

TIEFSEE

A deep-sea underwater scene. On the left, a vertical structure is covered in a dense, cascading mass of small, translucent, pinkish-white organisms, possibly amphipods or small crustaceans. In the center, a similar but smaller cluster of these organisms is visible. On the right, a large, dark, metallic robotic arm or manipulator is partially visible, extending into the frame. The background is a dark, deep blue, suggesting the vastness of the deep sea.

VIelfalt in der DUNKELHEIT

Thorolf Müller, Gerd Hoffmann-Wieck (Hrsg.)

PROJEKT
NEUES
MUSEUM

Senckenberg

SENCKENBERG

4 INHALT

	Grußworte	XX
1.	ERFORSCHUNG DER TIEFSEE	
	Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller	10
1.1	Geschichte der Meeres- und Tiefseeforschung in Westeuropa und USA	
	Gerd Hoffmann-Wieck	14
1.2	Tiefseeforschung bei Senckenberg	23
1.3	Warum Tiefseeforschung?	28
1.4	Meerestechnik für die Tiefseeforschung	31
2.	LEBENSRAUM TIEFSEE	
	Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller	40
2.1	Bedingungen in der Tiefsee	42
2.2	Geologie der Tiefsee	46
2.3	Hotspots des Lebens – die geologischen Voraussetzungen	51
2.4	Die Unabhängigen – Oasen des Lebens an Hydrothermalquellen	
	Terue Cristina Kihara, Gritta Veit-Köhler	56
2.5	Cold-Seep-Ökosysteme – Oasen oder Leben am Limit	62
2.6.	Manganknollenfauna	69
2.7.	Lebewelt der Tiefsee	74
2.7.1	Krebse der Tiefsee	78
2.7.2	Fische der Tiefsee	84
2.7.3	Meeresborstenwürmer der Tiefsee	91
2.7.4	Tintenfische der Tiefsee	94
2.7.5	Schwämme der Tiefsee	98
2.7.6	Riffe in der Tiefsee	103
2.7.7	Die (fast) Unsichtbaren – Kleinstlebewesen in der Tiefsee	
	Gritta Veit-Köhle, Terue Cristina Kihara	107
2.7.8	Haste Töne? – Kommunikation im Meer	112
2.7.9	Biolumineszenz – Licht im Dunkel der Tiefsee	117
2.7.10	Wale in der Tiefsee?! Torben Riehl	122

3.	KREISLÄUFE UND ZUSAMMENHÄNGE IN DER TIEFSEE	
	Torben Riehl	126
3.1.	Walfälle – Oasen der Tiefsee	136
	Torben Riehl	
4.	NUTZUNG, GEFÄHRDUNG UND SCHUTZ DER TIEFSEE	
	Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller	142
4.1	Mineralische Rohstoffe der Tiefsee	147
4.1.1	Manganknollen	150
4.1.2	Massivsulfide	153
4.1.3	Methanhydrate	156
4.2	Fischerei in der Tiefsee und ihre Folgen	159
4.3	Vom Telegraphenkabel zum Internet-Glasfaserkabel in der Tiefsee	
	Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller	165
4.4	Plastikabfälle in der Tiefsee	168
4.5	Das Ringen um den Schutz der Meere und der Tiefsee	174
4.6	Das internationale Seerecht	182
4.7	Die menschgemachte Klimaerwärmung und die Tiefsee	186
	PROJEKT NEUES MUSEUM SENCKENBERG	
	Katrin Böhning-Gaese, Martin Cepek, Sören Dürr	188
	Glossar	192
	Bildnachweis	194
	Autorenadressen	195
	Anhang	196
	Impressum	200



Prof. Dr. Peter Herzig
Direktor GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel

Liebe Leserinnen und Leser,
liebe Museumsbesucherinnen und Museumsbesucher,

nach wie vor ist die Tiefsee für uns Menschen die am wenigsten bekannte Region auf unserem Planeten. Doch so fremd und geheimnisvoll sie uns erscheint, so groß ist ihr Einfluss auf die gesamte Erde – auch auf das Leben an Land. Die Tiefsee beeinflusst das Klima, sie ist Ursprungs-ort von Naturgefahren wie Erdbeben, Tsunamis oder Vulkanismus und sie liefert Rohstoffe und Nahrung.

Es bedarf umfangreicher Forschungstätigkeit, um Licht in diese dunkle, kalte Welt zu bringen, die zudem unter extremem Druck steht. Dazu leistet das GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel mit seinen mehr als tausend Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern einen nicht unerheblichen Beitrag: Es hat seinen Schwerpunkt in der Tiefseeforschung und wird seine Aktivitäten in diesem Bereich in Zukunft noch weiter intensivieren.

Für uns Menschen ist die Tiefsee ein in der Regel unerreichbarer und lebensfeindlicher Raum, der es nur extrem angepassten Organismen ermöglicht, sich dort erfolgreich zu behaupten. Heute kennen wir ca. 250.000 Arten, die in der Tiefsee leben – Bakterien und Mikroorganismen nicht mitgerechnet. Wahrscheinlich machen diese bekannten Arten aber nur 20 % des Gesamtbestands aus.

Erst durch den Einsatz von komplexen und äußerst robusten Tiefseeforschungsgeräten (die technischen Geräten für die Erkundung des Weltalls in nichts nachstehen) ist es überhaupt möglich, diesen faszinierenden und größten Lebensraum der Erde zu erreichen und zu

untersuchen. Einige Forschungsgeräte, wie das unbemannte Tiefseefahrzeug ABYSS, ozeanografische Gleiter oder Multischließnetze ermöglichen es, den Tiefseeboden detailliert zu vermessen, zu beproben und die Meeresströmungen zu analysieren. In der Tiefsee-Ausstellung des Senckenberg-Museums kann man diese Geräte als Modelle erleben und so einen Eindruck von der Technologie erhalten, die nötig ist, um Wissen über den tiefen Ozean zu erlangen.

Ich freue mich, dass – in enger Kooperation zwischen dem Senckenberg-Museum und GEOMAR – jetzt auch in Frankfurt ein Fenster geöffnet wird, durch das Groß und Klein einen Blick in das „dunkle Universum“ werfen können. Damit gehört das Senckenberg-Museum zu den wenigen Orten in Deutschland und Europa, an denen man einen Einblick in dieses weitgehend unbekannte Ökosystem erhalten kann.

Ich wünsche den Lesern dieses Begleitbuches zur Ausstellung viele neue Erkenntnisse und den Besuchern der Dauerausstellung „Tiefsee“, einem echten Highlight der meereskundlichen Präsentationen des Senckenberg-Museums, eine spannende Zeit.

Ihr



Prof. Dr. Katrin Böhning-Gaese
Institutsleiterin und Direktorin bei der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung

Liebe Leserinnen und Leser,
liebe Museumsbesucherinnen und Museumsbesucher,

der Ausstellungsbereich „Tiefsee“ ist der erste neue Ausstellungsbereich des „Projekts Neues Museum“ im Senckenberg Naturmuseum Frankfurt. Umfangreiche Sanierungs-, Modernisierungs- und Umbaumaßnahmen und der Einsatz erheblicher Mittel waren und sind notwendig, um unserer Vision des „neuen Museums“ Schritt für Schritt näher zu kommen.

Der Ausstellungsbereich „Tiefsee“ bietet einen hervorragenden Einstieg in die Umsetzung dieser Vision. Am Beispiel Tiefsee können wir all das zeigen, was uns wichtig ist. Wir erlauben es den Besucherinnen und Besuchern, mit allen Sinnen in die faszinierende Welt der Tiefsee einzutauchen, die bizarren, seltsamen, unheimlichen Lebewesen zu sehen, die dort leben, fressen, Paarungspartner suchen und sterben. Wir lernen etwas über die Umweltbedingungen in dieser riesigen, für Menschen fast unzugänglichen Welt, über Dunkelheit, Kälte, Druck und Nahrungsmangel. Wir lernen, wie diese Ökosysteme entstanden sind und wie sie „funktionieren“. Gleichzeitig zeigen wir den Einfluss des Menschen, der selbst bis in diese entlegenen Lebensräume reicht – vom Abbau von Manganknollen und den damit verbundenen Schäden bis zum Verlegen von Tiefseekabeln, die vielen Organismen als sehr begehrter „Sitzplatz“ die Besiedlung mancher Bereiche der Tiefsee erst erlauben. Der Schutz der Tiefsee ist eine besondere Verantwortung der Menschheit, dem daher zu Recht ein besonderer Rechtsstatus zuerkannt wurde.

Gleichzeitig vermitteln wir, wie man in dieser menschenfeindlichen Welt Forschung betreibt, wie wir erfahren, was dort lebt, aber auch was wir über diese Welt (noch) nicht wissen und warum wir dort forschen. Weiter ist die neue Ausstellung ein ausgezeichnetes Beispiel dafür, wie Senckenberg mit nationalen und internationalen Partnern zusammenarbeitet. Dies spiegelt unsere Auffassung von Forschung wieder; denn auch Forschung wird heute nicht mehr alleine, sondern gemeinsam betrieben.

Nicht vergessen wollen wir, dass diese Ausstellung nur dank der Unterstützung vieler engagierter Bürgerinnen und Bürger sowie durch die Unterstützung von Stiftungen und Unternehmen verwirklicht werden konnte. Auch hier arbeitet Senckenberg zusammen, in diesem Fall mit Ihnen – und damit gehört diese Ausstellung nicht nur Senckenberg, sondern allen Bürgerinnen und Bürgern der Stadt, des Landes und der Welt.

Ich wünsche ihnen viel Spaß mit diesem Begleitbuch und beim Staunen über die Wunderwelt der Tiefsee und lade Sie ein, wiederzukommen, Kontakt mit uns aufzunehmen und zur Gestaltung unseres Museums beizutragen.

Ihre

Vakat?



Prof. Dr. Dr. h.c. Volker Mosbrugger

Generaldirektor der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung

Liebe Leserinnen und Leser,
liebe Museumsbesucherinnen und Museumsbesucher,

mit unserem neu konzipierten Ausstellungsbereich „Tiefsee“ und diesem Begleitbuch möchten wir Ihnen im wahrsten Sinne des Wortes tiefe Einblicke in das größte und zugleich noch so wenig bekannte Ökosystem auf unserer Erde eröffnen. Damit möchten wir auch an unsere Sonderausstellung „Tiefsee – Entdecken Erforschen Erleben“ anknüpfen, die wir 2008 sehr erfolgreich gezeigt haben.

Wie wichtig die Tiefsee für uns alle ist, bleibt uns meist verborgen. Tatsächlich nimmt die Tiefsee in 1.000 m Tiefe mehr als 60 % der Erdoberfläche ein; sie hat großen Einfluss auf die Meeresströmungen, auf das Klima, auf viele geochemische Stoffkreisläufe, sie beherbergt große Nahrungs- und Rohstoffressourcen und ist zugleich der am wenigsten erforschte Lebensraum unserer Erde, mit einer ungeheuren biologischen Vielfalt, die wir bisher erst zu wenigen Prozent kennen.

Nicht verwunderlich also, dass sich Forscherinnen und Forscher aus den verschiedensten naturwissenschaftlichen Bereichen mit unermüdlicher Neugier bemühen, unser Wissen um die Tiefsee zu erweitern. Das tun auch viele Senckenberger. Mitglieder der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung waren schon bei der ersten großen deutschen Tiefsee-Expedition „Valdivia“ (1898–1899) an Bord, und heute ist die Tiefseeforschung integraler Bestandteil der Senckenberg-Meeresforschung.

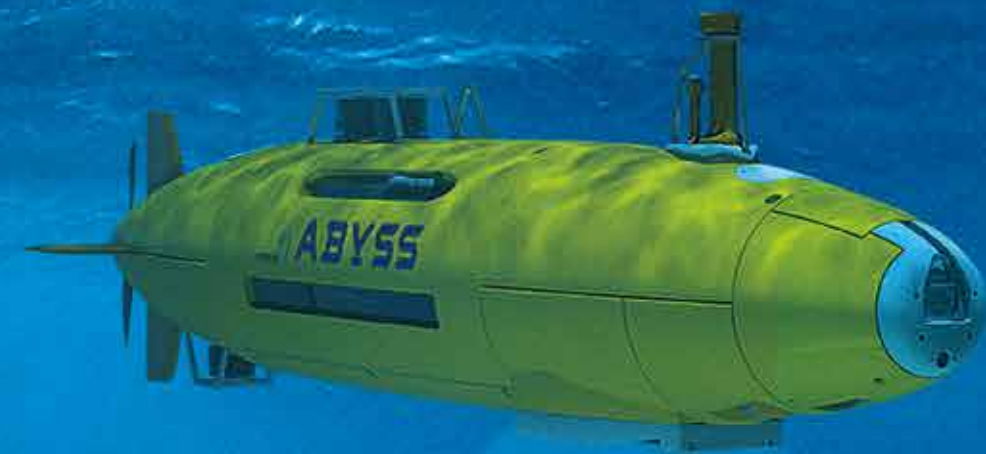
Für die Spezies Mensch bleibt die Tiefsee ein lebensfeindlicher Raum, nichtsdestoweniger dringt der Mensch mithilfe der Technik auch in diese Sphären vor. Spuren des Menschen und seiner Ressourcennutzung – sei es durch Müll, die Fischerei oder den beginnenden Tiefseebergbau – sind daher vermehrt auch in diesem Lebensraum zu finden. Wege für eine nachhaltige Nutzung der Tiefsee zu finden, ist daher auch eine zentrale Aufgabe der Senckenberg-Tiefseeforschung.

Lassen Sie sich nun entführen in die noch weitgehend unerschlossene Welt der Tiefsee. Wir hoffen, Ihnen mit diesem Begleitband zur Ausstellung viele neue Erkenntnisse und ein möglichst umfassendes Bild dieses so vielfältigen Lebensraumes zu eröffnen. Und Sie werden feststellen: Die Tiefsee, so dunkel und kalt sie sein mag, sie zieht uns mit ihrer Faszination in den Bann und lässt uns ein ums andere Mal staunen!

Viel Spaß beim Entdecken!

Ihr

KAPITTEL 1



Tiefsee-Forschung wird hauptsächlich mittels technischer Geräte möglich. Bemannte Tauchfahrten bergen zu viele Gefahren. Das Autonomous Underwater Vehicle (AUV) ABYSS operiert in Tiefen von 2.000 bis 6.000 m. Es ist ausgestattet mit Sonden für Temperatur, Druck und Leitfähigkeit sowie einem Partikelsensor und Kameras. Seitensicht- und Tiefensonare sowie ein hochauflösendes Fächerecholot dienen der exakten Kartierung des Meeresbodens. ABYSS kann bis zu 22 Stunden tauchen. Bildkomposition von Tom Kwasnitschka, GEOMAR.

1. ERFORSCHUNG DER TIEFSEE

Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller

Für uns Menschen ist die Tiefsee mit ihren extremen Bedingungen absolut lebensfeindlich. Zahlreiche Mythen rank(t)en sich um die Lebewesen, die tief unten in der ewigen Finsternis leben. Auch heute noch wissen wir über den größten Lebensraum unseres Planeten weniger als über die Rückseite des Mondes. Die Kontinente der Erde scheinen uns zwar riesig, bedecken aber gerade einmal knapp ein Drittel der Erdoberfläche. Über 60% der Erdoberfläche liegen mehr als 1.000 m tief unter dem Meeresspiegel, in 4.000 m Tiefe und darunter sind es noch immer 35%. Wenn wir den höchsten Berge der Erde, den Mt. Everest, im Marianengraben, der tiefsten Stelle des Ozeans, versenken würden, so befände sich zwischen dessen Gipfel und der Wasseroberfläche immer noch 2.000 m wassergefüllter Raum.

Die Erforschung der Tiefsee mit wissenschaftlichen Methoden nahm vor etwa 160 Jahren ihren Anfang. Vor dieser Zeit gab es die Hypothese, die Tiefen seien unbelebt („azoisch“), was 1860 eindrucksvoll widerlegt wurde. Ein im Mittelmeer liegendes, defektes Tiefseekabel sollte repariert werden. Als man das Kabel heraufgeholt hatte, stellten die Anwesenden verblüfft fest, dass sich etliche Organismen darauf angesiedelt hatten. Seitdem stieg das Interesse am „Leben in der Kelleretage“ stetig. Etliche Schiffs-Expeditionen wurden ausgerüstet und – mit spezifischen Forschungsfragen sowie großen Forscherteams ausgestattet – auf monate- und jahrelange Fahrten durch alle Weltmeere geschickt. Im Jahr 1898 stieg Deutschland mit der *Valdivia*-Expedition in die Tiefseeforschung ein (vgl. Kap. 1.1).

Nicht nur die Forschungsgeräte, auch die Methoden der Forschung haben sich seit dieser Zeit stark verändert. So lassen sich Organismen inzwischen relativ schnell und sicher molekularbiologisch bestimmen. Geologische sowie chemisch-physikalische Untersuchungen sind durch technisches Gerät einfacher geworden. Komplexe Computertechnik und zunehmende Digitalisierung sorgen dafür, dass immense Datenmengen über die Tiefsee vorliegen. Dazu gehören neben den physikalischen und chemischen Messwerten Fotografien und Filmaufnahmen. Die weltweite Vernetzung von Wissenschaftlern und zahlreiche Forschungsprogramme und -projekte mehrten das Wissen um die Tiefsee (vgl. Kap. 1.2).

Inzwischen verfügen Meeresforscher über einen ansehnlichen Fuhrpark technischer Gerätschaften, die die Erkundung, Beobachtung und Beprobung der Tiefsee von Forschungsschiffen aus ermöglichen. Wie aus einem Science-Fiction-Abenteuer muten Glider, Crawler, Floats, Multicorer, Lander und Roboter an. Tatsächlich sind die Anforderungen an Tiefseegerät genauso hoch wie an Geräte für die Weltraumforschung (vgl. Kap. 1.4).

Die Fragestellungen, die Tiefseeforscher mittels technischem Equipment und Methoden beantworten möchten, sind mannigfaltig. Es geht um die Grundlagen: Wie ist der Lebensraum Tiefsee geologisch beschaffen? Welche Organismen leben dort unten? Wie hält das Leben den extremen Bedingungen in der Tiefsee stand? Inzwischen stellen sich auch Fragen nach der Bedeutung der Tiefseeforschung: Welchen Wert, welche Bedeutung und welchen Einfluss hat die Tiefsee für das Leben auf unserem Planeten? Welche Rohstoffe birgt die Tiefsee, und können wir diese nachhaltig und gewinnbringend abbauen? Gibt es medizinische Wirkstoffe in der Tiefsee? Wie schützen wir die Tiefsee? Ein Hauptantrieb für die Beschäftigung mit der Tiefsee war und ist die Freude am Entdecken und die Neugier auf einen Lebensraum, der faszinierend und immer noch weitgehend unerforscht ist (vgl. Kap. 1.3).

Tiefseeforschung ist teuer und aufwendig. Es dauert viele Stunden, bis ein Bohrgerät oder Roboter in die Tiefsee hinabgelassen und wieder heraufgeholt wird. Die Anzahl geborgener Organismen ist teilweise überschaubar, die Probennahme punktuell begrenzt, und die Analyse des Materials braucht lange Zeit. Infolgedessen lassen sich nur mit Vorsicht Aussagen über die tatsächliche Beschaffenheit der Habitate und die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften treffen. Veränderungen sind nur erkennbar, wenn uns verlässliche Daten aus der Vergangenheit vorliegen oder derselbe Lebensraum über längere Zeiträume durch den langfristigen Einsatz von Tiefsee-Observatorien beobachtet wird.

Über 90% der Tiefsee sind unbekanntes Gebiet, und die Menschheit verändert den Planeten gegenwärtig schneller, als wir ihn erforschen können – das ist nicht nur in der Tiefsee ein Problem. Der Satz „Nur was man kennt und schätzt, kann man auch schützen“ stimmt zwar, für die Tiefsee jedoch ist zutreffender: „Obwohl wir diesen riesigen Lebensraum nur schlaglichtartig kennen, sollten wir ihn schützen.“ Denn wir können, auf der Basis unseres heutigen Wissens nicht beurteilen, welche planetaren Auswirkungen massive Veränderungen der Tiefsee hätten.

1.1 GESCHICHTE DER MEERES- UND TIEFSEE-FORSCHUNG IN WESTEUROPA UND USA

Gerd Hoffmann-Wieck

Lange galt das Meer als unendlicher Ressourcenraum, den wir Menschen nicht nachhaltig beeinflussen könnten. Heute wissen wir, dass auch das Meer endlich ist. Es wird diskutiert, ob der Mensch das gigantisch große „Ökosystem Meer“ kollabieren lassen könnte. Gleichzeitig wird die Bedeutung der Meere für das Leben auf der Erde nicht mehr bestritten und die Relevanz der Meeresforschung für nachhaltiges gesellschaftliches, politisches und wirtschaftliches Handeln deutlich.

Lange galt das Meer als unendlicher Ressourcenraum, den wir Menschen nicht nachhaltig beeinflussen könnten. Heute wissen wir, dass auch das Meer endlich ist. Es wird diskutiert, ob der Mensch das gigantisch große „Ökosystem Meer“ kollabieren lassen könnte. Gleichzeitig wird die Bedeutung der Meere für das Leben auf der Erde nicht mehr bestritten und die Relevanz der Meeresforschung für nachhaltiges gesellschaftliches, politisches und wirtschaftliches Handeln deutlich.

Die Generalversammlung der Vereinten Nationen hat den Schutz der Ozeane als eigenes Nachhaltigkeitsziel (Sustainable Development Goal; SDG 14; Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development) auf dem Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung 2015 verabschiedet. Auf der ersten Ozeankonferenz der Vereinten Nationen im Juni 2017 wurde vereinbart, den Meeresschutz in regionale, nationale und globale Strategien zu integrieren.

Ein umfassendes Wissen und Verständnis der marinen Prozesse und Organismen sowie ihrer Geschichte und ihres gegenwärtigen Zustands mit all ihren interdependenten Verknüpfungen sind von entscheidender Bedeutung für das Prozessverständnis der gesamten Lebewelt des Planeten und damit für die Prognose zukünftiger Entwicklungen.

Erst eine ganzheitliche meereswissenschaftliche Forschung von Natur- und Wirtschaftswissenschaftlern, Mediziner*innen, Soziologen, Historikern, Juristen u. a. wird ein globales und nachhaltiges Management der Ozeane ermöglichen. Die Exzellenzcluster in Kiel und Hamburg („Ozean der Zukunft“ und „Climate, Climatic Change, and Society“ (CLICCS) sind gute Beispiele für einen solchen Denk- und Forschungsansatz.

EXPEDITIONEN IN DIE TIEFSEE

Die Ursprünge der wissenschaftlichen Ozeanografie liegen in der britischen und amerikanischen Erkundung der Tiefsee seit Mitte des 19. Jahrhunderts. Galt das Meer zuvor als feindlicher, gefährlicher Lebensraum, so entwickelte sich nun ein nationaler Entdeckergeist für die Tiefsee. Die Erkundung der Tiefsee war in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ein sehr präsent Thema in der Gesellschaft. Expeditionen wurden mit großem Interesse verfolgt, Veröffentlichungen und Ausstellungen wurden enthusiastisch aufgenommen. Erste Aquarien eroberten die privaten Haushalte, das Sammeln und Studieren von Meerestieren galt in den gebildeten Kreisen als angemessene Form der Unterhaltung. Aquarien wurden erstmals auf der Londo-

ner Weltausstellung 1851 ausgestellt. Interesse weckten auch Jules Vernes (1828–1905) Roman „Zwanzigtausend Meilen unter dem Meer“ (1870) und die Präsentationen von Meeresorganismen, z. B. im Pariser Naturkundemuseum 1884. Dort wurden die Ergebnisse der französischen Tiefsee-Expeditionen der *Travailleur* und der *Talisman* ausgestellt. In Deutschland veröffentlichte Carl Chun die Ergebnisse der Deutschen Tiefsee-Expedition (1898/99) in einem populärwissenschaftlichen Band, und Ernst Haeckels (1834–1919) Bildband „Kunstformen der Natur“ (1889) trug zur Verbreitung des Darwinismus und zugleich zur Begeisterung für die Meeresorganismen bei, ebenso die Bände von „Brehms Tierleben“ von Alfred Edmund Brehm (1829–1884), die 1863 bis 1869 veröffentlicht wurden.

1854 veröffentlichte der US-amerikanische Hydrograf M. F. Maury (1806–1873), mit der bathymetrischen Karte des Nordatlantiks die erste Tiefenkarte eines großen Ozeanbereichs. Grundlage waren mit der Lotmaschine ermittelte Tiefen. Diese Karte war Grundlage der Trasse des ersten interkontinentalen Telegrafenkabels zwischen Neufundland und Irland. Im Jahr 1860 entdeckte man an defekten Telegrafenkabeln, die aus über 2.000 m Tiefe vor Sardinien heraufgeholt worden waren, fest angeheftete, inkrustierende Organismen. Man konnte also sicher sein, dass sie nicht aus höher gelegenen Meeresbereichen stammten. Damit war die „azoische Theorie“ des Briten Edwards Forbes aus dem Jahre 1843 endgültig widerlegt.

1859 veröffentlichte Charles Darwin (1809–1882) sein Hauptwerk „On the Origin of Species by Means of Natural Selection“. Nach Darwin sollten sich die Organismen in der Tiefsee viel langsamer entwickelt haben als die Bewohner des festen Landes. Daher müssten sich in der Tiefsee Organismen finden lassen, die als „missing links“ der „unendlich zahlreichen Verbindungsglieder“ seine Theorie stützen würden. Eine Sammlung dieser „alten Gattungstypen“ trug der norwegische Meeresbiologe Michael Sars (1805–1869) zusammen.

Zur Klärung weiterer Fragen über die Tiefsee führte der Professor für Naturgeschichte an der Universität

Belfast Charles Wyville Thomson (1830–1882) 1868–1871 Tiefsee-Expeditionen zur Vorbereitung der *Challenger*-Expedition mit den Vermessungsschiffen *Lightning* und *Porcupine* durch, die tierisches Leben bis in 4.454 m Tiefe nachweisen konnten. Die Ergebnisse publizierte Thomson 1873 in seinem Buch „The Depths of the Sea“. Auch der amerikanische Coast Survey entsandte 1867–1871 auf Anraten von Louis Agassiz (1807–1873) Expeditionen an die Küste von Florida und nach Südamerika, die ebenfalls Nachweise von Organismen bis in 1.500 m Tiefe erbrachten. Die amerikanischen Expeditionen setzten die Royal Society in Großbritannien unter Druck. Kurze Zeit später wurden die Pläne für die Challenger-Expedition positiv beschieden, sowohl von der Royal Society als auch von der British Association for the Advancement of Science.

DIE CHALLENGER-EXPEDITION (1872–1876) – DER BEGINN MODERNER MEERESFORSCHUNG

Mit der Forschungsfahrt der *HMS Challenger* 1872–1876 wird heute oft der Beginn der modernen Meeresforschung definiert. Auf dieser Expedition, wie auch auf allen folgenden bis zur Deutschen Atlantischen Expedition 1925–1927, gab es nur wenig Zusammenarbeit zwischen den Forschern an Bord. Jeder betrieb separat seine eigenen Untersuchungen – je nach Fachgebiet. Die Expedition führte auf ihrer 69.000 sm (Seemeilen) langen Forschungsreise durch alle Ozeane insgesamt 363 Stationsmessungen durch: Tiefenlotungen, Temperaturmessungen in verschiedenen Tiefen, Schleppnetzfänge, Dredgenzüge zur Gewinnung von Bodenproben und Tiefseeorganismen wurden erfolgreich durchgeführt. Es war die erste große Forschungsreise mit meteorologischen, hydrografischen, geologischen und biologischen Aufgaben. Charles Wyville Thomson (s. o.) und William Benjamin Carpenter (Universität London, 1813–1885) planten die Reise. Bis zu dieser Expedition waren mit Ausnahme des Nordatlantiks nur vereinzelte Ozeantiefen bekannt. Die *Challenger*-Expedition erbrachte die ersten Tiefenkarten der großen Ozeane mit der damals tiefsten Lotung auf 8.184 m. Die Bearbeitung

KARTE HISTORISCH BEDEUTENDER SCHIFFSEXPEDITIONEN.

GALATHEA



Weltumseglung 1845-47 mit der dänischen Korvette GALATHEA unter der Führung von Kapitän Steen Andersen Bille.

VALDIVIA



Tiefsee-Expedition 1898-99 mit dem Charter-Dampfer VALDIVIA unter Leitung des Zoologen Carl Chun.

GAZELLE



Weltumseglung 1874-76 mit der Dampfkorvette SMS GAZELLE unter dem Kommando von Georg Freiherr von Schleinitz.

GAUSS



Antarktis-Expedition 1901-03 mit dem Forschungsschiff GAUSS unter Leitung des Polarforschers Erich von Drygalski.

NATIONAL

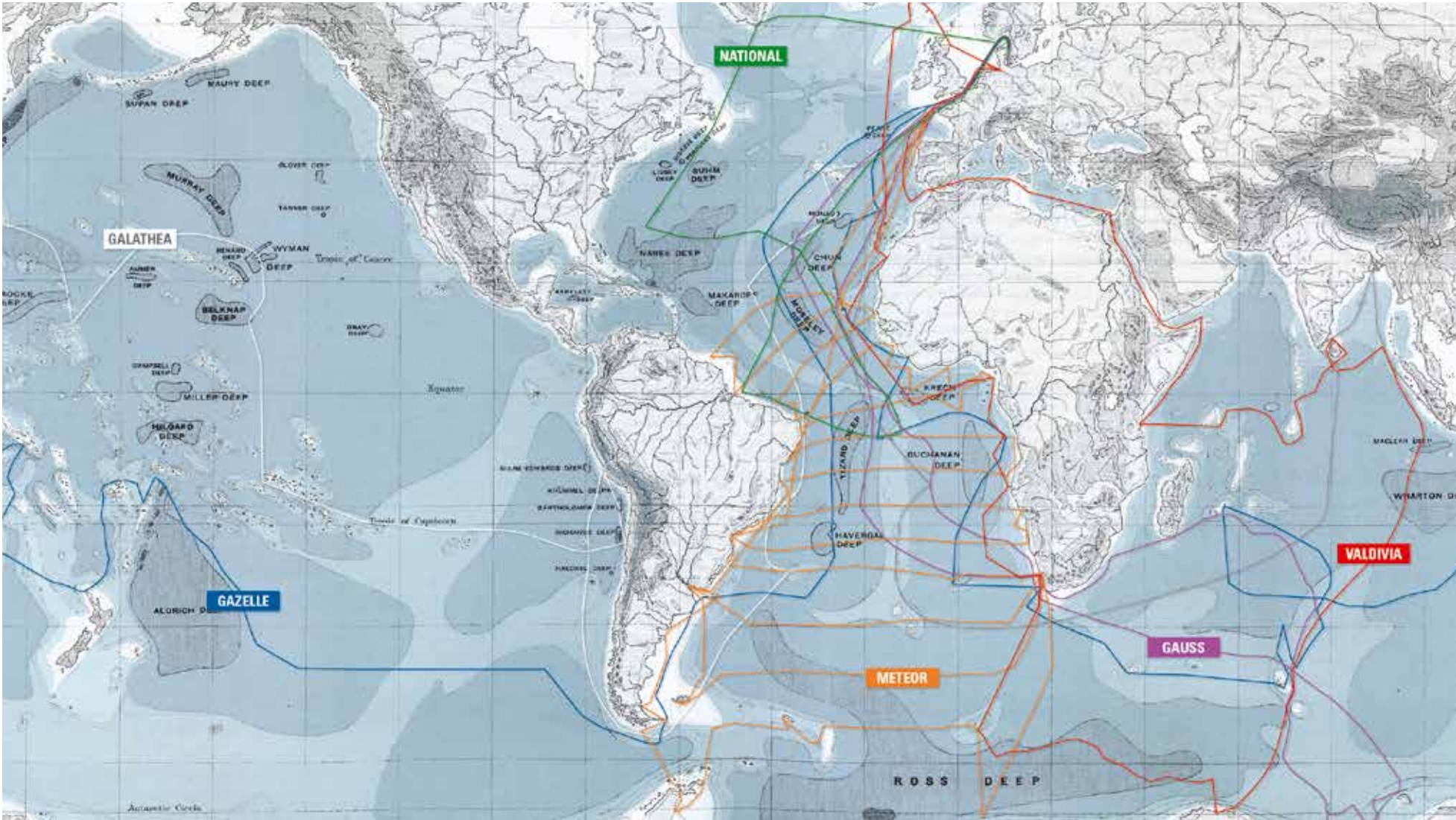


Plankton-Expedition 1889 mit dem Charter-Dampfer NATIONAL unter Leitung des Kieler Meeresbiologen Victor Hensen.

METEOR



Deutsche Atlantische Expedition 1925-27 mit dem Vermessungsschiff METEOR unter Leitung des Meereskundlers Alfred Merz.



Bildunterschrift Karte einfügen (Detail!)

und Auswertung der Proben erfolgte an Instituten vieler Länder. Publiziert wurden die Ergebnisse in fünfzig großformatigen Bänden in einer Auflage von 750 Exemplaren, die zwischen 1880 und 1895 erschienen sind. Diese wurden weltweit kostenfrei an die bedeutenden ozeanografischen Institute und Museen geschickt.

DIE DEUTSCHE EXPEDITION MIT SMS „GAZELLE“ (1872–1874)

Durch diese Expedition erfuhr auch die deutsche Meeresforschung einen Aufschwung. Das Deutsche Kaiserreich wollte ebenfalls „Flagge zeigen“ und startete 1874 von Kiel aus die von Georg von Neumayer (1826–1909) organisierte Expedition der Dampfkorvette *Gazelle* in den Indischen Ozean, die in ihrer Bedeutung aber weit hinter der *Challenger*-Expedition zurückblieb. Neben Wetterbeobachtungen untersuchten die Wissenschaftler Meeresströmungen, loteten Wassertiefen und sammelten biologische Proben. *Challenger* und *Gazelle* trafen sich 1876 im Hafen von Montevideo in Uruguay und sprachen die Kurse ihrer Routen zurück nach Europa ab, um nicht dieselben Seegebiete zu erforschen.



Das Dampfschiff „Valdivia“ wurde für die Deutsche Tiefsee-Expedition (1898/99) zum Forschungsschiff umgebaut.

DEUTSCHE TIEFSEE-EXPEDITION 1898/99

Den ersten bedeutenden deutschen Beitrag zur Tiefseeforschung lieferte der Biologe Carl Chun (1854–1912) von der Universität Leipzig ab 1876 auf seinen Expeditionen im Mittelmeer und im Atlantik (Kanarische Inseln). Diese Untersuchungen waren Grundlage der von ihm geleiteten Deutschen Tiefsee-Expedition 1898/99 mit dem Dampfer *Valdivia* (Abb. 2). Neben zahlreichen Tiefenlotungen wurde eine große Zahl bis dahin unbekannter Tiefseeorganismen entdeckt. Die wissenschaftlichen Berichte in 24 Bänden wurden 1940 abgeschlossen. Auch diese Expedition in den Atlantischen und den Indischen Ozean sowie in antarktische Gewässer wurde vom Kaiser finanziert. Deutschland sollte einen bedeutenden Beitrag zur internationalen Tiefseeforschung leisten.

Nach dem Ersten Weltkrieg wurden die Kontakte zur gesamten deutschen Wissenschaft von internationaler Seite abgebrochen. Hintergrund war u. a. die kritiklose öffentliche Unterstützung der deutschen Giftgas-Kriegsführung durch namhafte deutsche Wissenschaftler. Neben den wissenschaftlichen Aufgaben der Deutschen Atlantischen Expedition wollte man durch diese Expedition die internationalen Wissenschaftskontakte wieder aufnehmen, was auch gelang.



Meteor I nach dem Umbau für die Deutsche Atlantische Expedition (1925–27).

DIE DEUTSCHE ATLANTISCHE EXPEDITION (1925–1927)

Die Deutsche Atlantische Expedition mit der *Meteor I* (1925–1927; Abb. 3) leitete eine neue Epoche in der internationalen Meeresforschung ein. Sie stand unter der Leitung von Alfred Merz (1880–1925), Direktor des Berliner Instituts für Meereskunde. Nach Merz' Tod in Buenos Aires wurde dem Kommandanten, Kapitän zur See Fritz Spieß, auch die wissenschaftliche Leitung der Expedition übertragen. Erstmals wurde mit dem mittleren und südlichen Atlantik ein großer Ozeanraum systematisch und interdisziplinär entlang von dreizehn Traversen untersucht, sowohl in der Wassersäule als auch in der Atmosphäre. In bathymetrischer, ozeanografischer, meteorologischer, biologischer und chemischer Hinsicht erfolgte eine erste systematische und interdisziplinäre Aufnahme eines großen Ozeanraums. Merz setzte erstmals diese interdisziplinäre Forschung durch. So hatten die Biologie und die Chemie ihren Beitrag zu den physikalischen Fragestellungen zu Strömungen und Wasserkörper und zum Aufbau der Wassermassen im Südatlantik an Merz zu liefern (Abb. 4). Erstmals wurden auch Echolote (Behm Kiel, ELAC Kiel, Krupp Atlas Bremen) eingesetzt, deren Messergebnisse punktuell durch Messungen mit der herkömmlichen Drahtlotung (Abb. 5), unterstützt durch eine Lotmaschine, kontrolliert und bestätigt wurden. 67.000 Echolotungen führten zu einer ersten detaillierten Darstellung der „Landschaft“ am Meeresboden des zentralen und südlichen Atlantiks; erstmals wurde der Mittelozeanische Rücken als geschlossener Gebirgszug sichtbar. Die These, nach der Strömungen in der Wassersäule auch durch Dichteunterschiede in Abhängigkeit von Salzgehalt und Temperatur bestimmt seien, wurde bestätigt.

BEDEUTENDE SCHIFFSEXPEDITIONEN SOWIE MARINE INSTITUTS- UND ORGANISATIONSGRÜNDUNGEN IM ZEITABSCHNITT 1874 BIS 1949:

— Norwegische Tiefsee-Expeditionen im Nordatlantik fanden zwischen 1872 und 1876 unter der Leitung des

Biologen Michael Sars und des Ozeanografen Henrik Mohn (1835–1916) von der Universität Oslo mit der *Vörlinger* statt.

— Zwischen 1880 und 1883 wurden von französischer Seite mehrere Tiefsee-Expeditionen in der Biscaya, im Mittelmeer, bei den Kap Verden und den Kanaren mit den Forschungsschiffen *Travailleur* und *Talisman* durchgeführt, die Organismen aus Tiefen zwischen 1.000 m und 5.000 m an die Oberfläche brachten. Alfonse Milne-Edwards (1835–1900) vom 1793 gegründeten Musée National d'Histoire Naturelle (Paris) begleitete einige der Expeditionen.

— 1890–1898 erkundeten mehrere österreichisch-ungarische Tiefsee-Expeditionen das Mittelmeer, das Rote Meer und das Marmarameer mit den Forschungsschiffen *Pola* und *Taurus*. Schwerpunkt waren meteorologische, physikalische, geologische, chemische und biologische Untersuchungen. Auf einer der Reisen wurde der erste Tiefseefisch in der Adria gefangen.

— Auf der schwedischen Weltumsegelung mit dem Segelschiff *Albatross* 1947–1948 wurden 20 m lange Kerne mit dem von Björle Kullenberg (Universität Göteborg) entwickelten Piston Sampler (Gerät zur Entnahme langer Sedimentkerne) aus dem Sediment ausgestanzt. Das waren die bis dahin weltweit längsten Sedimentkerne, anhand derer die Geschichte eines Ozeanbereiches rekonstruiert werden kann. Zudem wurden erste seismische Untersuchungen mit Reflexionsseismik zur Dokumentierung der Sedimentschichten am Meeresboden eingesetzt. Die Erkenntnis, dass die Dicke der Sedimente vom Mittelatlantischen Rücken zu den Kontinenten hin abnimmt, war ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung der Theorie der Plattentektonik.

— Die zweite dänische Tiefsee-Expedition mit der *Galathea* wiederholte 1950–1952 die Expedition der ersten Galathea-Expedition von 1845–1847. Über 100 bisher unbekannte Tiefseeorganismen wurden entdeckt.

— 1949 wurde in England das National Institute of Oceanography in Wormley, Surrey, gegründet, aus dem sich das heute sehr renommierte National Oceanographic

Centre in Southampton entwickelt hat, das 1994 errichtet wurde.

DIE ENTWICKLUNG DER MEERES- UND TIEFSEEFORSCHUNG NACH 1945

Forschungsschiffe, Tauchboote und Methoden der Meeresbodenkartierung sowie Methoden zur Bergung von Organismen sind entscheidende Instrumente bei der Erforschung der Ozeane und der Tiefsee. Nach 1945 entwickelte sich insbesondere die Meerestechnik rasant und durch sie auch die Geschwindigkeit und Menge der Erkenntnisse, die Wissenschaftler bis heute sammeln und weiterhin sammeln werden.

TAUCHBOOTE

Der Einsatz von Tauchbooten und unbemannten Tauchrobotern ermöglicht detaillierte Untersuchungen in der Wassersäule bis zum Meeresboden der Ozeane. Alle Disziplinen der Meeresforschung profitieren erheblich von den Tauchrobotern wie auch vom Einsatz weiterer Forschungsgeräte, die als „verlängerte Arme der Meeresforscher“ fungieren (vgl. Kap. 1.4).

Bereits das im Jahr 1934 erfolgreiche Abtauchen mit der an einem Stahlseil hängenden Tauchkugel Bathysphere bis auf 923 m Tiefe des amerikanischen Naturforschers William Beebe (1877–1962) und seinem Techniker Otis Barton (1899–1992) brachte erste visuelle Eindrücke aus der Tiefsee. Diesen Tiefenrekord überbot Barton 1948 mit einer neuen Tauchkugel, der Benthoscope, bis auf 1.370 m. Barton berichtete von Tiefseeorganismen, die bis dahin vollkommen unbekannt waren. Auch das aktive Leuchten (Biolumineszenz) zahlreicher Tiefseeorganismen beobachtete er als erster.

1960 folgte die spektakuläre Tauchfahrt von Jaques Picard (1922–2008) und Don Walsh (1931–) mit einem Spezialtauchboot, dem Bathyscaphe Trieste. Als erste Menschen erreichten sie die tiefste Stelle der Ozeane, das Challengerertief im Marianengraben. Ihr Tauchrekord



Blick ins Labor der Meteor I.

von 10.916 m war eine technische Meisterleistung, die erst im April 2019 durch das Tauchboot The limiting factor der amerikanischen Five-Deeps-Mission mit 10.928 m Tiefe um 12 Meter übertroffen wurde.

Picards Erfolg regte den amerikanischen Meeresgeologen Al Vine zum Bau des drei Personen fassenden Tauchbootes Alvin an, das erste Tauchboot, welches in der Tiefe navigieren konnte und daher einen Piloten erforderte. Ab 1964 begannen seine Tauchfahrten bis auf 4.000 m, ab 2011 bis 6.500 m Tiefe. Bekannt wurde Alvin durch den Tauchgang zur Titanic 1986.

1969 folgte das französische Tauchboot Cyana, das auf Betreiben von Jacques-Ives Cousteau für das Vorgänger-Institut des heutigen Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) gebaut wurde. Es erreichte eine maximale Tiefe von 3.000 m.

Im französisch-amerikanischen Forschungsprojekt „Mid Ocean Undersea Study“ wurde erstmals mit Alvin und Cyana der mittelozeanische Rücken im Atlantik detailliert untersucht. Mitte der 1970 Jahre verlagerten sie ihre Forschung auf den Pazifik und entdeckten 1978 die schwarzen Raucher in der Nähe der Galapagos-Inseln.

1987 bauten die Russen die beiden MIR-Tauchboote mit 6.000 m Tauchtiefe, Frankreich 1984 die Nautilie (6.000 m), Japan die Shinkai 1987 (6.527 m) und China die Jiaolong 2012 (7.062 m).

2012 erreichte James Cameron mit seinem Tauchboot Deepsea Challenger als Dritter eine Tiefe von 10.898 m im Marianengraben. Die letzte bemannte Tauchfahrt in die tiefsten Tiefen unternahm der Amerikaner Victor Vescovo, der mit The limiting factor einen neuen Tiefenrekord aufstellte (s. o.).

TIEFENMESSUNG UND TIEFENKARTEN DER OZEANE

Auf die erste Tiefenkarte eines großen Ozeanbereiches mit der Lotmaschine durch M. F. Maury (1854) folgte 1899 die Initiative von Prinz Albert I von Monaco weltweit abgesicherte Tiefenmessungen aus dem Weltozean zu sammeln um Tiefenkarten aller Ozeane zu erstellen, heute bekannt unter dem Kürzel GEBCO (General Charts of the Oceans). Eine Revolution der Tiefenmessung löste Alexander Behm (1899–1952) 1912/1913 mit der Erfindung des Echolots aus. Während die Challenger-Expedition 1872 bis 1876 ca. 400 Tiefenmessungen mit der Lotmaschine erbrachte, ergaben die hydroakustischen Messungen während der deutschen Atlantischen Expedition 1925–1927 67.000 Tiefenmessungen mit den drei an Bord eingesetzten Echoloten. Eine neue Epoche der Tiefenmessung läutete die Entwicklung des Fächerlotes „Sea Beam“



Zur Kontrolle der Echolotmessungen wurden immer wieder Drahtlotungen durchgeführt, letztlich mit dem Ergebnis, dass die Echolot-Technik absolut verlässlich ist.

durch die US-amerikanischen Physiker Harold Farr und Paul Froehlich ein, das erstmals 1981 auf einem amerikanischen Forschungsschiff eingesetzt wurde. Dieses Echolot sendet einen Schwarm von Schallstrahlen zum Meeresboden, so dass erstmals keine schmalen Profile sondern Flächen am Meeresboden vermessen werden können. Bei einer Wassertiefe von 5.000 m beträgt die Breite der Vermessung ca. 30 km quer zur Fahrtrichtung des Schiffes. Heute sind ca. 10 % der Meeresböden mit Echoloten vermessen.

VON DER KONTINENTALVERSCHIEBUNG ZUR PLATTENTEKTONIK

In den Jahren 1912 und 1915 veröffentlichte der Meteorologe Alfred Wegener (1880–1930) seine Theorie der Kontinentalverschiebung, die in der Fachwelt lange Zeit keine Akzeptanz fand. Erst Ende der 1960er Jahre setzte sich durch die Forschung des US-amerikanischen Meeresgeologen Bruce Heezen (1924–1977), seiner Kollegin Marie Tharp (1920–2006) und des Geophysiker Harry Hess (1906–1969) Wegeners Modell der Plattentektonik durch. Grundlage dieser Entwicklung waren in mühsamster Kleinarbeit entstandene Tiefenkarten der Ozeane, die Heezen und Tharp 1977 in National Geographic veröffentlichten. Die Karte zeigt unzweifelhaft die Spuren der Kontinentaldrift anhand der Lage, der Form und des Verlaufs des Mittelozeanischen Rückens und der Sedimentbecken. Um Wegeners Theorie zu überprüfen wurde 1968 (bis 1983) das US-amerikanische Bohrschiff Glomar Challenger bereitgestellt, um Bohrungen in den Meeresboden der Tiefsee bis 6.000 m Tiefe durchzuführen. Durch ein Bohrprofil im südlichen Atlantik und durch zahlreiche weitere Bohrungen bzw. der Datierung der gezogenen Bohrkerne aus allen Ozeanen wurde das Modell der Plattentektonik bestätigt. Die ermittelten Zeitdaten zeigen, dass sich die jüngsten Sedimentablagerungen in der Mitte des Atlantiks beiderseits des Mittelozeanischen Rückens befinden, die in Richtung zu den Kontinenten kontinuierlich älter werden. Die Datierungen der Sedimente ermöglichen es uns die

zeitliche Dimension der Plattenbewegung zu rekonstruieren. Die ältesten Ablagerungen des Atlantiks finden wir vor den Kontinentalabhängen.

1985 wurde die Glomar Challenger durch die Joides Resolution mit einem fast 62 m hohen Bohrturm ersetzt. 2005 wurde das japanische Bohrschiff Chikyu mit einem 130 m hohen Bohrturm ebenfalls zu Forschungszwecken in Dienst gestellt. Es kann bis 7.000 m tiefe Bohrungen in bis in 2.500 m Wassertiefe durchführen.

FORSCHUNGSSCHIFFE

Heute gibt es weltweit ca. 100 Forschungs- und Vermessungsschiffe, die alle mit Fächerloten ausgestattet sind. Deutschland unterhält neben den Schiffen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie und den Schiffen des Thünen-Instituts für Fischereiökologie die vier großen Forschungsschiffe: Meteor III, Sybilla S. Merian, Sonne II und den Forschungseisbrecher Polarstern sowie die drei mittelgroßen Forschungsschiffe Poseidon, Alkor, Heincke, Elisabeth Mann Borgese und fünf kleine Forschungsschiffe. In Europa engagieren sich neben Deutschland vor allem Frankreich und Großbritannien für die Meeresforschung.

DIE BEDEUTUNG DER MEERES- UND TIEFSEEFORSCHUNG IM HISTORISCHEN UND IM AKTUELLEN VERHÄLTNIS EUROPAS ZUM MEER

Während das Meer vor der Aufklärung eher mit großen Ängsten vor Naturgefahren und Meeresungeheuern verbunden war, setzte danach – mit Humboldt, Cook, Forster, Chamisso u. a. – eine rationale Betrachtung und der Wunsch nach einem umfassenden Verständnis der Vorgänge in der Natur ein.

Ein großer Teil der Forschung fand lange Zeit im Elfenbeinturm der Wissenschaft statt. Die deutsche Meeresforschung war allerdings schon früh darauf bedacht, ihre Erkenntnisse verständlich in die Öffentlichkeit zu tragen.

Heute hat sich die Rolle der Wissenschaft, insbesondere der Naturwissenschaft, in der deutschen Gesellschaft komplett gewandelt. Die Ende der 1980er Jahre beginnende Diskussion um die Nachhaltigkeit, die Berichte des Club of Rome („Die Grenzen des Wachstums“, 1972), das von Paul Crutzen (2000) bekannt gemachte Schlagwort vom Anthropozän, der Stern-Report (2006) und die IPCC-Reports der Vereinten Nationen (ab 2007) sowie der im Mai 2019 erschienene IP-BES-Report zum katastrophalen Schwund von Pflanzen- und Tierarten bringen Klima- und Artenwandel in die Wahrnehmung der Menschen.

Weitere marine Themen wie die anhaltende Überfischung der Meere, der Müll im Meer, die Ozeanversauerung, die Ausbeutung mineralischer und energetischer Tiefseeressourcen sowie die Überfischung bis in die Tiefsee hinein, sind aktuelle Forschungsthemen, die in den Medien vermehrt diskutiert werden.

Allerdings ist das Bewusstsein für den unmittelbar mit dem Klimawandel verknüpften „Ozeanwandel“ – die Erwärmung der Ozeane, der Meeresspiegelanstieg und die Ozeanversauerung – bis heute in weiten Teilen der deutschen Gesellschaft nicht angekommen. Eine Steigerung der gesellschaftlichen Wahrnehmung gestaltet sich besonders schwierig, weil sich der Ozeanwandel zwar der Wissenschaft zeigt, diese Veränderungen in den Weltmeeren jedoch für die Gesellschaft in der Regel nicht sichtbar sind. Die medial gepushte Verschmutzung der Meere durch Plastikmüll oder einzelne Öltankerhavarien sind nur die Spitze des Eisbergs. Hier sind Meereswissenschaft und Politik in der Pflicht, Öffentlichkeitsarbeit zu betreiben und die begonnene Sensibilisierung fortzuführen. Der in unzähligen Untersuchungen an Land und im Meer unzweifelhaft nachgewiesene anthropogene Klima- und Ozeanwandel sollte schnellstens nachhaltiges politisches und wirtschaftliches Handeln nach sich ziehen.

(Weitere Informationen befinden sich im Anhang 2 über die Highlights der Meeresforschung.)

1.2 TIEFSEEFORSCHUNG BEI SENCKENBERG

Angelika Brandt, André Freiwald

Dreh- und Angelpunkte für die Erforschung der Ozeane insbesondere auch der Tiefsee bei Senckenberg sind die Abteilung für „Marine Zoologie“ mit sechs Sektionen in Frankfurt, sowie das „Deutsche Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung“ und die „Abteilung Meeresforschung“ mit vier Sektionen bei „Senckenberg am Meer“ in Wilhelmshaven und Hamburg.

Anders als viele andere Lebensräume unseres Planeten wurde die Tiefsee erst Ende des 19. Jahrhunderts als interessant und untersuchenswert wahrgenommen. Die erste Expedition zur systematischen Erforschung der Tiefsee erfolgte 1872–1876 mit der Korvette HMS Challenger unter Leitung des Meeresbiologen Charles Wyville Thomson. Wenige Jahre später (1898–1899) wurde die deutsche Valdivia-Expedition unter Leitung des Zoologen Carl Chun durchgeführt (vgl. Kap. 1.1). Sie lieferte reichhaltiges Tiermaterial aus Tiefen von mehr als 4.000 m vor der Küste der Antarktis. Den nächsten großen (Fort-) Schritt in die Tiefe ermöglichten Geräte und Fahrzeuge, mit denen Menschen sich weit unterhalb der Wasseroberfläche aufhalten, Beobachtungen machen und Proben nehmen konnten (vgl. Kap. 1.4).

Die moderne Tiefseebiologie begann in den frühen 1960er Jahren, als Howard Sanders und Kollegen auf der Grundlage erster feinmaschiger Schleppnetzfänge feststellten, dass der Artenreichtum (Artenzahlen) mit der Tiefe zunimmt, die Dichte (Individuenzahl) und die Biomasse (Bestandsgewicht) der Organismen jedoch abnimmt. Dadurch wurden die Muster der Verteilung der Tiefseeorganismen zu Hauptzielen der biologischen Tiefseeforschung.

„VOLKSZÄHLUNG“ IM MEER

Von 2000–2010 beschäftigte sich ein internationales Forschungsprogramm mit einer „Volkszählung der Meeresorganismen“ (engl. Census of the Marine Life, CoML), bei dem Verteilungsmuster und Artenvielfalt im Mittelpunkt



Abb. 1: Schwimmende Seegurke (*Enypniastes eximia*) im Nordwestpazifik in 4.847 m Tiefe. Foto: Nils Brenke.



Abb. 2: Tiefseegarnelen im Nordwestpazifik in 5.378 m Tiefe. Foto: Nils Brenke.

des Interesses standen. In verschiedensten Feldprojekten, die sich von den Polen zu den Tropen und dem Flachwasser bis in die Tiefsee erstreckten und sowohl im freien Wasser als auch am Meeresboden operierten, wurde gezählt, gesammelt, bestimmt und klassifiziert. Den Wissenschaftler des CoML-Projekts ging es auch um die scheinbar einfachen Fragen: „Was wissen wir, was wissen wir nicht und was werden wir niemals wissen?“

Angesichts der Größe des Ökosystems liegt es nahe, dass wir nicht wissen, wie viele Arten die Tiefsee besiedeln, wo und wie sie verbreitet sind, und diese Informationen werden auch niemals sicher zu erheben sein. Dennoch haben wir – trotz unseres beschränkten Beprobungsstandes – bereits einiges über die Besiedlung der Tiefsee durch Meeresorganismen gelernt, etwa im Rahmen des CeDAMar Projektes (Census of the Diversity of Abyssal Marine Life). Während der Feldprojektphase von ca. fünf Jahren wurden ca. 500 neue Arten neu für die Wissenschaft entdeckt, die meisten davon waren Krebstiere. Aber bisher ist erst ungefähr 1 % der gesamten Tiefsee erforscht und ca. 10.000 Arten sind beschrieben. Es werden aber bis zu 10 Mio. Arten in der Tiefsee vermutet. Generell können wir sagen: Je kleiner die Organismen sind, desto weniger wissen wir über sie. Zu den häufigsten Bewohnern des Meeresbodens (Benthos) der großen Tiefen gehören Faden- und Igelwürmer, Meeresborstenwürmer, Krebstiere, Weichtiere und Stachelhäuter.



Abb. 3: Gestielte Seefeder in der Vema Fracture Zone des tropischen Nordatlantiks in 5.178 m Tiefe. Foto: Nils Brenke.

Ein anderes Feldprojekt von CeDAMar war ANDEEP (Antarctic Benthic Deep-Sea Biodiversity Project), welches im Atlantischen Sektor des Südpolarmeereres durchgeführt worden ist. Diese Tiefseeregion gehörte zu den bisher am wenigsten erschlossenen, und so konnte eine Brücke zum atlantischen Projekt DIVA geschlagen werden, welches die Diversität verschiedenster Tiefseebecken im Atlantik untersuchte. ANDEEP nahm Tiefseeproben in der größten Nähe zum Südpol und gleichzeitig der weitesten Entfernung zum Äquator; die Auswertung ergab eine Zunahme der Artenzahlen vom Äquator zu den Polen, was die Theorie der Artenabnahme von den Tropen zu den Polen in Frage gestellt hat.

Mit weiteren Projekten im Nordwestpazifik, wie z. B. KuramBio (Kuril-Kamtschatka Biodiversity Studies; Abb. 1, 2), oder im Nordatlantik in der Vema Fracture Zone (Abb. 3, 4) wurden zahlreiche Felder der Tiefseeforschung bearbeitet und Biodiversitätsmuster sowie ihre steuernden Prozesse – von geologischen Hintergründen bis hin zu biologischen Prozessen – analysiert. Die aktuellen Bedrohungen der Lebenswelt in der Tiefsee durch anthropogene Aktivitäten, wie Tiefseebergbau, z. B. im zentralen pazifischen Ozean, lassen sich jedoch bis heute nicht gut genug einschätzen bzw. in ihrer künftigen Wirkung modellieren oder vorhersagen.



Abb. 4: Makrofauna (Größenbereich von 2 mm bis 20 mm) bestehend aus verschiedenen Krebs- und Ringelwürmerarten, gesammelt während der Expedition Vema-Transit aus 5.507 m Tiefe. Foto: Torben Riehl.

Um die Biodiversitätsforschung in unbekannten Tiefseeregionen voranzutreiben, ist es wichtig, auch neue, moderne Methoden zur Arterfassung zu entwickeln, denn insbesondere für ökologische Studien müssen die in den Proben vorgefundenen Arten genau bestimmt werden. Für die Aufbereitung von Plankton-, Meiobenthos- oder Makrobenthos-Proben ist die Artidentifikation in der Regel sehr zeitaufwendig, da es sich meistens um eine sehr große Zahl sehr kleiner Organismen handelt. Eine mögliche Lösung für dieses Problem könnte z. B. MALDI-TOF-MS sein, eine neue Methode zur massenhaften Identifizierung von Metazoenarten mittels Massenspektrometrie.

KALTWASSERRIFFE – DIE GROSSEN UNBEKANNTEN

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt von Senckenberg liegt auf den Riffe bildenden Kaltwasserkorallen in den dunklen Zonen der Weltmeere (vgl. Kap. 2.7.6); diese haben im Laufe von einigen Hunderttausend Jahren mehrere Hundert Meter hohe Korallenhögel hergestellt. Die imposanten Riffe befinden sich im oberen Stockwerk der Tiefsee (400–1.200 m Wassertiefe) entlang der Kontinentalränder im gesamten Atlantik. Weitere Vorkommen im Indischen Ozean sowie im Pazifik sind noch nicht systematisch erfasst. Das größte bislang bekannte tiefe Riffsystem ist die „Mauretanische Mauer“, eine 580 km lange und 80–100 m hohe Riffkette in 400–600 m Tiefe vor Westafrika (Abb. 5). Diese tiefen Riffe werden mit modernsten Techniken der Unterwasserkartierung großräumig kartiert (Bathymetrie) und mit Tauchrobotern oder bemannten Tauchbooten systematisch erforscht. Dem bathymetrisch gehäuft Vorkommen dieser tiefen Riffe liegen ozeanografische Besonderheiten zugrunde.

Die Riffe entstehen vor allem in den Zonen der tiefen, permanenten Sprungschicht, in der von der Meeresoberfläche herabsinkendes organisches Material länger verweilt, so dass es von den festsitzenden Korallen gefressen werden kann. Mit anderen Worten: Die Tiefseeriffe filtern effektiv organisches Material (Sedimentpartikel) auf dem

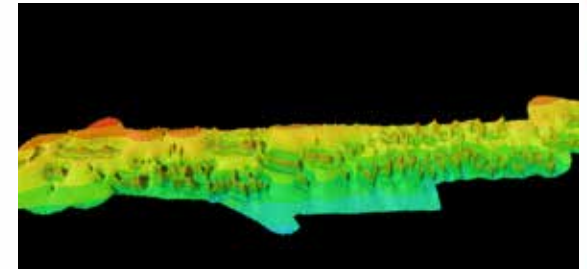


Abb. 5: Reliefkarte eines 50 km langen Abschnitts der „Mauretanischen Mauer“ in 400–600 m Tiefe. Die ca. 100 m hohen Högelketten sind im Laufe einiger Hunderttausend Jahre durch riffbildende Tiefseekorallen und Sedimentablagerungen entstanden. Quelle: André Freiwald.

Weg in die Tiefsee aus der Wassersäule heraus; damit sichern sie einerseits ihren Bedarf an Nährstoffen und akkumulieren andererseits das Sediment an einem Ort. Ähnlich wie die viel besser erforschten tropischen Flachwasserriffe, bilden auch die tiefen Riffe Zentren der Artenvielfalt. Wir kennen 17 Tiefseekorallenarten, die in der Lage sind, Riffgerüste zu generieren. Als wahre Ökosystemingenieure lassen diese wenigen Riffbauer einen Lebensraum für viele Bewohner entstehen. Ca. 13.000 Arten haben Wissenschaftler aus diesen Ökosystemen beschrieben, aber unser Wissen über deren Lebensweise und ökologische Rolle ist noch ziemlich gering. Wie in Flachwasserriffen dominieren auch hier in der Tiefe Krebs- und Weichtiere neben Schwämmen, Würmern und Stachelhäutern (Abb. 6, 7). Auffallend häufig und komplex sind symbiotische und parasitäre Beziehungen in den tiefen Riffen. Diese ziehen außerdem eine reiche und diverse Fischgemeinschaft an (Abb. 8); denn ähnlich wie die tropischen Riffen bieten auch die Riffe in der Tiefe genug Nahrung, Schutzräume sowie ein variables Angebot an Substrattypen und Strömungsregimes für Hunderte von Fischarten, die entweder dauerhaft oder nur zu bestimmten Zeiten (z. B. Paarungsperioden) in diesem Ökosystem auftreten.

**KÖNNEN SICH GESCHÄDIGTE RIFFE
REGENERIEREN?**

Fischer wussten seit Jahrhunderten um diesen Zusammenhang und befischten diese Riffe oftmals mit wenig nachhaltigen Methoden. Besonders mit dem Aufkommen moderner Bodenschleppnetzfisherei und hydroakustischer Methoden zum Aufspüren von Fischschwärmen in großer Tiefe nahmen die Habitatzerstörungen enorm zu.



Abb. 6: Junge Korallenkolonie von *Desmophyllum pertusum* mit ihrem in Symbiose lebenden Wurm *Eunice norvegicus*.
Quelle: Tomas Lundälv, Sven Lovén Centre for Marine Infrastructure, Universität Göteborg.

Ein weiteres großes Problem stellt die Entnahme langlebiger Raubfische noch vor dem Erreichen der Reproduktionsfähigkeit dar. Wir wissen noch zu wenig über das Regenerationspotenzial der tiefen Riffe nach eingetretenen Schädigungen. Dennoch führte das erkannte Ausmaß der Zerstörungen (u. a. in der Außenwirtschaftszone der Europäischen Gemeinschaft) zur Einrichtung von Schutzzonen. Grundlage dafür waren europäische Verbundprojekte, die unter Einsatz modernster Unterwasser-



Abb. 7: Hydrozoenkolonie auf der Tiefseekoralle *Madrepora oculata*.
Quelle: Tomas Lundälv, Sven Lovén Centre for Marine Infrastructure, Universität Göteborg.

technologien eine systematische Situationsanalyse der tiefen Riffe von Nordnorwegen bis nach Westafrika ermöglicht haben. Erste Beobachtungen zuvor geschädigter Riffe zeigten weltweit eher ernüchternde Ergebnisse, was die Regenerationsfähigkeit innerhalb von 10 Jahren angeht. Auch das Abfischen von Arten, bevor diese sich fortpflanzen können, wird nicht ohne Folgen auf die Nahrungsnetze, das Artenspektrum und folglich auf das gesamte „Funktionieren“ des Ökosystems bleiben. Aus dem Flachwasser gibt es gesicherte Erkenntnisse, dass Überfischung zur Ausbreitung von Quallenpopulationen führen kann, die dann die Fischlarven wegfressen. Ob und wie sich derartige ökosystemare Kipp-Punkte in den tiefen Riffen auswirken, kann man zwar prognostizieren, aber die technologischen Innovationen zu einer dauerhaften Überwachung (Monitoring) stecken noch in den Kinderschuhen.

Weitere Stressoren für das Ökosystem Tiefseeriff sind die zunehmende Verschmutzung durch feste und gelöste Kontaminanten (z. B. Makro- und Mikroplastik), aber auch

die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in den oberen Stockwerken der Tiefsee. Diese weltweit zu beobachtende Sauerstoffabnahme tritt anscheinend genau im Lebensraum der tiefen Riffe auf – so auch vor Mauretanien (Abb. 5–8). Wir wissen nicht, ob es den Korallen gelingt, sich an diese sich rasch ändernden Umweltbedingungen anzupassen, oder ob sie schlichtweg absterben. Bohrkern aus diesen über 100 m hohen Korallenhügeln zeigen wiederholte Blütephasen, aber auch Abschnitte, in denen keine Korallen vorhanden waren. Die Forscher werden dank des hohen Erhaltungspotenzials der Korallen und ihrer Bewohner sicher bald in der Lage sein, die steuernden Faktoren und Kipp-Punkte zu entschlüsseln, die dazu geführt haben, dass Korallen der Tiefsee in der Vergangenheit verblühten oder blühten. Dieses Wissen wird hoffentlich dazu beitragen, die Folgen dynamischer Veränderungen in unseren Ozeanen zu begreifen und die genetische Vielfalt und den wichtigen Lebensraum Tiefseeriff vor dem Untergang zu bewahren.



Abb. 8: Der Schleimkopf *Gephyroberyx darwinii* ist ein beliebter Speisefisch, der häufig in Tiefseeriffen in den wärmeren Breiten angetroffen wird. Quelle: Tomas Lundälv, Sven Lovén Centre for Marine Infrastructure, Universität Göteborg.

1.3 WARUM TIEFSEEFORSCHUNG?

Torben Riehl

Eine dunkle, kalte, eintönige Wüste, harsch und lebensfeindlich, unbewohnt, azoisch. So oder so ähnlich sah man die Tiefsee bis weit in das 19. Jahrhundert hinein. Bedeutende Naturforscher dieser Zeit, wie Louis Agassiz, David Page und Henry de la Beche, aber allen voran Edward Forbes verbreiteten die Idee, dass in den großen Meerestiefen tierisches Leben nicht existieren könne. Warum sollte man sich also für einen Raum interessieren, in dem man nichts zu erwarten hatte? Erst der schottische Naturforscher Wyville-Thomson konnte, angetrieben von seiner Entdeckung des besiedelten Tiefseekabels 1860 (vgl. Kap. 1.1) auf einer Expedition mit dem britischen Schiff Porcupine in den Jahren 1868–1870 die Theorie der azoischen Tiefsee endlich widerlegen. Es ist also nur knapp über 150 Jahre her, dass die bloße Existenz von Tiefseetieren allgemein bekannt ist.



Selbstverständlich hat die Tiefseeforschung seitdem enorme Fortschritte gemacht, und die Tiefsee ist inzwischen auch aus wirtschaftlichen Gründen in das Blickfeld von Staaten und Unternehmen gerückt. Nichtsdestoweniger konnte der Vorsprung des Wissens um terrestrische Systeme bislang nicht wettgemacht werden. Noch heute sind sich Wissenschaftler einig, dass sie lediglich an der sprichwörtlichen Oberfläche (in diesem Fall der Tiefsee) gekratzt haben und noch viele bahnbrechende Erkenntnisse über diesen faszinierenden Lebensraum zu erwarten sind. Die Tiefseeforschung ist jung und entwickelt sich deshalb sehr dynamisch.

„TOO BIG TO FAIL“ – EIN SCHEITERN KÖNNEN WIR UNS NICHT LEISTEN

In der Wirtschaft werden Unternehmen und Staaten ab einer gewissen Marktbedeutung als „systemrelevant“ eingestuft und bei Schräglagen mit aller Kraft staatlich gestützt, damit nicht die gesamte Wirtschaft negative Konsequenzen fürchten muss. Sie sind „too big to fail“, also „zu groß, um zu scheitern“ – oder auch „zu groß, um sie scheitern zu lassen“. Die Erde ist zu etwa 70 % vom Meer bedeckt! Schaut man aus dem Weltraum auf die Erde hinab, erscheint sie als blaue Kugel. Die Bezeichnung „Blauer Planet“ ist also wirklich gerechtfertigt. Die Durchschnittstiefe des Weltmeers liegt bei etwa 3.800 m. Das Wasservolumen der Tiefsee repräsentiert ganze 98,5 % des gesamten von Tieren dauerhaft bewohnbaren Raums auf der Erde.

Die Tiefsee ist also anteilmäßig – sowohl was ihre Fläche als auch was ihr Volumen angeht – der bedeu-

Abb.1: Das Gorgonenhaupt *Gorgonocephalus arcticus* Leach (1819) ist vermutlich die erste Art, die aus der Tiefsee geborgen wurde. Kapitän John Ross setzte im Jahre 1818 die Segel, um die Tiefe des Arktischen Ozeans und insbesondere der Nordwestpassage zu vermessen. Am Ende seiner Lotleine befand sich ein Greifer, der bei Bodenkontakt auslöste und, einem Bagger ähnlich, Bodensedimente aufnahm. Aus ca. 1.095 m Tiefe brachte der Greifer neben Meeresborstenwürmern auch ein Exemplar dieses spektakulären Stachelhäuters mit an die Oberfläche. Dieser Beweis für eine belebte Tiefsee wurde noch 50 Jahre ignoriert. Mit freundlicher Genehmigung von SERPENT Project, D.O.B. Jones, Creative Commons BY-SA 4.0.

tendste Lebensraum der Erde. Die tiefste Stelle der Erde befindet sich ca. 10.980 m unter der Wasseroberfläche. Diesen Ort am Grund des Ozeans bezeichnet man als das Challenger-Tief. Es liegt im Marianengraben im westlichen Pazifik. Die genaue Tiefe ist umstritten, denn es gibt keine 100 % genaue Messmethode für derartige Abgründe. Eins aber steht fest: Würde man wirtschaftliche Maßstäbe ansetzen, müsste man die Tiefsee als „too big to fail“ einstufen, denn zu groß ist ihr Anteil am Erdsystem, als dass man sie vernachlässigen darf. Es wäre fahrlässig, das, was die Tiefsee noch an Unbekanntem birgt, nicht ans Licht zu holen.

WARTET AUF ENTDECKER – DIE UNBEKANNTE VIELFALT AM MEERESGRUND

Neue Kartierungen und Vermessungen des Meeresbodens bringen immer wieder unerwartete Erkenntnisse. Ganze Berge und Lebensraumtypen, die bislang nicht bekannt waren, werden im Zuge neuerer Forschungen zutage gefördert; dasselbe gilt für Organismen, von denen ständig neue Spezies in der Tiefsee entdeckt werden.

Hochrechnungen lassen darauf schließen, dass ca. 2,2 Mio. Arten Eukaryoten (Lebewesen, deren Zellen Zellkerne besitzen) in den Meeren existieren, von denen 91 % noch nicht beschrieben oder überhaupt entdeckt sind. Da die Tiefsee zu den am wenigsten erforschten Lebensräumen gehört, werden vor allem dort sehr viele unbekannte Arten erwartet. Manche Schätzungen überschreiten diese Zahl deutlich und gehen von annähernd 10 Mio. Arten aus, die wir alleine in der Tiefsee noch entdecken könnten.

SCHWER ZU (ÜBER)SCHÄTZEN – DER WERT DER TIEFSEEFORSCHUNG

Die Bedeutung von Tiefseeforschung in Zahlen auszudrücken, ist zurzeit kaum möglich. Und trotzdem – oder gerade weil sie noch so viele Geheimnisse birgt – ist die Tiefsee von enormer Bedeutung: Sie spielt Schlüsselrollen in verschiedenen globalen Prozessen, deren Gesamtverständnis auch vom Verständnis der Vorgänge in der Tiefsee

abhängt. Nur, wenn wir die Tiefsee verstehen, haben wir die Chance, vielleicht auch globale Systeme zu durchschauen.

Dazu gehören die Meeresströmungen ebenso wie die Kreisläufe der atmosphärischen Gase, allen voran das Kohlendioxid (CO_2). Aufgrund ihrer hohen Speicherkapazität für CO_2 ist die Tiefsee ein maßgeblicher Faktor in den am Klimawandel beteiligten Prozessen (vgl. Kap. 3). Auch unser regionales Wetter wird von der Tiefsee mitgesteuert, indem sie – über Meeresströmungen wie den Golfstrom – am Energietransport vom Äquator zu den Polen mitwirkt.

In der Tiefsee verbirgt sich ein enormes, noch größtenteils unbekanntes Reservoir der Biodiversität – eine Artenvielfalt, die vor kurzfristigen Umweltkatastrophen, welche an Land enorme Konsequenzen haben, durch die puffernde Trägheit des Meerwassers geschützt ist. In den unterschiedlichen Lebensräumen der Tiefsee – den Kaltwasserkorallenriffen, hydrothermalen Schloten und den schier endlos erscheinenden Tiefsee-Ebenen – kommen etwa 79 % der gesamten Biomasse der marinen Biotzone vor, und zwar in Form unzähliger Tier- und Mikrobenarten. Diese komplexen Organismengemeinschaften bilden auch für viele Meerestiere, die in flacheren Meereszonen leben, eine Nahrungsgrundlage, und damit nicht zuletzt für wirtschaftlich bedeutsame Spezies.

Zu den noch weitgehend ungehobenen Schätzen der Tiefsee gehören außerdem wertvolle Rohstoffe wie z. B.



Abb. 2: Der Forschungseisbrecher *Polarstern* bei der Probenahme im Jahr 2007 in der Antarktis. Mit freundlicher Genehmigung von ANDEEP-SYSTCO Projekt, Torben Riehl, Senckenberg



Abb. 3: Die Senckenberg-Tiefseeforscher Torben Riehl und Nils Brenke setzen in eingespielter Zusammenarbeit mit der Decksmannschaft des Forschungsschiffes *Sonne* den mit Kameras und Sensoren ausgerüsteten Epibenthoschlitten aus. Ungefähr acht Stunden später wird das Gerät mit gefüllten Netzen und Speicherchips voller Daten aus dem Abgrund des Nordatlantik wieder zurück an Deck geholt. Dies sind die spannendsten Momente auf Tiefsee-Expeditionen. Mit freundlicher Genehmigung von Vema-TRANSIT-Projekt, Simon Bober, Universität Hamburg.

Manganknollen (vgl. Kap. 4.1.1) und Fischbestände, deren Förderung großen Einfluss auf die Weltwirtschaft, die globale Ernährung und die Fortentwicklung moderner Technologien haben wird. Die Erforschung der Tiefsee ist Voraussetzung für langfristig nachhaltige Strategien, diese Rohstoffe zu nutzen.

Das Interesse an den hochspezialisierten Anpassungen der Tiefseebewohner geht weit über die reine wissenschaftliche Neugier hinaus: Grundlagenforschung zum Verständnis ihrer Biochemie hat das Potenzial, medizinische Durchbrüche anzustoßen. Viel Hoffnung wird beispielsweise in die Entdeckung hochpotenter Wirkstoffe gesetzt, die von Tiefseetieren biologisch synthetisiert werden und möglicherweise zu Durchbrüchen bei der Bekämpfung von Erkrankungen wie Krebs führen können.

Über die Erforschung der möglichen kommerziellen Nutzung der Tiefsee und die potenziellen Auswirkungen solcher Eingriffe in das Tiefseeökosystem hinaus birgt die Tiefseeforschung noch ganz andere Antworten auf spannende wissenschaftliche Fragen, etwa der nach dem Ursprung des Lebens auf der Erde. Die Klimageschichte der Erde ist über Jahrmillionen hinweg in den Sedimenten der Tiefsee aufgezeichnet; dadurch wird es prinzipiell möglich, Schlüsse aus der Vergangenheit zu ziehen, um so die Zukunft besser vorhersagen und die Menschheit auf künftige Herausforderungen vorbereiten zu können.

1.4 MEERESTECHNIK FÜR DIE TIEFSEEFORSCHUNG

Peter Linke

Die Tiefsee wird als eines der letzten Grenzgebiete in der Erforschung unseres blauen Planeten angesehen. Zu den großen Herausforderungen, die uns den Zugang zu diesem Lebensraum erschweren, zählen neben der Dunkelheit, tiefe Temperaturen (im Mittel um 2°C), hohe Korrosion im salzigen Meerwasser, hoher Umgebungsdruck, biologischer Bewuchs („biofouling“), stürmische See mit hohem Wellengang sowie die schwierige Datenübertragung ohne Kabel, die nur auf die Akustik beschränkt ist. Dies macht die Tiefseetechnik zu einer Spitzentechnologie, die sehr viele Analogien zur Weltraumforschung aufweist.



Abb. 1: Forschungsschiff *Sonne* auf wissenschaftlicher Mission im Pazifik zur Untersuchung der ökologischen Auswirkungen des Tiefseebergbaus auf die Umwelt. An Bord befinden sich modernste Schiffs- und Meerestechnik wie autonome und ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge und Landefähren (sogenannte „Lander“). Foto: Peter Linke.

SCHIFFE ALS AUSGANGSBASIS UND FORSCHUNGSZENTRALE

Die wichtigsten Plattformen für den Einsatz der Meerestechnik in der Tiefseeforschung sind immer noch die Forschungsschiffe. Gerade noch vor vier Wochen Fahrleiter auf dem derzeit neuesten Deutschen Forschungsschiff *Sonne* im nordöstlichen tropischen Pazifik (Abb. 1) kann mit der jetzigen Fahrt auf der *Poseidon* (Baujahr 1976) in die Nordsee der Kontrast und der Blick auf die stark gewachsenen Anforderungen nicht deutlicher sein. Während dieses Schiff in den 1980er Jahren mit der Länge der Schwerlastwinde Einsätze von schwerem Gerät bis knapp 4.000 m ermöglichte und am Koaxialkabel ozeanografische Sonden und Wasserprobennehmer bis auf 6.000 m eingesetzt wurden, verfügen die modernen Schiffe über Glasfaserhybridkabel und Winden mit Hubkompensation, die den videogeführten Einsatz bis in mehr als 10.000 m Wassertiefe ermöglichen. Hinzu kommt die dynamische

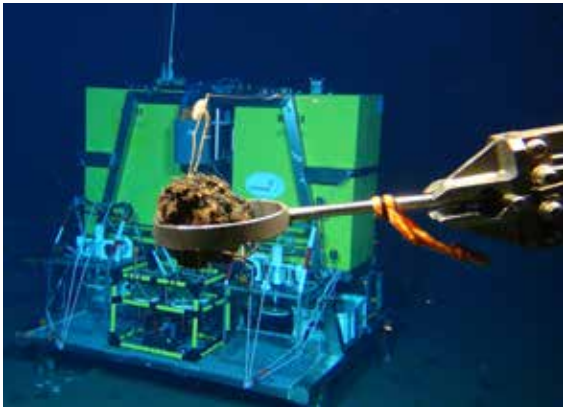


Abb. 2: Fahrstuhl-Lander beladen mit wissenschaftlichen Modulen zur Messung der Stoffwechselaktivität der Tiefseebewohner. Der Lander wird videogeführt mit einem Absetzrahmen am Meeresboden dort platziert, wo das ferngesteuerte Unterwasserfahrzeug (ROV) die Geräte einsetzen und nach erfolgter Messung wieder auf dem Lander befestigen soll. Dieser bringt die Proben und Messgeräte anschließend, unabhängig vom ROV, mithilfe des gelben Auftriebschaumes und nach Abwurf der Gewichte wieder an die Oberfläche. Foto: ROV-Team GEOMAR.



Abb. 3: Bergung von Geräten mit einer 2-Draht Operation in 4.500 m Wassertiefe. Das ferngesteuerte Unterwasserfahrzeug (ROV) befestigt an dem verlorengegangenen Gerät einen Haken, der mit dem Schiffsdraht heruntergelassen wird. Hierbei sind exakte Navigation und Positionierung, gute Absprache sowie viel Fingerspitzengefühl gefragt. Foto: Peter Linke.

Positionierung, mit der wir heute in der Lage sind, Geräte auch noch in großer Tiefe im Dezimeterbereich am Meeresboden zu positionieren (Abb. 2) und teilweise parallel über zwei Drähte – seitlich über den Schiebebalken und achtern über den A-Rahmen einzusetzen (Abb. 3).

Ein anderer Aspekt ist die gestiegene Größe und Komplexität der Großgeräte, wie etwa beim Einsatz kabelgebundener und autonomer Roboter, der 3D-Seismik, Magneto-Tellurik, Geodäsie sowie der Meeresboden-Bohrgeräte und Beobachtungsstationen. Viele dieser Systeme werden sogar gleichzeitig eingesetzt, um die teure Schiffszeit effizienter zu nutzen, und so entwickelt sich das Forschungsschiff bei Großprojekten immer mehr zum Leitstand für eine ganze Flotte autonomer und kabelgebundener Geräte. Umgekehrt ermöglichen die technischen Weiterentwicklungen in der Unterwassernavigation, dass die kabelgeführten Roboter (Remotely Operated Vehicle, übersetzt: ferngesteuertes Fahrzeug, kurz ROV) diese Führungsaufgabe übernehmen und das Forschungsschiff in das gewünschte Arbeitsgebiet leiten. Dies wurde zuletzt mit dem ROV PHOCA und dem Forschungsschiff



Abb. 4: Aussetzen des Crawlers VIATOR mit dem Lander MANSIO von Bord der Polarstern. Über den roten Auftriebskugeln ist die Absetzvorrichtung am Glasfaserhybridkabel, bestückt mit Kameras und Scheinwerfern, zu erkennen. Wenn der Boden in Sicht kommt, wird vom Schiff aus das Signal zum Abwurf des Landers gegeben. Nach Beendigung der Mission werden die Gewichte nach einem akustischen Auslösesignal abgeworfen, und der Lander kehrt mithilfe seiner Auftriebskugeln zurück an die Oberfläche. Fotos: oben: J. Lemburg, unten: ROV-Team GEOMAR



Abb. 5: Der Crawler VIATOR am Meeresboden. Hier noch mit einer „Nabelschnur“ zur Oberfläche zu sehen, wird er später mit seinen optischen und chemischen Sensoren den Meeresboden hochauflösend kartieren und selbstständig in seine „Herberge“ zurückkehren. Foto: SUBMARIS.

Maria S. Merian in einem Hydrothermalfeld vor Island durchgeführt, wo zuvor das AUV ABYSS (Autonomous Underwater Vehicle, ein autonomes Unterwasserfahrzeug, kurz AUV) die hochauflösenden Karten geliefert hatte. Gleichzeitig ermöglichen moderne Satellitensysteme eine Breitbandverbindung zwischen Forschungsschiff und Forschern und Öffentlichkeit an Land, so dass Videoaufnahmen quasi in Echtzeit übertragen werden können. Dies eröffnet großartige Möglichkeiten für die Wissenschaft, aktuelle Daten innerhalb der Gemeinschaft auszutauschen und Spezialisten, die nicht an Bord sein können, zu informieren und fachkundige Unterstützung einzuholen.

IN DEN UNENDLICHEN WEITEN – DER TIEFSEE

Nicht umsonst wird die Tiefseeforschung mit der Weltraumforschung verglichen. Diese Gemeinsamkeiten und möglichen Synergien wurden in dem von der Helmholtz-Gemeinschaft geförderten Projekt ROBEX (Robotics in Extreme Environments) – in Analogie zum Mars-Rover – u. a. mit Tiefsee-Raupenfahrzeugen, sogenannten Crawlern gezielt gesucht. Sowohl der TRAMPER des Alfred-Wegener-Instituts als auch der VIATOR des GEOMAR wird mittels einer videogeführten Vorrichtung am Meeresboden abgesetzt, um dort autonome Missionen

durchzuführen. Im Falle des VIATOR geschieht dies in Kombination mit dem Lander MANSIO, der als „Herberge“ (so die Übersetzung des lateinischen Namens) für den „Wanderer“ (so die Übersetzung des lateinischen Namens VIATOR) dient (Abb. 4).

Der Crawler verlässt den Lander über eine Rampe; er erfasst die chemischen Parameter im Bodenwasser und kartiert den Meeresboden mit Kameras und einem Laser-Line-Scanner in Millimeter-Auflösung (Abb. 5).

Die Daten werden im Bordrechner zu einer Karte verarbeitet, die den Crawler zusammen mit akustischer Navigation und optischer Naherkennung (wie bei der Annäherung einer Raumfähre an eine Raumstation im All) wieder den Weg zurück in die Herberge finden lässt. Dort werden die Batterien wieder aufgeladen, gesammelte Daten übertragen sowie neue Aufträge für Messungen und Fahrtrouten empfangen. Danach kann der Wanderer die nächste Mission starten, so lange bis auch die Energievorräte in der Herberge aufgebraucht sind (Abb. 6).

PHANTASIEVOLLES GERÄT FÜR PHANTASTISCHE WESEN

Aber nicht nur am Meeresboden befinden sich Lebensräume, die wir noch nicht ausreichend erforscht haben.

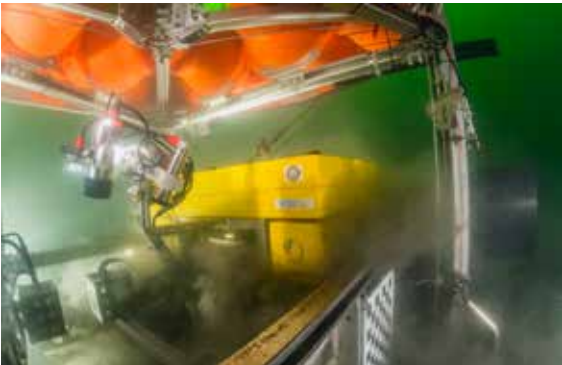


Abb. 6: VIATOR eingeparkt im Lander MANSIO. Über Induktion werden die Energievorräte wieder aufgetankt. Foto: SUBMARIS.

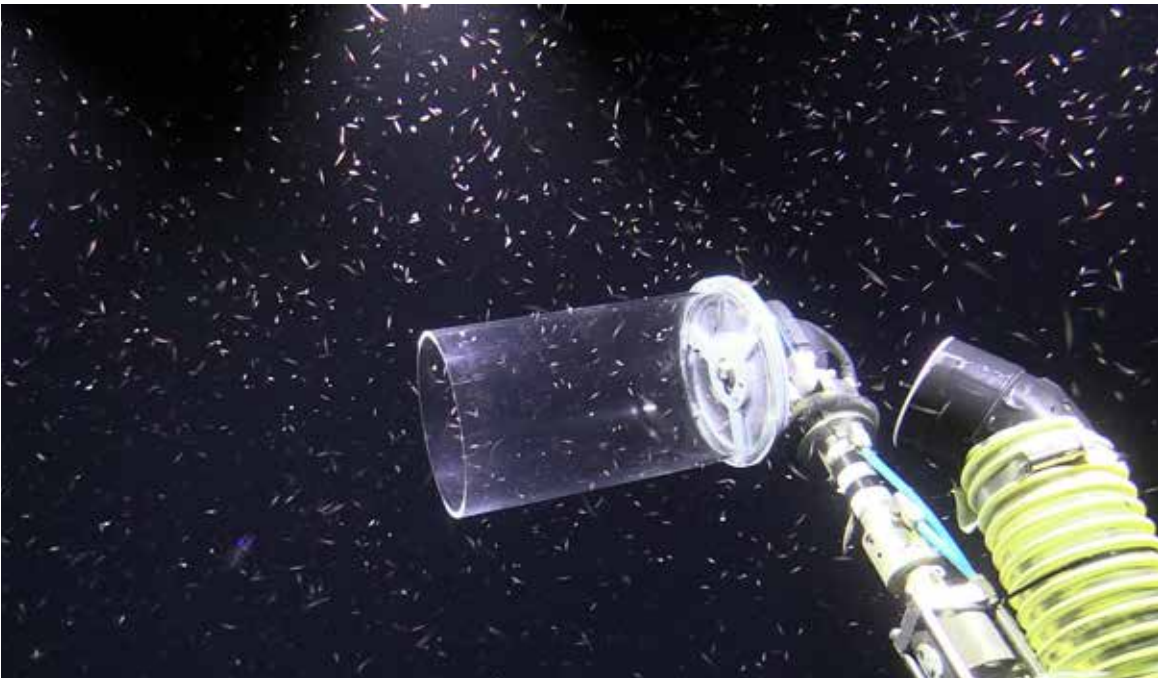


Abb. 7: [links](#) JAGO auf der Pirsch nach Plankton. Vor dem Tauchboot befinden sich sogenannte „Scoop Tubes“ oder übersetzt Fangrohre (rechts oben) sowie ein Saugrohr am Greifarm (rechts unten), mit denen der Pilot die fragilen Organismen behutsam einfangen kann. Foto links: U. Kunz, SUBMARIS, Fotos rechts: J. Schauer.

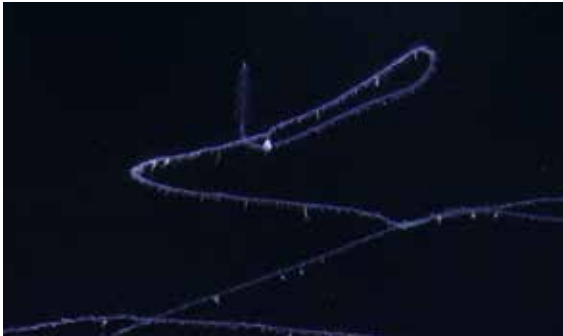


Abb. 8: Erstmalige Beobachtung einer Staatsqualle *Apolemia* sp. in ihrem natürlichen Umfeld im Atlantik. Foto: J. Schauer.

Auch darüber, im permanent dunklen Wasser der Tiefsee, dem Bathypelagial, leben Organismen, die wir mit konventionellen Fangmethoden – wie etwa mit horizontal oder vertikal geschleppten Fangnetzen – nicht erfassen und in ihrer natürlichen Umgebung beobachten können, da sie oft durchsichtig, gelatinös und sehr fragil sind, also leicht zerfallen und oft vor Geräuschen und Licht fliehen. Solche Beobachtungen gelangen zuerst mit Forschungstauchbooten, die über besondere Rotlichtquellen verfügen, und führten zu einmaligen Dokumentationen von bizarren Organismen, die z.T. mehrere Meter lang sind und im Dunkeln mit ihrer selbst erzeugten Biolumineszenz Beute anlocken oder Farbwolken ausstoßen, um Fressfeinde abzulenken. Tauchgänge bei Nacht haben auch gezeigt, wie die pelagischen Lebensgemeinschaften den nächtlichen Wanderungen des Zooplanktons in die obersten Wasserschichten folgen und damit auch in das Blickfeld von JAGO (Abb. 7) geraten, dem einzigen wissenschaftlichen Tauchboot in Deutschland (stationiert am GEOMAR), das mit zwei Personen bis in 400 m Wassertiefe vordringen kann. Spezielle Kameras und Fangmethoden am JAGO ermöglichen die gezielte Dokumentation (Abb. 8) und den Fang solcher fragilen Organismen.

Ein weiteres Gerät mit Namen PELAGIOS (Pelagic In Situ Observation System; Abb. 9) ist ein Schleppkörper, ausgestattet mit HD-Kamera, LED-Beleuchtung und Sensoren.

Es liefert über ein Koaxial- oder Glasfaserhybridekabel, das mit einer mobilen Winde auch von Bord der *Poseidon* aus eingesetzt werden kann, hochauflösende Videos von pelagischen Organismen (> 1 cm) aus Tiefen, in die JAGO nicht vorzudringen vermag (Abb. 10).

Mithilfe von Partikelkameras kann PELAGIOS auch kleinere Organismen oder Nahrungspartikel dokumentieren oder in Kombination mit Multischließnetzen die gefilmten Tiere in verschiedenen Tiefenstufen fangen.

Viele pelagische Organismen filtrieren das Wasser oder spannen Schleimnetze auf, um Nahrung zu fangen. Sowohl die Kotpillen als auch die sterblichen Überreste dieser Organismen sind wichtige Elemente im marinen Nahrungsnetz und dienen als Transportvehikel zum Meeresboden, von dem die benthischen Organismen zum überwiegenden Teil abhängig sind. Da die Rolle der pelagischen Organismen im marinen Kohlenstoffkreislauf noch weitestgehend unbekannt ist, sind diese technischen Entwicklungen und Untersuchungen wichtige Bausteine für ein verbessertes Verständnis der betho-pelagischen Kopplung in der Tiefsee – ein Thema, das bereits in den 1980er Jahren u. a. mit der *Poseidon* bearbeitet wurde und nun mit den neuen technischen Errungenschaften erneut im Fokus der Wissenschaft steht.

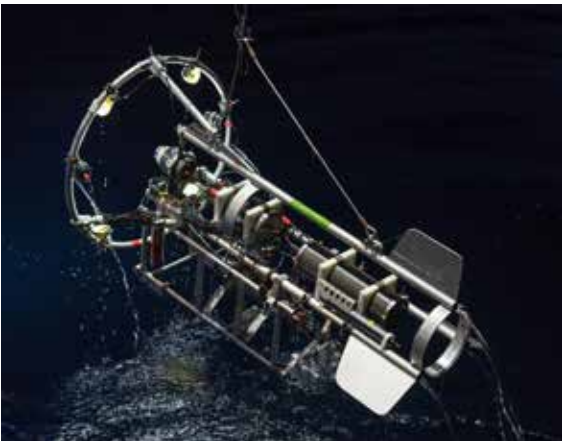


Abb. 9: Bergung des Beobachtungssystems PELAGIOS. Foto: C. Rohleder.



Abb. 10: PELAGIOS-Bilder einer Staatsqualle (*Praya dubia*). Am unteren Bildrand ist als Größenmaßstab eine Stange montiert; der Abstand zwischen den weißen Markierungen beträgt 5 cm. Fotos: H.-J. Hoving.



KAPITEL 2

In der Tiefsee gibt es Orte, an denen das Leben wimmelt. Hydrothermale Quellen, an denen durch das Erdinnere stark erhitztes Ozeanwasser mit bis zu 400° C zutage tritt, sind im wahrsten Sinne des Wortes „Hotspots“ des Tiefsee-Lebens. Bakterien nutzen Bestandteile des Cocktails aus mineralischen Stoffen und Schwefelverbindungen, das den „Rauchern“ entströmt. Die Bakterien wiederum sind Nahrung für Organismen, die ihrerseits von anderen gefressen werden. Ein einzigartiges Netzwerk von Lebewesen auf kleinstem Raum. Foto: ROV-Team, GEOMAR.

2. LEBENSRAUM TIEFSEE

Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller

Lebensräume bestehen aus anorganischen und organischen Anteilen. Gesteine und Minerale bilden den mehr oder weniger harten Untergrund und Böden, auf denen sich – je nach sonstigen Umweltbedingungen – die unterschiedlichsten Pflanzen ansiedeln. Pflanzen stellen mithilfe des Sonnenlichts aus anorganischen Stoffen Biomasse her (Produzenten). Sie dienen Pflanzenfressern als Nahrung und diese wiederum werden fleisch- und allesfressenden Organismen verzehrt (Konsumenten). Die Gesamtheit aller Lebewesen in einem bestimmten Lebensraum heißt Biozönose. Sonnenlicht, Luft und Wasser sind weitere, für das Leben entscheidende Komponenten eines Ökosystems.

Die Tiefsee ist ein sehr spezielles Ökosystem. Weichböden dominieren den Tiefseeboden. (Sonnen)Licht fehlt in Tiefen ab 1.000 m gänzlich. Es herrscht ein unglaublicher Wasserdruck, Nahrung ist knapp, und es ist kalt (vgl. Kap. 2.1). Trotzdem gibt es auch hier Netzwerke aus Produzenten (meist Bakterien) und Konsumenten.

Um die Tiefsee als System zu verstehen, entdecken, erfassen und analysieren Wissenschaftler die Komponenten dieses riesigen Lebensraums. Der Ozeanboden ist eine dynamische Struktur, die durch Vorgänge im zähflüssigen Erdmantel geformt und stetig verändert wird. Gebirgsketten, Bänke und Seeberge türmen sich auf, und es entstehen riesige Ebenen. Vulkanismus und Erdbeben treten in der ozeanischen Kruste ebenso auf wie in der kontinentalen Kruste, auf der wir leben (vgl. Kap. 2.2).

Geologische Vorgänge in der Tiefsee erzeugen Strukturen, die von Lebewesen genutzt werden. Erst in den 1970er Jahren wurden die „Schwarzen Raucher“ entdeckt, untermeerische domartige Strukturen (Hydrothermalquellen; engl. hydrothermal vents). Aus ihnen strömen bis zu 450 °C heiße metallhaltige Lösungen. In dieser Suspension sind mineralische Stoffe aus dem Erdinneren gelöst, die sich ablagern und kaminartig aufragende Strukturen bilden. Auch in diesem scheinbar lebensfeindlichen Milieu leben Organismen, die nur an diese Strukturen existieren können (vgl. Kap. 2.4). Diesen Rauchern entströmt je nach Zusammensetzung und Menge der gelösten Stoffe schwarzer, weißer oder klarer „Rauch“ (vgl. Kap. 2.3). An anderen Stellen tritt Methangas aus Spalten und Rissen im

Meeresboden aus. An diesen „kalten Sickerstellen“ (engl. cold seeps) bildet sich eine Lebensgemeinschaft, deren Basis meist aus methanliebende Bakterien besteht (vgl. Kap. 2.5).

Die Lebewelt der Tiefsee ist weniger artenreich als die auf dem Land. Bakterien bilden die Lebensgrundlage in der Tiefsee. Nichtsdestoweniger tummeln sich Vertreter diverser Tiergruppen in der Tiefsee (vgl. Kap. 2.7.1–2.7.10). Sogar Säugetiere (Wale) schaffen es als „Besucher“ bis in die Tiefsee hinab (vgl. Kap. 3.1). Pflanzen, z. B. Algen und pflanzliches Plankton, finden sich in der Tiefsee jedoch nur in Form von Kleinstteilen, die von oben herabsinken. Die meisten Tiere sind eher klein und auf unterschiedlichste Weise an die extremen Bedingungen angepasst. Riesenassel und Riesenkalmar dagegen setzen auf Größe – der Tiefsee-Gigantismus ist ein Weg, dem ständigen Nahrungsdruck zu begegnen: Je größer ein Tier ist, desto geringer die Wahrscheinlichkeit, dass es selbst zur Beute wird.

Kommunikation unter Wasser ist ebenso entscheidend wie auf dem Land. Schallwellen können sich im Wasser viel schneller und sehr weit ausbreiten. Fische nutzen das Seitenlinienorgan, um sich in Schwärmen zu orientieren oder drohende Gefahr zu erspüren (vgl. Kap. 2.7.8). Das für uns ästhetisch schöne Leuchten der Tiefseeorganismen, die Biolumineszenz, ist ein lebensnotwendiges Mittel, um Nahrung und/oder Fortpflanzungspartner zu finden; es kann aber auch der Tarnung, der Abschreckung von Fressfeinden und der Flucht dienen (vgl. Kap. 2.7.9).

2.1 BEDINGUNGEN IN DER TIEFSEE

Thorolf Müller, Gerd Hoffmann-Wieck

Je nach Definition beginnt die Tiefsee bei 200, 500 oder 1.000 m unter der Wasseroberfläche. Die Tiefsee ist dunkel, kalt, nährstoffarm, spärlich besiedelt und steht unter dem enormen Druck der auf ihr lastenden Wassersäule. Sämtliche Tiefseeorganismen müssen diesen z. T. lebensfeindlichen Bedingungen standhalten bzw. an diese angepasst sein. An einigen Stellen, den sogenannten Hotspots, ist die Artenvielfalt jedoch trotz dieser Extrembedingungen sehr hoch.

Von der Wasseroberfläche bis in die Tiefseegräben erstreckt sich der freie Wasserkörper, das sogenannte Pelagial (griech. pelagos, „Meer“). Das Pelagial wird in fünf Zonen oder „Etagen“ unterteilt. Das Epipelagial (griech. epi, „auf“) reicht von der Oberfläche bis in 200 m Tiefe. Das darauf folgende Mesopelagial (griech. méson, „mitig“) liegt zwischen 200 und 1.000 m Tiefe. Danach begin-



Abb. 1: Nur die Tauchgeräte des Menschen bringen viel Licht in die ewige Nacht der Tiefsee. Hier beleuchtet ein Tauchroboter Garnelen, Muscheln und Fische am Logatchev Hydrothermalfeld im zentralen Atlantik. Foto: ROV-Team, GEOMAR.

nen die „Zonen absoluter Dunkelheit“. Das Bathypelagial (griech. bathýs, „tief“) umfasst den Bereich zwischen 1.000 und 4.000 m. Ihm schließt sich das Abyssopelagial (griech. ábyssos, „bodenlos“) von 4.000–6.000 m Tiefe an. Die unterste (und zugleich höchste) Etage bildet das Hadopelagial (griech. Hades, „Unterwelt“). Es reicht von 6.000–11.000 m Tiefe. Auch der Meeresboden – das Benthal – ist in Zonen gegliedert, von denen je nach Definition das Bathyal, das Abyssal und das Hadal der Tiefsee zugerechnet werden.

DENN DIE IM DUNKLEN SIEHT MAN NICHT...

Die Dunkelheit der Tiefsee ist (für uns Menschen) ab dem Bathypelagial, also 1.000 m Tiefe, vollkommen, denn das Meerwasser wirkt wie ein Filter (Abb. 1). Es absorbiert zuerst die langwelligen Anteile des Lichts; das sind die roten, orangen und gelben Anteile des für uns sichtbaren Bereichs des elektromagnetischen Spektrums (ca. 400–700 nm Wellenlänge). Sie verschwinden bereits 100 m unterhalb der Meeresoberfläche. Rote Organismen und menschliches Blut erscheinen unterhalb dieser Grenze braunschwarz. Nach etwa 300–700 m verschwindet grünes und nach 600–1.000 m das am tiefsten vordringende kurzwellige blaue Licht. Danach ist es für uns Menschen stockfinster. Nur das für uns nicht sichtbare UV-Licht kann noch tiefer vordringen.

Tarnung in absoluter Finsternis ist im Grunde simpel: Entweder sind die Organismen rot oder sehr dunkel gefärbt, annähernd durchsichtig oder farblos weiß. Alle diese Anpassungen sind von Tiefseeorganismen bekannt. Wenn die Organismen trotzdem entdeckt werden, flüchten sie. Dennoch müssen sie auch Nahrung finden und Partner zur Fortpflanzung anlocken. Für diese Zwecke nutzen die Organismen Licht, das sie entweder selbst oder mithilfe von Bakterien in Leuchtorganen produzieren. Dieses Phänomen heißt Biolumineszenz (vgl. Kap. 2.7.9). So erzeugtes „kaltes Licht“ leuchtet grünblau und hat aufgrund der kurzen Wellenlänge eine große Reichweite. Die meisten Tiefseeorganismen, die überhaupt noch Augen besitzen, nehmen infolgedessen ausschließlich kurzwelliges, grünblaues Licht wahr und haben meist stark vergrößerte Sehorgane, um das wenige vorhandene Licht aufzufangen. Einige Drachenfische haben sich darauf spezialisiert, rotes Licht als „Suchschweinwerfer“ einzusetzen, das für die „Grünblau-Sehenden“ unsichtbar bleibt. Ihre eigenen Augen nehmen rote Wellenlängen wahr, so dass sie erfolgreiche Beutegreifer in der Dunkelheit sind. Der „Glaskopffisch“ (*Macropinna microstoma*) kann mittels seiner sehr großen, nach oben gerichteten Teleskopaugen, die einen Grünfilter enthalten, bestimmte Anteile des Lichts filtern. Dadurch nimmt er das Leuchten anderer Organismen, z.B. Quallen und Garnelen, die ihm als Nahrung dienen, besser wahr.

LEBEN IN LÄHMENDER KÄLTE UND UNTER HOHEM DRUCK

Es ist kalt in der Tiefsee. In mittleren Breiten nimmt die Temperatur von etwa 200 m bis etwa 1.000 m Wassertiefe rapide ab (sogenannte Thermokline; Abb. 2). In der Tiefsee herrschen Temperaturen von –1 bis +4 °C. Die meisten Stoffwechselprozesse der dort lebenden Organismen – das Erreichen der Geschlechtsreife sowie die Produktion von Biomasse (Wachstum) eingeschlossen – laufen aufgrund der niedrigen Temperatur wesentlich langsamer ab. Auch ist es sehr energieaufwendig, bei dieser

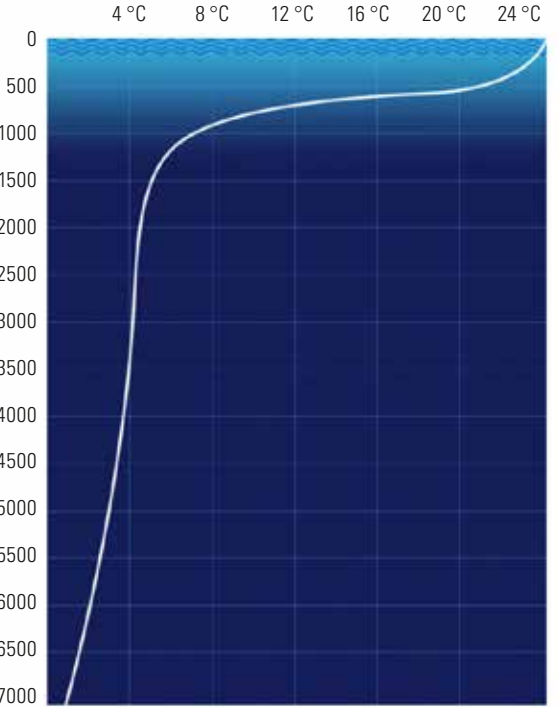


Abb. 2: Zwischen etwa 500 und 1.000 m fällt die Wassertemperatur im offenen Ozean drastisch. Grafik: Praveenron, Wikimedia commons, CC BY-SA 3.0.

Kälte schnelle Bewegungen auszuführen – und so schwimmen Fische in den Videoaufnahmen der Tauchgeräte meist „träge“ herum. Das liegt jedoch nicht nur an der Kälte, sondern auch am enormen Wasserdruck. In 10 m Wassertiefe herrscht ein hydrostatischer Druck von 1 bar. In 1.000 m Wassertiefe wird ein Druck von 100 bar, das sind etwa 100 kg/cm², gemessen. In 4.000 m Tiefe sind es bereits 400 bar, also 400 kg/cm². In 10.000 m Tiefe lastet 1 t Gewicht pro cm² auf den Organismen, die dort überhaupt noch leben können. (Die durchschnittliche Tiefe der Ozeane beträgt etwa 4.000 m). Die tiefsten Stellen der Ozeane, das Witjastief und das Challengertief des Marianengraben, liegen im westlichen Pazifischen Ozean bei etwa 11.000 m. Beide Stellen sind benannt nach

Schiffen, von denen aus die Tiefen ermittelt wurden. Doch selbst in Tiefen von über 10.000 m haben Wissenschaftler noch Organismen (z. B. Borstenwürmer) gefunden.

Anders als ihre weiter oben lebenden Artgenossen besitzen Tiefseefische meist keine Schwimmblase. Diese würde durch den enormen Druck in der Tiefe zusammengepresst bzw. platzen, wenn die Tiere aufsteigen. Zudem haben sie chemische Stoffe in ihren Körpern, die die Zerstörung der komplexen Strukturen bestimmter Eiweiße in den Körperzellen verhindert. Tiefseeorganismen sind häufig gallertartig weich; ihre Körper bestehen zum größten Teil aus Wasser, weil Flüssigkeiten im Gegensatz zu luftgefüllten Hohlräumen, nicht komprimierbar sind. Wale, die Lungen besitzen, Luft atmen und trotzdem tief tauchen, haben ebenfalls spezielle Mechanismen entwickelt, um dem Druck standzuhalten (vgl. Kap. 3.1). Allerdings „besuchen“ sie die Tiefsee nur zur Nahrungsaufnahme und leben dort nicht dauerhaft.

GEFRAGT – GUTE STRATEGIEN BEI NAHRUNGS- UND PARTNERSUCHE

Nahrungsarmut ist der Normalzustand in der Tiefsee. Der Hauptgrund dafür ist, dass es in der Tiefsee keine Primärproduzenten gibt wie an Land oder in den lichtdurchfluteten Bereichen (euphotische Zone) der Meere. Primärproduzenten sind Organismen, die aus anorganischen Substanzen organische Stoffe produzieren. Das klassische Beispiel sind grüne Pflanzen, Algen und Cyanobakterien, die Sonnenlicht und CO₂ nutzen, um mittels Photosynthese Biomasse zu erzeugen. In den Ozeanen sind Seegras, pflanzliches Plankton und Cyanobakterien die wichtigsten Primärproduzenten. Aber auch in der Tiefsee, in der lichtlosen (aphotischen) Zone, gibt es Primärproduzenten, die „autarken Lebensgemeinschaften“ als Grundlage dienen. Diese als „Extremophile“ bezeichneten bakterienähnlichen Archaeen nutzen die Chemosynthese als Mechanismus und verstoffwechseln schwefelhaltige Verbindungen in absoluter Dunkelheit. Die benötigten chemischen Stoffe liegen jedoch nur an Hydrothermalquellen



Abb. 3: „Alles Gute kommt von oben“ – dieses Sprichwort trifft besonders für die Organismen der Tiefsee zu. Verwertbare Partikel, meist abgestorbenes Plankton und Kot, rieseln als „Mariner Schnee“ aus den oberen Schichten der Ozeane in die Tiefsee. Foto: JAGO-Team, GEOMAR.

oder an Methanaustrittsstellen (vgl. Kap. 2.3, 2.4) in der Tiefsee vor, sind also lokal begrenzt. Das heißt, die Lebewesen sind entweder auf diese Orte beschränkt oder sie leben von dem, was von oben herabsinkt.

Organisches Material bildet sich fast ausschließlich in der lichtdurchfluteten Zone (trophogene Zone; griech. trophē, „Ernährung“, und gennan, „erzeugen“). Wenn es von oben herabsinkt, wird es von Organismen in der Wassersäule als Nahrung genutzt und durch deren Verdauung wieder in seine Bestandteile zerlegt. Dieses Phänomen heißt „Remineralisierung“, und der Bereich, in dem es stattfindet, wird „tropholytische Zone“ genannt (griech. lytikos, „auflösend“). Am Meeresgrund kommt also relativ wenig „essbares“ Material an – außer, es sterben größere Tiere und sinken rasch in die Tiefsee ab, wie z. B. ein toter Wal (vgl. Kap. 3.1).

Festsitzende (sessile) Organismen in der Tiefsee, die meist von dem leben, was sie aus dem Wasser herausfiltern, sind auf das wenige angewiesen, das von oben als „Meeresschnee“ herabsinkt (Abb. 3). Dieser „Schnee“ besteht größtenteils aus Kotkügelchen, Überbleibseln toter Tiere und winzigen Pflanzenteilchen (meist Plankton). Oder sie leben von Bakterien, die sie direkt fressen oder deren Stoffwechselprodukte sie nutzen und denen sie im Gegenzug Schutz bieten (Symbiose). Bewegliche (mobile)

Organismen hingegen sind in der Lage, der Nahrung aktiv zu folgen. Nacht für Nacht steigen unzählige Organismen aus der Tiefsee in die oberen Wasserschichten auf. Diese „Vertikalwanderung“ ist eine erfolgreiche Strategie, auch wenn die Gefahr besteht, selbst zur Beute nächtlicher Jäger zu werden.

Die meisten Tiere der Tiefsee können lange Phasen ohne Nahrungsaufnahme ertragen. Einige verharren sehr lange regungslos in der Finsternis und schnappen sich das wenige, das vorbeischwimmt. Tiefsee-Anglerfische (Ceratoidae) dagegen locken ihre Beute aktiv mit Licht an. Dazu schwenken sie eine „Angel“ (Illicium) mit einer leuchtenden Beuteattrappe (Esca) hin und her, so dass kleinere Beutegreifer angelockt und dann selbst zur Beute werden. Maul und Magen der Schwarzen Schlinger (Chiasmodontidae) sind extrem dehnbar, wodurch sie Beute verschlingen können, die größer ist als das Tier selbst. Der Pelikanaal (*Eurypharynx pelecyanoides*) setzt auf ein besonders großes Maul, das ihm das Fangen vieler kleiner Lebewesen ermöglicht. Der Fangzahn (*Anoplogaster cornuta*) und einige andere Fische haben riesige Zähne entwickelt, die es Beutetieren nahezu unmöglich machen, zu entkommen (Abb. 4).



Abb. 4: *Anoplogaster cornuta*, der Fangzahnfisch, hat im Verhältnis zu seiner Körperlänge die längsten Zähne aller bisher bekannten Meeresfische. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.

Die Tiefsee ist spärlich besiedelt. Das macht sowohl die Nahrungssuche als auch die Suche nach Fortpflanzungspartnern schwierig. Haben sich weibliche und männliche Tiere gefunden, bleiben sie z. T. lebenslang verbunden – bei einigen Arten der Anglerfisch-Familien verwachsen die sehr viel kleineren Männchen („Zwergmännchen“) mit dem Körper des Weibchens und teilen sich Haut und Blutkreislauf mit ihm. Beim „Zombiewurm“ *Osedax*, der vor allem auf Knochen zu finden ist, sind die Männchen mit 0,2–1,1 mm mikroskopisch klein und leben z. T. in großer Zahl im Körper des 2–7 cm langen weiblichen Tieres (vgl. Kap. 2.7.3).

Nur etwa 15 % der Meeresböden bestehen aus harten Substraten (Fels, Schalen, Manganknollen etc.). Sie werden Hartböden genannt. Die restlichen 85 % sind Weichböden, die aus Sedimenten bestehen. Dieses feinkörnige Substrat entsteht bei der Verwitterung von Gesteinen (lithogene Sedimente) oder – wie in der Tiefsee – aus den Überresten von Organismen (biogene Sedimente). Die Schichten des Weichbodens bilden sich zum Teil über Jahrtausende und beherbergen ein hochkomplexes Ökosystem mikroskopisch kleiner Lebewesen (vgl. Kap. 2.7.7). Ähnlich wie in den Böden, die wir für den Anbau unserer Nahrung nutzen, treten diese Organismen meist zu Millionen im Sediment (Endobenthos) auf. Sie „fressen“ den Boden und durchmischen ihn. Schnecken, Muscheln und Stachelhäuter nutzen die Oberfläche von Weichböden (Epibenthos) als Nahrungsquelle. Schwämme, Korallen und manche Muscheln sind festsitzende Organismen, die Hartsubstrate brauchen, die in der Tiefsee offenbar Mangelware sind. Aus diesem Grund ist nahezu jedes Hartsubstrat gleich mehrfach besiedelt, und die Organismen sitzen sogar auf- und übereinander. Dieses stockwerkartige Siedeln wird analog zu den Etagen eines Regenwaldes als „animal forest“, als „Wald aus Tieren“ bezeichnet.

2.2 GEOLOGIE DER TIEFSEE

Philipp A. Brandl, Anna Krätschell, Nico Augustin

Die Geowissenschaft betrachtet die Erde und damit auch die Entstehung von Tiefsee-Ebenen und untermeerischen Hochgebirgen aus einem anderen Blickwinkel. Um diese Herangehensweise nachzuvollziehen, hilft es, sich die Erde ohne Wasser vorzustellen. Wie die übrigen inneren Planeten unseres Sonnensystems, Merkur, Venus und Mars, ist auch die Erde von einer festen äußeren Schale, der sogenannten Erdkruste, umgeben. Dabei ist unsere Erde jedoch einzigartig darin, dass hier nicht nur eine, sondern zwei unterschiedliche Krustentypen auftreten, die kontinentale Kruste auf der einen und die ozeanische Kruste auf der anderen Seite (Abb. 1).

Die kontinentale Kruste ist im Mittel 35 km mächtig, bis zu 4 Mrd. Jahre alt und hat eine andesitische Zusammensetzung. Im Gegensatz dazu ist die ozeanische Kruste nur 5–8 km mächtig, meist jünger als 200 Mio. Jahre und im Mittel basaltisch zusammengesetzt (Andesit und Basalt sind beides spezifische Vulkangesteine). Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der beiden Krustentypen bewirken, dass auch die mittlere Gesteinsdichte verschieden ist. Die Erdkruste besitzt eine geringere Dichte als der darunter gelegene zähflüssige Erdmantel, wobei ozeanische Kruste eine höhere mittlere Dichte hat als kontinentale Kruste. Deshalb „schwimmt“ die Erdkruste auf dem Erdmantel. Gemäß dem Prinzip der Isostasie, also der Ausgleichsbewegungen der Erdkruste bei Be- und Entlastung, entscheiden Dichte und Mächtigkeit der Erdkruste darüber, wie weit diese aus dem Erdmantel herausragt. Vorstellen kann man sich das in etwa wie einen Eisberg, der aufgrund seiner (im Vergleich zum Meerwasser) geringeren Dichte zu etwa einem Zehntel aus der Wasseroberfläche herausragt. Die kontinentale Kruste weist dabei einen höheren Dichteunterschied zum Erdmantel sowie eine höhere Mächtigkeit im Vergleich zur Ozeankruste auf. Daher liegt die kontinentale Kruste im Mittel deutlich höher als ihre ozeanische Gegenspielerin. Mit dem auf der

Erde vorhandenen Wasser lassen sich die Ozeanbecken daher im Mittel knapp 4.000 m tief füllen, wodurch die Erdoberfläche zu rund 70 % mit Wasser bedeckt wird. Nur die höhergelegenen Bereiche der kontinentalen Kruste erheben sich aus dem ansonsten blauen Planeten und ermöglichen uns ein Leben trockenen Fußes.

DYNAMIK DES OZEANBODENS

Bereits 1915 formulierte der deutsche Meteorologe Alfred Wegener seine Theorie der Kontinentaldrift. Er hatte erkannt, dass die Kontinentalränder Afrikas und Amerikas in ihrem Verlauf perfekt zusammenpassen. Wegener zog daraus 1920 den Schluss, dass die heutigen Kontinente aus dem Superkontinent Pangaea hervorgegangen sein mussten, in dem einst alle größeren Landmassen der Erde vereint gewesen waren und der vom Erdzeitalter des Karbons (vor ca. 335 Mio. Jahren) bis hinein ins Jura (vor ca. 175 Mio. Jahren) existiert hatte. Über den genauen Mechanismus, wie sich die einzelnen Erdplatten fortbewegen, herrschte jedoch lange Unklarheit. Erst in den 1960er Jahren gelang es Geowissenschaftlern, weltweit mehr und mehr Beweise für die Bewegung der Kontinentalplatten zu liefern und so das

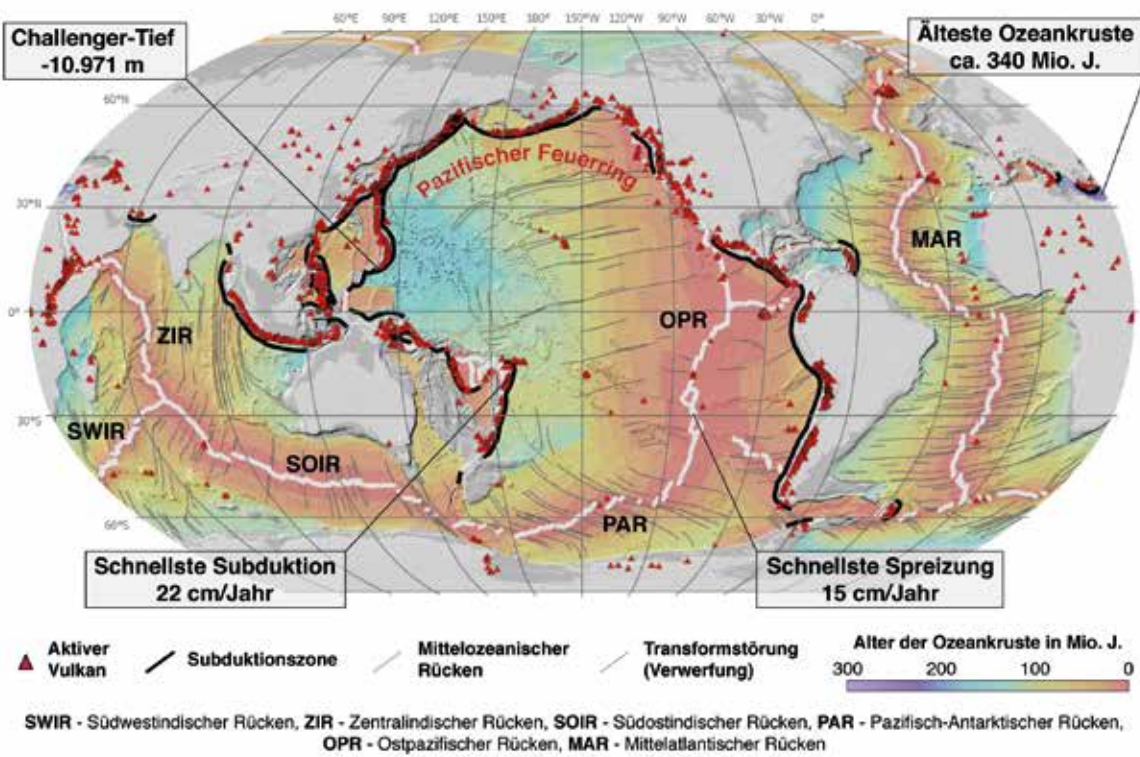


Abb. 1: Weltkarte mit den Bereichen kontinentaler Kruste (grau) und ozeanischer Kruste (farbig). Neben den Subduktionszonen (schwarz) als destruktiven Plattengrenzen und den Mittelozeanischen Rücken (weiß) als konstruktiven Plattengrenzen gibt es auch große Verwerfungszonen (z. B. Transformstörungen), die einzelne Rückensegmente trennen.

Konzept der Plattentektonik (Abb. 2) zu bestätigen. Mithilfe paläomagnetischer Messungen, mittels derer man die Umpolung des Erdmagnetfelds im Laufe der Erdgeschichte verfolgen kann, ließ sich ein spiegelsymmetrisches Streifenmuster an den Flanken der Mittelozeanischen Rücken nachweisen. In Abb. 1 wird dieses Streifenmuster in der ozeanischen Kruste mit – je nach Alter – verschiedenen Farben dargestellt: Rot symbolisiert die jüngsten Bereiche an den Plattenrändern der Mittelozeanischen Rücken, und die Skala reicht über gelb bis hin zur ältesten ozeanischen Kruste in blau und violett. Dies war der Beweis, dass sich entlang der Rücken ständig neue ozeanische Kruste bildet und die ozeanischen Platten dadurch wach-

sen. Der zentrale Graben des Mittelatlantischen Rückens wurde bereits 1952 von einem Team um die US-amerikanischen Geowissenschaftler Bruce Heezen und Marie Tharp entdeckt. Wegen der Entstehung neuer Kruste entlang des Rückens, der sogenannten Ozeanbodenspreizung, entfernt sich Amerika jedes Jahr um rund 2,5 cm von Europa und Afrika. Heute, knapp 70 Jahre später weiß man, dass die Mittelozeanischen Rücken mit mehr als 60.000 km die längste zusammenhängende Gebirgskette der Erde formen. Die Rate, mit der neue Ozeankruste gebildet wird, nennt man Spreizungsrate; sie variiert von nur wenigen Millimetern in der Arktis bis über 15 cm pro Jahr im Ostpazifik!

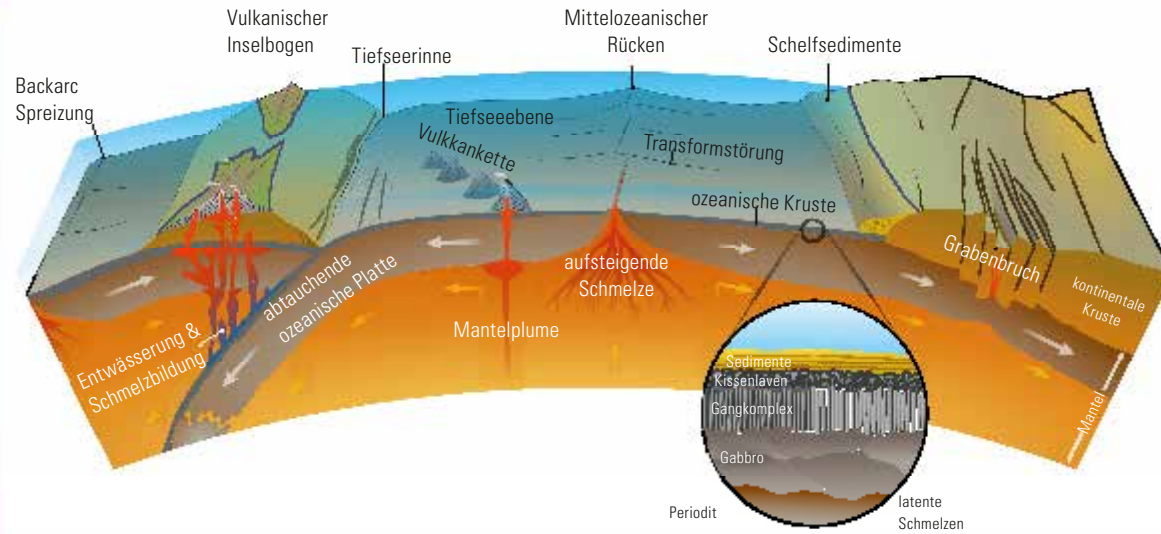


Abb. 2: Schnitt durch die Erdkruste und den oberen Erdmantel. Die Grundzüge der Plattentektonik sind schematisch dargestellt. Magmatische Aktivität findet sich an Mittelozeanischen Rücken durch direkte Aufschmelzung des Erdmantels, entlang von Subduktionszonen durch das Eindringen von Wasser in den Erdmantel und an Mantelplumes oder Hot Spots durch das Aufströmen von heißem Material aus dem tiefen Erdmantel. Kleines Bild: vereinfachter Schnitt durch die ozeanische Kruste.

Durch den kontinuierlichen Zuwachs von Krustenmaterial driftet neu gebildete Kruste langsam von den Mittelozeanischen Rücken weg. Mit dem Altern der ozeanischen Kruste kühlt diese ab, wird dadurch dichter sowie schwerer und sinkt allmählich ab. Dieses Prinzip erklärt, warum die Mittelozeanischen Rücken, je nach Spreizungsgeschwindigkeit, in geringeren Wassertiefen von 2.500-3.500 m liegen, wohingegen die großen Tiefsee-Ebenen meist von alter Ozeankruste gebildet werden und dann Wassertiefen von 5.000 m und mehr erreichen können. Dieses Prinzip kann dazu führen, dass ozeanische Kruste sogar eine höhere Dichte erreicht als der Erdmantel. In diesem Fall taucht die Kruste in den Erdmantel ein, und es bildet sich eine sogenannte Subduktionszone. Fast der gesamte Pazifische Ozean ist von solchen Subduktionszonen mitsamt der dazugehörigen Tiefseerinne und der dahinter angeordneten Reihe von Vulkanen umgeben (Abb. 2). Dies prägte den Begriff des „pazifischen Feuerrings“. Dort, wo die ozeanische Kruste besonders alt und schwer ist, läuft die Subduktion auch mit besonders hoher Geschwindig-

keit ab, zum Teil mit bis zu 22 cm pro Jahr! In den Tiefseerinnen der Subduktionszonen befinden sich auch die tiefsten Orte der festen Erdoberfläche, wie z. B. das Challenger-Tief im Marianengraben, das 10.971 m unter dem Meeresspiegel liegt.

Dieser kontinuierliche Vorgang der Bildung neuer ozeanischer Kruste entlang Mittelozeanischer Rücken und dem „Recycling“ zurück in den Erdmantel entlang von Subduktionszonen ist der Grund dafür, dass die ozeanische Kruste – bis auf wenige Ausnahmen – nicht älter als 200 Mio. Jahre ist (Abb. 1). Zu den Ausnahmen gehören das Mittelmeer (bis 340 Mio. Jahre) und Fragmente von Ozeankruste, die durch plattentektonische Prozesse abgetrennt und z. B. auf kontinentale Kruste aufgeschoben wurden.

AUFBAU DER OZEANISCHEN KRUSTE

Der freie Raum, der durch die fortlaufende Spreizungsbewegung der Erdplatten entlang der Mittelozeanischen Rücken entsteht, muss durch kontinuierliche Entstehung

neuer ozeanischer Kruste kompensiert werden. Seitlich und aus der Tiefe wird Material aus dem Erdmantel „angesaugt“. Die tiefen Gesteine bewegen sich dabei plastisch, sind aber noch nicht geschmolzen. Erfolgt dieser Aufstieg sehr langsam, kann sich die Temperatur allmählich der Umgebung anpassen, und es kommt zu keiner Aufschmelzung (Abb. 2). Dann kann Mantelgestein, das überwiegend aus dem Gestein Peridotit (mit den Mineralen Olivin, Pyroxen, Spinel oder Granat) besteht, bis an den Meeresboden aufsteigen. Entlang großer Bruch- und Störungszonen können gigantische Mantelkomplexe aufgeschlossen werden; diese werden dann „metamorphe Kernkomplexe“ genannt. Durch den hohen Anteil an Eisen und Magnesium reagieren die Minerale dieser Gesteine sehr schnell und intensiv mit dem Meerwasser und verwandeln den Peridotit in einen sogenannten Serpentin. Im Gegensatz dazu kommt es bei höheren Spreizungsraten und dem damit verbundenen schnelleren Aufstieg von Mantelmaterial zu einer Druckentlastung bei nahezu gleichbleibender Temperatur (adiabatische Dekompression). Dies führt dazu, dass eine teilweise Aufschmelzung des Erdmantels stattfindet. Die dabei entstehenden Schmelzen haben eine basaltische Grundzusammensetzung und sind bis zu 1.200 °C heiß.

Wegen der höheren Temperatur und der geringeren Dichte steigen die Schmelzen nach oben und sammeln sich in Magmenkammern unterhalb der Plattengrenze. Wie tief diese liegen, und wie dick die magmatische Ozeankruste darüber ist, hängt erneut von der Geschwindigkeit der Plattenbewegung ab. Bei sehr hohen Spreizungsraten kann die Magmenkammer sehr flach unter dem Meeresboden liegen. Im Ostpazifik konnte man mit einer wissenschaftlichen Tiefbohrung nachweisen, dass Schmelzlinien bis rund 1.000 m unterhalb des Meeresbodens aufsteigen können. Bis in diese Tiefe kann auch das Meerwasser in die Kruste eindringen; es wirkt dort wie eine Art Kühlkreislauf für die Ozeankruste. Nahe der Gesteinsschmelze erhitzt sich das Meerwasser, reagiert mit dem umliegenden Gestein und steigt als heiße Lösung wieder nach oben. Das Abkühlen der Schmelze führt zum Erstarren in der Tiefe.

Das Ergebnis ist ein Tiefengestein, ein sogenannter Plutonit, der aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung überwiegend aus den Mineralen Pyroxen und Plagioklas besteht und so einen Gabbro als Gestein bildet. Diese Lage aus Gabbro bildet die mächtigste Einheit der ozeanischen Kruste und ist typischerweise 2–5 km mächtig.

FEUER UND WASSER

Bevor die Schmelze in der Tiefe erstarrt, findet sie jedoch nicht selten auch den Weg bis zum Meeresboden. Durch das Auseinanderdriften der Erdplatten und den hydrostatischen Druck der aufsteigenden Schmelze entstehen in der Kruste Wegsamkeiten in Form von Rissen und Spalten. Durch das Wechselspiel aus Öffnung eines Ganges, Intrusion von Magma und vergleichsweise schneller Abkühlung der Schmelze in diesen schmalen Gängen, entstehen 1–1,5 km mächtige geschichtete Gangkomplexe (engl. sheeted dyke complex). Durch die einzelnen Gänge wird das Magma nach oben gefördert und bricht nicht selten aus dem Meeresboden – meist in Form von Spalteneruptionen, wie man sie zum Beispiel auch von Island kennt – hervor. Die Krafla-Eruption von 1984 oder die Holuhraun-Eruption des Bárðarbunga-Vulkans, die von August 2014 bis Februar 2015 andauerte, sind namhafte Beispiele. Dabei traten in wenigen Wochen oder Monaten große Mengen Magma an einzelnen Eruptionszentren aus, die durch eine oder mehrere Spalten miteinander verbunden waren. Das Magma fließt als Lava aus und die entsprechenden Lavaströme können riesige Flächen einnehmen.

Unter Wasser bilden sich durch die rapide Abkühlung der heißen Gesteinsschmelze besondere Lavaformen. Die bekannteste davon ist die sogenannte Kissenlava (Abb. 3). Diese entsteht, wenn das Magma beim Kontakt mit Meerwasser „abgeschreckt“ wird und zu einer kugelförmigen Schale erstarrt. Durch nachfließendes Magma brechen diese Kugeln immer wieder auf, so dass Lava-schläuche entstehen (Abb. 3). Erst bei hohen Eruptionsraten bilden sich Lavaströme, die auch unter Wasser

Distanzen von mehreren Kilometern zurücklegen können. Das vulkanische Gestein, das durch den Ausfluss der Lava entsteht, hat eine basaltische Zusammensetzung und wird deshalb „Mittelozeanischer Rückenbasalt“ genannt. Die Mächtigkeit dieser Lava-Abfolgen kann bis zu 500 m erreichen. Nach der geologisch aktiven Phase der Bildung neuer ozeanischer Kruste kühlt diese ab und entfernt sich langsam von den Mittelozeanischen Rücken. Im Laufe der Jahrmillionen lagern sich Sedimente auf der Kruste ab (je nach Wassertiefe weißer Karbonatschlamm oder roter Tiefseeton) und bilden eine im Mittel 400 m mächtige Sedimentbedeckung.

DIE TIEFSEE – EINE GEOLOGISCHE WÜSTE?

Lange dachte man, dass sich die geologische Aktivität der ozeanischen Kruste auf ein Zeitfenster von einigen Hunderttausend bis wenige Millionen Jahre nach ihrer Entstehung beschränkt. Erst durch den Einsatz modernster Technik kann der Ozeanboden bis zu seinem tiefsten Punkt im Marianen-

graben kartiert und mit Tauchbooten und Tiefseerobotern visuell beobachtet und beprobt werden. Heute wissen wir, dass die Geologie des Meeresbodens deutlich komplexer und der Meeresboden nicht so platt, eintönig und tot ist, wie man jahrzehntelang angenommen hatte. Geologische Aktivität auf alter ozeanischer Kruste kannte man bislang nur von der Nähe zu Subduktionszonen und Hot Spots. Letztere werden durch aktiv aufsteigende, heiße Manteldiapire (engl. mantle plumes) verursacht. Der damit einhergehende Vulkanismus führt zur Entstehung von Unterseebbergen oder Ozeaninseln wie Hawaii. Kürzlich fanden Forscher des GEOMAR jedoch Hinweise darauf, dass auch kleinräumig Vulkanismus auf mehrere Millionen Jahre alter Ozeankruste auftreten kann. Hier steht die Forschung jedoch erst am Anfang, denn die Erkundung des Meeresbodens ist extrem zeit- und kostenintensiv. Weltweit sind gerade einmal 10 % der Fläche der Tiefsee mit Fächerecholot kartiert, und es bleibt die Frage, was auf den restlichen 90 % noch entdeckt werden wird.

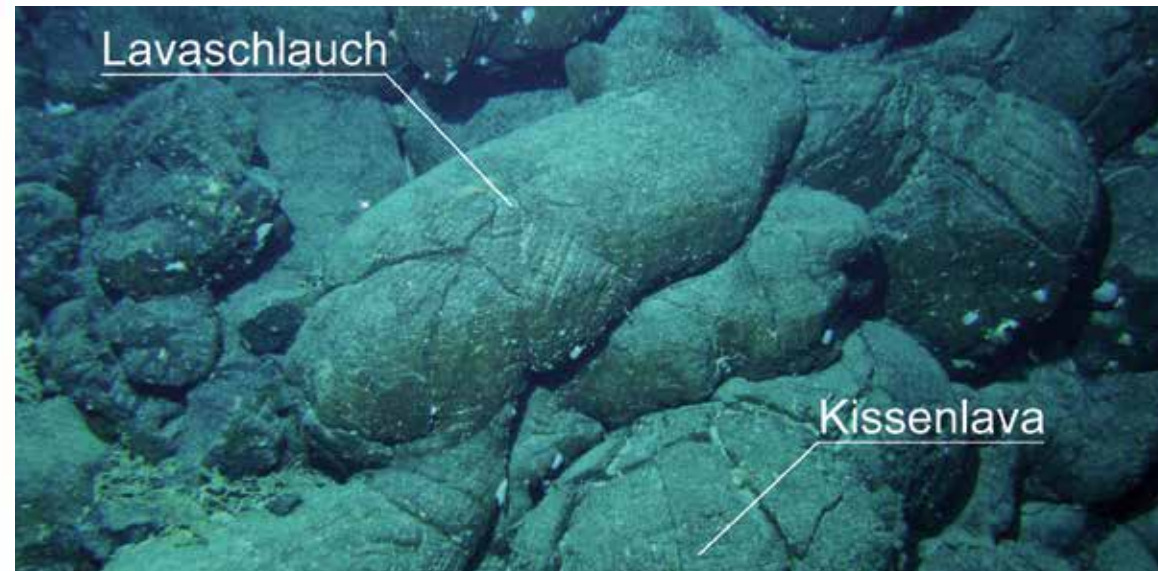


Abb. 3: Kissenlava und Lavaschlauch am Mittelatlantischen Rücken, ca. 500 km südwestlich von Island. Das Foto wurde in rund 730 m Wassertiefe vom GEOMAR-Tiefseeroboter PHOCA aufgenommen.

2.3 HOTSPOTS DES LEBENS – DIE GEOLOGISCHEN VORAUSSETZUNGEN

Sven Petersen

Geologische Prozesse und dabei entweichende wässrige Lösungen sind in vielen Bereichen der Ozeane für die Entstehung von Oasen in der Tiefsee verantwortlich. Das Leben dort ist an die speziellen Eigenschaften der auftretenden Gesteine und chemischen Lösungen angepasst und unterscheidet sich daher erheblich von dem der normalen Tiefsee-Ebenen oder Seeberge. Zu den außergewöhnlichen Lebensräumen gehören dabei die sogenannten Schwarzen Raucher, die sich in der Umgebung vulkanisch aktiver Bereiche bilden und an denen heiße (hydrothermale) Lösungen austreten. Dazu gehören aber auch Austrittsstellen von Gasen und Lösungen mit geringerer Temperatur, die sich häufig in den Schelfgebieten der Kontinente oder in sehr stark sedimentierten Bereichen der Tiefsee finden. Diese werden unter dem Begriff „Cold Seeps“ („kalte Sickerstellen“) zusammengefasst, obwohl diese Stellen sehr unterschiedlich sein können.

SCHWARZE UND ANDERE RAUCHER

Hierbei handelt es sich um sulfidische (schwefelhaltige) Ablagerungen, die sich an submarinen Plattengrenzen bilden, an denen durch das Zusammenwirken von vulkanischer Aktivität und Meerwasser ein Wärme- und Stoffaustausch zwischen den Gesteinen des Meeresbodens und dem Ozean stattfindet. Kaltes Meerwasser wird entlang von tief reichenden Spalten und Rissen z. T. mehrere Kilometer in den Meeresboden gepresst und in der Nähe einer Magmakammer auf Temperaturen von mehr als 400 °C erhitzt. Das Wasser reagiert dabei chemisch mit dem umgebenden Gestein und löst Metalle heraus. Aufgrund der Erwärmung verringert sich die spezifische Dichte, und das veränderte Meerwasser steigt sehr schnell zum Meeresboden auf, wo es unter hohem Druck aus kaminähnlichen Schloten, den „Schwarzen Rauchern“, am Meeresboden austritt (Abb. 1).

Beim Kontakt von heißen Lösungen mit kaltem Meerwasser werden feine Sulfidpartikel ausgefällt, die mit den ausströmenden Lösungen in der Wassersäule verteilt werden und die namensgebende Färbung der Suspensionswolke hervorrufen. Die Farbe der Raucher hängt jedoch von der Bildungstemperatur und der chemischen Zusammensetzung ab. So werden „echte“ Schwarze Raucher nur bei sehr hohen Temperaturen gebildet (über 300 °C), da nur hier dunkel gefärbte Sulfide entstehen. Bei niedrigeren Temperaturen werden auch Sulfate und Silikate gebildet, die das Scheinwerferlicht hell reflektieren. So gibt es, je nach Mischungsverhältnis auch Graue oder gar Weiße Raucher. Befindet sich unter den ausgefällten Mineralen in größeren Mengen Schwefel, kann die Suspension sogar gelbliche Farbtöne annehmen. Sind die Metallionen bereits im Untergrund ausgefällt worden, kann es auch zum Austritt heißer, transparenter Lösungen kommen.

Durch den Kollaps der Sulfidstrukturen bilden sich mit der Zeit regelrechte Hügel aus, die im Lauf der Jahrzehnte an Höhe und Breite zunehmen (Abb. 2). Aufgrund des Metallgehaltes der Raucher gibt es derzeit ein steigendes Interesse an diesem Rohstoffpotenzial (vgl. Kap. 4.1.2). Das schwefelreiche Wasser mit Beimengungen aus Methan und Wasserstoff bildet die Lebensgrundlage von Mikroorganismen, die unabhängig vom Licht ihre Energie beziehen. Auf Basis dieser Chemosynthese haben sich hier spezielle Lebensgemeinschaften mit vielen endemischen Arten entwickelt. Die

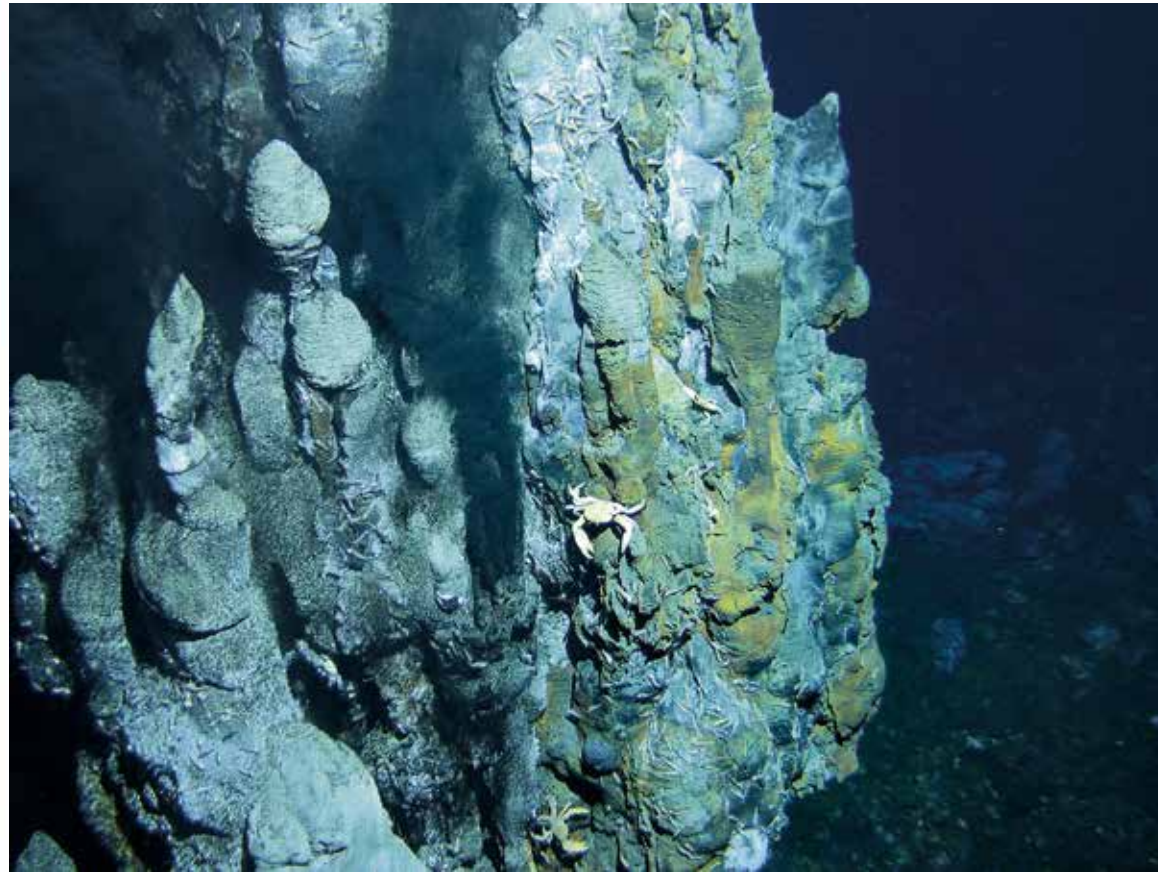


Abb. 1: Flanke eines Schwarzen Rauchers im südlichen Atlantik in 3.000 m Wassertiefe. Die Krebse und Garnelen befinden sich nur wenige Zentimeter von den über 300 °C heißen Austrittsstellen entfernt. Die schnelle Abkühlung bei der Mischung mit dem kalten Meerwasser „rettet“ sie. Foto: ROV Kiel6000.

Mischungsverhältnisse der Gase, die chemische Zusammensetzung der Gesteine sowie die Abstände der einzelnen Regionen mit hydrothormaler Aktivität führen zu extrem unterschiedlichen Habitaten mit teilweise sehr verschiedenen Faunengemeinschaften in den einzelnen Ozeanen.

DURCHGESICKERT: COLD SEEPS

Als „Cold Seeps“ bezeichnet man Austrittsstellen von methan- und schwefelwasserstoffreichen Lösungen am



Abb. 2: 3D-Modell einer Gruppe von Schwarzen Rauchern aus dem nordöstlichen Pazifik. Die höchste Struktur ist 14 m hoch. Aufgrund der geringen Sichtweite unter Wasser sind solche Strukturen nicht auf Fotos zu bannen. Quelle; T. Kwasnitschka, GEOMAR.

Meeresboden, wie sie erstmals in den 1980iger Jahren vor der Küste der USA beobachtet wurden. Heute sind eine Vielzahl von Cold Seeps entlang der Kontinentalhänge, aber auch in der Tiefsee bekannt. Dabei beschränkt sich deren Auftreten nicht auf aktive Kontinentalränder, an denen durch die Subduktion der ozeanischen Platte unter Kontinente Fluide aus den Sedimenten freigesetzt werden (wie z. B. an der Westküste der USA, wo durch das Abtauchen der pazifischen Platte unter Nordamerika die Bildung solcher Cold Seeps ermöglicht wird). In den letzten Jahrzehnten wurden auch an sogenannten passiven Kontinentalrändern, z. B. im Atlantik, dem Golf von Mexiko oder dem Schwarzen Meer, solche Cold Seeps beobachtet. In allen Fällen werden aus Sedimenten, die sich in küstennahen Gewässern abgelagert haben, durch tektonische Prozesse gasreiche Lösungen freigesetzt, die entlang von Störungen oder Schichtgrenzen an den Meeresboden wandern und dort die Entstehung chemosynthetischer Lebensgemeinschaften ermöglichen. Das Austreten der Lösungen am Meeresboden kann im Zusammenhang mit der Bildung von Öl- und Gasvorkommen, Schlammvulkanen oder dem Auftreten von Salzstöcken erfolgen.

GASHYDRATE/METHANEIS

Durch die Entwässerung von Mineralen und die Umwandlung organischen Materials in den Sedimenten werden wässrige Lösungen mit hohen Konzentrationen an Methan und höheren Kohlenwasserstoffen gebildet. Dies geschieht häufig unter Luftabschluss und teilweise bei erhöhten Temperaturen von über 80 °C in Tiefen unter 2.000 m. Aufgrund des Drucks der auflagernden Sedimente werden die Fluide und Gase nach oben gepresst. Beim Aufstieg des Methans verbindet es sich bei größeren Wassertiefen (unter ca. 400 m) und tiefen Temperaturen (unter 10 °C) mit Wasser zu festen, eisartigen Verbindungen, den sogenannten Gashydraten. Die Gashydrate finden sich dabei in den obersten, oft mehrere Hundert Meter mächtigen Sedimentlagen. Darunter wird es, je nach geothermischem Gradienten, zu warm. Aufgrund der Oxidation des Methans durch mikrobielle Aktivität bildet sich am Meeresboden Kalziumkarbonat, welches in der Umgebung der Cold Seeps zur Bildung von großflächigen Kalkablagerungen führen kann (Abb. 3). Es wurden bereits Kalkformationen dokumentiert, die sich bis zu 90 m über den Meeresboden erheben. Die Cold Seeps werden von komplexen Lebensgemeinschaften als Habitate genutzt (vgl. Kap. 2.5). Die Gashydrate selbst sind aufgrund ihres möglichen Potenzials als Energierohstoff (vgl. Kap. 4.1.3) sowie der möglichen klimaschädlichen Wirkung bei der Freisetzung ins Blickfeld der Wissenschaft geraten.

UNTERMEERISCHE ASPHALTVULKANE

Im Golf von Mexiko wurden 2003 bei der Untersuchung von Cold Seeps in Wassertiefen von ca. 3.000 m Asphaltablagerungen entdeckt, die größere Flächen am Meeresboden bedecken und chemosynthetische Lebensgemeinschaften beherbergen. Diese Asphaltmassen im Bereich der Campeche-Hügel ähneln in Form und Größe normaler Seillava, wie man sie von basaltischen Laven an Land kennt; sie wurden daher „Asphaltvulkane“ oder „Asphaltlaven“ genannt. Frische Asphaltlaven sind verformbar und werden schnell von Mikrobenmatten besiedelt, ältere Ablagerungen dagegen sind zäher, weisen Risse und Brüche

auf und werden von Röhrenwürmern und anderen Lebewesen besiedelt.

Der Asphalt steigt aus dem Untergrund – vermutlich in einer verflüssigten Form – durch die überlagernden Sedimente zum Meeresboden auf. Die Prozesse, die zum Auftreten der Asphaltablagerungen am Meeresboden führen, sind noch nicht vollständig verstanden. Das Auftreten von klar unterscheidbaren Ablagerungseinheiten an den Campeche-Hügeln im Golf von Mexiko deutet mehr auf ein schnelles episodisches Austreten hin (ähnlich einer vulkanischen Eruption) als auf ein langsames, aber kontinuierliches Hervorquellen, welches durch den leichten Auftrieb

des frischen Asphalts verursacht werden könnte. Die Auslösemechanismen für die Asphaltausbrüche sind vermutlich in tektonischer Aktivität, eventuell auch in Bewegungen der Salzstöcke im Untergrund (siehe unten) zu suchen. Neben den Ablagerungen im Golf von Mexiko wurden ähnliche Asphaltablagerungen auch aus dem Santa-Barbara-Becken vor Kalifornien beschrieben.

SALZSEEN IN DER TIEFSEE

Dass in der Tiefsee auch nach vielen Jahren noch unerwartete Entdeckungen gemacht werden können, zeigte sich vor wenigen Jahren im Golf von Mexiko gezeigt. Hier



Abb. 3: Beprobung eines Karbonatblockes an einer kalten Quelle durch eine Säge während der Forschungsfahrt S0210 des Forschungsschiffes FS Sonne (2010). Foto: ROV Kiel6000.

wurden im Jahre 2014 während eines Tauchgangs mit einem ferngesteuerten Tauchroboter merkwürdige Wannen am Meeresboden beobachtet, die am Rand von einer Vielzahl von Muscheln bewachsen sind (Abb. 4). Die Bildung dieser Salzseen hängt mit dem Vorkommen von Salzstöcken im Untergrund zusammen. Hier, im Golf von Mexiko, wird das Salz teilweise aufgelöst und – aufgrund von Wärmezufuhr aus dem Untergrund – nach oben transportiert. Beim Kontakt mit dem kalten Meerwasser kommt es zu Ausfällungsreaktion, die eben auch solche „Badewannen“ und ihre Salzseen ausbilden können. Die größte dieser Senken hat einen Durchmesser von 30 m und ist mehrere Meter tief.

Zu den Besonderheiten dieser Salzseen gehört neben der hohen Salz- und Methankonzentration sowie der geringen Sauerstoffkonzentration auch die erhöhte Temperatur

in der „Badewanne“ (17 °C verglichen mit nur 3 °C in der Umgebung). Aufgrund dieser Kombination sind solche Unterwasser-Salzseen (engl. brine pools) jedoch für die meisten Arten absolut tödlich. Dies spiegelt sich in zahlreichen Kadavern wieder, die in der Salzlake zu finden sind, und führte zu einer entsprechenden Namensgebung: „Jacuzzi der Verzweiflung“. Aufgrund des hohen Salzgehaltes ist die Dichte der Lösungen deutlich höher als die von normalem Meerwasser, darum sammeln sie sich in lokalen Senken. Bei anderen salzhaltigen Seen unter Wasser hat man sogar das Auftreten von Wellen beobachtet, die sich am „Strand“ brechen. Bakterien, die austretendes Methangas nutzen, bilden, ebenso wie an den Schwarzen Rauchern, die Nahrungsgrundlage für andere Organismen. Allerdings sind die Bedingungen für eine spezifische Faunengemeinschaft nur an den „Ufern“ eines brine pools ideal.

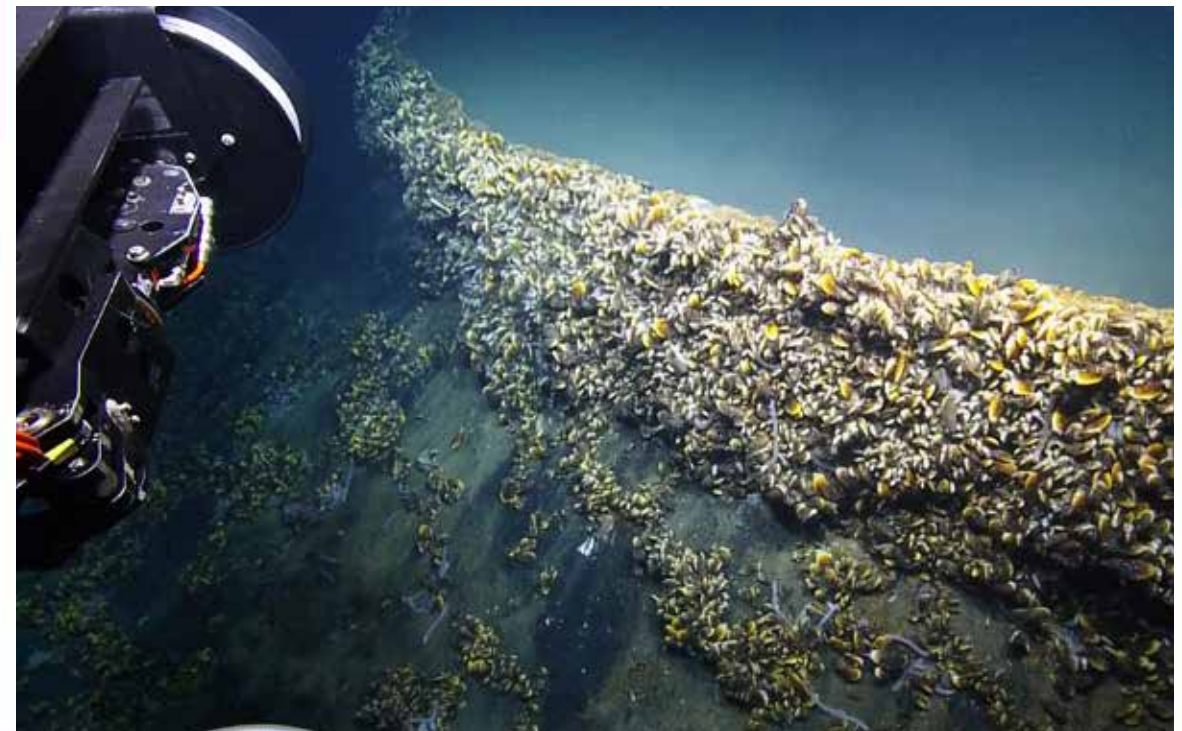


Abb. 4: „Ufer“ eines Salzsees am Grunde des Golfs von Mexiko. Quelle: Ocean Exploration Trust/NautilusLive.

56 2.4 DIE UNABHÄNGIGEN – OASEN DES LEBENS AN HYDROTHERMALQUELLEN

Terue Cristina Kihara, Gritta Veit-Köhler

Seit sie in den späten 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts entdeckt wurden, sorgen Hydrothermalquellen immer wieder für Überraschungen. In der sonst von größeren Tieren eher dünn besiedelten, nahrungsarmen Tiefsee, können diese vergänglichen Ökosysteme Oasen voller Leben sein.

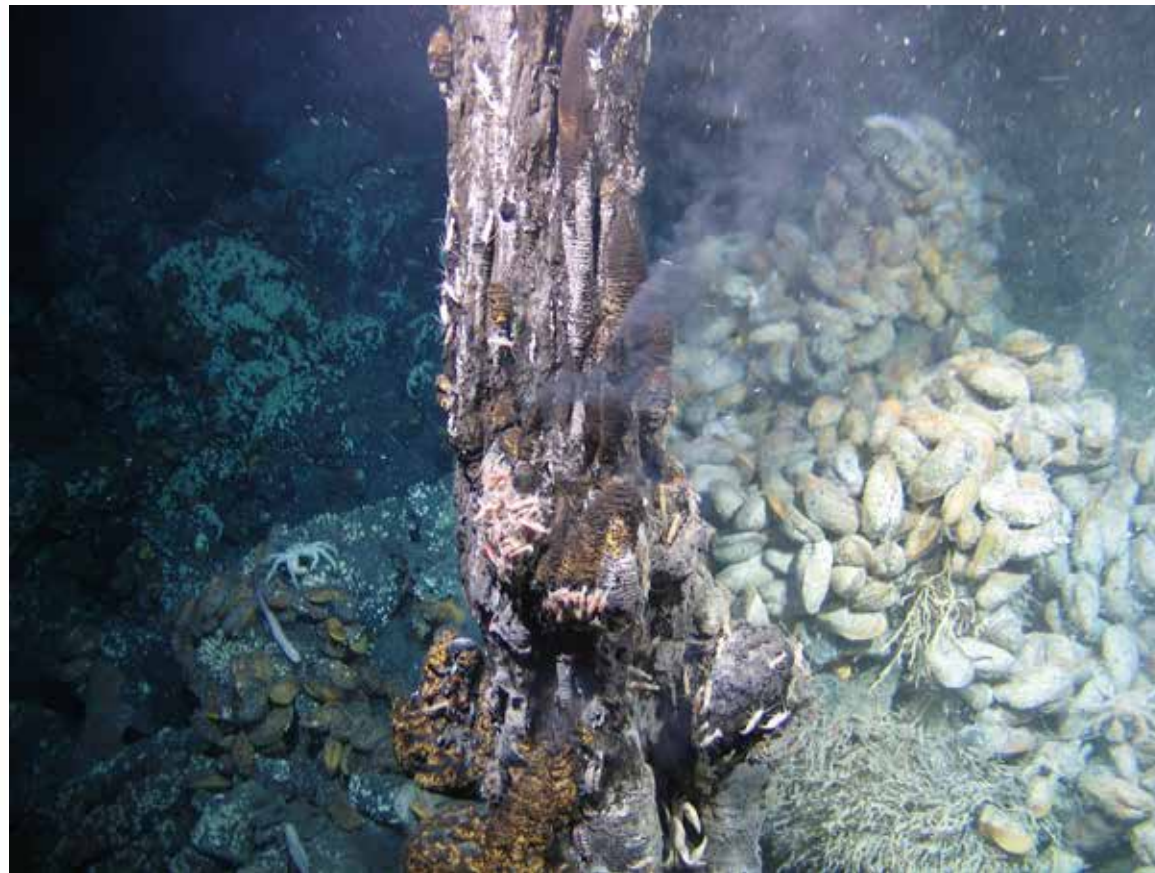


Abb. 1: Deutlich sichtbar strömt das heiße, mit Schwefelwasserstoff angereicherte Fluid aus einer Spalte an der Flanke eines aktiven Schwarzen Rauchers. Krabben und Garnelen besiedeln diesen Lebensraum. Foto: ROV-Team/GEOMAR.



Abb. 2: Anderer Raucher, andere Zonierung: Anemomen, Garnelen, Krabben und Muscheln teilen sich die Mikrohabitate an den Flanken eines Tiefseeschlotes. Foto: BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).

Organismen, die an heißen Quellen leben, müssen mit besonderen Umweltbedingungen zurechtkommen: Giftiger Schwefelwasserstoff strömt gemeinsam mit gelösten metallischen Verbindungen aus dem Meeresboden und im Vergleich zur kalten Umgebung sind die stark erhöhten Wassertemperaturen für Tiefseeorganismen eher ungewohnt. Direkt an den Schloten leben die „härtesten“ Tiere, weiter weg die Organismen, die vom Nahrungsreichtum profitieren, aber nicht so gut mit den Extrembedingungen umgehen können. Das führt zu typischen und je nach Meeresregion unterschiedlichen Zonierungen, die von unterschiedlichen Charakterarten dominiert werden (Abb. 1–3).

Je mehr Hydrothermalfelder erkundet werden, desto mehr, ganz speziell an diese Lebensräume angepasste Tierarten werden entdeckt. Meist gehören die neuen Arten zu Ringelwürmern (Annelida, z. B. Poly- und Oligochaeta) und Krebsen (Crustacea), aber auch Fische (Pisces), Schwämme (Porifera) oder Seescheiden (Ascidiacea) sind



Abb. 3: Große Ansammlungen von Muscheln der Gattung *Bathymodiolus*, Verwandten unserer heimischen Miesmuscheln, leben in nächster Nähe zu den Schloten. Auf den Muscheln wiederum sitzen winzige Schnecken. Foto: ROV-Team/GEOMAR.

an den heißen Quellen zu finden. Zu den Lebensgemeinschaften gehören Vertreter der Nesseltiere (Cnidaria) ebenso wie Stachelhäuter (Echinodermata, z.B. Seesterne und Seeigel). Auch Muscheln (Bivalvia) und Schnecken (Gastropoda), die zu den Weichtieren (Mollusca) zählen, können in großen Mengen an diesen Hotspots des Lebens vorkommen.

Alle haben eins gemeinsam: Ihre Nahrung wird nicht von Pflanzen in den lichtdurchfluteten oberen Zonen der



Abb. 4: Mollusca (Schnecken und Muscheln) von Hydrothermalquellen: A. *Alviniconcha marisindica*; B. *Bathymodiolus septemdierum*; C. *Phymorhynchus* sp.; D, E. Napfschnecken; F. *Provanna* sp.; G. Napfschnecke; H. Unbekannte Schnecke; I-K. verschiedene Individuen der „Schuppenfußschnecke“ *Chrysomallon squamiferum*. Maßstab: 0,5 cm. Fotos: Terue C. Kihara und BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).



Abb. 5: Schnecken der Gattung *Alviniconcha* kommen oft in dichten Aggregationen vor. Hier gemeinsam mit Garnelen, Krabben und Muscheln. Foto: ROV-Team/GEOMAR.

Ozeane produziert, sondern direkt an den Hydrothermalquellen in der lichtlosen Tiefe. Das Sonnenlicht spielt also als Energielieferant keine Rolle. An Schwarzen Rauchern ist die in anorganischen chemischen Verbindungen gespeicherte Energie Grundlage allen Lebens (vgl. Kap. 4.1.2).

Primärproduzenten an Hydrothermalquellen sind Schwefelbakterien, chemoautotrophe Mikroorganismen. Sie oxidieren den giftigen Schwefelwasserstoff (H_2S), der mit den heißen Fluiden aus den Schloten strömt. Die dabei frei werdende Energie nutzen die Schwefelbakterien zur Bildung von organischen Kohlenstoffverbindungen. Die Bakterien können frei im Meerwasser leben oder dichte Matten bilden. Schwefelbakterien können aber auch in Symbiose mit Tieren leben.

Riftia pachyptila, ein zu den Polychaeten zählender Röhrenwurm, ist die bekannteste Art, die mit und von einer solchen Symbiose lebt. Die Individuen besitzen weder einen Mund noch ein Verdauungssystem. Dennoch können sie Körperlängen von bis zu drei Metern erreichen. Die chemosynthetische Symbiose mit Schwefelbakterien ermöglicht es ihnen: *Riftia*-Würmer kultivieren ihre Bakterien in einem speziellen Organ, dem Trophosom (frei über-



Abb. 6: Dicht an dicht sitzen Garnelen der Gattung *Rimicaris* an den Ausströmöffnungen eines Schwarzen Rauchers. Foto: ROV-Team/GEOMAR.

setzt: „Ernährungskörper“). Mit einer eigenen Art Hämoglobin (rotem Blutfarbstoff) können sie H_2S und Sauerstoff in ihren Kiemen binden und direkt zu den Bakterien ins Trophosom transportieren. Die Bakterien leben geschützt und versorgt, der Wurm ernährt sich von den Bakterien. Eine „Win-Win“-Situation.

Mit Endosymbionten sind auch viele Mollusken an Hydrothermalquellen ausgestattet. Die mit unseren heimischen Miesmuscheln verwandte *Bathymodiolus septemdierum* (Abb. 4 B) kultiviert Bakterien in ihren vergrößerten Kiemen. Die „haarige“ Schnecke *Alviniconcha marisindica* (Abb. 4 A) lebt oft in größeren Ansammlungen rund um die

Ausströmöffnungen der Schlotte (Abb. 5), wo die Tiere warmem, sulfidreichem Wasser ausgesetzt sind. Auch ihre Kiemen sind stark entwickelt und besitzen spezialisierte Zellen, in denen sie endosymbiontische Bakterien beherbergen. Ihr Verdauungstrakt ist wie bei *Riftia* reduziert.

Mit rund 60 Gattungen und über 100 Arten sind die Gastropoden die artenreichste und am besten untersuchte Gruppe an Hydrothermalquellen. Es ist die Aufgabe von Taxonomen neue Arten zu beschreiben und in das bestehende System der Organismen einzuordnen. Die hohe Zahl von bekannten Arten mag auch mit der Anzahl von Wissenschaftlern, die sich mit Schnecken beschäftigen,

zusammenhängen. Hydrothermalarten dieser attraktiven Tiergruppe haben außer Symbionten noch weitere Besonderheiten zu bieten: Oft sind ihre Schalen, wie auch die von Muscheln, von dicken Krusten und abgelagerten Mineralien überzogen. Sie können schwarz von amorphem Pyrit (Eisensulfid) oder rötlich-braun durch profanen Rost werden (Abb. 4, 5). In den durch die Ablagerungen entstehenden Rissen und Spalten leben wiederum Bakterien, die gerne von anderen Organismen abgeweidet werden. Eine ganz besondere Schnecke ist *Chrysomallon squamiferum* (Abb. 4 I–K). Die „Schuppenfußschnecke“ (Eng-

lisch: Scaly-foot Gastropod) hat hunderte von schuppenförmigen Hautausstülpungen an ihrem Fuß, die mit Pyrit überzogen sein können. Dieses Eisensulfid kann je nach geographischer Herkunft der Schnecke sogar magnetisch sein. Andere Schnecken wie *Phymorhynchus* (Abb. 4 C) werden oft in der Umgebung von versiegenden Quellen beobachtet. Sie leben wahrscheinlich als Aasfresser oder räuberisch von anderen Weichtieren. Aber zurück zu den Bakterien. Sie werden von vielen Tieren auch als Episymbionten auf der Körperaußenseite kultiviert. Viele Krebse haben Techniken entwickelt, mit

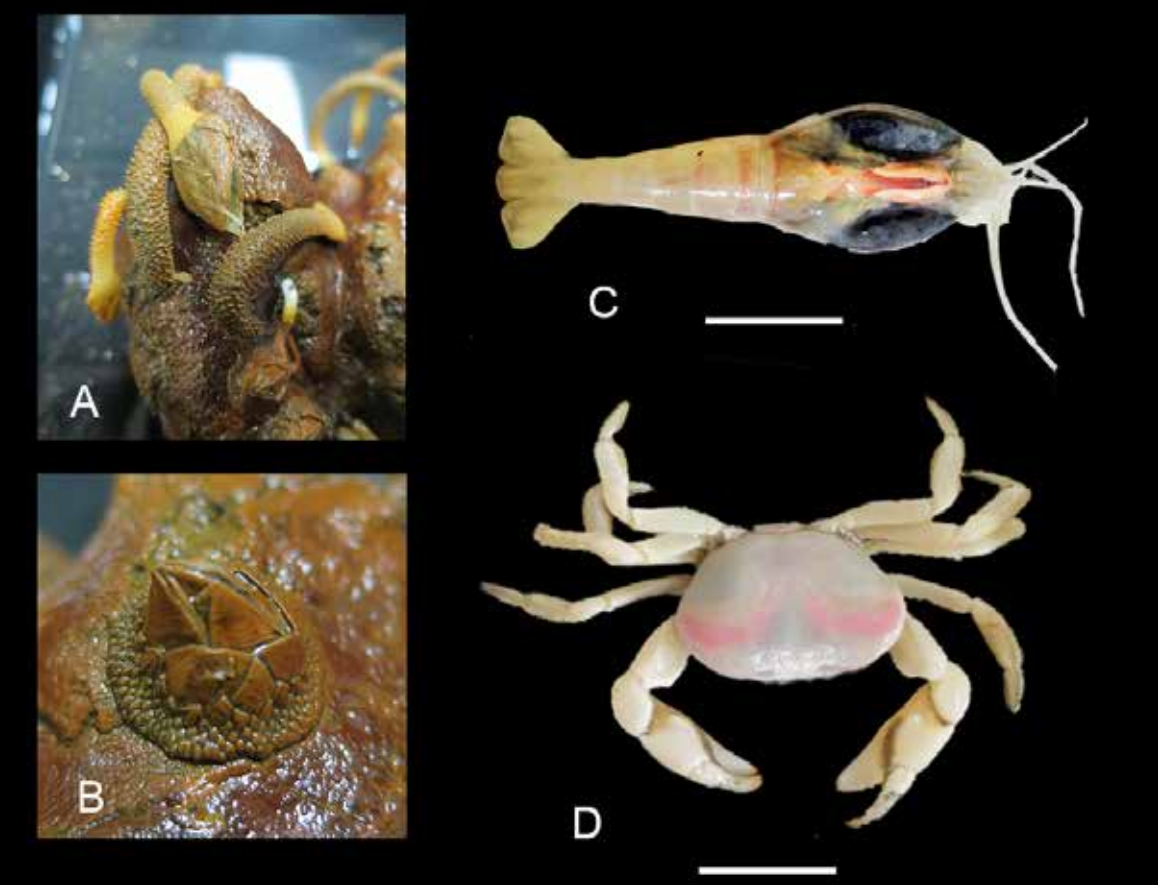


Abb. 7: Crustacea (Krebse) von Hydrothermalquellen: A. Die Entenmuschel *Neolepas marisindica*; B. Seepocke; C. *Rimicaris kairei*; D. *Austinograea rodriguezensis*. Maßstab: 2 cm. Fotos: Terue C. Kihara und BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).



Abb. 8: Fisch der Familie Zoarcidae (Aalmuttern). Einige Aalmuttern haben sich an das Leben an Hydrothermalquellen angepasst. Maßstab: 3 cm. Fotos: BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) und Terue C. Kihara.

denen sie Bakterien züchten. Garnelen der Gattung *Rimicaris* (Abb. 6, 7 C) leben in extrem hohen Dichten von bis zu 2.500 Individuen pro Quadratmeter an den Wänden aktiver Schlote, wo die Wassertemperaturen 10 bis 30 °C betragen. Als Primärkonsumenten ernähren sich diese Krebse unter anderem von Bakterien, die auf ihren Mundwerkzeugen leben. Hingegen kommt die Krabbe *Austinograea rodriguezensis* (Abb. 7 D) zwar gemeinsam mit den *Rimicaris* Garnelen vor, ernährt sich aber carnivor (fleischfressend) oder lebt von Aas. Die festsitzenden Entenmuscheln der Gattung *Neolepas* (Abb. 7 A), auch sie sind Krebstiere, haben angepasste Mundwerkzeuge mit denen sie besonders kleine Nahrungspartikel und Bakterien aus dem Wasser filtrieren können. Einige Arten züchten aber Bakterien auf speziell geformten Borsten, die sie in die Strömungen der Hydrothermalquellen halten, damit die Mikroorganismen gut gedeihen können. Auch Fische haben sich an das Leben an den heißen Quellen der Tiefsee angepasst. Die Familie Zoarcidae (Aalmuttern) hat einige Arten hervorgebracht, die an Hydrothermalquellen leben (Abb. 8). Aber ihre Anpassungen sind weder körperlicher Natur noch haben die Tiere ihre Nahrungsgewohnheiten umgestellt. Sie müssen biochemische Anpassungsmechanismen entwickelt haben, um in diesem extremen Lebensraum nahe der aktiven Raucher überleben zu können. Mit ihrem Futter sind sie

nicht wählerisch: kleine Krebse, Würmer, Schnecken und ab und zu ein Bissen von den Kiemen der großen *Riftia*-Würmer. Auch wenn also nicht alle an den Schloten lebenden Tierarten Bakterien fressen oder gar eine Symbiose mit Bakterien eingehen, so sind doch alle von diesen chemosynthetischen Mikroben abhängig. Und das wirft einige Fragen auf: Hydrothermalquellen sind im Vergleich zur umgebenden Tiefsee nur winzig kleine Flecken, die zudem oft weit voneinander entfernt liegen. Ihre Existenz ist zeitlich begrenzt. Die angepassten Lebensgemeinschaften können aber nur dort existieren. Wie gelangen die Tiere von einem Hydrothermalfeld zum anderen? Wie gelingt es ihren Nachkommen den nächsten Raucher zu erreichen und zu besiedeln? Als Beispiel dienen noch einmal die festsitzenden Entenmuscheln (Krebse) der Gattung *Neolepas*. Ihre Larven verbreiten sich frei im Wasser schwebend. Sie fressen während ihrer Reise ins Ungewisse nicht, leben aber von einem großen Dottervorrat, mit dem sie ausgestattet sind. So können sie bis zu drei Monate im Plankton leben, bevor sie sich festsetzen müssen. Das geht nur gut, wenn sie in dieser Zeit eine Hydrothermalquelle finden. Mit ihrer Larvalphase, die fünf- bis sechsmal länger als die jeder bekannten Flachwasserart ist, sollte das dem einen oder anderen Tier gelingen... ab und zu.

2.5 COLD-SEEP-ÖKOSYSTEME – OASEN ODER LEBEN AM LIMIT

Stefan Sommer, Peter Linke

Die uns vertraute Grundlage des Lebens ist die Photosynthese, die Erzeugung organischer Kohlenstoffverbindungen mithilfe des Sonnenlichts durch Pflanzen, Algen und Cyanobakterien (Primärproduktion). Diese Organismen werden als „autotroph“ („sich selbst ernährend“) bezeichnet und dienen uns Menschen und anderen heterotroph („sich von anderen ernährend“) lebenden Tieren als Nahrung. In den lichtlosen Tiefen der Ozeane wurden allerdings Ökosysteme entdeckt, die gänzlich anders funktionieren.

Im Februar 1977 erkundete das Tauchboot *Alvin* des weltbekannten Woods Hole Institut für Ozeanografie in der Nähe der Galapagos-Inseln hydrothermale Quellen in Wassertiefen von bis zu 2.700 m. Aus teils 60 m hohen Schloten und tiefen Rissen im Meeresboden tritt dort warmes und an manchen Stellen 460 °C heißes Wasser aus. Atemberaubende Aufnahmen offenbarten bis dahin unbekannte Lebewesen, deren Lebensgrundlage die chemische Umsetzung von Methan (CH_4) und Hydrogensulfid darstellt, die beide hier in großen Mengen freigesetzt werden.

Mitte der 1980er Jahre wurde im Golf von Mexiko ein ähnliches Ökosystem entdeckt, das jedoch auf einer weniger spektakulären „kalten“ Form der Fluid-Freisetzung beruht. Die Temperatur der austretenden Fluide ist gegenüber dem Umgebungswasser kaum erhöht, zudem sickern diese Fluide nur langsam ins Bodenwasser. Daher die englische Bezeichnung „cold seeps“ („kalte Sickerstellen“) für dieses Phänomen. In Cold Seeps gelangen unter anderem CH_4 und Sulfid als Gas oder in Wasser gelöst durch Wegsamkeiten und Risse im Meeresboden (Sediment) an die Oberfläche und treten dort in die Wassersäule über (Abb. 1). Viele Cold Seeps kommen entlang aktiver Kontinentalränder, in sogenannten Subduktionszonen vor (vgl. Kap. 2.2).

CHEMOSYNTHESE – DAS ALTERNATIVE LEBEN IN COLD SEEPS

In Cold Seeps stehen enorme Mengen chemisch gebundener Energie, hauptsächlich in Form von Methan (CH_4) und Sulfid, bereit, diese wird von speziellen Lebewesen zur Energiegewinnung und der Produktion von Biomasse genutzt. Dieser fundamental wichtige Prozess wird Chemosynthese genannt und bildet die Lebensgrundlage des Seep-Ökosystems.

Methan ist ein farb- und geruchloses, brennbares Gas, das nur von bestimmten bakterienähnlichen Organismen – man nennt sie Archaeen – direkt zur Energiegewinnung genutzt werden kann. Ihnen stehen dafür im Wesentlichen zwei Reaktionspfade zur Verfügung: Haben die Archaeen an der Sedimentoberfläche Zugang zu Sauerstoff, kann das Methan aerob umgesetzt werden. Bei dieser Reaktion entsteht reichlich biologisch nutzbare Energie, die für die Synthese von organischen Kohlenstoffverbindungen genutzt werden kann. Dieser Prozess läuft fast ausschließlich in der Wassersäule ab, da der heiß begehrte Sauerstoff oft nur wenige Millimeter tief in den Meeresboden eindringt.

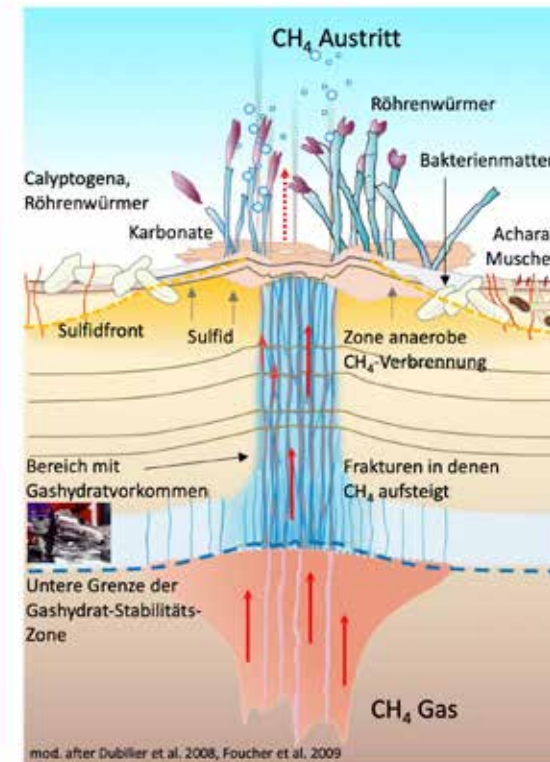


Abb. 1: Schema des Ökosystems Cold Seep, dessen Lebensgrundlage auf dem Umsatz von Methan und dem giftigen Sulfid beruht. Quelle: Stefan Sommer, GEOMAR modifiziert nach Dubilier et al. 2008 und Foucher et al. 2008.

In tieferen, sauerstofffreien Sedimentschichten kommt die zweite Option zur Energiegewinnung zum Tragen, die anaerobe Umsetzung von Methan. Dieser mikrobielle Reaktionspfad nimmt eine Schlüsselstellung in der Energiebereitstellung an Cold Seeps ein. Anstelle des spärlich verfügbaren Sauerstoffs wird nun Sulfat, das massenhaft vorhanden ist, zur Verbrennung (Oxidation) von CH_4 verwendet. Bei dieser Reaktion entstehen Sulfid, Wasser und Bikarbonat. Auch an dieser Reaktion sind methanotrophe („sich von Methan ernährend“) Archaeen beteiligt, allerdings brauchen sie dieses Mal noch Reaktionspartner, sogenannte sulfatreduzierende Bakterien. Im Vergleich zur aeroben CH_4 -Oxidation wird jedoch nur wenig

Energie freigesetzt. Trotz hohen Methanumsatzes „köchelt“ das mikrobielle Konsortium nur auf niedriger Flamme vor sich hin. Der größte Teil der Energie des CH_4 steckt nun im Sulfid, das allerdings für die meisten Organismen hochtoxisch ist, da es deren Atemzentrum irreversibel lähmt. Dennoch gibt es Lebewesen, die genau dieses Sulfid als Lebensgrundlage nutzen.

WIE PECH UND SCHWEFEL – SPEZIELLE LEBENS-GEMEINSCHAFTEN IN COLD SEEPS

Cold Seeps sind für ihre speziell angepassten Lebensgemeinschaften bekannt, die oft in hoher Anzahl und hohen Biomassen auftreten. Als erste Pioniere zur Erschließung der Fluid- und Gasaustritte treten die bereits beschriebenen Methan oxidierenden Archaeen und Sulfatreduzierer auf den Plan.

Gelangt das von ihnen produzierte Sulfid an die Sedimentoberfläche, wird es dort von weiteren mikrobiellen Lebensgemeinschaften mit Sauerstoff oder Nitrat weiterverwertet. Die hierbei frei werdende Energie und das im Meerwasser gelöste Kohlendioxid (CO_2) nutzen sie dann zur Chemosynthese von organischen Kohlenstoffverbindungen. Hierbei sind u. a. Bakterien der Gruppe *Beggiatoa* und *Thioploca* beteiligt. Sie bilden zentimeterlange Filamente und können leicht mit dem bloßen Auge entdeckt werden. In Cold Seeps bilden diese Bakterien oftmals quadratmetergroße, weißliche Matten an der Sedimentoberfläche (Abb. 2). Diese Organismen sind auch außerhalb von Cold Seeps weltweit verbreitet. Das wohl größte zusammenhängende Bakterienmatten-System der Erde erstreckt sich über Tausende von Kilometern entlang der Küsten von Chile und Peru.

Kurze Zeit später besiedeln dann verschiedene Muschelarten die Seep-Sedimente in großen Mengen. Sie erstrecken sich entlang von Senken und Rissen oder bilden große Muschelbänke aus, wie die aus der Nordsee bekannte essbare Miesmuschel (*Mytilus edulis*). Die Besonderheit dieser Muscheln, die bis 36 cm groß werden können, ist, dass sie in direkter Symbiose mit meist sulfi-



Abb. 2 links: Probennahme im Bakterienmattensystem eines Cold Seeps vor der Küste Costa Ricas; rechts: mikrometerdünne Filamente von schwefeloxidierenden Bakterien bilden diese Matten. Foto links: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen, Foto rechts: S. Sommer, GEOMAR.

doxidierenden Bakterien leben, die sie in ihren Kiemenfilamenten beherbergen. Eine besondere Art, *Bathymodiolus*, ist überaus produktiv und erzeugt Biomassen von bis zu 70 kg/m². Dies entspricht dem Zwei- bis Fünffachen der Produktion der nah verwandten Miesmuschel.

Die auffälligsten Organismen an Hydrothermalquellen sind meterlange Röhrenwürmer (vgl. Kap. 2.7.3), die seit

ihrer Entdeckung die Titelseiten einer ganzen Reihe populärwissenschaftlicher Zeitschriften bevölkerten. Auch in Cold Seeps dürfen diese Organismen, deren Ernährung ebenfalls auf der Symbiose mit sulfidoxidierenden Bakterien beruht, nicht fehlen (Abb. 3). Im Erwachsenenstadium besitzen sie weder einen Mund noch einen Verdauungstrakt und einen Anus und sind damit ausschließlich auf



Abb. 3 links: Röhrenwürmer drängen sich entlang von Karbonatplattformen (Chile). Sie stecken in einer Chitinröhre, nur ihre rötlichen Kiemen sind zu sehen; rechts: extrem dichte Ansammlungen von Röhrenwürmern (*Lamellibrachia*) in einem Seep vor Costa Rica in 1.800 m Wassertiefe. Foto links: ROV-Team, GEOMAR, Foto rechts: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen.

den Austausch von Stoffwechselprodukten mit ihren symbiontischen Bakterien angewiesen. In den Methan- und Öl-Seeps des Golfs von Mexiko, in Wassertiefen von 500–800 m, trifft man auf einen beeindruckenden Vertreter (*Lamellibrachia luymesii*) dieser Gruppe. Diese Art kann bis zu 3 m lang werden. Die Würmer organisieren sich in dichten buschähnlichen Strukturen, die über die Sedimentoberfläche hinausragen. Unterhalb der Sedimentoberfläche heften sie sich an harte Strukturen an und bilden eine Art Wurzelwerk aus, das tief in das Sediment reicht und mit dem sie Sulfid aufnehmen. Diese sehr langsam wachsenden Tiere werden über 250 Jahre alt und zählen damit zu den langlebigsten Organismen auf unserem Planeten.

Ende der 1990er Jahre reihte sich ein weiterer Organismus in die bemerkenswerte Gesellschaft der Seep-Organismen ein: der Eiswurm *Hesiocaeca methanicola*. Dieser bis 4 cm lange vielborstige Wurm besiedelt als einziger mehrzelliger Organismus direkt die Oberfläche von Gashydraten – daher der Name „Eiswurm“. Der erste Fund wurde im Golf von Mexiko in einer Wassertiefe von 540 m gemacht. Hier durchbrechen metergroße, teilweise orangefarbige Gashydratblöcke das Sedimentgefüge an der Oberfläche und schaffen ein hügeliges Terrain.

In Dichten von 2.500 Individuen pro Quadratmeter besiedelt der Eiswurm diese Gashydrate, deren Farbe vom Öl verursacht wird (Abb. 4). In den Geweben des Eiswurms konnten keine symbiontischen Bakterien nachgewiesen werden. Man nimmt daher an, dass er Bakterien direkt von der Gashydratoberfläche abweidet.

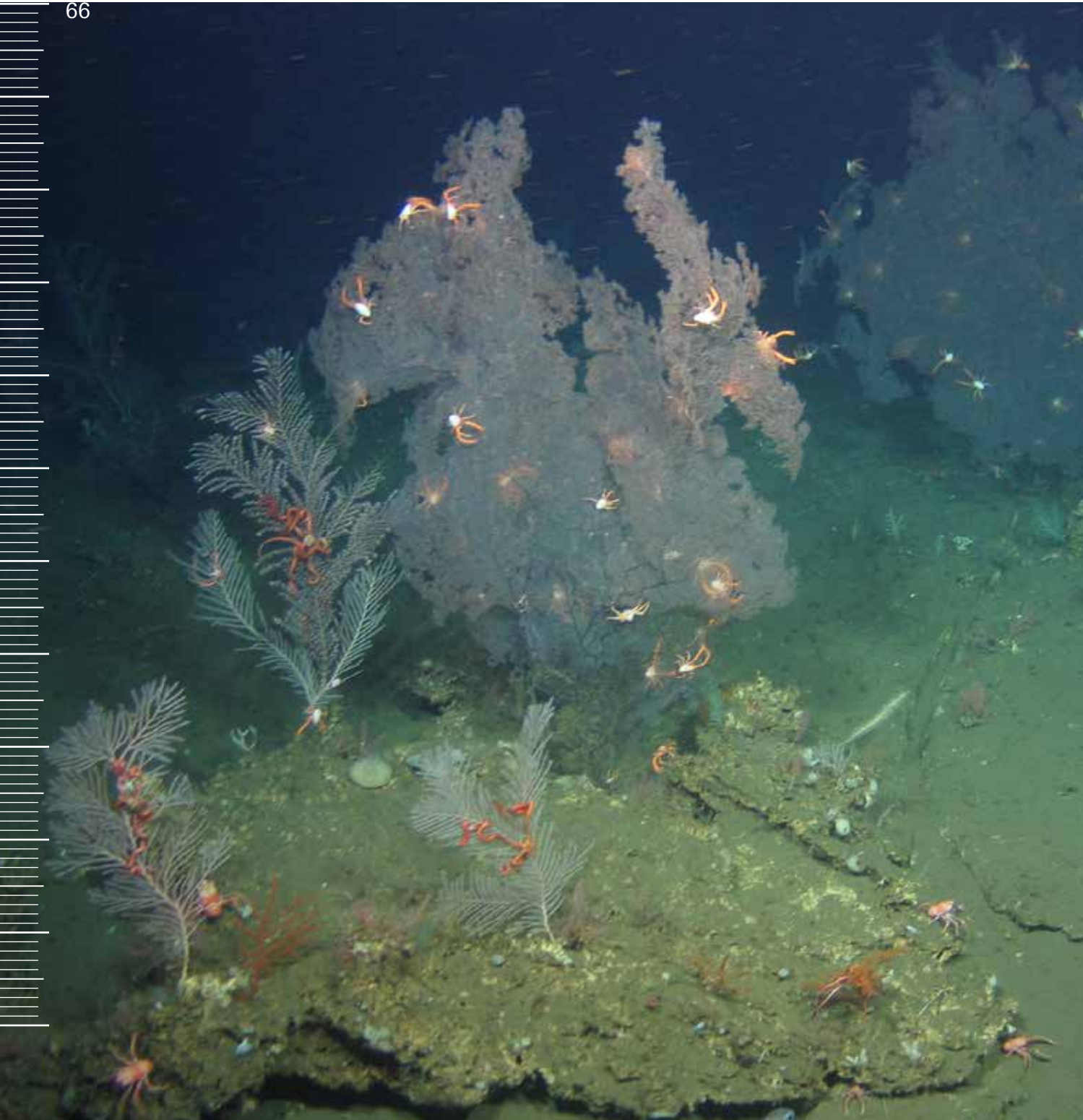
Es sind die oben beschriebenen Organismen, auf denen die Berühmtheit von Cold Seeps beruht. Jedoch hinterlässt der Fluidausstrom auch innerhalb des Mikrokosmos Meeresboden deutliche biogeochemische Spuren mit großen Konsequenzen für kaum beachtete mikroskopisch kleine Lebewesen, die den mit Wasser gefüllten Raum zwischen den Sedimentkörnern in großen Mengen besiedeln. Neben Viren, Bakterien, Pilzen findet sich dort eine Vielzahl von Einzellern, aber auch mehrzelligen Formen, wobei Fadenwürmer meist dominieren.

COLD-SEEP-ÖKOSYSTEME IM WANDEL

Bei der anaeroben Umsetzung von CH entstehen zusätzlich zum Sulfid große Mengen Karbonat. Dieses reagiert mit den im Meerwasser gelösten Kalziumionen, fällt aus und lagert sich in geologisch langen Zeiträumen am Meeres-



Abb. 4 links: Ölgetränkte Gashydrate durchdringen die Meeresbodenoberfläche im Golf von Mexiko; rechts: der vielborstige Eiswurm besiedelt die Gashydratoberfläche in einer hohen Individuendichte. Fotos: I. R. MacDonald, Florida State University.



boden ab. Hierbei können immens große Plattformen, Schlote oder Hügelstrukturen entstehen, die für alle Organismen, die auf Hartgrund als Siedlungsplatz angewiesen sind, einen idealen Untergrund bieten. Entlang des Kontinentalrands vor Neuseeland oder des von Erdbeben immer wieder heimgesuchten Chiles sind auf diese Weise ausgedehnte Karbonatlandschaften entstanden (Abb. 5). Ein Cold Seep versiegelt sich auf diese Weise von selbst, und der Fluidstrom muss sich dann neue Wege an die Oberfläche des Meeresbodens suchen. Dies lässt sich eindrucksvoll vor der Küste Neuseelands beobachten, wo erst vor zehn Jahren ein neuartiges Seep-Habitat entdeckt wurde. In direkter Nähe von Karbonatplattformen sind Sedimentoberflächen zu sehen, die einer Schlammschicht gleichen, in die große Regentropfen eingeschlagen sind und dabei eine Vielzahl kleiner Vertiefungen hinterlassen haben; daher ihr englischer Namen „Rain Drop Sites“ (Abb. 6a). Hochauflösende Aufnahmen zeigen, dass in jeder dieser Vertiefungen ein Wurm wohnt (Abb. 6b).

Obwohl diese Borstenwürmer (Ampharetiden) auch von anderen Seeps bekannt waren, brachen die Organismen hier alle Rekorde und tauchten in extrem großer Zahl – bis zu 72.000 Individuen pro Quadratmeter – auf. Wie der eng verwandte Eiswurm ernähren sich die Ampharetiden heterotroph von freilebenden Methan verwertenden Bakterien. Es wird vermutet, dass der Lebensraum „Rain Drop Site“ ein frühes Stadium der Besiedelung darstellt, wobei diese Tiere als Geo-Ingenieure auftreten und dazu beitragen, das Sediment für die nachfolgende Besiedelung vorzubereiten.

Selbst nach dem Versiegen des Fluidausstroms bleiben diese biogenen Strukturen lange erhalten. Während die Karbonate geologisch lange Zeiträume überdauern, bleiben Schalen von Muscheln etwa ein bis zwei Jahrzehnte erhalten. Die weniger mineralisierten Behausungen der Röhrenwürmer sind nach wenigen Jahren verschwunden.

Abb. 5: Karbonate (Chile) bilden einen idealen Untergrund für eine Vielzahl von Organismen. Foto: ROV-Team, GEOMAR.

Bei voranschreitender Sedimentation entsteht wichtiger Lebensraum für eine Übergangsgemeinschaft zwischen Seep- und Hintergrundfauna, die sich aus Organismen der näheren Umgebung rekrutiert. Ein Prozess, der Hunderte von Jahren dauern kann.

COLD SEEPS: MEHR ALS NUR VON REIN AKADEMISCHEM INTERESSE

Eine Zeit lang hatte man die Vorstellung, Cold Seeps seien zwar für wissenschaftliche Grundlagenforschung attraktiv, repräsentierten aber dennoch nur lokal begrenzte Ökosysteme mit geringer Auswirkung auf ihre Umgebung. Dieser Blick hat sich mit der rasch steigenden Zahl der Seep-Entdeckungen und dem wachsenden Verständnis für deren besondere Bedeutung im globalen Kohlenstoffkreislauf grundlegend gewandelt.

— Auf den ersten Blick könnte man Cold Seeps verdächtigen, starke Emittenten des Treibhausgases Methan zu sein. In Seeps wird Methan jedoch effizient in organische, biologisch verwertbare Kohlenstoffverbindungen verwandelt. 80 % des aufsteigenden Methans werden im Meeresboden zurückgehalten. Methan, das dem biologischen Abbau im Sediment entkommt, wird meist in der Wassersäule umgesetzt und stellt eine willkommene Energiequelle für diverse Mikrobengesellschaften dar.

— Eine der herausragenden Eigenschaften von Cold Seeps ist deren Export von organischen Kohlenstoffverbindungen in die ansonsten nährstoffärmere Tiefseeumgebung. Schätzungen gehen davon aus, dass ca. 10 % des gesamten organischen Kohlenstoffs, der allen Tiefseeorganismen zur Verfügung steht, von Cold Seeps produziert wird.

— Cold Seeps sind wichtig für die Artenvielfalt. Entlang des räumlichen Kontinuums vom Fluidaustritt bis hin zur unbeeinflussten Tiefseeumgebung erschließen chemosynthetisch und heterotroph lebende Organismen verschiedenste Nischen und schaffen neue Habitate.

— Kommerzielles Interesse an Cold Seeps. Cold Seeps stellen einzigartige genetische Fundgruben für die Suche nach neuartigen hochspezifischen Stoffwechselprozessen dar. Weiterhin besteht großes Interesse an Gashydraten und deren Exploration zur Energiegewinnung.

— Zunehmend haben Cold Seeps auch die breite Öffentlichkeit fasziniert, wozu der Bestseller-Roman „Der Schwarm“ von Frank Schätzing (2004) nicht unerheblich beigetragen hat. Nicht zuletzt aber, unabhängig von allen menschlichen Interessen, verfügen Cold Seeps über einen intrinsischen Wert und sind um ihrer selbst willen schützenswert.

— Chemosynthetische Lebensgemeinschaften stehen vielleicht auch Pate für Lebensformen auf fernen Planeten und Monden. Als Kandidaten, auf denen derzeit mit gewisser Wahrscheinlichkeit extraterrestrisches Leben zu erwarten ist, sind neben den eisigen Polen des Mars, die Eismonde Europa (im Jupiter-System) und Enceladus (einer der 62 Monde des Saturn) zu nennen. Auf beiden Monden werden unter einer dicken Eisschicht von mehreren Kilometern Mächtigkeit tiefe Ozeane vermutet, die alle Ingredienzien für chemosynthetisches Leben enthalten.

BLEIBEN SIE NEUGIERIG.

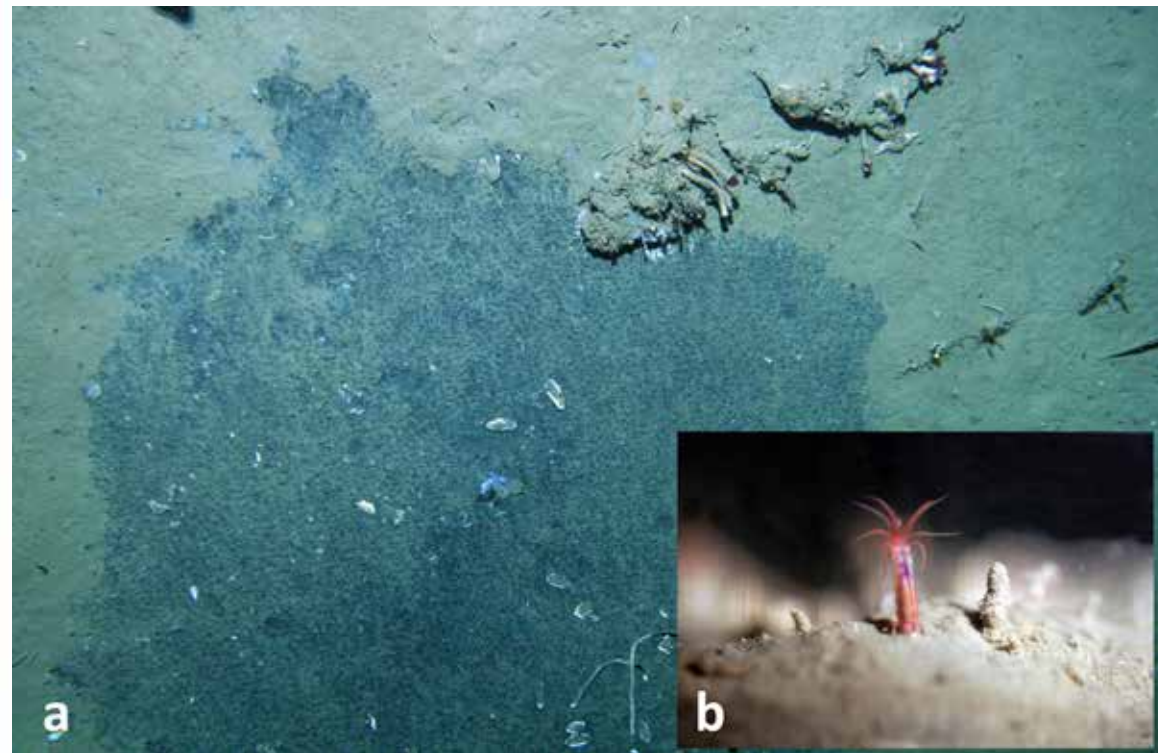


Abb. 6a: „Rain Drop Sites“ in Cold Seeps vor Neuseeland; 6b: jeder dunkle Fleck dieses nur wenige Meter großen Areals wird von mindestens einem Borstenwurm aus der Familie der Ampharetidae besiedelt. Foto a: D. A. Bowden, NIWA, Foto b: S. Sommer, GEOMAR.

2.6. MANGANKNOLLENFAUNA

Torben Riehl, Dorte Janussen

Polymetallische Knollen, auch als Manganknollen bekannt, stellen einen besonderen Lebensraum dar, da sie in ausgedehnten Feldern reichlich Hartsubstrat bieten. Der Meeresboden der abyssalen Tiefenzone erstreckt sich hauptsächlich über Ebenen und Hügellandschaften, die von Feinsedimenten wie Ton oder Mergel geprägt sind. Er wird in der Regel als relativ eintönig beschrieben. Fester und harter Meeresboden gelten als selten und sind daher nur sehr begrenzt für die Meeresbodenfauna als Substrat verfügbar. Manganknollen sind somit ein kostbarer Siedlungsraum in der Tiefsee.

Manganknollen sind typischerweise von einer Aufwuchsfau (Epifauna) bewachsen, die sich aus speziellen Mikroben-, Protisten- und Tiergemeinschaften zusammensetzt. Sie ähneln eher der Fauna anderer Hartsubstrate als der auf und in den umgebenden Sedimenten. Auch die Hohlräume der Manganknollen sind von einer besonderen Lebensgemeinschaft bewohnt. In dem durch das Wachstum der Knollen entstandenen Labyrinthsystem leben Fadenwürmer, verschiedene Krebstiere wie Harpacticoida (vgl. Kap. 2.7.1), Eichelwürmer, Borstenwürmer (vgl. Kap. 2.7.3) und Wasserbären – alle typische Vertreter der Sedimente. Sie kommen jedoch in anderer Artenzusammensetzung und Dichte vor. Bis zu 170 dieser Kleinstlebewesen wurden in einer einzigen Manganknolle gefunden – eine beeindruckende Zahl wenn man bedenkt, dass der Lebensraum an sich arm an Nahrung ist. Die Höhlensysteme der Knollen bieten Schutz vor Fraßfeinden.

Zur Manganknollen-Epifauna zählt eine Fülle festsitzender Meerestiere, deren Larven zum Anwachsen ein Hartsubstrat benötigen, z. B. Seerosen, Oktokorallen, Ruderfußkrebse und Seelilien sowie allerlei Schwämme und deren Mitbewohner. Vielerlei Organismen sind also auf derartige Hartsubstrate angewiesen, weil sie z. B. als sessile (festsitzende) Arten einen festen Untergrund als

Anheftungsstelle brauchen. Andere profitieren von einem solchen Hartboden, weil dieser sich in der Regel zumindest etwas über die Sedimentoberfläche erhebt und somit exponierter gegenüber Meeresströmungen ist – so bekommen beispielsweise Filtrierer besseren Zugang zu ihren vorbeidriftenden Nahrungspartikeln (vgl. Kap. 3.1).

Tiere, die typischerweise an Hartböden angeheftet sind, stellen mit ihrem eigenen Körper eine Siedlungsfläche für andere Organismen dar – sogenannte „biogene Substrate“. Auf diese Weise entstehen dreidimensionale Lebensräume, die in der Fachliteratur als „Animal Forests“, also „Tierwälder“, bezeichnet werden. Diese Strukturierung ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Manganknollenfauna gegenüber der sie umgebenden Weichsubstratfauna.

Mit ihren unzähligen Übergängen zwischen Hartsubstrat und Sediment bilden Manganknollenfelder komplexe Lebensraummosaik, welche zu den artenreichsten Lebensgemeinschaften im Abyssal gehören. Untersuchungen in der Clarion-Clipperton-Bruchzone im äquatorialen Nordost-Pazifik, dem weltgrößten potenziellen Abbaugebiet für den Tiefseebergbau polymetallischer Knollen mit einer Gesamtfläche von etwa 5,2 Millionen km², haben ergeben, dass hier Tiergruppen leben, deren Stammes-

geschichte vergleichsweise alt ist und die nirgendwo sonst in der Tiefsee oder den Meeren insgesamt existieren, wie beispielsweise mache Schlangensterne (Abb 1). Es wurde ebenfalls gezeigt, dass die Aufwuchsfaua von Manganknollenfeldern mehr als doppelt so individuenreich ist wie die der manganfreien Sedimente.

EIN DILEMMA

Mineralische Rohstoffe am Meeresboden könnten die Lösung sein, um die Verknappung bestimmter Rohstoffe an Land auszugleichen und drastische Preisanstiege sowie wirtschaftspolitische Konflikte zu verhindern. Daher gibt es in zahlreichen Industrienationen Bestrebungen, diese neue Rohstoffquelle möglichst bald zu erschließen. Doch

der Bergbau am Tiefseegrund birgt enorme Risiken für die dort lebenden Organismen und damit für das gesamte Ökosystem. Um eine Lösung für dieses Dilemma zu finden, führen unabhängige Forschungsinstitute wie das Senckenberg Bestandsaufnahmen der von Manganknollen geprägten Ökosysteme durch und versuchen abzuschätzen, welche Maßnahmen nötig wären, um dieses besondere Ökosystem vor Umweltkatastrophen und durch Abbau verursachte Aussterbeereignisse zu bewahren.

GEFAHREN DES TIEFSEEBERGBAUS

Es ist zu erwarten, dass der Tiefseebergbau zum Abbau von Manganknollen verheerende Folgen für die Tiefseumwelt haben wird. Das hat mehrere Gründe: Zum einen



Abb. 1: Ein Schlangenstein (Ophiuroidea) im Manganknollenfeld der Clarion-Clipperton-Bruchzone. Im Frühjahr 2015 fand dort unter Leitung von Prof. Dr. Pedro Martínez Arbizu vom Senckenberg DZMB in Wilhelmshaven eine Tiefseeexpedition (SO239 – EcoResponse) mit dem Forschungsschiff Sonne statt. Sie diente der Erforschung der dortigen Tierwelt und möglicher Auswirkungen eines großräumigen Tiefseebergbaus. Unter anderem wurden uralte Gruppen von Schlangensteinen entdeckt, die außerhalb des Manganknollengebiets noch nirgends nachgewiesen wurden. Foto: ROV-Team, GEOMAR.

wird mit den Manganknollen eine ganz speziellen Lebensgemeinschaft zusammen mit ihrem Lebensraum zerstört, denn gemeinsam mit den Knollen werden auch die den Meeresboden bewohnenden Organismen und das umgebende Sediment vom Meeresboden entfernt. Zum anderen wird es abseits der eigentlichen Manganknollenabbaugebiete zur Ablagerung von Sedimenten und Manganknollenfragmenten kommen, die sowohl beim Abbau selbst als auch beim Transport an die Meeresoberfläche abgeschieden werden und sich mit der Meeresströmung verteilen. Filtrierende Organismen werden unter Sedimenten begraben und die Weichbodenfauna empfindlich gestört wenn nicht gar zerstört.

Es steht außer Frage, dass die Meeresbodenfauna in den Abbaugebieten selbst verloren gehen wird, sollte der

Bergbau durchgeführt werden. In einem Langzeitexperiment im Perubecken, dem sogenannten DISCOL-Experiment (DISturbance and reCOLonization experiment), wurde Manganbergbau simuliert. Die Epifauna der betroffenen Gebiete wurde bei dem Eingriff fast vollständig zerstört. Nach 26 Jahren zeigte sich, dass die Erholung der Epifauna nur sehr langsam vonstattengeht.

Die Ursachen für diese sehr langsame Regeneration des Ökosystems sind unter anderem in der vom Bergbau bedrohten Sedimentoberfläche zu finden. Diese wenige Zentimeter dünne Sedimentschicht spielt eine wesentliche Rolle für das Tiefseeökosystem. Sie wird als reaktiv bezeichnet, denn hier finden wichtige biochemische Reaktionen statt, welche mit dem Mikrobiom (Lebensgemeinschaft von Mikroorganismen) zusammenhängen, das



Abb. 2: Blick in das Osculum (Ausströmöffnung) des Glasschwammes *Saccocalyx pedunculatus* Schulze, 1896, der in der Clarion-Clipperton-Bruchzone auf Manganknollen wächst. Viele Schwammarten sind auf Manganknollen als Substrat angewiesen. Foto: SO239, ROV-Team, GEOMAR.

dieses Sediment besiedelt. Mikroben sind für die marinen Nährstoffflüsse von herausragender Bedeutung. Eine natürliche Wiederherstellung dieser reaktiven Schicht bedarf möglicherweise Jahrhunderte. Das Mikrobiom bildet die Grundlage für das Weichboden-Nahrungsnetz insgesamt. Daher beeinträchtigt ein großflächiger Abbau das gesamte Ökosystem mit seinen Ökosystemdienstleistungen.

Ein zentrales Anliegen der aktuellen Forschungsbemühungen besteht darin, die Bedingungen zu ergründen, unter denen eine schnelle Erholung des Ökosystems nach dem Bergbau möglich ist. Dazu gehören so substantielle Fragen, wie die nach der genetischen wie taxonomischen Identität der dort lebenden Organismen, ihrer Ausbreitungsfähigkeit und Umweltansprüche. Davon hängen letztlich politische Entscheidungen über den Umfang des Bergbaus, die Platzierung und Gestaltung von Schutzgebieten sowie die technische Umsetzung des Bergbaus ab. Denn wo, wie und wann dieser Bergbau stattfinden wird, könnte genauso entscheidend sein, wie ob und welche Restaurierungs- und Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

Von den Konsequenzen des Manganknollenabbaus könnten sogar Meeressäuger betroffen sein. In einer Studie aus dem Jahr 2018 wurde darauf hingewiesen, dass Schnabelwale in Tiefen von bis zu 4.258 m zur Nahrungssuche im Sediment graben – in einem für den Bergbau vorgesehenen Meeresgebiete. Die englischen Autoren der Studie zeigten ungewöhnliche und anscheinend von großen Tieren gegrabene Löcher im Sediment, die sonst in dieser Form und Verteilung in flacheren Meeresregionen ausschließlich von Schnabelwalen verursacht werden. Es ist derart wenig über das Verhalten von Walen in der Tiefsee bekannt, dass dieser mögliche Tiefenrekord (vgl. Kap. 3.1) mehr Fragen aufwirft als Antworten.

Welche Maßnahmen auch getroffen werden, der kommende Manganknollenbergbau wird Langzeitfolgen haben. Während immerhin zu erwarten ist, dass sich biochemische Flüsse innerhalb von Jahrzehnten bis Jahrhunderten nach erfolgtem Bergbau erholen, kann sich das Manganknollenökosystem nicht in seinen natürlichen Zustand zurückentwickeln. Manganknollen brauchen Jahrtausende

für ihr Wachstum (vgl. Kap. 4.1.1). Daher wird sich nach Wiederherstellung der biochemischen Flüsse zwangsweise ein Ökosystem frei von Manganknollen entwickeln, welches durch vollkommen andere Lebensgemeinschaften und Ökosystemfunktionen gekennzeichnet sein wird.

SCHWÄMME – WICHTIGE BIOINGENIEURE DER MANGANKNOLLENFAUNA UND BESONDERS GEFÄHRDET

Als aktiven Filtrierer kommt den Schwämmen (Porifera – zu Deutsch „Porenträger“; vgl. Kap. 2.7.5) an der Kontaktstelle zwischen Wassersäule und Meeresboden eine besondere ökologische Bedeutung zu. Denn sie binden durch ihre Filtration des Meeresswassers schwebende Partikel und Organismen an den Meeresboden. Auch als Mikrokosmos und Lebensraum für andere Tiere, wie Würmer, Krebstiere, Schlangensterne, Fische und deren Brut, sowie eine diverse Vergesellschaftung von Mikroben spielen sie eine wichtige Rolle.

Die 2018 am Senckenberg verfasste Dissertation von Daniel Kersken hat die Schwämme der Clarion-Clipperton-Bruchzone besonders unter die Lupe genommen (Abb. 2). Der Autor konnte allein von der EcoResponse-Expedition 23 Arten von Glasschwämmen (Klasse Hexactinellida) beschreiben und neun weitere Arten voneinander abgrenzen. Davon war fast die Hälfte für die Wissenschaft völlig unbekannt. Manche dieser Arten wachsen ausschließlich auf den polymetallischen Knollen. Innerhalb der Knollenfelder sind die Stiele dieser Schwämme meist die einzigen Strukturen, die wesentlich (50–100 cm) über den Meeresboden hinaus- und in die Meeresströmung hineinreichen. Sie werden deshalb gerne durch andere Filtrierer und Räuber besiedelt und es gibt etliche Arten, beispielsweise Korallen und Seerosen, die ausschließlich auf den Schwammstielen leben (Abb. 3). Auch größere und mobile Organismen profitieren von Manganknollenfeldern und deren schwammigen Bewohnern – direkt oder indirekt – und hängen zum Teil stark von diesen ab. In einem

Manganknollenfeld im Perubecken des Südostpazifik wurde bei dem Tauchgang einer Tiefseekamera beobachtet, wie ein Oktopus sein Gelege an dem Stiel eines Schwammes bebrütete, der auf Manganknollen wuchs. Das deutet darauf hin, dass im Falle von Manganknollenbergbau auch diese Kopffüßer von negativen Auswirkungen durch Habitatverlust betroffen wären.

Natürlich ist es ohne vorherige Experimente sehr schwierig, die direkten Auswirkungen des Tiefseebergbaus auf einzelne Tiergruppen einzuschätzen. Doch aufgrund ihres fragilen Aufbaus ist anzunehmen, dass die meisten Glasschwämme durch den mechanischen Abbau abgerissen



Abb. 3: Ein Glasschwamm der Gattung *Hyalonema*, der in der Clarion-Clipperton-Bruchzone auf Manganknollen wächst, bietet einer Seerose ein Substrat. Foto: S0239, ROV-Team, GEOMAR.

oder anderweitig zerstört würden. Dazu kommen die bereits erwähnten großen Mengen der von den Bergbaugeräten aufgewirbelten Sedimente, welche insbesondere die Schwämme in der Umgebung der Abbaugelände bedecken und somit deren feine Körperkanäle verstopfen würden. Experimente mit der immerhin ziemlich robusten Art *Aphrocallistes vastus* in Tiefwasserriffen vor der kanadischen Westküste haben gezeigt, dass diese erst Tage nach einer Sedimentaufwirbelung wieder zu Pumpen und Filtrieren anfangen. Dabei liegt der Lebensraum dieser Glasschwämme am Kontinentalhang in mittlerer Tiefe – einer Region, die sich durch viel höhere natürliche Sedimentationsraten auszeichnet als die Manganknollenfelder. Dementsprechend waren bei dieser Art Anpassungen an Sedimentverschmutzung zu erwarten. Bei den viel fragileren Tiefseeglasschwämmen, die nur über langsame oder gar keine Funktionen der Selbstreinigung verfügen, sind weit aus dramatischere Effekte zu erwarten. Dazu kommen die negativen ökologischen Auswirkungen durch hohe Konzentrationen von Schwermetallen, die durch einen Abbau in die Wassersäule gelangen würden.

Auch muss man bei Glasschwämmen besonders skeptisch sein, ob nach einem großräumigen Polymetallknollenabbau tatsächlich in naher Zukunft eine Wiederbesiedlung der betroffenen Areale stattfinden würde. Denn viele Arten leben ausschließlich auf den Manganknollen und kommen auf den Weichböden daneben überhaupt nicht vor, sodass eine Neubesiedlung der von Manganknollen freien Bereiche nicht stattfinden könnte. Desweiteren zeigen Altersdatierungen von Schwämmen aus verschiedenen Regionen, dass diese Tiere in der Tiefsee nur periodisch und meist extrem langsam wachsen. So liegt das wahrscheinliche individuelle Alter eines Schwammes aus der weit verbreiteten Gattung *Hyalonema* bei ca. 1.100 Jahren, wie eine ¹⁴C-Radiokarbon-Altersdatierung ergeben hat. Da die Bedeutung der Schwämme für das Tiefsee-Ökosystem noch nicht in Zahlen ausgedrückt werden kann, lassen sich auch die voraussichtlichen Konsequenzen des dortigen Bergbaus bislang nicht quantifizieren.

Achtung: Platzproblem.
Intro verkürzt. So okay?

2.7. LEBEWELT DER TIEFSEE

Henk-Jan Hoving

Die Tiefsee beginnt in einer Tiefe von 200 m. Der darüber liegende Bereich lichtdurchfluteter Wasserschichten wird „photische Zone“ genannt, da hier genügend Licht zur Verfügung steht, um die Photosynthese zu unterstützen, die für das Wachstum von Pflanzen und Algen erforderlich ist. Unterhalb von 200 m kommt nur wenig Licht an, nicht genug für die Photosynthese. Dieser Bereich heißt Dämmerungszone oder auch „mesopelagische Zone“.

Die meisten chemischen und physikalischen Prozesse, wie zum Beispiel die Regulierung des Salzhaushaltes, Temperaturschwankungen oder Wellenbewegungen, finden in den oberen 1.000 m der Ozeane statt. Hier können Sauerstoffkonzentration, Salzgehalt und Temperatur starke Gradienten aufweisen. Dies führt zu Sauerstoffminimumzonen und sogenannten Thermoklinen, dem Übergang von Wasserschichten unterschiedlicher Temperaturen. Diese speziellen Umweltbedingungen können Biodiversität und die Biologie vieler Organismen beeinflussen. Der Wasserkörper zwischen 1.000 und 3.000 m Tiefe ist die bathypelagische Zone, die eine relativ konstante Umgebung darstellt. Die meso- und die bathypelagische Zone machen zusammen geschätzte 90 % des gesamten Ozeanvolumens aus. Der tiefe Meeresboden erstreckt sich von den Kontinentalfhängen bis zu den Tiefsee-Ebenen auf 3.000–11.000 m Tiefe. Weitere große topografische Merkmale auf dem Meeresboden sind Seeberge, Bergrücken und Vulkaninseln, die unterschiedliche Lebensräume schaffen und die Evolution von Organismen vorantreiben.

VON VERTIKALWANDERERN, ECHOSTREUUNG UND TARNUNG DURCH LICHT

Die meisten Organismen in der Tiefsee sind direkt oder indirekt von organischer Substanz abhängig, die in den sonnendurchfluteten oberen Ozeanschichten produziert wird. Wolken aus abgestorbenen Mikroalgen und kleinem

Zooplankton sinken passiv nach unten und bilden einen kontinuierlichen Regen von Partikeln, der „Meeres-schnee“ bezeichnet wird. Viele Tiefseeorganismen profitieren von der hohen Produktivität in den oberen Schichten, indem sie nachts aktiv Richtung Oberfläche wandern: Sie können bis nahe an die Oberfläche aufsteigen; dieses Phänomen ist als „Vertikalwanderung“ bekannt. Hier oben ernähren sie sich von Plankton und meiden optisch jagende Raubtiere. Indem sie tagsüber in die Tiefsee abwandern und hier ihre Nahrung verdauen und veratmen, transportieren sie organische Stoffe von der Oberfläche in tiefere Meeresschichten. Das Absinken von Partikeln aus Meeresschnee und anderen organischen Stoffen sowie die tägliche Migration von Organismen transportiert Kohlenstoff in die Tiefsee. Dieser Prozess wird „biologische Kohlenstoffpumpe“ genannt (vgl. Kap. 3).

Tagsüber konzentrieren sich die wandernden Organismen in Schichten in 300–500 m Tiefe. Diese Ansammlungen sind auf Echoloten als dicke Schicht, die sogenannte Echo-Streuschicht (engl. deep scattering layer), sichtbar. Diese dichte Schicht verleitete frühere Besatzungen von Tauchbooten anzunehmen, sie seien schon am Meeresboden angekommen, obwohl sie sich noch mitten in der Wassersäule befanden.

Ein großer Teil der mesopelagischen Organismen in diesen Schichten besteht aus kleinen Fischen der Familie Myctophidae oder Laternenfische. Ihr Name leitet sich von den Leuchtorganen ab, den sogenannten Photophoren, die

Bildunterschriften fehlen

überall auf ihrem Körper vorhanden sind und die wie kleine Laternen aussehen. Auf der unteren Seite ihres Körpers befindet sich ein Muster aus diesen Photophoren, das ihren Bauch beleuchtet und ihnen so die gleiche Helligkeit verleiht wie das sie umgebende Wasser. Dies macht sie unsichtbar gegen die geringe Lichtmenge, die noch in diesen Tiefen von oben ins Wasser eindringt und ihren Schatten von oben herabprojizieren würde – wodurch sie zu einer leichten Beute für Räuber würden. Dieses Phänomen der optischen Tarnung wird „Gegenbeleuchtung“ (engl. counter illumination) genannt. Laternenfische sind nach den Borstenmäulern (Gonostomatidae) die häufigsten Fische in der Tiefsee und dadurch extrem wichtig für die Ozeane. Sie sind Beute für viele Meerestiere, darunter Schwertfische, Thunfische und Tintenfische.

MIT NEUEN METHODEN NEUE TIERE ENTDECKEN

Traditionell beproben Ozeanografen die Meere mit Netzen. Mit dieser Methode kann eine Vielzahl von Tieren untersucht werden, darunter Fische, Tintenfische, Krebstiere und einige robuste Quallen. Der Einsatz von Unterwasserkameras in der Tiefsee hat eine neue, zuvor verborgene Artenvielfalt aufgezeigt, die aus zerbrechlichen Lebensformen besteht. Diese Tiere werden auch als „gallertartiges Zooplankton“ bezeichnet. Dazu gehören Ctenophoren (Rippenquallen), Medusen (Quallen), Siphonophoren (Staatsquallen) und die freischwimmenden Manteltiere wie die Salpen. Was viele dieser Tiere gemeinsam haben, ist eine empfindliche und transparente Körperstruktur, die zu zerbrechlich ist, um in Netzen unversehrt erhalten zu bleiben. Der Einsatz von bemannten und unbemannten Tauchbooten ermöglicht die Dokumentation dieser Tiere in ihrem natürlichen Lebensraum sowie die Untersuchung ihres Verhaltens.



Bildunterschriften fehlen

nophoren (Staatsquallen) und die freischwimmenden Manteltiere wie die Salpen. Was viele dieser Tiere gemeinsam haben, ist eine empfindliche und transparente Körperstruktur, die zu zerbrechlich ist, um in Netzen unversehrt erhalten zu bleiben. Der Einsatz von bemannten und unbemannten Tauchbooten ermöglicht die Dokumentation dieser Tiere in ihrem natürlichen Lebensraum sowie die Untersuchung ihres Verhaltens.

Diese gallertartigen Organismen halten ein ganzes Nahrungsnetz aufrecht, indem sie sich gegenseitig fressen oder von Fischen, Krebstieren und Tintenfischen gefressen werden. Viele größere Raubtiere ernähren sich ebenfalls von gallertartigen Tieren. Ein Beispiel hierfür ist der pelagische Siebenarm-Tintenfisch *Haliphron atlanticus*. Dieser Oktopus wird riesig, obwohl er sich nur von gallertartigen Organismen ernährt (Abb. 1). Der Einsatz von Tauchbooten in unerforschten Gebieten führt häufig zur Entdeckung neuer Arten oder neuer Artenaufzeichnungen für ein bestimmtes Areal. Mit dem bemannten Tauchboot JAGO wurde auf den Kapverdischen Inseln erstmals die große Rippenqualle *Kiyohimea usagi* im Atlantik beobachtet. Dieses Tier ist ein Raubtier. Es fängt vermutlich Krebstiere mit einer klebrigen Schicht auf der Innenseite seiner Lappen, die es schließen kann, damit die Beutetiere nicht entweichen (Abb. 2).

Andere große Wirbellose (Organismen ohne Knochen) sind noch schwieriger zu untersuchen. Tintenfische sind



Bildunterschriften fehlen

Mollusken (Weichtiere, wie z.B. auch die Schnecken), zu denen Oktopusse, Sepien und Kalmare gehören. Diese Gruppe kommt besonders häufig in der Tiefsee vor. Wir wissen sehr wenig über das Verhalten dieser Tiere.

RÄUBER UND RIESEN DER TIEFSEE

Tief tauchende Räuber wie Pottwale haben sich auf die Jagd nach Tiefseekalmaren spezialisiert. Über die Details des Kampfes zwischen diesen Tieren ist wenig bekannt, doch die Narben, die Kalmare mit ihren Saugnäpfen oder Haken auf den Körpern von Pottwalen hinterlassen, sprechen eine deutliche Sprache. Zur Lieblingsspeise von Pottwalen gehören Glaskalmare, Hakenkalmare, Riesenkalmare und Kolosskalmare. Wovon sich Pottwale ernährt haben, erfährt man, indem man die im Magen verbleibenden Tintenfischschnäbel untersucht (Abb. 3). Jede Tintenfischart hat einen individuell geformten Schnabel, anhand dessen sie eindeutig bestimmt werden kann.

Der Riesenkalmar *Architeuthis* ist ein prominentes Beispiel für ein Beutetier der Pottwale. Mit bis zu 18 m Körperlänge sind dies die längsten Tintenfische im Ozean. 2004 machten Wissenschaftler das erste Foto eines lebenden Riesenkalmars unter Wasser, und 2012 wurde der erste lebende Riesenkalmar in seiner natürlichen Umgebung von einem Tauchboot aus gefilmt. Riesenkalmare produzieren trotz ihrer Größe kleine Eier, die vermutlich in die Wassersäule abgegeben werden. Es ist nicht bekannt, wie alt Riesenkalmare werden. Normalerweise wachsen Kalmare sehr schnell und schließen ihren Lebenszyklus in nur einem Jahr ab, vor allem im Flachwasser. Für Riesenkalmare ist dies jedoch unwahrscheinlich, denn sie müssten innerhalb kürzester Zeit enorm an Gewicht zulegen. Außerdem haben Wissenschaftler herausgefunden, dass marine Ektotherme, also Lebewesen deren Körpertemperatur vollständig von der Umwelttemperatur abhängt, in kalten Wassermassen länger leben. In der Tiefsee herrschen meistens Temperaturen zwischen 0 und +4 °C und dementsprechend können wir davon ausgehen, dass Tiefseetintenfische älter werden können als ihre tropischen Artgenossen (vgl. Kap. 2.7.4).



Bildunterschriften fehlen

Riesenkalmare sind nicht die einzigen Riesen der Tiefsee. Es gibt mehrere Beispiele für Riesenvuchs (Gigantismus). Asseln, die an Land gerade einmal 1 cm groß werden, können in der Tiefsee mehr als 1 kg schwer werden. Sie fressen Kadaver, die aus der darüber liegenden Wassersäule auf den Meeresboden sinken (vgl. Kap. 2.7.1). Zu den längsten Fischen im Meer gehört der bis zu 11 m große Riemenfisch. Er hängt normalerweise vertikal in der Wassersäule. Ein Jungtier zeigt Abbildung 4. Riesenröhrenwürmer der Gattung Riftia (vgl. Kap. 2.7.3) werden bis zu 2,4 m lang und leben in der unmittelbaren Nähe von Hydrothermalquellen, die auch Schwarze oder Weiße Raucher genannt werden (vgl. Kap. 2.3). Diese Quellen können 400 °C heißes Wasser ausstoßen, beherbergen aber trotzdem eine Vielzahl an spezialisierten Organismen in ihrer unmittelbaren Nähe. Der Grönlandhai oder Somniosus (*Somniosus microcephalus*) ist ein bis zu 8 m langer Tiefseehai. Diese Haie gehören mit einer Lebensdauer von mehreren Hunderten Jahren zu den ältesten Fischen im Meer. Tiefseebewohner werden häufig sehr alt, denn je tiefer im Meer der Lebensraum ist, desto später wird die Geschlechtsreife erreicht. Bestimmte Tiefsee Muscheln und Korallen zum Beispiel können Hunderte von Jahren alt werden.

BESONDERE BEDINGUNGEN ERFORDERN BESONDERE ÜBERLEBENSSTRATEGIEN

Aufgrund der Größe der Tiefsee verteilen sich die vorhandenen Tiere sehr stark, man sagt: Die Populationsdichte ist geringer als in anderen Ökosystemen. Deswegen haben die Organismen ausgeklügelte Strategien entwickelt, um sich gegenseitig zu finden und eine erfolgreiche Reproduktion sicherzustellen. Hat z.B. ein Anglerfischmännchen ein Weibchen gefunden, lässt er es nicht mehr los. Er hält sich so lange fest, bis er mit dem Gewebe des Weibchens verwachsen ist und das Sperma aus seinem Körper in den seiner Partnerin fließen kann. Tintenfische haben eine andere Strategie zur Fortpflanzung entwickelt. Tintenfischmännchen übergibt seine Spermienpakete dem Weibchen. Diese Pakete haben einen raffinierten Mechanismus, um in das Gewebe des Weibchens, seine Arme, Körper oder Kopf, einzudringen. Dabei bleibt das Sperma in einem ruhenden (inaktiven) Zustand, bis das Weibchen zur Befruchtung und Freisetzung seiner Eizellen bereit ist. Die Spermienpakete von Riesenkalmaren können bis 20 cm lang sein. Sich paarende Tiefseekalmare wurden erst ein einziges Mal beobachtet, aber viele Weibchen tragen die Spuren der Fortpflanzung in Form der abgelagerten Spermienpakete mit sich herum. Viele Tiefseetiere kümmern sich aktiv um ihre Eier, pflegen und brüten sie, bis der Nachwuchs geschlüpft ist. Ein extremes Beispiel hierfür ist der Tiefsee-Oktopus *Graneledone*. Weibchen dieser Gattung wurden dabei beobachtet, 53 Monate lang ihre Eier zu bebrüten. Dabei nehmen sie vermutlich keine Nahrung zu sich.

Eine andere Herausforderung der Tiefsee ist das Finden von Nahrung. In der Tiefsee herrschen absolute Dunkelheit, ein enormer Druck, Kälte, und es ist schwierig, andere Tiere zu finden, sei es zum Fressen oder um sich fortzupflanzen. Aus diesem Grund haben Bewohner der Tiefsee viele raffinierte Strategien entwickelt, um an Nahrung zu gelangen. Eine der spektakulärsten ist die Biolumineszenz (vgl. Kap. 2.7.9). Hierbei produzieren Tiefseebewohner ihr eigenes Licht, um damit andere Lebewesen anzulocken. Der Anglerfisch hat seinen Namen nicht von ungefähr. Er

besitzt eine fingerartige Verlängerung an seinem Kopf, wie eine Angel mit einem Köder, der leuchtet und direkt über seinem hungrigen Maul schwebt. Die Fischgruppe der Macrourinae verfügt zudem über einen extrem guten Geruchssinn, um Nahrung aufzuspüren und sich in der Dunkelheit zu orientieren.

Viele Tiefseebewohner sind Aasfresser und ernähren sich von toten Tieren, die langsam zu Boden sinken. Wal-kadaver und die Überreste anderer großer Lebewesen sind extrem wichtig und können Tausende von Organismen viele Jahre ernähren (vgl. Kap. 3.1). Mehr als 400 verschiedene Arten wurden bisher auf einem einzigen Wal-kadaver gefunden. Zuerst wird der tote Wal von Schlafhaien, blinden Schleimaalen oder Krabben in Stücke gerissen. Als Nächstes lösen Bartwürmer und kleinere Krabben die letzten Fleischreste vom Knochen. Wenn nur noch der Knochen zurückbleibt, beginnt das Schlemmen von Schnecken, Bakterien und Würmern. Einer von ihnen ist ein Bartwurm namens *Osedax*, was auf Deutsch „Knochenfresser“ heißt. Dieser gerade einmal fingernagelgroße Wurm produziert eine Säure, mit der er Nährstoffe aus dem Knochen lösen kann (vgl. Kap. 2.7.3). Das vollständige Zersetzen eines Wals kann 100 Jahre dauern. Nach einem solchen Gelage begeben sich die Tiefseebewohner zurück in eine Art Energiesparmodus, in dem sie ihre Stoffwechselvorgänge auf ein Minimum reduzieren und sich extrem langsam bewegen, um wenig Energie zu verbrauchen. Schließlich kann es einige Zeit dauern, bis sie wieder etwas Essbares finden.



Bildunterschriften fehlen

2.7.1 KREBSE DER TIEFSEE

Angelika Brandt, Terue Cristina Kihara, Torben Riehl

Viele verschiedene Krebstiere ganz unterschiedlicher stammesgeschichtlicher Herkunft bewohnen heute den Teil der Meere, den wir als Tiefsee bezeichnen. Sie kommen in allen Meerestiefen vor, aber das Ausmaß ihrer jeweiligen Spezialisierung und der Vielfalt der verschiedenen Gruppen hängt u. a. von der Zeitspanne ab, seit der sie mit der Besiedlung Tiefsee begonnen haben. Unter den besonderen, für uns Menschen feindlich erscheinenden Umweltbedingungen (vgl. Kap. 2.1) sind manche Krebstiergruppen geradezu aufgeblüht, wie z. B. die Ruderfußkrebse (Copepoda) der Harpacticoida (Abb. 1), die hauptsächlich der Meiofauna (unter 1 mm) zuzurechnen sind, und die Asseln (Isopoda), deren Arten meist im Größenbereich von 1–10 mm liegen und somit der Makrofauna zuzurechnen sind. Die Asseln sind mit sehr hohen Artenzahlen und speziellen Anpassungen in der Tiefsee vertreten, die sie über große geologische Zeiträume, zum Teil seit dem Paläozoikum, evolviert haben. Typische Krebstiergruppen aus den Küstengewässern, wie etwa die Zehnfußkrebse (Decapoda) und Fangschreckenkrebe (Stomatopoda) sowie andere typische Vertreter der Megafauna (über 1 cm), kommen hingegen relativ selten in der Tiefsee vor. Für einige besondere Krebstiere und Krebsgruppen wollen wir im Folgenden etwas weiter ins Detail gehen.

DIE KLEINEN KÖNIGE DER MEERE

Ruderfußkrebse (Copepoda, Abb. 1) sind kleine Krebstiere von Mikrometer- bis Millimetergröße, die in allen Gewässern vorkommen und im Meer das freie Wasser und den Meeresboden – von der flachen Küstenregion bis in die tiefsten Gräben des Hadals – besiedeln. Sie sind die „Könige der Meere“, denn mit ihren ca. 13.000 Arten stellen sie den größten Anteil des marinen Zooplanktons. Sie fressen Phytoplankton oder leben als Filtrierer, Räuber oder Para-

siten und sind auch ein sehr wichtiges Element der marinen Nahrungskette. Der Körperbau der bodenlebenden Ruderfußkrebse aus der Gruppe der Harpacticoida kann,



Abb. 1: Fotos von Tiefsee-Harpacticoida (Ruderfußkrebse) aus verschiedenen Familien, aufgenommen mit einem konfokalen Laserscanning-Mikroskop. A) Aegisthidae (*Hase lagomorphicus*), C) Ectinosomatidae, B) Aegisthidae, D) Ancorabolidae, E) Paramesochridae (*Emertonia ingridae*), F) Paramesochridae (*Wellsopsyllus (Wellsopsyllus) antarcticus*), G) Idyanthidae (*Meteorina magnifica*). Maßstab: A, D, G = 200 µm; B = 250 µm, C, E, F = 50 µm. Quelle: Terue C. Kihara, Johanna Kottmann, Karin Pointner, Gritta Veit-Köhler, Deutsches Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung (DZMB), Wilhelmshaven.

in Anpassung an die jeweilige Lebensweise, stark modifiziert sein.

HÖHERE KREBSE (MALACOSTRACA)

Vertreter dieser mit etwa 28.000 Arten größte Gruppe der Krebstiere lebten bereits im Kambrium. Ihre bemerkenswerten Sinnesleistungen und komplexen Verhaltensweisen zeigen eine hohe Organisationsform. Zu den Höheren Krebsen gehören z. B. Fangschreckenkrebe, Flohkrebse und Meeresasseln, Leuchtgarnelen, Krabben, Hummer und Garnelen. Diese Krebstiere leben meist am Meeres-

boden, nur wenige Arten haben sich auf ein Leben in der freien Wassersäule spezialisiert. Ihnen gemein ist u. a. ein sehr kompliziert gebauter Kau- und Filtermagen, mit dem sie Nahrung weiter zerkleinern und sortieren und der ihnen die Nutzung ganz unterschiedlicher Nahrungsspektren ermöglicht. Viele Arten werden ihrerseits vom Menschen als Speisekrebse konsumiert.

Obwohl sie insgesamt in der Tiefsee seltener vorkommen als in Küstengewässern, gibt es auch unter den größeren Krebsen im Allgemeinen und den Decapoda im Speziellen einige Gruppen, die ihre Hauptverbreitung in der Tiefsee haben. Die Polychelidae – man könnte ihren



Abb. 2: Yeti Krabbe *Kiwa tyleri* aus einem Hydrothermalgebiet bei den Süd Shetland Inseln (E2 Ventfield Dog's Head). Fotos: NERC, ChEsSO consortium.

wissenschaftlichen Namen mit „Vielscherer“ übersetzen, da sie an mehreren Laufbeinen Scheren ausgebildet haben – und einige Vertreter der Springkrebse (Galatheaidea) haben ihre größte Artenvielfalt an den Kontinentalhängen. In der Tiefsee sind manche Vertreter der Garnelen vertreten, einige von ihnen haben Hydrothermalquellen besiedelt und kommen dort in enormen Mengen vor (vgl. Kap. 2.4). Auch Vertreter der Springkrebse findet man an solchen Quellen, z.B. die Yeti-Krabbe.

DIE YETI-KRABBE – EIN FABELWESEN DER TIEFSEE

So weiß wie Schnee leuchtet die Yetikrabbe (Abb. 2) in der Tiefsee an schwarzen Rauchern bei Hydrothermalquellen. Über ihre Lebensweise ist wenig bekannt. Yeti-Krabben sind blind und von langen fadenförmigen Bakterien bewachsen, die vermutlich ein wichtiger Bestandteil ihrer Nahrung sind. Sie scheinen diese Bakterien regelrecht zu kultivieren. Sie hegen und pflegen sie, indem sie ihre Bakteriengärten stets mit ausreichend Sauerstoff und Schwefelwasserstoff, der Lieblingsnahrung der Bakterien, überströmen. Der Körper einer Yeti-Krabbe wird ca. 5 cm lang, mit den langen ersten Greifarmen erreicht sie eine Länge von ca. 15 cm.

LEUCHTENDE KREBSE – DAS LIEBLINGSFUTTER DER GANZ GROSSEN

„Krill“ ist Norwegisch und bedeutet „Walnahrung“. Diese bis 6 cm langen Zooplankter gehören zu den Leuchtkrebsen und werden ca. sechs Jahre alt. Sie bilden riesige Schwärme und filtern Phytoplankton aus dem Wasser oder unter dem Eis. Sie sind die Nahrungsgrundlage vieler Wale, Robben, Eisfische, Tintenfische, Pinguine und anderer Vögel.

Euphausia superba, der Antarktische Krill (Abb. 3), gehört zu den Leuchtgarnelen und lebt in großen Schwärmen von 10.000–30.000 Individuen pro m³ Wasser. Er gilt als Schlüsselart im antarktischen Ökosystem (Südozean).

Krill ist in der Lage, mithilfe spezieller Organe Licht („Biolumineszenz“, vgl. Kap. 2.7.9) zu erzeugen. Diese Organe finden sich an verschiedenen Stellen des Körpers, an den Augenstielen, der Basis des zweiten und siebten Beinpaars sowie auf der Unterseite des Hinterleibs (Pleon). Die Leuchtorgane produzieren ein blaues Licht (ca. 490 nm), möglicherweise in Form von periodischen Lichtblitzen, welche der Kommunikation für die nächtliche Schwarmbildung und der Partnersuche dienen. Die Leuchtorgane sind mit einer Taschenlampe vergleichbar, sie besitzen einen konkaven Reflektor in der Leuchtgrube und eine Linse, die die Grube abschließt und den Leuchtblitz streut. Auf ihren täglichen Wanderungen durch die Wassersäule können Krillschwärme bis in die Tiefsee abtauchen.



Abb. 3: Die antarktische Leuchtgarnele *Euphausia superba* (Krill). Foto: Torben Riehl.

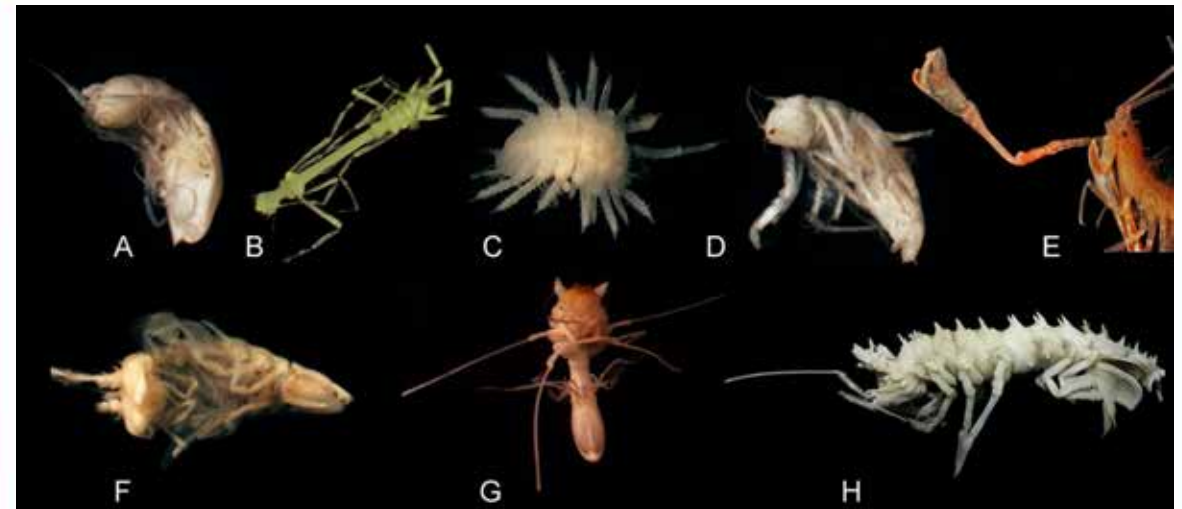


Abb. 4: Meeresasseln der Familien A) Haploniscidae, B) Ischnomesidae, C) Mesosignidae, D) Desmosomatidae, E) Munnidae, (F–H) Munnopsidae, F) Ilyarachninae, G) Munnopsinae, H) Storthyngurinae. Größen von A–F: wenige mm bis ca. 1 cm; G–H, 1–2 cm. Quellen: Wiebke Brökeland A–F, Michael Raupach G und Torben Riehl H.

ASSELN – VIELFÄLTIGE KRABBLER MIT BESONDEREN ANPASSUNGEN

Asseln sind extrem erfolgreich, man findet sie im Meer in allen Lebensräumen, aber sie haben auch das Land erobert, so sind die Meeresasseln sehr nahe verwandt mit unseren Landasseln, der Mauer- oder Kellerassel oder auch der in der Sahara beheimateten monogamen Wüstenassel *Hemilepistus reaumuri* (Milne-Edwards, 1840).

Genau wie die Zehnfüßkrebse sind auch die meisten Gruppen der Asseln mit nicht sehr vielen Arten in der Tiefsee vertreten, denn sie haben sich erst spät in ihrer Evolution dorthin auf den Weg gemacht. Die Gruppen der Ancturidae, Anthuroidea, Asellota und Serolidae können allerdings echte Tiefseerepresentanten aufweisen, von denen manche sogar bis ins Hadal vorgedrungen sind. Insbesondere die Asellota sind eine wichtige Tiefseegruppe mit vielfältigen Besonderheiten und Anpassungen. Manche ihrer Vertreter sind über weite Tiefenbereiche verbreitet, andere sind hochspezialisiert auf bestimmte Zonen (Abb. 4). Doch auch unter den Asselgruppen, die ansonsten

hauptsächlich im Flachwasser zu finden sind, gibt es einige spektakuläre Tiefseebewohner.

Die größte antarktische Meeresassel (*Glyptonotus antarcticus*) lebt auf dem antarktischen Kontinentalschelf



Abb. 5: Die räuberische Assel *Glyptonotus antarcticus* wird bis zu 17 cm groß. Foto: Torben Riehl.

und ernährt sich räuberisch von kleinen Krebsen, Würmern, Muscheln und Schnecken, daher sind ihre vorderen drei Laufbeinpaare mit großen Fangklauen ausgestattet. Das größte bisher gefundene Tier misst 17 cm und ist lebend von hellbrauner Farbe (Abb. 5).

DIE GRÖSSTE MEERESASSEL – EIN GIGANTISCHER AASFRESSER

Die Riesenasseln der Gattung *Bathynomus* (Isopoda: Flabellifera) ähneln auf den ersten Blick stark ihren Verwandten aus unseren Kellern und Vorgärten. Mit über 40 cm Körperlänge ist *Bathynomus giganteus*, der größte Vertreter dieser Aasfresser, allerdings deutlich größer als die uns vertrauten Landbewohner (Abb. 6). Vermutlich werden sie vom Geruch verrottender Tiere angelockt und sammeln sich schnell in großen Gruppen an der wert-



Abb. 6: *Bathynomus giganteus*. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.



Abb. 7: *Sursumura* sp., Vergrößerung von Abb. 3 H. Foto: Torben Riehl.

vollen Nahrung, die tote Wale und andere Tierkadaver für sie darstellen (vgl. Kap. 3.1). Scharfe, kräftige Mandibeln erlauben es ihnen, Wale, Fische oder andere tote Tiere am Meeresboden zu zerlegen. Sie fressen sich daran derart voll, dass es ihnen schwerfällt, sich wieder wegzubewegen. Nach einem solchen Festessen müssen sie für Wochen keine Nahrung mehr aufzunehmen.

Milne-Edwards beschrieb diese Art 1879, nachdem er ein männliches Jungtier von *Bathynomus giganteus* aus dem Golf von Mexiko gefischt hatte. Eine Sensation, denn erst kurz zuvor hatte Edward Forbes Thomson angenommen, dass es in den Tiefen der Weltmeere kein Leben gebe (vgl. Kap. 1.3). Diese Tiefseeassel lebt im Südwestatlantik. Mit einer Länge bis 45 cm und einem Gewicht bis 1,7 kg sind Riesenasseln ein gutes Beispiel für Tiefseegigantismus, denn die meisten ihrer Verwandten werden nur 1–5 cm lang. Im lebenden Zustand sind diese Asseln blasslila gefärbt.

SPINNENARTIGE TIEFSEEASSELN UND WURMARTIGE GRÄBER

Große Vielfalt findet man in einer anderen Asselgruppe, nämlich bei den Asellota. Hiervon gibt es in der Tiefsee uralte (mehr als 250 Millionen Jahre) Gruppen, die so stark an ein Leben in der Tiefsee angepasst sind, dass sie

auf den ersten Blick kaum an ihre Verwandten im Flachwasser oder an Land erinnern.

Munnopsiden sind Meeresasseln mit sehr langen Vorderbeinen (Beine 2–4), die beim Laufen am Meeresgrund wie Spinnen aussehen. Die ersten, etwas kürzeren Beine werden verwendet, um im Sediment nach Nahrung zu suchen, sie übergeben von Zeit zu Zeit Futter an die Mundwerkzeuge. Munnopsiden (*Sursumura* sp.) (Abb. 3H, Abb. 7) sind aber auch sehr effiziente Schwimmer, ihre Hinterbeine (Beine 5–7) sitzen an verbreiterten, muskelbepackten Segmenten und sind mit langen gefiederten Borsten ausgestattet, die den Vortrieb beim „Flossenschlag“ erhöhen. Diese Extremitäten werden benutzt, um sich rückwärts „propellerartig“ durch das Wasser zu ziehen, wobei die langen Vorderbeine dann vor dem Körper zusammengelegt werden müssen.

Diese schwimmende Lebensweise erklärt möglicherweise die weite geografische Verbreitung der Familie (Munnopsidae) in allen Ozeanen, aber auch ihre Tiefenverbreitung: Sie kommen in allen Tiefenzonen, vom Litoral bis in die hadalen Tiefseegräben vor (Abb. 3 F–H).

Im Gegensatz dazu verbringt eine andere Asselgruppe, die Langstielasseln (Macrostylidae), den Großteil ihres Lebens eingegraben im Sediment (Abb. 8). Entsprechend angepasst ist der Körper einer Langstielassel meist lang gestreckt und zylindrisch, die Beine sind kurz und liegen dem Körper dicht an. Auch diese Asseln findet man von küstennahen Gewässern bis in die tiefsten Tiefseegräben. Das Fehlen von Augen und das Auftreten ihrer größten Artenvielfalt im Abyssal deuten auf eine lange Evolutionsgeschichte in großen Meerestiefen hin, was von molekular-genetischen Studien bestätigt wird.



Abb. 8: Eine unbekannte macrostylide Assel aus dem Kurilen-Kamtschatka-Graben. Maßstab: A,B = 0,5 mm, Maßstab: C,D = 0,1 mm. Foto: Jonathan Kniese.

2.7.2 FISCHE DER TIEFSEE

Friedhelm Krupp, Uwe Zajonz

Seit Beginn der Tiefseeforschung diskutieren Wissenschaftler die Definition der Begriffe „Tiefsee“ und „Tiefseefische“. Man hat sich weitgehend darauf geeinigt, dass es Arten sind, die den größten Teil ihres Lebens unterhalb von 200 m Wassertiefe verbringen. Unterhalb von 1.000 m herrscht völlige Dunkelheit und die Wassertemperaturen liegen unter 4 °C. Dieser Lebensraum ist jenseits des Einflusses der Sonnenstrahlung und weit entfernt von den Hauptenergiequellen seiner Bewohner, die darum zumeist indirekt auf im flachen Wasser produzierte Nahrung zugreifen. Der Bereich zwischen 200 m und 1.000 m ist eine Übergangszone, und Arten, die hier vorkommen, werden oftmals auch in Abgrenzung zu „echten“ Tiefseefischen als „Tiefenwasserfische“ bezeichnet. Für die meisten Bewohner des Flachwassers ist dieser Bereich lebensfeindlich.

Im offenen Ozean wandern Tiefseefische oftmals nachts in flacheres Wasser. Sie verbringen also nicht unbedingt ihr gesamtes Leben in der Tiefe. Für Tiefsee-

fische, die am Meeresboden leben, bildet die Kante des Kontinentalschelfs in etwa 200 m Tiefe zumeist die obere Begrenzung ihres Lebensraums. Die größte Tiefe, in der jemals ein Fisch nachgewiesen wurde, liegt im Marianengraben bei 8.178 m. Es gibt auch Flachwasserfische, die in Tiefen unterhalb von 200 m vordringen können, so etwa der Hering oder der Kabeljau, die schon in Tiefen von 600 m bzw. 360 m gefunden wurden. Dennoch sind es keine Tiefseefische, da sie diese Tiefen nur gelegentlich aufsuchen. Während Tiefseefische lange Zeit nur von Netzfängen her bekannt waren, kann man sie heute mit Tauchbooten und ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen auch lebend und in ihrer natürlichen Umgebung beobachten.

DIE WUNDERWELT DER SPEZIALISTEN

Viele Tiefseefische haben im Laufe der Evolution ganz außergewöhnliche Anpassungen an diesen Extremlebensraum sowie beeindruckende Überlebensstrategien



Abb. 1: Der Boxer-Schnepfenaal *Nemichthys curvirostris* erreicht eine Länge von 1,4 m und kommt in Tiefen bis 2.000 m vor. Foto: Tomas Lundälv, Universität Göteborg.



Abb. 2: Loppes Kaulquappenfisch *Ljimaia loppei* lebt in Tiefen von 200–600 m vor der Atlantikküste Spaniens und Afrikas. Foto: Tomas Lundälv, Universität Göteborg.

entwickelt. Oftmals weisen sie bizarre Körperformen auf (Abb. 1, 2). Damit sie dem hohen hydrostatischen Druck in der Tiefe standhalten können, stabilisiert ein Aminoxyd, das sogenannte Trimethylamin-N-oxid (TMAO), Proteine in den Zellen der Fische. Mit zunehmender Tiefe erhöhen sich die TMAO-Konzentrationen. Da diese jedoch ab einer bestimmten Wassertiefe die Muskeln destabilisieren würden, können Fische unterhalb von 8.200 m nicht mehr existieren. Trimethylamin-N-oxid ist in vielen Fischen vorhanden und wird nach dem Tod von Bakterien zu Trimethylamin abgebaut, was den typischen Fischgeruch erzeugt.

Im Dunkel der Tiefe haben einige Arten extrem große und sehr lichtempfindliche Augen entwickelt, mit denen

sie auch bei wenig Restlicht noch sehen können. Hierzu gehört beispielsweise der in der Dämmerzone lebende Silberbeilbauch (Abb. 3). Im Gegensatz zu fast allen anderen Wirbeltieren können einige Fische des Tiefenwassers auch bei Nacht Farben erkennen. Bei Fischen, die ausschließlich in völliger Dunkelheit vorkommen, besitzen die Augen oftmals keine Funktion mehr und haben sich völlig zurückgebildet. Bei anderen Arten in gleichen Tiefen sind sie dagegen besonders gut entwickelt, denn viele Tiefseeorganismen besitzen Leuchtorgane, in denen mithilfe symbiontischer Bakterien Licht erzeugt wird (vgl. Kap. 2.7.9). Leuchtorgane dienen beispielsweise zum Anlocken von Beutetieren, so etwa beim Schwarzangler (Abb. 4).

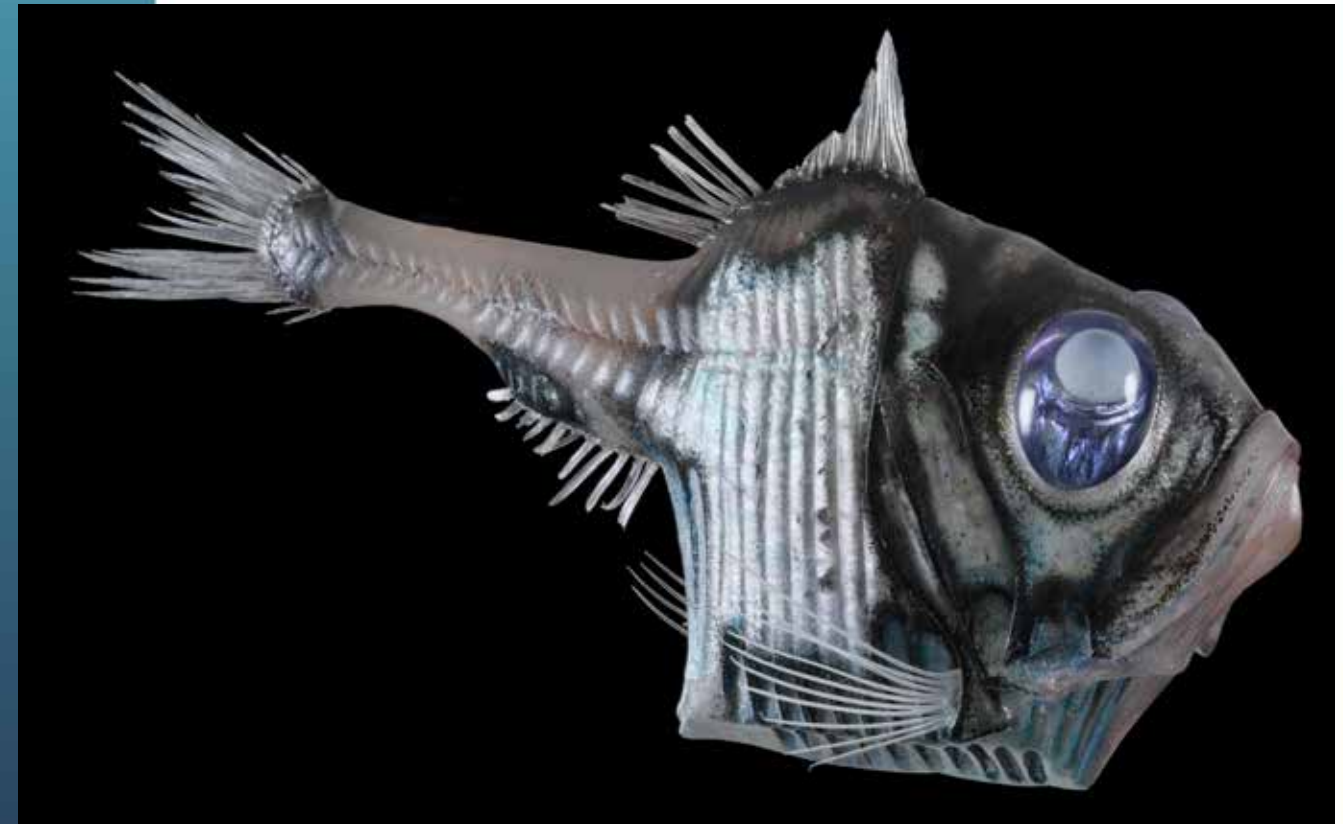


Abb. 3: Der Silberbeilbauch *Argyrolepiscus offersii* hat extrem große, hochempfindliche Augen, mit denen er die Lichtausbeute optimiert. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.

Während andere Fische nur blaues Licht sehen, sieht der Schwarze Drachenfisch mit seinen speziell angepassten Augen auch rotes Licht, das er mit Hilfe von Leuchtorganen unterhalb seiner Augen aussendet.

Die röhrenförmigen, extrem lichtempfindlichen Augen des Glaskopffisches (Abb. 5) liegen unter einer mit Flüssigkeit gefüllten transparenten Schutzhaube an der Oberseite seines Kopfes. Sie sind von leuchtend grünen Linsen bedeckt und werden nach oben gerichtet, wenn der Fisch nach Nahrung sucht, und nach vorne, wenn er frisst. Er ernährt sich von Zooplankton.

FINDEN UND (NICHT) GEFUNDEN WERDEN – DAS GEHEIMNIS DES ÜBERLEBENS

Die meisten Gebiete der Tiefsee sind äußerst dünn besiedelt, was das Auffinden von Beute erheblich erschwert. Der Pelikanaal kann sein Maul extrem weit öffnen, da seine Kiefer lediglich über elastische Membranen miteinander verbunden sind. So kann er relativ viele seiner kleinen Beuteorganismen gleichzeitig aufschnappen. Viele Tiefseefische dringen nachts in flacheres Wasser vor, um von dem dort unvergleichlich viel höheren Nahrungsange-

bot zu profitieren. Vor Sonnenaufgang kehren sie dann zurück in die Tiefe, um nicht selbst zur Beute zu werden. Zahlreiche Arten haben Eier, die zur Wasseroberfläche treiben, so dass die Larven im nährstoffreichen Flachwasser schlüpfen und heranwachsen können.

Die Populationsdichten der meisten Arten sind in der Tiefsee extrem niedrig und damit ist die Chance gering, dass Geschlechtspartner einander finden. Bei einigen Arten helfen Leuchtorgane bei der Partnersuche. Alternativ erkennen Männchen und Weibchen anderer Arten einander anhand spezieller Geruchsstoffe, sogenannter Sexual-

pheromone. Dreistelzenfische (Abb. 6), die sich mit ihren verlängerten Bauchflossen auf dem Meeresgrund gegen die Strömung stellen, um so Nahrung auf sich zukommen zu lassen, sind Zwitter und können sich notfalls selbst befruchten. Trifft das winzige Zwergmännchen des Teufelsänglers (Abb. 7) in den Weiten der Tiefsee auf ein seltenes Weibchen, verbeißt es sich in seine Partnerin, verwächst mit ihr, wird fortan über ihren Blutkreislauf versorgt und beschränkt sich nun darauf, Spermien zu produzieren. Die zur Partnerfindung benötigte Energie muss er damit nur einmal im Leben aufbringen.

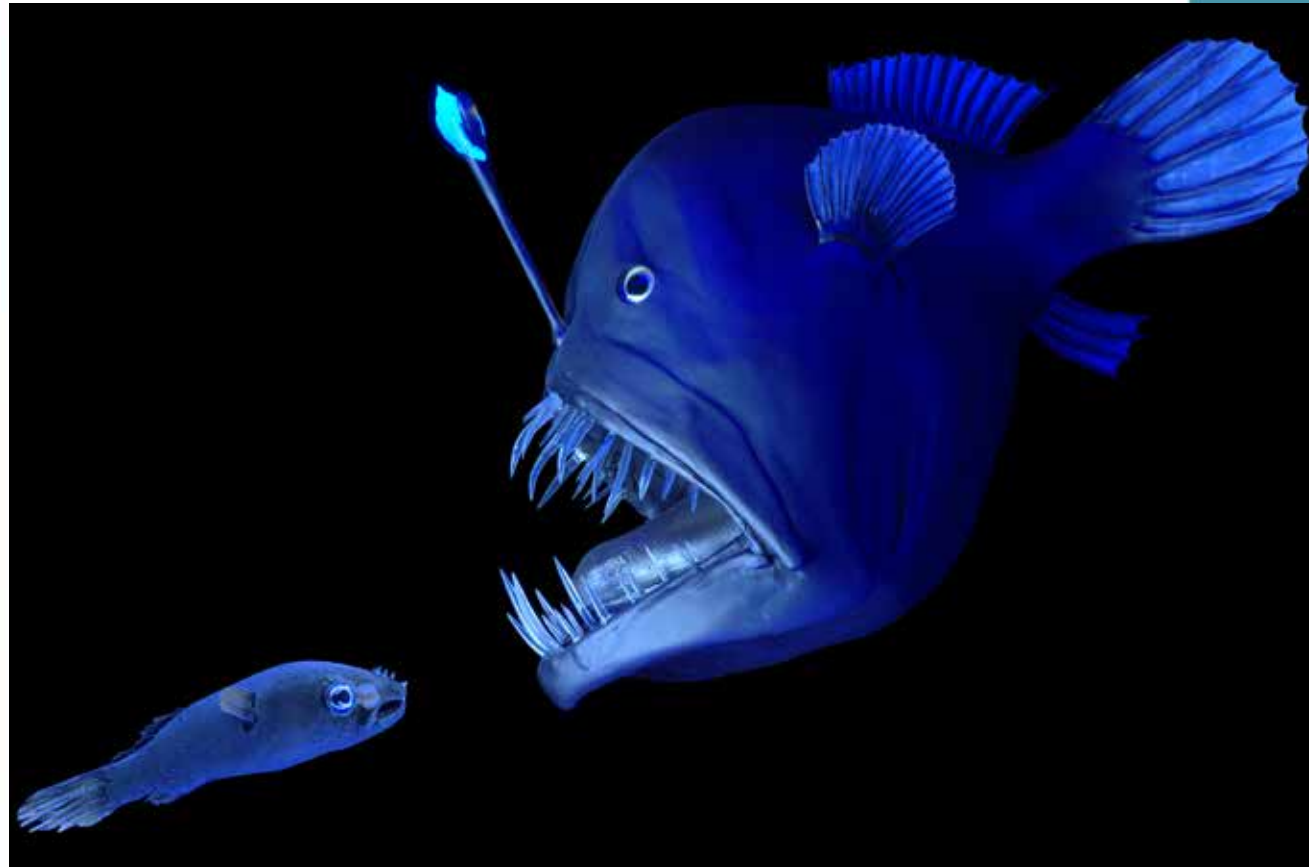


Abb. 4: Der Schwarzängler *Melanocetus johnsonii* besitzt ein Leuchtorgan an der Spitze seiner „Angel“. Vom Licht angezogen, schwimmen ihm kleinere Fische direkt vor das Maul. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.



Abb. 5: Der Glaskopffisch *Macropinna microstoma* lebt im nördlichen Pazifik von der Beringstraße bis zur Baja California in Mexiko in Tiefen von bis zu 1.000 m. Das Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARS) in den USA (Kalifornien) beforcht diese Fische intensiv. Foto: MBARS



Abb. 6: Dreistelzenfische *Bathypterois grallator* sind Zwitter, die sich selbst befruchten können, wenn sie keinen Geschlechtspartner finden. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.



Abb. 7: Weibchen des Teufelsanglers *Linophryne arborifera*. Das Zwergmännchen dieser Art hat nur etwa 1 % der Körpermasse des Weibchens. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.



Abb. 8: Der Rotmeer-Eidechsenfisch *Harpadon erythraeus* wurde 1983 von senckenbergischen Wissenschaftlern entdeckt. Er kommt ausschließlich im Roten Meer in Tiefen von 780–1.150 m vor. Foto: Erwin Haupt, Senckenberg.

DIE WOHL TEMPERIERTE TIEFSEE

Die Tiefseefischfauna des Roten Meeres bildet einen Forschungsschwerpunkt senckenbergischer Wissenschaftler. Sie unterscheidet sich ganz erheblich von derjenigen der Weltozeane, denn von 400 m bis hinab zu mehr als 2.000 m Tiefe liegt die Temperatur gleichbleibend bei 21,5 °C. Damit ist sie für an kaltes Wasser angepasste Tiefseefische zu hoch. Weiterhin verhindert die flache, nur 130 m tiefe Schwelle von Perim, die das Rote Meer mit dem Indischen Ozean verbindet, die Einwanderung von Tiefseearten. So entstand hier eine sekundäre Tiefseefauna, die sich aus Flachwasserarten entwickelt hat und durch einen hohen Anteil an Endemiten, Arten die nur hier vorkommen, gekennzeichnet ist (Abb. 8, 9).

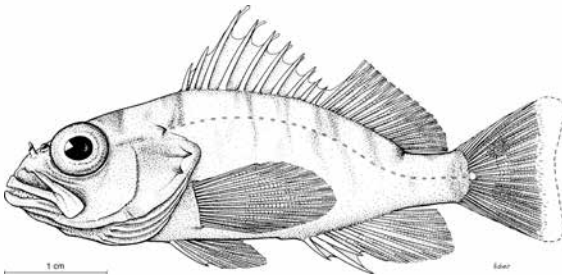


Abb. 9: Der Zwergfahnenbarsch *Plectranthias klausewitszi* aus dem Tiefenwasser des Roten Meeres wurde dem senckenbergischen Fischkundler Prof. Dr. Wolfgang Klausewitz, dem Pionier der Erforschung der Tiefseefische des Roten Meeres, gewidmet. Zeichnung G. Eder, Senckenberg.

2.7.3 MEERESBORSTENWÜRMER DER TIEFSEE

Dieter Fiege

Meeresborstenwürmer (Polychaeta, lateinisch für „Vielborster“) sind die marinen Verwandten der Regenwürmer. Obwohl viele Arten recht dünn und nur wenige Millimeter lang sind, gehören die Borstenwürmer zu den wichtigsten Tiergruppen im Meer, denn sie treten dort in großer Zahl und Artenvielfalt auf.

Bei den meisten Arten ist eine Gliederung in den Kopf mit Augen, Antennen und ggf. weiteren Anhängen und Sinnesorganen und in einen mehr oder weniger langen geringelten, aus einzelnen Segmenten aufgebauten Körper zu erkennen. Dies ist besonders typisch für räuberisch auf dem Meeresboden lebende Arten, z. B. der Gattung *Nereis* (Abb. 1). Diese sind weltweit verbreitet und kommen auch in der relativ flachen Nordsee vor. *Nereis*-Arten sind oft relativ groß und machen aktiv Jagd auf ihre Beute, die sie mit zwei starken Kiefern ergreifen, die am Ende eines ausstülpbaren Rüssels sitzen. Etwa 10.000–14.000 bekannte Polychätenarten leben in den Meeren. Sie kommen in allen marinen Lebensräumen und oft in hoher Individuendichte vor. Im Nahrungsnetz der Meere spielen sie eine wichtige Rolle: Zum einen dienen sie selbst als Nahrung für Fische,

Krebse oder auch für Vögel, die bei Niedrigwasser die Wattflächen nach Organismen absuchen, die im oder auf dem Meeresboden leben. Zum anderen fressen Polychäten ihrerseits kleinere Organismen und sonstige organische Stoffe. Mit ihrer Verdauung gelangen die Nährstoffe wieder zurück in die Umwelt und können erneut verwertet werden.

Polychäten sind aber auch Baumeister, die Gänge ins Sediment bohren oder Röhren aus Kalk, Sand oder Schleim bauen, in die sie sich bei Gefahr zurückziehen können. In vielen Fällen können solche Röhren zusätzlich mit einem Deckel verschlossen werden. Der Wurm ist so vor Fressfeinden geschützt. Über die Gänge im Sediment sorgen Borstenwürmer für eine Durchmischung und Durchlüftung des Meeresbodens und machen so zumindest die obersten Schichten für viele andere Organismen bewohnbar. Zu den auffälligsten Borstenwürmern gehören die Sternaspidae, hier *Sternaspis scutata*, die weltweit – vom Flachwasser bis in die Tiefsee – verbreitet sind (Abb. 2). Polychäten gibt es in Seegraswiesen, im Schlick- und Sandwatt, in Korallenriffen und als schwimmende Formen im freien Wasser



Abb. 1a: *Nereis* sp. Kopfregion mit charakteristischen sensorischen Anhängen (Antennen, Taster, Tentakel).

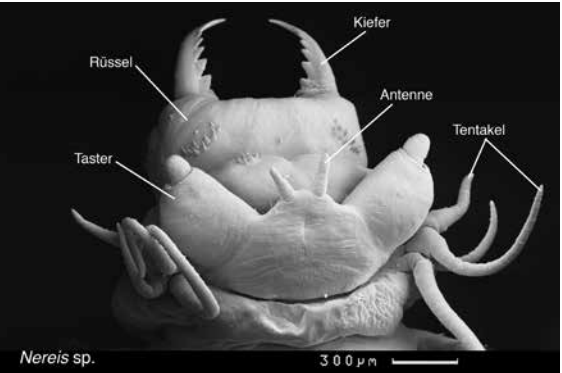


Abb. 1b: *Nereis* sp. Kopfregion mit ausgestülptem Rüssel und Kiefern (Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme). Fotos: Dieter Fiege.

des Pelagials sowie auch in und auf den „Schlickwüsten“ der großen Tiefseebecken. Sie sind eine evolutionsbiologisch sehr alte Tiergruppe, die frühesten fossilen Nachweise stammen bereits aus dem Kambrium (vor ca. 500–520 Mio. Jahren). Auch in dieser Tiergruppe haben sich unterschiedliche Lebensformen herausgebildet, so z. B. neben Räubern, auch Plankton- oder Sedimentfresser.

DIE EXZENTRIKER DER WURMWELT

Darüber hinaus gibt es auch Borstenwürmer, die speziell an das Leben in Extrembiotopen angepasst sind, wie z. B. die Nähe der Hydrothermalquellen (engl. hot vents) an den Rändern der Kontinentalplatten. Obwohl aufgrund der großen Tiefe sehr hoher Druck herrscht, Sonnenlicht als Energieträger fehlt und toxische Schwefelverbindungen im Wasser gelöst sind, existieren hier sehr produktive Lebensgemeinschaften mit Biomassen von 10–70 kg Nassgewicht/m². Die Wassertemperaturen von 20–30 °C sind zwar deutlich wärmer als die sonst nur knapp über 0 °C liegenden Temperaturen in der Tiefsee, aber mit einem gewissen Abstand zu den Austrittsstellen der Schlote auch deutlich kühler als die dort gemessenen Temperaturen von z. T. über 400 °C. Die Basis der Nahrungskette bilden hier chemolithotrophe Bakterien, die ähnlich wie grüne Pflanzen und Algen zur Bildung organischer Verbindungen aus Kohlendioxid (CO₂) in der Lage sind. Die Energie für diese Syntheseprozesse gewinnen sie allerdings statt aus dem Sonnenlicht aus der chemischen Oxidation von Schwefelverbindungen (z. B. Schwefelwasserstoff), die in der Umgebung der Schlote in reichem Maße im Wasser gelöst sind. Während die Tiere der Tiefsee aufgrund der niedrigen Temperatur und des geringen Nahrungsangebots normalerweise eine recht geringe Stoffwechselrate haben, ist diese bei manchen Vertretern der Hydrothermalfauna sehr hoch. So ist z. B. für den Borstenwurm *Riftia pachyptila* eine Wachstumsrate bis zu 50 cm pro Jahr nachgewiesen worden.

Zur Hydrothermalfauna gehören z. B. Vertreter der Polychätenfamilie Alvinellidae, die sich von Bakterien ernähren, die teils frei, teils auf ihrem Körper leben. Einige dieser



Abb. 2: *Sternaspis scutata*. Foto: Dieter Fiege.

Würmer leben in Röhren, in denen Wassertemperaturen bis 70 °C gemessen worden sind (Abb. 3). Weitere Vertreter der Polychäten an den Hydrothermalquellen sind die meist räuberisch lebenden Schuppenwürmer. Benannt sind sie nach den Schuppen, die ihren Rücken schützend bedecken. Borstenwürmer der Gattung *Branchiopolynoe* leben in der Mantelhöhle von Muscheln der Gattung *Bathymodiolus* (Abb. 4). Man hielt sie zunächst für Symbionten oder Kommensalen, Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass sie sich von kleinen Stücken der Muschelkiemen ernähren und somit eher als Parasiten einzustufen sind.



Abb. 3: *Paralvinella unidentata*. Foto: Michael Reuscher.

Für den röhrenbewohnenden Wurm *Riftia pachyptila* und einige verwandte Arten hatten Systematiker wegen ihrer Gestalt und Lebensweise ursprünglich einen eigenen Tierstamm errichtet (Vestimentifera = Bartwürmer) bevor geklärt werden konnte, dass es sich um spezialisierte Polychäten handelt. *Riftia pachyptila* besitzt keinen Verdauungsapparat und ist daher nicht zu eigenständiger Nahrungsaufnahme in der Lage. Der Wurm wird von bakteriellen Symbionten ernährt, die sich in einem eigenen, als Trophosom bezeichneten Körperabschnitt befinden. Gegen die giftige Wirkung der im Wasser gelösten Schwefelverbindungen schützen sich die Würmer zum einen durch spezielle Enzyme in den äußeren Körperschichten, die diese Verbindungen unschädlich machen. Zum anderen werden Schwefelverbindungen für den Transport zu den symbiontischen Bakterien, ähnlich wie beim Menschen der Sauerstoff, fest an im Blut flottierende Moleküle gebunden und erst in den Bakterien wieder freigesetzt und abgebaut.

Eine weitere hochinteressante Polychätengattung namens *Osedax* (lateinisch für „Knochenfresser“) wurde 2002 in der Monterey Bay in Kalifornien in 2.900 m Tiefe auf dem Kadaver eines Grauwales entdeckt. Inzwischen sind weltweit 15 Arten bekannt, die als Nahrungsspezialisten von den Knochen toter Wale leben (vgl. Kap. 3.1).

Die Nahrungsaufnahme erfolgt über wurzelartig verzweigte Strukturen des hinteren Körperendes, die die Walknochen durchdringen. Wie bei der oben erwähnten *Riftia pachyptila* fehlt auch den *Osedax*-Arten Mundöffnung und Verdauungstrakt, die Verdauung erfolgt hier mit Hilfe heterotropher Bakterien, die endosymbiontisch in den Würmern leben. Auch die Fortpflanzung von *Osedax* weist Besonderheiten auf. Die größeren, d. h. mit bloßem Auge sichtbaren Exemplare sind weiblich. Sie tragen am vorderen Körperende federartige Kiemen. In ihren transparenten Röhren leben zahlreiche, mikroskopisch kleine Männchen, deren Körper mit Spermien gefüllt sind. In Abhängigkeit von der Größe der Weibchen wurden z. T. über 100 Männchen in einer Röhre gefunden.

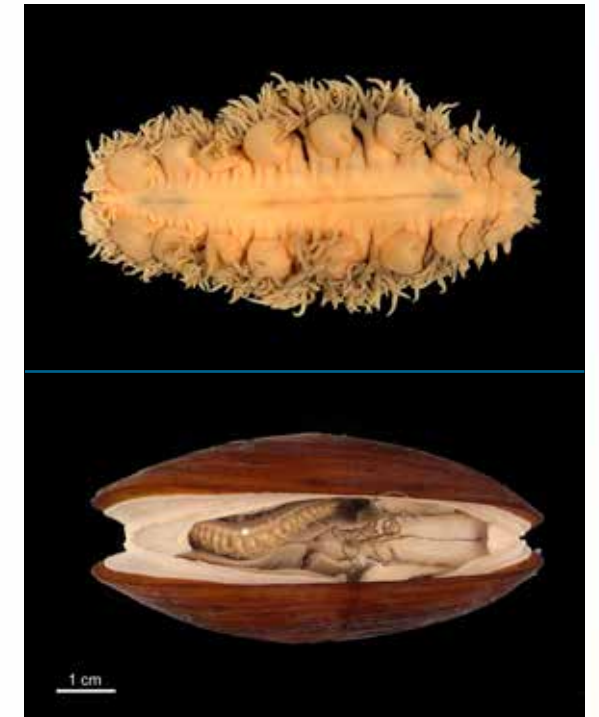


Abb. 4a: *Branchiopolynoe pettiboneae*.

Abb. 4b: *Branchiopolynoe pettiboneae* in der Tiefseemuschel *Bathymodiolus brevior*.

Fotos: Sven Tränkner, Senckenberg.

2.7.4 TINTENFISCHE DER TIEFSEE

Véronique Merten

Tintenfische schwimmen bereits seit 500 Mio. Jahren in unseren Meeren, lange bevor die ersten Dinosaurier auftraten. Sie gehören wie Muscheln und Schnecken zu den Weichtieren oder Mollusken und sind die bei Weitem am höchsten entwickelten Organismen dieser Tiergruppe. Zu ihnen gehören Kalmare, Kraken und Sepienartige mit derzeit etwa 800 beschriebenen Arten, die alle Meeresräume, von den Küstengewässern bis in die Tiefsee, besiedeln.

Abb. 1: Tiefseekrake aufgenommen im pazifischen Ozean im September 2015 mit dem ROV Kiel 6000 während einer Ausfahrt mit der FS Sonne (S0242). (Foto: XY- bitte ergänzen). bei allen



KOPFFÜSSER MIT KÖPFCHEN

In der Tiefsee kommen hauptsächlich Kalmare und einige Kraken vor. Unterschieden werden sie vor allem nach der Anzahl ihrer Arme, die man eigentlich „Füße“ nennen müsste, denn das wissenschaftliche Fachwort für Tintenfische heißt „Cephalopoda“, was aus dem Griechischen stammt und „Kopffüßer“ bedeutet. Kraken haben acht muskulöse Arme, auf denen jeweils bis zu 240 kräftige Saugnäpfe ausgebildet sein können (Abb. 1). Kalmare dagegen besitzen acht Arme und zwei Tentakel. Bei einigen Kalmaren entwickeln sich die Saugnäpfe an den Tentakeln

zu hornigen Haken, mit denen sie ihre Beute besser greifen und in Stücke reißen können. Der Körper eines Tintenfisches wird „Mantel“ genannt. Alle Tintenfische besitzen einen hornartigen, sehr kräftigen Schnabel, der ähnlich geformt ist wie der von Papageien. Hinter dem Schnabel folgt eine mit zahlreichen Zähnchen versehene Raspelzunge, die Radula. Schnabel und Radula helfen, die Beute zu zerkleinern, bevor sie geschluckt wird. Da das Gehirn von Tintenfischen wie ein Ring um die Speiseröhre gelegt ist, vermeiden es die Tiere, harte und große Beutestücke zu verschlingen, um nicht das komplexe Gehirn zu verletzen.

Abb. 2: pelagischer Zirren-Krake aufgenommen im pazifischen Ozean im September 2015 mit dem ROV Kiel 6000 während einer Ausfahrt mit der FS Sonne (S0242). (Foto: XY- bitte ergänzen).



Mit mehr als 150 Millionen Nervenzellen stellt das Tintenfischgehirn das größte Gehirn der Wirbellosen dar, und in einem Tintenfischarm werden bis zu 350 Millionen zusätzliche Nervenzellen vermutet. Manche dieser Nervenzellen können einen Durchmesser von 1 mm erreichen und sind damit die größten bekannten Nervenzellen im Tierreich. Zum Vergleich: Menschliche Nervenzellen werden maximal 0,02 mm dick.

SEHEN UND (NICHT) GESEHEN WERDEN

Extrem groß sind auch die leistungsstarken Linsenaugen, die in Bau und Funktion unseren Augen ähneln. Der Linsendurchmesser von ausgewachsenen Riesenkalmaren kann bis 40 cm betragen und die Augen des Vampirkalmars (*Vampyroteuthis infernalis*) machen ein Drittel seines Körperdurchmessers aus. Damit hätten wir den nächsten

Superlativ: die größten Augen im Tierreich. Eine weitere Besonderheit sind die drei Herzen der Tintenfische. Das zentral gelegene arterielle Herz nimmt das Blut von den zwei Kiemen in Empfang, während die zwei zusätzlichen kontraktile (zusammenziehbaren) Kiemenherzen das Blut zurück in die Kiemen pressen. Neben dem sehr leistungsfähigen und hochentwickelten Blutgefäßsystem, das dem von Wirbeltieren ähnelt, haben Tintenfische eine gewaltige Stoffwechselaktivität. Erwachsene Tiere fressen täglich bis 20 % ihres Körpergewichts. Das entspräche bei einem 75 kg schweren Menschen etwa 15 kg Nahrung täglich. Auch das Körperwachstum von einigen heranwachsenden Kalmare ist enorm. Sie verdoppeln ihr Körpergewicht jede Woche und können innerhalb von 6–12 Monaten von ein paar Gramm auf 5–10 kg heranwachsen. Menschen bräuchten dafür 2 Jahre.

Die vielleicht faszinierendste Eigenschaft von Tintenfischen ist ihre Fähigkeit, Struktur und Farbe ihrer Haut blitzschnell zu verändern. Dies funktioniert durch das Zusammenspiel zahlreicher Farbzellen (Chromatophoren). Diese Chromatophore sind wie kleine elastische Taschen, die mit verschiedenen Farbstoffen (Pigmenten) gefüllt und von sternförmig angeordneten Muskelzellen umgeben sind. Die Muskelzellen können vom Nervensystem einzeln gesteuert werden, so dass sich die Farbstofftaschen erweitern oder zusammenziehen und somit einen Farbwechsel in der Haut bewirken (Abb. 2). Viele Tintenfische besitzen in einigen Hautregionen an die 100 Farbzellen pro Quadratzentimeter, von denen sich einige bis zum 20-Fachen vergrößern können.

Etwa 75 % aller Tiefseetintenfische besitzen außerdem sehr komplexe Leuchtorgane (Photophoren) in oft verwirrender Vielfalt und Anzahl. Es gibt zwei verschiedene Leuchtorgane: intrinsische und bakterielle (vgl. Kap. 2.7.9). Intrinsische Leuchtorgane produzieren Licht durch die chemische Luciferin-Luciferase-Reaktion (Abb. 3). Dabei wird Energie freigesetzt, die das sogenannte kalte Licht erzeugt, das der Kommunikation und der Tarnung dient. Die bakteriellen Leuchtorgane benutzen symbiotische,

Licht produzierende Bakterien, die in speziellen Kammern in der Tintenfischhaut leben. Diese Kammern sind häufig mit dem Tintensack verbunden, und bei Gefahr können die Bakterien mit der Tinte ins Wasser abgegeben werden, so dass eine leuchtende Tintenwolke entsteht, die den Angreifer verwirren soll.

Eine andere effektive Entwicklung der Tintenfische für Flucht und Fortbewegung ist der sogenannte Siphon. Der Siphon ist eine Einfaltung des Mantels, der, wie eine Art Düse, bei kräftiger Muskelkontraktion Wasser aus dem Mantel presst. Durch diesen Rückstoßantrieb können ozeanische Kalmare bis auf 80 km/h beschleunigen. Sie schwimmen dabei rückwärts und können bei Flucht vor Feinden sogar bis 100 m weit über die Wasseroberfläche gleiten.



Abb. 3: Glaskrake (*Vitreledonella richardi*) aufgenommen westlich der Kap Verden im östlichen tropischen Atlantik. Foto: JAGO-Team GEOMAR Kiel, Ausfahrt POS532 mit dem Tauchboot JAGO.

SAGENHAFTE TIEFSEE: VON RIESEN, KOLOSSEN UND VAMPIREN

Der wohl bekannteste Vertreter der Tiefseekalmare ist der Riesenkalmare *Architeuthis*. Über sein Vorkommen und seine Lebensweise ist nur wenig bekannt. Es wird vermutet, dass *Architeuthis* in 500–1.500 m Tiefe vorkommt. Jedenfalls sind das die Wassertiefen, in denen Riesenkalmare in der kommerziellen Fischerei als Beifang in den Netzen auftreten. Mit einer Gesamtlänge von bis zu 18 m gehört der Riesenkalmare zweifellos zu den größten wirbellosen Tieren im Meer. Allerdings sind diese Angaben sehr ungenau. Tintenfische sind Weichtiere und Längenmessungen gestalten sich daher schwierig. Die maximale Mantellänge der Tiere beträgt „nur“ ca. fünf Meter. Was

die Tiere so groß macht, sind die langen Arme und Tentakel (Abb. 4); insgesamt können sie bis 900 kg wiegen. Der Kolossalmar, *Mesonychoteuthis hamiltoni*, kann vermutlich schwerer werden als der Riesenkalmare, ist aber nicht so groß. Der Vampirkalmare erreicht dagegen nur eine Maximallänge von 30 cm, ist dafür aber der einzige bekannte Tintenfisch, der sich von den Überresten abgestorbener Planktonorganismen, von Krebshäuten und Kotpellets ernährt, die von der Oberfläche als „Meeresschnee“ hinabsinken. Er kommt in einer Tiefe von 600–1.200 m vor. Als Übergangsform von den zehnamigen Kalmaren zu den achttarmigen Kraken ist er ein lebendes Fossil. So besitzt der Vampirkalmare zehn Arme, von denen zwei zu langen, klebrigen, dünnen Filamenten ausgebildet sind, mit denen er seine Nahrung einsammeln kann.



Abb. 4: Tentakel eines Riesenkraken (*Architeuthis dux*) im Größenvergleich. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.

2.7.5 SCHWÄMME DER TIEFSEE

Dorte Janussen

Die Schwämme oder Poriferen („Porenträger“) sind eine erfolgreiche Tiergruppe, und zwar in allen Weltmeeren und seit den Anfängen vielzelliger Lebens auf unserem Planeten. Von der Gezeitenzone und Lagunen bis ins Hadal sind Schwämme eine außerordentlich diverse, weit verbreitete und erfolgreiche Tiergruppe. Seit dem Erdaltertum gibt es sie auch im Süßwasser. In der Tiefsee spielen Schwämme als Pioniersiedler und Habitat, als Nahrungsquelle und Brutstätte für viele andere Lebewesen eine wichtige ökologische Rolle. Dies gilt vor allem für die vergleichsweise großen Glasschwämme (Klasse Hexactinellida), eine sehr alte Schwammgruppe (die ersten fossilen

Nachweise stammen aus etwa 545 Mio. Jahre alten Erdschichten), die heute überwiegend in der Tiefsee anzutreffen ist, wo manche Arten auch massenhaft vorkommen können.

GRAZILE GLASSCHWÄMME

Hexactinelliden gehören zu den Kieselschwämmen, und, wie der Name sagt, ist ihr Skelett durch sechsstrahlige Glasnadeln (Hexactine) charakterisiert. Diese sind oft ästhetisch sehr ansprechend, wie überhaupt die Schönheit der Glasschwämme Menschen seit Jahrhunderten in

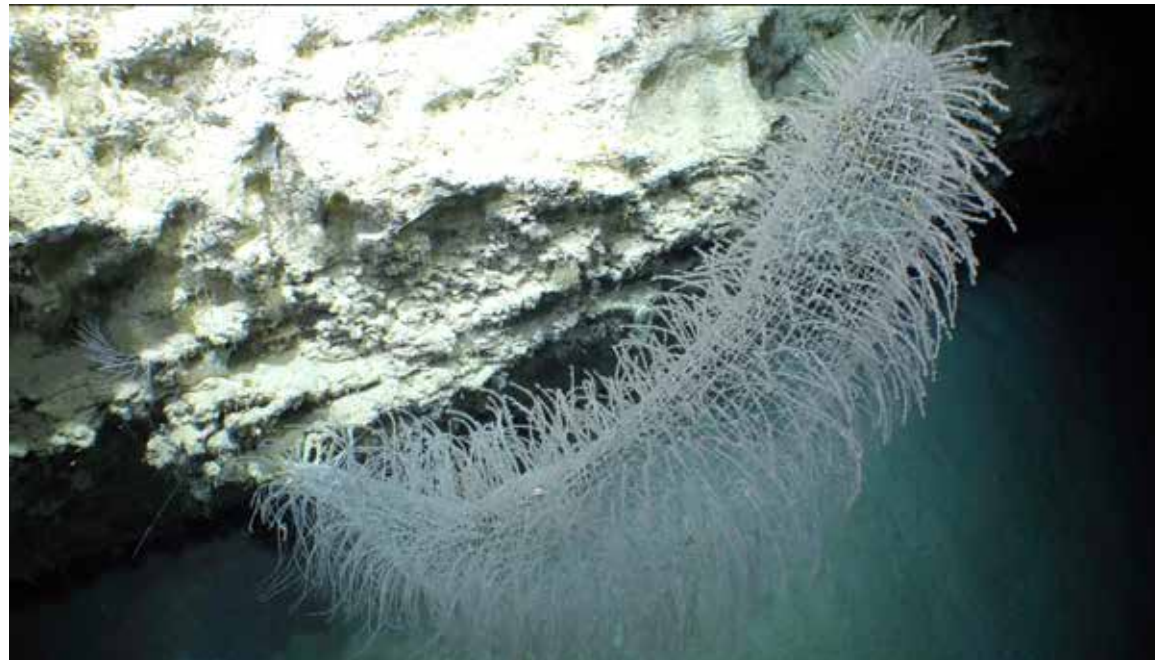


Abb. 1: Nicht näher identifizierter Glasschwamm in der Tiefsee von Perth Canyon, vor West Australien. Foto: Jane Fromont, mit freundlicher Genehmigung.



Abb. 2 (links): Der Gießkannenschwamm (*Euplectella aspergillum*). Foto: Chris Kelly, mit freundlicher Genehmigung.

Abb. 3 (rechts): Massenvorkommen der Glasschwamm-Art *Sericolophus hawaiiicus* vor Hawaii. Foto: Adele Pile, mit freundlicher Genehmigung.

ihren Bann zieht (Abb. 1, 2). Diese fragilen Meereswesen wurden zuerst aus Südostasien und Fernost bekannt, und noch heute findet sich an der Ostküste Japans eine der artenreichsten Vergesellschaftungen hexactinellider Schwämme. Obwohl Glasschwämme in erster Linie Tiefseeorganismen sind, kommen sie in der japanischen Sagami-Bucht aufgrund einer besonderen Bodenbeschaffenheit (Hydrografie) schon ab 300 m bis etwa 1.000 m Tiefe vor. Sie wurden hier früher als Beifang der Langleinen-Fischerei gesammelt; die Fischer verkauften sie als Heimdekoration und als Geschenke für traditionelle japanische Hochzeiten (Abb. 2). Im Nordost-Atlantik beispielsweise leben in 1.000 m Tiefe große hexactinellide Schwämme der Art *Pheronema carpenteri* stellenweise in einer Dichte von mehr als 1,5 Individuen pro Quadratmeter. In großen Meerestiefen vor Hawaii gedeiht eine andere, ansonsten seltene Glasschwammart: *Sericolophus hawaiiicus* (Abb. 3). Die großen, z. T. sehr dicht wachsenden Schwämme leben vor allem auf dem Kontinentalschelf der Antarktis

und sind aufgrund ihres beeindruckenden Größenwachstums (oft mehr als 1 m Höhe) berühmt, sie spielen jedoch auch im tiefen Südpolarmeer eine Rolle.

MIT HAKEN UND ÖSEN – RAUBSCHWÄMME

In puncto Ernährung stellen die fleischfressenden Schwämme der Familie Cladorhizidae (Raubschwämme) eine Ausnahme innerhalb der Schwämme dar. Die Raubschwämme gehören zur Klasse Demospongiae (Hornkieselschwämme) und leben meist in sehr großen Tiefen. Die bisher tiefsten Fänge von Raubschwämmen stammen aus 8.000 m Tiefe im Kurilen-Kamtschatka-Graben. Schwämme ernähren sich normalerweise, indem sie winzige Nahrungspartikel, wie z. B. Bakterien, aus dem Meerwasser filtern. Die räuberische Ernährung ist eine besondere Anpassung an das Leben in der Tiefsee, wo das Bodenvasser meist besonders nährstoffarm ist. Die karnivore Ernährung mancher Blütenpflanzen, die wie Schwämme

100

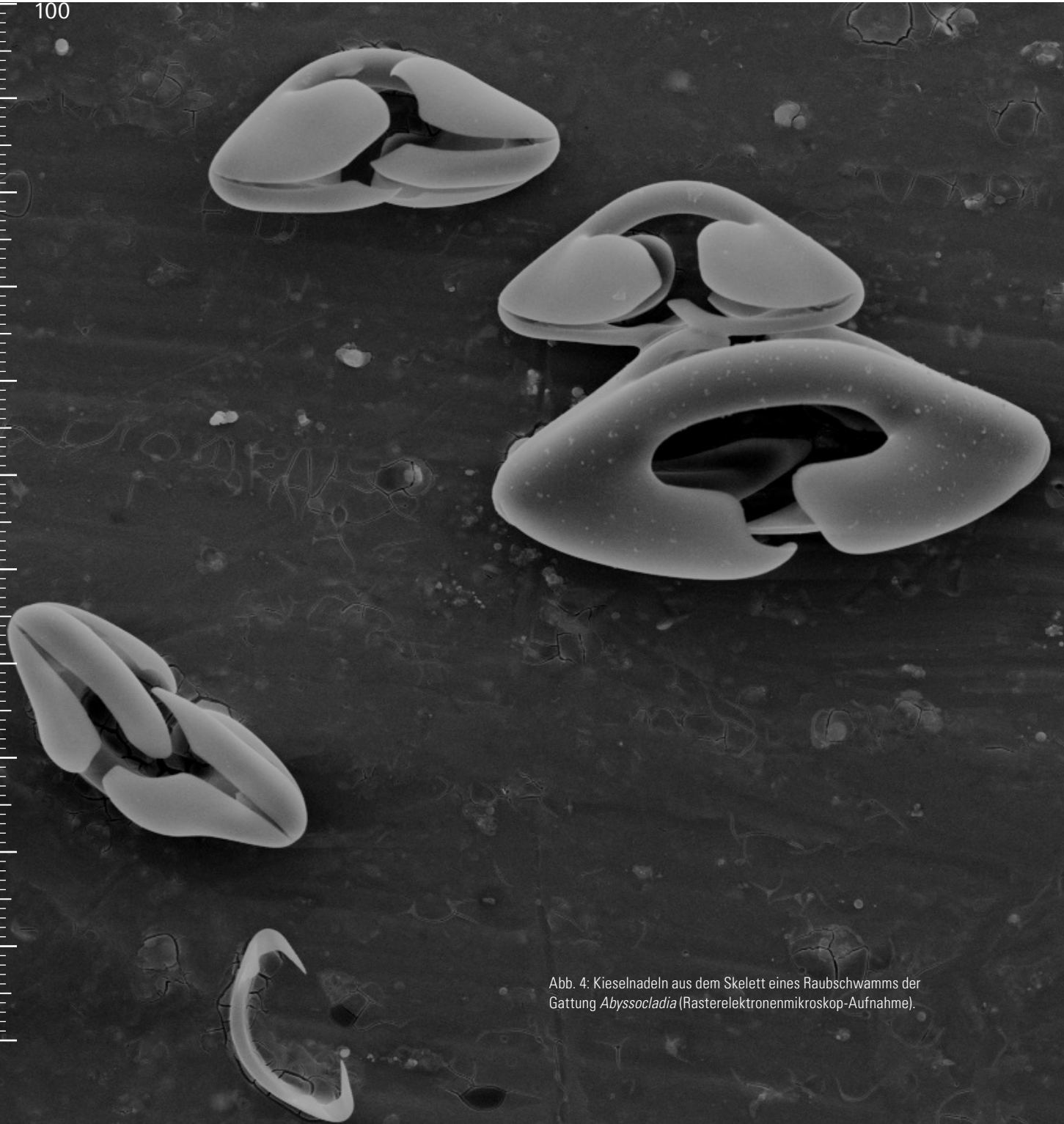


Abb. 4: Kieselnadeln aus dem Skelett eines Raubschwamms der Gattung *Abyssocladia* (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme).

ebenfalls keine Verdauungsorgane besitzen, ist ein interessantes Beispiel für unabhängige (konvergente) Evolution innerhalb nicht näher verwandter Organismen. Bei den Pflanzen ist die Karnivorie jedoch nur ein „Zubrot“, während die Photosynthese der primäre Nährstofflieferant bleibt. Bei den Schwämmen ist die Umstellung von der ursprünglich filtrierenden Lebensweise auf Beutefang vermutlich nur einmal in der Evolution erfolgt. Sie bedeutete eine vollkommene Neuorganisation des Körperbaus: Das Wasserleitsystem ist zurückgebildet, so dass diese

Schwämme nicht mehr filtrieren können und sich ausschließlich von gefangenen Tieren ernähren müssen. Dafür haben sie ein Netz von Filamenten entwickelt, die mit winzigen Häkchenskleren besetzt sind (Abb. 4), mit denen sie sehr effektiv die nur wenige Millimeter kleinen Krebstiere, die sich ahnungslos darauf niederlassen, festhalten, in den Körper hineinziehen und verdauen. Raubschwämme leben meist vereinzelt in Meerestiefen von mehreren Tausend Metern, wo sie sehr artenreich sind und neben den Glasschwämmen meist als einzige Schwammgruppe



Abb. 5: Federförmiger Raubschwamm (*Cladorhiza*) auf Glasschwamm (*Caulophacus*) in 2500 m Tiefe im arktischen Hausgarten. Foto: Melanie Bergmann, AWI, mit freundlicher Genehmigung.



Abb. 6: Raubschwamm (*Cladorhiza corallophila*) auf Tiefwasserkoralle vor Mauretanien.
Foto: André Freiwald, DZMB, mit freundlicher Genehmigung.

vorkommen. In manchen Regionen, wie im sogenannten „Hausgarten“-Observatorium in der arktischen Framstraße in etwa 2.500 m Tiefe, kommen sie jedoch auch massenhaft vor und können zu beachtlichen Größen heranwachsen (Abb. 5). Die Spezies *Cladorhiza corallophila* hat sich auf das Zusammenleben mit Korallen in Tiefwasserriffen vor Mauretanien spezialisiert (Abb. 6).

KALKSCHWÄMME – FÜR ÜBERRASCHUNGEN GUT

Die Kalkschwämme (Klasse Calcarea) gelten traditionell überwiegend als Flachmeerorganismen. Der berühmte Schwammforscher Ernst Hentschel schrieb im „Handbuch der Zoologie“ (1923/1925) über die Calcarea folgendes: „Ihrer Tiefenverbreitung nach müssen die Calcarea als ausgeprägte Flachwasserschwämme bezeichnet werden...

Unter 700 m sind keine mehr sicher nachgewiesen.“ Dieser Mythos hält sich, trotz vielerlei gegenteiliger Berichte über Kalkschwämme aus großen Meerestiefen immer noch hartnäckig. Sie trifft jedoch insofern zu, dass die Calcarea zwar in flachmarinen Bereichen relativ häufig sind, aber aufgrund des in der Tiefsee herrschenden hohen CO₂-Partialdrucks tun sie sich mit ihren fragilen Skelettnadeln aus Kalk (CaCO₃) bei der Skelettbildung dort eher schwer, sie sind deshalb in großen Tiefen relativ selten und meist oft nur wenige Millimeter klein (Abb. 7). Während der Tiefsee-Expeditionen der vergangenen Dekaden konnten mithilfe von speziellen Geräten, die eigentlich für den Fang kleiner Krebstiere und Würmer konstruiert wurden, Tausende Exemplare verschiedener Calcarea-Arten aus Tiefen von 3.000 bis 5.000 m gesammelt werden. An manchen Stellen vor Norwegen und Ostgrönland wird ihre Dichte auf annähernd ein Individuum pro Quadratmeter Meeresboden geschätzt. Im Mittelmeer konnten unerwartete Vorkommen von Kalkschwämmen in Tiefen zwischen 1.500 und 2.775 m nachgewiesen werden, und in der Antarktis wurden ebenfalls Kalkschwämme in der Tiefsee und in etwa 600 m Tiefe sogar ein Massenvorkommen entdeckt.

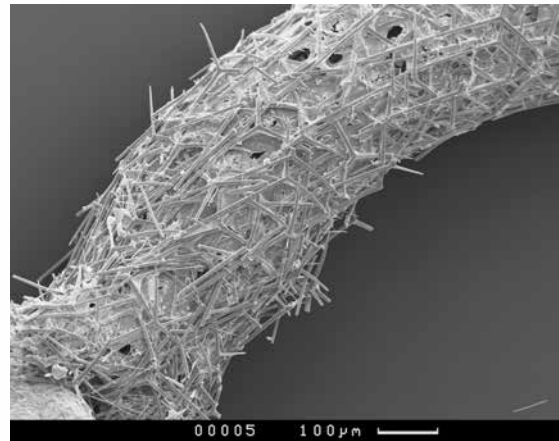


Abb. 7: Kleiner Tiefsee-Kalkschwamm (*Sycon abyssale*) auf einer Foraminifere (Kammerling) (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme).

2.7.6 RIFFE IN DER TIEFSEE

André Freiwald, Lydia Beuck

Allgemein denkt man beim Stichwort Korallen an warme, lichtdurchflutete Meere der Subtropen und Tropen. Tatsächlich lebt die Hälfte der bekannten Steinkorallenarten (Scleractinia) jedoch in großen Tiefen, bei niedrigen Wassertemperaturen und vorwiegend in völliger Dunkelheit. Ihre Lebensräume und enorme Verbreitung offenbarten sich erst in den letzten drei Jahrzehnten durch den gezielten Einsatz modernster kartierender und bildgebender Technologien. Tiefwasserkorallen leben überwiegend in 250–1.200 m Wassertiefe an Kontinentabhängen, die den Übergangsbereich vom überfluteten Festlandsockel in die Tiefsee darstellen, an submarinen, steilen Hängen vulkanischer Seeberge, an den Flanken großer ozeanischer Bänke und in den Fjord- und Sundregionen der hohen Breiten bei Wassertemperaturen von etwa 4–13 °C. So weisen diese Tiefwasserkorallen mit einer Verbreitung von den subpolaren Breiten bis in die Tropen im Vergleich zu den (sub-) tropischen Warmwasserkorallen eine ungleich weitere geografische Verbreitung auf. Eindrucksvolle Tiefwasserkorallenvorkommen finden sich zum Beispiel vor Norwegen mit über 6.000 kartierten Riffen, etwa 2.000 bis 350 m hohe Korallenhügel liegen weiter südlich vor Irland, und vor der Küste von Mauretanien (Nordwestafrika) existiert sogar eine ungefähr 580 km lange und etwa 100 m hohe Korallenhügelkette.

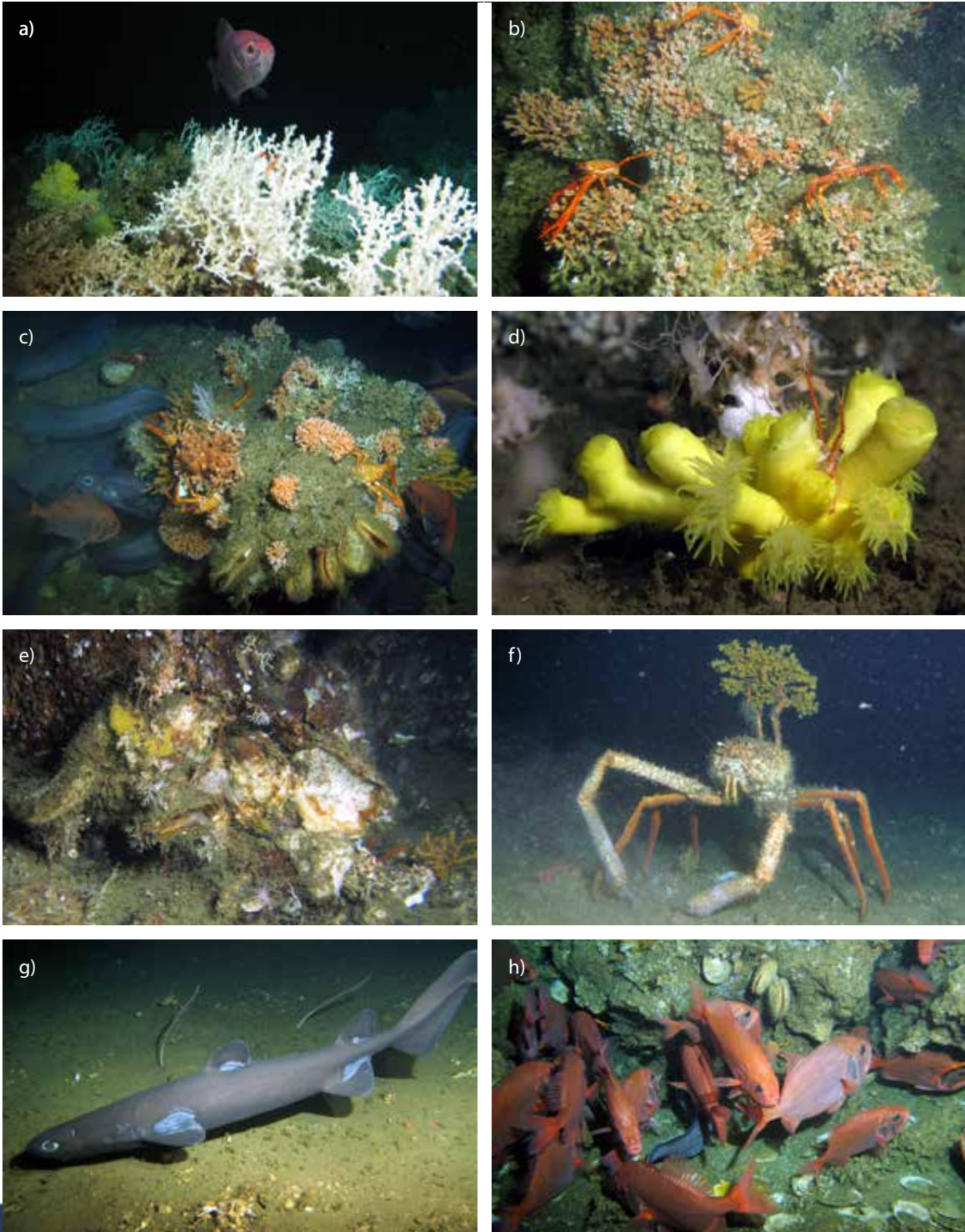
ERNÄHRUNG UND ARTENVIELFALT

Die meisten tropischen Steinkorallen besitzen eine Besonderheit, die ihnen das Überleben in den ansonsten nährstoffarmen Meeren überhaupt erst ermöglicht: eine Symbiose mit pflanzlichen Einzellern aus der Gruppe der Dinoflagellaten. Die lichtabhängigen (phototrophen) Symbionten binden diese Steinkorallen, die in der Fachsprache auch als „zooxanthellate“ Korallen bezeichnet werden, an

die flache, lichtdurchflutete Zone des Meeres. Etwa die Hälfte der heute lebenden Steinkorallen existiert allerdings ohne phototrophe Symbionten, sie zählen folglich zu den „azooxanthellaten“ Korallen, zu denen auch die Tiefwasserkorallen gehören. Unabhängig vom Faktor Sonnenlicht können diese auch große Wassertiefen besiedeln, allerdings sind sie auf Strömungen angewiesen, die sie mit Nahrung bzw. gelösten Nährstoffen versorgen.

Von den zurzeit 711 bekannten Arten azooxanthellater Steinkorallen gelten nur 17 als lebensraumformend in den großen Tiefen der Weltmeere. Allerdings sind selten mehr als zwei Korallenarten in einem Seegebiet signifikant am Aufbau der Riffgerüste beteiligt (Abb. 1a, b). Wahre Kosmopoliten unter den koloniebildenden Tiefwasserkorallen sind *Desmophyllum pertusum*, *Madrepora oculata* und *Solenosmilia variabilis*. Die in diesem System anzutreffende hohe Artenvielfalt erstreckt sich daher in erster Linie auf die Begleitfauna (Abb. 1c–h). So sind aus dem Lebensraum der weltweit vorkommenden Tiefwasserkoralle *Desmophyllum pertusum* in der Literatur (nach eigener Listung) bis dato 13.004 Arten beschrieben, aber mit jeder Expedition entdecken wir auch heute noch viele neue Arten. So wurde im Jahr 2009 eine bis 30 cm große neue Austernart beschrieben, die Methusalem-Tiefwasserauster *Neopycnodonte zibrowii*. Ihr deutscher Name bezieht sich auf ihre lange Lebensspanne: Einzelne Individuen können außergewöhnlich alt werden, z. T. mehr als 500 Jahre (Abb. 1e). Tiefwasserkorallen bieten den assoziierten Arten vor allem Nahrung und Schutz und stellen mit ihrer hohen Artenvielfalt somit wahre Oasen der Tiefe dar.

Wegen ihres langsamen Wachstums sind Tiefwasserkorallen jedoch stark von einer Zerstörung durch Bodenschleppnetzfisherei bedroht. Umso wichtiger ist es, die existierenden Tiefwasserriffe zu ermitteln und entsprechende Schutzgebiete auszuweisen, die als Rückzugs-



gebiete für die assoziierte Fauna dienen und deren Lebensräume nachhaltig bewahren.

GEFAHREN FÜR TIEFWASSERKORALLENRIFFE UND IHRE BEWOHNER

Tiefwasserkorallenlebensräume sind einer Vielzahl von Bedrohungen ausgesetzt, wobei die Bodenschleppnetz-fischerei einen unmittelbaren, messbaren Schaden erzeugt. Bodenschleppnetze zerstören die langsam wachsenden Korallenriffe. In Netzen verhedderte Korallengerüste zeugen von deren letztem Einsatzgebiet (Abb. 2a). Manchmal bleiben Netze am Meeresboden hängen und stehen unter Spannung (Abb. 2b). Sie werden als „Geisternetze“ bezeichnet, weil sich schwimmende Meerestiere weiterhin in diesen Netzen verfangen und dort verenden können. Darüber hinaus können die Scherbretter der Bodenschleppnetze tief in den Meeresboden drücken und charakteristische Spuren hinterlassen (Abb. 2c).

Abb. 1: Tiefwasserkorallenriffe und assoziierte Arten in 400–650 m Wassertiefe. a) Westlicher Atlantik (Great Bahama Bank), Kaiserbarsch (*Beryx decadactylus*) über weißen Tiefwasserkorallen. b)–h) Östlicher Atlantik, vor Mauretanien. Im Einzelnen: b) Krebse (*Eumunida bella*) nutzen gern die erhöhten Positionen im Riff, um besser an Nahrung zu gelangen. c) Die kalkigen Skelette abgestorbener Tiefwasserriffbereiche werden gern von diversen Organismen besiedelt, wie hier von Oktokorallenarten, Feilenmuscheln (*Acesta* sp.) oder der neu beschriebenen Raubschwammart *Cladorhiza corallophila*. d) Kolonie der gelben Baumkoralle (*Dendrophyllia cornigera*). e) Methusalem-Tiefwasserauster (*Neopycnodonte zibrowii*). f) Die letzten Laufbeinpaare der Trägerkrabbe (*Paromola cuvieri*) sind zum Tragen umfunktioniert. Dieses imposante Männchen trägt vermutlich zum Schutz vor Fressfeinden eine mit einer Krustenanemone überwachsenen Oktokoralle. g) Ein Schokoladenhai (*Dalatias licha*) schwimmt an Seefedern (*Funiculina quadrangularis*) vorbei. h) Darwins Schleimkopf (*Geophyroberyx darwinii*) und Aalmuttern (*Zoarcidae*) suchen unter einem Tiefwasserkorallenriff Schutz. Fotos: Abb. 1a, © MARUM, Universität Bremen; Abb. 1 b–h, © T. Lundälv, Sven Lovén Centre for Marine Infrastructure, Universität Göteborg.

Eine weitere Gefahr stellt die Vermüllung der Meere dar (vgl. Kap. 4.4). Je nach Umweltbedingungen schätzt man den Zerfallsprozess, z.B. für eine PET-Flasche, auf über 450 Jahre. Am Meeresboden treibende Plastiktüten können sich sehr leicht in den stark verästelten Tiefwasserkorallenkolonien verfangen und die von einer Plastiktüte überdeckten Korallentiere und andere betroffene Organismen verhungern oder ersticken dann (Abb. 2d). Zudem kann Plastik giftige Chemikalien, wie Weichmacher, freisetzen und von Meeresorganismen konsumierte Plastikpartikel reichern sich in der Nahrungskette an. So kann ein Speisefisch zum „trojanischen Pferd“ werden und den Plastikmüll bzw. die giftigen Komponenten am Ende zum Konsumenten zurückbringen.

Der giftige Rotschlamm (Bauxitrückstand) im Cassidagne-Canyon vor Marseille, Frankreich, erinnert daran, dass das Meer – besonders in der Vergangenheit – gern als „Deponie“ für toxische Substanzen betrachtet wurde. Dieser Schlamm entstand bei der Aluminiumgewinnung und wurde dort via Pipeline von 1967 bis 2015 eingeleitet. Das schützende Polypengewebe der Korallen hält die lebenden Korallenskelettzonen frei von diesem Rotschlamm (Abb. 2e).

Darüber hinaus liegen Tiefwasserkorallenriffe nicht selten in Gebieten, in denen es Erdöl- und Erdgasvorkommen gibt. Sich ändernde Umweltbedingungen, wie Klimaerwärmung, Strömungsänderungen, Ozeanversauerung, Sauerstoffminimumzonen, aber auch erhöhter Sedimenteintrag oder Nahrungsknappheit können die Lebensbedingungen der Tiefwasserkorallen und ihrer assoziierten Arten verschlechtern und lokal zum Absterben von Tiefwasserriffen führen (Abb. 2f). Die meisten Arten der Tiefwasserkorallenlebensräume nutzen allerdings im Zuge ihrer Vermehrung die Meeresströmungen zur Verbreitung. Somit bleibt zu hoffen, dass sie auch zukünftig auf Gebiete mit lebensfördernden Umweltbedingungen treffen.

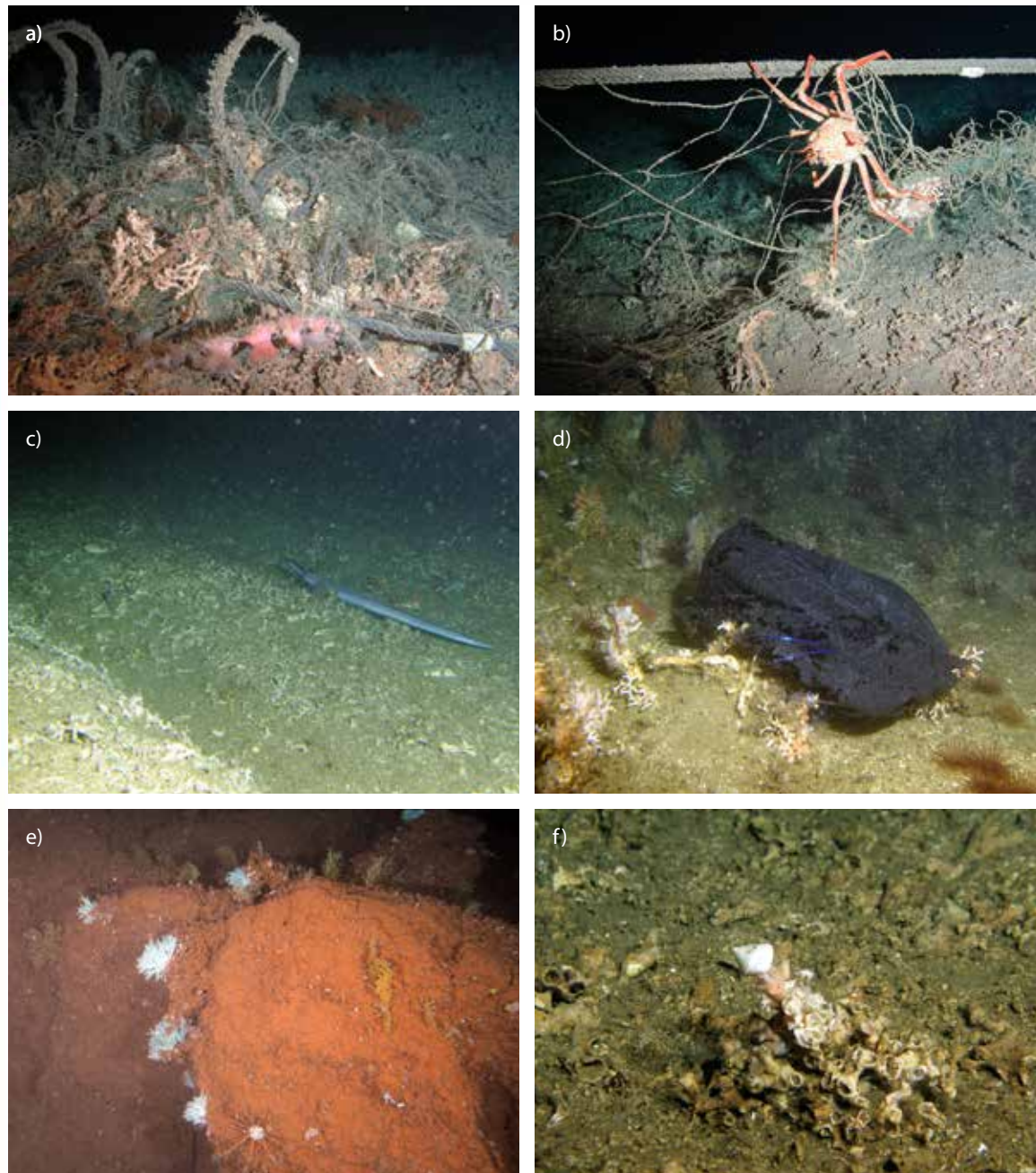


Abb. 2: Bedrohungen für Tiefwasserkorallenlebensräume. a) Zerstörung der Riffe durch Bodenschleppnetzfisherei. b) Eine weibliche Trägerkrabbe (*Paromola cuvieri*) bei der Erkundung eines Geisternetzes. c) Ein Salzwasser-Aal (*Nettastoma cf. melanurum*) schwimmt entlang einer Scherbrüpfmarken in einem Korallenschuttgebiet. d) Korallentiere der Augenkoralen (*Madrepora oculata*) ersticken oder verhungern unter einer im Korallengerüst verfangenen Plastiktüte. e) Umweltsünden der Vergangenheit: giftiger Rotschlamm (Bauxitrückstand), der bei der Aluminiumgewinnung entstand und ins Meer geleitet wurde. f) Klimaerwärmung, Ozeanversauerung und Sauerstoffminimumzonen können Lebensbedingungen der Tiefwasserkorallen verschlechtern und zum Absterben führen.

2.7.7 DIE (FAST) UNSICHTBAREN – KLEINSTLEBEWESEN IN DER TIEFSEE

Gritta Veit-Köhler, Terue Cristina Kihara

Wenn von Kleinstlebewesen die Rede ist, dann denken die meisten an Bakterien und andere Mikroben. Doch „kurz vor unsichtbar“ gibt es noch eine weitere, vielfältige Welt von Lebewesen. Zu dieser sogenannten Meiofauna gehören Tiere, die in ihrer Größe zwischen Makrofauna

und Mikrofauna liegen (das griechische Wort „meios“ bedeutet „kleiner“). Meiofauna ist fast überall zu finden, wo es Wasser gibt: von den Polargebieten bis zu den Hydrothermalquellen, in Höhlen und im Grundwasser, in Flüssen, Seen und im Moos, ja sogar im Hochgebirge. In tropischen



Abb. 1: Garnelen (*Bythocaris* sp.) und Seelilien (*Bathyrinus carpenterii*) leben auf dem Weichboden in der Fram Straße westlich von Spitzbergen (Tiefe: 2.500 m). Schwämme (hier: *Caulophacus arcticus* und *Cladorhiza gelida*) können nur auf Steinen wachsen, die von abschmelzenden Eisbergen herabgefallen sind. Foto: Melanie Bergmann, AWI.

Regionen leben sie auf Bäumen, z.B. in den Kelchen von Bromelien, und weltweit auch in der Tiefsee. Obwohl die Meiofauna eine durch standardisierte Siebe definierte Größenklasse ist (kleiner als 1 mm und größer als 32 µm), zeichnet sie sich besonders durch ihre Lebensweise aus.

Die meisten ihrer Vertreter sind Tierarten mit einer „benthonischen“ Entwicklung. Ihre Larven leben im und am Meeresboden und werden nicht – wie bei einem Groß-

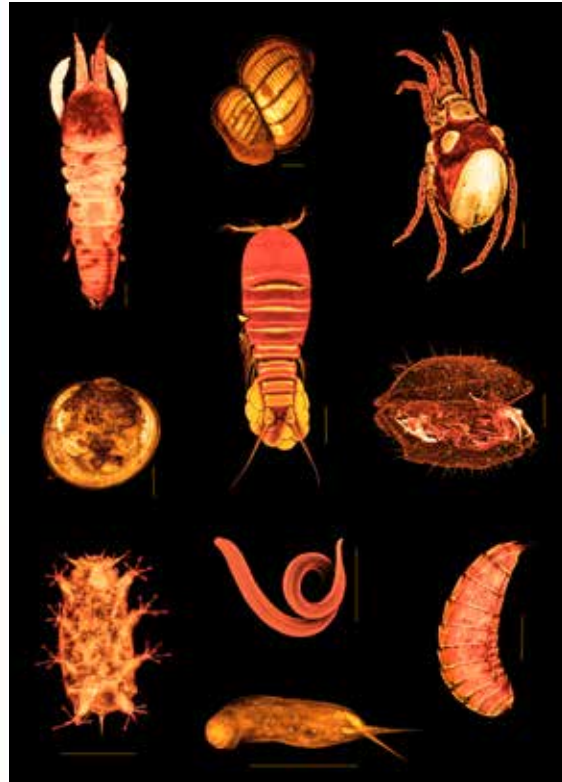


Abb. 2: Meiofauna aus der Tiefsee, aufgenommen mit dem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (CLSM), koloriert. Oben (v.l. n.r.): Scherenassel (*Tanaidacea*), Schnecke (*Gastropoda*), Meeresmilbe (*Halacarida*). Mitte: Muschel (*Bivalvia*), Ruderfußkreb (Copepoda), Muschelkrebs (Ostracoda). Unten: Bärtierchen (Tardigrada), Fadenwurm (Nematoda), Hakenrüssler (Kinorhyncha). Unten Mitte: Bauchhärting (Gastrotricha). Maßstäbe: 100 µm (0,1 mm).

Fotos: Terue C. Kihara, Helen Lichtenstein, Severin Korfhage, Nancy F. Mercado-Salas.



Abb. 3: Nach vier Stunden wird der Multicorer mit seinen gefüllten Plexiglasrohren aus über 5.000 m Tiefe zurück an Bord der Sonne geholt. Foto: Sophia Reichelt.

teil der Makrofauna – frei ins Wasser abgegeben und mit den Meeresströmungen über weite Strecken verbreitet. Die generell wenigen Nachkommen der Meiofauna müssen „laufen“, um sich zu verbreiten. Tiere der Meiofauna besiedeln auch andere Lebewesen: So bieten Schwämme mit ihren Poren und Kanälen geeigneten Lebensraum.

Eine typische Meiofauna-Gemeinschaft setzt sich hauptsächlich aus Fadenwürmern (Nematoda) und Ruderfußkrebsen (Copepoda), gefolgt von Hakenrüsslern (Kinorhyncha), Bärtierchen (Tardigrada), Rädertieren (Rotifera), Muschelkrebsen (Ostracoda) und den schon aufgrund ihres Namens interessanten Bauchhärtingen (Gastrotricha) oder Korsettträgertieren (Loricifera) zusammen. Meiofauna umfasst also ein anderes Spektrum von Gruppen als die Makrofauna, mit Ausnahme von besonders kleinen Vertretern der Ranzenkrebse (Peracarida, z.B. Scherenasseln, Tanaidacea), Muscheln und Schnecken (*Bivalvia*, *Gastropoda*). Auch große Einzeller wie Kammerlinge (Foraminifera) oder Wimpertierchen (Ciliophora) gehören dazu.



Abb. 4: Merten Bohn und Gritta Veit-Köhler bergen einen Sedimentkern aus dem Multicorer. Foto: Mine Tekman.

WENN DER BLICK IN DIE RÖHRE NEUE EINSICHTEN LIEFERT

An Bord großer Forschungsschiffe gibt es verschiedene Möglichkeiten der Probenahme. So auch auf der Sonne, auf der zur Beprobung des Meeresbodens hauptsächlich der sogenannte Multicorer (MUC) eingesetzt wird. Die neueste Variante dieses Geräts ist mit zwanzig Plexiglasrohren ausgestattet, die nach der Landung auf dem Meeresboden langsam in das Sediment gedrückt werden. Wird er wieder angehoben, schließen Deckel die sedimentgefüllten Rohre oben und unten ab. Die meisten Tiere leben im obersten Zentimeter des Meeresbodens, daher ist der MUC mit seinen ungestörten Sedimentkernen das ideale Probenahmegerät.

Mit einem MUC wurden auch die Proben für eine Studie zur Vielfalt der bodenlebenden Ruderfußkrebse (Copepoda, Harpacticoida) im Angola-Becken genommen. In 75 Sedimentproben fanden die beteiligten Wissenschaftler insgesamt 7.081 Ruderfußkrebse, von denen etwa 30 % adult waren. Diese erwachsenen Tiere gehörten unglaublichen 682 verschiedenen Arten an, von denen 99,3 % bis dahin noch völlig unbekannt waren! Eine solche Diversität und so hohe Artenzahlen von einer einzigen Tiergruppe hatte man eigentlich nur in tropischen Regenwäldern oder in Korallenriffen vermutet – bis die Tiefsee genauer unter die Lupe genommen wurde.

Die Tiefsee besteht nicht nur aus schlammigen Ebenen. Eisen, Nickel, Kobalt und Kupfer enthaltende Manganknollen bedecken weite Teile des Meeresbodens. Hydrothermalquellen lassen Schwarze und Weiße Raucher mit ihren polymetallischen Sulfiden entstehen und versiegen. Kobaltreiche Krusten finden sich an den Hängen von Seebergen.

Alle diese Tiefseelebensräume haben eins gemeinsam: Sie bergen eine große Vielfalt kleiner Organismen, die ganz speziell an diese Lebensräume angepasst sind. In Manganknollenfeldern finden sich diversere Gemeinschaften von Fadenwürmern als in Sedimenten ohne Knollen. Aber: Eine einmal gezogene Schleppspur im Tief-



Abb. 5: Blick in die Röhre: Auf dem Schlack aus mehr als 5.000 m Tiefe liegen Manganknollen. Im Schlack, aber auch an und in den Knollen tobt das Leben. Foto: Gritta Veit-Köhler.

seeboden bleibt mindestens 25 Jahre lang bestehen, und die gestörten Lebensgemeinschaften in der Spur haben sich selbst nach so langer Zeit nicht erholt. Fragile Lebensräume wie Schwarze Raucher werden mit einem Tauchroboter (Remotely Operated Vehicle, ROV) beprobt. Kamera-gesteuert und mit Greifarmen und Saugpumpen versehen, nimmt der Roboter gezielt Proben, die oft als dominante Gruppe Ruderfußkrebse der Familie Dirivultidae enthalten, sonst in der Tiefsee eher selten anzutreffende Tiere.

VON DER ART ZUR GEMEINSCHAFT – NUTZUNG GENETISCHER METHODEN

Möglichst viele der neu entdeckten Arten sollten wissenschaftlich dokumentiert werden. Die Ruderfußkrebse sind eine Modellgruppe für die Meiofauna: Zwei Paar Anten-

Tauschen Bild 6 und 7 möglich? sonst Platzproblem

nen, vier Paar Mundwerkzeuge und fünf Paar Beine ergeben eine Menge Charakteristika, anhand derer neue Arten von bereits bekannten unterschieden werden können. Mit Zeichnungen, Bildern und in Worten beschrieben, werden sie der wissenschaftlichen Welt zugänglich gemacht. Da das zwar sehr wichtig, aber auch sehr langwierig ist, werden genetische Methoden angewandt, um neue Arten zu untersuchen und sie somit leichter (wieder)erkennen zu können, z.B. das sogenannten Barcoding (einzelne Individuen) oder auch das Metabarcoding (alle Tiere einer Probe und damit ganze Meiofaunagemeinschaften). Durch die Kombination verschiedener Methoden können Veränderungen in den Gemeinschaften über Zeit und Raum und auf Artebene zuverlässig beobachtet werden.

Je mehr Proben aus der Tiefsee geholt werden, umso besser wird unser Eindruck von der Verbreitung der Arten.



Abb. 7: Unter dem Binokular wird die Welt der Meiofauna sichtbar: Hier sind Flohkrebse, Borstenwürmer und Fadenwürmer zu sehen. Foto: Viola Siegler.



Abb. 6: Marco Bruhn vom Deutschen Zentrum für Marine Biodiversitätsforschung (Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven) sortiert die Proben und zählt die Meiofauna. Foto: Viola Siegler.

Viele der neuen Arten sind aus weit voneinander entfernten Gebieten bekannt, und je mehr Meeresgebiete untersucht werden, umso größer wird ihr Verbreitungsgebiet. Andere Arten wiederum sind auf einzelne Ozeane oder sogar nur einzelne Tiefseebecken beschränkt.

Artenkenntnis und das Wissen über die Verbreitung der Arten sind besonders wichtig, um abschätzen zu können, wie der inzwischen immer wahrscheinlicher werdende Abbau von metallhaltigen Knollen und Krusten in der Tiefsee diese fragile Gemeinschaft beeinflussen wird (vgl. Kap. 2.6). Senckenberg-Wissenschaftler um Pedro Martínez Arbizu arbeiten an diesen brandaktuellen Fragen:

- Welche Tierarten leben in Manganknollenfeldern oder an Hydrothermalquellen?
- Werden durch kommerziellen Rohstoffabbau zerstörte Gebiete wieder von Organsimen besiedelt, und wie lange dauert das?



Abb. 8: Die Tiere werden mit dem Farbstoff Bengalrosa eingefärbt. Nur so sind die kleinen Ruderfußkrebse auf dem Objektträger – gerade noch – erkennbar. Foto: Gritta Veit-Köhler.

— Sind die Tiere verschiedener Tiefseegebiete genetisch identisch, oder werden durch den Abbau unwiederbringlich Arten ausgelöscht oder genetische Vielfalt zerstört?

Setzen wir uns dafür ein, dass die Menschheit den Lebensraum Tiefsee mit Bedacht und Umsicht nutzt, denn niemand kann bisher mit Sicherheit sagen, was langfristig geschehen wird, wenn aus der Tiefsee Arten verschwinden.



Abb. 9: Drei Arten von nahe verwandten Ruderfußkrebsen aus der Tiefsee der Antarktis, Weddellmeer: Emertonia andeep (gelb, Weibchen), Wellisopsyllus antarcticus (rot, Männchen) und Emertonia bernardi (grün, Weibchen), alle unter 0,4 mm (CLSM-Aufnahmen, koloriert). Fotos: (v. l. n. r.) Gritta Veit-Köhler, Johanna Kottmann und Terue Kihara, Annabel Mathiske.

2.7.8 HASTE TÖNE? – KOMMUNIKATION IM MEER

Bernd Ueberschär

Viele Meereslebewesen verständigen sich sowohl über optische Signale als auch über Schall. Wobei Letzterer wegen der geringen Sicht im Meer – besonders unterhalb der vom Licht erhellten Zone (euphotische Zone) – eine größere Bedeutung hat. Unter Tiefseebewohnern wird auch Biolumineszenz zur Verständigung mit Artgenossen genutzt (vgl. Kap. 2.7.9). Der folgende Beitrag widmet sich der akustischen Kommunikation der Meeresbewohner.

SCHALL IM WASSER, GERÄUSCHE IM MEER

Schall verhält sich im Wasser anders als in der Luft. Die Schallgeschwindigkeit ist im Meerwasser etwa viermal höher als in der Luft und beträgt ungefähr 1.500 m/s, in der Luft dagegen nur 343 m/s. Außerdem ist die Schallabsorption im Wasser wesentlich geringer als in der Luft und nimmt besonders zu tieferen Frequenzen hin ab. Die akus-

Was ist der SOFAR-Kanal im Meer?

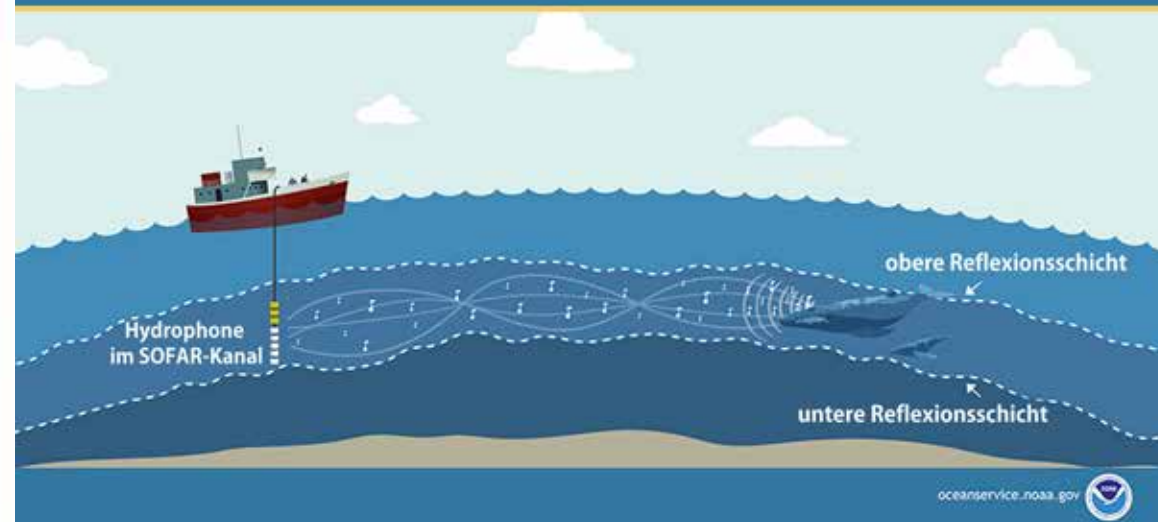


Abb. 1: Der SOFAR-Kanal („Sound Fixing And Ranging Channel“) entsteht durch natürliche Dichteschichtungen (Salzgehalt, Druck- und Temperaturunterschiede) in den Ozeanen. Dieser Bereich verhält sich wie ein Kanal, in dem Geräusche reflektiert und – ähnlich wie in einem Lichtfaserleiter – über große Distanzen transportiert werden können. Mit Hydrophonen, die in den SOFAR-Kanal gehängt werden, kann man z. B. den Gesang der Buckelwale über große Strecken abhören. Quelle: NOAA.



Abb. 2: Robben, hier eine Kegelrobbe, erzeugen Geräusche über Stimmbänder wie andere an das Landleben gebundene Säugetiere. Bei der Kommunikation unter Wasser sind die über Stimmbänder erzeugten Laute aber eher die Ausnahme. Foto: Gabi Müller.

tische Orientierung unter Wasser funktioniert daher sehr gut, und die Reichweite des Schalls ist um ein Vielfaches höher als die Sichtweite. Leonardo da Vinci bemerkte schon 1490: „Wenn du ein Rohr in das Wasser tauchst und das andere Ende an dein Ohr hältst, kannst du Schiffe auf sehr große Entfernungen hören.“

Die Unterwasserwelt in den Meeren ist voller Geräusche natürlichen Ursprungs. Für viele Meereslebewesen, insbesondere Fische und Wale, spielt die akustische Kommunikation eine wichtige Rolle, um sich mit Artgenossen auszutauschen, Nahrung aufzuspüren, sich zu orientieren und vor Feinden zu schützen. Neben den natürlichen gibt es aber auch viele Geräuschquellen, welche auf Tätigkeiten und Einrichtungen von Menschen zurückzuführen sind.

Das Projekt LIDO (Abkürzung für „Listening to the Deep-Ocean Environment“) stellt im Internet einen Zugang zu stationären Hydrophonen (Unterwassermikrofone) in den Weltmeeren zur Verfügung; dort kann man in Echtzeit einen Eindruck von der vielfältigen Geräuschkulisse unter Wasser erhalten (www.listentothedeep.com).

AKUSTISCHE KOMMUNIKATION BEI MEERESSÄUGERN

Wale und andere Meeressäuger sind sehr stark auf die Kommunikation durch Töne (vokale Kommunikation) angewiesen, da der optische Sinn und der Geruchssinn – wegen der hohen Lichtabsorption bzw. der relativ langsamen



Abb. 3: Die Gesänge der Buckelwale faszinieren seit jeher die Menschen. Um Walgesänge für Menschen hörbar zu machen, werden Unterwassermikrofone verwendet. Foto: Yann Hubert/Shutterstock.com.

Verteilung von Stoffen im Wasser – eine geringere Bedeutung haben. Zahnwale, wie z. B. die Delfine, haben keine Stimmbänder, können aber über komplexe Strukturen im Kopf Laute produzieren. Bei den großen Walen gibt es diese Strukturen nicht, und bis heute ist nicht genau bekannt, wie sie Töne erzeugen. Die hochfrequenten Töne der Delfine haben eine geringere Reichweite, sind aber sehr variabel. Die niederfrequenten Töne der großen Wale haben bei der Nutzung des sogenannten SOFAR-Kanals (Abb. 1) eine Reichweite bis zu 3.000 km. Robben benutzen ihre Stimme zur Kommunikation sowohl an Land wie auch im Wasser. Laute erzeugen Robben wie Landsäugetiere über die Stimmbänder im Kehlkopf (Abb. 2).

Der Gesang der Buckelwale unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Populationen und dient vor allem der Partnerfindung. Die meist niederfrequenten Töne die-

ser weit verstreut und vereinzelt lebenden Wale haben aufgrund ihrer großen Reichweite wahrscheinlich eine Kontaktfunktion (Abb. 3). Zahnwale, wie z. B. Schwertwale und Schweinswale, stoßen eine Reihe von Tönen aus, die wie Pfiffe in unterschiedlichen Tonlagen klingen. Wer einmal live Walgesänge hören möchte, kann in der passenden Jahreszeit bei der „Jupiter Foundation“ fündig werden, welche über Hydrophone vor dem Big Island von Hawaii die Gesänge der dort im Winter vorbeiziehenden Wale aufnimmt und über das Internet zur Verfügung stellt (www.jupiterfoundation.org).

WIE FISCHE HÖREN

Fische besitzen gleich zwei Organe, mit denen sie Schall im Wasser wahrnehmen können. Über das Seitenlinien-

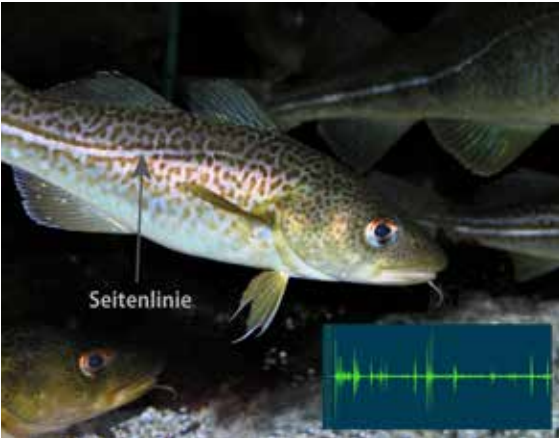


Abb. 4: Beim Dorsch oder Kabeljau ist die Seitenlinie gut zu erkennen. Die kleine Abbildung zeigt beispielhaft ein Audiogramm der Geräusche, die von diesen Fischen produziert werden können. Foto: Bernd Ueberschär.

organ spüren sie Strömungen und Wasserschwingungen, wie sie von Beutetieren, Schwarmgefährten oder Geschlechtspartnern verursacht werden. Auch Druckwellen, die von einem Hindernis zurückgeworfen werden, kann der Fisch so wahrnehmen. Außerdem dient die Seitenlinie



Abb. 5: Ein Gehörsteinchen (Otolith) vom erwachsenen Seelachs. Gut lassen sich im Querschnitt die Wachstumsringe erkennen, aus denen, wie bei einer Baumscheibe, das Alter des Fisches abgelesen werden kann, jeder Ring steht für ein Lebensjahr. Foto: Bernd Ueberschär.



Abb. 6: Der Lippfisch *Tautoga onitis* erzeugt so laute Geräusche mit seiner Schwimmblase, dass diese sogar über Wasser wahrgenommen werden können. Die Töne, die Männchen zur Fortpflanzungszeit produzieren, gleichen einem Nebelhorn und können bis 30 s anhalten. Kein Wunder, dass Küstenbewohner früher glaubten, dass es sich um Geisterstimmen handele. Foto: Public Domain der Freshwater and Marine Image Bank, University of Washington.

zur Ortung einer Schallquelle: Dieses Organ erstreckt sich über die gesamte Körperlänge, und erfüllt damit die Bedingung zum räumlichen Hören unter Wasser (Abb. 4).

Neben der Seitenlinie zur Schallaufnahme haben Fische auch Ohren, um zu hören: kleine flüssigkeitsgefüllte Röhren hinter den Augen, die in ihrer Funktionsweise dem Innenohr der Landwirbeltiere gleichen. Auftreffende Schallwellen versetzen kleine, in der Flüssigkeit schwimmende Gehörsteinchen (oder Schweresinn-Steinchen, die auch das Gleichgewicht der Fische regulieren; Otolithen, Abb. 5) aus Kalk in Schwingung. Diese Bewegung wiederum erregt feine Sinneszellen, die ihre Information ans Gehirn weiterleiten. Bei einigen Fischarten dient die Schwimmblase als Verstärker von Schallwellen, und eine Anordnung von kleinen Knöchelchen leiten die Schallwellen zum Innenohr. Dank dieses sogenannten Weberschen Apparats hören diese Fischarten 40- bis 60-mal leisere Töne als andere ohne dieses Merkmal. Die meisten Fischarten können Signale unterhalb 1.000 Hz wahrnehmen, einige haben ihr Hörvermögen durch spezielle Strukturen verbessert und den Hörbereich bis auf 5.000 Hz oder mehr erweitert.

STUMM WIE EIN FISCH? VON WEGEN...

Entgegen der landläufigen Meinung sind diese Unterwasserbewohner alles andere als leise. Fische können vielfältige Geräusche produzieren können, um sich zu verständigen, gegenseitig abzuschrecken oder zu drohen. Da Wasser als Lebensraum ganz andere Anforderungen an die Lauterzeugung stellt als Luft, haben Fische hoch spezialisierte Mechanismen entwickelt, um sich in ihrer Unterwasserwelt durch Geräusche zu verständigen. Sie bringen z. B. ihre mit Luft gefüllten Schwimmblasen in Schwingung, in dem sie darauf trommeln, sie reiben ihre Flossen knarrend in Schultergelenken, knirschen mit den Zähnen oder zupfen an gespannten Sehnen wie an einer Gitarrensaite oder sie erzeugen Töne, indem sie gezielt Luft aus der Schwimmblase entlassen. Der Knurrhahn erzeugt sein charakteristisches Knurren auf diese Art, aber auch Heringe produzieren so Töne mit verschiedenen Frequenzen. Als der lauteste Fisch gilt ein Lippfisch, welcher an der Atlantikküste von Nord- und Südamerika vorkommt, der Tautog (Abb. 6).



Abb. 6: Der Lippfisch *Tautoga onitis* erzeugt so laute Geräusche mit seiner Schwimmblase, dass diese sogar über Wasser wahrgenommen werden können. Die Töne, die Männchen zur Fortpflanzungszeit produzieren, gleichen einem Nebelhorn und können bis 30 s anhalten. Kein Wunder, dass Küstenbewohner früher glaubten, dass es sich um Geisterstimmen handele. Foto: Public Domain der Freshwater and Marine Image Bank, University of Washington.



Abb. 8: Ein Taucher hört unter Wasser eine ganze Menge Geräusche. Allerdings werden diese selten mit Fischen als Urheber in Verbindung gebracht. Foto: Bernd Ueberschär.

Für Menschen ist unter Wasser keine sinnvolle akustische Verständigung möglich, ihnen bleibt nur die Kommunikation über die sogenannte Tauchersprache. Dabei handelt es sich um eine optische Kommunikation mit einer Reihe standardisierter Unterwasser-Handzeichen, die jeder Taucher beherrschen sollte (Abb. 7). Doch als Taucher hat man gute Chancen, Fische „sprechen“ zu hören, wenn man einmal den Atem anhält (Abb. 8). Vorausgesetzt man taucht in den entsprechenden Gebieten (z. B. in einem Korallenriff), lassen sich die unterschiedlichsten Geräusche vernehmen: Klick- und Grunzlaute (Soldatenfische und Lippfische), Knurr-laute (Knurrhahn), Knocklaute (Kaiserfisch), Quieklaute (Welse), Trommellaute (Trommler), Tok-tok-Laute (Anemonenfische), Quaklaute (Krötenfisch). Dabei liegen die Laute der meisten Fische in einem Frequenzbereich von etwa 400–800 Hz – Schallwellen, die auch für das menschliche Ohr gut wahrnehmbar sind. Wer sich Fischlaute anhören möchte, ohne selbst zu tauchen, wird in der Datenbank FishBase fündig (Tondateien von etwa 90 Arten, www.fishbase.se/topic/List.php?group=sounds).

2.7.9 BIOLUMINESZENZ – LICHT IM DUNKEL DER TIEFSEE

Eva-Lena Stange

Unterhalb von 1.000 m Tiefe dringt kein Sonnenlicht mehr in den Ozean. Trotzdem herrscht dort keine ewige Dunkelheit: „Leuchtraketen und Funkenexplosionen, blaue Wolken, lange Ketten wie japanischen Laternen – wie Magie“, so beschreibt die Meeresbiologin Edith Widder das Phänomen Biolumineszenz. Schätzungsweise 80 % der Lebewesen in mehr als 200 m Wassertiefe erzeugen selbst Licht: in verschiedenen Farben, als lang anhaltendes Glühen oder in kurzen Lichtblitzen.

Obwohl Biolumineszenz in der Tiefsee schon Ende des 19. Jahrhunderts beobachtet wurde, ist es herausfordernd, sie systematisch und großflächig zu untersuchen. Während Leuchtphänomene an der Meeresoberfläche in manchen Fällen sogar von Satelliten aus dem Weltraum aufgenommen werden können, gibt es in der Tiefsee keine großflächigen Untersuchungsmethoden. Meeresforscher lassen hochsensible Kameras in die Dunkelheit hinab, um Biolumineszenz zu untersuchen. Unterstützung bekommen sie auch aus der Physik: Fest auf dem Meeresgrund installierte Neutrinodetektoren nehmen die Biolumineszenz in der Umgebung wahr – für Physiker eher störendes Rauschen, helfen solche Aufnahmen bei der Erforschung des Phänomens. So zeigten Messungen des ANTARES-Neutrinoteleskops im Mittelmeer beispielsweise, dass während fast 30 % der Messzeit auf dem Meeresboden Biolumineszenz stattfindet.

LEUCHTENDE TIERE

Am weitesten verbreitet ist Biolumineszenz unter Nessel-tieren wie den Quallen, doch vom Bakterium bis zum Hai leuchten viele Arten – mit unterschiedlichen Absichten. Die Weibchen der Tiefsee-Anglerfische locken mit ihrer Leuchtangel Beute an, der Pelikanaal (*Eurypharynx peleca-*



Abb. 1: Der Pelikanaal lebt in Tiefen von 1.200 bis 1.400 m Tiefe. Er besitzt ein Leuchtorgan an der Spitze seines Schwanzes, mit dem er Beute anlockt. Auffällig ist das extrem weit zu öffnende Maul, das einer Fischreuse ähnelt und mit dem der Pelikanaal meist kleine Beutetiere einfängt. Foto: bitte noch einfügen.

noides) nutzt seine lumineszierende Schwanzspitze als Köder (Abb. 1). Barten-Drachenfische (Familie Stomiidae) sind die einzigen Fische der Tiefsee, von denen bekannt ist, dass sie rotes Licht abgeben und wahrnehmen können: Ihre rote Lumineszenz dient ihnen als exklusiver Scheinwerfer, für ihre Beutetiere bleiben sie bzw. ihr Suchscheinwerfer unbemerkt (*Malacosteus niger*, Abb. 2). Doch auch Gejagte verwenden Lumineszenz zu ihrem Vorteil: Die Kranzqualle oder auch „Alarmqualle“ *Atolla wryvillei* verschießt blaue Lichtblitze (Abb. 3), die Tiefseegarnele *Oplophorus gracilirostris* blaue Lichtschwaden, um Angreifer zu verwirren oder größere Jäger anzulocken – getreu dem Motto „der Feind meines Feindes ist mein Freund“. Schlangensterne (*Ophiichiton temispinus* und *Ophiopsila annulosa*) opfern sogar einzelne Arme, die zuckend weiterleuchten, um Angriffen zu entkommen. Andere wollen gar nicht erst entdeckt werden: Der Leuchtkalmar (*Wasatenia scintillans*), ein Bewohner der Dämmerungs-

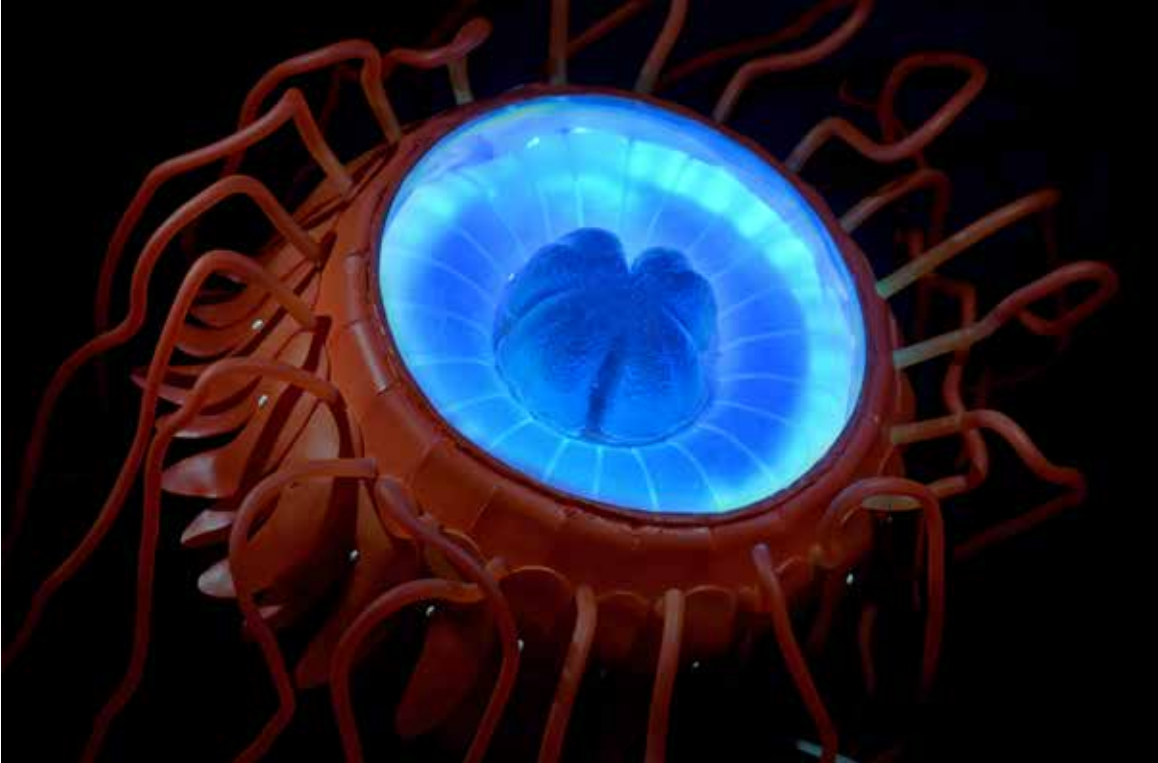


Abb. 4: Weibliche Fußballfische (*Himantolophus groenlandicus*) werden wesentlich größer als die männlichen Tiere. Sie tragen auf der Stirn als Angel (Illicium) einen umgebildeten Flossenstrahl, an dessen Ende sich das Leuchtorgan (Esca) befindet. In Aktion leuchten die darin lebenden Bakterien blau. Foto: bitte noch einfügen. Bei allen bitte.

zone zwischen 200 und 1.000 m Tiefe, tarnt sich beispielsweise mit blauer Biolumineszenz vor Jägern, die unter ihm in der Tiefe lauern. Blicken sie nach oben ins blaue Restlicht, verschwindet der Körperumriss des Kalmars. Auch Vipernfische (hier *Chauliodus sloani*; Abb. 5) nutzen diese „Taktik der visuellen Auflösung“ indem sie die die Stärke des Leuchtens von Organen auf der Bauchseite als „Gegenlicht“ zum Restlicht von der Oberfläche anpassen. Einige Lebewesen kommunizieren über Licht, wie zum Beispiel Muschelkrebse: Sie verwenden bei der Paarung komplizierte Muster aus kurzen Lichtsignalen.

Abb.2: Der Schwarze Tiefseebartelfisch (*Malacosteus niger*) kann rotes Licht aussenden und wahrnehmen. Damit ist er im Vorteil gegenüber den meisten Tiefseeorganismen, die kein rotes Licht sehen können. Das kleinere grün-blau leuchtende Organ dient vermutlich als Signalorgan zum Anlocken von Partnern. Foto: bitte noch einfügen.

DIE CHEMIE HINTER DER BIOLUMINESZENZ

Die Lumineszenz entsteht in einer chemischen Reaktion: Leuchtende Organismen besitzen Luciferasen. Das sind Enzyme, die ein Molekül, das Luciferin, unter Zusatz von im Wasser gelöstem Sauerstoff oxidieren. Bei dieser Reaktion wird Energie frei, die in Form von Licht abgegeben wird. Welche Farbe das abgegebene Licht hat, hängt sowohl von der Struktur des Luciferins als auch von der Luciferase ab. Die meisten Tiere produzieren kurzwelliges blaugrünes Licht, denn das hat im Wasser die größte Reichweite. Während biolumineszierende Bakterien, wie Vibrionen und Photobakterien, mithilfe eines einfach gebauten Moleküls leuchten, ähnelt das Luciferin der Dinoflagellaten, den Verursachern des Meeresleuchtens an der Wasseroberfläche, dem Chlorophyll der Pflanzen. Tiere mit sogenannter intrinsischer Lumineszenz, wie z. B.

der Leuchtkalmar, benutzen meist den Stoff Coelenterazin als Luciferin: Entweder stellen sie es selbst her oder sie nehmen es über ihre Nahrung auf. Andere lassen sich lieber beleuchten: Anglerfische, hier der sogenannte Fußballfisch (*Himantolophus groenlandicus*; Abb. 4), und Feuerwalzen (*Pyrosoma atlanticum*) leben in Symbiose mit biolumineszierenden Bakterien.

Im Stammbaum des Lebens hat sich die Eigenschaft, Licht zu produzieren, mehr als 30 Mal unabhängig entwickelt. Ob als Tarnung, zum Anlocken von Beute oder zur Partnersuche: Biolumineszenz könnte zunächst aus einem ganz anderen Grund entstanden sein. Die Leuchtreaktion

verbraucht nicht nur Sauerstoff, sie kann auch Wasserstoffperoxid oder freie Radikale abfangen, die die DNA schädigen – Biolumineszenz hat also eine antioxidative Wirkung, wie z. B. Vitamin C bei uns Menschen. Als die Vorfahren der Tiefseelebewesen immer weiter ins Dunkel abtauchten, verringerte sich der oxidative Stress, dafür entpuppte sich die Leuchtfähigkeit als umso nützlicher.

Abb. 3: Die „Alarmqualle“ (*Atolla wyvillei*) erzeugt ein blaues Licht, das sich, wie das bekannte „Blaulicht“, stetig kreisförmig bewegt. Mittels eines Modells dieser Qualle konnte im Jahr 2012 erstmals ein Riesenkalmar angelockt und gefilmt werden. Foto: bitte noch einfügen.



LEUCHTEN FÜR DIE FORSCHUNG

Seit wir die Sequenzen einiger Gene, die für Biolumineszenz verantwortlich sind, kennen, wird Biolumineszenz auch in der Wissenschaft genutzt. In der Krebsforschung werden Tumore in Mäusen mit Luciferasen markiert: So lässt sich nichtinvasiv untersuchen, ob der Tumor nach der Verabreichung eines Medikaments weiter wächst. Das wichtigste lebenswissenschaftliche Leuchtsystem ist das der Qualle *Aequorea victoria*. Ihr Luciferin Aequorin produziert nur in Gegenwart von Calcium blaues Licht – das lässt sich ausnutzen, um Calcium-Konzentrationen in Lebewesen sichtbar machen. Doch berühmt ist die Qualle nicht etwa für blaues Leuchten: In den Leuchtorganen der

Qualle befindet sich auch ein grün fluoreszierendes Protein (GFP): Es absorbiert das blaue Licht der Lumineszenzreaktion und leuchtet mit dieser Energie selbst grün. So ist die Biolumineszenz der Qualle im Meer auch grün statt blau. In der Wissenschaft wird GFP zur Untersuchung der Genexpression und Markierung von Proteinen verwendet. Diese Methoden sind so wichtig, dass die Entdecker des Proteins und seiner Anwendungen 2008 sogar den Nobelpreis für Chemie erhielten. Das Leuchten in der Tiefe ist also nicht nur ein unfassbares Spektakel der Natur, sondern auch wertvoll und nützlich. Die Wissenschaft sucht weiter nach neuen Leuchtstoffen aus dem Meer – die Tiefsee hält dabei in ihrer unbekannten Dunkelheit vermutlich noch viele Schätze bereit.



Abb. 5: Sloans Vipernfisch (*Chauliodus sloani*) lebt in der Zwielichtzone der Tiefsee und besitzt auf der Bauchseite seriell angeordnete Leuchtorgane, die ihm eine Tarnung gegen Angriffe von unten ermöglichen. Er selbst ist ein Jäger und ernährt sich von kleineren Fischen und Krebstieren. Foto: bitte noch einfügen.

2.7.10 WALE IN DER TIEFSEE?!

Torben Riehl

Wale, die Giganten der Meere, haben faszinierende Fähigkeiten und spielen eine bedeutende Rolle im Ökosystem der Tiefsee. Als Säugetiere benötigen sie Luft zum Atmen, genau wie wir Menschen. Deshalb kehren sie ein Leben lang immer wieder an die Oberfläche zurück. Dennoch sind einige Arten in der Lage, bis in das Abyssal hinabzutau- chen. Manche haben sich regelrecht auf das Tauchen in die Tiefsee spezialisiert, weil sie dort nach Nahrung suchen. Nehmen wir den Nördlichen Entenwal und den Pottwal als Beispiele: Sie sind zwei der am tiefsten tauchenden Säugetiere überhaupt und als Skelett und lebensgroßes Modell im Senckenberg-Museum zu bewundern.

DER NÖRDLICHE ENTENWAL

Der Nördliche Entenwal (*Hyperoodon ampullatus*), auch Dögling genannt, gehört wie der Pottwal, zur Unterord- nung der Zahnwale (Odontoceti), selbst wenn das ange- sichts der bei ihm fast vollständig fehlenden Zähne seltsam erscheinen mag. Bei dieser Spezies sind zwar durchaus einfache, konische Zähne vorhanden, doch nur ein Paar davon tritt aus dem Kiefer hervor, und auch nur bei adulten Männchen. Weitere Zähne sind wohl ange- legt, bleiben aber ein Leben lang im Kiefer verborgen. Bei dem Skelett im Senckenberg-Museums dürfte es sich da- her um ein ausgewachsenes Männchen handeln: An der Spitze des Unterkiefers sind bei genauem Hinsehen die kleinen Zähne zu erkennen.

Ein typisches Erkennungszeichen des Nördlichen Entenwals ist die delfin- oder entenschnabelähnliche Schnauze (Abb. 1). Die deutschen, englischen und lateini- schen Namen (Entenwal, Northern Bottlenose Whale, *H. ampullatus*) nehmen Bezug darauf. Charakteristisch ist außerdem die stark vorgewölbte Stirn, die nur bei Männ-

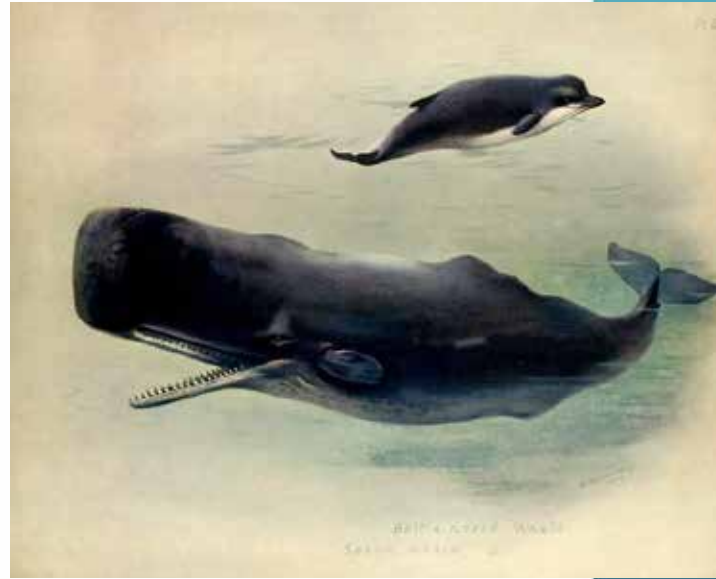


Abb. 1: Nördlicher Entenwal (*Hyperoodon ampullatus*), oben, und Pottwal (*Physeter macrocephalus*), unten. Illustrationen: A. Thorburn, F.Z.S., aus seinem Werk „British Mammals“ von 1921.

chen deutlich ausgebildet ist und möglicherweise für inner- artliches Aggressionsverhalten („Kopfnüsse“) genutzt wird. Damit könnten Streitigkeiten um die Vorherrschaft in einem Jagdgrund, in einer Gruppe oder um ein Weib- chen beigelegt werden.

Alle Schnabelwale (Ziphiidae), zu denen der nördliche Entenwal gehört, sind Hochseebewohner, denn zum Fres- sen tauchen sie sehr tief. Zu ihrem Speiseplan gehören auch Fische, vor allem aber Tintenfische und andere wir- bellose Tiere, welche sie in der Wassersäule sowie am Meeresboden jagen. In Küstengewässern ist das selten möglich. Daher halten sich diese Säugetiere meist auf offenem Meer auf, und so wissen wir sehr wenig über sie.

Einige der 19 Schnabelwalspezies wurden sogar erst jüngst beschrieben. Unter den Schnabelwalen gehört der Nördliche Entenwal noch zu den bekanntesten und am leichtesten zu beobachtenden Spezies. Das hat zwei Gründe: Nördliche Entenwale sind sehr neugierig und nähern sich deshalb oft Schiffen. Das ist verhängnisvoll, denn es führt nicht selten zu Kollisionen mit Schiffen und hat zu- dem früher die Waljagd auf diese Art sehr einfach ge- macht. Außerdem kommen Nördliche Entenwale häufiger als andere Schnabelwale in kleinen Gruppen in flachen Randmeeren vor (Nord- und Ostsee), wo die Tiere rasten. So wurde diese Art im 19. und frühen 20. Jahrhundert zu einer bevorzugten Beute der Walfänger im Nordatlantik.

Die maximale aufgezeichnete Tauchtiefe des Nördlichen Entenwals beträgt 1.453 m! Möglicherweise kommt er aber auch noch um einiges tiefer. Im Durchschnitt tauchen diese Säuger alle 80 min auf über 800 m und erreichen da- bei Tauchzeiten bis zu 70 min. Damit verbringt der Enten- wal von allen Säugetierspezies mit am meisten Zeit in derart großer Tiefe.

DER LEGENDÄRE POTTWAL

Spätestens seit der Veröffentlichung des Romans „Moby Dick“ von Herman Melville im Jahr 1851 ist der Mythos um Pottwale in der Bevölkerung angekommen. Pottwale sind außergewöhnlich große Zahnwale, z.T. über 20 m lang, und sie tauchen regelmäßig 400–1.000 m tief, schaf- fen aber auch über 2.000 m. Tauchzeiten von einer Stunde sind keine Seltenheit — während sie nur wenige Minuten an der Oberfläche benötigen, um ihre Sauerstoffreserven wieder zu füllen. Auf Videokanälen im Internet kann man Begegnungen von Unterwasserrobotern mit Pottwalen in bis zu 600 m bestaunen (Abb. 2). Möglicherweise kann Moby Dick aber sogar noch viel weiter in die Tiefsee hin- abtauchen. Ganze 90 min lang können die mächtigen Kolosse auf der Jagd nach ihrer Leibespeise, den Riesen- kalmaren der Gattung Architeuthis, in den kalten, licht- losen Tiefen der Meere die Luft anhalten!

VERBLÜFFENDE ANPASSUNGEN DER TIEFSEE- TAUCHER UNTER DEN WALEN

Das wirft viele Fragen auf: Wie schafft es ein Wal, den enormen Druck von 100 bar (entsprechend einer Belas- tung von 100 kg/cm² Körperoberfläche) in 1.000 m Tiefe auszuhalten, während ein Mensch schon bei wenig über 100 m und 10 bar Druck „schlapp“ macht? Wie schützen sich Wale vor der Kälte der Tiefsee? Auf welche Art und Weise versorgen sie sich während der langen Tauchzeit mit dem lebensnotwendigen Sauerstoff? Ein Mensch hält es maximal 11,5 min unter Wasser aus, ohne Luft zu holen, und der menschliche Tieftauchrekord ohne Hilfsmittel liegt bei 101 m. Und hierbei handelt es sich um Rekorde von Ausnahmesportlern und nicht um alltägliche Leistun- gen. Wie kann sich ein Wal in der Dunkelheit überhaupt orientieren?

AALGLATT UND GUT ISOLIERT

Zu den Anpassungen der Wale an das Tieftauchen gehört u. a. der stromlinienförmige Körperbau, der den Reibungs- widerstand im Wasser – und damit den Energie- und den Sauerstoffverbrauch – minimiert. Im Grunde handelt es sich um eine Anpassung an das Schwimmen im Allgemei- nen, doch für das Tieftauchen ist sie eine Grundvoraus- setzung. Die Stromlinienform des Walkörpers – entstan- den unter anderem durch eine Reduktion der Hinterbeine über Jahrmillionen hinweg –, die Umwandlung der Arme in Flipper, eine Fluke sowie eine veränderte Nasenposi- tion auf dem Rücken sind als Anpassungen an das ständige Leben im Wasser zu interpretieren.

Menschen frieren im Wasser recht bald, kein Wunder, denn hier findet ein erhöhter Wärmeaustausch über die Haut statt. In der Tiefsee, wo die Temperaturen in der Re- gel im Bereich von 2–4 °C liegen, wird also eine gut funk- tionierende Isolierung gebraucht. Aber auch dafür hat die Evolution bei Walen eine praktikable Lösung gefunden. Ihr Körper ist von einer dicken Fettschicht umhüllt: Dieser Kälteschutz kann mehr als 20 cm stark sein.

INMAL TIEF LUFT HOLEN

Weitere Anpassungen an das Tauchen sind kleine Lungen und die Fähigkeit, die Lungen beim Tauchen (teilweise) kollabieren zu lassen. Für die Sauerstoffspeicherung ist bei Walen, anders als bei uns Menschen, die Lunge kaum von Bedeutung. Weniger als 10 % des Sauerstoffs werden bei tief tauchenden Walen in der Lunge mitgeführt (weniger gasförmiger Sauerstoff bedeutet auch weniger Auftrieb). Der Sauerstoff wird stattdessen im Blut und in den Muskeln – an Proteinkomplexen namens Hämoglobin und Myoglobin – gespeichert.

Ein deutlich höheres Blutvolumen als bei vergleichbaren Landtieren sowie die Fähigkeit des Wal-Hämoglobins und -Myoglobins, erheblich mehr Sauerstoff zu binden als bei anderen Säugetieren üblich, sind ebenfalls bedeutende Anpassungen an das Tieftauchen. Dennoch ist der Sauerstoffvorrat begrenzt, denn Wale haben, anders als Fische, keine Kiemen. Mithilfe besonderer Klappen in den Blutgefäßen sind sie in der Lage, ausschließlich die lebenswichtigen Körperorgane mit Blut und somit mit frischem Sauerstoff zu versorgen. Erhebliche Teile der Muskulatur und der Haut werden in großen Tiefen kaum mehr durchblutet und sind damit weitgehend von der Sauerstoffversorgung abgeschnitten.

Darüber hinaus können Wale eine für den Menschen gefährlich hohe CO_2 -Konzentration im Blut problemlos ertragen. Über 10 % Kohlenstoffdioxid konnten nach dem Tauchen in ihrer Ausatemluft nachgewiesen werden. Das sind Werte, bei denen ein Mensch in Teilnahmslosigkeit verfallen oder sogar das Bewusstsein verlieren würde.

DEM DRUCK STANDHALTEN

Wer sich einmal mit Taucherausrüstung ins Wasser gewagt hat, weiß, dass es Tiefen- und Zeitbeschränkungen beim Tauchen gibt, an die man sich halten sollte, wenn man sein Leben nicht aufs Spiel setzen möchte. Das hat mit verschiedenen Effekten des mit der Tiefe zunehmenden Drucks auf die Gase in unserer Atemluft zu tun. Stick-

stoff etwa, der ca. 78 % der Atemluft ausmacht, wird ab einem Teildruck von ca. 3,2 bar giftig. Diese Stickstofftoxizität wird bereits ab ca. 30–40 m Tauchtiefe erreicht und ist als „Tiefenrausch“ und „Stickstoffnarkose“ bekannt. Noch giftiger wirkt der für uns Menschen doch eigentlich so wichtige Sauerstoff. In der Luft hat er einen Anteil von ca. 21 %. Ab einem Teildruck von 0,5 bar treten Vergiftungserscheinungen in der Lunge auf, ab 1,7 bar, also in einer Tauchtiefe von 80 m, im zentralen Nervensystem. Sporttauchern, die mit Pressluft tauchen, wird empfohlen, 30 m Tiefe nicht zu überschreiten.



Apnoetauchen, also das Tauchen ohne Atemgasversorgung, wie es die Wale tun, ist diversen weiteren Beschränkungen unterworfen. Wenn ein Mensch sehr tief hinabtauchte, würde seine Lunge zusammengepresst und irgendwann kollabieren, denn bei zunehmendem Druck wird eine luftgefüllte Lunge, anders als die festen und flüssigen Körperteile, komprimiert. Dabei käme es zu schlimmen Verletzungen der Lungenschleimhaut und der Lungenbläschen. Derselbe unangenehme Effekt würde in unseren von Knochen umgebenen Nasennebenhöhlen sogar noch eher auftreten. An dieses Problem der hohen Druckbelastung sind Wale auf elegante Weise angepasst. Bei ihnen können Lungen und ein Großteil der Atemwege bei zunehmendem Druck vollständig und ohne Verletzungsrisiko kollabieren, denn die Vorderseite ihres Brustkorbs ist nicht von Rippen eingeschlossen und von Knochen starr umgebene Nasennebenhöhlen haben sie schlichtweg nicht. Die wenigen verbleibenden Hohlräume sind mit Knorpelringen enorm verstärkt, und die Wale vermeiden so die Giftigkeit der Atemluft. Auch die Stickstoffanreicherung in den Geweben bleibt gering; dadurch entgehen die Tiere der tödlichen Gefahr der Bläschenbildung beim schnellen Auftauchen. Das Risiko der bei Tauchern berüchtigten Tauchkrankheit, die dann auftritt, wenn man unkontrolliert und schnell aus großen Tiefen aufsteigt, ist somit stark reduziert.

MIT TÖNEN SEHEN

In den Tiefen der Ozeane ist es nicht nur kalt, sondern auch dunkel. Die bei Walen durchaus vorhandenen Augen

Abb. 2: Bei einer Tauchfahrt mit einem Unterwasserroboter schaut sich ein Pottwal in ca. 600 m Tiefe das Gerät einmal genauer an.
Foto: Ocean Exploration Trust/GISR

helfen hier nicht weiter. Aber auch für diese Situation hat die Evolution eine Lösung gefunden: Wale besitzen Fettkörper, z.B. in der Melone und am Innenohr, die wie Schalllinsen funktionieren und der Echoortung dienen. Bei dieser Art der Echoortung wird der Schall im Nasengang erzeugt und über die Fettkörper fokussiert. So können zum Beispiel Entenwale auch in absoluter Dunkelheit Formen, Größen und Entfernungen von Objekten wahrnehmen, indem sie Klicklaute von sich geben und deren Reflektionen hören. Sie sehen ähnlich wie Fledermäuse quasi mithilfe von Lauten.

WALE IM TIEFSEE-ÖKOSYSTEM

Tief tauchende Wale spielen eine wichtige Rolle im Ökosystem der Tiefsee. Durch die Tintenfischjagd kontrollieren sie deren Populationsgröße und damit mittelbar auch den Einfluss der Tintenfische auf deren Beuteorganismen. Zwar entnehmen Wale der Tiefsee mit den Tintenfischen Biomasse und transportieren diese an die Meeresoberfläche. Doch was gefressen und verdaut wird, wird auch wieder ausgeschieden. Der Kot der Wale düngt die oberen Wasserschichten merklich. Die Folge ist eine vermehrte Primärproduktion, wodurch die Menge der in die Tiefsee herabsinkenden organischen Partikel, also der Nahrung für die meisten Tiefseebewohner, letztlich zunimmt.

Für diesen wichtigen Transport von Nährstoffen in die Tiefsee spielen die Wale außerdem noch eine ganz direkte Rolle — als sogenannte Walfälle. Wenn ein Wal stirbt, wird sein Kadaver manchmal an der Küste angeschwemmt, meistens aber sinkt er in die Tiefe. In seiner Kompaktheit sinkt ein Wal schnell und entgeht so der Verwertung in der Wassersäule. Auf diese Weise werden große Mengen wertvoller Stoffe, wie zum Beispiel Fette und Proteine, von der Oberfläche in die Tiefsee befördert. Deshalb stellen Walkadaver regelrechte Kalorienbomben dar, die zu „Oasen in der Tiefseewüste“ werden. So entsteht ein sehr kleinräumiger neuer Lebensraum, der sich mit der Zeit wandelt (Sukzession) und über Jahrtausende, ja manchmal sogar über Jahrmillionen, besteht (vgl. Kap. 3.1).

KAPITEL 3

Tiefwasserriffe funktionieren im Gegensatz zu den allseits bekannten Korallenriffen, deren Bewohner auf das Sonnenlicht angewiesen sind, in der Finsternis der Tiefsee. Während ihre Verwandten im Licht mit pflanzlichen Einzellern Symbiosen eingehen und die Produkte der Photosynthese nutzen, sind die Korallen in der Dunkelheit auf Strömungen angewiesen, die ihnen Nahrungspartikel zuführen. Auf den Korallenstöcken, die als rares und daher heiß begehrtes Hartsubstrat zur Anhaftung von sesshaften Organismen dienen, bilden sich Lebensgemeinschaften in mehreren Etagen, die als „Animal forests“ – als „Wald aus Tieren“ – bezeichnet werden. Foto:

3. KREISLÄUFE UND ZUSAMMENHÄNGE IN DER TIEFSEE

Torben Riehl

Das Wissen um die Rolle und die Funktion der Tiefsee in globalen Kreisläufen – und somit ihre volle Bedeutung für uns Menschen – ist noch immer begrenzt. Dennoch können wir bereits jetzt sagen, dass die Tiefsee mit einer Vielzahl verschiedener Ökosystemleistungen in globale Kreisläufe eingebunden und essenziell für unser Überleben ist. Weil sie ein für uns unwirtlicher und unzugänglicher Lebensraum ist, haben wir viel zu lange eine „Aus den Augen, aus dem Sinn“-Mentalität gegenüber der Tiefsee an den Tag gelegt. Dabei ist sie seit jeher über Wasserströmungen, Stoffkreisläufe, geologische Prozesse und die Besiedlungsgeschichte der zahllosen Arten mit den Flachwasserbereichen, der Atmosphäre und dem Land – also unserem Lebensraum – im Austausch (Abb. 1). Die Biosphäre, zu der auch wir gehören, ist über vielfältige Prozesse und Kreisläufe mit der Geosphäre, der Hydrosphäre und der Atmosphäre verwoben. Selbst wenn unser Verständnis um die Zusammenhänge noch nicht erschöpfend ist, muss der heutige Kenntnisstand genutzt werden, um die Auswirkungen menschlicher Eingriffe in das Tiefseeökosystem abzuschätzen und entsprechende Regulierungsmaßnahmen zu fordern und umzusetzen. Schon allein aufgrund der enormen Größe der Tiefsee haben viele der Prozesse, die sich in ihr abspielen, große Bedeutung für globale Kreisläufe. Die Aufgabe der Tiefseeforschung besteht darin, die Wissensgrundlage stetig zu erweitern.

CO₂-SENKE UND PHYSIKALISCHE CO₂-PUMPE

Es ist zurzeit in aller Munde: das Kohlendioxid (CO₂). Zwar ist es nur in geringen Anteilen (0,04 % des Volumens) in der Erdatmosphäre vorhanden, doch das genügt, um merklich zu einem Treibhauseffekt beizutragen. Durch menschliche Aktivitäten, allen voran die Verbrennung fossiler Rohstoffe und die Abholzung von Urwäldern, wird die direkt verfügbare CO₂-Menge erhöht, wodurch sich die Erdatmosphäre erwärmt. Dieser Treibhauseffekt wäre noch viel stärker, würde die Tiefsee nicht einen großen Teil dieses Kohlendioxids speichern. Aber wie kommt das CO₂ aus der Luft ins Meerwasser? CO₂ ist zwar gasförmig, doch an der Grenzfläche zwischen Gasen und Flüssigkeiten – also in diesem Fall zwischen

der Luft der Atmosphäre und dem Meer – kommt es durch Diffusion zum Austausch von Gasmolekülen und es entsteht eine sogenannte Lösung. Wie die anderen Bestandteile der Luft löst sich also auch das Gas CO₂ proportional, also in relativ geringer Menge, im Meerwasser. Darüber hinaus reagiert das CO₂ aber auch mit H₂O und es entsteht dabei Kohlensäure H₂CO₃. Wie an Land assimilieren auch diverse Meeresorganismen das CO₂ während der Photosynthese. Derzeit sind rund 37.000 Gt CO₂ in der Tiefsee gespeichert, was einem Viertel der Gesamtmenge entspricht, die durch die Aktivitäten der Menschen freigesetzt wurde. Dieses CO₂ gelangt über Meeresströmungen und mithilfe von lebenden Organismen in die Tiefsee.

Kaltes Wasser kann mehr gelöstes CO₂ aufnehmen und hat eine höhere Dichte. In der Nähe der Pole sinkt dieses kalte, salzhaltige Meerwasser aufgrund seiner höheren Dichte ab und bildet das sogenannte Tiefenwasser. Durch diesen als „physikalische CO₂-Pumpe“ bezeichneten Vorgang wird der Atmosphäre das Treibhausgas Kohlendioxid für ca. 1.000 Jahre entzogen – so lange dauert es, bis der abgesunkene Wasserkörper alle Ozeane durchflossen hat und sich schließlich wieder der Oberfläche nähert, wo er das CO₂ an die Atmosphäre zurückgibt. Für die Zukunft bedeutet das jedoch ebenfalls, dass das Meer dieses Gas dem Konzentrationsgefälle folgend vermehrt in die Atmosphäre abgeben wird, wenn der atmosphärische CO₂-Anteil wieder sinken sollte. Doch auch biologische Prozesse tragen zu einem Kohlenstofftransport in die Tiefsee bei.

REMINERALISATION UND DIE BIOLOGISCHE KOHLENSTOFF-PUMPE

Zu den Ökosystemleistungen der Tiefsee gehört das Zurverfügungstellen von Nährstoffen. Nahrung ist dort knapp bemessen. Von wenigen Ausnahmen abgesehen (vgl. Kap. 2.4–2.6) hängt das Leben in der Tiefsee von toten Pflanzen- und Tierteilen ab, die als sogenannter Detritus langsam von der Meeresoberfläche zu Boden sinken. Diese organische Materie wird von Planktern (passiv in der Wassersäule driftenden Lebewesen) sowie der Meeresbodenfauna und dem dort lebenden Mikrobiom konsumiert und in ihre Bestandteile zerlegt. Man spricht von „Remineralisation“. In diesem Prozess entsteht der Dünger, von dem das Planktonwachstum an der Meeresoberfläche und somit das gesamte Nahrungsnetz zehrt.

Je größer ein toter Körper ist und je höher seine Dichte, desto schneller sinkt er und desto eher entgeht er der Remineralisation. Manche Organismen (oder ihre Überreste) sinken direkt zu Boden und sammeln sich dort über Jahrmillionen zu dicken Sedimentschichten, welche mit der Zeit durch chemische (Verkittung, Zementierung) und physikalische Prozesse (Verfestigung) zu Sedimentgestein werden. Dieser von Organismen abhängende einseitige Transport von Kohlenstoff in die Tiefsee wird oft als „biologische Kohlenstoffpumpe“ bezeichnet. Er kann dem Erdsystem für Millionen von Jahren Kohlenstoff entziehen.

TIERISCHE HELFER AN DER KOHLENSTOFF-PUMPE

Doch das System des Kohlenstofftransports wird durchbrochen von Organismen, die zwischen flachen und tiefen Wasserschichten hin- und herwandern und auf diesem Weg in beide Richtungen Kohlenstoff transportieren. Dazu gehören tief tauchende Wale (vgl. Kap. 2.7.10), die Kohlenstoff aus der Tiefe heraufbefördern, indem sie in großen Tiefen auf Jagd gehen und ihre Stoffwechselprodukte an der Oberfläche ausscheiden. Durch ihre Ausscheidungen unterstützen sie jedoch wiederum die Primärproduktion an der Wasseroberfläche, die die Hauptquelle für herabsinkende Partikel ist. Und nach ihrem Tod dienen Wale – als sogenannte Walfälle – vielen Tiefseeorganismen als Nahrung (vgl. Kap. 3.1).

Auch der antarktische Krill (vgl. Kap. 2.7.1) spielt eine wichtige Rolle für den Kohlenstofftransport in die Tiefsee. Krillschwärme sind derart groß und dicht gepackt, dass sie zu den höchsten Konzentrationen tierischer Biomasse auf der Erde gehören. Die Kotbällchen dieser Leuchtkrebse sinken viel schneller als die von ihnen verzehrten Algen und entgehen so der Remineralisation nahe der Meeresoberfläche. Auf diese Weise können Krillschwärme der Atmosphäre große Mengen Kohlenstoff entziehen.

Vermehrter Abbau von organischen, also kohlenstoffhaltigen Substanzen geht in den allermeisten Fällen mit vermehrtem Verbrauch von Sauerstoff einher.

SAUERSTOFFMINIMUMZONEN WERDEN ZU TODESZONEN

Als Folge der Erderwärmung, in manchen Regionen gepaart mit übermäßiger landwirtschaftlicher Düngung, breiten sich sogenannte Sauerstoffminimumzonen (SMZ), auch Todeszonen genannt, immer weiter aus. Warmes Wasser an der Meeresoberfläche nimmt

prinzipiell weniger Sauerstoff aus der Atmosphäre auf als kaltes und vermischt sich schlechter mit tieferen, kälteren Wasserschichten – Sauerstofftransport aus der Luft in die Tiefsee ist somit behindert. Hinzu kommt, dass organismisches Wachstum und ihr Stoffwechsel sich mit zunehmender Temperatur verstärken und verstärkt den vorhandenen Sauerstoff aufzehren. Außerdem führt die Erderwärmung in manchen Küstenregionen zu vermehrtem Niederschlag, was zum Eintrag von mehr Nährstoffen ins Meer führt und wiederum zu mehr Primärproduktion führt. Wenn die Primärproduktion in den oberen Wasserschichten erhöht ist, fällt auch mehr organisches Material an, das später in der Wassersäule zu Boden sinkt und dabei zersetzt wird. Und weil für den Zersetzungsprozess Sauerstoff gebraucht wird, steigt die Sauerstoffzehrung mit zunehmender Primärproduktion. Irgendwann ist der Sauerstoffgehalt in der Tiefe so niedrig, dass Tiere dort nicht mehr überleben können. Man findet solche Todeszonen in Wassertiefen von ca. 200–1.000 m, vornehmlich vor den Westküsten der Kontinente. Auch wirtschaftlich bedeutsame Arten sind davon betroffen, und in Ländern wie Chile, Peru oder Mauretanien hat das negative Folgen für die lokale Fischerei.

Die SMZ bilden sich in Gebieten erhöhter Nährstoffverfügbarkeit – interessanterweise sind es gerade diese Gebiete, in denen ein besonders wichtiger Nährstoff, der Stickstoff, aus dem Kreislauf verschwindet.

STICKSTOFF – EIN ESSENZIELLER FAKTOR FÜR DAS LEBEN

Alles uns bekannte Leben hängt von Stickstoff (N) ab. Das Element ist als unentbehrliche Komponente von Proteinen und der Erbsubstanz DNS ein essenzieller Bau- und Nährstoff. In so mancher Form, in der Stickstoff im Ozean vorliegt, ist er jedoch für die meisten Lebewesen nicht nutzbar, zum Beispiel als gasförmiger Stickstoff (N₂). Dieses Gas muss zunächst von speziellen Bakterien gebunden und zu Ammonium umgewandelt werden, damit andere Lebewesen es verwerten können. Ist der für die Organismen nutzbare Stickstoff nur in geringer Menge vorhanden, begrenzt das das Algenwachstum und somit das Wachstum aller Organismen im Nahrungsnetz. Die Menge des nutzbaren Stickstoffs ist messbar und gibt Auskunft über die Produktivität eines Ökosystems. Stickstoff durchläuft, ähnlich wie Kohlenstoff, einen Kreislauf, der jedoch nicht vollständig in sich geschlossen ist. Durch die Ausbreitung von „Todeszonen“ (siehe oben), also letztlich als Folge des Klimawandels und des übermäßigen Nährstoffeintrags in Meer, verliert der

Ozean nutzbaren Stickstoff.

Neben der bakteriellen Stickstoffbindung gelangt Ammonium vor allem durch die Remineralisation, also das Recyceln organischer Materie, ins Meer. Dort, wo Sauerstoff Mangelware ist, zum Beispiel in Sauerstoffminimumzonen, verschwindet verwertbarer Stickstoff aus dem System. Warum gerade in den SMZ besonders viel Stickstoff aus der Tiefsee verschwindet, war bis 2013 unbekannt. Dann konnten Forscher des Max-Planck-Instituts für Marine Mikrobiologie in Bremen und des GEOMAR in Kiel zeigen, dass ein als „Anammox“ (kurz für „Anaerobe Ammonium-Oxidation“) bezeichneter Stoffwechselprozess dafür verantwortlich ist. Wieder sind spezielle Bakterien beteiligt. Sie leben in anaeroben (sauerstofffreien) SMZ und nutzen in den herabsinkenden Partikeln verfügbares Ammonium zusammen mit Kohlendioxid als Energiequelle und wandeln es direkt in gasförmigen Stickstoff um, der in die Atmosphäre aufsteigt und somit aus dem Nährstoffkreislauf verschwindet.

DIE KLIMAGASFRESSER

Gashydrate – kristalline Substanzen, die sich bei niedrigen Temperaturen und hohem Druck aus einer Mischung von Gas und Wasser bilden (vgl. Kap. 4.1.3) – kommen an den Kontinentalhängen der Ozeane im Meeresboden in ca. 500–3.000 m Wassertiefe vor. Sie können Schichten von mehreren Hundert Metern Dicke bilden. Etwa 90% der natürlich vorkommenden Gashydrate enthalten das Erdgas Methan als zentrales Molekül, um das sich die Wassermoleküle käfigartig herumgruppieren. Bei Veränderung eines dieser beiden Parameter (Druck oder Temperatur) zerfällt das Gashydrat schnell in seine Bestandteile und das darin enthaltene Gas entweicht und steigt auf in die Atmosphäre.

Die Mikrobengemeinschaften der Tiefsee spielen wichtige Rollen für globale Stoffkreisläufe. Methan verwertende Bakterien sind z. B. der Grund dafür, dass nur wenig der gigantischen Ablagerungen des Treibhausgases Methan, welches in der Tiefsee als Methanhydrat vorliegt, an die Wasseroberfläche und damit in die Atmosphäre gelangt. Die weit- aus größere Menge wird von diesen Kleinstorganismen aufgezehrt. Dank dieser Ökosystemleistung gelangen Schätzungen zufolge nur 2–4% des aus den ozeanischen Quellen entweichenden Methans in die Atmosphäre und dessen Effekt auf das globale Klima bleibt gering.

LEBENSZYKLEN VON MINI-ÖKOSYSTEMEN

Ähnlich wie außerhalb der Tiefsee gibt es auch am tiefen Meeresgrund einen Jahreszyklus, und zwar überall dort, wo sich die Saisonalität der Oberflächenprimärproduktion in Variationen der am Meeresboden eintreffenden Nahrungspartikel widerspiegelt. So manche Spezies passt z. B. ihren Reproduktionszyklus daran an.

Ganz anders sieht es bei Bewohnern von Lebensräumen aus, deren Bestehen zeitlich stark begrenzt und deren Auftreten schlecht vorhersehbar ist. Zu diesen sogenannten ephemeren (vorübergehenden, flüchtigen) Lebensräumen gehören z. B. große Kadaver (vgl. Kap. 3.1) oder auch hydrothermale Quellen (vgl. Kap. 2.3). In beiden Fällen erlischt nach gewisser Zeit die wichtigste Energiequelle und die für diese Lebensräume typischen Organismen sterben lokal aus und wandern ab, um andernorts ähnliche „Oasen“ zu besiedeln.

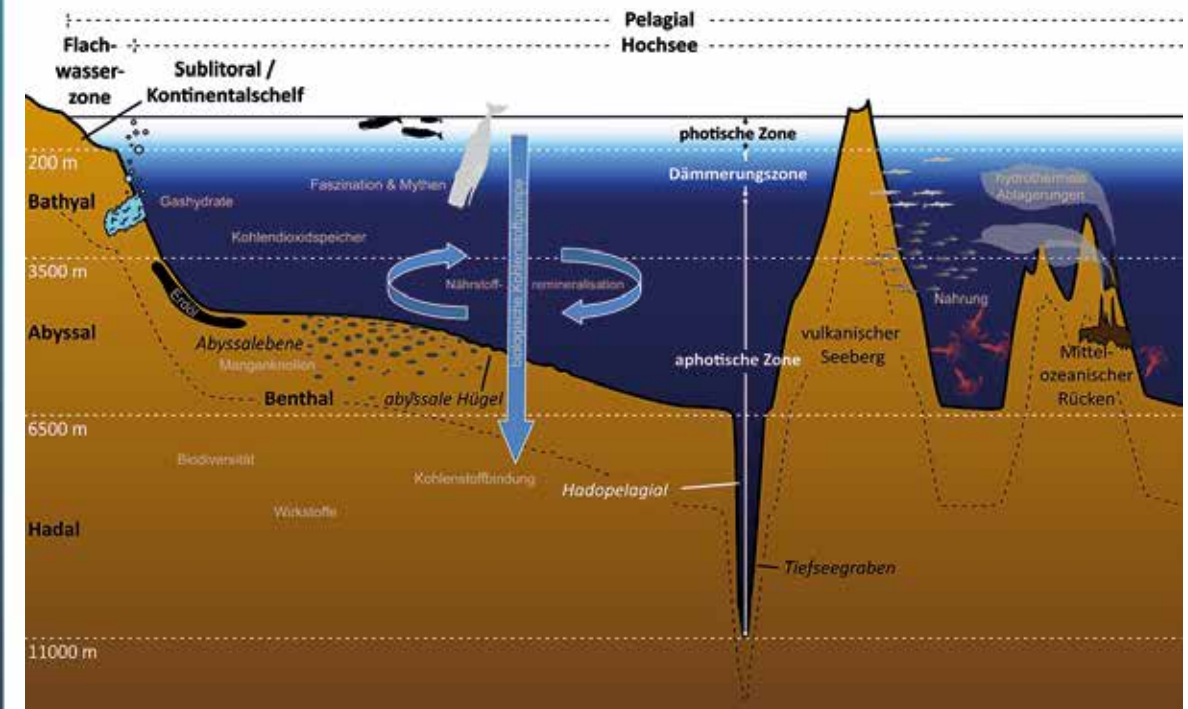
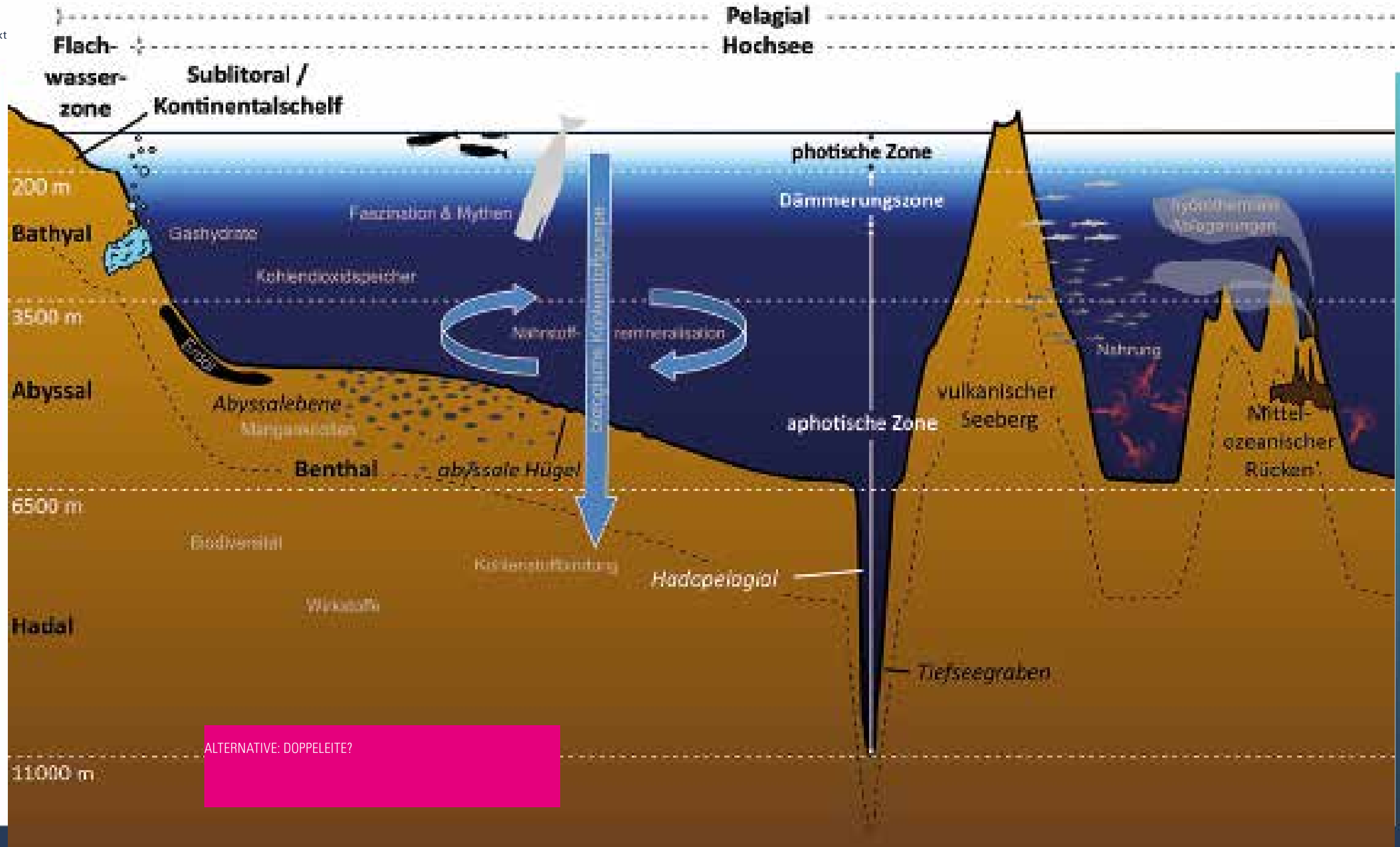


Abb. 1: Schematischer Querschnitt durch die Tiefsee. Fachbegriffe der Meereszonierung sind weiß oder schwarz geschrieben, Ökosystemleistungen grau. Die Auswahl ist nicht erschöpfend und die Darstellung nicht maßstabsgetreu.



ALTERNATIVE: DOPPELEITE?

3.1. WALFÄLLE – OASEN DER TIEFSEE

Torben Riehl

Das Alter, das ein Wal in der Natur erreichen kann, hängt stark von der Spezies ab. Schnabelwale können vermutlich über 40 Jahre alt werden, während Pottwale Schätzungen zufolge etwa 70 Jahre erreichen. Abgesehen von Schiffskollisionen und den immer wieder auftretenden Strandungen, die in einigen Fällen auf Umweltverschmutzung zurückgeführt werden konnten, deren Ursachen aber oft ungeklärt bleiben, sterben Wale vermutlich meistens eines natürlichen Todes. Dabei spielen Altersschwäche, Krankheiten und Parasitenbefall wichtige Rollen.

Die allermeisten Wale sterben im Ozean. Still und vom Menschen unbemerkt. Bald nach ihrem Tod beginnt ein Verwesungsprozess, der zunächst vor allem die inneren Organe betrifft. Faulgase entstehen und oft bläht der Wal sich auf. An der Meeresoberfläche treibend ernähren sich Haie und Seevögel von ihm. Ausgehungerte Wale gehen direkt unter, wenn sie sterben, da ihnen das Auftrieb verleihende Fett fehlt. Egal, ob sie zu Lebzeiten zu den tief tauchenden Arten gehörten oder nicht – bald nach dem Tod sinken Walkadaver meist in große Tiefen.

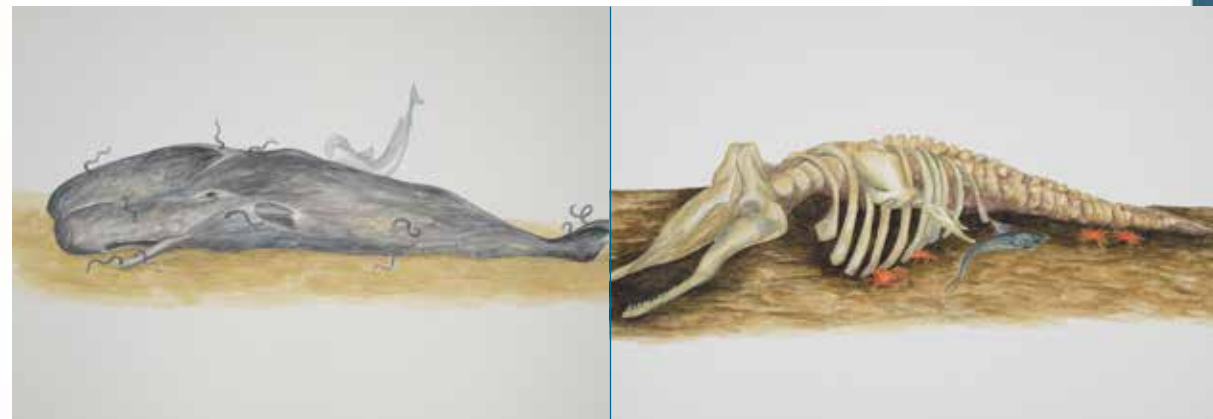
EIN MEHRGÄNGIGER LEICHENSCHMAUS MIT SONDERBAREN GÄSTEN

Wenn tote Wale auf dem Meeresboden niedergehen – insbesondere in bathyalen oder abyssalen Zonen tiefer als 2.000 m –, spricht man von „Walfällen“ (engl. whale falls). In einem ansonsten nahrungs- und nährstoffarmen Bereich stellen ihre sterblichen Überreste für eine Vielzahl dort lebender Organismen ein wahres Festmahl dar. Viele bizarre Kreaturen, von denen es die Mehrzahl sonst nirgendwo auf der Welt gibt, gründen auf und in Walkada-

vern einzigartige Lebensgemeinschaften. Sie sind zum Teil hochspezialisiert und manche sogar vom regelmäßigen Nachschub von Kadavern abhängig. Die toten Säuger bieten dabei nicht nur sonderlichen Lebewesen Nahrung, von denen die meisten Menschen noch nie etwas gehört haben. So manche Spezies würde ohne Walkadaver nicht überleben. Im weit verzweigten Nahrungsnetz der Weltmeere hängt auch das Überleben von Fischarten, die der Mensch gerne verspeist, mit von gefallenem Walen ab.

Ein toter Wal stellt ein eigenes, reichhaltiges Ökosystem dar, denn er ist im Prinzip nichts anderes als ein enormes Paket organischer Materie auf einem eng begrenzten Raum. Schon bald nachdem das Festmahl angerichtet ist, treffen nach und nach die hungrigen Gäste ein. Am Kadaver beginnt eine Abfolge von Besiedlung und Verwertung, die in vier Phasen verläuft und die nach den Lebensgemeinschaften benannt sind, die sie auszeichnen: (1) das Stadium der mobilen Aasfresser, (2) das Stadium der Anreicherungs-Opportunisten, (3) das Stadium der Schwefelliebenden sowie (4) das Riffstadium. Werden die

Abb. 1: Künstlerische Interpretation der vier Walfallstadien. Oben links: Der Kadaver eines jungen Pottwals (*Physeter macrocephalus*) ist auf den Tiefseeboden gesunken. Die Überreste des großen Säugers locken Aasfresser, wie Schlafhaie (*Somniosidae*) und Schleimaale (*Myxinidae*) an, welche innerhalb von Monaten die Weichteile verzehren. Unten links: Bilder von Iga Raszowska unter konzeptioneller Mitarbeit von Torben Riehl, Senckenberg.



speziellen Nahrungsansprüche der diversen Totengräber eines jeden Stadiums nicht mehr erfüllt, ziehen sie weiter, immer auf der Suche nach einem frischen Kadaver am Meeresgrund, oder sie sterben am Ort des Geschehens, nachdem sie ihr Erbe in Form von Eiern oder Larven in der Umgebung verteilt haben.

DAS STADIUM DER MOBILEN AASFRESSER

Das erste Stadium der Kadaverzersetzung wird von großen Aasfressern dominiert, die eine frei bewegliche („mobile“) Lebensweise haben. „Groß“ ist dabei freilich ein relativer Begriff – Wissenschaftler sprechen von „Megafauna“, wenn sie die oberste Größenklasse von Tieren am Meeresboden meinen. Dabei handelt es sich um alle Organismen, die über 1 cm Körperlänge aufweisen bzw. solche, die auf Foto- und Videoaufnahmen zu erkennen sind. Dazu gehören meterlange Haie genauso wie zentimetergroße Flohkrebse.

Solche Aasfresser treten oft innerhalb weniger Tage nach Ankunft des Wales in großen Dichten auf. Sie verzehren Fett, Muskeln und andere weiche Gewebe innerhalb von Monaten. Zu den häufigen Arten gehören Schleimaale, Steinkrabben, Grenadierfische, große Schlafhaie, diverse Zehnfüßkrebse und Millionen von Flohkrebsen. Diese Tiere können Schätzungen zufolge gemeinsam 40–

60 kg Gewebe pro Tag von einem Walkadaver entfernen. So wird ein Kadaver von 5 t Gewicht innerhalb von vier Monaten zerlegt. Für einen 100 t schweren Kadaver brauchen die Aasfresser hingegen bis zu fünf Jahre.

DAS STADIUM DER ANREICHERUNGS-OPPORTUNISTEN

In dieser zweiten Phase des Verfalls dominieren die kleinere Megafauna und die Makrofauna – Tiere im Größenbereich von 1–10 mm. An den Überresten dessen, was die „Großen“ übriggelassen haben, sammeln und laben sich vor allem Meeresborstenwürmer (Polychaeta) und Krebse (Crustacea), wie z.B. Flohkrebse, kleineren Krabben und Schlickkrebse (Cumacea). Doch Schnecken (Gastropoda), Asseln (Isopoda) und Borstenwürmer (Polychaeta) findet man hier ebenfalls. Nutznießer der sehr hohen Verfügbarkeit organischer Substanzen treten in extrem hohen Individuendichten auf, dafür ist aber die Artenvielfalt umso geringer, je näher man einem Walkadaver dieses Stadiums kommt.

Regelmäßig hat man Polychaeten der Gattung *Vigornella* an Walfällen gefunden, die als dichter Rasen undulierender Würmer um den Wal lagen und den Meeresboden komplett bedeckten: In direkter Nachbarschaft des Wals (1–3 m Entfernung) wurden Dichten von 20.000–45.000



Abb. 2: Kurz nachdem ein toter Wal am Meeresboden angekommen ist, treffen bereits die schnellsten unter den Aasfressern der Tiefsee ein; dazu gehören Schleimaale und Flohkrebse. Mit freundlicher Genehmigung von Craig R. Smith, University of Hawaii

Individuen pro Quadratmeter ermittelt. Dabei handelt es sich um die höchsten Dichten von wirbellosen Tieren, die jemals unterhalb von 1.000 m festgestellt wurden. Andere Spezies von Polychaeten bedecken die Walknochen. Die Opportunisten kratzen die letzten Fleisch- und Fettreste von den freigelegten Knochen. Insbesondere haben sie es auf das energiereiche und deshalb sehr wertvolle Walöl abgesehen. Außerdem ernähren sich die Gäste des zweiten Stadiums auch von den Abbauprodukten und Ausscheidungen ihrer Vorgänger aus der vorangegangenen Phase der Walmahlzeit.

DAS STADIUM DER SCHWEFELLIEBENDEN

Das Stadium der Schwefelliebenden ist das zweitlängste Zersetzungsstadium eines Walfalls. Es nimmt in der Regel, je nach der Größe des Walkadavers, 10–50 Jahre oder auch länger in Anspruch. Es verdankt seinen Namen den Sulfiden, das sind Schwefelverbindungen, die in den Walknochen von chemosynthetisch aktiven Bakterien gebildet werden. Das Skelett eines Wals ist auch in diesem Stadium eine reichhaltige Energiequelle, denn es besteht bis zu 60 % aus Lipiden (Fetten). Die hochspezialisierten Mikroben können anorganische Verbindungen in organische umwandeln. Einige zersetzen das vorhandene Fett unter Sauerstoffabschluss, wobei sie Schwefelwasserstoff freisetzen. Davon ernähren sich wiederum die chemolithoautotrophen Bakterien, die frei auf dem Skelett und den umgebenden Sedimenten oder symbiontisch auf bzw. in Tieren leben. In beiden Fällen profitieren davon schließlich die Tiefseetiere, die sich von den Bakterien ernähren. Solche Tiere, wie Muscheln, Röhrenwürmer und andere spezialisierte Wirbellose, treten z.T. in großen Dichten auf, aber nicht alle grasen die Bakterienmatten ab – viele leben in Symbiose mit Schwefelbakterien und ernähren sich so indirekt von dem Schwefelwasserstoff, der aus den Walknochen herausdiffundiert.

Zu dieser Gruppe gehört auch ein kleiner, höchst seltsam anmutender Bartwurm, den 2004 zum ersten Mal beschrieben wurde. Sein lateinischer Name lautet *Osedax*,

auf Deutsch „Knochenfresser“. Das kaum fingernagelgroße Geschöpf wird allerdings meist nur „Zombie-wurm“ genannt.

EXTRAVAGANT: KNOCHENFRESSENDE „ZOMBIEWÜRMER“

Die „Zombiewürmer“ bilden eine Schlüsselgruppe an Walfällen. Sie bestimmen maßgeblich, wie lange ein Walfall besteht und wie schnell er vergeht, indem sie die Knochenmasse abbauen. *Osedax* ist ein wahrer Spezialist: Er produziert eine Säure, mit deren Hilfe er sich durch den Knochen hindurchätzt und die Knochenbestandteile Kollagen und Cholesterin verzehrt.



Abb. 3: Nach nur 18 Monaten haben Schleimaale und andere mobile Aasfresser einen Walkadaver im Pazifik vor Santa Cruz bis auf die Knochen verzehrt. Mit freundlicher Genehmigung von Craig R. Smith, Mike Degruy

Osedax haben keine Mundöffnung und keinen Verdauungstrakt. Stattdessen leben Bakterien der Ordnung Oceanospirillales innerhalb des Wurzelsystems der Würmer (vgl. Kap. 2.7.3). Diese Mikroben sind in der Lage, komplexe organische Stoffe zu zersetzen. Biochemische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bakterien als Endosymbionten für die Ernährung der Würmer verantwortlich sind – eine im gesamten Tierreich einmalige Ernährungsweise.

Solche schwefelliebende Lebensgemeinschaften aus symbiotisch lebenden Partnern kennt man ansonsten nur von Hydrothermalquellen. Sobald die Nährstoffe in diesen Schichten verbraucht sind, sterben die Zombiewürmer ab, aber sie bereiten mit ihrer Tätigkeit die Grundlage für die letzte Phase der Walzersetzung, das Riffstadium, welches

Jahrtausende oder unter Umständen gar länger in Anspruch nehmen kann.

DAS RIFFSTADIUM

Nachdem alles organische Material verzehrt und zersetzt ist, bleiben die anorganischen Anteile des Walskeletts zurück. Sie ragen aus dem Sediment empor und bieten somit einen harten, festen Untergrund – ein Substrat, wie es ansonsten in der Tiefsee selten vorkommt. Viele Organismen sind auf Hartsubstrate angewiesen. Dabei sind exponierte, also in die Wassersäule hineinragende Orte vorteilhaft für ihre Verpflegung. Viele dieser festsitzenden („sessilen“) Organismen ernähren sich filtrierend von vorbeitreibendem Detritus oder Plankton. Erhöhte Positionen sind stärkerer Strömung ausgesetzt als bodennahe Plätze. Darum sind herausragende Walknochen beliebte Orte für die Besiedelung und bilden so die Basis eines Riffs.

Wenn ein Walkadaver in die manganbildende Zone (vgl. Kap. 4.1.1) der Tiefsee herabgesunken ist und dort das fortgeschrittene Schwefelstadium erreicht hat, beginnen sich Manganoxid und andere Metallverbindungen an den Knochen abzulagern. Diese Kruste konserviert die Knochen und bewahrt sie davor, sich mit der Zeit im Wasser aufzulösen. Derartig verkrustete Knochen verbleiben vermutlich weit über 10.000 Jahre als Riffe am Meeresboden erhalten. Dieses Stadium bildet sich vornehmlich an den Skeletten alter, großer Wale, die sich nicht nur aufgrund ihrer Größe, sondern vor allem aufgrund ihrer stark mineralisierten und von Öleinlagerungen durchzogenen Knochen einem zügigen Abbau eher widersetzen als die jüngerer Artgenossen.

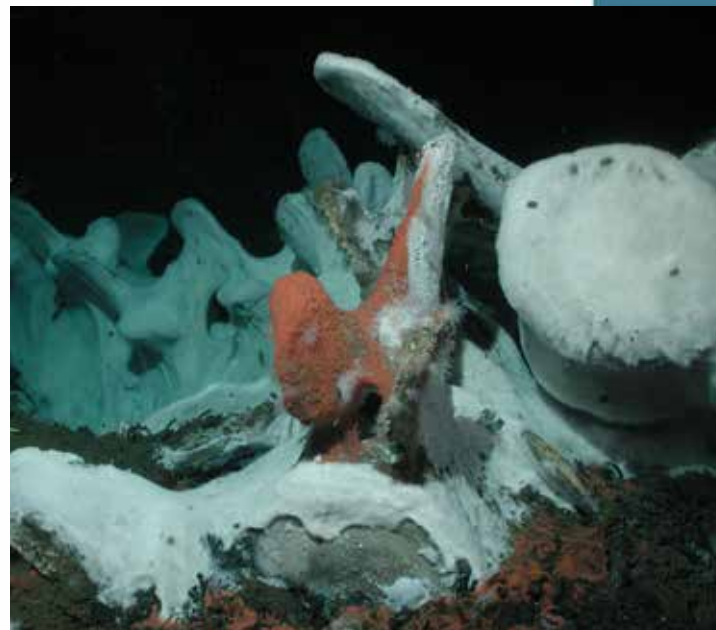
Das Riffstadium ist sogar in fossilen Walfällen überliefert. Es tritt vom Flachwasser bis in die Tiefsee auf, jedoch existieren besonders manganisierte Walfallriffe für lange Zeitperioden. Im Flachwasser werden diese Riffe von Muscheln, Anemonen und Seepocken besiedelt. Auch in der Tiefsee zählen Seepocken zu den typischen Bewohnern von alten Walknochen. Verschiedene Studien an der Manganknollen-Megafauna (vgl. Kap. 2.6) haben gezeigt, dass eine große organismische Vielfalt von diesen Metallabla-

gerungen abhängt. Man kann daher davon ausgehen, dass manganisierte Walknochen wichtige Riffe für Tiergruppen wie Schwämme, Moostierchen, Nesseltiere, Krebstiere sowie Kämmerlinge und ihre Verwandten bilden.

WIE KOMMEN DIE TIERE ZU DEN WALFÄLLEN?

Walfälle werden entweder von Tieren, die gut schwimmen können, besiedelt, oder von solchen die sich über Meeresströmungen verbreiten. Wie genau das vonstatten geht, bleibt bislang unverstanden. Man weiß zwar, dass sich Larven von Meeresströmungen tragen lassen, doch wie ausgewachsene Tiefseetiere in der ewigen Finsternis tote Wale orten, ist nicht bis ins Letzte erforscht. Man kann davon ausgehen, dass der Geruch eine wichtige Rolle spielt.

Zwar ist nach ein paar Jahrzehnten kaum noch etwas Nahrhaftes von einem Walkadaver übrig, doch der Nachschub reißt nicht ab. Seit sich manche Walpopulationen wieder erholt haben, hat auch die Zahl der natürlich verendenden Wale wieder zugenommen. Schätzungen zufol-



ge sterben jährlich etwa 69.000 Wale weltweit. Daraus lässt sich herleiten, dass durchschnittlich alle 5–13 km ein Walkadaver am Meeresgrund liegt – entlang wichtiger Wanderrouten mancher Spezies ist die Entfernung vermutlich sogar deutlich geringer.

DIE BEDEUTUNG DER WALFÄLLE

Walfälle ziehen Tiere und Bakterien in sehr großer Zahl an. Wissenschaftler haben berechnet, dass ein einzelner Walfall so viel Nährstoffe auf einmal in die Tiefsee befördert, wie sonst über eine Zeitspanne von 2.000 Jahren langsam als Detrituspartikel auf den Meeresboden sinken würden. Walfälle stellen daher Inseln hoher Nahrungsverfügbarkeit in einem Meer des Nahrungsmangels dar. Dort, wo die Reise eines Wals endet, blüht das Leben in der Tiefsee auf. Jeder Walfall ist somit der Ursprung eines neuen Ökosystems und wahrscheinlich sogar ein wichtiger evolutionärer Faktor für das Leben im Ozean.

Jedes Mal, wenn ein Walkadaver entdeckt und erforscht wird, werden neue, bislang unbekannte Arten an und in ihm entdeckt. Mehr als 400 Spezies, für die Wal- leichen die Lebensgrundlage darstellen, haben Forscher bereits gezählt. Darunter befanden sich bislang über 120, die für die Wissenschaft noch völlig neu waren. An einem einzigen Kadaver können sich Zehntausende Individuen gleichzeitig gütlich tun. Für das Verständnis von Artenvielfalt in der Tiefsee ist die Erforschung der Gäste dieses Festmahls also von großer Bedeutung.

Viele der Organismen, die einen Walfall ausmachen, sind stammesgeschichtlich so alt wie die Wale selbst oder sogar noch älter – der Zombiewurm *Osedax* zum Bei-

Abb. 4: Nach viereinhalb Jahren am Meeresboden haben chemosynthetisch aktive Bakterien die Walknochen mattenartig überzogen. Anemonen nutzen die Walknochen als Substrat. Um die letzte Ruhestätte des Wals herum ist das Sediment stark mit organischer Materie angereichert – die Überreste des großen Fressens. Opportunisten, wie z. B. Seesterne (links am Bildrand), profitieren davon. Foto: Craig R. Smith, University of Hawaii

spiel. Es wird vermutet, dass Walfälle die sprichwörtlichen Trittsteine für die Besiedlung der Tiefsee durch mancherlei Tiere dargestellt haben. Dazu gehören die Flohkrebse der Überfamilie Lysianassoidea, wie *Eurythenes gryllus*. Walfälle bilden für manche Tiergruppen somit eine Art „Triebfeder der Evolution“.

WIE ERFORSCHT MAN WALFÄLLE?

Die bislang zu Walfällen gesammelte Datendichte ist noch sehr gering, denn die Forschungsarbeit in der Tiefsee ist im Gegensatz zu der in Küstengewässern oder an Land nicht nur ungemein teuer, sondern auch ungleich schwieriger. Und so kann man über die ökologische Abhängigkeit der vielen Walfallbewohner und der Regelmäßigkeit des Eintreffens von Walkadavern am Meeresgrund bislang noch wenig sagen. Dazu kommt das Problem, die Walfälle überhaupt zu finden: Anfangs stieß man ausschließlich per Zufall auf Walkadaver am Meeresgrund, und auch heute werden immer wieder neue Ruhestätten der Meeresriesen entdeckt. Dabei spielen mit Kameras ausgerüstete Unterwasserroboter (ROV – Remotely Operated Vehicle) die wichtigste Rolle. Doch man kann es sich auch einfacher machen: Craig Smith von der University of Hawaii, der Vater der Walfallforschung, hat zum einen selbst Dutzende mit Eisengewichten beschwerte Walkadaver versenkt und zum anderen – dank weltweiter Unterstützung – von über siebzig aktuellen Walkadaverstandorten in vier Ozeanen und in unterschiedlichen Tiefen Kenntnis erhalten.

KAPITEL 4

Tauchroboter wie das ROV KIEL 6000 des GEOMAR können gefahrlos in die lebensfeindliche Umwelt der Tiefsee abtauchen. Mittels Beleuchtung und hochauflösender Bild- und Videokameras bringen sie spektakuläre Bilder und Filme aus der Tiefsee in Echtzeit an Bord. Hier beleuchtet der Roboter die für heiße Quellen typischen Schlote der „Schwarzen Raucher“. Bildkomposition von Tom Kwasnitschka, GEOMAR.

4. NUTZUNG, GEFÄHRDUNG UND SCHUTZ DER TIEFSEE

Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller

Die Tiefsee dient dem Menschen als Quelle für Nahrung, Rohstoffe und Medizin. Aber er gefährdet sie auch, unter anderem durch diese Nutzung, und so gibt es vermehrt Bemühungen, diesen besonderen Lebensraum zu schützen (vgl. Kap. 4.5).

Nahezu alle Rohstoffe auf unserem Planeten sind begrenzt – auch die der Meere. Intensiver Abbau und Verbrauch einerseits und mangelhaftes Recycling sowie der exponentiell verlaufende technische Fortschritt andererseits führen dazu, dass wir ständig neue Rohstoffquellen suchen müssen. Rohstoffgewinnung (Öl, Gas, Sand, Metalle) aus den Ozeanen ist an sich nicht neu. Neu ist, dass die Gewinnung von Rohstoffen aus der Tiefsee wirtschaftlich interessant wird – seitdem sich die mit geringerem Aufwand auszubeutenden Rohstoffvorkommen verknappen. Besonderes Interesse besteht aktuell an der Förderung von Manganknollen und -krusten, Massivsulfiden und Methanhydrat. Verschiedene Forschungsprojekte versuchen einzuschätzen, welche Risiken dies für die betroffenen Ökosysteme mit sich bringt (vgl. Kap. 2.4, 2.6, 4.1).

Obwohl wir das Ökosystem Tiefsee nur ausschnittsweise kennen, nutzen wir es bereits seit Jahrhunderten als Nahrungsquelle. Im 18. Jahrhundert holten die Menschen Fische in geringen Mengen mit sogenannten Langleinen aus der Tiefsee herauf. Seit 1950 werden die Tiefen mit hochseetüchtigen Fangschiffen und gigantischen Schleppnetzen systematisch befischt; inzwischen sind viele Fischarten und auch ihre Lebensräume durch die industrielle Fischerei bedroht. Ein Grund für die rasante Verringerung von Fischpopulationen in der Tiefsee: Viele Tiefseefische wachsen langsam, werden sehr spät geschlechtsreif und produzieren wenig Nachwuchs (vgl. Kap. 4.2).

„SEA-ME-WE 3“ lautet der Name eines 39.000 km langen Seekabel-Netzwerks, das Europa, Afrika, Asien und Australien miteinander verbindet. Wir kommunizieren durch die Tiefsee! Verschicken wir eine E-Mail, rasen die Daten zu 90% durch Glasfaserkabel und häufig auch durch die Ozeane. Das „Netzwerk des Internets“ besteht aus Kabeln, die auf dem

Land und zwischen den Kontinenten durch die Ozeane verlegt wurden und werden. Millionen Kilometer Strom- und Datenkabel und damit Tausende Tonnen Material verlegen „Kabelleger“ – riesige Schiffe – auf dem Grund der Ozeane. Diese „Hardware“ stellt für Organismen, die festsitzend leben, ein willkommenes Hartsubstrat auf dem sonst überwiegend weichen Untergrund dar (vgl. Kap. 4.3).

Die stetig wachsende Weltbevölkerung, drastisch steigender Konsum und die unterentwickelte Kreislaufwirtschaft sorgen für eines der größten Probleme unserer Zeit: Müll. Insbesondere Kunststoffabfälle werden von Deponien auf dem Land, durch den Wind und über Flusssysteme bis in die Meere transportiert. In riesigen Müllstrudeln, in der Wassersäule und an nahezu allen Stränden dieser Welt findet sich Plastikmüll – vom Plastikfass bis zu mikroskopisch kleinen Plastikfragmenten (vgl. Kap. 4.4). Sensible Ökosysteme wie tropische Riffe aber auch Tiefwasserriffe (vgl. Kap. 2.7.6) sind massiv vom Abfallproblem betroffen. „Lost Fishing Gear“, also verloren gegangenes oder über Bord entsorgtes Material der Fischerei wie Netze und Leinen, sind Todesfallen für viele Meeresorganismen. Fische, Vögel und Wale fressen Plastikabfälle und verenden daran. Am Ende kommen das Plastik und die in Kunststoffen enthaltenen Schadstoffe in unseren eigenen Körper zurück, und zwar, wenn wir Fisch essen, der seinerseits Mikroplastik aufgenommen hat.

Die Probleme sind bekannt, und es gibt Bestrebungen, die Ökosysteme des Ozeans zu schützen. Appelle für den freiwilligen Schutz sind eine Möglichkeit, doch besser funktioniert die Regelung mittels Gesetzen (vgl. Kap. 4.5). Denn außerhalb der 200 sm messenden sogenannten Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) beginnt die Hochsee. Sie wird von allen Menschen gemeinsam genutzt und zeigt die typische „Tragik der Allmende“ – die übermäßige Ausbeutung und unregelmäßige Übernutzung eines Gemeinschaftsgutes, was leider nicht im Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen SRÜ, United Nations Convention on the Law of the Sea UNCLOS) für die Hochsee geregelt werden konnte. Das Internationale Seerecht (vgl. Kap. 4.6), rigide Fangquoten und das Ausweisen von

schutzwürdigen Meeresgebieten (engl. Vulnerable Marine Ecosystems, VME) wirken diesem Mechanismus entgegen. Erst 1995 wurde eine Fläche von 370 km² vor Tasmanien zum ersten VME erklärt, da die Fischerei mit grundberührenden Schleppnetzen verheerende Schäden in den dortigen Seeberg-Ökosystemen verursacht hatte. Allerdings sind die Einhaltung und Kontrolle der Gesetze und Schutzgebiete im Bereich der Hochsee aufgrund der riesigen Flächen außerordentlich schwierig. Politik und Gesellschaft sind gefragt, die Ozeane und damit auch den Lebensraum Tiefsee nachhaltig zu nutzen und zu schützen. Die Ergebnisse guter wissenschaftlicher Forschung bzw. die daraus entwickelten Handlungsoptionen bieten die Grundlage dafür.

Bitte ein Bild einfügen

4.1 MINERALISCHE ROHSTOFFE DER TIEFSEE

Sven Petersen, Matthias Haeckel

Die Erde hält eine Vielzahl natürlicher mineralischer Rohstoffe bereit, die wir in unserer hochtechnisierten Gesellschaft benötigen. Zurzeit werden fast alle diese Rohstoffe auf einer Fläche abgebaut, die weniger als ein Drittel unseres Planeten ausmacht – der Landfläche. Hier wird es jedoch immer schwieriger, reiche Vorkommen zu finden. Dies zwingt die Bergbauindustrie dazu, Lagerstätten mit geringeren Konzentrationen abzubauen bzw. nach Lagerstätten in abgelegenen Regionen der Erde oder in großer Tiefe zu suchen. Dies ist jedoch mit einem erheblichen Anstieg des Flächenverbrauchs und mit zusätzlichen Umweltbeeinträchtigungen verbunden.

Die Erde hält eine Vielzahl natürlicher mineralischer Rohstoffe bereit, die wir in unserer hochtechnisierten Gesellschaft benötigen. Zurzeit werden fast alle diese Rohstoffe auf einer Fläche abgebaut, die weniger als ein Drittel unseres Planeten ausmacht – der Landfläche. Hier wird es jedoch immer schwieriger, reiche Vorkommen zu finden. Dies zwingt die Bergbauindustrie dazu, Lagerstätten mit geringeren Konzentrationen abzubauen bzw. nach Lagerstätten in abgelegenen Regionen der Erde oder in großer Tiefe zu suchen. Dies ist jedoch mit einem erheblichen Anstieg des Flächenverbrauchs und mit zusätzlichen Umweltbeeinträchtigungen verbunden.

Gleichzeitig steigt durch das Bevölkerungswachstum, die Umstellung auf grüne Technologien, wie Elektrofahrzeuge, Windkraft- und Solarstromanlagen, die oft einen erhöhten Metallverbrauch gegenüber herkömmlichen Technologien aufweisen, und das weltweite Wirtschaftswachstum die Nachfrage nach Metallen weiter an. Die Vereinten Nationen prognostizieren bis zum Jahr 2050 einen Bevölkerungsanstieg auf 9,7 Milliarden Menschen, das sind knapp 2 Milliarden mehr als heute. Daher wird es in Zukunft vermutlich (noch) häufiger zu Landnutzungskonflikten zwischen Wohnungsbau, Infrastruktur und Landwirtschaft auf der einen Seite und dem Bergbau kommen.

METALLERZE

Neben der steigenden Nachfrage nach Metallen können geopolitische Interessen (z. B. Zölle und Exportbeschränkungen) die Verfügbarkeit von Metallen weiter einschränken. Es gibt demzufolge vorhersehbare Risiken für eine sichere Rohstoffversorgung der Industrie. Aus diesem Grund rücken alternative Rohstoffquellen in den Fokus. Außer über neue Abbaumethoden an Land und deutlich erhöhte Recyclingraten wird dabei auch über einen Abbau in der Tiefsee nachgedacht, um die Rohstoffversorgung zu sichern.

Bereits heute ist der Meeresboden eine wichtige Rohstoffquelle für die Menschheit. So werden Sand und Kies sowie Öl und Gas bereits seit vielen Jahren aus dem Meer gewonnen, dasselbe gilt für die Förderung von Diamanten, Zinn, Titan und Gold entlang der Küsten Afrikas, Asiens und Australiens. Künftig dürfte aber eine Reihe von mineralischen Rohstoffen hinzukommen, die aus der Tiefsee gefördert werden sollen. Dazu zählen Manganknollen (auf den sedimentbedeckten Tiefsee-Ebenen), kobaltreiche Mangankrusten (entlang der Flanken alter submariner Gebirgszüge) sowie Massivsulfide und Sulfidschlämme, die sich in Bereichen vulkanischer Aktivität bilden. Alle drei

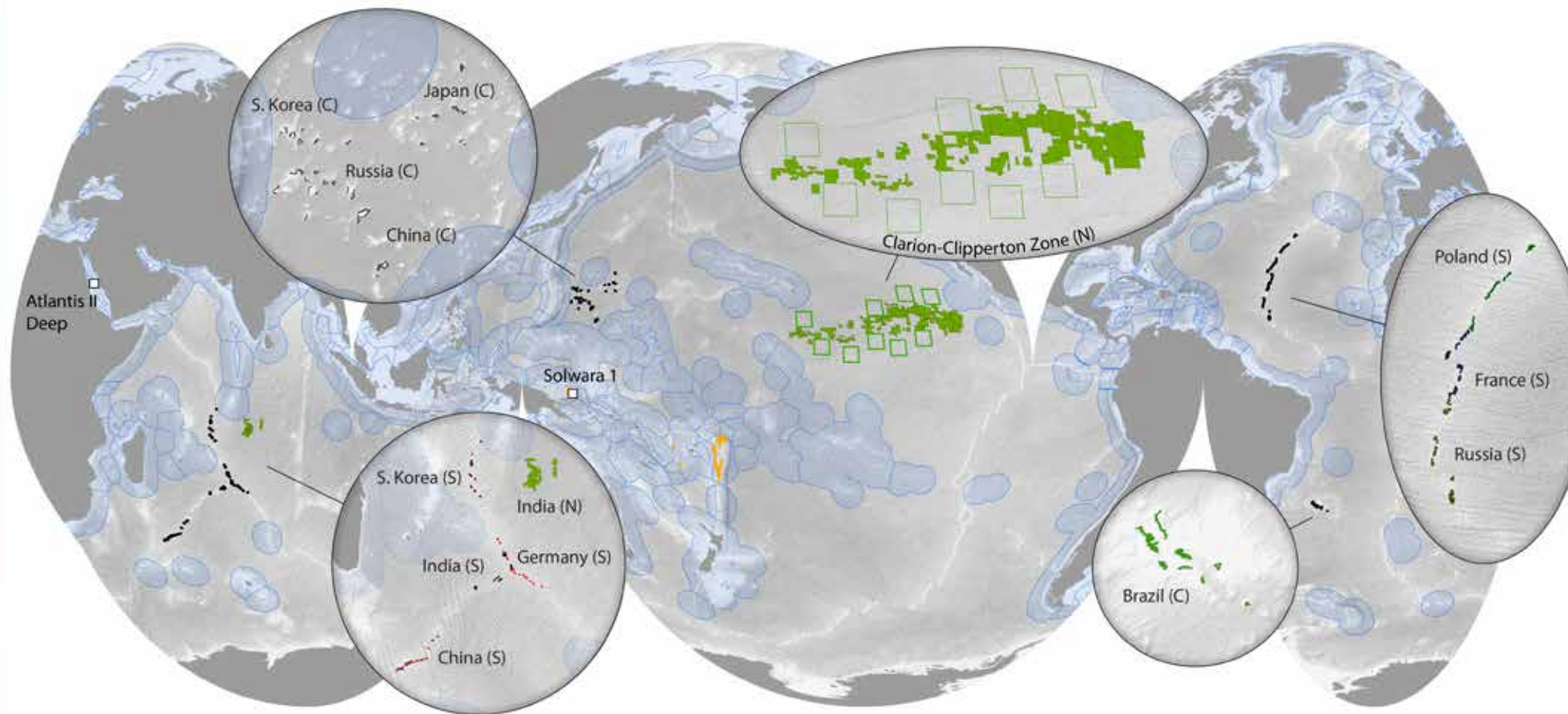


Abb. 1: Räumliche Verteilung der bisher von der Internationalen Meeresbodenbehörde vergebenen globalen Erkundungslizenzen für marine mineralische Rohstoffe außerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszonen der Küstenstaaten. Dazu kommen Lizenzen innerhalb der Hoheitsgewässer verschiedener Länder. Quelle: GEOMAR.

Rohstofftypen werden oftmals als „nachwachsende Rohstoffe“ bezeichnet. Dies ist aber irreführend, da die Metalle z.B. in Manganknollen über einen Zeitraum von Jahrtausenden angereichert werden. Selbst die deutlich schneller wachsenden Massivsulfide benötigen Jahrtausende, um wirtschaftlich interessante Größenordnungen zu erreichen.

Bereits in den 1980er Jahren gab es – nicht zuletzt aufgrund der Vorhersagen des „Club of Rome“ zur Rohstoffverknappung – großes Interesse an den Rohstoffen der Tiefsee. Ganze Forschungsflotten untersuchten damals

die Manganknollenfelder im Pazifischen Ozean auf ihre Eignung als mögliche Rohstoffquellen. Doch dank sinkender Rohstoffpreise, neuer Fördertechnologien und der Entdeckung neuer Landvorkommen traten die Vorhersagen nicht ein, und das rohstoffpolitische Interesse der Industrieländer schwand. Diese erste Phase der Euphorie und die Furcht vor einer Ausbeutung der Meere durch die Industrieländer auf Kosten der Allgemeinheit führten aber letztendlich dazu, dass im Jahr 1982 das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS) verabschiedet

und die Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) in Jamaika gegründet wurde. Dieses Abkommen bildet seit seinem Inkrafttreten 1994 für alle Unterzeichner die Grundlage für die Nutzung mariner Rohstoffe am Meeresboden außerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszonen der Küstenstaaten (Exclusive Economic Zone, EEZ). Seit 2001 hat die Meeresbodenbehörde 29 Lizenzen für die Erkundung von mineralischen Rohstoffen in der Tiefsee erteilt (Abb. 1).

GASHYDRATE

Erdgas wird in den nächsten Jahren eine zunehmende Rolle bei der Energieversorgung spielen. Gegenüber anderen fossilen Energieträgern bietet es eine Reihe wichtiger Vorteile: Die CO_2 -Emissionen eines Gaskraftwerks sind bei gleicher Leistung nur etwa halb so hoch wie die eines Kohlekraftwerks; bei der Verbrennung werden keine Schadstoffe freigesetzt; Gaskraftwerke können schnell und ohne wesentlichen Effizienzverlust in ihrer Leistung reguliert werden. Erdgas kann daher den Strom liefern, der in Schwachwindperioden und an sonnenarmen Tagen nicht durch erneuerbare Energieträger zur Verfügung gestellt werden kann. In den letzten Jahren sind die CO_2 -Emissionen in Nordamerika deutlich zurückgegangen, da Kohle durch Erdgas ersetzt wurde. Die Erdgaspreise sinken dort, weil mit dem (durch das zweifelhafte Fracking gewonnenen) Schiefergas eine neue unkonventionelle Erdgasquelle erschlossen wurde. Eine andere bisher nicht erschlossene Erdgasressource schlummert im Meeresboden. In den sogenannten Gashydraten ist mehr Kohlenstoff gebunden als in allen bekannten Erdgasvorkommen zusammen. Insbesondere aufstrebende Industriestaaten, wie China und Indien, erforschen daher die Nutzung der Gashydrate als zukünftige Erdgasquelle. Im Meeresboden bieten Gashydrate zudem interessante Optionen zur Speicherung des Klimakillers CO_2 (vgl. Kap. 4.1.3).

4.1.1 MANGANKNOLLEN

Sven Petersen

Die vermutlich wichtigste potenzielle Rohstoffquelle des Ozeans sind Manganknollen. Hierbei handelt es sich um Konkretionen, rundliche Mineralaggregate, die im Allgemeinen einen Durchmesser von 1–12 cm haben. Sie sind überwiegend aus Mangan- und Eisenoxiden aufgebaut und treten in großen Bereichen der sedimentbedeckten Tiefsee-Ebenen auf, vorwiegend in Wassertiefen zwischen 3.000 und 6.000 m (Abb. 1). Die in den Knollen enthaltenen Metalle stammen aus der Erosion der Kontinente, aus gelösten Metallen, die ins Meer gespült wurden, sowie aus heißen Quellen in vulkanisch aktiven Bereichen der Meere.

Die Mangan- und Eisenminerale der Knollen entstehen, wenn sich gelöste Metalle aus dem Meerwasser sowie dem Porenwasser der Sedimente an einem Kern, der aus Gesteinsfragmenten, Schalenresten, Haifischzähnen oder zerbrochenen Knollen bestehen kann, ab- und anlagern. Mit der Zeit bilden sich konzentrische Lagen um diesen Kern. Manganknollen wachsen extrem langsam: nur wenige Millimeter pro Million Jahre. Aufgrund dieser geringen Wachstumsraten sind in Bereichen junger ozeanischer Kruste (jünger als 10 Mio. Jahre) und mit hohen Sedimentationsraten (mehr als 1 cm pro 1.000 Jahre) keine wirtschaftlich interessanten Vorkommen zu erwarten.



Abb. 1: Manganknollen am Meeresboden des östlichen Pazifiks. Foto: ROV Kiel 6000.

Die Topografie des Meeresbodens und andere Faktoren verkleinern die Fläche, auf der Manganknollen zu erwarten sind, weiter. Die größte bekannte Konzentration von Manganknollen befindet sich in der sogenannten Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) zwischen Hawaii und Mexiko. Sie umfasst eine Fläche von über 5 Mio km². Wirtschaftlich interessante Manganknollenvorkommen sind außerdem aus dem Perubecken sowie aus der Umgebung der Cookinseln bekannt (Abb. 2). Weitere Vorkommen befinden sich aber auch im Indischen und im Atlantischen Ozean.

METALLGEHALTE UND WIRTSCHAFTLICHES POTENZIAL

Mangan und Eisen sind die dominanten Metalle in Manganknollen; wirtschaftlich am interessantesten sind jedoch Nickel, Kupfer und Kobalt, die zusammen Gehalte von etwa 2–3 Gewichtsprozent erreichen. Zusätzlich finden sich noch Spuren einer ganzen Reihe weiterer Metalle, an denen vor allem Unternehmen der Hochtechnologie sowie der grünen Technologien (z. B. für Lithium-Kobalt-Batterien für die Elektromobilität oder die Seltenen Erden als Magnete für Windkraftanlagen) interessiert sind. Dazu gehören z. B. Molybdän, die Seltenen Erden, aber auch Lithium oder Titan. Ob auch das Mangan, als Hauptkomponente der Knollen, wirtschaftlich gewonnen und vermarktet werden kann, ist derzeit nicht gesichert.

Wie häufig Manganknollen in der Clarion-Clipperton-Zone, im Perubecken und vor den Cookinseln vorkommen und wie hoch ihre Metallgehalte sind, ist einigermaßen bekannt. Für den Rest der Ozeane stehen keine oder nur wenige Daten zur Verfügung. Es gilt jedoch als gesichert, dass Manganknollen in riesigen Mengen Vorkommen und damit für die zukünftige globale Rohstoffsicherung von Bedeutung sein könnten. Allerdings wurde noch nicht gezeigt, dass die Knollen wirtschaftlich gefördert werden können; auch für die Auswirkungen eines solchen Abbaus auf die Umwelt fehlen noch umfassende Abschätzungen.

Bei diesen Betrachtungen muss zudem berücksichtigt werden, dass die Internationale Meeresbodenbehörde

größere Bereiche als „Flächen von besonderem Umweltinteresse“ (Areas of Particular Environmental Interest, APEI) von der Erkundung und dem Abbau ausgenommen hat. Auch kommen große Bereiche der Clarion-Clipperton Zone für einen Abbau nicht in Frage. Dazu gehören z. B. Gebiete, die entweder nur geringe Mengen an Manganknollen aufweisen oder die durch ihr starkes Relief für derzeitige Abbautechnologien ungeeignet sind. In den sedimentbedeckten Ebenen der Tiefsee finden sich nämlich durchaus große Bereiche, deren Topografie einen Vergleich mit alpinen Hochgebirgsszügen nicht zu scheuen braucht.

Das wachsende Interesse an Manganknollen zeigt sich u. a. in der Zunahme von Anträgen auf Erkundungslizenzen für Manganknollen in der Tiefsee. Im Jahr 2001 wurden die ersten Lizenzen der Internationalen Meeresbodenbehörde an sechs Vertragspartner vergeben. 2002 kam Indien hinzu, gefolgt von Deutschland, das seit 2006 eine Lizenz in der Clarion-Clipperton-Zone hält. Nach einer Phase der Ruhe zwischen 2006 und 2011 ist das Interesse mittlerweile deutlich angestiegen. Zurzeit sind 17 Erkundungslizenzen für Manganknollen auf einer Fläche von insgesamt 1,2 Mio. km² vergeben. Die Lizenzen haben eine Laufzeit von jeweils 15 Jahren. Die ersten sieben Vertragspartner, deren Erkundungslizenzen 2016 und 2017 ausgelaufen sind, haben Verlängerungen mit einer Laufzeit von jeweils fünf Jahren beantragt und bewilligt bekommen. Eine weitere chinesische Erkundungslizenz im westlichen Pazifik wurde von der Meeresbodenbehörde vor kurzen bewilligt, ist aber noch nicht in Kraft.

Anträge für einen Abbau von Manganknollen in der Tiefsee gibt es im Moment noch nicht, was nicht zuletzt daran liegt, dass die Regularien dafür erst noch entwickelt werden. Obwohl die meisten vergebenen Lizenzen (16) im Bereich der Clarion-Clipperton-Zone liegen, sind auch größere Gebiete des Penrhynbeckens in der Nähe der Cookinseln wegen des erhöhten Kobaltgehaltes (zum Teil über 0,5 Gewichtsprozent) der dortigen Manganknollen von Interesse.

Ein Abbau von Manganknollen in naher Zukunft scheint möglich zu sein. Erste Tests wurden bereits in den 1970er

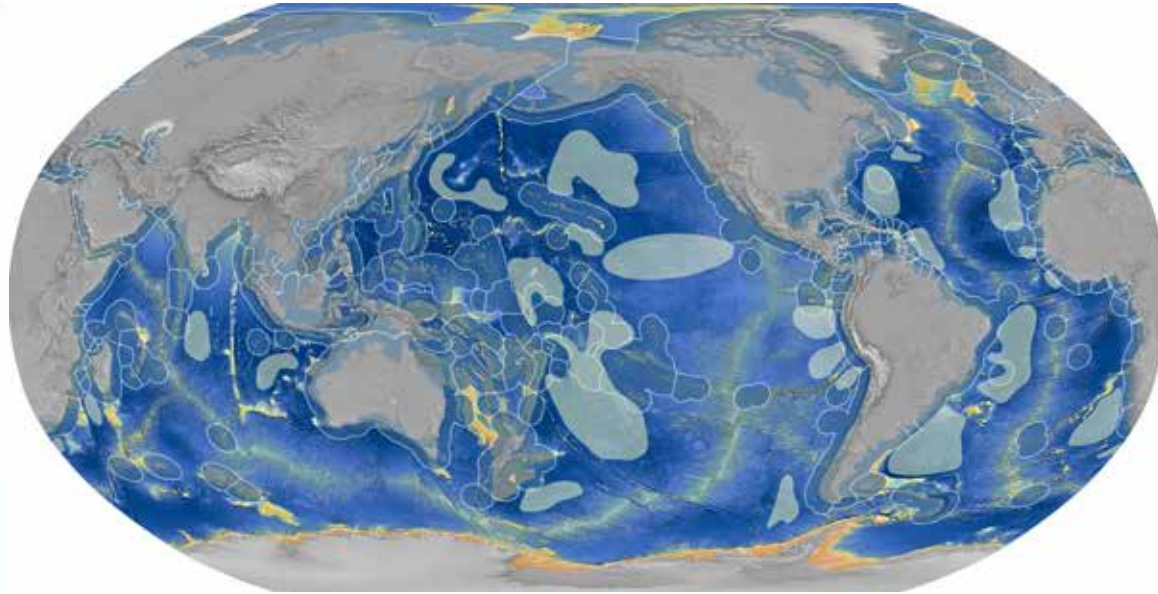


Abb. 2: Meeresbodenbereiche mit dem größten Potenzial für wirtschaftliche Manganknollenfunde. Quelle: Sven Petersen, GEOMAR.

Jahren durchgeführt und haben gezeigt, dass eine Förderung von Manganknollen aus großen Tiefen technisch im Prinzip machbar ist. Allerdings ist es ein weiter Schritt von mehrtägigen Tests (die aufgrund von technischen Schwierigkeiten auch abgebrochen werden mussten) zu einem technisch störungsfreien industriellen Abbau über mehrere Monate im Jahr. Die Auswirkungen eines groß angelegten Abbaus auf die Umwelt sind noch nicht ausreichend untersucht, auch wenn sich wissenschaftliche Großprojekte in den letzten Jahren intensiver mit Abbaufolgen (Habitatzerstörung, Sedimentwolken, Freisetzung von Metallen) beschäftigt haben. Für 2020 steht in der Clarion-Clipperton-Zone ein wichtiger Test für einen Abbaugeräte-Prototyp der international tätigen Firma DEMA aus Belgien auf dem Plan, bei dem testbegleitend unabhängige wissenschaftliche Umweltuntersuchungen durchgeführt werden sollen.

4.1.2 MASSIVSULFIDE

Sven Petersen

Bei Massivsulfiden handelt es sich um Metallerze, die in vulkanisch aktiven Gebieten an sogenannten Schwarzen Rauchern entstehen. Solche Erzvorkommen bilden sich überwiegend an den unter Wasser verlaufenden Erdplatten-grenzen, an denen durch das Zusammenwirken von vulkanischer Aktivität und Meerwasser ein Wärme- und Stoffaustausch zwischen den Gesteinen des Meeres-

bodens und dem Ozean stattfindet. Kaltes Meerwasser wird dabei entlang von Spalten und Rissen zum Teil mehrere Kilometer tief in den Meeresboden gepresst. In der Nähe einer Magmakammer erhitzt sich das Meerwasser auf Temperaturen über 400 °C, reagiert chemisch mit dem umgebenden Gestein und löst dabei die Metalle sowie Schwefel aus dem durchströmten Gestein.

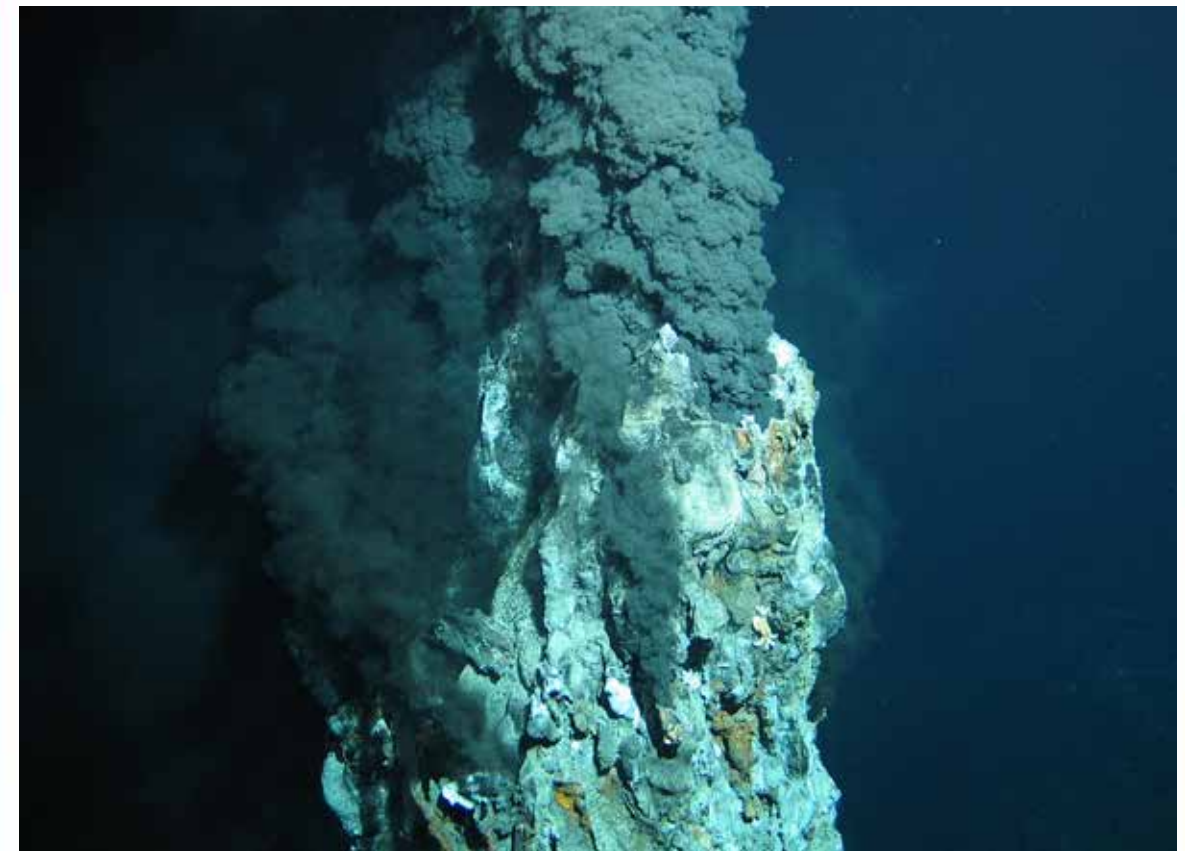


Abb. 1: Aktiver Sulfidschlote aus dem südlichen Atlantik. Hier treten Fluide mit Temperaturen von über 400 °C am Meeresboden aus. Die gelösten Metalle werden beim Kontakt mit Meerwasser ausgefällt und färben den „Rauch“ schwarz. Foto: ROV Kiel 6000.

Aufgrund der Erwärmung verringert sich die spezifische Dichte der chemisch veränderten Lösungen, und sie steigen zum Meeresboden auf, wo sie aus kaminähnlichen Schloten, den Schwarzen Rauchern, am Meeresboden austreten. Dort, wo die heißen, metall- und schwefelreichen Lösungen mit dem kalten Meerwasser in Berührung kommen, fallen die gelösten Metalle als Metall-Schwefel-Verbindungen (Sulfide) aus und setzen sich am Meeresboden ab. Dabei entstehen die charakteristischen Schlote der Schwarzen Raucher (Abb. 1). Von den gelösten Komponenten in den heißen Fluiden leben Mikroorganismen, die unabhängig vom Licht, z. B. aus der Umwandlung von Schwefelwasserstoff, ihre Energie beziehen. Auf der Grundlage dieser Chemosynthese haben sich einzigartige Lebensgemeinschaften mit vielen Arten entwickelt, die nur hier vorkommen. Solche Schwarzen Raucher und die sie umgebenden Lebensgemeinschaften wurden erstmals 1979 am Ostpazifischen Rücken entdeckt. Heute kennen wir mehr als 450 Vorkommen in allen Ozeanen (Abb. 2).

METALLGEHALTE UND WIRTSCHAFTLICHES POTENZIAL

Die Wertmetallgehalte und das wirtschaftliche Potenzial von Massivsulfiden unterscheiden sich deutlich von denen der Manganknollen. Die Metalle Kupfer und Zink sowie Gold und Silber sind hier von wirtschaftlichem Interesse. Es gibt darüber hinaus gewaltige Unterschiede in der Größe (Tonnage) der einzelnen Vorkommen. Die meisten bekannten Vorkommen haben deutlich weniger als 100 m Durchmesser und enthalten nur wenig Material (wenige Tausend Tonnen). Man rechnet zwar damit, dass am Meeresboden größere Vorkommen existieren, die über Jahrzehntausende gewachsen sind und jetzt nicht mehr aktiv sind, bisher sind aber nur wenige Massivsulfidvorkommen bekannt, die aufgrund ihrer Größe wirtschaftlich interessant wären.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Kupfer-, Zink- und Edelmetallgehalte der Vorkommen je nach Region stark schwanken. Die Schwarzen Raucher entlang der Mittel-

ozeanischen Rücken sind überwiegend aus eisenreichen Sulfiden aufgebaut, bei denen Kupfer und Zink zusammen nur etwa ein Achtel der Gesamtmenge ausmachen. Die Goldgehalte liegen dabei meist bei zirka 1 g pro Tonne Gestein. Eine besondere Klasse von Vorkommen hat sich an sich langsam spreizenden Rücken des Atlantischen und Indischen Ozeans (vgl. Kap. 2.2) an Verwerfungen abseits der zentralen vulkanischen Rückenachse gebildet. Hier treten durch tektonische Prozesse Gesteine des oberen Erdmantels am Meeresboden auf, die normalerweise nur in größeren Tiefen unterhalb des Meeresbodens vorkommen. Massivsulfide, die an solche Gesteine gebunden sind, weisen erhöhte Kupfer und Goldgehalte auf. Auch die Vorkommen im Südwestpazifik zeigen hohe Kupfer-, Zink-, und Goldgehalte und sind daher für einen möglichen Abbau besonders interessant.

Neben diesen Elementen gibt es aber auch eine ganze Reihe von Metallen, die in Spuren (mehrere Gramm pro Tonne) in solchen Sulfiden enthalten sein können und in eine wirtschaftliche Betrachtung einfließen könnten. Dazu gehören u. a. die Elemente Antimon, Germanium, Indium, Silber, Tellur und Wismut. Allerdings schwanken die Gehalte in den verschiedenen Vorkommen sehr stark, und die Ergebnisse der Untersuchungen zu ihrer Verteilung sind noch sehr lückenhaft. Die südwestpazifischen Vorkommen befinden sich in vergleichsweise geringen Wassertiefen (weniger als 2.000 m) und in den Wirtschaftszonen von Anrainerstaaten, was einem möglichen Abbau technologisch und rechtlich entgegenkommt.

Während die Manganknollen zweidimensional – an der Oberfläche des Meeresbodens – verteilt sind, handelt es sich bei den Vorkommen von Massivsulfiden um dreidimensionale Gebilde mit Mächtigkeiten von teilweise mehreren Zehnermetern. Um die Metallgehalte festzustellen, genügt es daher bei Manganknollen, direkt am Meeresboden Proben zu nehmen und diese auf ihre Zusammensetzung hin zu analysieren. Dagegen sind bei Massivsulfidvorkommen Bohrungen unerlässlich, um Informationen aus dem Inneren der Hügel zu gewinnen; zudem hat sich bei vielen Untersuchungen gezeigt, dass

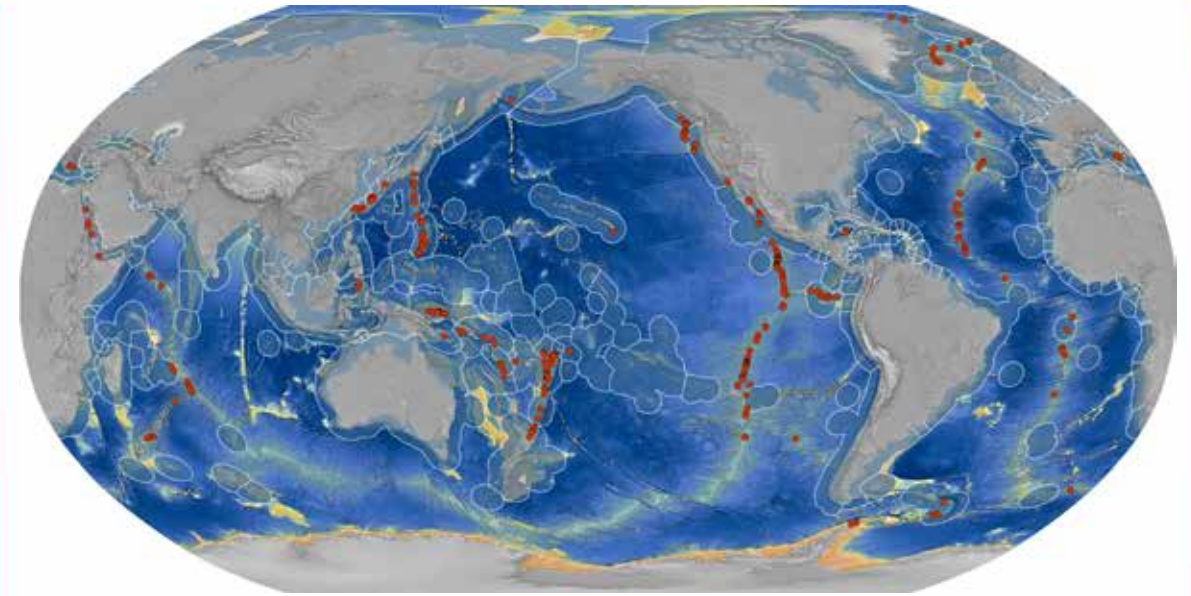


Abb. 2: Lage derzeit bekannter heißer Quellen oder inaktiver ehemaliger Schwarzer Raucher. Blaue Bereiche zeigen die Ausschließlichen Wirtschaftszonen der Länder an. Quelle: Sven Petersen, GEOMAR.

es große Unterschiede in den Metallgehalten zwischen Proben von der Oberfläche und denen aus dem Inneren gibt. Da solche Bohrungen nur von wenigen Vorkommen existieren, sind Abschätzungen des globalen Rohstoffpotenzials der Massivsulfide kaum möglich.

In den letzten Jahren hat das politische Interesse an den Massivsulfiden in der hohen See deutlich zugenommen. Seit 2011 haben sieben Länder Erkundungslizenzen für Massivsulfide im Indischen und im Atlantischen Ozean beantragt und erhalten. Dazu gehört neben China, Russland, Frankreich, Südkorea, Polen und Indien auch Deutschland. So hält die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover seit Mai 2015 ein Lizenzgebiet von 10.000 km² im Indischen Ozean, welches 15 Jahre lang auf sein Rohstoffpotenzial untersucht werden wird.

Trotz der Wissenslücken zum Rohstoffpotenzial wird deutlich, dass nur wenige der bekannten Massivsulfidvorkommen über eine ausreichende Größe und ausreichend hohe Metallgehalte verfügen, um wirtschaftlich abbaubar zu sein. So scheint denn auch das Rohstoffpotenzial der Massivsulfide, verglichen mit dem der Manganknollen, eher gering zu sein. Allerdings wären – aufgrund des dreidimensionalen und eher kleinräumigen Charakters der Vorkommen – die Umweltauswirkungen eines Abbaus vermutlich deutlich geringer als bei den enormen Flächen, die bei einem Abbau von Manganknollen betroffen wären.

4.1.3 METHANHYDRATE

Matthias Haeckel

Neben den in den vorherigen Kapiteln angesprochenen metallhaltigen Erzen können auch die Gashydrate zu den mineralischen marinen Rohstoffen gezählt werden, da sie ebenfalls eine feste Kristallstruktur ausbilden. Unter dem hohen Druck und der niedrigen Temperatur der Tiefsee bilden Wasser- und Gasmoleküle eine eisartige Substanz, sobald ausreichend Methangas im Meeresboden vorhanden ist (Abb. 1).

Das Methan entsteht durch Gärungsprozesse im Meeresboden, bei denen Mikroorganismen die im Sediment abgelagerte organische Substanz langsam zersetzen. Der Druck- und Temperaturbereich, in dem Methanhydrate unter dem Meeresboden existieren, wird als „Hydratstabilitätszone“ bezeichnet. Mit Ausnahme der polaren Gebiete, wo die Wassertemperaturen um den Gefrierpunkt liegen, kommen Methanhydrate im Ozean nur in Wassertiefen von mehr als ca. 400 m vor. Unterhalb des Meeresbodens steigt die Temperatur wieder an (geothermischer Gradient), im globalen Mittel mit 30 °C pro Kilometer. Gashydrate sind daher nur in den oberen ca. 600 m der Sedimentablagerungen anzutreffen. In den tieferen Sedimentschichten entsteht gasförmiges Methan.

Ob sich nennenswerte Methanmengen in marinen Sedimenten bilden, hängt vom Gehalt an organischem Kohlenstoff, meistens Reste von abgestorbenem Plankton, und seiner schnellen Einbettung in tiefere Sedimentschichten ab. Nur dann produzieren Mikroorganismen aus dem organischen Material auch Methan. Dieser Umstand erklärt, warum Gashydrate bevorzugt entlang der Kontinentalränder vorkommen (Abb. 2). Die Bildung größerer Hydratmengen erfordert den kontinuierlichen Transport von Methan in das Stabilitätsfenster. Dies geschieht durch Gasanstieg aus größeren Sedimenttiefen und Fluidfluß entlang von Störungszonen.

ERDGASGEHALTE UND WIRTSCHAFTLICHES POTENZIAL

Mittels mathematischer Modelle wird geschätzt, dass weltweit etwa 1.000 Gt Kohlenstoff in Methanhydraten gebunden vorliegen. Der Energieverbrauch im nächsten Jahrhundert wird auf 500–2.500 Gt Kohlenstoff veranschlagt. Die Gashydrate könnten also einen erheblichen

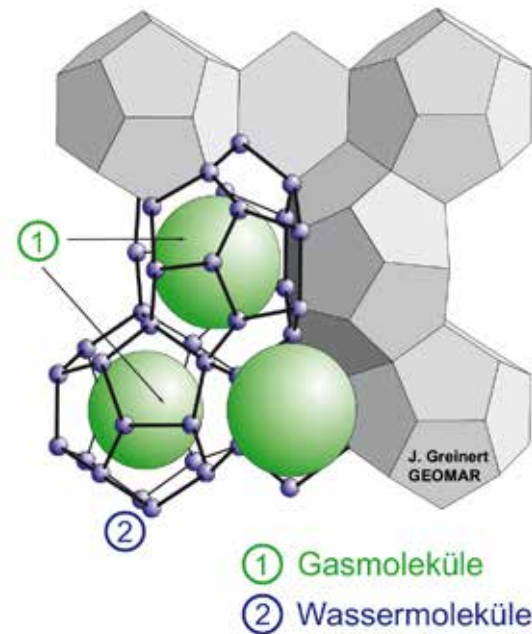


Abb. 1 links: Struktur des Methanhydrats.

Abb. 1 rechts: In marinen Sedimenten findet man massive Gashydratstücke oder Hydratlagen eingebettet im Sediment (oben), überwiegend kommt Gashydrat allerdings fein verteilt im Porenraum der Sedimente vor (unten). Quelle: GEOMAR.

Beitrag zur zukünftigen Energieversorgung leisten. Förderbar sind Hydratvorkommen mit hoher Permeabilität, wie z. B. in sandigen Sedimenten, was die Fließbewegung des Methangases zur Bohrung erhöht. Bei der wirtschaftlichen Betrachtung müssen weitere Faktoren, wie die Entfernungen zu existierender Infrastruktur und zu Abnehmern sowie der Energiepreis, berücksichtigt werden. Um dieses Energiepotenzial nutzen zu können, müssen Fördermethoden entwickelt werden, die einen umweltschonenden und wirtschaftlichen Abbau gewährleisten.

Seit mehr als zehn Jahren werden in Japan, Indien, China, Südkorea, Taiwan, in den USA, und Deutschland große Anstrengungen unternommen, um Gashydrate als zukünftige Energiequelle zu entwickeln. Trotzdem befindet sich die Technologie zur Methanföderung aus Gashydraten noch in einem frühen Stadium. Gegenwärtig werden vor allem Ansätze verfolgt, die Abwandlungen traditioneller Fördermethoden der Öl- und Gasindustrie sind, nämlich die Methanhydratzersetzung durch Wärmezufuhr und Druckentlastung. Dabei wird das Gashydrat im Untergrund in Wasser und Erdgas zersetzt und das gebildete Erdgas durch konventionelle Bohrungen gefördert. Beide Techniken (Wärmezufuhr, Druckentlastung) wurden bereits 2002 bzw. 2008 erfolgreich im Norden Kanadas im Permafrost des McKenzie-Deltas getestet. Diese Tests zeigten, dass die Gasproduktion aus Gashydraten durch Druckentlastung stabiler verläuft und eine günstigere Energiebilanz aufweist. 2013 und 2017 haben Japan und China dieses Verfahren erfolgreich in Offshore-Tests im Nankaigraben und im Südchinesischen Meer erprobt.

Eine vielversprechende, innovative Technologie zur Methangewinnung aus Gashydraten verwendet flüssiges oder gasförmiges Kohlenstoffdioxid (CO₂), z. B. aus Kohlekraftwerken, das über eine Bohrung in die Methanhydratlage injiziert wird. Hierbei reagiert CO₂ spontan mit dem Methanhydrat und setzt Erdgas frei. Die Kopplung von Erdgasproduktion und CO₂-Speicherung könnte einen wichtigen wirtschaftlichen Anreiz setzen und somit die Entwicklung von Technologien zur CO₂-Abtrennung und Speicherung in Ländern mit rasant steigendem wirt-

Lesbarkeit? Sollten die Punkte PS, C, A, etc. in der Legende erklärt werden?

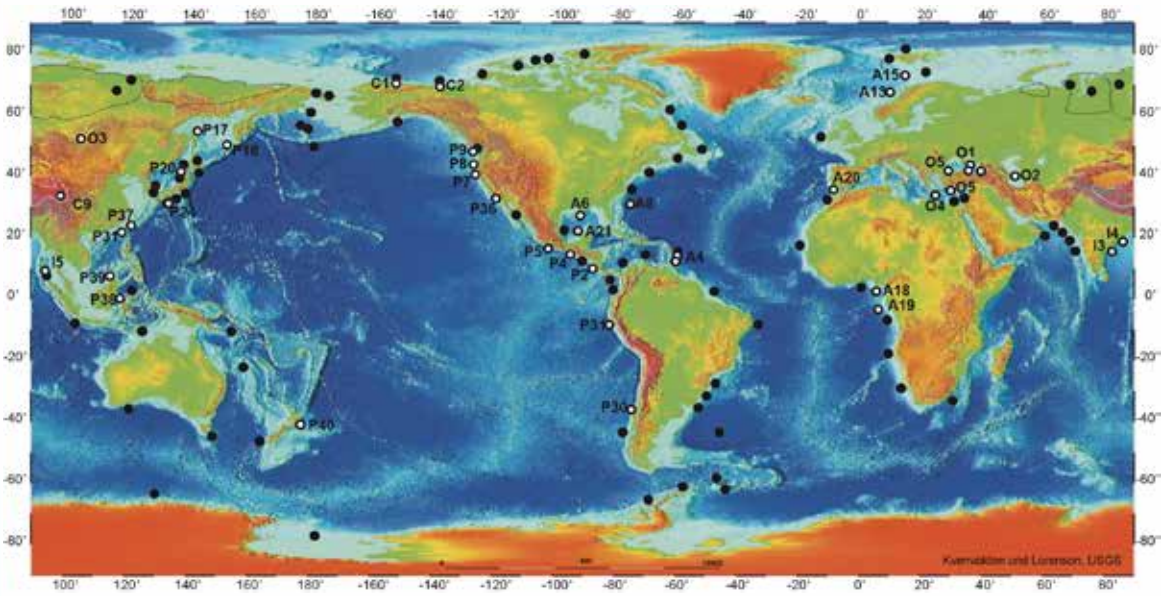


Abb. 2: Weltweite Vorkommen von Methanhydraten
Quelle: K. A. Kvenvolden und T. D. Lorenson, 2001, Global Occurrence of Gas Hydrate, Proceedings of the International Society of Offshore and Polar Engineers Conference 2001.

schaftlichem Wachstum, wie Indien und China, beschleunigen. Die zukünftige Nutzung von Gashydraten könnte also dabei helfen, Kohle- durch Erdgaskraftwerke zu ersetzen, CO₂ sicher im Untergrund zu speichern und so den weltweiten CO₂-Ausstoß zu begrenzen.

Artikel läuft sehr schlecht. Ggf. weiteres kleine Bild einfügen

4.2 FISCHEREI IN DER TIEFSEE UND IHRE FOLGEN

Moritz Sonnewald, Friedhelm Krupp

Als Tiefseefischerei definiert die Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) den Fischfang zwischen 200 und 2.000 m Tiefe. Fischen in größeren Tiefen ist derzeit unwirtschaftlich. Befischt werden vor allem Kontinentalabhänge, Seeberge und Kaltwasserkorallenriffe jenseits des Kontinentalschelfs, die sich durch hohe Fischbestände auszeichnen.

Die Fanggebiete liegen in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) von Küstenanrainern oder im Bereich der Hohen See, außerhalb nationaler Jurisdiktion, wo alle Staaten die Fischbestände ausbeuten dürfen (vgl. Kap.

4.6). Nachdem küstennahe Gebiete weitgehend leer- gefischt waren, erschloss man unter Einsatz neuer Tech- nologien zunehmend die bis dahin kaum befischten Gründe der Tiefsee. Eine solche Fischerei mit großen Schiffen, die fernab der Küsten quasi industriell arbeiten, bedarf erheb- licher finanzieller Investitionen.

DIE ANFÄNGE DER TIEFSEEFISCHEREI

In Gebieten, in denen die Küste tief ins Meer abfällt, er- schließt die Kleinfischerei seit Jahrhunderten auch Tief- seebestände von Fischen und Krustentieren (Abb. 1, 2, 3). Bereits im 18. Jahrhundert wurde mit Langleinen in der Tiefe gefischt. Kommerzielle Fischerei in der Tiefsee setz- te aber erst den 1950er Jahren ein, nachdem hochsee- tüchtige Kühlschiffe, die den Fang an Bord verarbeiten und einfrieren, in Dienst gestellt wurden. Etwa 20 Jahre später erfuhr die Tiefseefischerei mit der Einführung der 200-Seemeilen-Zone einen beträchtlichen Aufschwung. Da es ausländischen Schiffen nun nicht mehr möglich war, nahe an fremden Küsten zu fischen, erschlossen vor allem Länder Osteuropas, die damalige Sowjetunion und Japan alternative Fanggebiete im Bereich der Hohen See und damit auch die Tiefsee. Mit abnehmenden Beständen in



Abb. 1: Fischerboote im Hafen von al-Hudaïda, Jemen. Seit Jahr- hunderten erschließt auch die Kleinfischerei Ressourcen der Tiefsee. Foto: Friedhelm Krupp, Senckenberg.



Abb. 2: Kleine Tiefseetrawler vor der Küste Mauretaniens.
Foto: André Freiwald, Senckenberg.

Küstennähe wandten sich immer mehr Nationen der Tiefseefischerei zu. Nach der Auflösung des Ostblocks zogen sich die Fangflotten dieser Staaten zunehmend aus der Tiefseefischerei zurück, wurden jedoch durch Flotten anderer Nationen wie Neuseeland und Frankreich ersetzt. Vor allem seit den 1990er Jahren wurden zunehmend neue Tiefseefischereigründe erschlossen. Immer mehr Länder wandten sich der Tiefseefischerei zu, oftmals mit finanzieller Unterstützung der jeweiligen Regierungen.

Immer noch beteiligt sich die Kleinfischerei an der Ausbeutung von Tiefseeressourcen. Ihr kommt jedoch eine recht unbedeutende Rolle zu, verglichen mit großen kommerziellen Fangschiffen, die modernes, technologisch fortgeschrittenes Fanggerät zum Einsatz bringen. Etwa 70 % aller Fangschiffe setzen Schleppnetze im Freiwasser oder auf dem Meeresgrund ein. Grundschieppnetze sind mit tonnenschwerem Metallgeschirr, das das Netz auf den Boden drückt, und Scherbrettern, die es in der Strömung geöffnet halten, ausgestattet. Heute liegen etwa 40 % aller Einsatzgebiete der Schleppnetzfisherei unterhalb von 200 m, also in der Tiefsee. Weiterhin kommen Stellnetze und Langleinen zum Einsatz.



Abb. 3: Tiefseetrawler im Hafen von Nouadhibou, Mauretanien.
Foto: Lydia Beuck, Senckenberg.

AUS DER TIEFSEE FRISCH AUF DEN TISCH

Anfangs konzentrierte sich die Tiefseefischerei auf Stachelköpfe (Sebastidae), vor allem auf den Rotbarsch *Sebastes norvegicus*, der im nördlichen Atlantik, einschließlich der Nordsee in Tiefen bis 1.000 m vorkommt (Abb. 4, 5). Im Laufe der Zeit erweiterte sich das Artenspektrum, und oftmals ersetzten neue Zielarten überfischte Bestände anderer Spezies. Im nordöstlichen Atlantik kommt dem Goldbarsch *Sebastes marinus* seit den 1950er Jahren eine große Bedeutung zu. Insgesamt werden heute etwa 300 Arten von Tiefseefischen kommerziell genutzt. Hier seien nur einige Beispiele für wirtschaftlich wichtige Zielarten aufgeführt. Der Rundnasen-Grenadier *Coryphaenoides rupertis* kommt, wie die beiden zuvor genannten Arten, im nördlichen Atlantik – jedoch auch in der Nordsee – in Tiefen von 400–1.200 m vor. Der Granatbarsch *Hoplostethus atlanticus* besiedelt sowohl den Atlantik als auch Teile des Indo-Pazifiks und lebt zumeist in Tiefen von 400–900 m. Der Kohlenfisch *Anoplopoma fimbria* bewohnt den nördlichen Pazifik in Tiefen bis zu 2.700 m, während der Neuseeländische Petersfisch *Pseudocyttus maculatus* im

südlichen Atlantik und Pazifik in bis zu 1.500 m Tiefe vorkommt. Der Stachelkopf *Trachyscorpia cristulata echinata* (Abb. 6) besiedelt den westlichen Atlantik von Irland bis zum Senegal in 200–2.500 m Tiefe und kommt auch im Mittelmeer vor. Der Großkopffhaarschwanz *Trichiurus lepturus* (Abb. 7) ist weltweit in tropischen Meeren nahe des Kontinentalschelfs, zumeist in Wassertiefen von 100–350 m, zu finden. Die Bestände einiger Arten werden derzeit nicht gezielt befishet, haben aber für die Zukunft ein kommerzielles Potenzial. So etwa die Gallertnase *Guentherus altivelis* (Abb. 8), die im Ostatlantik und Ostpazifik in Tiefen von 200–800 m lebt.

Neben Fischen gehören auch zahlreiche Wirbellose zu den Zielarten der Tiefseefischerei, vor allem Tintenfische und Krustentiere. Die Arabische Peitschenlanguste *Puerulus sewelli* lebt in der Nähe des Kontinentalschelfs von Somalia bis Sri Lanka in Tiefen von 180–1.300 m. Tiefseegarnelen kommt eine große wirtschaftliche Bedeutung zu, so etwa der Eismeergarnele *Pandalus borealis*, die in nördlichen Bereichen des Atlantiks (insbesondere der nördlichen Nordsee) und des Pazifiks in Tiefen bis 500 m vorkommt. Der Kaisergranat *Nephrops norvegicus* (Abb. 9, 10) kommt im Nordost-Atlantik, einschließlich der Nordsee und des Mittelmeeres, in Tiefen von 20–800 m vor. Derzeit betra-



Abb. 4: Rotbarschfang mit einem großen kommerziellen Trawler.
Foto: Michael Türkay, Senckenberg.

Achtung: Bild nicht druckfähig. Bitte Feindaten zur Verfügung stellen



Abb. 5: Der Rotbarsch ist als Speisefisch aus der Tiefsee so bedeutend, dass ihm die Deutsche Bundespost 1964 eine Briefmarke widmete.

gen die Fangmengen in seinem gesamten Verbreitungsgebiet etwa 60 t im Jahr.

Schon früh wurde klar, dass die Tiefseefischerei in mehrfacher Hinsicht problematisch ist. Je ausgereifter die Fangmethoden und je größer und schwerer das Fanggerät, desto größer die Bedrohung für die marinen Ökosysteme. Fischbestände werden erheblich dezimiert, andere Meeresorganismen die mitgefangen werden, gehen als kommerziell nicht nutzbarer Beifang tot wieder über Bord. Neben den Beständen der Zielarten wird auch die Meeresumwelt erheblich geschädigt. Netze mit Grundberührung, die den Meeresgrund umpflügen und alles unter sich zermalmen, zerstören Lebensräume, vor allem an Strukturen wie Seebergen, Bänken und Kaltwasserkorallenriffen. Sesshafte Organismen wie Korallen und Schwämme sowie Lebensgemeinschaften des Weichbodens werden dabei erheblich geschädigt. Aufgrund der niedrigen Temperaturen wachsen Tiefseekorallen nur sehr langsam, und es dauert Jahrzehnte, bis sich geschädigte Flächen erholt haben. Zudem werden verlorene Netze und Seile auch nachträglich noch zur Bedrohung für die Meeresumwelt, da sich Fische und andere Tiergruppen dort verfangen und



Abb. 6: Stachelkopf in seinem natürlichen Lebensraum vor der westafrikanischen Küste. Foto: Tomas Lundälv, Universität Göteborg.

zugrunde gehen können, während kleine Plastikstücke und -fasern (Mikroplastik), jedoch auch größere Stücke oft als Nahrung fehlinterpretiert und verschluckt werden, wo sie dann das Verdauungssystem verstopfen und zum Tode können. Es ist zu befürchten, dass so manche Art mit kleinem Verbreitungsgebiet bereits vollständig ausgerottet wurde.

UNTERSCHIEDLICHE ÜBERLEBENSSTRATEGIEN

Viele Bewohner der Tiefsee sind Kapazitäts- oder K-Strategen: Sie bleiben mit der Anzahl ihrer Individuen an ihrer Kapazitätsgrenze, d.h. sie haben eine geringere Zahl Nachkommen mit dafür hohen Überlebenschancen. Bei Wassertemperaturen von weniger als 4°C und einem sehr begrenzten Nahrungsangebot in der Tiefsee wachsen sie nur sehr langsam, überleben aber dadurch auch Zeiten, in denen Nahrungsmangel herrscht. Erst spät erreichen sie die Geschlechtsreife. Sie werden jedoch sehr alt. Die hohe Lebenserwartung gleicht die geringen Reproduktionsraten aus. Der Rundnasen-Grenadier etwa wird mehr als 50 Jahre alt und erst mit 10 Jahren ge-



Abb. 7: Frisch gefangene Großkopfschwänze auf dem Fischmarkt in Dschidda, Saudi Arabien. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.

schlechtsreif, der Neuseeländische Petersfisch bringt es gar auf 100 Jahre, wird aber erst mit 20–30 Jahren geschlechtsreif, während der Granatbarsch weit über 100 Jahre alt wird und die Geschlechtsreife mit 20–40 Jahren erreicht.

Werden Bestände dieser Arten befischt, brechen die Populationen schnell zusammen. Sie erholen sich nur sehr langsam oder aber gar nicht mehr, denn fängt man zu viele Alttiere weg, verbleiben zu wenige geschlechtsreife Individuen, um eine Fortpflanzung zu gewährleisten. Nachdem Bestände des Granatbarsches entdeckt worden waren, waren sie bereits nach 5–10 Jahren auf etwa 20 % reduziert und damit kommerziell ausgerottet. Für viele Zielarten der Tiefsee ist diese Entwicklung typisch. Mehrere der kommerziell genutzten Arten sind von der Ausrottung bedroht. Hierzu gehören der Rundnasen-Grenadier, der Raue Grenadier *Macrourus berglax* und der Grönlandrochen *Bathyrja spinicauda*. Ganz besonders gefährdet sind auch in der Tiefsee lebende Haie, die ebenfalls zu den K-Strategen zählen. Sie werden vor allem ihrer Flossen wegen gefangen, der Grundlage der Haifischflossensuppe. Sind Populationen erst einmal zusammengebrochen,

werden neue Fanggebiete erschlossen. Nur Meeresbereiche mit unebenem, felsigem Untergrund, wie etwa bei Grönland, bleiben von der Bodenschleppnetzfischerei verschont.

Ganz anders sieht die Situation der Tiefseefische des Freiwassers aus. Viele von ihnen sind sogenannte Reproduktions- oder r-Strategen, das heißt sie produzieren Nachkommen in großer Zahl und können damit durchaus eine Grundlage für eine verantwortungsvolle, nachhaltige Tiefseefischerei bilden.

PROBLEME UND LÖSUNGSMÖGLICHKEITEN

Das volle Ausmaß der durch die Tiefseefischerei entstandenen Schäden ist nicht bekannt, da Fangmengen nur teilweise der FAO gemeldet wurden. Neuere Untersuchungen der Universität Vancouver in Kanada zeigen, dass die Fangmengen der Tiefseeschleppnetze weit höher sind als in den offiziellen Statistiken angegeben. Während die FAO von 1950 bis 2015 Anlandungen von 14 Mio. t meldete, blieben schätzungsweise 25 Mio. t Fisch ungemeldet,



Abb. 8: Schule der Gallertnase in der Tiefsee vor der Küste Mauretaniens. Foto: Tomas Lundälv, Universität Göteborg.



Abb. 9: Kaisergranat gefangen auf einer Senckenberg-Forschungsreise in der Nordsee. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.

davon ist etwa die Hälfte ungenutzter Beifang. Tiefseearten, deren Bestände aufgrund ihrer K-Strategie vergleichsweise gering sind, können eine derart starke Befischung nicht kompensieren. Umweltorganisationen warnen seit langem, dass die Tiefseefischerei, wie sie seit nahezu 70 Jahren betrieben wird, weder ökologisch noch wirtschaftlich zu verantworten ist. Tiefseebodentrawls (Grundschleppnetze) steuern weniger als 1 % der weltweiten Fangmenge bei, und dieser Sektor lässt sich oft nur mit Subventionen aufrechterhalten. Somit ist der wirtschaftliche Nutzen gering, der ökologische Schaden jedoch immens.

Es stellt sich nun die Frage, ob es Möglichkeiten gibt, der schnell fortschreitenden Zerstörung einmaliger, oftmals noch unerforschter Lebensräume und der Gefährdung oder gar Ausrottung zahlreicher Arten Einhalt zu gebieten. Außerhalb der 200-Seemeilen-Zonen vor den Küsten wird die Fischerei von Regionalen Fischereimanagement-Organisationen (RFMOs) geregelt. Im Rahmen ihrer Fischereipolitik stellte die Europäische Union 2003 Regeln für europäische Trawler auf und legte Fangquoten fest. Die Generalversammlung der Vereinten Nationen appellierte 2004 an ihre Mitgliedsstaaten und die RFMOs,



Abb. 10: Kopf eines Kaisergranats in Seitenansicht. Foto: Sven Tränkner, Senckenberg.

Maßnahmen für das Verbot destruktiver Fischereipraktiken einzuleiten. Im Rahmen dieser Resolution verabschiedete die FAO 2008 Richtlinien für die Tiefseefischerei im Bereich der Hohen See, die jedoch rechtlich nicht bindend sind. Sie beziehen sich auf Fischereigerät mit Grundberührung. Auch wurden besonders empfindliche und schutzwürdige Meeresgebiete definiert, wozu neben Seebergen und Bänken, auch heiße und kalte unterseeische Quellen, Kaltwasserkorallen- und Schwammareale gehören.

Die Umsetzung der FAO-Richtlinien ist Aufgabe der RFMOs. Sie beinhaltet auch die Einrichtung mariner Naturschutzgebiete in der Tiefsee. Im Jahr 2016 erließ die EU eine Verordnung zur Tiefseefischerei, die unter anderem ein Verbot von Schleppnetzen in europäischen Gewässern und im zentralen Ostatlantik in Tiefen unterhalb 800 m beinhaltet. Der Erfolg all dieser Maßnahmen hängt schließlich davon ab, ob die Mitgliedsstaaten dieser Organisationen sowie die Betreiber der Fangschiffe bereit sind, ein verantwortungsvolles und nachhaltiges Management dieses Fischereisektors einzuleiten und ein Gleichgewicht zwischen dem Schutz einzigartiger Tiefseegebiete und der nachhaltigen Nutzung von Fischereiressourcen zu finden.

4.3 VOM TELEGRAPHENKABEL ZUM INTERNET-GLASFASERKABEL IN DER TIEFSEE

Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller

Bereits 1811 schickte Samuel Thomas von Sömmering elektrische Signale durch einen von Kautschuk isolierten Draht, welcher bei München durch die Isar verlegt wurde. Diese frühen Versuche scheiterten an der ungeeigneten Isolierung. Erst die Erfindung der Gutapercha-Pressen 1847 durch Werner von Siemens ermöglichte die Unterwasserverlegung gut isolierter Kabel.

Ab 1850 wurden zwischen Dover und Calais erste Seekabel verlegt, wenig später auch im Mittelmeer zwischen Algerien und Sardinien. Häufig scheiterte die Verlegung dort an der unzureichenden Ausrüstung an Bord der Kabelleger. Erst die Erfindung des Bremsdynamometers durch Werner von Siemens ermöglichte das langsame Abrollen des Kabels in große Wassertiefen.

Erstmals im August 1858 ermöglicht ein 4.500 km langes Seekabel in der Tiefsee den telegrafischen Kontakt zwischen Europa und Amerika. Initiator und Organisator des Unternehmens „Atlantic Telegraph Co.“ war der amerikanische Industrielle Cyrus W. Field, der über Aktienverkauf die nötigen Geldmittel beschaffte (Abb. 1).

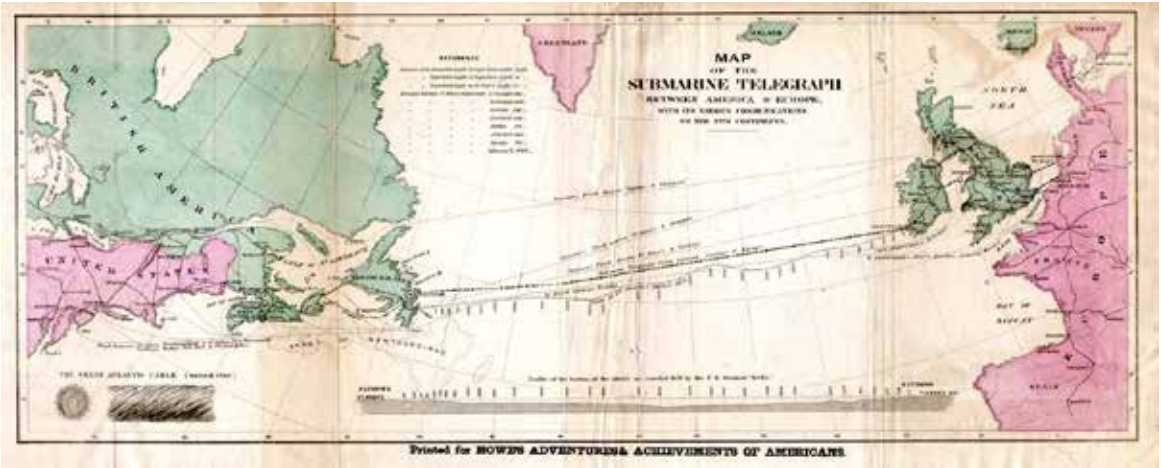


Abb. 1: Karte des ersten Transatlantikkabels von Neufundland nach Irland im Jahr 1858. Das Kabel wurde wenige Wochen nach der Verlegung durch zu hohe Betriebsspannungen im unbrauchbar.

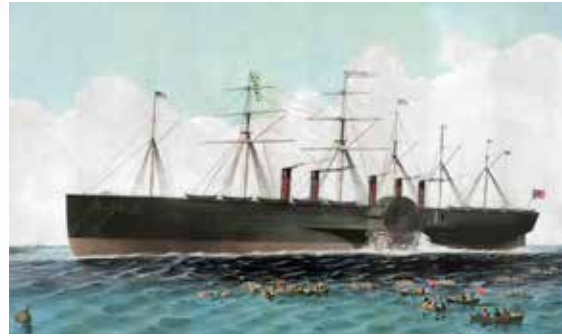


Abb. 2: Bis 1901 war die „Great Eastern“ das größte Schiff, das jemals gebaut wurde. Mit einem kombinierten Antrieb aus Segeln, Schaufelrädern und Schrauben erreichte es eine Geschwindigkeit von 23 km/h. Bekannt wurde es durch die Verlegung des ersten Transatlantikkabels.

Die Begeisterung endete bereits nach zwanzig Tagen und der Übermittlung von ca. 400 Telegrammen, u. a. der Grußbotschaft Queen Victorias an den amerikanischen Präsidenten Buchanan. Die Übertragung der Grußbotschaft dauerte 16 Stunden. Ursache für das Scheitern war die unzureichende Isolierung der Leitungsdrähte und die Terebo-Bohrmuschel, die das von Werner Siemens entwickelte Isolationsmaterial Gutapercha, ein dem Kautschuk vergleichbares Naturprodukt, als Nahrungsquelle schätzte.

Das Zusammenspiel von Seekabeln und Organismen beeinflusste auch auf andere Weise maßgeblich die biologische Tiefsee-Forschung. Üppig gewachsene Kalkgehäuse bzw. deren Überreste auf einem geborgenen Telegrafenkabel aus 1.800 m Tiefe bei Sardinien widerlegten 1860 eindrucksvoll und endgültig Edward Forbes' Abyssus-Theorie - auch bekannt als „Azoische Theorie“ von 1842. Der Brite hatte aufgrund von Beobachtungen im Mittelmeer postuliert, dass es unterhalb von etwa 500 m Tiefe kein Leben mehr gäbe. Allerdings ist das Mittelmeer durch die flache Meerenge von Gibraltar und eine durchschnittlich höhere Temperatur von etwa 13 °C gegenüber etwa 3 °C im Atlantik, ein Spezialfall der Tiefsee-Forschung. Einen positiven Effekt auf das Tiefsee-Leben haben Seekabel: Festsitzende Tiere sind auf Hartgrund angewiesen, den freiliegende Seekabel bieten. Es ist jedoch nicht bekannt,

ob die entstehenden elektromagnetischen Felder um die Kabel herum störend auf manche Organismen wirken.

1866 gelingt schließlich eine erste dauerhafte und seitdem ununterbrochene Transatlantikverbindung, die vom derzeit größten Liniendampfer der Welt, dem Kabelleger „Great Eastern“ (Abb. 2), verlegt wurde. Dieses Schiff konnte die 4.500 km Kabel in einer Ladung aufnehmen. Die Kabeltrasse verläuft am sogenannten „Telegraphenplateau“ zwischen Irland und Neufundland, das eine Maximaltiefe von 5.000 m aufweist. Ermittelt wurde die Trasse nach Abschluss der weltweit ersten systematischen Tiefsee-Vermessung eines Ozeanbereichs, initiiert von M. F. Maury, Leiter des Nautischen Observatoriums in Washington D. C. Diese weltweit erste Tiefenkarte eines großen Ozeanbereichs wurde 1854 nach umfangreichen Tiefenmessungen mit einer Lotmaschine publiziert. Das Telegraphenplateau wird auch heute bei der Verlegung von Glasfaserkabeln (Abb. 3), die seit 1987 die Kupferkabel ersetzt, genutzt. 1867 dauerte der Versand von zehn Worten etwa eine Minute, heute kann der gesamte Inhalt der Bibel im Bruchteil einer Sekunde um die Welt geschickt werden. Auch heute wird der Meeresboden der Seekabeltrassen vor der Verlegung intensiv untersucht. Die Kabel werden entsprechend den unterschiedlichen Meeresböden entsprechend konfektioniert. Bei felsigem Meeresboden wird das Seekabel für diesen Abschnitt mit

Abb 3 fehlt

Abb. 3: Die nahezu verlustlose Übertragung von großen Datenmengen erfolgt heutzutage zu 90 % über Glasfaserkabel.

zusätzlich schützenden Stahldrähten versehen. Zudem muss alle 400 Kilometer eines Glasfaserkabels ein Verstärker zwischengeschaltet werden, da das Lichtsignal keine längere Strecke überwinden kann. In von Grundfischerei betroffenen Gebieten muss das Kabel in den Meeresboden eingegraben oder eingespült werden.

Infolge des sich explosionsartig entwickelnden Internets und dem damit verbundenen globalen Transfer riesiger Datenmengen hat sich die Verlegung von Seekabeln heftig intensiviert. Zwischen 1995 und 2002 verdoppelte sich

das Seekabelnetz auf 632.000 km, das entspricht der zweifachen Entfernung zwischen Erde und Mond. Heute läuft 99 % des weltweiten Internetverkehrs durch das Netz der momentan ca. 420 Ozeankabel mit einer Gesamtlänge von über 1,1 Millionen Kilometern.

Noch immer besteht ein großes Ungleichgewicht bei der globalen Vernetzung. Während die Wirtschaftszentren Europa, Nordamerika und Asien durch zahlreiche Seekabel verbunden sind, existieren nur wenige Kabel nach Afrika und Südamerika (Abb. 4).

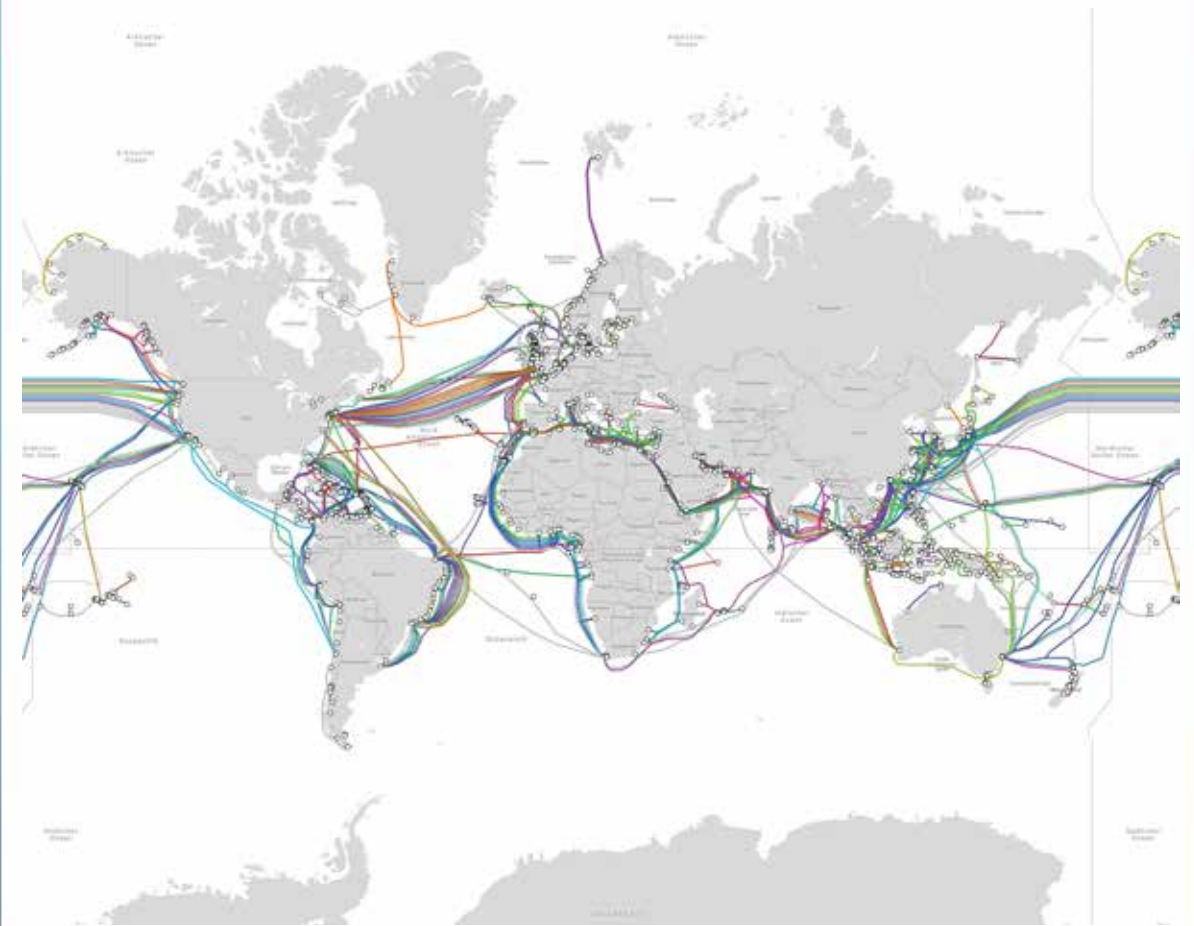


Abb. 4: Weltkarte mit den aktuell verlegten Seekabeln, Stand November 2019. Bildmontage aus interaktiver Karte, Quelle: seacablemap.org

4.4 PLASTIKABFÄLLE IN DER TIEFSEE

Mark Lenz

Die Reise des Mülls beginnt möglicherweise in der Hand eines Kindes auf Java, auf dem Tisch eines Straßenhändlers in Nigeria, bei einem Strandausflug an den Küsten Europas oder auf einem Fischerboot vor der Küste Chiles (Abb. 1). Sie kann eine Getränkeflasche, eine Einkaufstüte oder eine Fischkiste über Tausende von Kilometern in die entlegensten Ökosysteme der Erde führen – in die Ebenen und Gräben der Tiefsee.



Abb. 1: Der größte Teil des Plastikmülls im Meer stammt von Land. Hier sammelt ein Meeresbiologe leere Plastikflaschen an einem Strand der Kapverden-Insel São Vicente. Sie stammen aus einer nahen Siedlung oder wurden bei einem Strandausflug liegen gelassen. Foto: Leo Gottschalck.



Abb. 2: Ein weiterer Teil des Mülls wird von Flüssen aus dem Hinterland an die Küsten getragen. Dieser Fluss auf der indonesischen Insel Java fließt von der 60 km landeinwärts gelegenen Stadt Bogor in Richtung der Bucht von Jakarta. Foto: Mark Lenz.

Denn all diese Gegenstände sind aus Kunststoff und daher leicht und langlebig. Sie können, bewegt von Wind und Wasser oder eingeschlossen in Eis, riesige Distanzen überwinden und Orte erreichen, die weit von jeder menschlichen Siedlung entfernt sind. Ein substanzieller Teil des weltweit anfallenden Abfalls besteht mittlerweile aus Kunststoffen, im folgenden Text kurz Plastik genannt, und dieses Material hat erst unser Leben verändert und nun verändert es auch unseren Planeten.

DER WEG DES MÜLLS: WO KOMMT ER HER?

Der größte Teil des Meeresmülls stammt von den Kontinenten und reist mit dem Wasser von Flüssen oft von weit aus dem Hinterland an die Küsten (Abb. 2). Man schätzt dass im Jahr 2010 zwischen 5 und 13 Mio. t Plastikmüll in die Weltmeere gelangt sind und dass ca. 20 % dieser Menge von nur zehn großen Flüssen in Afrika und Asien in die Ozeane gespült wurden. An der Küste angekommen erfolgt die Auftrennung des Mülls in zwei Fraktionen. Die schweren Bestandteile werden zusammen mit den von den Flüssen mitgeführten Sedimenten in die Tiefe getragen, wo sie sich entweder küstennah ablageren oder weiter über den Schelf

hinaus zu den Kontinentallhängen getragen werden. Dort gelangen sie dann möglicherweise in einen submarinen Canyon. Ein solcher Canyon fungiert nicht nur als Eintrittstor für Müll in die Tiefsee, sondern ist gleichzeitig einer der Orte im Meer, an denen sich Plastikmüll sammelt.

Der auf dem Grund des Schelfmeeres abgelagerte Müll verbleibt möglicherweise nur eine Zeit lang vor der Küste und kann beim nächsten Anschwellen des Flussablaufs wieder mobilisiert und weiter in Richtung Tiefsee gewaschen werden. Entscheidend ist dabei die Breite des Schelfs und damit die Distanz zwischen einer Flussmündung und dem Beginn des Kontinentallhangs. Je breiter der Schelf, desto länger fungiert er als Zwischenlager für absinkenden Plastikmüll.

Müll, der leichter ist als Seewasser, wird küstenparallel weitertransportiert oder von Wind und Strömungen von den Kontinenten weg in die offenen Ozeane verfrachtet. Dort sind die großen ozeanischen Strudel seine vorläufige Endstation. Im Zentrum dieser Strudel, von denen sich weltweit fünf große und einige weitere kleine in den Ozeanen drehen, sinkt Wasser ab, und alles treibende Material bleibt – wie die Gummiente über dem Abfluss in der Badewanne – über dem absinkenden Wasser zurück. Auf diese Weise entstehen die sogenannten Müllstrudel,



Abb. 3: Unter dem Einfluss von Licht, Wärme und Wellenbewegungen entsteht im Meer aus dem großen Plastikmüll Mikroplastik. Man findet dieses feine Plastikmaterial mittlerweile an vielen Küsten, aber auch auf dem Meeresboden und in der Wassersäule. Foto: Valeria Hidalgo-Ruz.

bei denen es sich aber nicht, wie oft angenommen wird, um riesige treibende Müllteppiche handelt, sondern vielmehr um gigantische Plastiksuppen. In ihnen schwimmen vor allem viele sehr kleine Teile, deren durchschnittliche Größe nur 2 mm beträgt.

Die Häufigkeit der kleinen Partikel geht darauf zurück, dass sich treibender Müll auf seiner langen Reise durch die Meere unter dem Einfluss von UV-Licht, Wärme und Wellenbewegungen verändert und immer weiter zerfällt (fragmentiert). Dabei entsteht sogenanntes Mikroplastik, zu dem alle Teile und Partikel gezählt werden, die kleiner sind als 5 mm (Abb. 3). Was während der Reise allerdings nicht stattfindet – und das ist das große Problem mit dem Plastik in der Umwelt –, ist ein Abbau des Materials. Kunststoffpolymere, wie beispielsweise Polyethylen oder Polypropylen, aus denen viele der Verpackungen bestehen, die Menschen auf der ganzen Welt täglich benutzen, können aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften von keinem Organismus effizient abgebaut werden. Zumindest ist bislang noch kein Bakterium, Pilz oder Tier gefunden worden, das zu einem nennenswerten Abbau in der Lage wäre. Anders also als organischer Müll, der von Organismen in seine Ausgangsbestandteile zurückgeführt wird, verrottet Plastik nicht und reichert sich so in der Umwelt an.

WO GEHT ER HIN?

Seit der Markteinführung vor 65 Jahren sind ca. 8,3 Mrd. t Kunststoffe hergestellt worden, von denen 6,3 Mrd. t in der Zwischenzeit zu Abfall wurden. Davon wurde aber nur ein kleiner Teil verbrannt (12 %) oder recycelt (9 %), und der gesamte Rest befindet sich entweder auf Deponien oder in der terrestrischen oder aquatischen Umwelt (Abb. 4). Der geringe Anteil an adäquat entsorgtem Müll erklärt sich dadurch, dass in vielen Ländern der Erde die Müllmanagementsysteme unzureichend sind oder gänzlich fehlen. Dadurch kann der dort anfallende Müll oft nicht ausreichend kontrolliert werden und gelangt in die Umwelt.

Da dieser unkontrollierte Eintrag nicht nur andauert, sondern auch noch stetig zunimmt, müssten die Müllstru-



Abb. 4: Die Art des Müllmanagements hängt stark von den technischen Möglichkeiten in den jeweiligen Ländern ab. In Deutschland wird der größte Teil des anfallenden Mülls verbrannt. In vielen Ländern Asiens, Afrikas und Südamerikas ist Deponieren bislang die einzige mögliche Form der Müllentsorgung. Foto: Mark Lenz.

del in den Ozeanen kontinuierlich und schnell wachsen. Mit Hilfe von Müllzählungen, die in der Hauptsache von Schiffen aus gemacht wurden, wurde aber überraschenderweise festgestellt, dass die Menge Plastikmüll, die auf der Meeresoberfläche treibt, in den letzten 15 Jahren nur wenig zugenommen hat. Tatsächlich liegt die Menge an treibendem Plastikmüll zwei Zehnerdimensionen unter dem eigentlich zu erwartenden Wert. Dafür gibt es nur zwei Erklärungen: Ein Teil des Mülls zerfällt durch die oben bereits genannten Einflüsse in immer kleinere Partikel und kann daher bei vielen Zählungen nicht mehr erfasst werden. Zum anderen sinkt Müll ab und erreicht auf diese Weise den Boden der Tiefsee. Dieser stellt nicht nur das größte Ökosystem der Erde dar, sondern ist möglicherweise mittlerweile auch die größte Müllhalde des Planeten. Man vermutet, dass sich 70 % des Plastikabfalls, der in den vergangenen 65 Jahren ins Meer gelangt ist, auf dem Meeresboden befinden. Das betrifft den Grund der flachen Schelfmeere, die Kontinentalhänge, aber vor allem auch die Tiefsee-Ebenen und -Gräben. Es ist nicht bekannt, wie viel Plastik bereits in den Meeren ist, aber es dürften mehr als 100 Mio. t sein.

Warum aber sinkt treibender Plastikmüll überhaupt in die Tiefe? Viele Plastikteile verbleiben zunächst an der

Meeresoberfläche, weil die Polymere, aus denen sie bestehen, eine geringere Dichte haben als Seewasser. Dies gilt für ungefähr die Hälfte aller Polymertypen, die im Gebrauch sind. Damit sie absinken können, müssen sich ihre Dichte und damit ihr Gewicht pro Volumen ändern. Dies geschieht vor allem dadurch, dass sich Lebensformen auf ihnen ansiedeln. Alle festen Oberflächen im Meer werden von Bakterien, Pilzen, Algen und Tieren besiedelt, denn diese Organismen benötigen stabile Substrate, um ihren Lebenszyklus zu durchlaufen. Wie schnell die Besiedlung vonstattengeht, hängt von der Temperatur, von der Produktivität eines Seegebiets und vom Vorkommen von Sporen und Larven ab. In vielen Meeresgebieten der Welt dauert es aber nur einige Tage bis einige Wochen, bis sich Bewuchs einstellt. Dieser besteht zunächst aus Bakterien und einzelligen Algen, während später Tiere, wie Seepocken oder Muscheln, und Großalgen dazukommen



Abb. 5: Alle festen Oberflächen im Meer werden besiedelt, wie zum Beispiel diese Boje aus Kunststoff, die von Seepocken bewachsen wurde. Foto: Mark Lenz.

(Abb. 5). Das sorgt dafür, dass das Gewicht der Müllteile zunimmt und sie in die Tiefe sinken.

Kleinere Plastikpartikel können zudem auch vertikal transportiert werden, wenn sie von Tieren aufgenommen und wieder ausgeschieden werden: Mit den absinkenden Fäzes gelangen sie dann in tiefere Wasserschichten und schließlich bis zum Meeresboden. Zudem werden kleinere Plastikpartikel in Aggregate eingeschlossen, die sich in der Wassersäule aus treibendem organischem Material bilden. Dieser sogenannte Meeresschnee sinkt ebenfalls in die Tiefsee ab.

WAS GESCHIEHT MIT IHM IN DER TIEFE?

Wie viel Plastikabfall dort unten schon angekommen ist, wie genau er verteilt ist und was mit ihm geschieht, ist noch weitestgehend unklar. Es gibt, wie dies für viele Aspekte



Abb. 6: Von vielen Tieren aus flachen Meeresgebieten, wie beispielsweise diesen Muscheln, wissen wir, dass sie Mikroplastik aufnehmen. Zunehmend finden sich Belege, dass auch Tiefseeorganismen dies tun. Foto: Mark Lenz.

der Tiefseeforschung gilt, bislang nur punktuelle Beobachtungen von Plastikmüll in größeren Meerestiefen und keine genauen Erkenntnisse über sein weiteres Schicksal. Möglicherweise wird ein Teil nach Erreichen des Meeresbodens von bodennahen Strömungen über weite Strecken lateral (seitwärts) weitertransportiert. Mikroplastik, das im Kurilen-Kamtschatka-Graben gefunden wurde, befand sich so weit von jeder möglichen Quelle entfernt, dass ein lateraler Transport von Japan und Russland mit nordwärts fließenden Strömungen die wahrscheinlichste Erklärung für sein Vorkommen darstellt. Sind die bodennahen Strömungen schwach, kann sich der Müll jedoch auf den Sedimenten ablagern und wird dann möglicherweise nach und nach von herabsinkenden Partikeln überschichtet, bis er ganz eingebettet ist. Dieser Prozess dürfte sich in der Tiefsee allerdings über lange Zeiträume erstrecken. Man muss zudem annehmen, dass die Organismen der Tiefsee mit dem Müll interagieren. Eventuell wird er von grabenden Tieren, die bis 8 m tief in das Sediment eindringen können, ver- und auch wieder ausgegraben.

Nicht zuletzt nehmen auch Tiefseebewohner Müll auf, weil sie ihn mit Nahrung verwechseln. Dies kann zu direkten negativen Folgen für die betroffenen Tiere haben, und zum anderen kann das Plastik auf diese Weise in die Nahrungsketten der Tiefsee gelangen. Aus flacheren Gewässern weiß man von Hunderten mariner Arten, wie

Würmern, Muscheln und Seegurken, dass sie Plastikteile in ihren Magen-Darm-Trakt aufnehmen (Abb. 6), und auch aus der Tiefsee gibt es bereits einige Belege dafür, dass Organismen Plastik aufnehmen. Da Plastikpartikel chemische Additive (Zusatzstoffe wie z.B. Weichmacher) enthalten und organische Schadstoffe auf ihren Oberflächen akkumulieren, dienen sie zudem als Vektor für Umweltgifte, die mit ihnen in die Tiefe gelangen.

WAS TUN GEGEN DIE VERMÜLLUNG DER MEERE?

Während die Meeresforschung weiter daran arbeiten muss, unser Wissen über den Transport, die räumliche Verteilung und die biologischen Auswirkungen von Plastikmüll in der Tiefsee zu erweitern, müssen gleichzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um den weiteren Eintrag von Plastik in die (marine) Umwelt zu stoppen. Hier sind alle – Verbraucherinnen und Verbraucher, Politik und Wirtschaft, Wissenschaft und Umweltverbände – weltweit gleichermaßen gefordert, an Lösungen zu arbeiten. Letztendlich muss es uns gelingen, die anfallenden Müllmengen zu reduzieren und gleichzeitig den verbleibenden Müll so zu managen, dass er nicht in die Umwelt gelangen kann. Hierfür muss in vielen Ländern der Erde aber erst einmal die nötige Infrastruktur geschaffen werden. Auch sollte Müll, der in den Industrieländern anfällt, nicht mehr in Schwellenländer exportiert werden, denn dort kann er zur Verschärfung des Problems beitragen. All dies muss schnell geschehen, denn das Problem wächst mit großer Geschwindigkeit. Die oben erwähnte Studie, die für das Jahr 2010 einen Plastikeintrag in die Meere von 5–13 Mio. t errechnete, prognostizierte gleichzeitig, dass sich die Eintragsmenge bis zum Jahr 2025 verzehnfachen wird. Nur ein schnelles Handeln kann die Meere und damit auch die Tiefsee vor einer weiteren massiven Verschmutzung mit Plastik bewahren (Abb. 7).

Abb. 7: Die Verschmutzung der Meere mit Plastikmüll ist ein rasant wachsendes Umweltproblem. Seine Lösung erfordert schnelles Handeln, damit nicht mehr und mehr Küsten, Schelfe und Tiefseeböden zu gigantischen Müllhalden werden. Foto: Sarah Piehl.



4.5 DAS RINGEN UM DEN SCHUTZ DER MEERE UND DER TIEFSEE

Bettina Wurche

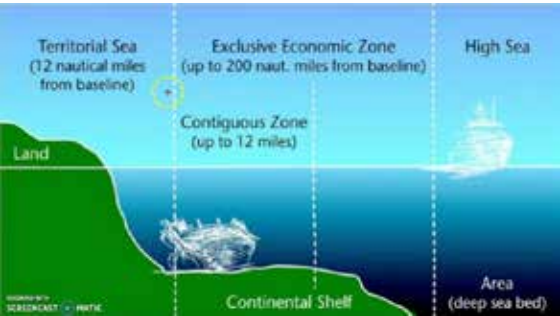
Die Hochsee gehört niemandem – dadurch gehört sie letztendlich allen. Noch vor 100 Jahren galten die Ozeane und ihre Ressourcen als nahezu unendlich, heute wissen wir, dass sie endlich sind. Und dass sie für unser Überleben elementare Bedeutung besitzen: Ihre einzigartige Artenvielfalt ist nicht nur die größte Nahrungsressource der Welt, sie stellen auch immer noch wichtige Verkehrswege dar und spielen eine zentrale Rolle in der Klimaregulierung – schließlich speichern sie einen erheblichen Teil des menschengemachten Kohlendioxids und fast die gesamte zusätzliche Wärme.

Das Miteinander der Staatengemeinschaft auf dem Meer wird durch das Seevölkerrecht geregelt. Das wichtigste internationale Abkommen ist das Seerechtsübereinkommen (SRÜ), eine Art Verfassung der Meere. Flankiert wird das Seerechtsübereinkommen von drei wichtigen Institutionen: dem Internationalen Seegerichtshof, der Internationalen Meeresbodenbehörde und der Kommission zur Begrenzung des Festlandsockels (vgl. Kap. 4.6). Jede an

ein Meer grenzende Nation darf ihr Küstenmeer, die sogenannte 12-Meilen-Zone, und ihre Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ), die 200-Meilen-Zone, für sich beanspruchen und nutzen; dahinter liegt die Hochsee.

Das Seerechtsübereinkommen ist auch die Basis für den Meeresschutz. Weitere wichtige Rechtsgrundlagen sind die Biodiversitätskonvention, die Klimakonvention und das Kyoto-Protokoll, das Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (London-Übereinkommen) und das Protokoll zu dem Übereinkommen (London-Protokoll) sowie das Internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (MARPOL). Dazu kommt eine Fülle weiterer internationaler und nationaler Gesetze.

Meeresschutzgebiete sind wichtige Instrumente zur Erhaltung maritimer Ökosysteme sowie zur Verbesserung von deren Widerstandskraft und Anpassungsfähigkeit im Hinblick auf Übernutzung und Klimawandel. Solche Schutzmaßnahmen sind regional unterschiedlich, sie



Ist dies das richtige Bild? Falls ja, könnt ihr es bitte kaufen und downloaden?



Bildvorschlag ok?
Bildunterschrift?

reichen von der Erlaubnis von Fischerei, Bodenschatzabbau und Tourismus bis zu einem vollständigen Verbot jeglicher menschlichen Aktivität. Meeresschutzgebiete gibt es heute vor allem in den Küstengewässern von Staaten oder Staatenbünden. In den deutschen Meereschutzgebieten in Nord- und Ostsee ist es – nach Meinung von Experten – um den Schutz der Ökosysteme allerdings nicht gut bestellt. Ein Grund sind zu viele Ausnahmen für wirtschaftliche Nutzung, ein anderer die Zersplitterung der Zuständigkeiten für Schifffahrt, Fischerei, Rohstoffabbau und Tourismus.

DIE HOCHSEE: SCHÜTZENSWERTES GEMEINSAMES ERBE DER MENSCHHEIT

Die Hochsee unterliegt keiner Souveränität, sondern ist mit ihren lebenden und nichtlebenden Ressourcen ein „gemeinsames Erbe der Menschheit“ – so die Präambel der „Meeresverfassung“. Die Hochsee umfasst 60 % der Ozeane. Weniger als 1 % davon steht heute unter Schutz. Bis 2020 sollen es 10 % sein – so die Nachhaltigkeitsagenda 2030 der Vereinten Nationen. Die anthropogen verursachte Klimakrise mit ihren vielfältigen Begleit-

erscheinungen, die industrielle Überfischung, der Rohstoffabbau, die chemische, die akustische und die Müllverschmutzung sind schwere Belastungen für die Ozeane, die in Ökosystemen und ihren Bewohnern – vom Bakterium bis zum Blauwal – tiefgreifende Veränderungen verursachen.

Dieser riesige Wasserkörper ist ein Puffer für Wärme und Kohlendioxid, allerdings ist auch seine Kapazität nicht unendlich (vgl. Kap. 3). Gewaltige Meeresströmungen (thermohaline Zirkulation) verbinden die Ozeane mit den stark genutzten Küstenmeeren, sie sind Korridore für Meerestierschwärme und Müll gleichermaßen (vgl. Kap. 4.4).

Durch Erwärmung und Überdüngung sinkt der Sauerstoffgehalt der Meere, dies bedroht selbst hoch produktive Fischgewässer wie die vor Peru und Westafrika, die Millionen Menschen ernähren. Bis jetzt gibt es kaum internationale Mechanismen, die die Schaffung und Verwaltung von Hochsee-Meeresschutzgebieten ermöglichen. Ebenso fehlen rechtliche Verpflichtungen für



Bildvorschlag ok?
Bildunterschrift?

Umweltverträglichkeitsprüfungen oder Regeln für den Zugang zu genetischen und anderen Rohstoffquellen und deren Nutzung. Beim Hochseeschutz gibt es also noch dringenden Handlungsbedarf!

DIE TIEFSEE: NOCH KAUM ERSCHLOSSEN, ABER BEREITS IN GEFAHR

Der Tiefseeboden außerhalb des Festlandssockels ist den Souveränitätsansprüchen einzelner Küstenstaaten entzogen, verwaltet wird er von der Internationalen Meeresboden-Behörde (ISA). 4.000 m sind unsere Ozeane im Durchschnitt tief, ab 1.000 m beginnt die lichtlose Zone. Oasen fremdartigen Lebens, wie riesige Kaltwasserkorallenriffe, schwefelspuckende Hydrothermalquellen oder dicht besiedelte Seeberge, beherbergen eine Biodiversität, die uns weitgehend fremd ist. Die Tiefe und ihre Bewohner stehen in einem stetigen Kreislauf und Austausch mit den oberen Meeresschichten. Bei nur 2 °C und sporadischem Nährstoffeintrag wachsen und vermehren sich die Tiefseewesen nur langsam. Dafür werden sie oft recht alt – ein Granatbarsch erreicht immerhin bis zu 150 Jahre. Solche Bestände sind schnell überfischt, da die Fische häufig bereits vor dem Erreichen der Geschlechtsreife gefangen werden (vgl. Kap. 4.2). Die dabei meist eingesetzten schweren Grundschleppnetze verwüsten den Meeresboden und zerstören Jahrzehnte alte sesshafte Tiere wie Korallen und Schwämme. Deshalb fordern Meeresbiologen und Umweltschutzverbände ein vollständiges Verbot dieser Fischerei zwischen 400 und 2.000 m Tiefe.

Für die Suche nach neuen Ressourcen für die Produktion diverser Wirtschaftsgüter wird der Tiefseebergbau dank neuer Technologien immer lohnender. Die begehrten Tiefsee-Manganknollen enthalten neben Mangan auch Eisen, Kupfer, Kobalt oder Nickel, wichtige Rohstoffe etwa für die Elektroindustrie. Gerade in und auf Manganknollen ist die Biodiversität jedoch besonders hoch (vgl. Kap. 2.6). Wissenschaftler warnen, dass durch den Manganknollenabbau die Lebensgemeinschaften des Bodens auf lange

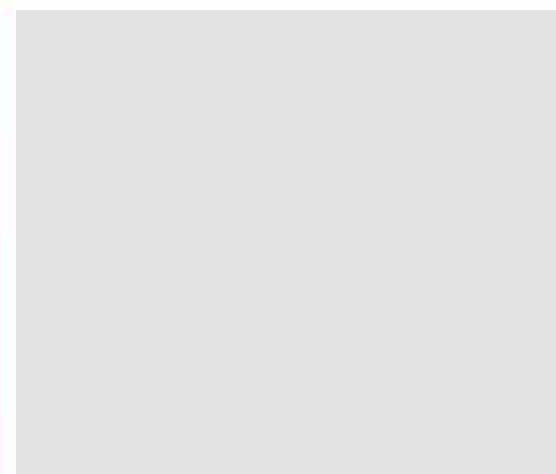
Sicht zerstört werden können. Im submarinen Bergbau wird rohstoffhaltiger Meeresboden über Saugvorrichtungen auf Schiffe emporgepumpt, was die zufällig darin enthaltenen Lebewesen in der Regel nicht überleben. Das aufgewirbelte Sediment sinkt wieder zu Boden und nimmt den dort vorhandenen Tieren Restlicht, Sauerstoff oder es verschüttet sie.

Die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) westlich von Mexiko im Pazifik ist ein für den Tiefseebergbau äußerst interessantes Areal (vgl. Kap. 4.1.1). Dort haben internationale Teams von Meeresforschern die Ökosysteme, ihre Biodiversität und die Auswirkungen des Manganknollenabbaus auf diese Oasen über Jahre hinweg untersucht; auch Senckenberg- und GEOMAR-Wissenschaftler sind daran beteiligt (vgl. Kap. 2.6). Ihre Forschungsergebnisse dienen als wichtige Grundlagen für politische Entscheidungen, beispielsweise sollen auf Basis der dort gewonnenen Erkenntnisse nun Schutzzonen eingerichtet werden. Außerdem sollen die Ergebnisse in die Mining-Code-Richtlinien einfließen, die gerade erarbeitet werden. Dieser Code soll künftig ein transparentes Umweltmanagement für den Tiefseebergbau gewährleisten.

DIE ARKTIS – GEFÄHRDET DURCH DIE NÄHE ZU DEN GROSSEN INDUSTRIENATIONEN

Die polaren Ozeanökosysteme sind besonders empfindlich: Die meisten Bewohner wachsen sehr langsam, werden sehr alt und pflanzen sich erst spät fort. Bis jetzt waren sie durch den Eispanzer geschützt. Im Zuge der globalen Erwärmung taut das Meereis immer weiter ab, dadurch rückt die Ausbeutung der dort entdeckten und vermuteten Rohstoffvorkommen wie Erdöl und Gas in greifbare Nähe.

Das Nordpolarmeer ist ein 3.500 m tiefes, von Meereis bedecktes Becken am Nordpol; das Südpolarmeer um das antarktische Festland herum ist sogar bis zu 5.800 m tief und ebenfalls von Eis bedeckt. Unter dem Meereis wachsen Myriaden von Eisalgen, sie sind die Basis der arktischen und antarktischen Nahrungsketten bis hin zu den Walen, Pinguinen und Eisbären.



4 Abbildungsvorschlag:
Meereis mit Eisalgen und Krill
hierzu konnte ich nichts passendes finden.

Die Erforschung und Ausbeutung von Bodenschätzen bis zum Rand des Festlandssockels ist das souveräne Recht von Küsten- oder Anrainerstaaten. Um sich Rechte und Claims zu sichern, versuchen einige der Arktisanrainer – Alaska (USA), Kanada, Grönland (Dänemark), Island, Norwegen sowie Russland – jetzt, wo das Meereis zurückweicht, ihre Festlandssockel neu zu definieren. So möchte Russland eine Verbindung des nordsibirischen Festlandssockels mit dem Lomonossow-Rücken nachweisen, einem submarinen Gebirgszug quer durch das Polarmeerbecken. Der Streit um den Lomonossow-Rücken und somit die Förderrechte im Arktischen Ozean ist exemplarisch für das nationalstaatsorientierte Denken bei der Meeresnutzung.

Die Erwärmung der Arktis ermöglicht auch neue Schiffsrouten als Abkürzung über den Nordpol. Neben den Arktisanrainern melden auch die EU und China Ansprüche auf die freie Nutzung der Nordwestpassage durch Transportschiffe an. Deren Schiffsdieselmotoren verbrennen Schweröl und geben besonders viele Schwefeloxide und große Mengen Kohlendioxid ab. Außerdem färben massenhaft ausgestoßenen Rußpartikel die Oberfläche des Eises schwarz und vermindern seine Rückstrahlfähigkeit (Albedo), wodurch es noch schneller abschmilzt.

Kommerzielle Fischerei wäre im eisfreien Polarmeer möglich, soll aber vorerst nicht stattfinden: Die EU hatte sich 2018 gemeinsam mit neun weiteren bedeutenden Fischereinationen (Kanada, China, Dänemark, Island, Japan, Südkorea, Norwegen, Russland und den USA) auf ein Fischereiverbot in der Arktis geeinigt. Dieses Fischerei-Moratorium ist eine Vorsorgemaßnahme und ein Meilenstein auf dem Weg zu einem zeitgemäßen Meeresschutz.

DIE ANTARKTIS – (NOCH) DURCH DIE ENTFERNUNG GESCHÜTZT

Die Antarktis liegt am anderen Ende der Welt, weit entfernt von den Industriestaaten – diese Entfernung könnte die Latte für die Einrichtung internationaler Schutzgebiete etwas niedriger legen.

Der Antarktisvertrag regelt ihre friedliche Nutzung, darauf basieren weitere Abkommen, etwa über die Erhaltung der lebenden Meeresschätze der Antarktis (Convention on the Conservation of the Antarctic Marine Living Resources). Die Ausbeutung der antarktischen Bodenschätze ist laut Umweltschutzprotokoll des Antarktisvertrags von 1991 verboten. Mit der voranschreitenden Eisschmelze und der besseren Erreichbarkeit von Öl-, Gas- und Kohlelagerstätten könnte sich die Einstellung einiger Staaten allerdings ändern.

Wegen der „Unschiffbarkeit“ ist das Südpolarmeer lange Zeit nicht kommerziell befischt worden, darum vergleichen Meeresbiologen die Artenvielfalt, vor allem im Weddellmeer, mit der tropischen Riffe. Mittlerweile nimmt der Fischereidruck auf Arten wie den Antarktischen Seehecht, den Dorsch oder auch Krill zu. Wegen der langsamen Regeneration der südpolaren Gewässer erholen sich die Bestände nur langsam, warnen Experten (vgl. Kap. 4.2). Zumindest das Ross-Meer ist seit 2017 für die nächsten 35 Jahre ein Meeresschutzgebiet. Die Einrichtung eines weiteren Schutzgebiets im Weddellmeer war 2018 am Veto Chinas und Russlands gescheitert, das ambitionierte Vorhaben wird aber weiterverfolgt.



Warum Meeres- und Artenschutz auch Klimaschutz ist, wird am Beispiel der antarktischen Walbestände besonders deutlich: Wale düngen mit ihren Fäkalien das Meer. Im Südpolarmeer ist Eisen der begrenzende Faktor, der das Algenwachstum, die Basis des Nahrungsnetzes, limitiert. Und Walkot enthält Eisen. Algen wiederum verwenden CO₂, um Pflanzenmasse zu produzieren, und setzen dabei Sauerstoff frei. Walschutz ist also auch Klimaschutz.

Seit 1994 sind die Gewässer rund um die Antarktis zum Schutzgebiet für Wale erklärt worden: Im Southern Ocean Whale Sanctuary ist kommerzieller Walfang untersagt. Die Einrichtung eines noch größeren Walschutzgebietes im Südatlantik wird immer wieder gefordert, scheiterte bis jetzt aber am Widerstand der Walfang-Befürworter. Der Walschutz war in den 1970er Jahren von der erstarkenden Umweltbewegung lautstark eingefordert worden. Der Walfang in internationalen Gewässern wird heute von der Internationalen Walfangkommission IWC restriktiv überwacht, seit dem Walfang-Moratorium haben sich die Bestände der meisten Großwalarten erholt.

UNO AGENDA 2030: NACHHALTIGKEIT UND KOOPERATION BEIM MEERESSCHUTZ

Im Übereinkommen über die Biologische Vielfalt (Biodiversitätskonvention) von 2011 haben die Vertragsstaaten beschlossen, bis zum Jahr 2020 10 % der globalen Meeresfläche unter Schutz zu stellen. Mit der Verabschiedung der Nachhaltigkeitsagenda der Vereinten Nationen im Jahr 2015 und durch die Aufnahme des nachhaltigen Entwicklungsziels 14 „Life below Water“ (SDG14) wurde das internationale Bekenntnis zum Schutz der Meere nochmals bekräftigt. Die nachhaltige Entwicklung soll wirtschaftlichen Fortschritt mit sozialer Gerechtigkeit und ökologischer Nachhaltigkeit in Einklang bringen.

Das größte Hindernis für einen effektiven Meereschutz sind heute die fragmentierten Zuständigkeiten in Schifffahrt, Fischerei und Tiefseebergbau. Darum fordern viele Experten – Politiker, Meeresforscher und Umweltschützer – die Schaffung einer UN-Meeresschutzbehörde.

Nur eine übergeordnete Institution könnte die Präambel des internationalen Seerechtsübereinkommens umsetzen, „dass die Probleme des Meeresraums eng miteinander verbunden sind und als Ganzes betrachtet werden müssen“. Am 13. Februar 2019 hatten Sachverständige, Wissenschaftler, Nichtregierungsorganisationen (NGOs) und Politiker im Rahmen eines Fachgespräches zum Thema „Ocean Governance – Schutz der Weltmeere“ über den komplexen Abstimmungsprozess, die Forderungen und die Bedeutung des UN-Abkommens diskutiert. Der Weg zu einem neuen Abkommen wird schwierig: Konkurrierende Staatengruppen, UN-Organisationen und Nutzergruppen müssen sich über Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten einigen. Am Ende könnte eine neue UN-Organisation stehen, die den Schutz der Weltmeere aktiv vorantreibt. Oder auch nur ein schwacher Rahmenvertrag, der den Staaten die Verantwortung zur Einrichtung von Meeresschutzgebieten weiterhin selbst überlässt.

Das Ergebnis dieser Verhandlungen wird entscheidend für die Zukunft unserer Ozeane sein. Der Schutz unserer Ozeane muss global und grundlegend neu gedacht werden! Es braucht einen Perspektivenwechsel von der Nutzung und Ausbeutung durch Staaten hin zu multilateralen Abkommen und einem Gleichgewicht zwischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten. Außerdem sollten Umweltrechtsprinzipien wie Vorsorge und Ökosystemsenschutz im Seerecht verankert werden. Nur so ließen sich die gegenwärtigen gigantischen Probleme lösen – bis hin zum Klimawandel. Es ist zu hoffen, dass die Staatengemeinschaft diese historische Chance klug nutzt.

Gerne ein ganzseitiges Bild einsetzen.
auswahl links ok?
oder vorherige Bilder größer?
evtl. Bild nach links

4.6 DAS INTERNATIONALE SEERECHT

Nele Matz-Lück

Wer darf die unter dem Meeresboden befindlichen Öl- und Gasvorkommen ausbeuten?
Wie lässt sich die Überfischung der Meere verhindern? Welche internationalen Standards gelten für den Schutz der Meere und Küsten vor Verschmutzung?

Diese Fragen sind hochaktuell und haben eines gemeinsam: Die juristischen Antworten darauf sind einem Rechtsgebiet zuzuordnen, das als internationales Seerecht oder Seevölkerrecht zusammenfassend diejenigen zwischenstaatlichen Regelungen bezeichnet, die sich mit den vielfältigen Nutzungen, den staatlichen Nutzungsrechten und dem Schutz der Meere befassen.

GEGENSTÄNDE DES INTERNATIONALEN SEERECHTS

Für Staaten ist die Festlegung, über welche Teile der Meere sie Hoheitsansprüche erheben dürfen, d. h. welche Bereiche ihnen „gehören“, von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus regelt das Seerecht auch, welche Bestimmungen für den Ozean jenseits staatlicher Hoheitsgewalt gelten, d. h. für die Hohe See und den Tiefseeboden.

Zur Nutzung der Meere gehören so unterschiedliche Aktivitäten wie die Schifffahrt, die Fischerei, die Ausbeutung von Öl- und Gasvorkommen sowie von mineralischen Ressourcen des Tiefseebodens, die wissenschaftliche Meeresforschung, das Verlegen von Kabeln und Rohrleitungen, der Bau künstlicher Inseln und anderer Bauwerke im Meer, die Gewinnung erneuerbarer Energien und die militärische Nutzung, z. B. für Manöver und das Testen von Waffen. Betrachtet man das internationale Seerecht funktionell, fällt die immense Erweiterung der Regelungsgegenstände im Verlauf seiner Geschichte auf. Während frühe seerechtliche Regelungen vor allem die Schifffahrt (inklusive der Verfolgung der Piraterie), die Fischerei und

die Seekriegsführung betrafen, führte die Zunahme verschiedener meeres- und küstenbezogener menschlicher Aktivitäten auf der rechtlichen Regelungsebene zu einer multifunktionalen und multidimensionalen Ordnung.

DAS SEERECHTSÜBEREINKOMMEN DER VEREINTEN NATIONEN

Nachdem es bis Anfang der 1970er Jahre trotz mehrfacher Versuche nicht gelungen war, das Seevölkerrecht in einem umfassenden zwischenstaatlichen Vertrag festzuschreiben, führten die Unabhängigkeit zahlreicher ehemaliger Kolonien und das Aufkommen neuer Interessen, z. B. am Tiefseebergbau, schließlich zur dritten Seerechtskonferenz der Vereinten Nationen. Beginnend im Jahre 1973 verfolgte diese das ehrgeizige Ziel, bereits geregelte, offene und neue Themen, einschließlich der internationalen gerichtlichen Streitbeilegung, in einem einzigen, möglichst universalen zwischenstaatlichen Abkommen festzulegen.

Das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen, das 1982 in Montego Bay (Jamaika) angenommen wurde und am 16. November 1994 in Kraft trat, ist mit 168 Parteien der mit Abstand wichtigste Vertrag des modernen Seevölkerrechts. Nach jahrelangem zähem Ringen und zahlreichen Kompromissen gelang die Festsetzung der wichtigsten Regelungen für das gesamte Seevölkerrecht in einem einzigen Vertrag. Dieser diplomatische Kraftakt bewirkte ferner die Gründung einer internationalen Organisation (die Internationale Meeresbodenbehörde mit Sitz in Jamaika) und eines Gerichtshofs zur Beilegung von Streitig-

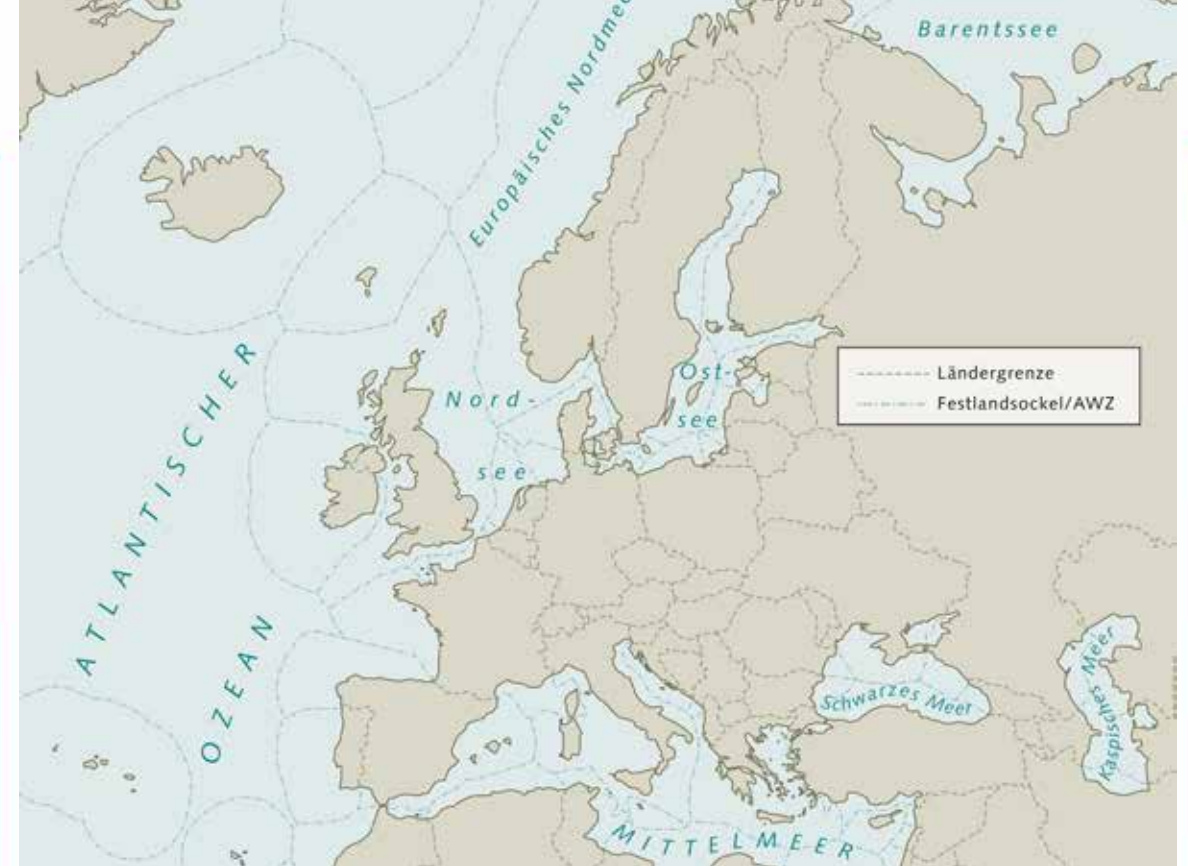


Abb. 1: Im dicht besiedelten Europa mit seinen vielen Grenzen ist die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) oftmals weniger als 200 sm breit. Das betrifft die Adria, die Nordsee und auch das Mittelmeer. Weltweit kommen in dem recht schmalen Band der AWZ immerhin 90 % aller kommerziell relevanten Fischarten vor. Quelle: maribus.

keiten der Parteien (der Internationale Seegerichtshof mit Sitz in Hamburg) durch das Seerechtsübereinkommen.

Das Seerechtsübereinkommen mit seinen über 300 Artikeln versteht sich als „Verfassung der Ozeane“ und verfolgt einen umfassenden Regelungsansatz. Trotz oder gerade wegen seines Anspruchs auf Vollständigkeit der rechtlichen Regelung zwischenstaatlicher maritimer Fragen ist das Seerechtsübereinkommen in vielerlei Hinsicht ein Rahmenübereinkommen. Das bedeutet, dass nicht alle Details und Standards im Abkommen selbst festgelegt sind, sondern dass dieses notwendigerweise durch weitere Verträge auf globaler oder regionaler Ebene, z. B. zur Verhinderung der Umweltverschmutzung durch Schiffe und andere Quellen, zur Regelung der Fischerei und weiterer Themen, ergänzt und ausgefüllt wird.

MEERESZONEN UND RECHTE AN MEERESRESSOURCEN

Eines der Hauptmerkmale der rechtlichen Regulierung des Ozeans durch das Seerechtsübereinkommen ist die Aufteilung in Meereszonen mit unterschiedlichen Befugnissen der Küstenanrainer und anderer Staaten. Um überhaupt Souveränität und weitere beschränkte Hoheitsrechte über Meeresgewässer ausüben zu können, bedarf es eines Staatsgebiets mit entsprechender Küste. Entscheidend für Rechte am und über das Meer sind nicht die Landmasse bzw. die Größe des Staatsgebiets oder politischer oder militärischer Einfluss, sondern allein das Vorhandensein von an das Meer angrenzender Küste. Binnenstaaten werden vom Seerechtsübereinkommen an verschiedener Stelle genannt

und teilweise mit besonderen Rechten ausgestattet, sie haben jedoch keine exklusiven Ansprüche auf Meeresgebiete und die darin enthaltenen Fischbestände oder die im Meeresboden vorhandenen Bodenschätze.

Das Küstenmeer gehört zum Staatsgebiet und darf in einer maximalen Breite von 12 sm (Seemeilen; 1 sm = 1,852 km) in Anspruch genommen werden. Dort genießt der Staat Souveränität über das Meer und den Meeresboden und die dort befindlichen Ressourcen, gleich ob es sich um Fisch, sesshafte Arten (z. B. Muscheln) oder Öl- und Gasvorkommen handelt. Daneben sind für Küstenstaaten vor allem die über diese Zone hinausgehenden Nutzungsrechte an lebenden und nichtlebenden Ressourcen von ökonomischer Bedeutung.

Eine der Neuerungen, mit erheblicher Tragweite, die das Seerechtsübereinkommen eingeführt hat, ist die Möglichkeit für Küstenstaaten, eine Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) auszuweisen. Diese misst bis zu 200 sm und kann so, je nach Länge der Küste, ein immenses Gebiet umfassen, das zwar nicht zum Staatsgebiet gehört, in dem der Küstenstaat aber exklusive Rechte genießt (Abb. 1). Das bedeutet für die Regelung der Fischerei, dass der Staat Fischereilizenzen an eigene und fremde Schiffe vergeben kann. Mit der AWZ wurde Rechtsunsicherheit beseitigt, die daraus resultierte, dass zuvor einige Staaten Fischereizonen unterschiedlicher Art und Breite im Anschluss an das Küstenmeer festgelegt hatten. Über die Fischerei hinaus wurden die exklusiven Nutzungsrechte der Küstenstaaten auf alle weiteren relevanten wirtschaftlichen Tätigkeiten ausgeweitet, z. B. auch die Gewinnung erneuerbarer Energien.

Der Küstenstaat ist allerdings auch für die nachhaltige Bewirtschaftung der AWZ verantwortlich, d. h. er muss dafür sorgen, dass Quoten so festgelegt werden, dass Fischbestände nicht überfischt werden. Außerdem muss er ihre Einhaltung durchsetzen. Vielfach setzen Staaten Quoten zu hoch an, weil verlässliche wissenschaftliche Daten fehlen oder weil der Staat kurzfristige Profite favorisiert. Aber auch die illegale Fischerei stellt ein großes Problem dar, wenn Staaten nicht in der Lage sind, ihre AWZ effektiv zu

kontrollieren. Berücksichtigt man ferner, dass viele Fischbestände wandern und sich daher in verschiedenen staatlichen Wirtschaftszonen und auf Hoher See aufhalten, wird deutlich, warum die Überfischung weiterhin ein gravierendes Problem darstellt. Der Kollaps von Beständen hat lokal bereits zum Niedergang der gesamten Fischereiwirtschaft geführt, während in anderen Regionen Fisch die einzige und damit maßgebliche Proteinquelle für die wachsende (Welt-)Bevölkerung darstellt.

Die Nutzung von Öl- und Gasvorkommen richtet sich nach den rechtlichen Regelungen über den Festlandsockel. Auch hier hat das Seerechtsübereinkommen zu einer Ausdifferenzierung der Regelungen geführt. Die funktionalen Rechte ähneln denen, die für die AWZ gelten. Im Gegensatz dazu ist aber eine Außengrenze des Festlandsockels möglich, die mehr als 200 sm von der Küste entfernt liegt. Die mögliche Erweiterung nationaler exklusiver Nutzungsrechte am Festlandsockel (die insbesondere für Öl- und Gasvorkommen relevant sind) über eine Zone von 200 sm hinaus, birgt besonderes Potenzial für politische und im schlimmsten Fall militärische Konflikte, wenn sich Ansprüche verschiedener Staaten überlappen. Dies ist u. a. im zentralen Arktischen Ozean der Fall.

Die Gewässer, die nicht zum Küstenmeer oder der AWZ eines Staates zählen, gelten als Hohe See. Zur Hohen See haben alle Staaten Zugang; auch Binnenstaaten ohne eigene Küste. Sie genießen dort verschiedene Freiheiten, von denen schon Hugo Grotius (Abb. 2) in seinem Buch „Mare Liberum“ (1609) die Freiheit der Schifffahrt und der Fischerei forderte. Im Gegensatz dazu schuf das Seerechtsübereinkommen ein besonderes Regime für die Ausbeutung mineralischer Ressourcen des Tiefseebodens. Diese gelten als das gemeinsame Erbe der Menschheit. Die Internationale Meeresbodenbehörde regelt den Zugang zu diesen Rohstoffen und die entsprechenden Tätigkeiten der Exploration und Ausbeutung. Sollte es in der Zukunft technisch möglich und ökonomisch sinnvoll sein, die Tiefseeressourcen zu fördern, müssen Gewinne allerdings mit der Staatengemeinschaft geteilt werden. Das ist ein Effekt der



Abb. 2: Hugo Grotius, Ölgemälde von Michiel van Mierevelt 1631.

Bestimmung dieser Rohstoffe zum gemeinsamen Erbe der Menschheit.

SCHWIERIGKEITEN UND OFFENE FRAGEN

Der Druck auf die Meere durch neue Nutzungen sowie die Intensivierung bestehender Nutzungsformen hat in den vergangenen Dekaden beständig zugenommen. Eine wachsende Weltbevölkerung beansprucht die Ressourcen und „Dienstleistungen“ der Ozeane in immer stärkerem Maße, während das Ökosystem Meer nicht zuletzt unter den nachteiligen Auswirkungen der globalen Erderwärmung, insbesondere der Versauerung und Erwärmung, leidet. Die Regelungen zum Schutze des Ozeans vor den nachteiligen Auswirkungen menschlicher Nutzungen der Meere selbst und den Folgen landbasierter Aktivitäten, z. B. in Gestalt des Einleiten von Abwasser oder Abfällen von Land aus, haben daher ebenfalls an Bedeutung gewonnen. Betrachtet man den aktuellen Zustand der Meere, scheint dies allerdings nicht abschließend oder nicht zufriedenstellend geregelt zu sein.

Eine negative Bewertung völkerrechtlicher Regelungen kann im Wesentlichen zwei Ursachen haben: Entweder ist bereits die völkerrechtliche Norm nicht oder nicht gut

genug geeignet, ein bestimmtes Regelungsziel zu erreichen, z. B. weil sie mehrdeutig oder zu vage formuliert ist, oder die Umsetzung und Ausführung durch die Vertragsstaaten ist mangelhaft. Im ungünstigsten Fall wirken beide Faktoren zusammen. In einem zentralen Punkt allerdings unterscheidet sich das Seerecht nicht von anderen völkerrechtlichen Regelungen: seine Effektivität hängt maßgeblich vom politischen Willen der Staaten ab, sich auf geeignete Regelungen nicht nur zu verständigen, sondern diese auch auf nationaler Ebene und im zwischenstaatlichen Verhältnis durchzusetzen.

In der Vergangenheit sind immer wieder Bereiche identifiziert worden, in denen sich das Seerecht als unzulänglich erwiesen hat, Verhaltensänderungen zu bewirken, um ein definiertes Ziel effektiv zu verfolgen. Das gilt nicht zuletzt für den Schutz der lebenden Ressourcen der Meere vor Überfischung. Die Freiheit der Fischerei auf hoher See, aber vor allem auch die Fischereiregime in der AWZ und ihre Durchsetzung haben sich in der Praxis als weitgehend ungeeignet erwiesen, eine nachhaltige Bewirtschaftung von Fischbeständen zu gewährleisten.

AUSBLICK

Das Seevölkerrecht ist ein ausdifferenziertes Teilrechtsgebiet, das Lösungen für eine Vielzahl unterschiedlichster Fragestellungen bereithält. Die größten Herausforderungen, vor denen das Seerecht und seine Anwender, d. h. vor allem Staaten und internationale Organisationen, stehen, sind die Reaktion auf neue Themen, z. B. die Auswirkungen des Klimawandels, sowie die Nachbesserung der Regelungen und/oder eine verbesserte Durchsetzung, wo Ziele nicht erreicht werden, wie im Bereich der nachhaltigen Fischerei.

Zusammenfassend gilt, dass das Seevölkerrecht nicht das einzige Instrument der Verhaltenssteuerung zur Nutzung und zum Schutz der Ozeane ist. Es wird aber auch zukünftig eine wichtige Rolle spielen, wenn es gelingt, seine Regelungen an die modernen Herausforderungen anzupassen, vermeintliche Lücken zu schließen und die Durchsetzbarkeit zu verbessern.

4.7 DIE MENSCHGEMACHTE KLIMAERWÄRMUNG UND DIE TIEFSEE

Tobias Bayr

Durch das Verbrennen von Kohle, Gas und Öl hat der Mensch die Erde seit Beginn der Industrialisierung um ca. 1 °C erwärmt, mit bereits deutlich spürbaren Auswirkungen, auch für uns Menschen.

So beobachten wir heute schon einen Anstieg des Meeresspiegels und eine Zunahme von Extremwetterereignissen, wie tropischen Wirbelstürmen, Starkregen und Überschwemmungen, aber auch Dürren und Waldbränden. Dies wiederum hat negative Auswirkungen auf Nahrungsmittelsicherheit und Trinkwasserversorgung und führt dazu, dass einige Gebiete unserer Erde, vor allem in Ländern des globalen Südens, in absehbarer Zeit nicht mehr bewohnbar sein werden. Dass dadurch Flüchtlingsbewegungen auslöst und politische Konflikte verschärft werden, ist absehbar. Prognosen gehen davon aus, dass sich die Erde bis zum Ende dieses Jahrhunderts um weitere 1–3 °C erwärmt, je nachdem wie ambitioniert wir den Klimaschutz in den nächsten Jahrzehnten umsetzen. Diese zusätzliche Erwärmung wird die schon zu beobachtenden Auswirkungen auf uns Menschen weiter verschärfen und das Klima auf der Erdoberfläche gravierend verändern. Doch wie sieht es mit der Tiefsee aus? Ist auch sie von der menschengemachten Klimaveränderung betroffen?

DIE THERMOHALINE ZIRKULATION – DIE VERBINDUNG ZUR TIEFSEE

Als Ozeanografen die ersten Temperaturmessungen in den tropischen Weltmeeren machten, waren sie sehr überrascht, als sie unter dem über 25 °C warmen Oberflächenwasser bis 4 °C kaltes Tiefenwasser fanden. Wie kann das Wasser in der Tiefe so viel kälter sein als an der

Oberfläche, wo das Oberflächenwasser das ganze Jahr über doch sehr warm ist? Eine Erklärung war bald gefunden: Das Wasser in der Tiefsee stammt von Absinkzonen der Polregionen in der Nord- und Südhemisphäre, die Teil der globalen thermohalinen Zirkulation sind, einem System von Meeresströmungen, das den ganzen Erdball in großen Schleifen umrundet (Abb.1). Aufgrund der kalten Temperaturen in den Polarregionen ist das Wasser so kalt und schwer, dass es bis in die Tiefsee absinken kann. Der durch Verdunstung und Meereisbildung erhöhte Salzgehalt macht das Wasser zusätzlich noch schwerer. Das absinkende kalte Wasser führt dazu, dass an der Oberfläche warmes Wasser vom Äquator zu den Polen „gezogen“ wird; auf diese Weise wird Wärme in die höheren Breiten transportiert. In der Tiefe strömt das abgesunkene Wasser als Teil der globalen Ozeanzirkulation von den Polregionen in die Ozeanbecken der drei Weltmeere.

Die Tiefenwasserbildung in den Polarregionen ist die einzige Verbindung zwischen Meeresoberfläche und Tiefsee; sie ist wichtig, um die Tiefsee und die darin lebenden Lebewesen mit frischem, sauerstoffreichem Wasser zu versorgen. Doch aufgrund der menschengemachten Klimaerwärmung schmelzen die Eisschilde von Grönland und der Antarktis, und das Schmelzwasser, das in diesen Regionen ins Meer gelangt, macht das Meereswasser weniger salzig und damit leichter. Zudem sind die Polarregionen diejenigen Gebiete, die sich am stärksten erwärmen. Wenn das Wasser in den Polargebieten leichter wird,

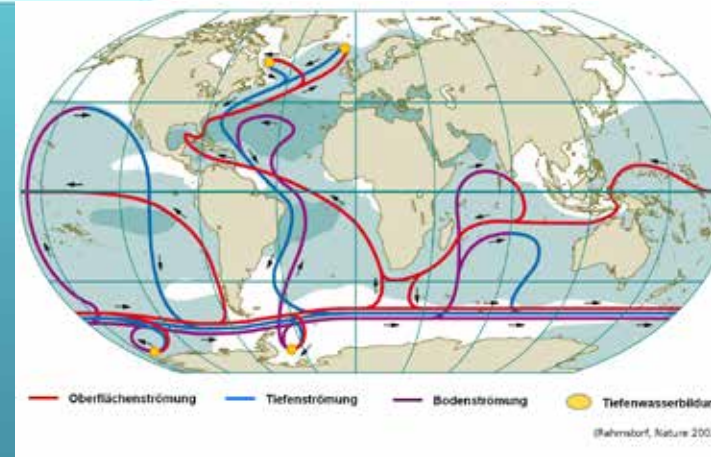


Abb. 1: Die thermohaline Zirkulation: Die Strömungen an der Meeresoberfläche sind rot dargestellt, die in der Tiefsee blau und violett. Die gelben Bereiche in den Polregionen sind die Absinkzonen, in denen Tiefenwasser gebildet wird. Quelle: Rahmstorf, Nature 2002

dann kann es nicht mehr so weit in die Tiefsee absinken. Das heißt in der Konsequenz: Die thermohaline Zirkulation schwächt sich im Klimawandel ab – und damit auch der Golfstrom, der Wärme von den Tropen nach Nordeuropa transportiert und uns damit relative milde Winter beschert. Aber eine Abschwächung der thermohalinen Zirkulation hat auch Auswirkungen auf die Sauerstoffversorgung der Tiefsee.

SAUERSTOFFMANGEL UND OZEANVERSÄUERUNG BEDROHEN DIE MEERESLEBEWESEN

Bereits heute gibt es vor den westlichen Küsten der subtropischen Ozeanen in 200–1.000 m Tiefe sogenannte Sauerstoffminimumzonen (SMZ), d. h. Bereiche mit nur wenig im Wasser gelöstem Sauerstoff, so dass in diesen Zonen kein Leben möglich ist. Aufgrund ihrer geografischen Lage an den Westküsten der Kontinente gelangt nur wenig frisches, sauerstoffreiches Tiefenwasser in diese Bereiche. Erschwerend kommt hinzu, dass in diesen Regionen an der Wasseroberfläche eine hohe biologische Produktivität herrscht. Infolgedessen sinkt viel abgestor-

benes Material in die SMZ ab und verzehrt beim Zersetzen den restlichen Sauerstoff. Durch den vermehrten Eintrag von Dünger in die Weltmeere und die verminderte Tiefenzirkulation breiten sich diese sogenannten Todeszonen aus und bedrohen Fischbestände in den betroffenen Regionen und damit die Nahrungsmittelsicherheit für uns Menschen.

Ein weiterer Faktor, an dem der Mensch maßgeblichen Anteil hat und der sich auch auf die Tiefsee und ihre Bewohner auswirkt, ist die zunehmende Ozeanversauerung. Der Ozean nimmt etwa ein Viertel der menschengemachten CO₂-Emissionen auf und bildet daraus Kohlensäure. Kohlensäure macht den Ozean, wie der Name nahelegt, saurer. Unter sauren Bedingungen haben alle kalkbildenden Lebewesen, wie Muscheln, Schnecken und Korallen, Probleme, ihre Kalkschale zu bilden. Folge ist, dass sie sich nicht so gut vermehren können. Da diese Organismen eine wichtige Rolle in der Nahrungskette der Meere spielen, bringt die Ozeanversauerung das ökologische Gleichgewicht in den Ozeanen in Gefahr

FAZIT: ES IST ALLERHÖCHSTE ZEIT ZUM HANDELN

Wir Menschen sorgen mit unseren Treibhausgasemissionen gerade dafür, dass sich das Klima der Erde erwärmt. Dies hat gravierende Auswirkungen an der Erdoberfläche, aber auch für die Tiefsee. Mit fortschreitendem Klimawandel wird sich die thermohaline Zirkulation abschwächen, die die Tiefsee mit frischem, sauerstoffreichem Wasser versorgt, die Sauerstoffminimumzonen werden sich ausbreiten und kalkbildende Lebewesen werden verschlechterte Lebensbedingungen vorfinden. Dies wird eine Herausforderung für die Lebewesen der Tiefsee sein, aber wir gefährden damit auch die für uns Menschen so wichtige Nahrungsquelle Ozean. Von daher ist es wichtig, wie im Klimaabkommen von Paris beschlossen, die Erderwärmung möglichst auf unter 2 °C (im Vergleich zum vorindustriellen Zeitraum) zu begrenzen. Dies stellt uns vor eine große Herausforderung, die wir nur gemeinsam als Menschheit meistern können.

PROJEKT NEUES MUSEUM

Für Frankfurter*innen ist die Fassade am Haupteingang des Senckenberg Naturmuseums ein vertrauter Anblick. Wer als Kind hierher kam, kommt als Schüler*in wieder und später mit den eigenen Kindern und Enkeln. Die Umgestaltung der Dauerausstellung in das „Neue Museum“, hier mit einem farbigen Bauband symbolisch angedeutet, startete mit der Ausstellung Tiefsee, der dieses Buch gewidmet ist.

PROJEKT NEUES MUSEUM SENCKENBERG

Katrin Böhning-Gaese, Martin Cepek, Sören Dürr

Die Tiefsee – der mit Abstand größte und dennoch weitgehend unerforschte Lebensraum auf unserem Planeten fasziniert. Dunkel und geheimnisvoll, gleichzeitig arm an Nährstoffen und dennoch reich an Arten, die oft bizarr und skurril anmuten. Senckenberg hat der Tiefsee schon 2008 eine große und sehr gut besuchte Sonderausstellung gewidmet. Die neue Dauerausstellung unterscheidet sich von der Sonderausstellung aber nicht nur deshalb, weil die Erforschung der Tiefsee sich erheblich weiterentwickelt hat. Auch das Frankfurter Senckenberg Naturmuseum entwickelt sich rapide, und die Tiefsee-Ausstellung ist ein wichtiger Bestandteil des sogenannten Neuen Museums in Frankfurt. Bestehende Ausstellungen werden überarbeitet, aber auch in erheblichem Umfang neue Bereiche konzipiert und gestaltet.

Senckenberg hat hierfür ein vollständig neues inhaltliches Konzept entworfen, das eine Gliederung in vier große Bereiche vorsieht: Kosmos – Erde – Mensch – Zukunft. Was aber ist die Motivation für Senckenberg, sich von Althergebrachtem zu lösen und diese neue, innovative Aufteilung zu entwickeln?

Wir leben in einer Zeit raschen Wandels und zunehmender Komplexität. Senckenberg möchte mit dem Neuen Museum sowohl eine Orientierungshilfe als auch eine Diskussionsplattform bieten. Wissenschaftliche Ergebnisse werden immer wieder geleugnet oder angezweifelt; viele Menschen wissen nicht mehr, was sie glauben sollen. Gleichzeitig sind Klimawandel und Biodiversitätsverlust ernste Probleme, die unser Wohlergehen zunehmend bedrohen und deren Lösung unverzügliches Handeln erfordert – und zwar nicht nur ganz konkrete Maßnahmen, z. B. zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes, sondern auch durch eine Änderung der Grundhaltung der gesamten Gesellschaft zur Umwelt.

Senckenberg strebt mit dem Neuen Museum also mehrere Ziele an: Die Vermittlung aktueller wissenschaftlicher Daten und Interpretationen, eine Weiterbildung der Öffentlichkeit im Sinne einer „wissenschaftlichen Mündigkeit“ – also beurteilen zu können, was wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse sind und was nur „fake news“ – und letztlich auch das Vorantreiben einer gesellschaftlichen „Transformation“, damit wir zu einer nachhaltigen Nutzung unseres Planeten kommen.

Bei all dem vergessen wir aber nicht, dass das Naturmuseum weiterhin auch unterhalten soll – viele Besucher kommen ins Museum, weil sie eine schöne Zeit haben wollen. Deshalb werden Highlight-Exponate wie Dinosaurier oder die ein Wasserschwein verschlingende Anakonda selbstverständlich erhalten bleiben.

Was also wird neu? Im Bereich KOSMOS spannen drei aufeinander bezogene Räume einen Bogen von der Evolution des Weltraums über die Erforschung außerirdischen Materials bis zu Betrachtungen der fundamentalen Dimensionen von Zeit und Raum. Auch die Ziele moderner Weltraumforscher und die Frage nach extraterrestrischem Leben werden thematisiert. Ein Planetarium, das auch als Veranstaltungsort dienen kann, ist fest geplant.

Der Bereich ERDE wird der umfangreichste Teil des Neuen Museums sein und teilt sich auf in „Archive der Natur“ und „Systeme der Natur“. In den „Archiven“ werden Tier- und Pflanzengruppen in klassischen Vitrinen ausgestellt. In den „Systemen“ – und hierzu gehört auch die Tiefsee-Ausstellung – durchschreiten die Besucher ganze Welten. Sie erleben unterschiedliche Lebensräume der Gegenwart und der Erdgeschichte, zu Wasser und zu Land. Hierfür sind „Graslandschaften“ sowie „Flüsse und Seen“ weitere Beispiele.

Der MENSCH ist ein hochinteressantes und außergewöhnliches Untersuchungsobjekt – und zwar sowohl als betrachtetes Objekt als auch betrachtendes Subjekt. Grundlegende Fragen faszinieren uns alle: Woher kommen wir? Wer sind wir? Wohin geht die Reise der Menschheit? Wer bin ich und welche Rolle spiele ich auf dem Planeten Erde? In den Teilbereichen „Menschwerdung“, „Mensch als System“ und „Mensch im System“ wird diesen und vielen weiteren Fragen nachgegangen werden.

Die „Menschwerdung“ wird anhand von Meilensteinen in der Entwicklung zum Homo sapiens anhand von einzigartigen Exponaten erzählt. Wie der „Mensch als System“ funktioniert, erläutert der nächste Bereich. Der Mensch ist ein hochkomplexes Wesen und Ökosystem; er definiert sich zum einen über seine biologischen Eigenschaften und die zahllosen Mikroorganismen, die in ihm und auf ihm leben, zum anderen aber auch über seine kulturellen und sozialen Fähigkeiten, die das System des Menschen entscheidend mitprägen. Der Bereich „Mensch im System“ wird dezentral über die „Systeme der Natur“ inszeniert. Hierbei geht es um die Rolle des Menschen und die Konsequenz seines Handelns: Wie wirkt sich z. B. die Abholzung des Regenwaldes oder die Nutzung fossiler Brennstoffe auf das Klima aus? Wie beeinflusst die Überfischung der Meere oder die Rohstoffgewinnung aus der Tiefsee den Artenreichtum und die Biodiversität? Für jedes der innerhalb der „Systeme der Natur“ behandelten Ökosysteme wird anhand eines konkreten Beispiels die Rolle menschlichen Tuns untersucht. Ein großes begehbare Gehirn wird das Highlight-Exponat im Bereich Mensch werden.

Aber wie stellt sich die ZUKUNFT der Erde und der Menschheit dar? Wie werden wir leben und wie wollen wir leben? Welche Steuerungsmöglichkeiten haben wir, um die Zukunft von Natur und Umwelt positiv, also im Sinne

der Menschheit, zu beeinflussen? Welche Organisationen engagieren sich wissenschaftlich oder politisch? Der Bereich „Zukunft“ zeigt die Systemparameter, die die ökologische und ökonomische Entwicklung unserer Umwelt steuern. ZUKUNFT bildet somit eine Klammer für die anderen drei Bereiche „Kosmos“, „Erde“ und „Mensch“. Dieser Bereich kann daher in idealer Weise den Abschluss eines Museumsrundgangs bilden.

Mit dem Neuen Museum schafft Senckenberg also etwas Großes – durchaus auch im Wortsinne, denn die Ausstellungsfläche des Museums vergrößert sich von rund 6.000 auf 10.000 m².

Hier ein Bild einfügen?

GLOSSAR

blindtxt
Blindtext

Text fehlt noch

GLOSSAR

blindtxt
Blindtext

Text fehlt noch

BILDNACHWEIS

blindtxt
Blindtext

Text fehlt noch

AUTORENADRESSEN

blindtxt
Blindtext

Text fehlt noch

ANHANG 1: DIE ENTWICKLUNG DER DEUTSCHEN MEERESFORSCHUNG NACH 1945

Gerd Hoffmann-Wieck, Thorolf Müller

Ab Ende 1945 übernahm das Deutsche Hydrographische Institut (DHI) die Aufgaben der 1868 gegründeten Deutschen Seewarte. Das DHI konnte 1949 die *Gauss* als erstes Vermessungs- und Forschungsschiff in Betrieb nehmen. 1990 wurde das DHI mit dem Bundesamt für Schiffsvermessung zum Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zusammengefasst. Mit der Vereinigung der beiden deutschen Staaten wurde der 1950 gegründete Seehydrographische Dienst (SHD) der Deutschen Demokratischen Republik 1990 in das BSH eingegliedert.

Die Fischereiforschung in Hamburg konnte 1948 als Zentralanstalt für Fischerei und ab 1949 als Bundesforschungsanstalt für Fischerei seine Forschung fortsetzen – ab 1955 mit dem Fischereiforschungsschiff *Anton Dohrn*, das in Nord- und Ostsee sowie im Nordatlantik eingesetzt wurde.

1947 nahm das Wilhelmshavener Forschungsinstitut Senckenberg am Meer seine Forschung wieder auf.

An der Universität Hamburg entstand 1947 das Institut für Fischereiwissenschaft, das ab 1953 in das Institut für Fischereibiologie und ab 1963 in das Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft umbenannt wurde. 1957 folgte das Institut für Meereskunde, seit 2016 Teil des Centrums für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN).

Die Biologische Anstalt Helgoland, 1892 gegründet, arbeitete ab 1959 wieder auf Helgoland und Sylt als marines Forschungsinstitut des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und wurde 1998 dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (s. u.) angegliedert.

Internationale Höhepunkte der Forschung waren die Mitwirkung am Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957 mit den Forschungsschiff *Gauss* und dem Fischereiforschungsschiff *Anton Dohrn*, an dem Polarfront-Survey vor Grönland 1958/59 und die Teilnahme des 1964 in Dienst gestellten deutschen Forschungsschiffs *Meteor II*, das 1965 an der International Indian Ocean Expedition (IIOE) teilnahm. Zudem beteiligten sich zahlreiche Universitätsinstitute und Zoologische Museen an internationalen Forschungsvorhaben auf der hohen See. Mit der Teilnahme an diesen internationalen Expeditionen gelang es den deutschen Wissenschaftlern, den Anschluss an die internationale Meeresforschung wiederherzustellen.

Zwischen 1970 und 1995 vergrößerte sich die west- und später die gesamtdeutsche Meeresforschungslandschaft erheblich. 1980 entstand das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Die Universität Bremen gründete 1986 den Fachbereich Geowissenschaften und 2001 das Zentrum für marine Umweltwissenschaften MARUM, seit 2013 als assoziiertes Leibniz-Institut. Die Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH (GKSS) wandelte sich vom Kernforschungszentrum 1976

zum Helmholtz-Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG). Das Max-Planck-Institut für Meteorologie, 1975 in Hamburg gegründet, entwickelt Klimamodelle unter Einbeziehung des Ozeans. Die Carl von Ossietzky Universität Oldenburg gründete 1987 das Institut für die Chemie und Biologie des Meeres mit Außenstellen in Wilhelmshaven (ICBM-Terramare) und Spiekeroog mit Schwerpunkten sowohl in der Grundlagenforschung als auch im angewandten Bereich der Meeres- und Umweltwissenschaften. 1991 entstand in Bremen das Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) und im Jahr 2002 das Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie. Das Institut für Ostseefischerei in Rostock wurde Teil der Bundesforschungsanstalt für Fischerei in Hamburg.

In den 1960er Jahren entwickelten sich mit dem Tiefseeeumweltschutz und den mineralischen Tiefseeressourcen neue interdisziplinäre Forschungsthemen. 1966 begann die Dokumentation von Umweltschäden, die durch das Versenken von Atommüll im Atlantik, durch die Gewinnung von Erzschlämmen im Roten Meer und durch den Tiefseebergbau (Manganknollen) im Pazifik hervorgerufen wurden. In den 1960er bis 1980er Jahren fanden unter der Leitung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Hannover), und der Beteiligung einiger Firmen und Forschungsinstitute erste Explorations-Expeditionen (Manganknollen und Massivsulfide) mit den Forschungsschiffen *Valdivia II* und *Sonne I* statt. Nach einer Unterbrechung wurden diese Untersuchungen von der BGR Anfang dieses Jahrhunderts mit den Forschungsschiffen *Sonne I* und *Sonne II* wieder aufgenommen.

Die Tiefseeforschung von deutscher Seite wird heute überwiegend vom Alfred-Wegener-Institut, vom Marum, von Senckenberg am Meer und von GEOMAR meist in internationaler Kooperation durchgeführt.

ANHANG 2: HIGHLIGHTS DER MEERES- UND TIEFSEEFORSCHUNG

Gerd Hoffmann-Wieck

1818 Der englische Polarforscher Sir John Ross birgt im Nordatlantik aus 1.800 m Tiefe Würmer und eine Meduse.

1843 Der britische Naturforscher Edward Forbes erklärt, unterhalb von 500 m Wassertiefe existiere kein Leben (Abysus-Theorie). Diese Theorie wurde erst 1860 widerlegt.

1855 Im Buch „The Physical Geography of the Sea“ von Matthew Fountaine Maury erscheint erstmals eine Tiefenkarte eines großen Tiefseebereichs, des Nordatlantiks.

1858 Das erste interkontinentale Telegrafenkabel wird zwischen Neufundland und Irland verlegt, funktioniert allerdings nur 20 Tage lang.

1859 Charles Darwin veröffentlicht sein Werk „On the Origin of Species“ („Über die Entstehung der Arten“). Seine These, dass in der Tiefsee zahlreiche fehlende Arten existieren, wird u. a. vom norwegischen Meeresbiologen Michael Sars bestätigt.

1866 Das transatlantische Telegraphenkabel wird erneut verlegt, seit 1987 mit Glasfaserkabel.

1870 Der Schriftsteller Jules Verne veröffentlicht seinen technisch visionären Roman „Vingt mille lieues sous des mers“ („20.000 Meilen unter dem Meer“).

1872–1876 Expedition der HMS *Challenger*; Beginn der modernen Meeresforschung.

1887 Der Kieler Meeresforscher Viktor Hensen prägt den Begriff „Plankton“.

1898/99 Die erste deutsche Tiefsee-Expedition mit dem Dampfschiff *Valdivia* unter der Leitung von Carl Chun führt in den Atlantik und den Indischen Ozean sowie in die Nähe der Antarktis.

1900 Gründung des ersten deutschen Instituts und Museums für Meereskunde in Berlin.

1904 Der Kieler Kunsthistoriker Anschütz erhält ein Patent für den ersten funktionierenden Kreiselkompass, den er später in Kiel mit Unterstützung von Albert Einstein zum Kugelkompass weiterentwickelt.

1912 Der Meteorologe und Polarforscher Alfred Wegener stellt im Senckenberg-Museum seine Kontinentalverschiebungs-Theorie vor, die von den Geologen damals nicht akzeptiert wurde.

1912–16 Angeregt durch die Titanic-Katastrophe entwickelt der Kieler Physiker Alexander Behm das Echolot.

1925–1927 Deutsche Atlantische Expedition mit dem Forschungsschiff *Meteor I* unter der Leitung des Instituts für Meereskunde in Berlin, die weltweit erste interdisziplinäre Expedition.

1930 Tauchfahrt von William Beebe und Otis Barton in einer Stahlkugel, der „Bathysphäre“, bis auf 427,8 m Tiefe. Sie sehen Garnelen und Quallen in der Tiefe.

1938 Ein Exemplar des Quastenflossers (*Latimeria*) wird von Fischern ins Zoologische Museum Kapstadt gebracht. Quastenflosser galten als bereits vor 65 Mio. Jahren ausgestorben.

1939 Der Österreicher Hans Hass dreht seinen ersten Unterwasserfilm, dem nach dem Krieg bis 2007 weitere Filme folgen.

1960 Der Schweizer Jacques Piccard und der Amerikaner Don Walsh tauchen an Bord des U-Boots Trieste im Challenger-Tief bis auf 10.916 m ab. Dort beobachten sie einen Fisch.

1961 Die amerikanischen Geologen Harry Hess, Robert Dietz, Bruce Heezen und Mary Tharp beginnen die Theorie der Plattentektonik zu entwickeln, die wesentliche Teile von Alfred Wegeners Kontinentaldrift-Theorie bestätigt.

1962 Jacques-Ives Cousteau dreht seinen ersten Unterwasserfilm, auf den über 100 weitere folgten.

1964 Die US-Navy baut das Tauchboot *Alvin*, das zunächst bis 2.000 m tauchen kann, aber 1973 und 1994 auf eine maximale Tauchtiefe von 4.500 m ausgebaut wird.

1968–1983 Das US-amerikanische Bohrschiff *Glomar Challenger* wird für wissenschaftliche Bohrungen eingesetzt, die das Modell der Plattentektonik bestätigen.

1977 Vom Tauchboot *Alvin* aus werden erstmals in 2.500 m Tiefe „Schwarze Raucher“ in der Nähe der Galapagos-Inseln entdeckt.

1982 Die Vereinten Nationen verabschieden die Internationale Seerechtskonvention. Sie erklärt die Tiefseeressourcen außerhalb der Territorialgebiete zum Erbe der gesamten Menschheit. Der Vertrag tritt 1994 in Kraft.

1985/86 Das Wrack der 1912 gesunkenen *Titanic* wird entdeckt: Die Tiefsee rückt ins öffentliche Interesse. Wissenschaftlicher Tauchboote ermöglichen Filmaufnahmen von Wrack und Umgebung.

1985 Das französische Forschungsinstitut Ifremer setzt das bemannte Forschungstauchboot *Nautilie* zur Tiefseeforschung bis 6.000 m Tiefe ein.

1988 beteiligt sich die Sowjetunion mit seinen beiden Mir-Tauchbooten an der Tiefseeforschung bis 6.000 m Tiefe.

1989 Bau des einzigen deutschen bemannten Tauchboots *Jago*, das seit 2006 am GEOMAR angesiedelt ist. Es erreicht eine Tauchtiefe von 400 m.

1995 Der japanische Tauchroboter *Kaiko* taucht bis auf 10.911 m Tiefe im Marianengraben.

2003 Das Marum in Bremen setzt den Tauchroboter *Quest* bis in 4.000 m Tiefe ein.

2007 Das GEOMAR setzt den Tauchroboter ROV Kiel 6000 bis auf 6.000 m Tiefe ein.

2012 Der kanadische Filmregisseur James Cameron taucht mit dem Ein-Mann-Tauchboot *Deapsea Challenger* bis in 10.898 m Tiefe im Marianengraben ab.

2018/19 Die Expedition „The Five Deeps“ erforscht mit dem Tauchboot *Limiting Factor* die tiefsten Stellen im pazifischen, atlantischen, indischen, arktischen und südlichen Ozean.

ANHANG 3: FRÜHE INTERNATIONALE
TIEFSEE-EXPEDITIONEN

Jahr der Expedition	Expeditionsschiffe	Staat, der die Expedition durchführte
1823–1826	„Predprijatje“	Russland
1839–1843		
1841	„Beacon“	England
1847–1849	„Achts“	Russland
1868	„Lightning“	England
1872–1876	„Challenger“	England
1872 und 1876	„Vörringer“	Norwegen
1874–1876	„Gazelle“ (1900)	Deutschland
zw. 1880 und 1883	„Travailleur“ und „Talisman“	Frankreich
1890–1893	„Pola“ und „Taunus“	Österreich, Ungarn
1898–1899	„Valdivia“ (2176)	Deutschland
1924	„Michel Sars“	Norwegen

Leiter bzw. Mitarbeiter der Expeditionsarbeiten	Expeditionsgebiet, Art der Arbeiten und sonstige Angaben
O. v. Kotzebou, E. Lenz und Eschholz	Weltumseglung im Atlantischen, Pazifischen und Indischen Ozean und ihren Nebenmeeren – die ersten modernen Tiefseetemperatur- und Dichtemessungen, Salzgehaltbestimmungen wie auch Farbe des Meerwassers, O ₂ und meteorologische Beobachtungen.
James Clark Ross	Antarktis-Expedition
E. Forbes	Tiefsee- Untersuchungen im östlichen Mittelmeer. (Azoische Theorie).
E. Lenz	Atlantischer Ozean, Tiefseetemperaturen.
K. May, W. Thomson, B. Carpenter	Erste englische Tiefsee-Expedition zwischen den Hebriden und Färöern.
G. Nares, F. Thomson, W. Thomson, C. Tizard, I. Murray, I. Buchanan, v. Willesnoessuhm	Weltumseglung im Atlantischen, Pazifischen und Indischen Ozean. Wissenschaftliche Tiefseeexpedition – 362 Tiefseestationen.
M. Sars, H. Mohn	Tiefseeexpeditionen im Nordatlantik.
v. Schleinitz, K. Börgen, T. Struden, Vorname?. Gümpler	Wissenschaftliche Tiefsee-Expedition im Atlantischen, Pazifischen und Indischen Ozean und deren Nebenmeeren.
	Mehrere Tiefseeexpeditionen in Biskaya, im Mittelmeer, bei den Kap Verden und den Kanaren durchgeführt.
Adria-Kommission [?], K. Natterer	Expeditionen im Ägäischen Meer und im östlichen Mittelmeer, im Roten Meer.
C. Chun, G. Schott und andere	Tiefseeexpedition im Südatlantischen und Indischen Ozean.
	Tiefseeexpedition in das Nordpolarmeer

ANHANG 3: FRÜHE INTERNATIONALE
TIEFSEE-EXPEDITIONEN

Jahr der Expedition	Expeditionsschiffe	Staat, der die Expedition durchführte
1925–1938	„Mansju“	Japan
1925–1927	„Meteor“	Deutschland
1933	„Sjunpu-Naru“	Japan
1937–1940	„Meteor“ (1178)	Deutschland
1947–1948	„Albertross“	Schweden
1949–1955	„Witjas“	UdSSR
1950–1952	„Challenger II“ (1140t)	England
1953	„Aventure“	Frankreich
ab Herbst 1953 [so lang?]	„Baird“	USA
1955	„Calypso“	Frankreich

Leiter bzw. Mitarbeiter der Expeditionsarbeiten	Expeditionsgebiet, Art der Arbeiten und sonstige Angaben
	Spezielle ozeanische Expeditionen im nordwestlichen Teil des Stillen Ozeans für die Untersuchungen der Gebiete der großen Tiefen.
A. Merz, A. Defant und andere	Große Tiefsee-Expedition im Atlantischen Ozean – 310 Tiefseestationen im Südatlantik.
	Spezielle ozeanographische Expeditionen im nordwestlichen Teil des Stillen Ozeans für die Untersuchungen der Gebiete der großen Tiefen.
Deutsche Seewarte	Mehrere ozeanische Expeditionen im Nordatlantik, in der Nordsee und im Norwegischem Meer.
	Weltumsegelung. 20 m lange Kerne aus dem Sediment gestanzt.
Akademie der Wissenschaften der UdSSR [?], N. Sisoeff und andere	Große ozeanische Expedition in den Pazifischen Ozean mit Gewinnung von großen ungestörten Bodenproben aus Tiefen bis 1.000 m.
T. F. Gaskell, G. S. Ritchie und andere	Wissenschaftliche Weltumsegelung im Atlantischen, Pazifischen und Indischen Ozean in Wiederholung der Challenger-Expedition von 1872–1876.
M. Lambert	Ozeanische Forschungen in der Labrador-See mit insgesamt 145 Tiefseestationen.
	Ozeanographische Arbeiten in der Kurilen-Tiefseesenke und in den Japanischen Tiefseesenken.
S. Cousteau, F. Bernard H. Edgerton	Ozeanographische und meeresbiologische Forschungen im ganzen Mittelmeer mit insgesamt 110 Tiefseestationen.

SENCKENBERG-BUCH 8X

HERAUSGEBER

Prof. Dr. Dr. h.c. Volker Mosbrugger

Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Senckenberganlage 25, 60325 Frankfurt am Main

HERAUSGEBER DES BANDES

Dr. Thorolf Müller

Projektleiter Sonderausstellungen, Senckenberg Naturmuseum, Senckenberganlage 25, 60325 Frankfurt am Main

Dr. Gerd Hoffmann-Wieck

Kommunikation und Medien, GEOMAR, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Wischhofstr. 1–3, 24148 Kiel

LEKTORAT

Susanne Warmuth, Lektorat und Redaktion, Darmstadt

LAYOUT, SATZ UND LITHOGRAFIE

Sandra Seibert, simply-s, Frankfurt am Main

DRUCK UND BUCHBINDERISCHE VERARBEITUNG

Druckerei XXXXXXXXXXXXXXXXX

VERTRIEB

E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart

www.schweizerbart.de, E-Mail: mail@schweizerbart.de

INFORMATIONEN ZU DIESEM TITEL: www.schweizerbart.de/9783510614xxx

© 2020 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung und Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, des auszugsweisen Nachdrucks, der Herstellung von Mikrofilmen und der Übernahme in Datenverarbeitungsanlagen vorbehalten.

Die Autoren sind für den Inhalt des Bandes verantwortlich.

www.senckenberg.de

Senckenberg-Buch 8X

ISBN 978–3–510–614XX–X

ISSN 0341-4108

Printed in Germany

(FSC-Logo – über Druckerei)

(Logo Leibniz-Gemeinschaft)