

world ocean review

Mit den Meeren leben.

2010



Herausgegeben von
maribus in Kooperation mit



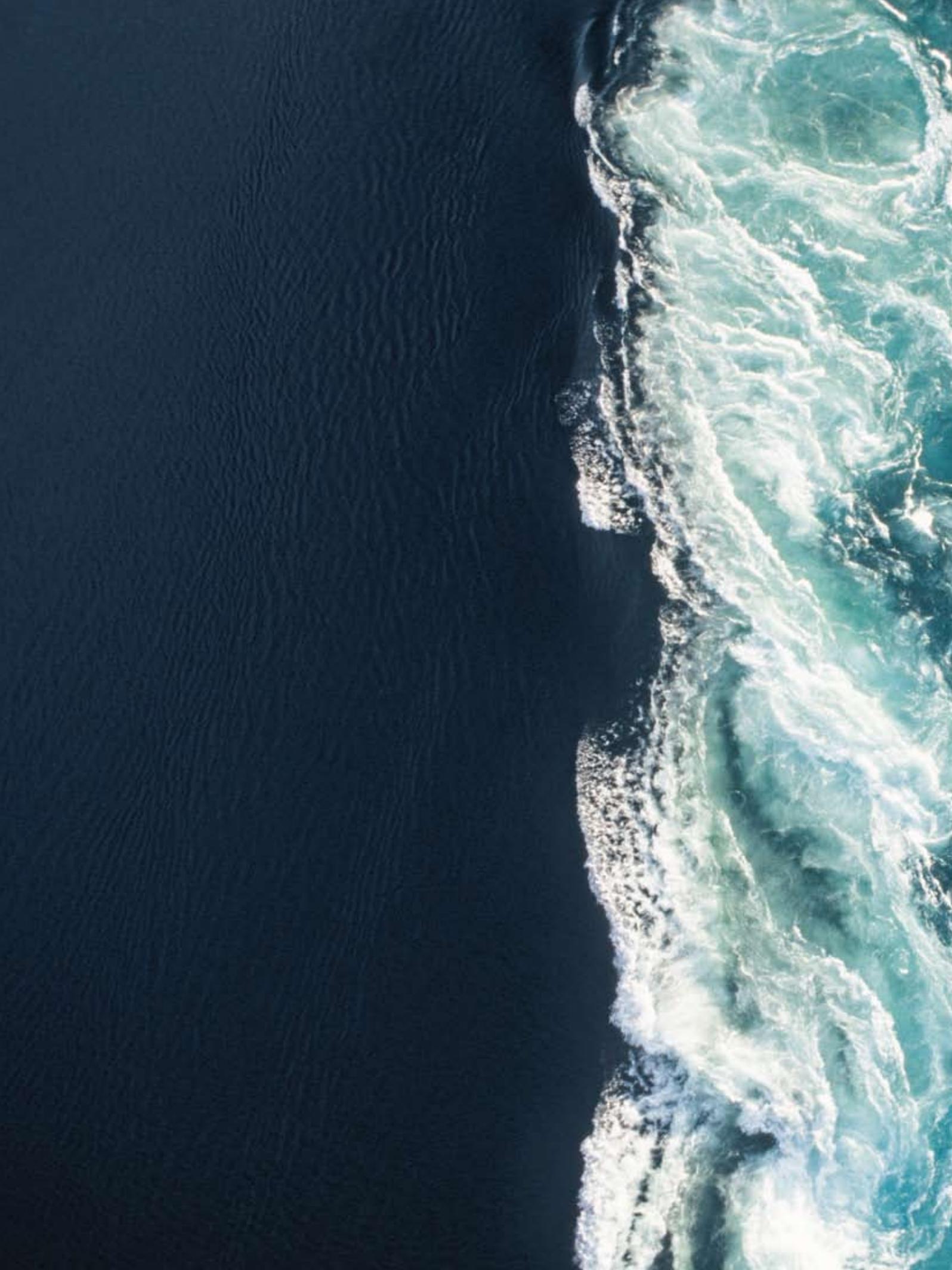
ozean der zukunft
DIE KIELER MEERESWISSENSCHAFTEN



mare

1

Mit den Meeren leben.



world ocean review 
2010

Vorwort

Unser Bewusstsein für die Umwelt ist ein stetig wachsendes. Wenn auch sehr langsam. Mit den sichtbaren, begreiflichen Missständen begann dieser Prozess. Unsere Straßen, Strände, Wiesen und Wälder wurden sauberer, Industrieabgase reduzierten sich, die Schornsteine spieen immer sauberere Luft aus. Was wir wahrnehmen und wo es eine Anwaltschaft gibt, engagieren wir uns.

Die Ozeane jedoch sind in ihrer Unzugänglichkeit und Dimension schwer begreifbar, entziehen sich zum größten Teil unserem Bewusstsein. Und sie haben weder einen Fürsprecher noch eine Interessenvertretung. Das ist umso bemerkenswerter, als dass die Meere maßgeblich unser Klima beeinflussen und eine immer wichtigere Ernährungsquelle darstellen.

Der Weltklimabericht des IPPC im Jahr 2007 und der Stern-Report 2006 schufen weltweit eine bis dahin unbekannt hohe Aufmerksamkeit für die Probleme und Folgen der Klimaveränderungen. Da keimte die Idee, einen Report zu erstellen, der sich drei Vierteln der Erdoberfläche widmet und somit zugleich auf die dringlichsten Fragen unserer Zeit fokussiert.

Zu diesem Zweck gründete der mareverlag in Hamburg vor zwei Jahren die gemeinnützige Gesellschaft maribus. Kein kommerzieller Gedanke, sondern allein eine möglichst hohe Aufmerksamkeit für die Belange der Meere sollte im Vordergrund stehen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurden Partner gesucht. Und im International Ocean Institute (IOI), gegründet von Elisabeth Mann Borgese, und auch in der ebenso von ihr ins Leben gerufenen gemeinnützigen Stiftung Ocean Science and Research Foundation (OSRF) gefunden. Dabei unterstützt das IOI die Arbeit logistisch. Seiner Nähe zur Arbeit der Vereinten Nationen kommt dabei eine wichtige Rolle zu. Die OSRF steht als Finanziererin hinter dem Projekt.

Der Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ – ein Bündnis von mehr als 250 Forscherinnen und Forschern, die in Kieler Wissenschaftseinrichtungen zum Thema Klima- und Ozeanwandel arbeiten – wurde jedoch der entscheidende Partner. Mit all seiner ausgezeichneten Expertise und seinem interdisziplinären Ansatz erarbeiteten über 40 Wissenschaftler als Autorinnen und Autoren den Inhalt dieses ersten „World Ocean Review“ (WOR).

Nun liegt der erste „World Ocean Review“ vor. Im Vordergrund stehen nicht spektakuläre neue Erkenntnisse oder provokante Aufrufe. In der Verbindung von kompetenten und substanziellen Inhalten, die in der Zusammenarbeit mit dem mareverlag in verständlicher und kommunikativer Form aufbereitet wurden, liegt vielmehr nun die Chance, die Komplexität und Brisanz der Zustände unserer Ozeane zu verstehen.

Es liegt an uns, mit diesem Wissen umzugehen. Und es besteht die Hoffnung, dass wir in Zukunft eine Anwaltschaft bilden, die dem blauen Planeten zu seinem Recht verhilft.



Nikolaus Gelpke

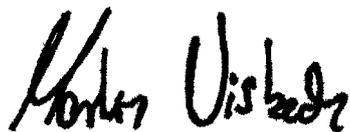
Geschäftsführer maribus gGmbH und Verleger des mareverlags

Die Wissenschaftler des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“ erforschen in vielen Bereichen die Entwicklung des Ozeans im Spannungsfeld zwischen Wandel, Chancen und Risiken – aber wie sieht unser Kenntnisstand über den heutigen Ozean aus? Was wissen wir über die vielen Einflüsse im Zusammenhang mit der zunehmenden Nutzung der Meere oder dem Klimawandel, die beide direkt und indirekt auf das Meer wirken? Wo sind die Grenzen unseres Verständnisses? Gibt es nachhaltige Lösungsansätze für die zukünftige Nutzung der Meere?

Diese Fragen werden uns Wissenschaftlern häufig von Journalisten, Lehrern und interessierten Mitbürgern gestellt und sind für einzelne Meeresforscher nicht umfassend zu beantworten. Im Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ arbeiten Wissenschaftler der unterschiedlichsten Disziplinen zusammen und erforschen gemeinsam das Meer: Meeresforscher, Geologen, Biologen, Chemiker sowie Mathematiker, Ökonomen, Juristen und Mediziner. Wie können die offenen Fragen sinnvoll erforscht und zuverlässig beantwortet werden? Die Vielfalt in den Fach- und Forschungsrichtungen des Exzellenzclusters wird hier genutzt, um einen umfassenden Überblick über den Zustand der Ozeane zu geben.

Mit dem „World Ocean Review“ wollen wir eine möglichst realistische Einschätzung des momentanen Zustands der Meere wagen. Ziel ist es, die Einzelkenntnisse in den verschiedenen Fachgebieten zusammenzutragen und unser Wissen an die breite Öffentlichkeit weiterzugeben. Dazu haben wir zunächst die großen Themen, die für den Status der Ozeane relevant sind, identifiziert und Wissenschaftler des Exzellenzclusters gebeten, über den Status quo und aktuelle Fragen zu schreiben und gleichzeitig das Thema von verschiedenen Seiten zu beleuchten. Die Experten wurden durch Journalisten beim Schreiben der Texte und bei der Auswahl der Bilder unterstützt.

Bei der Auswahl der Kapitel fällt auf, dass viele aktuelle Themen die Nutzung und Übernutzung durch den Menschen aufgreifen. Die scheinbar unendliche Ressource Meer ist endlich geworden. Der hier dargestellte Stand gibt häufig Anlass zur Sorge. Der Ausblick auf mögliche Entwicklungen und Konsequenzen der weiteren Übernutzung und Verschmutzung der Meere kann diese Sorge leider nur verstärken und verdeutlicht, wie bedeutend die Vorsorgeforschung der Meereswissenschaften für die Zukunft der Menschheit ist. Dazu wollen die Kieler Meeresforscher einen Beitrag leisten. Wir wünschen allen Lesern eine spannende und aufschlussreiche Lektüre.



Prof. Dr. Martin Visbeck
Sprecher des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“



Vorwort

4

Die Weltmeere, Motor des globalen Klimas

Kapitel 1

Ein komplexes Gefüge – das Klimasystem der Erde	10
Antrieb des Klimas – die großen Meeresströmungen	16
CONCLUSIO: Zeit zu handeln	25

Wie der Klimawandel die Chemie der Meere verändert

Kapitel 2



Die Rolle des Meeres als größter CO ₂ -Speicher	28
Die Folgen der Ozeanversauerung	36
Sauerstoff im Ozean	44
Wirkung des Klimawandels auf Methanhydrate	48
CONCLUSIO: Die Stoffflüsse in Gänze verstehen	53

Die ungewisse Zukunft der Küsten

Kapitel 3



Der Meeresspiegelanstieg – eine unausweichliche Bedrohung	56
Wie Natur und Mensch die Küste verändern	60
Der Kampf um den Lebensraum Küste	68
CONCLUSIO: Die Zukunft der Küste – Verteidigung oder geordneter Rückzug?	73

Endstation Ozean – von der Verschmutzung der Meere

Kapitel 4



Die Überdüngung der Meere	76
Organische Schadstoffe in der Meeresumwelt	82
Allgegenwärtig – der Müll im Meer	86
Die Verschmutzung der Meereslebensräume durch Öl	92
CONCLUSIO: Es gibt viel zu tun ...	99

Auswirkungen des Klimawandels auf das marine Ökosystem

Kapitel 5



Biologische Systeme im Stress	102
Störung im Planktonkreislauf	106
Neue Arten in fremden Revieren	110
Die Rolle der biologischen Vielfalt im Meer	114
CONCLUSIO: Die Folgen des Klimawandels für die biologische Vielfalt im Meer	117

Von der Ausbeutung einer lebenden Ressource – die Fischerei Kapitel 6

Die Meeresfischerei – Stand der Dinge	120
Die Ursachen der Überfischung	126
Klassische Ansätze des Fischereimanagements	130
Wege in eine bessere Fischereiwirtschaft	136
CONCLUSIO: Ist nachhaltiger Fischfang möglich?	139



Bodenschätze und Energie aus dem Meer Kapitel 7

Fossile Brennstoffe	142
Marine mineralische Rohstoffe	146
Methanhydrat	152
Regenerative Energien	156
CONCLUSIO: Der Druck auf den Meeresboden wächst	161



Das Meer – der weltumspannende Transportweg Kapitel 8

Ein dynamischer Markt – der Weltseeverkehr	164
Piraterie und Terrorismus im globalen Seeverkehr	174
CONCLUSIO: Der Weltseeverkehr – ein Blick in die Zukunft	177



Medizinisches Wissen aus dem Meer Kapitel 9

Meerestiere als Wirkstofflieferanten	180
Wie Krankheiten entstehen – Ursachenforschung	188
Rechtliche Fragen der marinen Medizinforschung	192
CONCLUSIO: Der Beginn einer neuen Ära?	197



Das Internationale Seerecht – ein potentes Regelwerk Kapitel 10

Die Rechtsordnung der Ozeane	200
Die Grenzen des Seerechts	208
CONCLUSIO: Die Zukunft des Internationalen Seerechts	211

Gesamt-Conclusio 213

Glossar	217
Abkürzungen	220
Autoren und Partner	222
Quellenverzeichnis	226
Index	230
Abbildungsverzeichnis	234
Impressum	236



1

Die Weltmeere, Motor des globalen Klimas



> Die Ozeane bedecken circa 70 Prozent der Erdoberfläche. Sie spielen daher für das Klima auf der Erde und die globale Erwärmung eine große Rolle. Eine wichtige Aufgabe der Ozeane besteht darin, die Wärme aus den Tropen in höhere Breiten zu transportieren. Sie reagieren träge auf Veränderungen in der Atmosphäre und nehmen neben der Wärme große Mengen des von uns Menschen produzierten Klimagases Kohlendioxid auf.



Ein komplexes Gefüge – das Klimasystem der Erde

> Das Klima der Erde wird durch viele Faktoren wie Sonnenstrahlung, Wind oder Meeresströmungen geprägt. Forscher versuchen diese Einflussgrößen in Modellen zu vereinen. Inzwischen hat man viele Prozesse verstanden. Das Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren ist aber derart komplex, dass noch immer viele Fragen offen sind.

Die Trägheit des Klimas

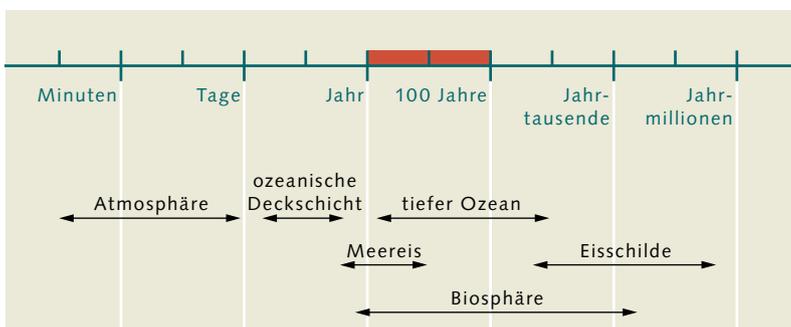
Der Weltozean ist eines der wichtigsten Elemente des globalen Klimasystems. Das lernt man schon in der Schule. Aber was ist eigentlich Klima? Der Unterschied zwischen Wetter und Klima lässt sich durch einen einzigen Satz verdeutlichen: Klima ist das, was man erwartet; Wetter ist das, was man bekommt. Demnach gibt es einen fundamentalen Unterschied zwischen Wetter und Klima. Die Wetterforschung befasst sich mit der Entstehung, Verlagerung und der Vorhersage einzelner Wetterelemente, etwa eines bestimmten Tiefdruckgebiets. Die Klimaforschung ist hingegen an der Gesamtheit der Tiefs und Hurrikans interessiert und widmet sich beispielsweise der Frage, wie viele Tiefs oder Hurrikans es nächstes Jahr geben wird oder ob sie sich infolge der globalen Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten häufen oder intensivieren werden. Mit dem Begriff Wetter bezeichnet man also die kurzfristigen Geschehnisse in der **Atmosphäre**, während sich der Begriff Klima auf längere Zeiträume bezieht. Zur

Beschreibung des Klimas verwendet man in der Regel eine Zeitspanne von 30 Jahren als Bezugszeitraum.

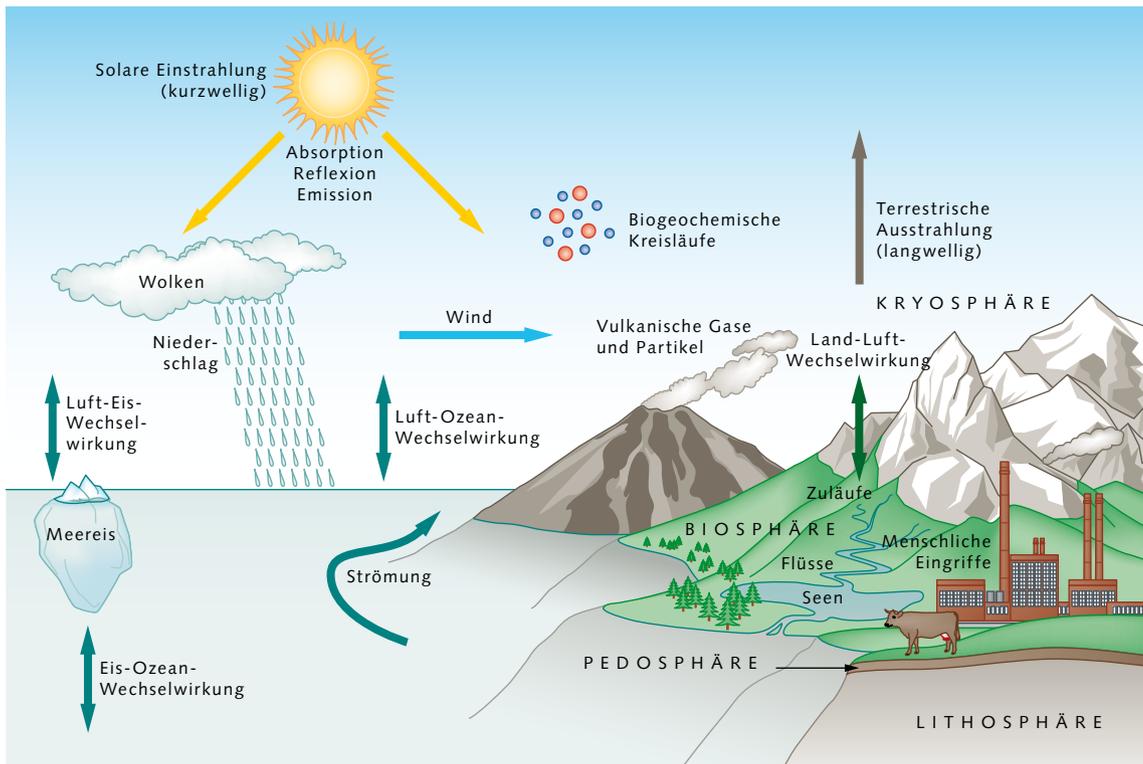
Klimaänderungen nimmt der Mensch vor allem durch die Änderung atmosphärischer Größen wahr, etwa Änderungen der Temperatur oder des Niederschlags. Im Prinzip kann die Atmosphäre selbst wegen ihrer chaotischen Dynamik viele natürliche Klimaänderungen erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die **Nordatlantische Oszillation (NAO)**, die das Klima über Teilen Europas und Nordamerikas erheblich beeinflusst. Sie ist eine Art Druckschaukel zwischen dem **Islandtief** und dem **Azorenhoch**, welche die Stärke der winterlichen Westwinde über dem Nordatlantik bestimmt: Sind sie stark, gibt es in Westeuropa mildes und regenreiches Wetter. Sind sie schwach, ist es eher trocken und kalt. Derartige Schwankungen machen es schwer, Klimaveränderungen zu erkennen, die auf den Einfluss des Menschen und den Treibhauseffekt zurückgehen.

Die Atmosphäre ist kein isoliertes System, sondern steht mit anderen Komponenten des Erdsystems in Wechselwirkung, dem Ozean etwa. Sie ist aber auch mit der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Tiere und Pflanzen), der Pedosphäre (Böden) und der Lithosphäre (Gestein) in Kontakt. Alle Bestandteile zusammen bilden das Klimasystem, dessen Einzelkomponenten und -prozesse auf vielfältige Weise miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen.

Alle diese Komponenten reagieren unterschiedlich schnell auf Veränderungen. Die Atmosphäre passt sich in Stunden bis Tagen den Bedingungen an der Erdoberfläche wie etwa der Meerestemperatur oder der Eisbedeckung an. Das Wetter ist zudem wechselhaft und daher nur einige Tage im Voraus zu prognostizieren. In der Tat kann man zeigen, dass die theoretische Grenze der Wettervorhersagbarkeit bei etwa 14 Tagen liegt. Die Strömungen der Tief-



1.1 > Die verschiedenen Komponenten des Klimasystems reagieren unterschiedlich schnell oder träge auf Veränderungen. Der tiefe Ozean zum Beispiel ist eine wichtige Ursache der Trägheit des Klimas. Der farblich markierte Skalenbereich oben stellt den kurzen Zeitausschnitt eines Menschenlebens dar.



1.2 > Das Klimasystem, seine Teilsysteme und relevante Prozesse und Wechselwirkungen.

see hingegen reagieren erst in vielen Jahrhunderten voll auf veränderte Randbedingungen, wie etwa Variationen der Nordatlantischen Oszillation und die daraus resultierenden Änderungen von Temperaturen und Niederschlägen an der Meeresoberfläche, die die Bewegungen in der Tiefe antreiben. Ein großes Inlandeisgebiet wie die Antarktis wird durch den Klimawandel vermutlich sogar über viele Jahrtausende sein Gesicht verändern und ohne Gegenmaßnahmen in diesem Zeitraum nach und nach abschmelzen.

Die Vorhersagbarkeit des Klimas basiert auf den Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und den trägeren Klimasubsystemen, allen voran dem Ozean. Dabei bewegen sich die verschiedenen Komponenten des Klimasystems mit völlig unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Tiefdruckgebiete wandern innerhalb von Tagen Hunderte von Kilometern weit. Meeresströmungen hingegen schleichen oftmals mit wenigen Metern pro Minute dahin. Zudem haben die einzelnen Komponenten verschiedene Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten. Wasser etwa speichert für lange Zeit große Mengen an Sonnenwärme.

Änderungen des Klimas können auf zwei verschiedene Weisen ausgelöst werden – durch interne und externe Anregungen. Unter internen Anregungen versteht man:

- Veränderungen in einer einzelnen Klimakomponente – zum Beispiel eine abweichende Meeresströmung;
- veränderte Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Klimakomponenten – zum Beispiel dem Ozean und der Atmosphäre.

Im Vergleich dazu haben die externen Anregungen mit dem Klimasystem zunächst nichts zu tun. Dazu gehören unter anderem:

- die sehr langsame Kontinentalverschiebung, die die Landmassen in Jahrtausenden in andere Klimazonen bewegt;
- die Veränderung der Strahlungsintensität der Sonne – sie schwankt mit den Jahren, wodurch sich auch die Temperatur auf der Erde ändert;
- Vulkanausbrüche, die durch in die Atmosphäre ausgestoßene Asche- und insbesondere Schwefelmassen die Sonnenstrahlung in der Atmosphäre und das Klima verändern können.

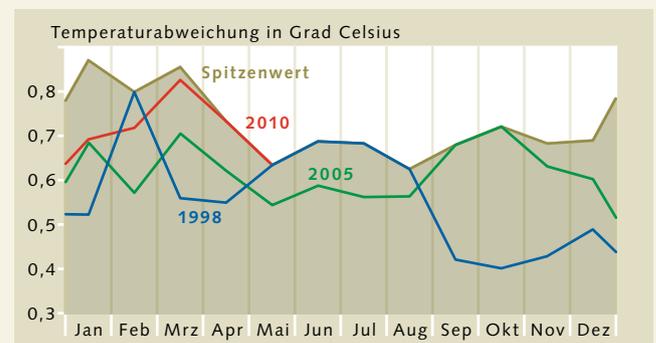
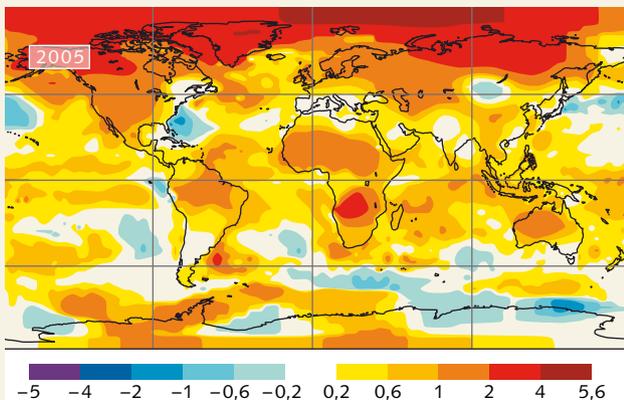
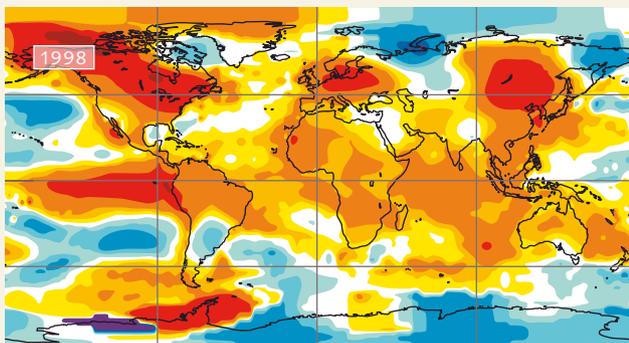
Von der Schwierigkeit, den Einfluss des Klimawandels zu erkennen

Klimaschwankungen sind nichts Ungewöhnliches. Für den Nordatlantik zum Beispiel ist bekannt, dass die durchschnittlichen Winde oder Temperaturen im Laufe von Jahrzehnten, von Dekaden, schwanken können. Auch die durch den Menschen verursachten Veränderungen des globalen Klimas sind erst im Laufe von Jahrzehnten spürbar. Natürliche dekadische Veränderungen und die durch den Menschen verursachten Veränderungen überlagern sich damit. Das macht es schwer, den Einfluss des Menschen auf das Klima sicher abzuschätzen. Anders als in der dynamischen Nordatlantikregion lassen sich die Auswirkungen des Klimawandels in ruhigeren Gebieten wie etwa dem tropischen Indischen Ozean daher besser messen.

Als sicher gilt, dass die Ozeane Treiber jährlicher oder dekadischer Klimaschwankungen sind. So korrelieren die dekadischen Schwankungen des Niederschlags in der Sahelzone oder der atlantischen Hurrikanaktivität recht gut mit den Schwankungen der nordatlantischen Meerestemperatur. Obwohl man den genauen Mechanismus

hinter diesen dekadischen Änderungen noch nicht völlig verstanden hat, ist man sich darin einig, dass Variationen der Meeresströmungen im Atlantik eine wichtige Rolle spielen. Diese Hypothese wird auch dadurch gestützt, dass im Rhythmus von mehreren Jahrzehnten Temperaturanomalien an der Meeresoberfläche des Atlantiks auftreten, die man als interhemisphärischen Dipol bezeichnet. Strömt Wasser verstärkt nach Norden, erhöht sich im Nordatlantik die Lufttemperatur, während sie im Südatlantik fällt. Wird es im Norden kälter und im Südatlantik dagegen wärmer, deutet dies auf schwache Meeresströmungen hin. Die Lufttemperaturdifferenz zwischen Nord- und Südatlantik ist somit ein Maß für die Stärke der Meeresströmungen.

Grundsätzlich können heutige Klimamodelle das gegenwärtige Klima und die historischen Klimaschwankungen einigermaßen gut darstellen. Diese Modelle beschreiben das Klima vor allem auf globalem Maßstab mit befriedigender Zuverlässigkeit. Je kleiner aber

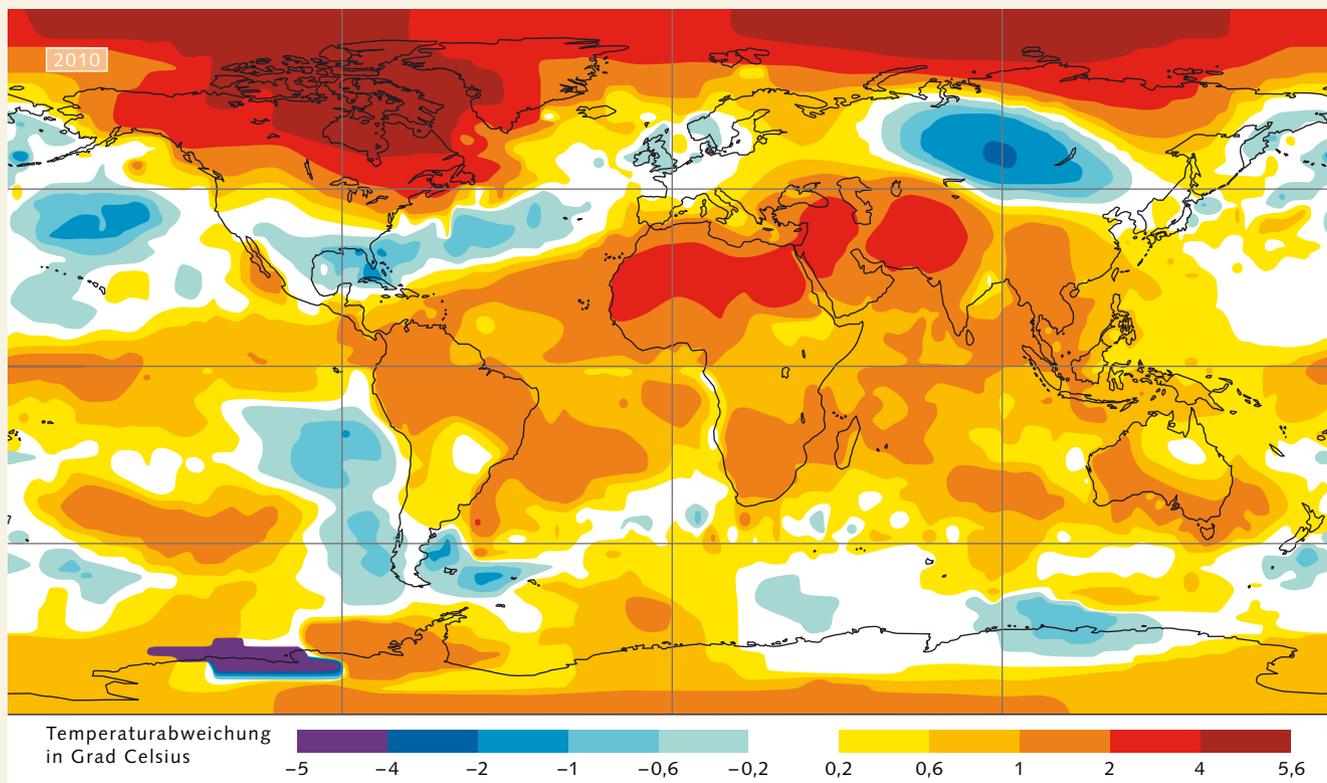


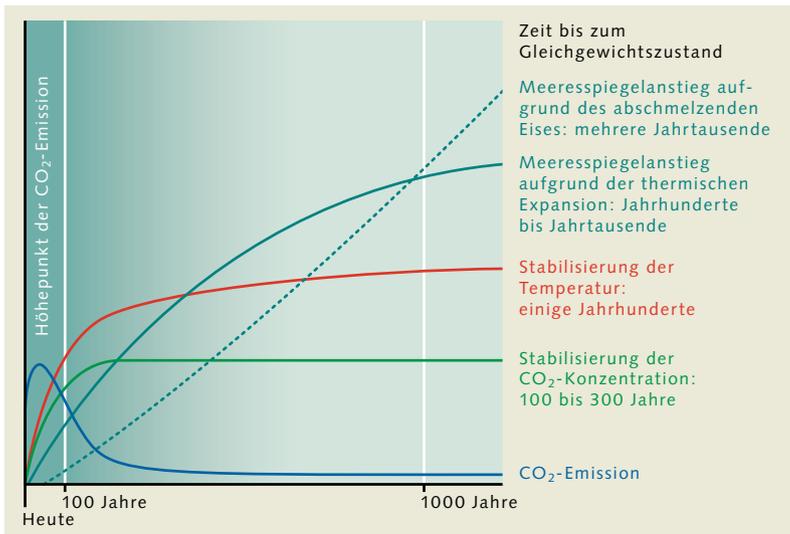
1.3 > Das Jahr 2010 hat Europa einen ungewöhnlich kalten Jahresbeginn beschert. Weltweit gesehen aber war der Winter 2010 der drittwärmste seit 131 Jahren. Betrachtet man die ersten fünf Monate wie auf den Karten dargestellt, ist das Jahr 2010 sogar das wärmste und erreicht in den Monaten April und Mai zudem die bisherigen Temperaturspitzenwerte (oben). Auch die Jahre 1998 und 2005 waren überaus warm und lagen ganzjährig über dem langjährigen Mittelwert (gemittelte Periode 1951 bis 1980).

die räumlichen Abmessungen sind, desto weniger zuverlässig sind die Modelle. So ist es deutlich einfacher, eine Aussage über die global gemittelte Temperatur zu machen als über den künftigen Niederschlag in Berlin. Für die regionale Einschätzung des Klimas sind ausführliche Messreihen nötig. Für viele Gebiete der Erde wie etwa den Südozean gab es aber lange kaum Messwerte. Heute liefern hier vor allem die Satelliten Daten.

Es gibt inzwischen zahlreiche mathematische Modelle, die die Auswirkungen des menschlichen Handelns auf das Klima ermitteln. Sie analysieren zum einen, wie das Klimasystem auf natürliche und anthropogene, also vom Menschen verursachte externe Anregungen reagiert, aber auch in welcher Weise es mit den **biogeochemischen** Kreisläufen wie etwa dem **Kohlenstoffkreislauf** (Kapitel 2) wechselwirkt. Daher entwickelt sich die Klimaforschung immer mehr zu einer umfassenden Erdsystemforschung, die die heutigen Klimamodelle entsprechend zu Erdsystemmodellen weiterentwickelt. Nur

so kann man die vielen Wechselwirkungen studieren. Der Einfluss der globalen Erwärmung auf die **stratosphärische** Ozonschicht beispielsweise lässt sich erst dann ermitteln, wenn man auch die chemischen Abläufe in der Atmosphäre betrachtet. Ein anderes Beispiel ist die Aufnahme von CO_2 ins Meer, die zu einer Versauerung des Wassers führt (Kapitel 2). Noch kann niemand abschätzen, wie die Erwärmung und Versauerung der Ozeane in Zukunft die Aufnahme von anthropogenem CO_2 beeinflusst, wovon wiederum der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre und die künftige Temperaturentwicklung abhängen. Zwischen Ozean und Atmosphäre gibt es also Wechselwirkungen in beide Richtungen. Einerseits bestimmt der Ozean in großem Maße den Grad der Klimaänderung und vor allem seine regionale Ausprägung mit. So kommt es zwar im weltweiten Durchschnitt zu einer Erwärmung. Diese wirkt sich aber in verschiedenen Regionen, etwa im Gebiet des Golfstroms, durchaus unterschiedlich aus. Andererseits reagiert der Ozean selbst auf den Klimawandel.





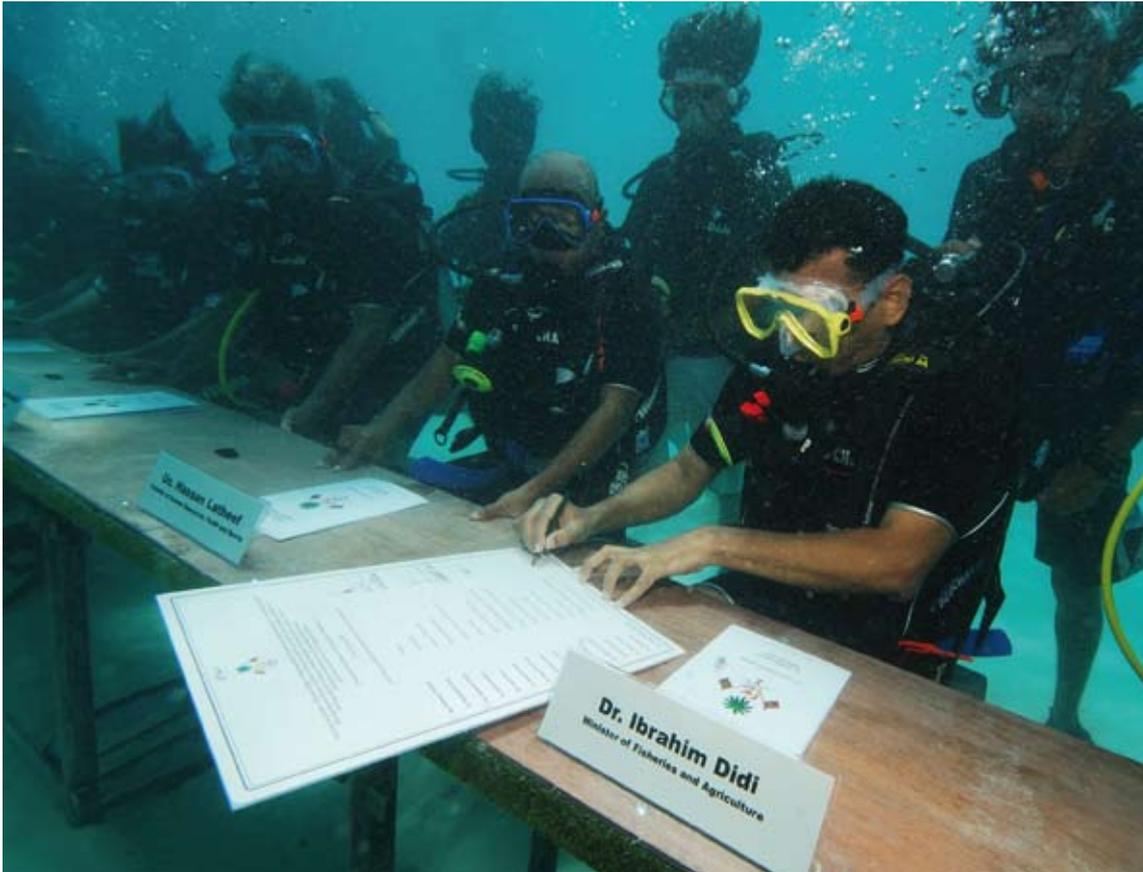
1.4 > Selbst wenn es gelingt, den Ausstoß der Klimagase und insbesondere von CO₂ bis zum Ende dieses Jahrhunderts deutlich zu reduzieren, dürften die Folgen erheblich sein. CO₂ ist langlebig und wird für viele Jahrhunderte in der Atmosphäre bleiben. Damit wird die Temperatur auf der Erde noch für ein Jahrhundert oder länger um wenige Zehntelgrad steigen. Da die Wärme nur langsam bis in die Tiefen des Meeres vordringt, wird sich auch das Wasser nur allmählich ausdehnen und der Meeresspiegel über lange Zeit langsam weiter steigen. Auch das Abschmelzen der großen Inlandeismassen in der Antarktis oder in Grönland ist träge. Über Jahrhunderte oder gar Jahrtausende wird dort Schmelzwasser ins Meer fließen und zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Die Abbildung ist eine prinzipielle Veranschaulichung für eine Stabilisierung auf beliebigen Niveaus zwischen 450 und 1000 parts per million (ppm) und trägt daher keine Einheiten auf der Auswirkungachse.

Wie der Mensch das Klima verändert

In den vergangenen hundert Jahren hat der Einfluss des Menschen auf das Klima stark zugenommen. Der Mensch setzt Unmengen von klimarelevanten Spurengasen in die Atmosphäre frei. Er verändert dadurch die Strahlungsbilanz der Atmosphäre und führt so eine globale Erwärmung herbei. Zu diesen klimarelevanten Spurengasen gehört nicht nur das Kohlendioxid, sondern auch Methan, Distickstoffoxid (Lachgas), die halogenierten Fluorkohlenwasserstoffe, die perfluorierten Kohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid. Von besonderem Interesse aber ist das Kohlendioxid (CO₂), weil der weltweite Ausstoß enorm ist. Es wird vor allem bei der Verbrennung der fossilen Rohstoffe (Erdöl, Erdgas und Kohle) freigesetzt – in Automotoren, in Kraftwerken oder in den Heizungskesseln von Wohngebäuden. Inzwischen hat sich sein Gehalt in der

Atmosphäre gegenüber dem vorindustriellen Wert von 280 parts per million (ppm) auf heute fast 390 ppm erhöht. Damit hat auch die Temperatur im Laufe von wenigen Jahrzehnten zugenommen. Auf der Zeitskala von Jahrzehnten oder einigen Jahrhunderten finden auch die – intern angeregten – Veränderungen in den Ozeanen statt, zum Beispiel Änderungen des **Golfstroms**. Diese haben einen entscheidenden Einfluss auf das Klima und auf die Konzentration der Klimagase in der Atmosphäre, da sie ganz erheblich an den globalen Stoffkreisläufen wie dem Kohlenstoffkreislauf beteiligt sind. Kohlendioxid etwa löst sich gut im Wasser. So haben die Ozeane bis heute etwa die Hälfte des vom Menschen seit dem Beginn der Industrialisierung ausgestoßenen und durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe entstandenen Kohlendioxids aufgenommen. Ob und wie stark sich das Klima ändern wird, ist daher auch aus den Meeren ablesbar.

Das Klima wird sich künftig nur sehr langsam verändern, weil die Ozeane mit ihrem riesigen Wasserkörper sehr träge auf Veränderungen reagieren. Daher werden viele Auswirkungen des durch den Menschen ausgelösten Klimawandels nur allmählich sichtbar. Tatsächlich könnten einige dieser Auswirkungen irreversibel sein, wenn erst bestimmte Schwellenwerte überschritten sind. So werden sich das völlige Abschmelzen der grönländischen Gletscher und ein damit verbundener globaler Meeresspiegelanstieg von 7 Metern ab einem bestimmten Punkt nicht mehr aufhalten lassen. Die Lage der Schwellenwerte ist nicht genau bekannt. Eines aber ist klar: Selbst wenn man den Ausstoß von CO₂ auf dem heutigen Niveau stabilisierte, würde das nicht zu einer Stabilisierung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre führen, weil CO₂ ausgesprochen langlebig ist und die sogenannten **Senken**, vor allem das Meer, es nicht so schnell aufnehmen, wie wir Menschen es nachliefern. Anders verhält es sich bei kurzlebigeren Spurengasen wie etwa Methan (CH₄). Stabilisierte man die Methanemissionen auf dem heutigen Niveau, würde sich die Methankonzentration in der Atmosphäre tatsächlich ebenfalls stabilisieren, da das Methan in etwa so schnell aus der Atmosphäre verschwindet, wie es neu ausgestoßen wird. Will man die CO₂-Konzentration auf einem bestimmten Niveau halten, so muss man die Emissionen auf einen Bruchteil der derzeitigen Mengen reduzieren.



1.5 > Um auf die Gefahren der globalen Erwärmung aufmerksam zu machen, hielt die Regierung der Malediven im Herbst 2009 eine Sitzung auf dem Meeresboden ab.

Kohlendioxid und Treibhauseffekt
Kohlendioxid (CO_2), oder chemisch korrekt: Kohlenstoffdioxid, und andere klimarelevante Spurengase reichern sich in der Atmosphäre an. Sie lassen die kurzweilige Strahlung der Sonne zunächst passieren. Diese wird an der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt und als langwellige Strahlung zurückgeworfen. Wie die Glasscheibe eines Treibhauses verhindern die Gase, dass diese langwellige Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht. Die Erde heizt sich auf.

Eine schleichende Katastrophe

Die Trägheit des Klimas wird dazu führen, dass sich selbst lange nach der Stabilisierung der CO_2 -Konzentration das Klima weiter verändern wird. Klimamodelle zeigen, dass sich die oberflächennahe Lufttemperatur noch über mindestens ein Jahrhundert erhöht. Der Meeresspiegel wird sogar noch über mehrere Jahrhunderte weiter ansteigen, weil sich erstens das Meerwasser durch die langsame Erwärmung der Tiefsee nur allmählich ausdehnt und weil zweitens die kontinentalen Eisschilde in der Arktis und Antarktis vermutlich nur sehr langsam auf die Erwärmung der Atmosphäre reagieren, wodurch sich das Abschmelzen der Gletscher über einen langen Zeitraum von vielen Jahrtausenden hinziehen wird. Es wird daher sehr lange dauern, bis ein neuer Gleichgewichtszustand des Meeresspiegels erreicht wird.

Wissenschaftler halten es allerdings ebenso für möglich, dass der grönländische Eisschild bei einer zu starken Erwärmung noch in diesem Jahrtausend komplett abschmilzt und im Meer verschwindet. Der Eispanzer könnte förmlich auseinanderbrechen. Riesige Teile würden ins Meer gelangen. Durch die enormen Mengen an Süßwasser könnte sich die Ozeanzirkulation, beispielsweise beim Golfstrom, grundlegend ändern. Zudem würde der Meeresspiegel im Extremfall um deutlich mehr als einen Meter pro Jahrhundert steigen.

Die Trägheit des Klimasystems und die Gefahr, dass die Entwicklungen irreversibel sind, sollten Anlass für vorausschauendes Handeln sein. Die heute bereits messbaren Auswirkungen des Klimawandels zeigen in keiner Weise das ganze Ausmaß der bisher durch den Menschen verursachten Klimaänderung. Die Menschheit wird sie erst in einigen Jahrzehnten deutlicher zu spüren bekommen.

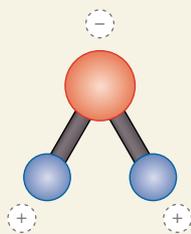
Wasser – ein ganz besonderes Molekül

Wasser verhält sich anders als die meisten anderen chemischen Stoffe. In fast allen Substanzen fügen sich Atome und Moleküle umso dichter zusammen, je kälter es wird. Sie erstarren. Wasser hingegen hat seine größte Dichte bei 4 Grad Celsius, weil sich die Wassermoleküle bei dieser Temperatur am dichtesten zusammenlagern. Viele Süßwasserseen weisen an ihrer tiefsten Stelle eine Temperatur von 4 Grad auf, weil das schwere Wasser zu Boden sinkt. In der festen Phase, im Eiskristall, liegen die Wassermoleküle erstaunlicherweise wieder weiter auseinander. Man spricht daher auch von der Anomalie des Wassers. Eis ist also leichter und schwimmt oben. So sind auch die großen Meeresgebiete in polaren Breiten mit Eis bedeckt. Die Ursache für diese Anomalie sind die besonderen Eigenschaften des Wassermoleküls (H_2O). Sein Sauerstoffatom (O) und die beiden Wasserstoffatome (H) sind asymmetrisch angeordnet. Das Wassermolekül wird damit zum Dipol, zu einem Molekül mit einem negativ und einem positiv geladenen Ende.

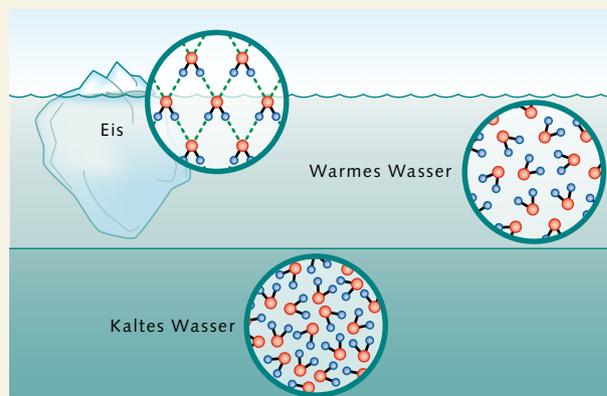
Je nach Temperatur ordnen sich diese Dipole nach ihren Ladungen zu Aggregaten zusammen – beispielsweise zu einem Eiskristall. Der Dipolcharakter des Wassers ist für das Klima ganz entscheidend: Da die Wasserdipole wie kleine Magnete zusammenhalten, reagiert Wasser relativ träge auf Erwärmung oder Abkühlung. Tatsächlich besitzt Wasser die höchste Wärmekapazität unter den flüssigen und festen Stoffen – mit Ausnahme von Ammoniak. Das bedeutet, dass Wasser große Mengen Wärme aufnehmen kann, bevor es verdampft. Auch der Gefrier- und der Siedepunkt des Wassers (0 beziehungsweise 100 Grad Celsius), die so alltäglich erscheinen, sind eher ungewöhnlich. Wäre das

Wassermolekül symmetrisch und damit kein Dipol, würde Wasser schon bei minus 110 Grad Celsius schmelzen und bei minus 80 Grad sieden. Die Trägheit des Klimas ist vor allem Folge dieser hohen Wärmekapazität.

Das Wasser beeinflusst das Klima aber nicht nur im flüssigen oder festen Zustand. In Form von Wasserdampf hat H_2O einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmehaushalt der Erde: Wasserdampf allein trägt zu etwa zwei Dritteln zum natürlichen Treibhauseffekt bei. Zudem verstärkt es die Klimawirkung anderer Stoffe. Steigt beispielsweise die Temperatur infolge eines höheren Kohlendioxidgehalts, so steigt auch der Gehalt an Wasserdampf, da eine wärmere Atmosphäre dauerhaft mehr Wasserdampf speichern kann. Da Wasser wegen seines Dipols Infrarotstrahlung sehr wirksam absorbiert, verdoppelt es in etwa die ursprüngliche durch das Kohlendioxid hervorgerufene Erwärmung. Eine weitere Eigenschaft des Wassers ist, dass es Salze lösen kann. Der Salzgehalt des Meeres beträgt durchschnittlich 34,7 Promille. Dieser verändert wiederum die Eigenschaften des Wassers. So verschiebt sich das Dichtemaximum von plus 4 Grad beim Süßwasser auf minus 3,8 Grad. Dieser Wert liegt sogar unter dem Gefrierpunkt von Meerwasser von minus 1,9 Grad. Anders als im Süßwasser nimmt die Dichte des Salzwassers also zu, wenn es unter plus 4 Grad Celsius abkühlt. So bildet sich dichtes Wasser, bis schließlich die Eisbildung einsetzt. Diese Dichteeigenart ist der Motor für eines der wichtigsten Elemente des Klimasystems – die Konvektion: Abgekühltes dichtes und damit schweres Salzwasser sinkt in die Tiefe ab. An der Meeresoberfläche strömt relativ warmes Wasser nach.



1.7 > Das Wassermolekül ist asymmetrisch und weist daher auf seinen beiden Seiten unterschiedliche Ladungen auf (links). Man spricht von einem Dipol. Dadurch verhält es sich anders als andere Substanzen. Eis ist weniger dicht (oben) und schwimmt an der Oberfläche. 4 Grad kaltes Süßwasser ist am dichtesten (unten) und sinkt in die Tiefe. Warmes Wasser sichtet sich darüber ein (Mitte).



Doch wie entstehen in den Ozeanen eigentlich Wassermassen unterschiedlicher Dichte, die letztlich auch die Konvektion antreiben? Zu den wichtigsten Faktoren zählen die Lufttemperatur, die Verdunstung und der Niederschlag. In den polaren Konvektionsgebieten spielt darüber hinaus auch noch das Gefrieren des Wassers eine zentrale Rolle. Da Eis nur ungefähr 5 Promille Salz enthält, setzt es während des Gefrierens eine beträchtliche Menge Salz frei, wodurch der Salzgehalt in den umgebenden Mee-

resgebieten zunimmt und sich somit zugleich die Dichte des Wassers erhöht. Das kalte salzreiche Wasser ist so dicht, dass es bei der arktischen Konvektion bis in etwa 2000 Metern Tiefe absinkt. Dieses Wasser bezeichnet man als Nordatlantisches Tiefenwasser (North Atlantic Deep Water, NADW).

Das weltweite Förderband

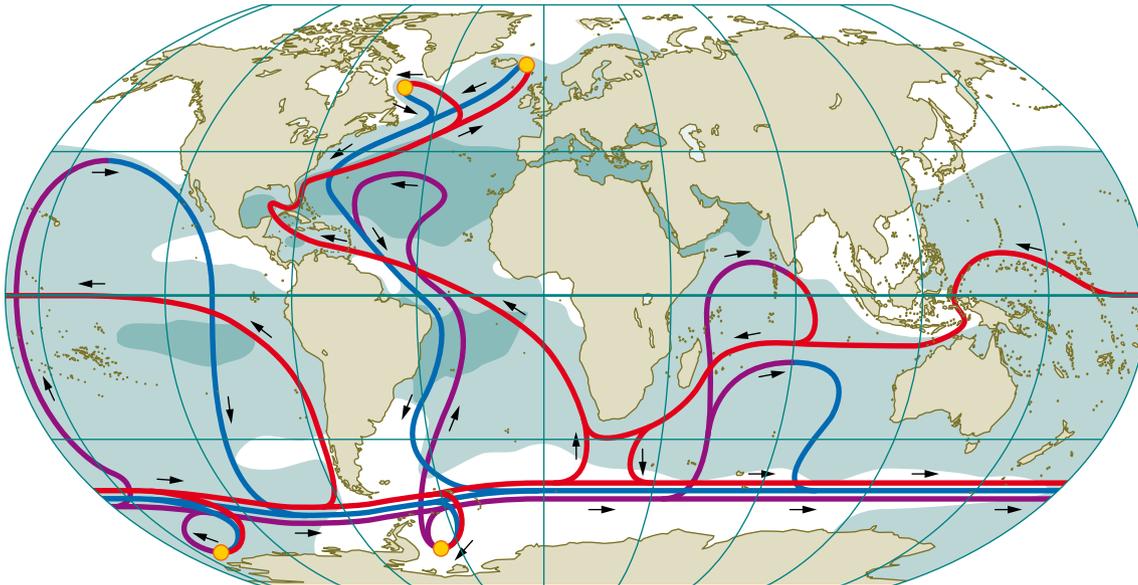
Auch in den antarktischen Gebieten findet Konvektion statt. Hier entstehen jene Wassermassen, die aufgrund ihres noch höheren Salzgehalts bis ganz zum Meeresboden hinabsinken. Man bezeichnet sie als Antarktisches Bodenwasser (Antarctic Bottom Water, AABW), das am Meeresboden um den halben Globus bis hinauf in den Nordatlantik wandert. Das Antarctic Bottom Water ist also zugleich jenes Tiefenwasser, über dem sich das North Atlantic Deep Water während der Konvektion als mächtige Zwischenschicht einlagert. Das North Atlantic Deep Water entsteht in der Grönlandsee und der Labradorsee. Die nebenstehende Abbildung zeigt schematisch den globalen Verlauf seiner Ausbreitung und den Rückstrom warmen Wassers in die oberflächennahen Schichten – das eindrucksvolle globale Förderband der thermohalinen Zirkulation. Das North Atlantic Deep Water und vor allem auch das Antarctic Bottom Water bleiben erstaunlich lange in der Tiefe: Wie man heute aus Datierungen von Tiefenwasser anhand radioaktiver Kohlenstoffisotope weiß, beträgt die Zykluszeit vom Abtauchen in die Tiefe bis zum Wiederauftauchen einige Hundert oder sogar bis zu etwa tausend Jahre.

Die meiste Zeit befindet sich das Wasser im kalten Bereich des thermohalinen Förderbands in der Tiefe, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit dort aufgrund der höheren Dichte mit etwa 1 bis 3 Kilometern pro Tag gering ist. Die Menge des am Kreislauf beteiligten Wassers ist geradezu gigantisch. Sie beträgt 400 000 Kubikkilometer, was etwa einem Drittel des gesamten Ozeanwassers entspricht. Damit ließe sich ein Becken von 400 Kilometern Länge, 100 Kilometern Breite und 10 Kilometern Tiefe füllen. Pro Sekunde transportiert das ozeanische Förderband etwa 20 Millionen Kubikmeter Wasser, was fast 5000-mal mehr ist, als an den Niagarafällen in Nordamerika in die Tiefe rauscht.

Der Weg des Wassers in die Tiefe

Nirgends sonst in den Ozeanen gleitet Oberflächenwasser so schnell in die Tiefe wie in den Konvektionsgebieten, und an keiner anderen Stelle machen sich Veränderungen an der Meeresoberfläche oder in der Atmosphäre so schnell im Innern des Meeres bemerkbar wie hier – etwa der wegen der steigenden Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre wachsende Kohlendioxidgehalt im Wasser. Die Konvektion verbindet also zwei Bereiche des Ozeans miteinander, die sich voneinander unterscheiden: die oberflächennahen Schichten, die mit den variierenden atmosphärischen Wind-, Strahlungs- und Niederschlagsfeldern in Kontakt stehen, und die tiefen Bereiche des Ozeans. Oben schwanken Strömungen, Temperaturen oder Salzgehalte innerhalb von Wochen oder Monaten. In der Tiefe hingegen ändern sich die Umgebungsbedingungen eher im Laufe von Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten.

In den gleichmäßig warmen Meeresgebieten der Tropen (die warmen Regionen der Erde zwischen 23,5 Grad nördlicher bis 23,5 Grad südlicher Breite) und Subtropen (die Regionen zwischen dem 23,5. und dem 40. Breitengrad auf der Nord- und auf der Südhalbkugel) gibt es keinen mit der Konvektion vergleichbaren Austausch zwischen Oberfläche und Tiefe. Der Grund: Im Jahresmittel findet eine ständige Erwärmung der oberflächennahen Schichten statt. Dieses mindestens 10 Grad Celsius warme Wasser hat eine relativ geringe Dichte und schwimmt deshalb als warme Deckschicht auf den tieferen kälteren Wassermassen. Beide Schichten sind klar voneinander getrennt. Sie gehen nicht allmählich ineinander über. Stattdessen gibt es dort, wo sie sich berühren, einen starken Temperatur- und damit Dichtesprung, der das Vordringen der Wärme in die Tiefe behindert. Die warme Deckschicht ist mit durchschnittlich einigen Hundert Metern Mächtigkeit, gemessen an der Tiefe der Ozeane, relativ dünn. In sehr warmen Meeresgebieten wie dem westlichen äquatorialen Pazifik schließlich gibt es kaum Durchmischungen. Zu den Polen hin aber sind die Meere stärker durchmischt und weniger stark geschichtet. Da ein klarer Temperatur- und Dichtesprung fehlt, können Veränderungen an der Meeresoberfläche dort bis ins Innere des Ozeans ausstrahlen. Die Konvektionsgebiete aber bleiben der Expresslift in die Tiefe.



1.8 > Die weltweiten ozeanischen Strömungen der thermohalinen Zirkulation sind ausgesprochen komplex. Nur im Atlantik erkennt man deutlich, wie kaltes salzreiches Oberflächenwasser (blau) in der Tiefe gen Äquator strömt. Warmes Oberflächenwasser (rot) strömt in der Gegenrichtung polwärts. Nicht überall sind die Strömungsverhältnisse so deutlich wie im Golfstromsystem (zwischen Nordamerika und Europa). So

fließt etwa um die Antarktis der sogenannte Zirkumpolarstrom in der gesamten Wassersäule. Die kleinen gelben Kreise in den Polarregionen zeigen Konvektionsgebiete. Die dunklen Gebiete sind durch hohen Salzgehalt gekennzeichnet, die weißen durch niedrigen. Salzige Wassermassen findet man, abgesehen von den Konvektionsgebieten, vor allem in den warmen Subtropen, da hier die Verdunstung besonders stark ist.

Die Angst vor dem Versiegen des Golfstroms

Lange haben Experten diskutiert, inwieweit die thermohaline Zirkulation und mit ihr die Umwälzbewegung im Atlantik durch den Klimawandel beeinflusst werden könnten. Immerhin könnte sich die Konvektion in den höheren Breiten durch die anthropogene, also vom Menschen verursachte Erwärmung der Atmosphäre und eine damit verbundene Verringerung der Dichte des Oberflächenwassers abschwächen. Diese Dichteabnahme ist vor allem auf das Ausfüßen des Wassers im Nordatlantik zurückzuführen, wobei der Klimawandel vermutlich auf mehreren Wegen die Süßwasserzufuhr verstärken und damit auf die Konvektion und die thermohaline Zirkulation einwirken würde. Zum einen dürften die Niederschläge über dem Meer und über dem Festland zunehmen. Zum anderen wird Süßwasser vermehrt durch das Abschmelzen der Gletscher ins Meer gelangen. Außerdem bildet sich weniger Eis, wenn es wärmer wird, sodass sich

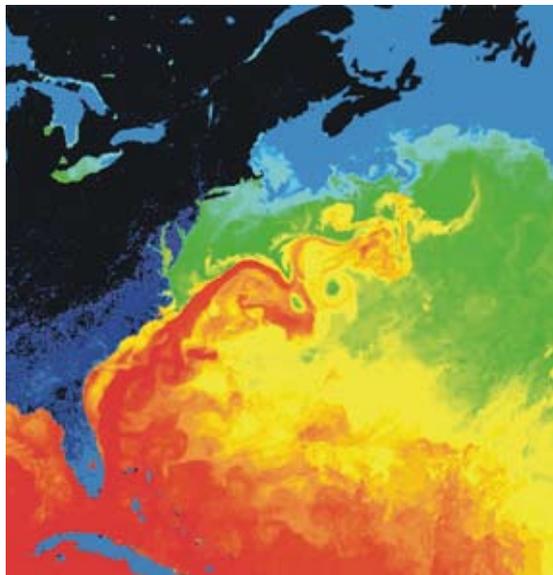
die Salzkonzentration im Oberflächenwasser nur in geringem Maße erhöht.

Die heutigen Klimamodelle gehen von einer Abschwächung der Umwälzbewegung im Atlantik bis zum Ende dieses Jahrhunderts um etwa 25 Prozent aus. Damit würde zugleich auch weniger Wärme aus den Tropen und Subtropen nach Norden transportiert. Eiszeitszenarien, wie sie schon oft in der Literatur oder in Kinofilmen gezeichnet wurden, sind trotzdem völlig unangebracht, selbst dann, wenn die Zirkulation völlig zusammenbrechen sollte. Denn die daraus resultierende verringerte Wärmezufuhr wird bei Weitem durch die künftige globale Erwärmung aufgrund des verstärkten Treibhauseffekts wettgemacht. Die Erde heizt sich durch die isolierende Wirkung des Kohlendioxids in der Atmosphäre auf. Diese Temperaturzunahme würde den verringerten Wärmetransport aus den Tropen nach Norden im Bereich des Nordatlantiks ausgleichen und auf den angrenzenden Landgebieten sogar deutlich übertreffen. Die Wissen-

schaftler sprechen daher im Zusammenhang mit dem menschlichen Einfluss auf das Klima von einer „Heißzeit“ und keineswegs von einer „Eiszeit“.

Wirbel im Meer – eine wichtige Klimakomponente

Wärme wird im Meer nicht nur durch das große globale Förderband der thermohalinen Zirkulation, sondern auch durch Wirbel transportiert, ähnlich wie die Tiefdruckgebiete in der Atmosphäre. Im Vergleich zu den oft mehrere Hundert Kilometer breiten Tiefdruckgebieten sind sie jedoch deutlich kleiner. Diese sogenannten mesoskaligen Wirbel entstehen, wenn Wasser zwischen Gebieten mit großen Dichte- oder Temperaturunterschieden strömt. Sie sind auf Satellitenaufnahmen deutlich zu erkennen. Messungen zeigen, dass sie nicht nur an der Meeresoberfläche wie beispielsweise im Bereich des Nordatlantiks auftreten, sondern sich auch in ausgesprochen großen Tiefen von einigen Tausend Metern wie etwa vor Brasilien bemerkbar machen. Diese Tiefseewirbel spielen aufgrund ihres starken Einflusses auf die großräumigen Wärmetransporte für das langfristige Klimageschehen ebenfalls eine wichtige Rolle.



1.9 > Momentaufnahme des Golfstroms und seiner Verwirbelungen. Warme Bereiche sind rot eingefärbt, kalte Bereiche blau.

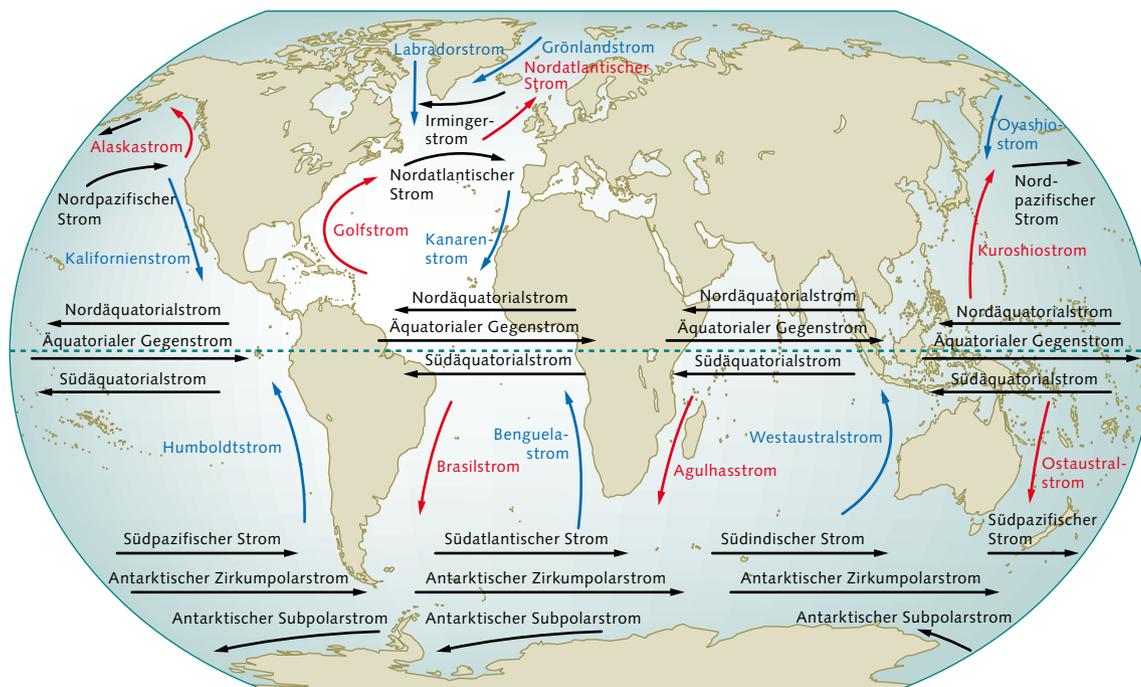
Wechselhaft und dynamisch – der Einfluss des Windes

Neben der Konvektion regen auch die Winde die Strömungen im Meer an. Zusammen mit der ablenkenden Kraft der Erdrotation (Corioliskraft) und der Gestalt der Meeresbecken verleiht der Wind dem weltweiten System der Oberflächenströmungen seine charakteristische Form. Besonders auffällig sind Wirbel, die sich über ganze Meeresbecken, etwa zwischen Amerika und Europa, erstrecken. Zu diesen Oberflächenströmungen gehören auch der Golfstrom im Atlantischen Ozean, der durch den Wind und die thermohaline Zirkulation zugleich angetrieben wird, sowie der Kuroshio im Pazifischen Ozean, dessen Intensität mit der Tiefe abnimmt.

Der Golfstrom ist ein relativ schneller Strom. An der Küste Nordamerikas erreicht er an der Meeresoberfläche Geschwindigkeiten von etwa 3,6 Kilometern pro Stunde, was einem gemächlichen Fußgängertempo entspricht. Er reicht bis in eine Tiefe von etwa 2000 Metern hinab, wo er etwa zehnmals langsamer fließt, weil der Einfluss des Windes hier geringer und die Dichte des Wassers größer ist. Nichtsdestotrotz kann der Wind durchaus direkt bis hinab in größere Tiefen wirken. So kommt es vor, dass sich für längere Zeit die typischen Windverhältnisse ändern – dass etwa die stetigen **Passatwinde** über Monate aus anderen Richtungen wehen. Dadurch kann sich der Auftrieb der Wassermassen verändern, wodurch im Innern des Ozeans Wellen mit Strömungen entstehen, die für Jahrzehnte in der Tiefe nachschwingen. Solche Wellen können auch die Meerestemperatur und damit das regionale Klima verändern. Vom Satelliten aus werden die Wellen als langsam wandernde Ausbeulungen der Meeresoberfläche wahrgenommen.

Darüber hinaus verursachen die vorherrschenden Winde in bestimmten Regionen beständige Auftriebs- und Absinkbewegungen. In manchen Gebieten treiben die Winde Oberflächenwasser von den Landmassen weg, sodass kaltes Wasser aus der Tiefe aufsteigen kann. Dort sind daher die Temperaturen an der Meeresoberfläche besonders niedrig. Wichtige Auftriebsgebiete finden sich an den westlichen Rändern der Kontinente, an denen die Winde küstenparallel wehen (Chile, Kalifornien, Namibia). So wird aufgrund der Corioliskraft beispielsweise auf

Die Corioliskraft
Die Erddrehung führt dazu, dass alle freien und geradlinigen Bewegungen wie etwa Luft- oder Wasserströmungen auf der Erde seitlich abgelenkt werden. Die ablenkende Kraft nennt man Corioliskraft oder Coriolisbeschleunigung. Auf der Nord- und Südhalbkugel wirkt sie in entgegengesetzter Richtung. Benannt ist die Corioliskraft nach dem französischen Naturforscher Gaspard Gustave de Coriolis (1792 bis 1843), der sie mathematisch hergeleitet hat.



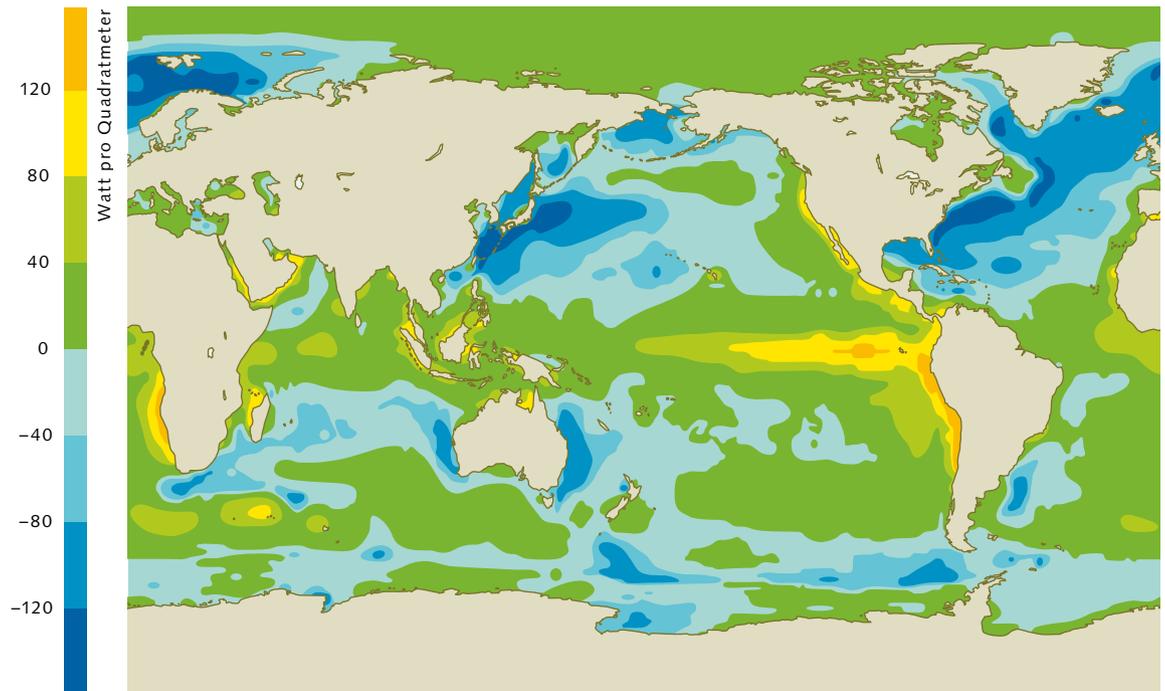
1.10 > Die großen Meeresströme der Welt sind auch das Ergebnis der vorherrschenden Winde. Warme Meeresströme sind rot, kühle Meeresströme blau gekennzeichnet.

der Südhalbkugel das Wasser nach links von der Küste weggeführt, wenn der Wind aus Süd weht. Dadurch kommt eine Art Walzenbewegung in Gang: An der Oberfläche wird das Wasser weg bewegt, aus der Tiefe steigt Wasser auf. Dieses aufsteigende Wasser ist häufig nährstoffreich, weshalb viele Auftriebsgebiete auch besonders fischreich sind.

Der Ozean – der globale Wärmespeicher

Die großen Meeresströme transportieren nicht allein riesige Wassermassen, sondern zugleich auch gigantische Wärmemengen um den Globus. So wie der Wassertank einer Heizungsanlage Wärme aus der Solaranlage auf dem Dach speichert, wirken auch die Ozeane wie ein gewaltiges Wärmereservoir, in dem die Sonnenenergie lange erhalten bleibt. Die großen Meeresströme transportieren diese Wärme über Tausende von Kilometern und beeinflussen damit erheblich, wie der Golfstrom zeigt, das Klima in vielen Regionen der Erde. In den warmen Tropen und in den Subtropen bis etwa zum 30. Breitengrad trifft im Jahresdurchschnitt mehr Wärme auf die Erdoberfläche,

als diese abgibt. In den höheren Breiten und zu den Polen hin ist dieses Verhältnis umgekehrt. Die Folge ist, dass die Atmosphäre und die Ozeane zum Ausgleich Energie vom Äquator nach Norden und nach Süden transportieren. In manchen Tropenregionen wie etwa dem Ostpazifik gewinnt das Meer mehr als 100 Watt Wärme pro Quadratmeter – in etwa so viel wie ein Heizkessel liefert, um eine Wohnung behaglich zu machen. In den höheren Breiten gibt das Meer die Wärme wieder ab. Am größten ist der Verlust mit Werten von bis zu 200 Watt pro Quadratmeter vor den Ostküsten Nordamerikas und Asiens sowie in Teilen der Arktis. Im Bereich des Nordatlantiks und des Nordpazifiks geben die Ozeane die Wärme durchaus großräumig ab. Versorgt werden all jene Regionen, in die die großen Stromsysteme das warme Wasser tragen – etwa Europa. Die riesigen Meeresströme transportieren eine maximale Wärmemenge von knapp 3 Petawatt (Billiarde Watt) in Richtung Norden – rund 600-mal mehr, als alle Kraftwerke der Welt zusammen leisten. Aber auch die Atmosphäre trägt zum Energieausgleich zwischen den Tropen und den kälteren, höheren Breiten bei. Sie transportiert weitere 2,5 bis 3 Petawatt Wärme, sodass sich ein



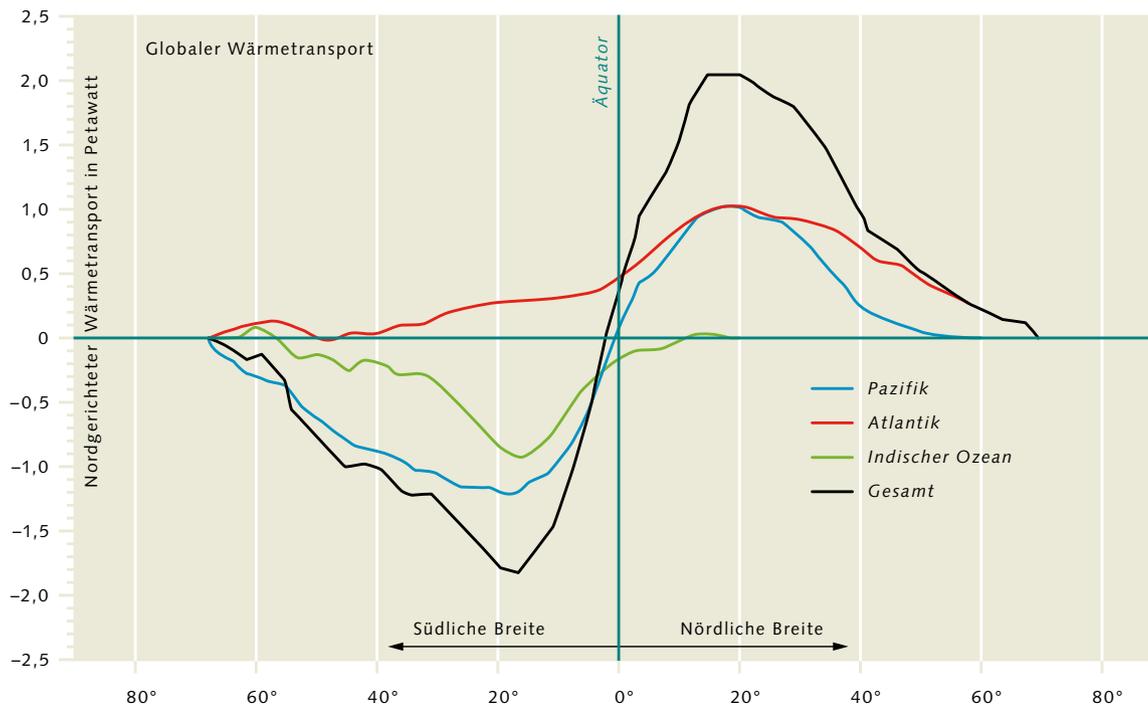
1.11 > Der Wärmeaustausch zwischen der Atmosphäre und der Meeresoberfläche (in Watt pro Quadratmeter) ist je nach Meeresgebiet recht unterschiedlich. Positive Werte geben eine Wärmeaufnahme – vor allem in den Tropen – und negative

Werte einen Wärmeverlust – vor allem in den nördlichen Breiten – des Meeres an. In den arktischen Regionen ist der Wärmeverlust relativ gering, da das Meereis die Wärme wie eine Isolierschicht im Wasser zurückhält.

nordgerichteter Wärmetransport von insgesamt 5,5 bis 6 Petawatt ergibt. In der Atmosphäre erfolgt der Wärmetransport in europäischen Breiten vor allem durch kreisende Tiefdruckgebiete. Im Atlantischen Ozean sind die Strömungen hingegen sehr viel geordneter, sodass die Wärme direkt nach Norden transportiert wird. Dort strömt warmes Wasser aus den Tropen nordwärts bis weit in den Arktischen Ozean, wo sich das Wasser abkühlt und Wärme an die Umgebung abgibt. Durch die Abkühlung nimmt die Dichte des Meerwassers zu. Es sinkt in die Tiefe und wandert gen Süden. Das atlantische Stromsystem transportiert demnach riesige Mengen Wärme nach Norden. Bei diesem Transport übersteigt der thermohaline den durch die Winde angetriebenen Anteil bei Weitem.

Der Atlantik und auch der Pazifik tragen jeweils etwa 1 Petawatt Wärme aus den Tropen und Subtropen in nördliche Richtung. Der Anteil des Indischen Ozeans hingegen ist vernachlässigbar gering.

Dabei nimmt der Atlantik eine Ausnahmestellung unter den Meeren ein. Er ist das einzige Ozeanbecken, in dem der Wärmetransport überall, also auch auf der Südhalbkugel, nach Norden gerichtet ist. Die Tendenz nach Norden kennt jeder Nordwesteuropäer dank des Golfstroms und des Nordatlantikstroms: Das Klima im Bereich des Nordatlantiks, speziell in Nordwesteuropa und auch in Deutschland, ist besonders milde. So sind die Winter in anderen Regionen, die auf denselben Breitengraden liegen, deutlich kälter. In Kanada etwa liegen die Temperaturen im Winter um rund 10 Grad Celsius niedriger als in Westeuropa. Allerdings bewirkt nicht allein die Ozeanzirkulation diese Milde. Auch Luftströmungen tragen erheblich dazu bei. Durch die Verteilung der Gebirge, vor allem die Lage der Rocky Mountains, die sich von Nord nach Süd die nordamerikanische Westküste entlangziehen, und den Einfluss der Corioliskraft entstehen in der Atmosphäre sehr stabile großräumige Wirbel, sogenannte stehende



1.12 > Die Ozeane tragen unterschiedlich stark zum globalen Wärmetransport bei. Nur der Atlantik transportiert auf der Südhalbkugel Wärme nach Norden (positive Werte). Der Äquator liegt bei 0 Grad. Sowohl der Atlantik als auch der Pazifik

tragen jeweils etwa 1 Petawatt Wärme bis 20 Grad nördlicher Breite. Weiter nördlich überwiegt der Anteil des Atlantiks. Der Indische Ozean wiederum beeinflusst den nördlichen Wärmetransport kaum.

planetare Wellen. Ein solcher Wirbel liegt auch über den USA, weil die Rocky Mountains als Hindernis große Luftmassen ablenken. Ein Teil dieses Wirbels beschert uns im Durchschnitt Westwinde, die relativ milde Luft vom Atlantik bis nach Nordwesteuropa tragen und uns vor der Kälte aus dem Osten schützen.

Zukunft ungewiss – das Meereis

Das Meereis der arktischen Regionen hat einen erheblichen Einfluss auf den Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean, denn es wirkt wie eine Dämmschicht, die die im Wasser enthaltene Wärme zurückhält. Vergewagt man sich, wie groß die Eisflächen sind, wird deutlich, dass auch sie Auswirkungen auf das globale Klima haben. Im Arktischen Ozean ist das Meereis, das gemeinhin auch als Packeis bezeichnet wird, im Mittel 3 Meter dick. Im Südlichen Ozean misst es im Schnitt

etwa 1 Meter. Die Meereisfläche wächst und schrumpft mit den Jahreszeiten. Im Jahresdurchschnitt sind rund 7 Prozent der Ozeane (circa 23 Millionen Quadratkilometer) mit Eis bedeckt, was in etwa der dreifachen Fläche Australiens entspricht. Dagegen sind die Landeisflächen relativ stabil. Sie bedecken permanent etwa 10 Prozent der Landoberfläche (14,8 Millionen Quadratkilometer). Wissenschaftler bezeichnen die vereisten Gebiete der Erde als Kryosphäre. Neben dem Landeis und dem Meereis zählt dazu auch das Schelfeis, die ins Meer ragenden Teile kontinentaler Eisschilde. Die Veränderungen des Meereises, wie etwa die Ausdehnung, der Bedeckungsgrad, die Dicke und die Bewegung, werden durch dynamische Prozesse (beispielsweise Meeresströmungen) und durch **thermodynamische Prozesse** (Gefrieren und Schmelzen) hervorgerufen. Diese wiederum werden durch die Sonnenstrahlung sowie die Wärmeflüsse in den Ozeanen beeinflusst.



1.13 > Eisberge bestehen in der Regel aus Süßwasser oder enthalten nur geringe Mengen an Salz. Aufgrund ihrer im Vergleich zum Meerwasser etwas geringeren Dichte ragt nur ein kleiner Teil aus dem Wasser. Der weitaus größere Teil befindet sich unter der Wasserlinie.

Eines der auffälligsten und wichtigsten Merkmale der Klimaschwankungen ist die Veränderung der Meereisausdehnung in den Polargebieten. So reicht das arktische Meereis in manchen Wintern deutlich weiter nach Süden als in anderen. Geophysiker betrachten das Meereis nüchtern als eine dünne, durchbrochene Schicht auf den polaren Ozeanen, die von Wind und Meeresströmungen bewegt wird und sich in ihrer Dicke und Ausdehnung verändert. Meereis bildet die Grenze zwischen den beiden großen und wichtigen Komponenten des Erdsystems, der Atmosphäre und dem Ozean. Es beeinflusst deren Wech-

selwirkung ganz erheblich. So besitzt Meereis ein hohes Reflexionsvermögen, eine hohe Albedo, und reflektiert einen beträchtlichen Teil des einfallenden Sonnenlichts. Dieser Effekt verstärkt sich noch, wenn Schnee auf dem Eis liegt. Das Meereis beeinflusst also die Strahlungsbilanz der Erde und spielt damit eine wichtige Rolle im Klimasystem.

Der Einfluss des Meereises auf das Klima wird noch dadurch verstärkt, dass es die Atmosphäre und den Ozean voneinander isoliert. So können Wärme und Windenergie zwischen Atmosphäre und Ozean nur sehr schlecht ausgetauscht werden. Über den Meereisflächen ist die Atmosphäre daher deutlich kälter als über dem offenen Ozean. Dadurch verstärkt sich auch der Temperaturunterschied zwischen den Tropen, Subtropen und den Polargebieten. Denn in warmen Regionen steigt Luft verstärkt auf, der Luftdruck sinkt entsprechend. In den sehr kalten Bereichen hingegen lastet die Luft schwer, sodass sich starke Hochdruckzonen bilden. Die ausgleichende Luftströmung zwischen Hoch und Tief ist entsprechend stark und bewirkt im Zusammenspiel mit der Corioliskraft in den mittleren Breiten stärkere Westwinde.

Natürlich beeinflusst das Meereis auch die Konvektion im Ozean und die Bildung von Tiefen- und Bodenwasser. Das Meereis spielt daher eine bedeutende Rolle für die großräumige Ozeanzirkulation, insbesondere für die thermohaline Zirkulation. Wie die globale Erwärmung auf die Meereisbildung und die damit gekoppelten Prozesse genau wirkt, weiß man heute noch nicht. Eis schmilzt, wenn es wärmer wird. Welche Auswirkungen das aber auf die Strömungen hat, lässt sich nur schwer einschätzen. Immerhin simulieren alle Klimamodelle eine beschleunigte Erwärmung in der Arktis bei weiter steigenden Spurengaskonzentrationen.

Zudem beobachtet man in den letzten Jahrzehnten einen deutlichen Rückgang der arktischen Meereisbedeckung. Dabei spielt die sogenannte Eis-Albedo-Rückkopplung eine Rolle, eine positive Rückkopplung. Helle Oberflächen besitzen eine recht große Albedo. Wenn sich das Meereis infolge der globalen Erwärmung also zurückzieht, verringert sich die Albedo und es steht mehr Sonnenenergie zur Verfügung, die zu einer zusätzlichen Erwärmung führt, wodurch noch mehr Eis schmilzt. Dieser Prozess wirkt sich vor allem am Rand des Meereises

aus. Ähnlich wie die dunkle Grasnarbe an den Rändern einer löchrigen Schneedecke erwärmt sich das Meerwasser am Eisrand stärker, sodass das Eis dort schneller abtaut. Je weiter sich das Eis zurückzieht, desto größer wird wiederum die freie, relativ dunkle Meeresfläche. Das Abschmelzen verstärkt sich.

Das Schrumpfen des Meereises könnte den Klimawandel künftig also noch verstärken. Ironischerweise beschert er dem Menschen aber etwas, wovon er schon lange träumt – die Öffnung des nördlichen Seewegs von Europa über die Arktis nach Asien: die Nordostpassage. In den vergangenen Jahren hat sich das Eis im Sommer so weit zurückgezogen, dass die arktischen Gewässer entlang der russischen Nordküste künftig durchgängig von Handelsschiffen durchfahren werden könnten – eine Strecke, die um mehrere Tausend Kilometer kürzer als die Fahrt durch den Suezkanal ist. So hat erst im Frühherbst 2009 eine

Bremer Reederei als eines der ersten Privatunternehmen weltweit die Nordostpassage mit einem Handelsschiff durchfahren. Doch die harten Konsequenzen des Klimawandels werden vermutlich schwerer wiegen als die Vorteile einer befahrbaren Nordroute – auch die negativen Folgen für arktische Lebewesen wie etwa den Eisbären, dessen Lebensraum wegschmilzt, sind beträchtlich.

Die großen Meeresströmungen und ihre Antriebskräfte sind heute gut erforscht. Im Detail aber bleiben noch viele Fragen offen. Noch hat man beispielsweise die thermohaline Zirkulation und das Wechselspiel der treibenden Kräfte nicht restlos aufgeklärt. Verschiedene mathematische Modelle kommen zu verschiedenen Ergebnissen. Zwar nutzen alle Modelle dieselben Gleichungen, Messgrößen und Eingabeparameter. Es ist aber schwierig, kleinräumige Klimaeinflüsse auf regionaler Ebene richtig einzuschätzen und korrekt in die großen, globalen Modelle zu übertragen.

CONCLUSIO

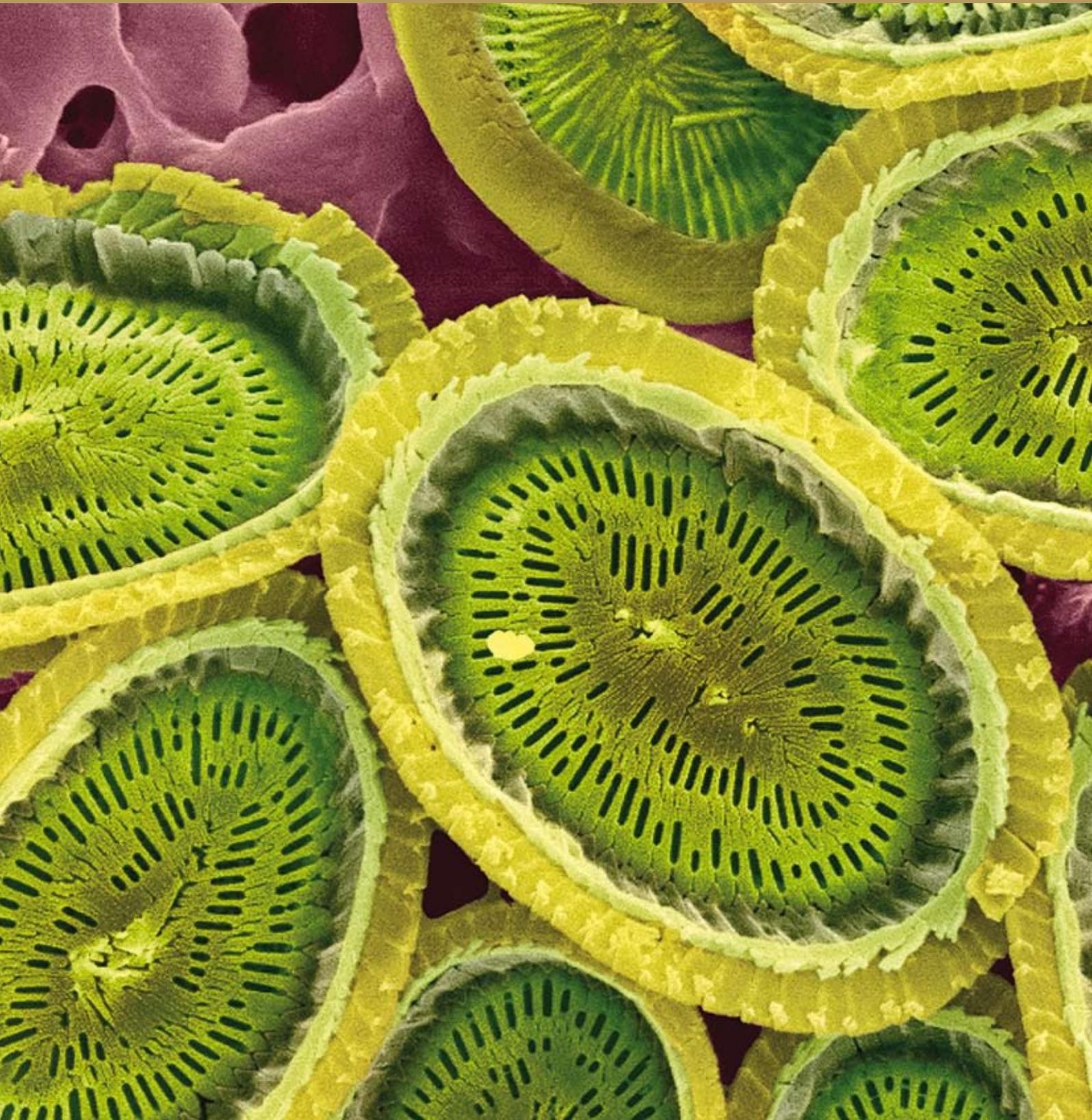
Zeit zu handeln

Der Klimawandel wird sich in vielerlei Hinsicht auf die Meere auswirken und nicht allein die Strömungen oder den Wärmehaushalt des Ozeans verändern. Steigende Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre bringen steigende Konzentrationen in den Ozeanen mit sich. Dadurch bildet sich verstärkt Kohlensäure im Wasser, die die Meere versauern lässt. Die Folgen für die Lebewesen sind heute noch kaum absehbar. Ebenso wenig weiß man, wie sich das Abschwächen der thermohalinen Zirkulation oder des Golfstroms konkret auf die Lebensgemeinschaften im Meer auswirken wird, auf Krebs- oder Fischlarven, die mit den Strömen durch die Ozeane transportiert werden. Während des Klimagipfels in Kopenhagen wurde erneut vor den Gefahren des Meeresspiegelanstiegs gewarnt. Fachleute sind sich heute weitgehend darin einig, dass der Meeresspiegel bis zum Ende dieses Jahrhunderts um etwa einen Meter steigen wird, falls sich der weltweite Ausstoß von Treibhausgasen

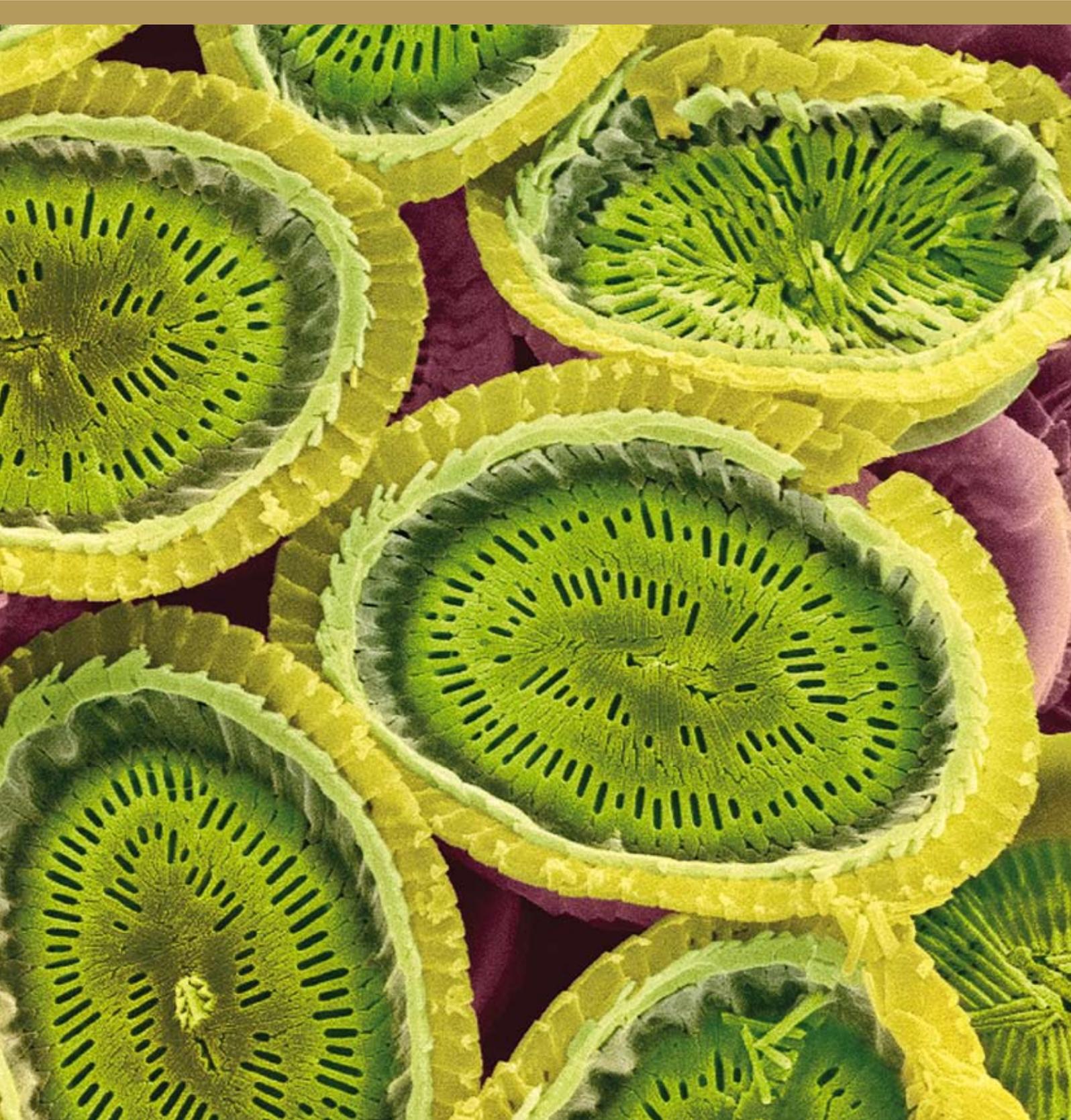
durch uns Menschen weiter so schnell erhöht wie in den letzten Jahrzehnten. Für Inselstaaten wie etwa die Malediven ist das fatal. Innerhalb weniger Jahrzehnte könnten die Einwohner ihre Heimat verlieren. Dass die Wissenschaftler heute noch nicht mit letzter Sicherheit sagen können, wie sich der Klimawandel künftig im Detail auswirken wird, sollte keinesfalls ein Argument dafür sein, nichts zu tun. Die Gefahr ist real. Die Menschheit sollte alles daransetzen, das Experiment Klimawandel so schnell wie möglich zu beenden. Das Klimasystem reagiert träge auf die menschengemachten Veränderungen. Damit besteht die Gefahr, dass bestimmte Entwicklungen schon heute irreversibel sind. Dieses Risiko sollte Anlass sein, vorausschauend zu handeln und den Ausstoß klimarelevanter Gase erheblich zu drosseln. Was die Durchführung von Klimaschutzmaßnahmen betrifft, ist keine Zeit zu verlieren. Vieles deutet darauf hin, dass sich die ärgsten Folgen des Klimawandels noch vermeiden lassen, wenn heute in CO₂-arme Technik investiert würde. Es ist an der Zeit zu handeln.

2

Wie der Klimawandel die
Chemie der Meere verändert



> Der massive Ausstoß von Kohlendioxid in die Atmosphäre wirkt sich auch auf die chemischen und biologischen Prozesse im Meer aus. So könnte die Erwärmung des Wassers dazu führen, dass sich feste Methanlager am Meeresgrund auflösen. Auch werden die Ozeane durch die Aufnahme von zusätzlichem CO_2 versauern. Mit aufwendigen Messungen versuchen Forscher herauszufinden, wie viel CO_2 ins Meer übergeht. Wichtige Informationen liefert dabei der Sauerstoff.



Die Rolle des Meeres als größter CO₂-Speicher

> Die Ozeane nehmen erhebliche Kohlendioxidmengen auf und schlucken damit einen großen Teil des vom Menschen freigesetzten Treibhausgases. Eine Entwarnung ist das trotzdem nicht, denn diese Prozesse ziehen sich über Jahrhunderte hin und werden die Folgen des Klimawandels nicht verhindern können. Zudem ist kaum abzusehen, wie der Lebensraum Meer auf die zusätzliche CO₂-Aufnahme reagiert.

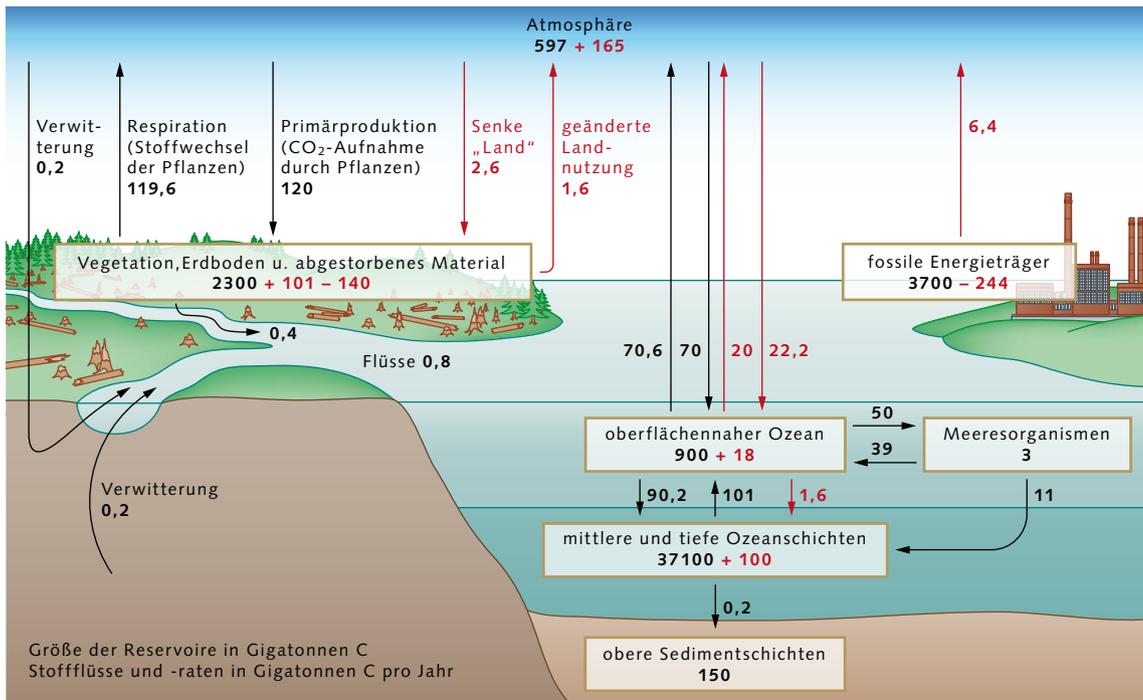
Die Wandlungsfähigkeit des Kohlenstoffs

Kohlenstoff ist das Element des Lebens. Der Körper des Menschen ist daraus aufgebaut, und auch tierische oder pflanzliche Biomasse wie Blätter und Holz besteht überwiegend aus Kohlenstoff (C). Pflanzen an Land und Algen im Meer nehmen ihn in Form von Kohlendioxid (CO₂) aus der Atmosphäre oder aus dem Wasser auf und wandeln ihn während der Photosynthese in energiereiche Moleküle wie Zucker und Stärke um. Durch den Stoffwechsel von Organismen und natürliche chemische Prozesse wechselt der Kohlenstoff immer wieder seinen Zustand. Er wird fest in Materie eingebunden oder steigt als CO₂ in die Atmosphäre auf. Das Meer speichert mehr Kohlenstoff als die Atmosphäre und die Landbiosphäre (Pflanzen und Tiere). Noch größere Mengen an Kohlenstoff sind in der Lithosphäre, also den Gesteinen des Planeten, gebunden, unter anderem in Kalkstein (Kalziumkarbonat, CaCO₃).

Die drei im Kontext anthropogener Klimawandel wichtigen Speicher Atmosphäre, Landbiosphäre und Ozean tauschen permanent Kohlenstoff aus, wobei sich der Austausch in Zeiträumen von bis zu Jahrhunderten vollzieht, was auf den ersten Blick langsam erscheint. Bedenkt man aber, dass Kohlenstoff in den Gesteinen der Erdkruste für Jahrtausende gebunden bleibt, dann kann man den Austausch zwischen den Kohlenstoffreservoirs Atmosphäre, Landbiosphäre und Ozean durchaus als rasch bezeichnen. Wissenschaftler können heute oft recht gut abschätzen, wie viel Kohlenstoff in den einzelnen Reservoiren gespeichert ist. Im Ozean befindet sich mit einer Masse von 38 000 Gigatonnen (Gt) Kohlenstoff (1 Gigatonne = 1 Milliarde Tonnen) gut 16-mal so viel Kohlenstoff wie in der Landbiosphäre und rund 60-mal so viel wie in der vorindustriellen Atmosphäre, zu einer Zeit also, bevor der

Mensch begann, durch die verstärkte Verbrennung von Kohle, Öl und Gas Unmengen von Kohlenstoff in Form von CO₂ freizusetzen und den atmosphärischen CO₂-Gehalt zu verändern. Damals lag der Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre bei nur knapp 600 Gigatonnen Kohlenstoff. Der Ozean ist somit der Gigant unter den Kohlenstoffreservoirs und bestimmt entscheidend den atmosphärischen CO₂-Gehalt. Der Kohlenstoff dringt jedoch erst im Laufe von Jahrhunderten in den tiefen Ozean vor, weil sich die Ozeane nur sehr träge durchmischen (Kapitel 1). Damit ziehen sich auch durch den Ozean hervorgerufene Änderungen des atmosphärischen Kohlenstoffgehalts über Jahrhunderte hin. In erdgeschichtlichen Dimensionen ist das schnell; aus menschlicher Perspektive aber zu langsam, um den Klimawandel weitgehend abzufangen.

Im Hinblick auf den Klimawandel ist im globalen Kohlenstoffkreislauf vor allem das Treibhausgas CO₂ von Interesse. Heute wissen wir, dass sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre in den knapp 12 000 Jahren zwischen der letzten Eiszeit und dem Beginn der industriellen Revolution Anfang des 19. Jahrhunderts nur sehr geringfügig verändert hat. Eine solche vergleichsweise stabile CO₂-Konzentration deutet darauf hin, dass sich der vorindustrielle Kohlenstoffkreislauf weitgehend im Gleichgewicht mit der Atmosphäre befand. Man nimmt an, dass der Ozean in diesem vorindustriellen Gleichgewicht jährlich etwa 0,6 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr an die Atmosphäre abgab. Der Grund dafür ist der Eintrag von pflanzlichem Kohlenstoff, der über die Flüsse vom Land ins Meer transportiert und nach dem Abbau durch Bakterien als CO₂ an die Atmosphäre abgegeben wird, sowie von anorganischem Kohlenstoff aus der Verwitterung kontinentaler Kalkgesteine. Dieser Transport findet vermutlich auch heute noch im Wesentlichen unverändert statt. Seit dem



2.1 > Der globale Kohlenstoffkreislauf der 1990er Jahre mit dem Kohlenstoffinhalt der verschiedenen Speicher (in Gigatonnen Kohlenstoff Gt C) sowie den jährlichen Austauschflüssen zwischen diesen. Vorindustrielle natürliche Flüsse sind in Schwarz, anthropogene Änderungen in Rot angegeben. Der Verlust von 140 Gt C in der terrestrischen Biosphäre entspricht den kumulativen CO_2 -Emissionen, die sich aus der geänderten Landnutzung (überwiegend Brandrodung in tropischen Regenwäldern)

ergeben und zu den Emissionen von 244 Gt C aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe hinzugerechnet werden. Die terrestrische Senke für anthropogenes CO_2 in Höhe von 101 Gt C ist nicht direkt nachgewiesen, sondern ergibt sich aus der Differenz zwischen kumulativen Emissionen ($244 + 140 = 384$ Gt C) auf der einen sowie atmosphärischem Anstieg (165 Gt C) und ozeanischer Senke ($100 + 18 = 118$ Gt C) auf der anderen Seite.

Beginn der Industrialisierung gelangen jährlich zunehmende Mengen an zusätzlichem Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre. Die Ursachen sind neben der Verbrennung fossiler Energieträger (6,4 Gigatonnen Kohlenstoff jährlich in den 1990er Jahren) eine geänderte Landnutzung wie beispielsweise die intensive Brandrodung in den tropischen Regenwäldern (1,6 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr). Vom Anfang des 19. Jahrhunderts bis zum Ende des 20. Jahrhunderts hat der Mensch rund 400 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid freigesetzt. Damit befindet sich der heutige Kohlenstoffkreislauf in einem markanten Ungleichgewicht. Diese zusätzlichen Mengen an Kohlenstoff führen zu Verschiebungen zwischen den Kohlenstoffreservoirs, was sich darin äußert, dass sich die Austauschflüsse zwischen

Reservoirs gegenüber denen der vorindustriellen Zeit verändert haben. Neben der Atmosphäre nehmen auch die Ozeane und vermutlich auch die Landpflanzen permanent einen Teil dieses anthropogenen, also durch menschliche Aktivitäten freigesetzten CO_2 auf.

Der Ozean als Senke für anthropogenes CO_2

Sobald CO_2 aus der Atmosphäre ins Wasser übergeht, reagiert es chemisch mit den Wassermolekülen zu Kohlensäure, und es kommt zu Verschiebungen in den Konzentrationen der sich von der Kohlensäure ableitenden Ionen Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) und Karbonat (CO_3^{2-}). Da das Kohlendioxid im Meer damit sozusagen direkt weiterverarbeitet wird, besitzen die Ozeane ein im Vergleich zu

Das Meer mit Eisen düngen

Eisen ist ein lebenswichtiger Pflanzennährstoff und das zweithäufigste chemische Element auf der Erde, wovon jedoch der allergrößte Anteil im Erdkern steckt. In vielen Regionen sind Pflanzen ausreichend mit Eisen versorgt. Große Gebiete des Ozeans aber sind so eisenarm, dass hier das Wachstum einzelliger Algen durch Eisen limitiert ist. Zu diesen eisenlimitierten Gebieten gehören der tropische Ostpazifik und Teile des Nordpazifiks sowie der gesamte Südozean. Diese Meeresregionen sind reich an den Hauptnährstoffen (Makro-nährstoffen) Nitrat und Phosphat. Doch das Eisen, welches Pflanzen nur in sehr geringen Mengen benötigen (Mikronährstoff), fehlt. Experten bezeichnen diese Meeresgebiete somit als HNLC-Region (high nutrient, low chlorophyll; nährstoffreich und arm an Chlorophyll), da hier keine Algen wachsen und die Menge des Pflanzenfarbstoffs Chlorophyll im Wasser entsprechend gering ist. Mit Düngungsexperimenten haben Forscher gezeigt, dass sich das Pflanzenwachstum in allen diesen Gebieten stark anregen lässt, wenn man das Wasser mit Eisen düngt. Da Pflanzen Kohlenstoff aufnehmen, wird damit zumindest kurzzeitig Kohlendioxid aus der Atmosphäre in Biomasse verwandelt.

Eine solche Eisendüngung ist durchaus ein natürliches Phänomen. So wird zum Beispiel eisenreicher Wüstenstaub durch Winde bis aufs Meer verdriftet. Eisen gelangt außerdem mit dem Schmelzwasser von Eisbergen oder durch den Kontakt des Wassers mit eisenhaltigen

Sedimenten am Meeresgrund in die Ozeane. Forscher vermuten, dass veränderte Windströmungen und eine trockenere Atmosphäre während der letzten Eiszeit zu einem wesentlich höheren Eiseneintrag in den Südozean geführt haben. Damit ließe sich der während der letzten Eiszeit deutlich reduzierte atmosphärische CO_2 -Gehalt zumindest teilweise erklären. Entsprechend kommen moderne Modellsimulationen zu dem Schluss, dass eine großskalige Eisendüngung der Ozeane den derzeitigen atmosphärischen CO_2 -Gehalt um etwa 30 ppm (parts per million, millionstel Volumenanteile) absenken könnte. Zum Vergleich: Die menschlichen Aktivitäten haben den atmosphärischen CO_2 -Gehalt von etwa 280 ppm auf gegenwärtig 390 ppm erhöht.

Meeresalgen nehmen zwischen tausend und einer Million Mal weniger Eisen als Kohlenstoff auf. Schon geringe Eisenmengen genügen daher, um die Aufnahme großer Kohlendioxidmengen in die Pflanzen anzukurbeln. Mit relativ wenig Eisen können unter geeigneten Bedingungen also große Mengen von CO_2 umgesetzt werden. Somit liegt der Gedanke nahe, die Meere in großem Stil zu düngen und die hohen CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre durch die Einlagerung (Sequestrierung) in Meeresorganismen zu verringern. Wenn die Algen sterben, dann absinken und schließlich von Tieren verdaut oder von Mikroorganismen abgebaut werden, wird das Kohlendioxid allerdings wieder freigesetzt. Um einschätzen zu können,

2.2 > Eisen ist ein lebenswichtiger Algennährstoff, der in vielen Meeresgebieten kaum vorhanden ist. Das Algenwachstum wird dadurch gehemmt. Düngt man das Wasser künstlich mit Eisen, führt das zu einer fast schlagartigen Zunahme der Algen. Mikroskopische Untersuchungen von Wasserproben, die im Südatlantik mit dem Forschungsschiff „Polarstern“ gewonnen wurden, zeigten deutlich, dass sich in dieser eigentlich eisenarmen Region nach einer Eisendüngung Algen tatsächlich stark vermehrten. Etwa drei Wochen nach der Düngung dominierten vor allem längliche hartschalige Kieselalgen die marine Algengemeinschaft.

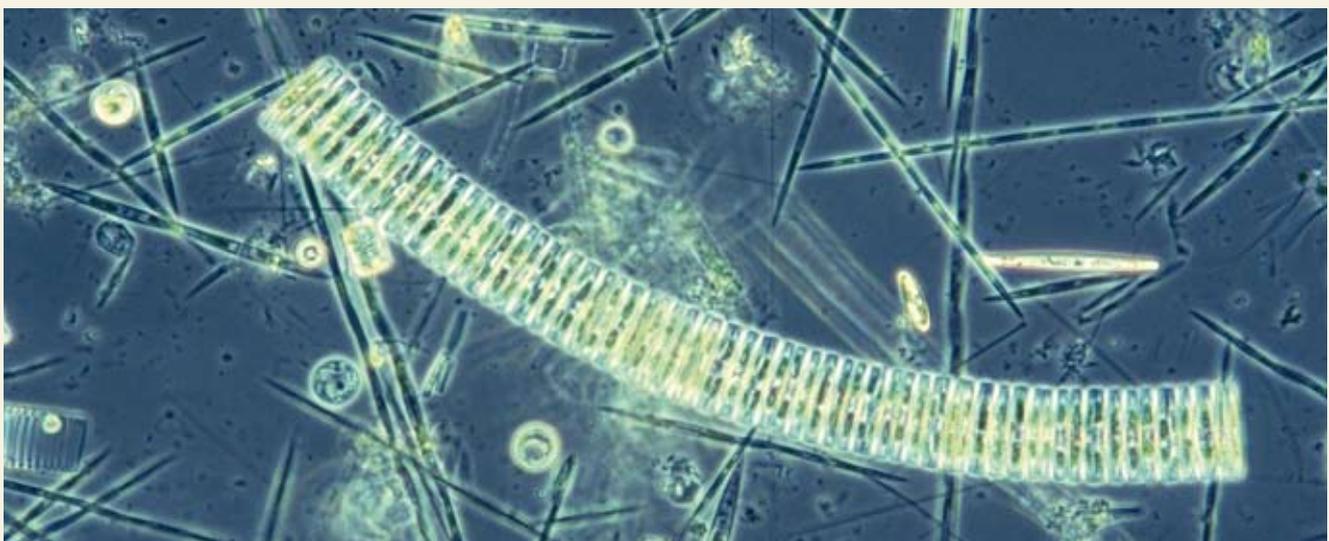
ob das gebundene Kohlendioxid tatsächlich im Ozean verbleibt, muss man daher zunächst herausfinden, in welcher Tiefe, und damit räumlicher und zeitlicher Entfernung von der Atmosphäre, die durch Eisendüngung produzierte Biomasse wieder abgebaut und das aufgenommene Kohlendioxid freigesetzt wird. Üblicherweise werden 60 bis 90 Prozent der Biomasse bereits im Oberflächenwasser in Kontakt mit der Atmosphäre wieder abgebaut. Dieser Biomasseanteil stellt somit keinen Beitrag zur Sequestrierung dar. Selbst wenn der Abbau erst in großen Tiefen geschieht, wird das CO₂ mit der globalen Ozeanzirkulation in einigen Hundert bis tausend Jahren wieder in die Atmosphäre gelangen.

Nicht nur aus diesem Grund wurde die Eisendüngung kontrovers diskutiert. So fürchten manche Experten, dass der Eiseneintrag den Nährstoffhaushalt in anderen Regionen stört. Da durch das verstärkte Algenwachstum die Makronährstoffe im Oberflächenwasser aufgebraucht werden, ist es denkbar, dass in anderen, vom Düngungsgebiet stromabwärts gelegenen Meeresgebieten die Nährstoffe fehlen werden. Dort würde die Produktion der Algen abnehmen, was die CO₂-Sequestrierung im gedüngten Areal konterkarieren würde. Ein solcher Effekt wird beispielsweise für den tropischen Pazifik erwartet, nicht aber für den Südozean, in dem die Oberflächenwasser nur relativ kurz an der Meeresoberfläche verweilen und in der Regel wieder abtauchen, bevor die Makronährstoffe erschöpft sind.

Da diese Wassermassen erst nach Hunderten von Jahren wieder an die Oberfläche gelangen, scheint der Südozean für eine CO₂-Sequestrierung am besten geeignet zu sein.

Experten fürchten, dass die Eisendüngung gleich mehrere unerwünschte Nebenwirkungen haben könnte. So ist es denkbar, dass die Eisendüngung durch den vermehrten Abbau von organischem Material und damit verstärkten Eintrag von Kohlendioxid in tiefere Wasserschichten vor Ort zur Ozeanversauerung beiträgt. Darüber hinaus würde der Abbau der durch die Düngung erzeugten zusätzlichen Biomasse zugleich vermehrt Sauerstoff zehren, den Fische und andere Tiere benötigen. Im relativ gut belüfteten Südozean sind unmittelbare Effekte durch eine Abnahme der Sauerstoffkonzentration auf die Biologie vermutlich sehr gering. Es ist aber nicht auszuschließen, dass diese reduzierten Sauerstoffgehalte Fernwirkungen haben und an anderen Orten im Weltozean die Situation in den bereits vorhandenen Sauerstoffminimumzonen verschärfen.

Wenig untersucht sind auch mögliche Folgen der Eisendüngung auf die Artenvielfalt und die marine Nahrungskette auf Zeitskalen, die über die wenigen Wochen der bisherigen Eisendüngungsexperimente hinausgehen. Bevor die Eisendüngung als mögliches Verfahren der CO₂-Sequestrierung etabliert wird, müsste zunächst genau festgelegt werden, wie mögliche Nebeneffekte beobachtet und protokolliert werden können.



Süßwasser zehnfach höheres Aufnahmevermögen für CO_2 und nehmen dieses daher in großen Mengen auf. Fachleute bezeichnen eine solche Aufnahme von CO_2 auch als Senke. Das Meer fängt das atmosphärische CO_2 also ab, wobei diese besondere Wirkung des Meerwassers vor allem auf das Karbonation zurückzuführen ist, welches mit 10 Prozent einen erheblichen Teil des gelösten anorganischen Kohlenstoffs im Meer ausmacht. Als anorganischen Kohlenstoff bezeichnet man im Meer den in CO_2 , Hydrogenkarbonat und Karbonat gebundenen Kohlenstoff. Sollte sich in Zukunft ein neues Kohlenstoff-Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und Weltozean einstellen, dann wird das ozeanische Reservoir vor allem dank des Karbonats rund 80 Prozent des anthropogenen CO_2 aus der Atmosphäre aufgenommen haben. Von zusätzlicher Bedeutung ist dabei die puffernde Wirkung der Tiefseekalksedimente. Diese nehmen große Mengen an CO_2 auf, indem das dort seit Langem lagernde Karbonat mit CO_2 reagiert und sich dabei zum Teil auflöst. Dank dieses Prozesses können letztlich sogar etwa 95 Prozent der anthropogenen Emissionen vom Ozean aufgenommen werden. Wegen der trägen Durchmischung des Ozeans wird es

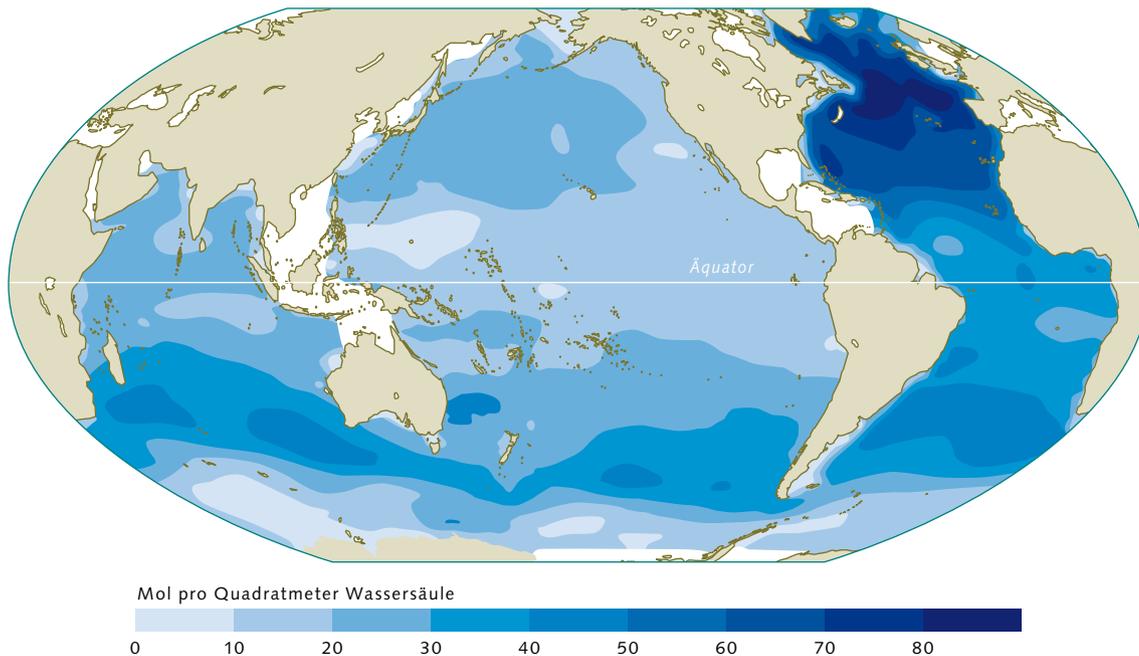
aber Jahrhunderte dauern, bis ein Gleichgewicht hergestellt ist. Die gemächliche Pufferung von CO_2 durch die Reaktion mit den Kalksedimenten dürfte sogar Jahrtausende andauern. Für die heutige Situation bedeutet das, dass es zunächst beim Kohlenstoff-Ungleichgewicht zwischen Ozean und Atmosphäre bleibt: Der Weltozean kann das Treibhausgas nicht so schnell aufnehmen, wie es durch den Menschen in die Atmosphäre freigesetzt wird. Die sich aus den chemischen Abläufen im Wasser ergebende Aufnahmekapazität der Meere ist also unmittelbar abhängig von der Durchmischungsgeschwindigkeit des Weltozeans. Die ozeanische CO_2 -Aufnahme hinkt damit stark hinter der Menge der derzeitigen CO_2 -Emissionen her.

Den Austausch zwischen Atmosphäre und Meer messen

Für zuverlässige Klimaprognosen ist es von entscheidender Bedeutung, genau zu bestimmen, wie viel CO_2 tatsächlich in der Senke Ozean verschwindet. Forscher haben daher eine Vielzahl unabhängiger Methoden entwickelt, mit denen sich quantifizieren lässt, welche Rolle

2.3 > Zementwerke wie hier bei Amsterdam gehören nach der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu den global signifikanten anthropogenen Kohlendioxidquellen. Entsprechend groß ist das CO_2 -Einsparpotenzial in diesen Industriebereichen.





2.4 > Der Weltozean nimmt das anthropogene CO₂ vor allem im Nordatlantik sowie in einem Gürtel zwischen 30 und 50 Grad südlicher Breite auf. Die Werte zeigen die Gesamtaufnahme vom Beginn der industriellen Revolution bis zum Jahr 1994.

der Ozean gegenwärtig im anthropogen veränderten Kohlenstoffkreislauf spielt. Diese haben viel zum gegenwärtigen Verständnis der Zusammenhänge beigetragen. Eine besondere Rolle spielen vor allem zwei Verfahren:

Die erste Methode (Atmosphäre-Ozean-Flussmethode) beruht auf der Messung der sogenannten CO₂-Partialdruckdifferenz zwischen Oberflächenozean und Atmosphäre. Der Partialdruck ist derjenige Druck, den ein Gas wie etwa CO₂ in einem Gasgemisch wie der Luft zum Gesamtdruck beiträgt. Damit ist der Partialdruck auch eine Möglichkeit, die Zusammensetzung der Atmosphäre quantitativ zu beschreiben. Je mehr von diesem Gas vorhanden ist, desto höher ist sein Partialdruck. Stehen zwei Volumina, zum Beispiel die Atmosphäre und die oberflächennahen Schichten des Ozeans, miteinander in Verbindung, kann ein Gasaustausch stattfinden. Eine etwaige Partialdruckdifferenz führt dazu, dass es zu einem Nettoaustausch von CO₂ kommt. Das Gas strömt dabei vom Bereich mit dem höheren Partialdruck in den Bereich des niedrigen Drucks. Dieser Nettogasaustausch lässt sich berechnen, wenn man die globale Verteilung der CO₂-Partialdruckdifferenz kennt. Angesichts der Größe des Weltozeans bedeutet das einen gewaltigen Messaufwand. Die weltweite Flotte der Forschungsschiffe reicht dafür bei

Weitem nicht aus. Daher wurden zahlreiche Handelsschiffe mit Messgeräten ausgestattet, die auf ihren Reisen automatisch CO₂-Messungen durchführen und die Daten speichern. Dieses „Voluntary Observing Ship“-Projekt (VOS) wird seit mehreren Jahrzehnten durchgeführt und umfasst weltweit Dutzende Schiffe. Grundsätzlich ist es ungeheuer schwierig, den über Raum und Zeit stark variierenden CO₂-Austausch in den Weltmeeren adäquat zu erfassen. Dank des existierenden VOS-Netzwerks aber konnte man eine erste wichtige Grundlage schaffen. Die Datenbasis aus über drei Jahrzehnten reicht aus, um den jährlichen Gasaustausch über die Gesamtoberfläche der Ozeane zu mitteln. Er wird als mittlere jährliche CO₂-Flussdichte angegeben, wobei der CO₂-Fluss in Kohlenstoff umgerechnet wird. Die Einheit der Flussdichte (mol C/m²/Jahr) ist damit die Menge des Kohlenstoffs (C), gemessen in Mol, die als CO₂ in einem Jahr durch einen Quadratmeter Ozeanoberfläche in den Ozean fließt.

Unser heutiges Bild beruht auf rund drei Millionen Messungen, die in die Berechnung der CO₂-Nettoflüsse eingegangen sind. Die Daten wurden zwischen 1970 und 2007 aufgenommen, wobei der Großteil der Messwerte im vergangenen Jahrzehnt durch das VOS-Programm gewonnen wurde. Recht gut erfasst sind die für das Weltklima wich-

tigen Gebiete wie der subpolare Nordatlantik, der subpolare Pazifik und das Südpolarmeer. Für andere Meeresregionen gibt es hingegen noch immer nur wenige Messwerte. Für diese chronisch unterbeprobten Gebiete fehlt es derzeit also noch an der für eine genaue Berechnung erforderlichen Datenbasis. Trotzdem konnten Wissenschaftler inzwischen mithilfe der vorliegenden Daten die CO₂-Senke Ozean recht gut quantifizieren, wobei der Wert wiederum in Kohlenstoff umgerechnet wird. Für das Referenzjahr 2000 beträgt die Senke 1,4 Gigatonnen Kohlenstoff.

Dieser Wert ist ein Saldo des natürlichen Kohlenstoffflusses aus dem Meer in die Atmosphäre und umgekehrt dem Transport anthropogenen Kohlenstoffs aus der Atmosphäre ins Meer. So steigen jährlich nach wie vor 0,6 Gigatonnen Kohlenstoff aus dem Meer auf, was dem natürlichen vorindustriellen Wert entspricht. Umgekehrt gehen jedes Jahr etwa 2,0 Gigatonnen anthropogen erzeugten Kohlenstoffs ins Meer über. Aufgrund der immer noch als prekär zu bezeichnenden Datenlimitation musste sich diese Methode bisher auf den klimatologischen CO₂-Fluss beschränken, das heißt auf ein langfristiges Mittel über den gesamten Beobachtungszeitraum. Erst jetzt rücken Untersuchungen zur zwischenjährlichen Variabilität dieser CO₂-Senke in besonders gut abgedeckten Regionen in greifbare Nähe. Ein erstes prominentes Beispiel ist der Nordatlantik. Es zeigt überraschend, dass die Daten zwischen einzelnen Jahren erheblich variieren. Dies ist vermutlich auf natürliche Klimazyklen wie die Nordatlantische Oszillation (Kapitel 1) zurückzuführen, die einen erheblichen Einfluss auf den natürlichen Kohlenstoffkreislauf haben.

Die zweite Methode versucht mithilfe geochemischer oder statistischer Verfahren zu berechnen, wie viel CO₂ im Ozean aus natürlichen und wie viel aus anthropogenen Quellen stammt – obgleich beide in chemischer Hinsicht (weitgehend) identisch und im Grunde nicht zu unterscheiden sind. Tatsächlich stehen heutzutage mehrere Verfahren zur Verfügung, die eine solche Differenzierung zulassen. Sie liefern generell sehr konsistente Ergebnisse. Im Detail weichen diese Methoden allerdings voneinander ab. So sind die Ergebnisse in gewissem Umfang abhängig davon, wo die Daten erhoben wurden und von welchen Annahmen und Näherungen die Wissenschaftler jeweils ausgehen.

Ein besonders erfolgreiches und prominentes Beispiel für die Erfassung der CO₂-Mengen in den Ozeanen ist der globale hydrographische GLODAP-Datensatz (Global Ocean Data Analysis Project), der von 1990 bis 1998 durch große internationale Forschungsprogramme gewonnen wurde. Dieser Datensatz

- umfasst eine Vielzahl von Messgrößen;
- basiert auf der Analyse von mehr als 300 000 Wasserproben;
- enthält Daten, die auf knapp 100 Expeditionen an nahezu 10 000 hydrographischen Stationen in den Ozeanen gewonnen wurden.

Alle diese Daten wurden in einem aufwendigen Prozess nachkorrigiert und einer mehrstufigen Qualitätskontrolle unterzogen. Damit wurde eine größtmögliche Konsistenz und Vergleichbarkeit der Daten aus einer Vielzahl verschiedener Labore erreicht. Der GLODAP-Datensatz bietet bis heute den genauesten und umfassendsten Blick auf den marinen Kohlenstoffkreislauf. Auf Basis dieses Datensatzes konnte erstmals zuverlässig abgeschätzt werden, wie viel anthropogenes CO₂ bisher von der Senke Ozean aus der Atmosphäre aufgenommen worden ist: Bis zum Jahr 1994 belief sich die anthropogene CO₂-Aufnahme auf 118 ± 19 Gigatonnen Kohlenstoff seit Beginn der Industrialisierung. Die Ergebnisse zeigen, dass das anthropogene CO₂ vor allem in zwei Regionen aus der Atmosphäre in den Ozean eingetragen wird. Zum einen ist dies der subpolare Nordatlantik, wo das CO₂ mit der Tiefenwasserbildung (Kapitel 1) ins Ozeaninnere abtaucht. Zum anderen wird CO₂ in einem Gürtel zwischen etwa 30 und 50 Grad südlicher Breite in den Ozean eingetragen. Hier sinkt das Oberflächenwasser aufgrund der Bildung von Zwischenwasser ab, welches sich in der Tiefe ausbreitet.

Der aus dem GLODAP-Datensatz ermittelte globale CO₂-Eintrag stellt gewissermaßen einen Schnappschuss eines langfristigen, fließenden Ungleichgewichtszustands dar: Zwar geht das anthropogene CO₂ kontinuierlich in das Ozeaninnere über. Doch hat das Gas den Ozean längst noch nicht in Gänze durchdrungen. Die GLODAP-Daten zeigen, dass der Weltozean bisher nur gut 40 Prozent der CO₂-Mengen aufgenommen hat, die der Mensch zwischen 1800 und 1995 in die Atmosphäre freigesetzt hat. Die maximale Aufnahmekapazität des Weltozeans von mehr als 80 Prozent ist also noch längst nicht erreicht.



Wie der Klimawandel den marinen Kohlenstoffkreislauf beeinflusst

Der natürliche Kohlenstoffkreislauf bewegt jährlich viele Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Zum einen wird der Kohlenstoff räumlich transportiert, etwa durch die Meeresströmungen. Zum anderen geht er von einem Zustand in einen anderen über – beispielsweise von einer anorganischen in eine organische chemische Verbindung. Grundlage dieses ständigen Transports und Wandels sind eine Vielzahl biologischer, chemischer und physikalischer Prozesse, die auch als Kohlenstoffpumpen bekannt sind. Diese Prozesse werden durch klimatische Faktoren angetrieben oder zumindest stark beeinflusst. Ein Beispiel ist der Stoffwechsel von Organismen, der durch steigende Umgebungstemperaturen angekurbelt wird. Dieser Effekt der Temperatur ist jedoch bei den Produzenten von Biomasse (vor allem den einzelligen Algen) vermutlich geringer als bei den Konsumenten von Biomasse (vor allem den Bakterien), was in manchen Regionen zu Verschiebungen der lokalen biologischen Kohlenstoffbilanzen führen könnte. Da viele klimatische Wechselwirkungen bislang nur unzureichend verstanden sind, lässt sich folglich nur schwer abschätzen, wie der Kohlenstoffkreislauf und die Kohlenstoffpumpen auf den Klimawandel reagieren werden. Erste Indikatoren eines den gesamten Weltozean erfassenden Wandels sind Veränderungen der Meerestemperatur und des Salzgehalts. Zudem hat man festgestellt, dass der Sauerstoffgehalt des Meerwassers generell abnimmt, was auf biologische und physikalische Ursachen zurückgeführt wird,

beispielsweise veränderte Strömungen und höhere Temperaturen. Eine Rolle spielen möglicherweise auch Veränderungen bei der Produktion und dem Abbau von Biomasse im Ozean.

Die Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf machen sich noch auf eine andere Art bemerkbar: Die verstärkte Aufnahme von Kohlendioxid ins Meer führt zur Versauerung der Ozeane, oder chemisch ausgedrückt: einer Abnahme des pH-Werts. Das könnte gravierende Auswirkungen auf marine Organismen und Ökosysteme haben. Besonders betroffen wären hier kalkbildende Organismen, weil ein saureres Milieu die Kalkproduktion erschwert. In Laborexperimenten konnte man zeigen, dass diese Versauerung Korallen und andere Lebewesen beeinträchtigt. Derzeit wird das Thema Ozeanversauerung weltweit in großen Forschungsprogrammen bearbeitet. Endgültige Aussagen über Rückkopplungseffekte zwischen Klima und Versauerung kann man daher noch nicht machen. Ähnliches gilt für den Einfluss der Ozeanerwärmung. Auch hier gibt es viele Hinweise auf erhebliche Rückkopplungseffekte, aber zu wenig solide Erkenntnisse, um belastbare quantitative Aussagen zu machen.

Es bleibt damit abzuwarten, welchen Einfluss der globale Wandel auf den natürlichen Kohlenstoffkreislauf des Ozeans haben wird. Es wäre naiv anzunehmen, dass dieser vernachlässigbar und für das zukünftige Klima auf unserem Planeten irrelevant sei. Vielmehr sollte unser begrenztes Verständnis der Zusammenhänge Anlass sein, den Ozean noch besser zu erforschen und neue Beobachtungsmethoden zu entwickeln.

2.5 > Um festzustellen, wie sich die steigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf das Meer auswirkt, hat ein internationales Forscherteam vor Spitzbergen Meerwasser in schwimmenden Tanks mit CO₂ angereichert und die Auswirkung auf die Lebewesen untersucht.

Die Folgen der Ozeanversauerung

> Der Klimawandel wird nicht nur zur Erwärmung der Atmosphäre und des Wassers, sondern auch zur Versauerung der Ozeane führen. Welche Konsequenzen das für die marinen Organismen und Lebensgemeinschaften letztlich haben wird, lässt sich aber noch nicht sicher abschätzen, denn bislang wurden nur wenige Spezies untersucht. Dafür bedarf es zunächst ausführlicher Langzeitstudien an einer Vielzahl von Organismen.

Wie der Klimawandel die Ozeane versauern lässt

Kohlendioxid ist ein bestimmender Faktor unseres Klimas und trägt als Treibhausgas maßgeblich zur Erwärmung der Erdatmosphäre und damit auch des Ozeans bei. Im Verlauf der Erdgeschichte veränderte sich das globale Klima mehrfach drastisch. Diese Veränderungen waren zum Teil mit natürlichen Schwankungen des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre verbunden, beispielsweise beim Übergang von Eiszeiten zu interglazialen Perioden, wärmeren Phasen während längerer Eiszeitalter. Der seit dem Beginn der Industrialisierung beobachtete massive Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration um circa 30 Prozent ist hingegen anthropogenen Ursprungs, also vom Menschen verursacht.

Die größten CO_2 -Quellen sind die Verbrennung der fossilen Rohstoffe Erdgas, Erdöl und Kohle sowie die Veränderung der Landnutzung – das Abholzen von Wäldern, das Trockenlegen von Sümpfen und die Ausdehnung von Landwirtschaftsflächen. Inzwischen liegt der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre bereits bei knapp 390 ppm (parts per million). Zu vorindustriellen Zeiten betrug er gerade einmal 280 ppm. Mehr noch: Schätzungen von Klimaforschern gehen derzeit mindestens von einer Verdopplung des aktuellen Wertes bis zum Ende dieses Jahrhunderts aus. Diese Zunahme wird nicht nur zu einem weiteren Aufheizen der Erde führen. Sie zieht einen zweiten Effekt nach sich, der erst in jüngster Zeit ins Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt ist: die Versauerung der Weltmeere.

Zwischen Luft und Ozean findet ein permanenter Gasaustausch statt. Steigt in der Atmosphäre der CO_2 -Gehalt, nimmt die Konzentration des Gases auch in den oberflächennahen Schichten der Weltmeere entsprechend zu.

Das gelöste CO_2 reagiert zu einem gewissen Teil zu Kohlensäure. Bei dieser Reaktion werden Protonen frei, was zu einer Versauerung des Seewassers führt. Der pH-Wert sinkt. Inzwischen konnte nachgewiesen werden, dass der pH-Wert des Meerwassers parallel zum CO_2 -Anstieg in der Atmosphäre tatsächlich im Mittel bereits um 0,1 Einheiten zurückgegangen ist. Dieser Wert könnte, je nach Entwicklung der CO_2 -Emissionen, bis zum Ende unseres Jahrhunderts um weitere 0,3 bis 0,4 Einheiten sinken. Das klingt zunächst vernachlässigbar klein. Tatsächlich aber entspricht dieser Wert einer Zunahme der Protonenkonzentration um 100 bis 150 Prozent.

Der Einfluss des pH-Werts auf den Stoffwechsel von Meeresorganismen

Der aktuell beobachtete Anstieg des CO_2 -Gehalts der Ozeane ist, was Ausmaß und Geschwindigkeit betrifft, in der Evolutionsgeschichte der letzten rund 20 Millionen Jahre einmalig. Daher ist derzeit noch völlig unklar, inwieweit sich die marine Fauna auf Dauer daran anpassen kann. Immerhin beeinträchtigen die niedrigen pH-Werte im Seewasser den Kalkbildungsprozess, der für viele, vor allem wirbellose Meeresbewohner mit Kalkpanzer wie etwa Muscheln, Korallen oder Seeigel lebenswichtig ist.

Im Organismus der betroffenen Tiere spielen sich ähnliche Vorgänge wie bei der Lösung von CO_2 im Meerwasser ab. CO_2 wandert als Gas ungehindert durch Zellmembranen und verursacht eine pH-Absenkung in den Körperzellen und im Blut beziehungsweise der mit Blut vergleichbaren Hämolymphe mancher Tierarten. Der Organismus muss diese Störung seines natürlichen Säure-Base-Haushalts kompensieren, was den einzelnen Tierarten besser oder schlechter gelingt. Letztlich kommt es

Der pH-Wert

Der pH-Wert ist ein Maß für die Menge an Säuren und Basen in einer Lösung. Er gibt also an, wie sauer beziehungsweise basisch eine Flüssigkeit ist. Die pH-Skala reicht dabei von 0 (sehr sauer) bis 14 (sehr basisch). Je nach Stärke gibt die Säure unterschiedlich stark Protonen (H^+) ab, die den pH-Wert beeinflussen. In der Praxis gilt: Je höher die Protonenkonzentration, desto saurer ist eine Flüssigkeit und desto kleiner ist ihr pH-Wert.



2.6 > Anhand von Eiskernen wollen Experten herausfinden, welche Organismen im Eis leben. In anderen Fällen geben in antarktische Eiskerne eingeschlossene Luftblasen Auskunft über den Gehalt von Spurengasen in der früheren Atmosphäre und das Klima der Vergangenheit. Die Eiskerne müssen dazu mit starken Geräten aus dem Eis gebohrt werden. Zur genaueren Untersuchung werden sie dann im Labor zersägt. Betrachtet man Eiskristalle unter speziellem, polarisiertem Licht, zeigt sich ihre Struktur im Detail in schillernden Farben.



dabei auf die genetisch bedingte Leistungsfähigkeit verschiedener Mechanismen zur pH- und Ionenregulation an, die je nach Tiergruppe und Lebensstil unterschiedlich ausgeprägt ist. Ab einem gewissen artspezifischen Grenzwert kommt es aber trotz der verstärkten Regulationsbemühungen des Organismus zu dauerhaften Verschiebungen der Säure-Base-Parameter in Geweben und Körperflüssigkeiten. Dies wiederum kann das Wachstum oder die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigen und damit im schlimmsten Fall sogar das Überleben einer Art in ihrem Lebensraum gefährden.

Der pH-Wert der Körperflüssigkeiten beeinflusst viele biochemische Reaktionen im Organismus. Daher versuchen alle Lebewesen, die Schwankungen des pH-Werts in einem für sie verträglichen Rahmen zu halten. Um eine

durch CO_2 verursachte Ansäuerung auszugleichen, hat der Organismus zwei Möglichkeiten: Er muss entweder verstärkt überschüssige Protonen ausscheiden oder Puffersubstanzen wie etwa Bikarbonationen aufnehmen, die Protonen binden. Die meisten Meerestiere nutzen für die dazu notwendigen Ionenregulationsprozesse eigens ausgebildete Epithelien, spezielle Gewebe, die Körperhöhlen, Blutgefäße oder beispielsweise die Kiemen und den Darm auskleiden.

Die Ionentransportsysteme der Säure-Base-Regulation sind nicht bei allen marinen Tiergruppen gleich effektiv. So sind Meeresorganismen offenbar immer dann recht CO_2 -tolerant, wenn sie große Mengen an Bikarbonationen speichern können, die die freien Protonen binden und so den pH-Wert stabilisieren. Diese Organismen sind in der

Wenn die Kalkbildung aus dem Gleichgewicht kommt

Das in der Atmosphäre enthaltene Gas Kohlendioxid (eigentlich Kohlenstoffdioxid, CO_2) löst sich leicht in Wasser. Das kennt man vom Mineralwasser, das man gern mit Kohlendioxid versetzt. Bei diesem Lösungsprozess reagiert das CO_2 gemäß der unten stehenden Gleichung mit den Wassermolekülen. Kohlendioxid wird also bei der Aufnahme aus der Atmosphäre teilweise umgewandelt – zu Kohlensäure, Wasserstoffionen (H^+), Hydrogenkarbonationen (HCO_3^-) und Karbonationen (CO_3^{2-}). Meerwasser kann sehr viel mehr CO_2 aufnehmen als reines Wasser. Der Grund: Seit ewigen Zeiten werden Hydrogenkarbonat- und Karbonationen in das Meer eingetragen. Das Karbonat reagiert dabei mit CO_2 zum Hydrogenkarbonat, was zu einer weiteren CO_2 -Aufnahme und sinkenden CO_3^{2-} -Konzentrationen im Meer führt. Die Gesamtheit aller sich vom CO_2 ableitenden chemischen Spezies im Wasser, also Kohlendioxid, Kohlensäure, Hydro-

genkarbonat- und Karbonationen, bezeichnet man als gelösten anorganischen Kohlenstoff (DIC = dissolved inorganic carbon). Die verschiedenen Formen des anorganischen Kohlenstoffs können sich über die in der Formel dargestellten chemischen Reaktionen ineinander umwandeln. Dieses sogenannte Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bestimmt den Gehalt freier Protonen im Meerwasser und damit den pH-Wert.



Die Reaktion des Kohlendioxids im Meerwasser läuft summarisch folgendermaßen ab: Zunächst reagiert das Kohlendioxid mit dem Wasser zu Kohlensäure. Diese reagiert wiederum mit Karbonationen und bildet Bikarbonat. Langfristig führt die Ozeanversauerung also

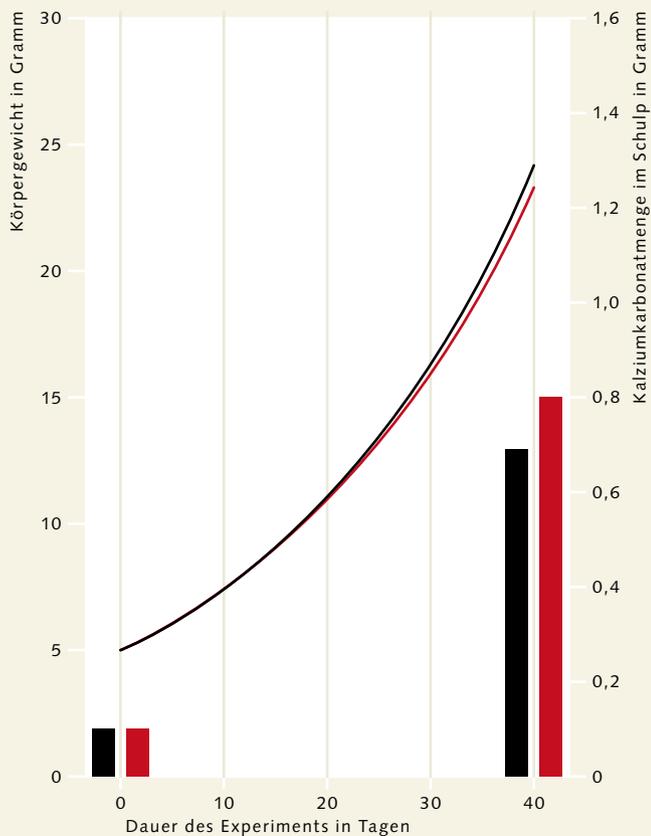


2.7 > Untersuchungen an der Koralle *Oculina patagonia* zeigen, dass Lebewesen mit Kalkpanzern empfindlich auf eine Versauerung des Wassers reagieren. Bild a zeigt eine Korallenkolonie in normalem Zustand. Die Tiere leben zurückgezogen in ihren Kalkgehäusen (gelblich). In saurem Wasser (b) bilden sich die Kalkgehäuse zurück. Die Tiere nehmen eine lang gestreckte Polypengestalt an. Deutlich sind ihre kleinen Fangarme zu sehen, mit denen sie Nahrungspartikel aus dem Wasser fangen. Erst wenn man die Tiere wieder in Wasser mit natürlichem pH-Wert umsetzt (c), bilden sie erneut einen schützenden Kalkpanzer.

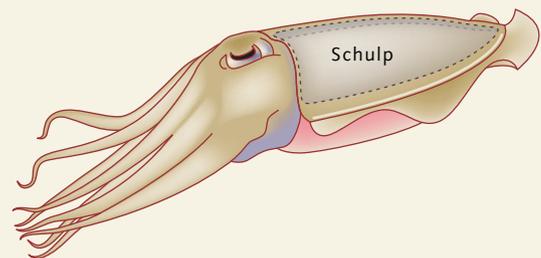
zu einer Abnahme der Konzentration an Karbonationen im Seewasser – eine Halbierung des Gehalts wird beispielsweise prognostiziert, falls ein pH-Abfall von 0,4 Einheiten auftreten sollte. Das ist fatal. Da Karbonationen in Verbindung mit Kalziumionen (als CaCO_3) den grundlegenden Bestandteil kalkhaltiger Skelette und Schalen bilden, kann sich dieser Rückgang unmittelbar auf die Fähigkeit vieler mariner Organismen zur **biogenen** Kalkbildung auswirken. Im Extremfall kann dies sogar zur Auflösung bereits bestehender Kalkschalen, Skelette und anderer Strukturen führen.

Wie die Versauerung die Kalkbildung beeinflusst, wurde bereits an vielen Meeresorganismen untersucht. Prominenteste Vertreter sind die Warmwasserkorallen, deren Skelette besonders von der pH-Absenkung bedroht sind. Wissenschaftliche Untersuchungen deuten darauf hin, dass bereits um die Mitte dieses Jahrhunderts CO_2 -Kon-

zentrationen erreicht sein könnten, unter denen ein Nettowachstum (das heißt, die Organismen bilden mehr Kalk, als sich im Wasser löst) und damit eine erfolgreiche Riffbildung kaum noch möglich sein dürfte. Darüber hinaus wurde in verschiedenen Untersuchungen auch bei weniger exotischen Arten wie Muscheln, Seeigeln oder Seesternen eine Kohlendioxid-bedingte Abnahme der Kalzifizierungsraten beobachtet. Bei vielen dieser Invertebraten (Wirbellosen) war nicht allein die Kalkbildung, sondern gleichzeitig auch das Wachstum beeinträchtigt. Im Gegensatz dazu konnte bei aktiveren Tiergruppen wie etwa Fischen, Lachsen oder auch beim Tintenfisch *Sepia officinalis* nicht festgestellt werden, dass der Kohlendioxidgehalt im Seewasser das Wachstum beeinflusst. Um genaue Aussagen machen zu können, wie sich die CO_2 -Zunahme im Wasser auf die Meereslebewesen auswirkt, sind daher weitere Studien nötig.



2.8 > Aktive und stark bewegliche Tierarten wie der gemeine Tintenfisch *Sepia officinalis* sind offensichtlich weniger von einer Versauerung des Wassers betroffen. Das Gesamtgewicht junger Tiere entwickelt sich in saurem Seewasser (rote Linie) über einen Zeitraum von 40 Tagen genauso gut wie in Wasser mit normalem pH- und CO_2 -Gehalt (schwarze Linie). Auch das Wachstum des kalkhaltigen Rückenpanzers, des Schulp, weist keine Auffälligkeiten auf (siehe rote und schwarze Balken im Diagramm). Als Maß dient hier die Menge des im Schulp eingelagerten Kalziumkarbonats (CaCO_3). Die schematische Zeichnung des Tintenfischs zeigt die Lage des Schulp im Tier.



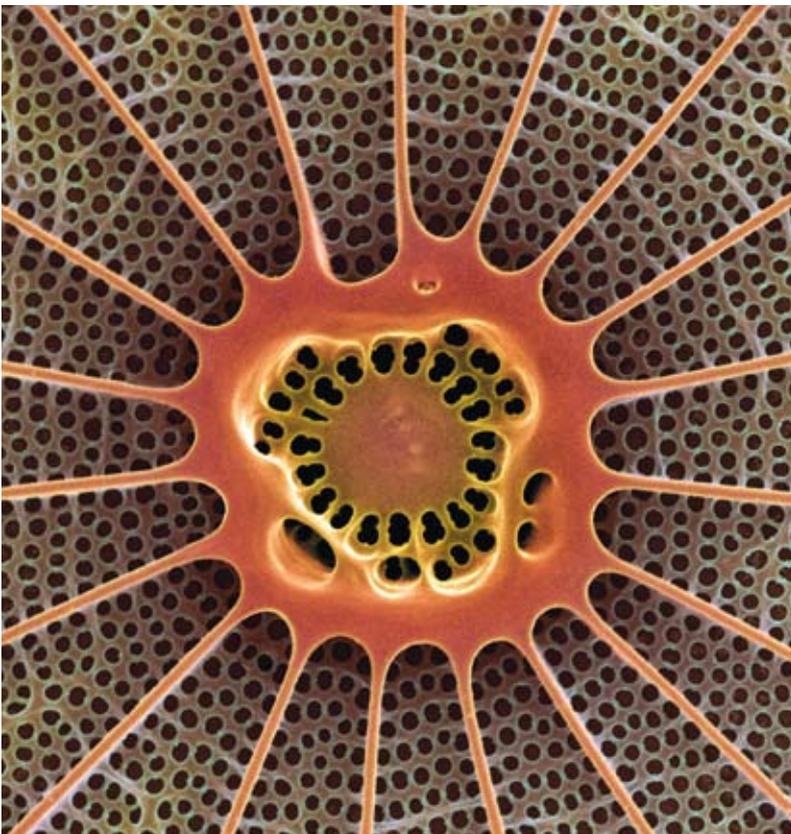
2.9 > Kieselalgen wie diese vom Typ *Arachnoidiscus* sind eine wichtige Nahrungsgrundlage für höhere Lebewesen. Wie stark sie von einer Versauerung der Meere betroffen sein werden, ist noch ungewiss.

Regel auch in der Lage, Protonen besonders gut auszuscheiden. Besonders CO_2 -tolerant sind deshalb mobile und aktive Tierarten wie etwa Fische, bestimmte Krebstiere oder Cephalopoden – Kopffüßer wie beispielsweise Tintenfische, deren Stoffwechselraten in Anpassung an ihren Lebensstil stark schwanken und sehr hohe Werte erreichen können. Die Sauerstoffverbrauchsraten (ein Maß für die Stoffwechselrate) solcher aktiven Tiergruppen können um Größenordnungen über denen von Seeigeln, Seesterne oder Muscheln liegen. Da bei exzessiver Muskeltätigkeit im Energiestoffwechsel große Mengen CO_2 und Protonen anfallen, verfügen die besonders aktiven Tiere in der Regel auch über ein leistungsfähiges System zur Protonenausscheidung und zur Säure-Base-Regulation. Solche Arten können damit auch Störungen ihres Säure-Base-Haushalts besser ausgleichen, die durch eine Versauerung des Wassers verursacht werden. Benthische Invertebraten (auf dem Meeresboden lebende Wirbellose) mit eingeschränktem Bewegungsradius wie etwa Muscheln, See-

sterne, Seeigel oder Würmer können in ihren Körperflüssigkeiten kaum pufferndes Bikarbonat akkumulieren, um das Zuviel an Protonen und die Versauerung auszugleichen. Langzeitversuche zeigen, dass einige dieser Arten unter sauren Bedingungen langsamer wachsen. Eine Ursache für verringertes Wachstum könnte ein natürlicher Schutzmechanismus mancher wirbelloser Tierarten sein: In Stresssituationen, etwa beim Trockenfallen während der Ebbe, reduzieren diese Organismen ihre Stoffwechselrate. Unter natürlichen Bedingungen ist das eine sehr effektive Schutzstrategie, die das Überleben in zeitlich begrenzten Stresssituationen sichert. Sind die Tiere aber unter lang anhaltendem CO_2 -Stress, gerät den sesshaften Tieren dieser Schutzmechanismus zum Nachteil. Bei langfristig erhöhten CO_2 -Gehalten im Meerwasser führt das energiesparende Verhalten und die Drosselung des Stoffwechsels nämlich zwangsläufig zu eingeschränktem Wachstum, geringerer Aktivität und damit insgesamt zu einer verminderten Konkurrenzfähigkeit innerhalb des Ökosystems.

Wie empfindlich eine Spezies auf den Stressor CO_2 und die Versauerung der Meere reagiert, lässt sich allerdings nicht ohne Weiteres mit der einfachen Formel: gute Säure-Base-Regulation = hohe CO_2 -Toleranz beschreiben. So kommen einige wissenschaftliche Studien zu anderen Ergebnissen. Beispielsweise wurde bei einer Schlangensterneart, einem meist im Sediment lebenden Wirbellosen, die Fähigkeit zur Regeneration abgetrennter Arme untersucht. Erstaunlicherweise waren bei Tieren aus saurerem Seewasser mit erhöhtem CO_2 -Gehalt nicht nur die nachgewachsenen Arme länger, obendrein wies ihr Kalkskelett sogar einen höheren Kalziumkarbonatanteil auf. Der Preis dafür war allerdings ein vermindertes Muskelwachstum. So wird diese Spezies trotz der auf den ersten Blick positiven Befunde durch die Ozeanversauerung offensichtlich beeinträchtigt, da die Tiere nur mit voll funktionsfähigen Armen richtig fressen oder ihre Höhlen im Sediment mit Frischwasser versorgen können.

Selbst Fische können beeinträchtigt werden. Zwar sind die erwachsenen Tiere relativ CO_2 -tolerant. Die frühen Entwicklungsstadien aber reagieren offenbar durchaus empfindlich auf den Stressor CO_2 . So wurde bei Larven des Clownfisches eine starke Beeinträchtigung des Geruchsinns in saurem Seewasser mit niedrigem pH-Wert beob-

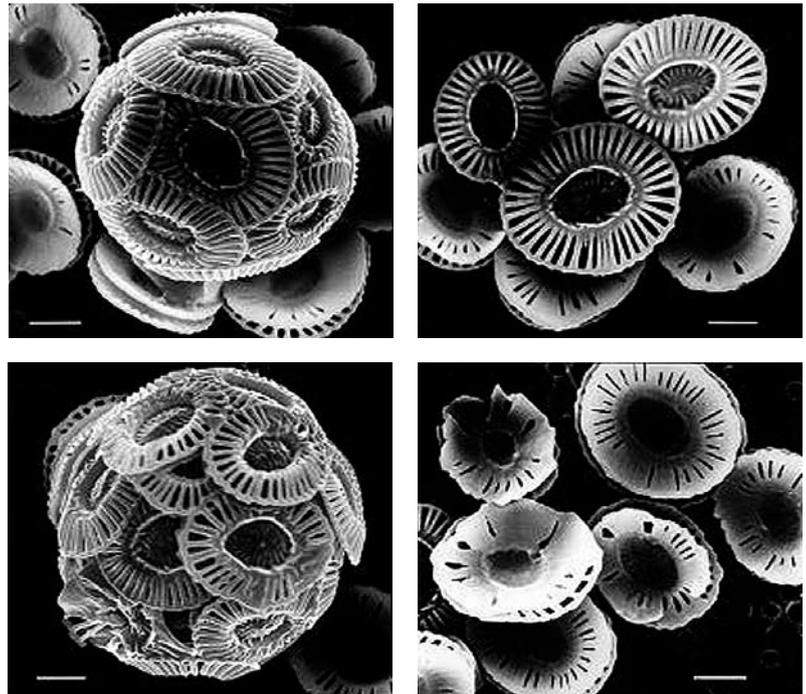


achtet. Normalerweise sind diese Tiere in der Lage, sich aufgrund spezifischer Geruchssignale zu orientieren und auf diese Weise nach der Larvenphase, die sie freischwimmend in der Wassersäule verbringen, ihr späteres ständiges Habitat, ein Korallenriff, zu finden. Im Versuch reagierten beispielsweise Fischlarven, die in Seewasser mit einem um etwa 0,3 Einheiten erniedrigten pH-Wert aufgezogen worden waren, bereits deutlich schlechter auf den sonst sehr anziehend wirkenden Geruch von Seeanemonen, mit denen sie im Riff in Symbiose leben. Treten also während einer kritischen Phase des Lebenszyklus CO_2 -bedingte Verhaltensänderungen auf, wirkt sich das natürlich stark auf den Reproduktionserfolg der Art aus. Offen bleibt, inwieweit auch andere marine Organismen von derartigen Effekten der Ozeanversauerung betroffen sind. Weitere Untersuchungen an Embryonal- und Jugendstadien verschiedener Arten haben allerdings gezeigt, dass die frühen Phasen im Entwicklungszyklus eines Organismus generell empfindlicher auf CO_2 -Stress reagieren als das ausgewachsene Tier.

Gefahr für die Nahrungsbasis der Ozeane – das Phytoplankton und die Versauerung

Die Grundlage des gesamten Nahrungsnetzes im Ozean sind die mikroskopisch kleinen Vertreter des marinen Phytoplanktons. Dazu gehören die Diatomeen (Kieselalgen), die Coccolithophoriden (Kalkalgen) oder auch die Cyanobakterien (ehemals als Blaualgen bezeichnet), die aufgrund ihrer Photosyntheseaktivität für etwa die Hälfte der globalen Primärproduktion, also der Produktion von Biomasse, verantwortlich sind.

Da das Phytoplankton für diese Prozesse auf Licht angewiesen ist, kommt es ausschließlich in den oberflächennahen Wasserschichten der Weltmeere vor. Damit ist es von der Ozeanversauerung direkt betroffen. Künftig werden sich durch den Klimawandel aber noch weitere Einflussgrößen wie Temperatur, Licht oder Nährstoffverfügbarkeit verändern. Diese werden die Produktivität autotropher Organismen, vor allem von Bakterien oder Algen, die allein durch Photosynthese oder die Aufnahme chemischer Verbindungen Biomasse erzeugen, ebenfalls bestimmen. Es ist deshalb sehr schwer vorherzusagen, welche Organismengruppen von den sich wandelnden



2.10 > Diese elektronenmikroskopischen Aufnahmen machen deutlich, dass ein erhöhter CO_2 -Gehalt im Wasser die Kalkbildung von Meeresorganismen, wie hier beispielsweise der Coccolithophoride *Emiliana huxleyi*, stören und zu Verformungen führen kann. Die oberen Fotografien wurden bei einer CO_2 -Konzentration im Wasser von 300 ppm aufgenommen, was knapp über dem vorindustriellen durchschnittlichen CO_2 -Gehalt des Meerwassers liegt. Bei den unteren Aufnahmen beträgt der CO_2 -Gehalt 780 bis 850 ppm. Zum Größenvergleich: Die Balken entsprechen einer Länge von einem Mikrometer.

Umweltbedingungen profitieren und welche zu den Verlierern gehören werden.

CO_2 trägt natürlich nicht nur zur Versauerung der Ozeane bei. In erster Linie ist das Gas Lebenselixier der Pflanzen, die CO_2 aus der Luft oder dem Meerwasser aufnehmen und daraus Biomasse aufbauen. Abgesehen von der Versauerungsproblematik dürften steigende CO_2 -Gehalte im Meerwasser deshalb generell vor allem das Wachstum jener Arten begünstigen, deren Photosyntheseprozesse bisher CO_2 -limitiert waren. So wurde bei Cyanobakterien teilweise ein starker Anstieg der Photosyntheseraten bei erhöhtem CO_2 -Gehalt festgestellt. Gleiches trifft auf bestimmte Coccolithophoriden wie *Emiliana huxleyi* zu. Doch selbst *Emiliana* könnten die zunächst vorteilhaften steigenden CO_2 -Konzentrationen zum Verhängnis werden. Denn *Emiliana*-Arten besitzen einen aus vielen Ein-

2.11 > Der Clownfisch (*Amphiprion percula*) reagiert normalerweise nicht empfindlich auf eine erhöhte CO₂-Konzentration im Wasser. Bei seinen Larven aber bewirkt sie eine Verschlechterung des Geruchssinns.



zelschuppen zusammengesetzten Kalkpanzer. Es gibt inzwischen Hinweise darauf, dass dessen Bildung bei sinkendem pH-Wert beeinträchtigt wird.

Im Gegensatz dazu scheint die Schalenbildung der Diatomeen ebenso wie ihre Photosyntheseaktivität kaum durch CO_2 beeinflusst zu werden. Allerdings wurden auch hier unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen Verschiebungen in der Artendominanz festgestellt.

Aufgabe für die Zukunft: die Versauerung verstehen

Um ein umfassendes Verständnis für die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf das Leben im Meer zu entwickeln, muss man herausfinden, wie und warum CO_2 verschiedene physiologische Prozesse mariner Organismen beeinflusst. Entscheidend ist letztlich, wie diese Einzelprozesse in der Summe die Toleranz des Gesamtorganismus gegenüber dem Stressor CO_2 bestimmen. Bislang wurden meist Kurzzeitstudien durchgeführt. Will man aber herausfinden, ob oder auf welche Weise ein Organismus unter CO_2 -Stress langfristig wachsen und aktiv und reproduktiv bleiben kann, dann bedarf es längerer Studien, die eine Tierart eventuell gar über mehrere Generationen hinweg unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen beobachten.

Die letzte und schwierigste Stufe ist dann die Übertragung der für einzelne Tierarten oder -gruppen gewonnenen Erkenntnisse auf die Ebene des Ökosystems. Aufgrund der vielfältigen Wechselbeziehungen der Tierarten innerhalb eines Ökosystems ist es natürlich ungleich schwieriger, das Verhalten eines solch komplexen Systems unter den Bedingungen der Ozeanversauerung vorauszusagen. Erste Computermodelle versuchen jetzt, den Wandel der Umweltbedingungen mit der Artendynamik des betroffenen Ökosystems in Verbindung zu setzen.

Darüber hinaus untersucht man vermehrt marine Habitate, die sich durch einen von Natur aus erhöhten Gehalt an CO_2 im Seewasser auszeichnen. In der Umgebung der italienischen Insel Ischia beispielsweise tritt in unmittelbarer Nähe der Küste infolge vulkanischer Aktivität CO_2 am Meeresboden aus und führt zu einer Ansäuerung des Wassers in einigen Abschnitten der Felsküste. In unmittelbarer Nachbarschaft befinden sich also Küstenabschnitte



2.12 > Wasser mit niedrigem pH-Wert greift in den Gewässern um Ischia die Schalen von kalkbildenden Tieren wie etwa der Schnecke *Osilinus turbinata* an. Das linke Bild zeigt ein intaktes gepunktetes Schneckenhaus bei normalem pH-Wert von 8,2. Das Schneckenhaus rechts zeigt bei einem pH-Wert von 7,3 deutliche Spuren des Verfalls. Der Balken entspricht einer Länge von einem Zentimeter.

mit normalem (8,1 bis 8,2) und mit deutlich abgesenktem pH-Wert (Minimum 7,4). Vergleicht man die jeweils vorhandenen Tier- und Pflanzengemeinschaften miteinander, so zeigen sich deutliche Unterschiede: In den sauren Bereichen fehlen Steinkorallen völlig, die Zahl der Exemplare verschiedener Seeigel- und Schneckenarten ist niedrig, ebenso die Zahl kalkbildender Rotalgen. Dominiert werden diese sauren Meeresgebiete vor allem von Seegraswiesen und verschiedenen nichtkalkifizierenden Algenarten.

Der Ausbau solcher ökosystembasierten Studien ist eine große Herausforderung für die Zukunft. Derartige Studien sind Voraussetzung für ein breites Verständnis der zukünftigen Entwicklungen im Ozean. Nicht außer Acht gelassen werden dürfen dabei die Tiefseeökosysteme, die unmittelbar von den Auswirkungen einer möglichen künftigen Entsorgung von CO_2 im Meeresboden betroffen sein könnten. Beantwortet werden muss zudem, wie sich die durch den Klimawandel bewirkten Veränderungen in der Meeresumwelt auf die Fortpflanzung verschiedener Organismen auswirken. Bislang gibt es wenige exemplarische Studien. Von einem Gesamtverständnis ist die Wissenschaft derzeit also noch weit entfernt. Ob und wie verschiedene Spezies auf die chemischen Veränderungen im Meer reagieren, ob sie dadurch in Stress geraten oder nicht, ist meist unbekannt. Hier gibt es erheblichen Forschungsbedarf. Geklärt werden muss außerdem, inwieweit Pflanzen und Tiere in verschiedenen Lebensphasen auf die Stressbedingungen reagieren.

Sauerstoff im Ozean

> Wissenschaftler messen den Sauerstoffgehalt im Meer seit mehr als hundert Jahren routinemäßig. Mit dem Klimawandel aber ist diese Messgröße schlagartig aktuell geworden. Denn der im Meer gelöste Sauerstoff fungiert als eine Art sensibles Frühwarnsystem für Veränderungen, die der Klimawandel im Ozean verursacht. Für die kommenden Jahre steht der Masseneinsatz von Sauerstoffsensoren bevor, die dieser Messgröße eine Renaissance bescheren dürften.

Sauerstoff – Produkt und Elixier des Lebens

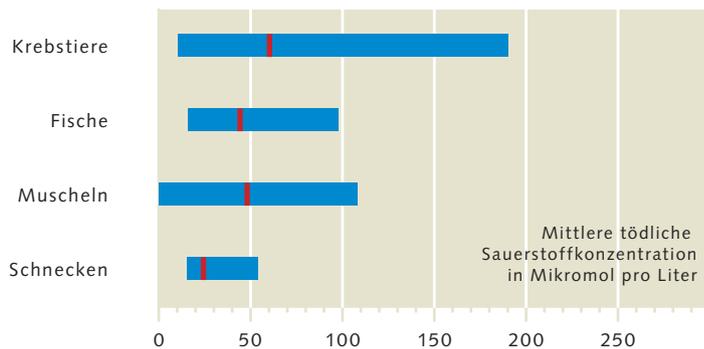
Während das Kohlendioxid – lebenswichtige Substanz für Pflanzen und klimaschädliches Gas zugleich – nur in geringen Mengen in der Atmosphäre vorkommt, ist Sauerstoff (O_2) nicht nur ein Hauptbestandteil unserer Atmosphäre, sondern auch das häufigste chemische Element der Erde. Das Erscheinen von atmosphärischem Sauerstoff ist das Ergebnis eines biologischen Erfolgsmodells, der Photosynthese, mit deren Hilfe Pflanzen und Bakterien anorganische Stoffe wie Kohlendioxid und Wasser in Biomasse umwandeln können. Bei diesem Prozess entstand und entsteht Sauerstoff. Die produzierte Biomasse ist ihrerseits Nahrungsgrundlage sogenannter Konsumenten, der Tiere oder der Menschen. Diese können zum Leben benötigte Energie nicht wie Pflanzen aus dem Sonnenlicht schöpfen, sondern müssen sie aus der Verbrennung von

Biomasse gewinnen, einem Prozess, der Sauerstoff verbraucht. Atmosphärischer Sauerstoff ist auf unserem Planeten also sowohl Produkt als auch Elixier des Lebens.

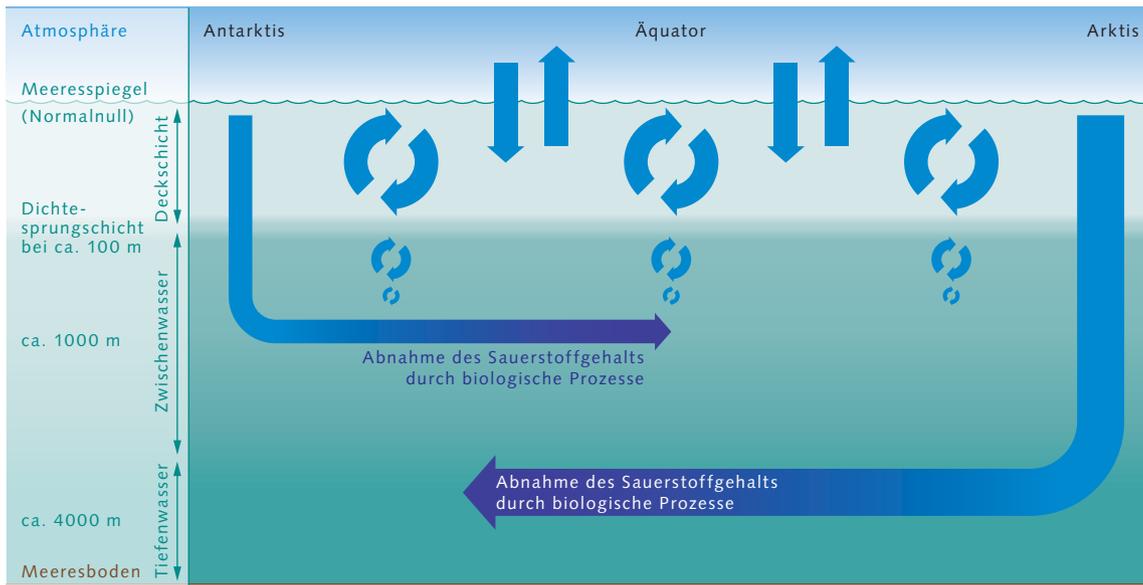
Sauerstoffhaushalt des Weltmeeres

Genau wie an Land gibt es im Meer photosynthetisch aktive Pflanzen und Bakterien, die **Primärproduzenten**. Pro Jahr erzeugen sie etwa genauso viel Sauerstoff und binden dabei genauso viel Kohlenstoff wie sämtliche Landpflanzen zusammen. Das ist zunächst erstaunlich. Immerhin beträgt die lebende Biomasse im Ozean nur etwa ein Zweihundertstel der in den Landpflanzen fixierten Biomasse. Primärproduzenten im Meer leisten also, bezogen auf ihre Masse, fast das Zweihundertfache der Landpflanzen. Hierin spiegelt sich die hohe Produktivität einzelliger Algen wider, die kaum inaktive Biomasse wie zum Beispiel das Kernholz in Baumstämmen besitzen.

Die photosynthetische Bildung von Sauerstoff ist auf die oberste, lichtdurchflutete Schicht des Meeres begrenzt. Diese reicht kaum tiefer als 100 Meter und ist aufgrund der stabilen Dichteschichtung des Meeres weitgehend von dem darunterliegenden riesigen Ozeaninnern getrennt. Zudem entweicht der biologisch durch die Primärproduzenten erzeugte Sauerstoff in kurzer Zeit zum großen Teil in die Atmosphäre, sodass dieser kaum zur Anreicherung von Sauerstoff im Innern des Meeres beiträgt. Der Grund: Weil das oberflächennahe Wasser, das etwa 100 Meter tief reicht, durch die Zufuhr aus der Atmosphäre nahezu mit Sauerstoff gesättigt ist, kann es keinen zusätzlichen Sauerstoff aus biologischer Produktion speichern, sondern gibt diesen rasch an die Atmosphäre ab. Im Ozeaninnern wiederum gibt es keine Sauerstoffquellen. Damit wird Sauerstoff also ausschließlich über den



2.13 > Meerestiere reagieren auf Sauerstoffmangel unterschiedlich. Viele Schneckenarten etwa ertragen geringere O_2 -Konzentrationen als Fische oder Krebse. Die Grafik zeigt, bei welcher Konzentration die Hälfte der Tiere im Experiment verendet. Der mittlere Wert ist für jede Tiergruppe als roter Strich dargestellt. Die Balken zeigen die Bandbreite: Manche Krebsarten ertragen viel geringere O_2 -Konzentrationen als andere.



2.14 > Sauerstoff gelangt aus der Atmosphäre in das oberflächennahe Wasser der Ozeane, die Deckschicht. Diese ist gut durchmischt, steht daher in einem chemischen Gleichgewicht mit der Atmosphäre und ist folglich reich an O_2 . Sie endet abrupt an der Dichtesprungschicht, die wie eine Barriere wirkt. Das sauerstoffreiche Wasser der Deckschicht vermischt sich

daher kaum mit den tieferen Wasserschichten. In die Tiefe gelangt Sauerstoff letztlich nur durch die Meeresströmungen, insbesondere durch die Bildung von Tiefenwasser und Zwischenwasser in Arktis und Antarktis. Im Innern des Ozeans verbrauchen die Meeresorganismen Sauerstoff. Es entsteht also ein sensibles Gleichgewicht.

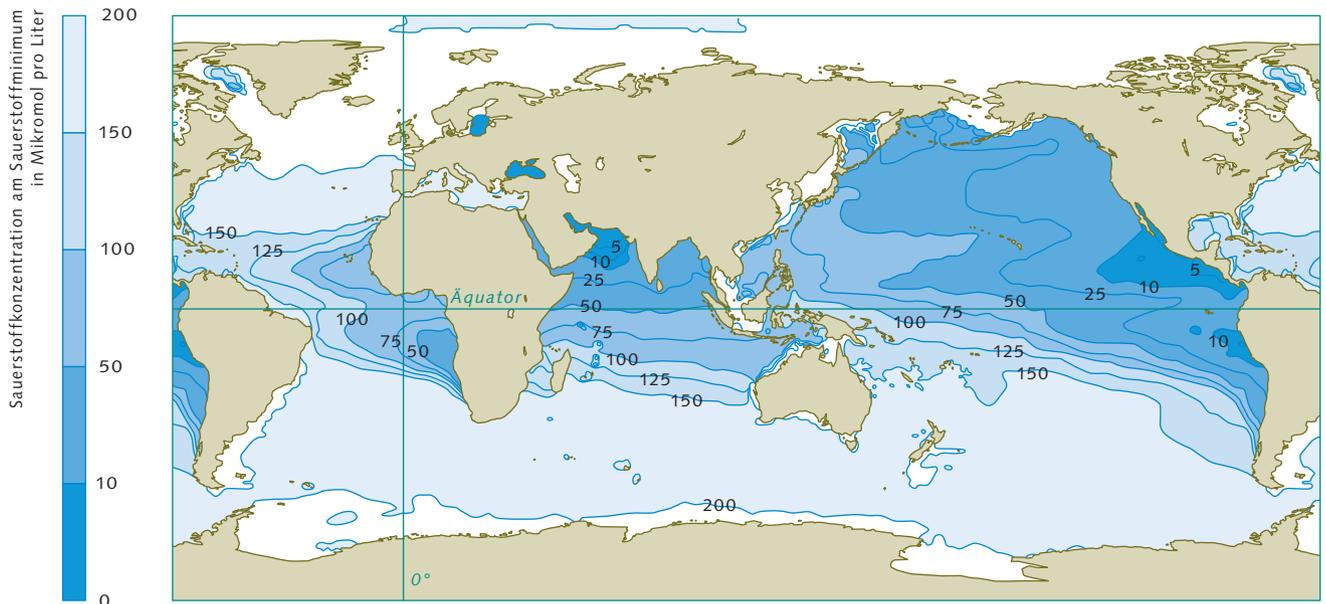
Kontakt des Oberflächenwassers mit der Atmosphäre ins Meer eingebracht. Von dort gelangt der Sauerstoff dann durch das Absinken und Zirkulieren von Wassermassen in die Tiefe. Dies wiederum sind dynamische Prozesse, die ihrerseits stark von den klimatischen Bedingungen beeinflusst werden (Kapitel 1).

Letztlich bestimmen drei Faktoren, wie hoch die Konzentration des gelösten Sauerstoffs an einem bestimmten Punkt im Ozean ist:

1. die Startkonzentration des Sauerstoffs, die dieses Wasser bei seinem letzten Kontakt mit der Atmosphäre besaß;
2. die Zeit, die seit dem letzten Atmosphärenkontakt vergangen ist. Das können tatsächlich Jahrzehnte oder Jahrhunderte sein;
3. die biologische Sauerstoffzehrung, die sich aus der Atmung sämtlicher Konsumenten in dieser Zeit ergibt. Diese reichen von winzigen Bakterien über das Zooplankton bis hin zu höheren Lebewesen wie den Fischen.

Somit ist die heutige Verteilung von Sauerstoff im Ozean das Resultat von Wasserzirkulation und biologischer Produktivität, also der Sauerstoffzehrung durch die Konsumenten. Ausführliche Messungen haben ergeben, dass man in den hohen Breiten, in denen die Weltmeere besonders gut durchmischt und belüftet werden, die höchsten Sauerstoffkonzentrationen findet. In den mittleren Breiten hingegen – vor allem vor den Westküsten der Kontinente – gibt es ausgeprägte Sauerstoffmangelzonen. Hier trifft eine schwache Sauerstoffversorgung wegen träger Wasserzirkulation auf eine starke Sauerstoffzehrung aufgrund der starken Aktivität der Konsumenten. Das führt dazu, dass der Sauerstoff im Tiefenbereich zwischen 100 und 1000 Metern praktisch vollständig aufgebraucht ist. Eine solche Situation findet sich auch im nördlichen Indischen Ozean im Bereich des Arabischen Meeres.

Verschiedene Gruppen von Meeresorganismen reagieren auf diesen Sauerstoffmangel unterschiedlich, weil die Toleranz gegenüber sauerstoffarmen Bedingungen bei



2.15 > Meeresgebiete mit Sauerstoffmangel sind durchaus natürlich. Diese Zonen befinden sich vor allem in den mittleren Breiten an den Westseiten der Kontinente. Hier durchmischt sich das warme Oberflächenwasser kaum mit dem kalten Tiefen-

wasser, sodass nur wenig Sauerstoff in die Tiefe dringt. Zudem führen hier eine hohe Bioproduktivität und entsprechend große Mengen absinkender Biomasse zu starker Sauerstoffzehrung in der Tiefe – insbesondere zwischen 100 und 1000 Metern.

marinen Tieren sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann. So benötigen Krebstiere und Fische im Allgemeinen deutlich höhere Sauerstoffkonzentrationen als Muscheln oder Schnecken. Die größten ozeanischen Sauerstoffminimumzonen sind aufgrund der dort vorherrschenden extrem niedrigen Konzentrationen jedoch weitgehend als natürliche und keineswegs vom Menschen verursachte Todeszonen für alle höheren Lebewesen anzusehen.

Sauerstoff – Renaissance einer hydrographischen Messgröße

Die Sauerstoffverteilung im Meer hängt sowohl von biologischen Prozessen wie der Atmung der Organismen als auch von physikalischen Prozessen wie etwa Strömungen ab. Veränderungen dieser Prozesse müssten somit auch zu Veränderungen der Sauerstoffverteilung führen. In der Tat kann der gelöste Sauerstoff künftig als eine Art sensibles Frühwarnsystem für den globalen (Klima-)Wandel im Ozean fungieren. Wie wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, erspürt dieses Frühwarnsystem sowohl die erwartete Abnahme des durch globale Strömungs- und

Durchmischungsprozesse angetriebenen Sauerstofftransports aus der Atmosphäre ins Meer als auch mögliche Veränderungen in den marinen Lebensgemeinschaften. Dieses Erkenntnis hat in den vergangenen Jahren zu einer regelrechten Renaissance des Sauerstoffs in der weltweiten Meeresforschung geführt. In der Ozeanographie ist gelöster Sauerstoff schon seit mehr als hundert Jahren eine wichtige Messgröße. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte man eine Bestimmungsmethode für gelösten Sauerstoff, die bis heute in nur leicht modifizierter Weise als präzise Methode angewendet wird. Dadurch konnte sich bereits früh ein grundlegendes Verständnis der Sauerstoffverteilung im Weltmeer entwickeln – etwa in den 1920er Jahren durch die berühmte Deutsche Atlantische Expedition der „Meteor“, des ersten deutschen Forschungsschiffs mit diesem Namen.

Aktuelle Forschungsergebnisse der letzten Jahre haben für nahezu alle Ozeanbecken Trends abnehmender Sauerstoffkonzentrationen aufgezeigt. Diese Trends sind zwar teilweise recht schwach und bisher überwiegend auf Wassermassen in den oberen 2000 Metern des Ozeans beschränkt, sodass sich aus den Einzelstudien noch kein völ-

lig konsistentes Bild zeichnen lässt. Dennoch deutet sich in den meisten Studien eine Entwicklung abnehmender Sauerstoffkonzentrationen an. Dieser Trend geht einher mit einer bereits nachgewiesenen Ausbreitung und Intensivierung der natürlichen Sauerstoffminimumzonen, jenen Zonen, die für höhere Organismen lebensfeindlich sind. Fällt der Sauerstoff unter bestimmte (niedrige) Schwellenwerte, werden höhere Organismen verdrängt. Sessile – festsitzende und somit unbewegliche – Organismen sterben. Außerdem führt der Sauerstoffmangel zu gravierenden Veränderungen in den biogeochemischen Reaktionen und Stoffkreisläufen der Ozeane – etwa der Pflanzennährstoffe Nitrat und Phosphat.

Das betrifft geochemische Vorgänge im Sediment, aber vor allem auch bakterielle Stoffwechselfvorgänge, die unter veränderten Sauerstoffbedingungen komplett umschlagen können. Welche Konsequenzen die Veränderungen letztlich haben, kann man heute kaum abschätzen. In manchen Fällen lässt sich noch nicht einmal mit Sicherheit sagen, ob die Folgen den Klimawandel weiter anheizen oder ihn eventuell sogar abschwächen. Als wahrscheinlich aber gilt, dass sich die daraus resultierenden spürbaren Effekte erst über längere Zeiträume von Jahrhunderten oder Jahrtausenden einstellen werden.

Doch bereits heute führt der Klimawandel zu veränderten Sauerstoffgehalten im Meer, die sich negativ auswirken. So trat in den vergangenen Jahren vor der Küste des US-Staates Oregon erstmals eine extreme Sauerstoffmangelsituation auf, die zum Massensterben von Krebsen und Fischen führte. Diese neue Todeszone vor Oregon stammt aus dem offenen Ozean und ist vermutlich auf Veränderungen im Klima zurückzuführen. So haben vor der Westküste der USA offenbar die vorherrschenden Winde ihre Richtung und Intensität und damit wahrscheinlich auch die Meeresströmungen verändert. Forscher nehmen an, dass dadurch jetzt verstärkt sauerstoffarmes Wasser aus der Tiefe an die Oberfläche strömt. Die Todeszone vor Oregon unterscheidet sich damit von den mehr als 400 weltweit bekannten küstennahen Todeszonen, die überwiegend auf Eutrophierung zurückzuführen sind, also den übermäßigen Eintrag von Pflanzennährstoffen. Dieses Problem tritt vor allem in den Küstengewässern vor dicht besiedelten Regionen mit intensiver Landwirtschaft auf (Kapitel 4).

Sauerstoff – Herausforderung an die Meeresforschung

Die Tatsache, dass Modellrechnungen der Auswirkungen des Klimawandels ebenfalls fast durchweg eine Sauerstoffabnahme im Ozean prognostizieren, die gut mit den bisher vorliegenden Beobachtungen abnehmender Sauerstoffkonzentration übereinstimmt, verleiht der Thematik zusätzliche Gewichtung. Auch wenn hier sicherlich das letzte Wort noch nicht gesprochen ist, deutet sich bereits jetzt an, dass der schleichende Sauerstoffverlust des Weltozeans ein Thema von hoher Relevanz ist, das möglicherweise auch sozioökonomische Konsequenzen hat und dem sich die Meeresforschung stellen muss.

Eine intensiviertere Forschung wird robustere Aussagen über das Ausmaß der Sauerstoffabnahme liefern können. Zudem wird sie wesentlich dazu beitragen, die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Ozean besser zu verstehen. Die Meeresforschung hat sich in den letzten Jahren verstärkt dieser Thematik angenommen und bereits entsprechende Forschungsprogramme und -projekte auf den Weg gebracht. Allerdings ist es schwierig, die räumlich und zeitlich sehr variablen Ozeane in Gänze zu erfassen. Um zuverlässige Aussagen machen zu können, werden die klassischen Instrumente der Meeresforschung wie Schiffe und Wasserprobenahme deshalb nicht ausreichen. Die Forscher sind auf neue Beobertungskonzepte angewiesen. Ein besonders erfolgversprechender Ansatz sind die sogenannten Tiefendrifter: Das sind tauchfähige Messroboter, die völlig autonom für drei bis vier Jahre im Meer treiben und dabei typischerweise alle zehn Tage die oberen 2000 Meter der Wassersäule vermessen. Die Daten werden nach dem Auftauchen via Satellit an Datenzentren übertragen. Gegenwärtig sind etwa 3200 dieser Messroboter für das internationale Forschungsprogramm ARGO – benannt nach einem Schiff aus der griechischen Mythologie – unterwegs. Gemeinsam bilden sie ein weltumspannendes autonomes Observatorium, das von fast 30 Nationen betrieben wird. Bisher wird dieses Observatorium nur in sehr geringem Umfang für O₂-Messungen genutzt. Inzwischen gibt es aber eine Sensortechnologie zur O₂-Messung, die auf den Tiefendriftern eingesetzt werden könnte. So ließen sich Daten zur Veränderlichkeit der ozeanischen Sauerstoffverteilung gewinnen.

Die Atlantische Expedition

Mit der Deutschen Atlantischen Expedition (1925 bis 1927) und dem Forschungsschiff „Meteor“ wurde erstmals ein ganzer Ozean systematisch sowohl in der Atmosphäre als auch in der Wassersäule beprobt. Unter Einsatz des damals hochmodernen Echolotverfahrens wurden auf 13 Ozeanüberquerungen Tiefenprofile über das gesamte Meeresbecken erfasst.

Wirkung des Klimawandels auf Methanhydrate

> Weltweit lagern gigantische Mengen Methan in Form fester Methanhydrate am Meeresgrund. Diese Hydrate sind eine große Energiereserve für die Menschheit. Doch durch die Klimaerwärmung könnten sich die Hydrate auflösen. Das Methan, ein potentes Klimagas, würde ungenutzt in die Atmosphäre entweichen und könnte den Klimawandel sogar noch anheizen.

Wie das Methan ins Meer gelangt

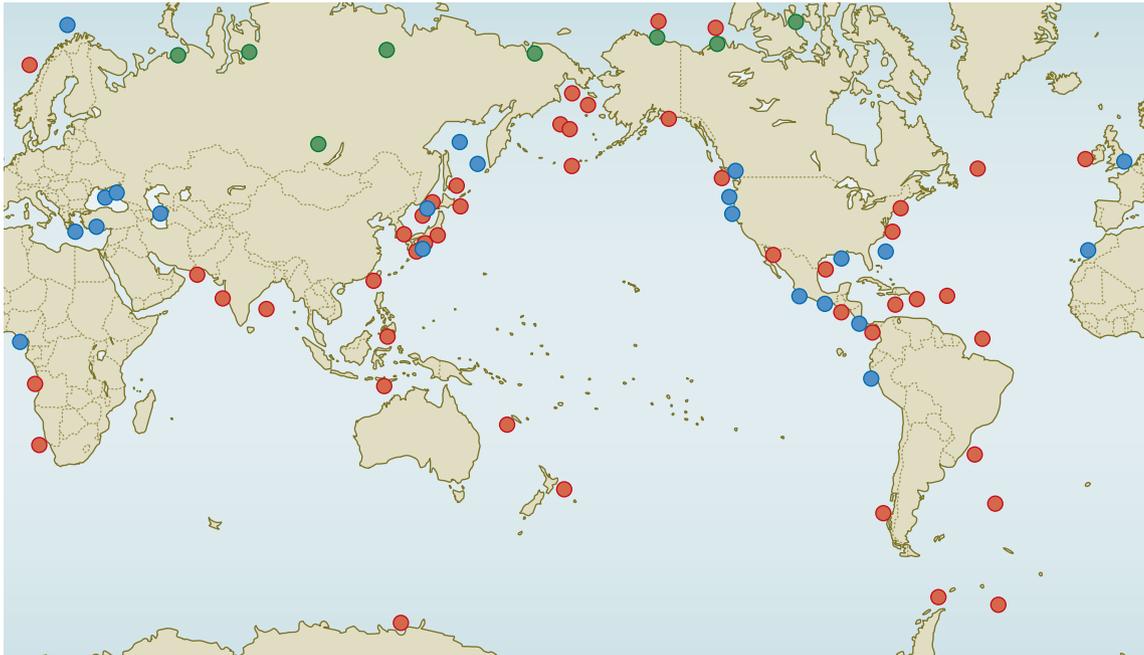
Kohle, Erdgas und Erdöl verfeuert man seit mehr als hundert Jahren. Methanhydrate hingegen werden erst seit Kurzem als zukünftige Energiequelle aus dem Meer kontrovers diskutiert. Sie stellen ein neues, bislang völlig ungenutztes Reservoir fossiler Energieträger dar, denn sie enthalten, wie der Name andeutet, gigantische Mengen von dem, woraus auch Erdgas besteht: Methan. Methanhydrate gehören zu den sogenannten Clathraten. Das sind Substanzen, bei denen ein Molekültyp eine kristallartige Käfigstruktur ausbildet und darin einen anderen Molekültyp einschließt. Ist das käfigbildende Molekül Wasser, spricht man von Hydrat. Ist das im Wasserkäfig eingeschlossene Molekül ein Gas, spricht man von Gashydrat – in diesem Fall von Methanhydrat. Methanhydrate bilden sich nur unter ganz bestimmten physikalischen,

chemischen und geologischen Bedingungen. Hohe Wasserdrücke und tiefe Temperaturen sind die besten Voraussetzungen für die Methanhydratentstehung. Ist das Wasser hingegen warm, muss der Wasserdruck sehr hoch sein, um die Wassermoleküle in den Clathratkäfig zu pressen. Das Hydrat bildet sich in diesem Fall nur in großen Tiefen. Ist das Wasser sehr kalt, so können sich Methanhydrate unter Umständen auch schon bei sehr geringen Wassertiefen oder sogar bei atmosphärischem Druck bilden. Im offenen Ozean mit einer durchschnittlichen Wassertemperatur von 2 bis 4 Grad Celsius am Meeresboden entstehen Methanhydrate schon ab einer Wassertiefe von ungefähr 500 Metern.

Überraschenderweise findet man in den tiefsten Meeresregionen der Erde, den Gebieten mit den höchsten Drücken, trotzdem kein Methanhydrat, weil hier kaum Methan zur Verfügung steht. Der Grund: Im Ozean wird Methan von Mikroben im Meeresboden erzeugt, die organisches Material zersetzen, das aus der lichtdurchfluteten Zone nahe der Wasseroberfläche herabsinkt. Es besteht unter anderem aus Überresten abgestorbener Algen und Tiere sowie deren Exkrementen. In den tiefsten Bereichen des Ozeans, unterhalb von etwa 2000 bis 3000 Metern, kommen am Meeresboden kaum noch organische Überreste an, denn der Großteil wird bereits auf seinem Weg durch die Wassersäule von anderen Organismen abgebaut. Als Daumenregel gilt, dass nur etwa 1 Prozent des an der Oberfläche produzierten organischen Materials tatsächlich bis in die Tiefsee gelangt. Je tiefer der Meeresboden liegt, desto weniger Biomasse landet am Boden. Methanhydrate kommen daher vor allem an den Kontinentalhängen vor, jenen Gebieten, in denen die Kontinentalplatten in die Tiefseeebenen übergehen. Hier sinkt ausreichend Biomasse zu Boden, und auch das Zusammenspiel von

2.16 > Wie ein Stück Eis sieht Methanhydrat aus, wenn man es vom Meeresgrund holt. Dieser Brocken wurde während einer Expedition zum sogenannten Hydratrücken vor der Küste des US-Staates Oregon an Bord gebracht.





2.17 > Methanhydratvorkommen gibt es in allen Ozeanen und auch an Land. Die grünen Punkte zeigen die Vorkommen in den nördlichen Permafrostgebieten. Mit Rot sind Vorkommen ge-

kennzeichnet, die mithilfe geophysikalischer Methoden identifiziert wurden. Die blau markierten Vorkommen wurden durch direkte Beprobung nachgewiesen.

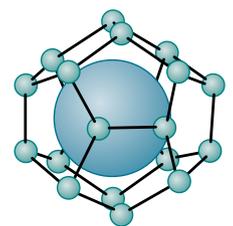
Temperatur und Druck stimmt. In sehr kalten Regionen wie der Arktis kommen Methanhydrate sogar auf dem flachen Kontinentalschelf (in weniger als 200 Metern Wassertiefe) oder auch an Land im Permafrostboden vor, jenen tiefgefrorenen arktischen Böden, die selbst im Sommer nicht auftauen.

Man schätzt, dass in den Methanhydraten mehr fossiler Brennstoff enthalten sein kann als in den klassischen Energieträgern Kohle, Erdöl und Erdgas. Je nach Rechenmodell schwanken die Kalkulationen der Vorkommen derzeit zwischen 100 und 530 000 Gigatonnen Kohlenstoff. Wahrscheinlicher sind Werte zwischen 1000 und 5000 Gigatonnen. Das ist in etwa 100- bis 500-mal mehr Kohlenstoff, als jährlich durch die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas in die Atmosphäre freigesetzt wird. Bei einem künftigen Abbau wäre vermutlich nur ein Teil der Gashydrate tatsächlich als Energiequelle nutzbar, da viele Lagerstätten unerreichbar sind oder weil eine mögliche Förderung zu teuer oder technisch zu aufwendig ist. Trotzdem beschäftigen sich Indien, Japan, Korea und andere Natio-

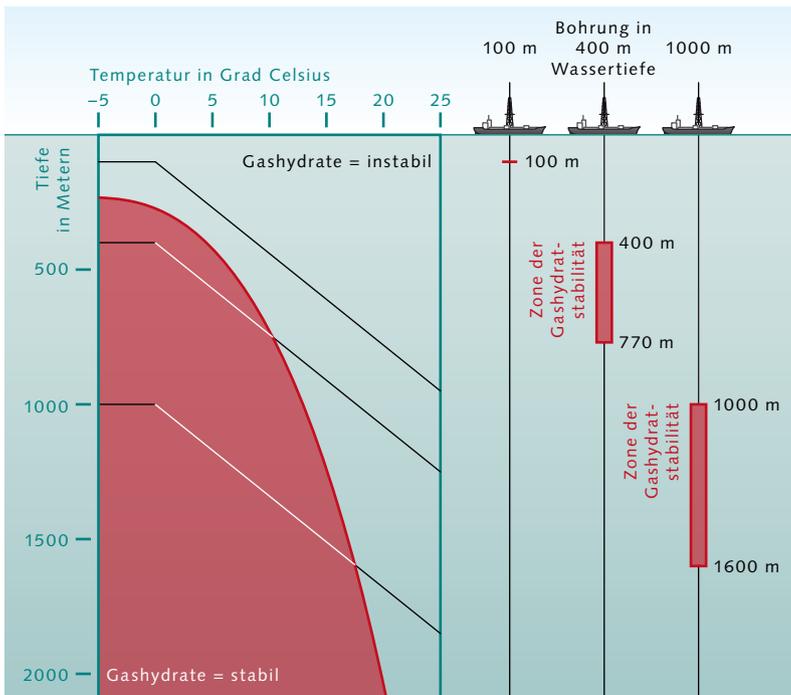
nen derzeit mit der Entwicklung von Abbautechniken, um Methanhydrate in Zukunft als Energiequelle nutzen zu können (Kapitel 7).

Methanhydrate und die globale Erwärmung

Bedenkt man, dass sich Methanhydrate nur unter ganz bestimmten Bedingungen bilden, ist es durchaus vorstellbar, dass eine globale Erwärmung und damit eine Erwärmung der Ozeane die Stabilität von Gashydraten beeinflussen kann. Es gibt Indizien in der Erdgeschichte, die darauf hinweisen, dass Klimaänderungen in der Vergangenheit zur Auflösung von Methanhydraten und damit zur Freisetzung von Methan geführt haben könnten. Diese Indizien, beispielsweise Messungen von Methangehalten in Eiskernbohrungen, werden allerdings immer noch kontrovers diskutiert. Dennoch ist das Thema nicht vom Tisch und beschäftigt die Wissenschaftler heute umso mehr, wenn es darum geht, mögliche Auswirkungen von Temperaturerhöhungen auf die derzeitigen Methanhydratvor-



2.18 > In Hydraten ist das Gas (große Kugel) in einen Käfig aus Wassermolekülen eingesperrt. Fachleute bezeichnen derartige molekulare Anordnungen als Clathrate.



2.19 > Gashydrate kommen dort vor, wo viel Biomasse zu Boden sinkt und zugleich niedrige Temperaturen und hohe Drücke herrschen – insbesondere an den Kontinentabhängen. Je höher die Wassertemperatur ist, desto größere Tiefen und Drücke sind für die Bildung des Hydrats nötig. In sehr großer Tiefe jedoch ist die Temperatur im Meeresboden aufgrund der Erdwärme so hoch, dass sich keine Methanhydrate mehr bilden können.

Die Oxidation

Viele Bakterien nutzen Methan als Energielieferant ihres Stoffwechsels. Sie nehmen Methan auf und wandeln es chemisch um. Das Methan gibt dabei Elektronen ab. Es wird oxidiert. Manche Bakterien bauen das Methan mithilfe von Sauerstoff ab. Man spricht dann von aerober Oxidation. Andere Bakterien benötigen keinen Sauerstoff. Die Oxidation ist anaerob.

kommen abzuschätzen. Methan ist ein starkes Treibhausgas – in seiner Wirkung als Molekül ungefähr 20-mal so stark wie Kohlendioxid. Eine verstärkte Freisetzung aus den Meeren in die Atmosphäre könnte den Treibhauseffekt weiter ankurbeln. Es muss daher dringend untersucht werden, wie stabil die Methanhydrate in Abhängigkeit von Temperaturschwankungen sind und wie sich das Methan nach seiner Freisetzung verhält. Es gibt mehrere Möglichkeiten, um die künftige Entwicklung abzuschätzen, insbesondere die mathematische Modellierung. Computermodelle errechnen zunächst die Methanhydratvorkommen anhand von Hintergrunddaten (Anteil von organischem Material im Meeresboden, Druck, Temperatur). Anschließend wird im Computer die Erwärmung des Meerwassers simuliert – beispielsweise um 1, 3 oder 5 Grad Celsius pro 100 Jahre. So kann man feststellen, wie sich die Methanhydrate in verschiedenen Gebieten verhalten. Natürlich lässt sich die Berechnung der Methanhy-

dratvorkommen auch mit komplizierten mathematischen Klima- und Ozeanmodellen koppeln. Man erreicht damit eine realistischere Abschätzung der Entwicklung der Wassertemperatur, die ins Methanhydratmodell eingespeist wird. Dank dieser Computermodelle bekommt man eine vage Vorstellung davon, wie stark sich die Methanhydrate bei den verschiedenen Temperaturerhöhungen auflösen würden. Heute nimmt man an, dass im schlimmsten Fall bei einer gleichmäßigen Erwärmung des Ozeans um 3 Grad Celsius circa 85 Prozent des im Meeresboden enthaltenen Methans in die Wassersäule freigesetzt werden könnten. Andere, sensitivere Modelle sagen voraus, dass Methanhydrate in größeren Wassertiefen nicht durch Erwärmungen gefährdet sind. Gemäß diesen Modellen sind vor allem Methanhydrate betroffen, die sich unmittelbar an der Stabilitätsgrenze befinden. Hier würde schon eine Temperaturerhöhung von nur 1 Grad Celsius ausreichen, um größere Mengen Methan aus den Hydraten zu lösen. Betroffen sind vor allem Methanhydrate im offenen Ozean, die in etwa 500 Metern Wassertiefe liegen, und die in den flachen Bereichen der Arktis lagernden Methanhy-

drate. Erwartet wird im Zuge der Erderwärmung auch, dass durch das Abschmelzen der Polkappen und des Gletschereises der Meeresspiegel steigt. Damit erhöht sich zwangsläufig auch der Druck am Meeresboden. Diese Druckerhöhung wird allerdings nicht ausreichen, um einer Auflösung der Methanhydrate durch Temperaturerhöhungen effektiv entgegenzuwirken. Nach neuesten Berechnungen könnte selbst ein Meeresspiegelanstieg um 10 Meter die durch eine Erwärmung um 1 Grad Celsius bewirkte Methanhydratauflösung lediglich um ein paar Jahrzehnte verlangsamen.

Es gibt eine Fülle mathematischer Modelle, mit denen man die Folgen der Erderwärmung abzuschätzen versucht. Entsprechend unterschiedlich sind die Simulationsergebnisse. Es ist daher schwierig, die Folgen der globalen Erwärmung auf die Gashydratvorkommen exakt abzuschätzen – nicht zuletzt wegen der großen Schwankungen in den Berechnungen zur Größe der heutigen Gashydratvorkommen. Ein Ziel aktueller Gashydratforschung ist es, diese Modelle durch immer genauere Eingabeparameter zu optimieren. Hierfür sind weitere Messungen, Expeditionen, Bohrungen und Analysen nötig.

Methanhydrat schmilzt – was dann?

Es ist nicht gesagt, dass alles Methan, welches aus instabilen Methanhydraten freigesetzt wird, auch in die Atmosphäre gelangt. Der überwiegende Teil dürfte bereits während des Aufstiegs im Sediment und in der Wassersäule abgebaut werden. Dieser Abbau geschieht vor allem durch zwei biologische Prozesse:

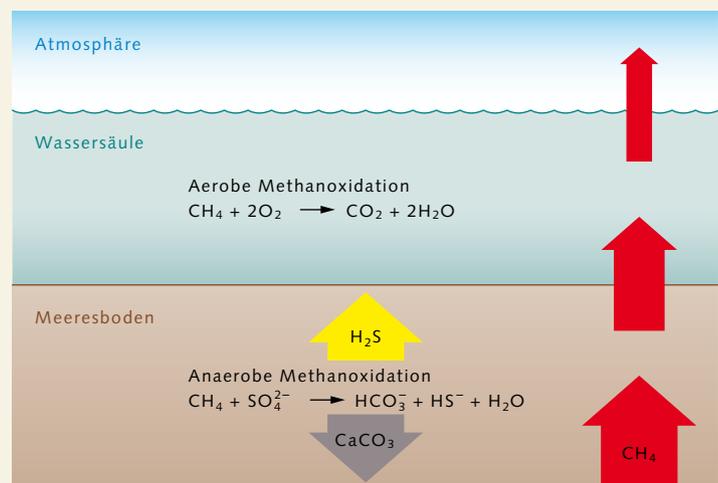
- die anaerobe Methanoxidation durch Bakterien und Archeen (früher als Urbakterien bezeichnet) im Meeresboden;
- die aerobe Methanoxidation durch Bakterien in der Wassersäule.

Bei der anaeroben Methanoxidation im Meeresboden nutzen die Mikroben für den Methanabbau Sulfat (SO_4^{2-}), das Salz der Schwefelsäure, das im Meerwasser in großen Mengen vorhanden ist. Dabei wird Methan in Bikarbonat (HCO_3^-) umgewandelt. Reagiert das Bikarbonat weiter mit Kalziumionen (Ca^{2+}) im Meerwasser, entsteht Kalziumkarbonat (CaCO_3), Kalk, der lange Zeit im Meeresboden gespeichert bleibt. Das wäre der Idealfall, denn damit würde das potente Treibhausgas Methan (CH_4) unschädlich gemacht. Gleichzeitig entsteht aus dem Sulfat Schwefelwasserstoff (H_2S), der vielen Lebensgemeinschaften wie etwa Muscheln und Röhrenwürmern mit symbiontischen Bakterien als Energiequelle dient. Bei der aeroben Oxidation in der Wassersäule bauen Bakterien das Methan hingegen mithilfe von Sauerstoff (O_2) ab. Dabei entsteht Kohlendioxid, welches sich im Wasser löst. Auch hier wird Methan unschädlich gemacht, indem es in eine andere Form umgewandelt wird. Diese chemische Umwandlung ist allerdings durchaus problematisch. Zum einen, weil sich das Kohlendioxid im Wasser löst und Kohlensäure bildet und damit zur Versauerung der Ozeane beiträgt. Zum anderen, weil bei der aeroben Methanoxidation Sauerstoff verbraucht wird. Dadurch könnten im Meer sauerstoffarme Zonen entstehen, was eine Gefahr für Fische und andere sensible Lebewesen wäre. Grobe Abschätzungen gehen davon aus, dass die anaerobe und aerobe Methanoxidation zusammen circa 90 Prozent des im Meeresboden produzierten Methans verbrauchen, bevor es die Atmosphäre erreichen kann. Dabei sind die Mikroben umso effektiver, je langsamer das Methan durch den Meeresboden oder durch die Wassersäule wandert.

Die Grundvoraussetzung für einen solchen Abbau ist, dass sich die Methanmoleküle im Wasser lösen. Nur in dieser Form ist Methan für die Bakterien überhaupt nutzbar. Sollte Methan jedoch schnell aus den Hydraten freigesetzt werden, könnte es in Form von Gasblasen aufsteigen, die für die Mikroorganismen nicht verwertbar sind. Der mikrobielle Methanfilter würde also zum Teil versagen, wenn sich die Methanhydrate allzu schnell auflösen und auf einen Schlag große Mengen Methan frei werden. Ebenso problematisch sind geringe Wassertiefen, weil sich die Methanblasen auf dem kurzen Weg vom Meeresboden zur Atmosphäre nicht vollständig im Wasser lösen können. Um solche Prozesse besser zu verstehen und Vorhersagen über die Funktion des mikrobiellen Filters

Bakterien verarbeiten Methan

Methan (CH_4) wird im Meer vor allem durch Mikroorganismen abgebaut. Beim anaeroben Abbau im Meeresboden verarbeiten die Mikroben das Methan mithilfe von Sulfat (SO_4^{2-}). Dabei entstehen Hydrogensulfidionen (HS^-) und Schwefelwasserstoff (H_2S), die chemisch eng verwandt sind und nebeneinander vorkommen, sowie Bikarbonat (HCO_3^-). Das Bikarbonat kann mit Kalziumionen (Ca^{2+}) zu Kalk, Kalziumkarbonat (CaCO_3), reagieren und sich im Meeresboden ablagern. Beim aeroben Abbau (in der Wassersäule) wird Sauerstoff (O_2) aus dem Wasser verbraucht. Als Produkt entsteht Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Sollten sich in Zukunft aus den Gashydraten im Meeresboden große Mengen Methan lösen, könnte der aerobe Abbau zu sauerstoffarmen Zonen führen. Auch das Kohlendioxid ist problematisch, da es zu einer Versauerung des Meeres beitragen würde.





2.20 > Nicht nur am Meeresboden, auch auf dem Festland sind Methanhydrate in großen Mengen gespeichert. Vor allem in den dauerhaft tiefgefrorenen Permafrostböden der russischen Tun-

dra wie hier in der russischen Republik Komi. Experten fürchten, dass die Permafrostböden durch die globale Erwärmung schmelzen und dabei das Methanhydrat freisetzen.

machen zu können, untersuchen Forscher derzeit natürliche Methanquellen am Meeresgrund, die sehr viel Methan freisetzen, die kalten Quellen (cold seeps). Dazu zählen oberflächennahe Gashydratvorkommen, Schlammvulkane und natürliche Gasquellen in flachen Meeresregionen. Diese natürlichen Quellen sind eine Art Modell, an dem man untersuchen kann, wie sich das Methan im Meer verhält. Versteht man, wie die Natur auf diese Methanflüsse aus dem Meeresboden reagiert, lässt sich besser abschätzen, wie sich die Auflösung großer Gashydratmengen auswirkt. Die an den Methanquellen gewonnenen Daten sollen auch dazu beitragen, mathematische Methanhydrat-Simulationen präziser zu machen.

Das Schwinden der Methanhydrate könnte durchaus fatale Folgen haben. Gashydrate wirken wie Zement, der die Poren zwischen den feinen Sedimentpartikeln verkitet und den Meeresboden stabilisiert. Lösen sich die

Methanhydrate auf, verliert der Boden an Festigkeit. Im schlimmsten Fall können riesige Sedimentpakete an den Kontinentabhängen abrutschen und an den Küsten schwere Tsunamis auslösen. Derartige Hangrutschungen haben sich bereits vermutlich während der letzten Eiszeit ereignet. Der Auslöser war allerdings nicht die Erwärmung der Atmosphäre, sondern das genaue Gegenteil. Weil viel Wasser als Eis gebunden war, lag der Meeresspiegel um etwa 120 Meter tiefer als heute. Gerade in den flachen Meeresgebieten war der Wasserdruck dadurch so niedrig, dass sich die Methanhydrate massenhaft zersetzten. Einen unmittelbaren Beleg für Rutschungen, die durch Gashydratzersetzung ausgelöst wurden, hat man bisher indes nicht gefunden. Doch man kennt Indizien, die darauf hinweisen. So gibt es in der Nähe von Abrisskanten fast immer Spuren von Gas- und Flüssigkeitstransporten. Möglicherweise sind diese Hänge also durch strömende

Methangas- und Flüssigkeitsmengen destabilisiert worden. Forscher sehen aber durchaus auch einen umgekehrten Bezug: So ist es denkbar, dass sich Methanhydrate erst durch Hangrutschungen und die dadurch bedingte Druckentlastung am Boden zersetzen. Erst dadurch würden große Mengen Gas frei werden. Die Hangrutschung wäre also Ursache und nicht Folge des Gasaustritts. Eine weitere Theorie besagt, dass Hangrutschungen in der Vergangenheit auch durch eine verstärkte Sedimentation von Meeresorganismen am Kontinentalhang ausgelöst worden sein könnten. Diese Unsicherheiten machen klar, dass noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Dennoch gilt es als wahrscheinlich, dass das Schwinden der Methanhydrate zu ernststen Problemen führen könnte.

Methanemissionen aus der Arktis – ein Exempel für die künftige Gashydratforschung

Bei der Erforschung von Methanemissionen gehört die Arktis heute zu den wichtigsten Regionen weltweit. So wird vermutet, dass Methan dort zum einen in Form von

Gashydraten im Meer vorkommt, zum anderen als im tiefgefrorenen Permafrostboden eingeschlossenes Gas an Land. Als besonders sensibel gelten die Methanlager im Permafrostboden und die Hydrate in den ausgedehnten flachen Schelfmeerbereichen, da aufgrund des geringen Drucks schon kleinste Temperaturerhöhungen große Mengen von Methanhydrat oder Methan freisetzen könnten. Zusätzlich entsteht permanent neues Methan, weil die arktischen Gebiete reich an organischem Material sind, das von den Mikroben abgebaut wird. Die Aktivität dieser Mikroben, und damit die biologische Freisetzungsrate von Methan, wird ebenfalls durch Temperaturerhöhungen angekurbelt. Die Methanemissionen in der Arktis haben also gleich mehrere Quellen. Derzeit bilden sich internationale wissenschaftliche Konsortien mit Forschern verschiedener Disziplinen – Chemiker, Biologen, Geologen, Geophysiker, Meteorologen –, die sich intensiv mit dem Problem beschäftigen. Noch kann niemand mit Bestimmtheit sagen, wie sich der Methanausstoß in der Arktis mit der Erderwärmung entwickeln wird – sowohl im Meer als auch an Land. Noch steht die Forschung am Anfang.

CONCLUSIO

Die Stoffflüsse in Gänze verstehen

Die chemischen und geochemischen Vorgänge im Meer sind komplex. Sie in ihrer Gesamtheit aufzuklären bleibt eine Herausforderung für Jahrzehnte. Für globale Veränderungen wie die Abnahme des Sauerstoffgehalts im Meer oder die Versauerung der Ozeane gibt es klare Anzeichen. Doch bislang reichen die Erkenntnisse nicht aus, um mit Sicherheit sagen zu können, welchen Einfluss der Klimawandel im Detail spielt und wie er die verschiedenen Parameter künftig beeinflussen wird. Sicher ist, dass durch den Klimawandel verursachte Veränderungen ganz erhebliche Folgen haben können, denn die chemischen und geochemischen Stoffflüsse belaufen sich auf viele Milliarden Tonnen. Allein die Menge der am Meeresboden gebundenen Methanhydrate ist gigantisch. Sollten sie sich auflösen und das

Methan bis in die Atmosphäre aufsteigen, hat das deutliche Auswirkungen auf die Entwicklung des künftigen Klimas. Die Erforschung der chemischen und geochemischen Prozesse ist daher von enormer Bedeutung, wenn wir erfahren wollen, was uns erwartet und wie die Menschheit darauf reagieren kann. Die Analyse der CO₂-Kreisläufe zeigt, wie die CO₂-Reservoirs Atmosphäre, Landbiomasse und Ozean interagieren. Die Meere puffern steigende Konzentrationen atmosphärischer Spurengase ab. Doch dauern diese Pufferprozesse und das Erreichen eines neuen CO₂-Gleichgewichts mehrere Jahrtausende. Diese natürlichen Prozesse können daher nicht mit dem Tempo mithalten, mit dem die Menschheit weiter CO₂ und andere klimarelevante Spurengase in die Luft freisetzt. Die einzige Lösung bleibt, Energie zu sparen und den Ausstoß der Klimagase deutlich zu verringern.

3 Die ungewisse Zukunft der Küsten



> Dass die Klimaerwärmung den Meeresspiegel künftig stark ansteigen lässt, gilt inzwischen als sicher. Damit werden in den kommenden Jahrhunderten weltweit viele Küstengebiete verloren gehen. Die reichen Industrienationen werden sich mit enormem technischen Aufwand noch einige Zeit gegen das Vorrücken des Meeres wehren können. Langfristig aber werden auch sie sich von den bedrohten Ufern zurückziehen oder an das steigende Wasser anpassen müssen.



Der Meeresspiegelanstieg – eine unausweichliche Bedrohung

> Der Meeresspiegel ist von der letzten Eiszeit bis heute um etwa 125 Meter gestiegen. Das hat auch natürliche Ursachen. Der durch den Menschen verursachte Treibhauseffekt aber verstärkt diesen Prozess. Wesentliche Folgen sind die Wärmeausdehnung des Wassers und das Abschmelzen von Gletschern. Dadurch könnte der Meeresspiegel in nur 300 Jahren um weitere 5 Meter steigen.

Verlust von Lebensräumen und Kulturschätzen

Der Meeresspiegelanstieg ist eine der bedrohlichsten Folgen des Klimawandels. Wohl kaum jemand kann sich wirklich vorstellen, wie die Küsten aussehen werden, wenn das Wasser in wenigen Jahrhunderten um mehrere Meter steigt. Die Küsten gehören zu den am dichtesten besiedelten Regionen der Erde und sind damit besonders anfällig für die Auswirkungen des Klimawandels. Dort erstrecken sich wichtige landwirtschaftliche Flächen und Städte mit historischen Bauten. Wie wird sich ihr Gesicht verändern?

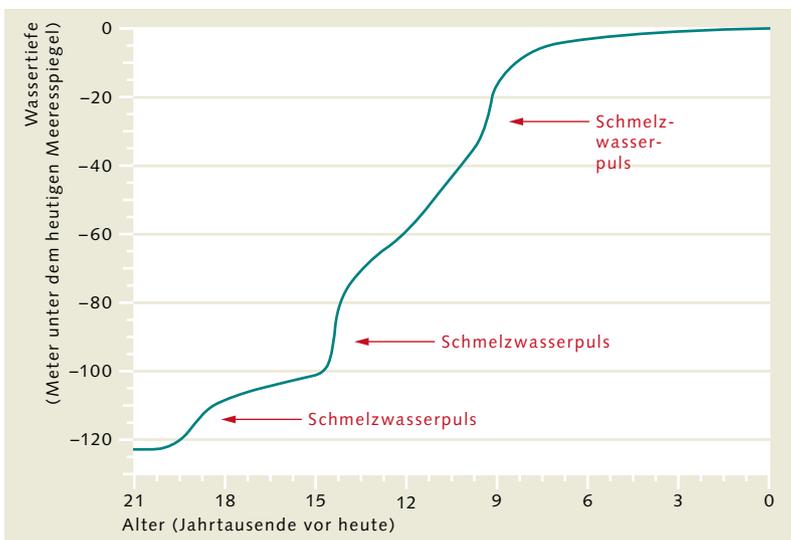
Weltweit versuchen Forscher die Frage zu beantworten, wie schnell und auch wie stark der Klimawandel das Was-

ser steigen lassen wird. Dabei müssen sie berücksichtigen, dass nicht allein der menschengemachte Treibhauseffekt, sondern auch natürliche Prozesse die Höhe des Wasserstands beeinflussen. Fachleute unterscheiden zwischen:

- eustatischen, klimatisch bedingten, global wirksamen Ursachen, die zu einer Zunahme des Wasservolumens in den Weltozeanen führen (so steigt der Meeresspiegel, wenn nach Eiszeiten die großen Gletscher schmelzen);
- isostatischen, meist tektonisch bedingten Ursachen, die sich vor allem regional auswirken (dazu gehören etwa die Eispanzer, die sich während der Eiszeiten bilden. Durch ihr hohes Gewicht senken sie die Erdkruste in bestimmten Regionen ab, wodurch der Meeresspiegel relativ zum Land ansteigt. Taut das Eis, hebt sich die Landmasse wieder – ein Phänomen, das noch heute an der skandinavischen Landmasse zu beobachten ist).

Die Höhe des Meeresspiegels kann sich innerhalb von Jahrhunderten im 10-Meter-Bereich verändern und über Jahrmillionen durchaus um mehr als 200 Meter schwanken. Durch die Eiszeiten nahm die Häufigkeit und Intensität dieser Schwankungen während der letzten 3 Millionen Jahre zu: Während der Kaltzeiten bildeten sich auf dem Festland in höheren Breiten große Eismassen, sodass den Ozeanen Wasser entzogen wurde. Der Meeresspiegel sank global drastisch ab. Während der Warmzeiten schmolzen die kontinentalen Eiskappen ab und der Meeresspiegel stieg wieder stark an.

Die letzte Warmzeit, die mit der heutigen Klimaperiode vergleichbar ist, gab es vor 130 000 bis 118 000 Jahren. Damals lag der Meeresspiegel rund 4 bis 6 Meter höher als heute. Danach folgte ein unregelmäßiger Übergang in die letzte Kaltzeit – so war die Erde vor 26 000 bis 20 000 Jahren zum letzten Mal maximal vereist. Damals



3.1 > Bis vor 6000 Jahren stieg der Meeresspiegel pro Jahrhundert um durchschnittlich etwa 80 Zentimeter, wobei dieser Anstieg teilweise sprunghaft verlief. So gab es mindestens zwei Perioden von etwa 300 Jahren, in denen der Meeresspiegel aufgrund sogenannter Schmelzwasserpulse um 5 Meter pro Jahrhundert stieg.



3.2 > Vor der kleinen englischen Ortschaft Happisburgh frisst sich die Nordsee bei jedem Sturm weiter in das Land. Die alten Küstenschutzanlagen können dagegen kaum etwas ausrichten. Ein Bunker aus dem Zweiten Weltkrieg ist bereits von den Klippen gestürzt. An anderer Stelle gingen Häuser verloren.

lag der Meeresspiegel 121 bis 125 Meter tiefer als heute. Dann setzte die nächste Warmperiode ein. Der Meeresspiegel stieg dabei relativ gleichmäßig an. Hin und wieder aber gab es Phasen eines beschleunigten Anstiegs, die durch sogenannte Schmelzwasserpulse ausgelöst wurden. Ursache dafür war das Kalben großer Gletschermassen in der Antarktis und in den vereisten Gebieten auf der Nordhalbkugel. In anderen Fällen liefen riesige Stauseen aus, die sich beim Abschmelzen vor den zurückweichenden Inlandgletschern gebildet hatten. Dieser vergleichsweise starke Anstieg des Meeresspiegels dauerte bis vor etwa 6000 Jahren an. Seitdem hat er sich mit Schwankungen von wenigen Zentimetern pro Jahrhundert nur geringfügig verändert.

Gemessen an den geringen Veränderungen während der letzten 6000 Jahre ist der globale Anstieg des Meeresspiegels um 18 Zentimeter im vergangenen Jahrhundert beachtlich. Allein im letzten Jahrzehnt waren es 3,2 Zentimeter. Das ergaben Pegelmessungen an der Küste im vergangenen Jahrhundert und zusätzlich seit 1993 von Satelliten durchgeführte Messungen der Höhe von Land- und

Wasserflächen weltweit, der sogenannten Satellitenaltimetrie. Zwar sind diese Zeiträume kurz, dennoch lässt sich an den Messwerten eine deutliche Zunahme der Meeresspiegelanstiegsraten beobachten. Wie stark einzelne Faktoren dazu beitragen, wird von Fachleuten unterschiedlich beurteilt:

- 15 bis 50 Prozent des Meeresspiegelanstiegs gehen auf die temperaturbedingte Ausdehnung des Meerwassers zurück;
- 25 bis 45 Prozent auf das Abschmelzen von Gebirgsgletschern außerhalb der Polarregionen;
- 15 bis 40 Prozent auf das Abschmelzen der Eiskappen auf Grönland und in der Antarktis.

Aus den Messdaten können mithilfe von Modellrechnungen Vorhersagen über den künftigen Meeresspiegelanstieg getroffen werden – so wie beispielsweise im letzten Bericht des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) aus dem Jahr 2007. Dieses Werk ist der zurzeit aktuellste weltweite Klimabericht. Er sagt bis zum Jahr 2100 einen globalen Meeresspiegelanstieg um bis zu 59 Zentimeter voraus. Dabei ist nicht

Der Meeresspiegelanstieg

Der Meeresspiegelanstieg hat verschiedene Ursachen. Der eustatische Anstieg wird durch das Abschmelzen von Gletschern und den Abfluss dieser Wassermassen ins Meer bewirkt. Ursache des isostatischen Anstiegs hingegen sind tektonische Bewegungen wie etwa das Heben und Senken von Erdkrustenplatten. Die thermische Expansion wiederum wird durch die Ausdehnung des Meerwassers aufgrund der Erderwärmung bewirkt.

3.3 > Touristen seilen sich von einer Kante auf dem antarktischen Ross-Schelfeis ab. Sollten die der Küste vorgelagerten, auf dem Meer ruhenden Schelfeismassen verstärkt schmelzen, könnten die Gletscher zunehmend kalben, weil das Hindernis Schelfeis fehlt.

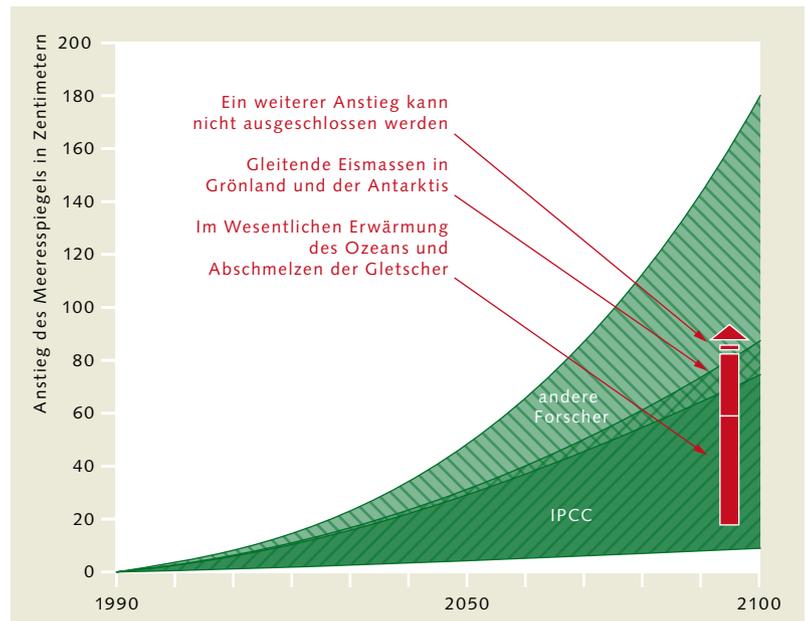


berücksichtigt, dass die großen Inlandeismassen der Erde (im Wesentlichen die Eismassen auf der Insel Grönland und in der Antarktis) durch die globale Erwärmung stärker abschmelzen könnten. Allerdings zeigen aktuelle Satellitenmessungen von den Rändern des grönländischen Eisschildes, der Westantarktis und der Gebirgsgletscher außerhalb der Polarregionen, dass die Höhe der Gletscher und damit das Eisvolumen schneller abnimmt, als Fachleute bisher angenommen haben. Diese Daten und auch Modellrechnungen lassen erwarten, dass der Meeresspiegel bis zum Ende dieses Jahrhunderts sogar um mehr als 80, eventuell sogar bis zu 180 Zentimeter steigt. Das Abschmelzen der antarktischen und grönländischen Gletscher dürfte sich noch bis weit über das nächste Jahrhundert hinaus verstärken. Die übrigen Hochgebirgsgletscher werden dann bereits abgeschmolzen sein und nicht mehr zum Meeresspiegelanstieg beitragen.

Der wissenschaftliche Beirat der deutschen Bundesregierung prognostiziert einen Meeresspiegelanstieg von 2,5 bis 5,1 Metern bis zum Jahr 2300. Die Werte liegen vor allem deshalb so weit auseinander, weil das Klimasystem träge ist und sich nicht gleichmäßig, linear, verändert. Eine Prognose ist deshalb unsicher. In jedem Fall wird sich der Anstieg des Meeresspiegels zunächst langsam beschleunigen. Legt man die heutige Anstiegsrate zugrunde, würde sich bis zum Jahr 2300 ein Meeresspiegelanstieg von nur knapp 1 Meter ergeben.

Der heutige Anstieg ist jedoch eine Reaktion auf eine durchschnittliche globale Erwärmung von gerade einmal 0,7 Grad Celsius während der vergangenen 30 Jahre. Der IPCC-Bericht aber sieht für die Zukunft eine deutlich größere Temperaturerhöhung um 2 bis 3 Grad Celsius voraus. Damit könnte der Meeresspiegel weltweit künftig tatsächlich so stark steigen, wie vom wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung vorausgesagt.

Wie bei den Klimaschwankungen in der jüngeren Erdgeschichte werden sich auch bei der gerade stattfindenden globalen Erwärmung die Temperaturen in den Polargebieten stärker als im globalen Mittel erhöhen und damit den Meeresspiegelanstieg entscheidend beeinflussen. Die stärkere Erwärmung in höheren Breiten wird durch die Abnahme der Albedo, der Rückstrahlung des Sonnenlichts, verursacht: In dem Maße wie die hellen, stark reflektierenden Meereis- und Gletscherflächen schrumpfen, deh-



3.4 > Der Meeresspiegel wird bis zum Ende dieses Jahrhunderts deutlich steigen. Unklar ist, wie stark dieser Anstieg ausfällt. Der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) erwartet für dieses Jahrhundert einen Anstieg von bis zu knapp einem Meter (unten). Andere Forscher halten sogar einen Anstieg um bis zu 180 Zentimeter für möglich (oben). Da in beiden Fällen mehrere Studien und Szenarien zugrunde gelegt wurden, weisen die Ergebniswerte der Prognosen eine gewisse Bandbreite auf. In jedem Fall summieren sich das Abschmelzen der Gletscher und die Ausdehnung des Wassers aufgrund der Erderwärmung auf. Die Rekordwerte werden für den Fall erwartet, dass sich das Abschmelzen der antarktischen und grönländischen Eispanzer verstärkt.

nen sich die dunklen Boden- und Meeresoberflächen aus, die das Sonnenlicht deutlich stärker absorbieren. Sollten die Festlandeismassen in Grönland und der Westantarktis weitestgehend abschmelzen, könnte der Meeresspiegel im Laufe von 1000 Jahren im Extremfall sogar um 20 Meter steigen.

Vor allem in der Westantarktis werden die randlichen Gletscher durch Fließvorgänge instabil, sodass sie Druck auf die vorgelagerten, auf dem Meer ruhenden Schelfeismassen ausüben. Das mit dem Festland verbundene Schelfeis kann dadurch teilweise aus seiner kontinentalen Verankerung brechen. In letzter Konsequenz verstärkt sich das Kalben der Gletscher, weil das Hindernis Schelfeis fehlt. Darüber hinaus können selbst bei geringem Meeresspiegelanstieg randliche Festlandeismassen in großen Mengen abbrechen, weil sie vom steigenden Wasser unterspült werden.

Wie Natur und Mensch die Küste verändern

> Der Küstenverlauf wird von Naturkräften beeinflusst und reagiert an vielen Stellen stark auf variierende Umweltbedingungen. Andererseits greift aber auch der Mensch in den Küstenraum ein. Er besiedelt und bewirtschaftet die Küstenzone und baut Rohstoffe ab. Diese Eingriffe stehen im Zusammenspiel mit geologischen und biologischen Prozessen und können verschiedenste Veränderungen nach sich ziehen.

Bedeutung und Eigenschaften der Küstenzonen

Die Küste ist die Schnittstelle zwischen Land, Meer und Atmosphäre. Eine einheitliche Definition für diesen Begriff gibt es nicht, denn es hängt durchaus von der jeweiligen Perspektive oder der wissenschaftlichen Fragestellung ab, ob man die Küstenzone eher als Meer oder als Land betrachtet. Vereinfacht gesagt umfasst die Küstenzone jenen Bereich, in dem das Land noch maßgeblich vom Meer und das Meer noch deutlich vom Land beeinflusst wird. Daraus ergibt sich ein komplex gestalteter Raum, der vom Menschen stark geprägt ist. Die Küstenzonen der Erde sind ausgesprochen vielfältig und nicht nur für den Menschen ungeheuer wichtig.

- Sie umfassen etwa 20 Prozent der Erdoberfläche.
- Sie bieten wichtige Transportwege und Industriestandorte.

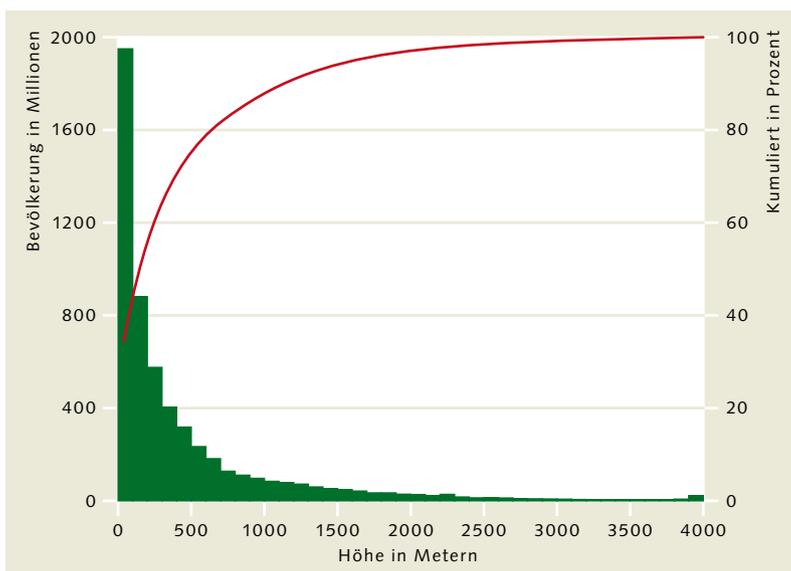
- Sie sind ein bevorzugtes Erholungs- und Tourismusgebiet.
- Sie sind Rohstoffquelle für Mineralien und geologische Produkte.
- Sie beinhalten wichtige Ökosysteme mit einer großen Artenvielfalt.
- Sie wirken als eine wichtige Sedimentationsfalle, die Sedimente aus Flüssen bindet.
- Durch ihre Pufferwirkung zwischen Land und Meer beeinflussen sie viele globale Parameter.
- 75 Prozent aller Megastädte mit einer Einwohnerzahl von mehr als 10 Millionen befinden sich in den Küstenzonen.
- 90 Prozent der globalen Fischerei finden in Küstengewässern statt.
- Sie bieten mehr als 45 Prozent der Weltbevölkerung Wohn- und Lebensraum.

Ein Großteil der Weltbevölkerung lebt in den Küstengebieten, die flach sind und deren Gestalt sich innerhalb kurzer Zeiträume stark verändern kann. In keiner anderen Region der Erde wächst die Bevölkerung heute schneller als in den Küstenzonen. Entsprechend wachsen die Küstenstädte. Der Mensch besiedelt mehr und mehr Fläche. Zugleich nutzt er die Küste immer intensiver, beispielsweise durch die Erschließung von Flächen für den Bau großer Windenergieparks im Meer.

Sedimente formen Küsten

Die Gestalt einer Küste wird also durch mehrere Einflüsse geprägt. Ein wesentlicher Faktor ist die Umlagerung von Sedimenten wie Schlamm, Sand und Kies. Die Sedimente werden vor allem durch winderzeugte Wellen und Strömungen, Gezeitenströme oder Flüsse, die ins Meer mün-

3.5 > Bevölkerungsverteilung nach Höhenlage.





3.6 > Die Gezeitenströmung hat den Sand am Strand der Isle of Lewis vor der schottischen Westküste fortgetragen und den steinigen Boden freigelegt.

den, bewegt. Je nach Strömung wird Sediment abgetragen (Erosion), umgelagert oder abgelagert (Akkumulation). Werden Sedimente nicht nur umgelagert, sondern weggetragen, verändert sich im Laufe der Zeit die Form der Küste. Ein Beispiel ist die ostfriesische Insel Memmert, an deren Südwestseite die Strömungen so viel Sediment abgetragen hatten, dass schließlich der alte Leuchtturm bis zu seinem Abriss im Wasser stand. Ein anderes Beispiel ist der Weststrand der dänischen Nordseeinsel Rømø. Dieser wird durch Sedimentzufuhr immer breiter.

Prinzipiell gibt es zwei Hauptrichtungen des Sedimenttransports. Zum einen jene, die parallel beziehungsweise entlang der Küste führt. Zum anderen jene, die auf die Küste zu oder von der Küste weg verläuft. Je mehr Sediment abgetragen oder angelagert wird, desto stärker verändert sich die Küstengestalt. Wie schnell Sediment erodiert werden kann, hängt von seiner Beschaffenheit sowie von der Dauer und Intensität der Wind- und Wasserströmungen ab. Eine starke Sturmflut etwa kann innerhalb weniger Stunden gewaltige Mengen Sediment forttragen. Besteht die Küste aus hartem Fels, der erosionsresistenter

ist als locker gelagerter Sand, verändert sich die Gestalt der Küste vergleichsweise langsam. Küstenrückgang ist meist die Folge von Erosion: Mehr Sediment geht verloren, als die Strömungen nachliefern. Allerdings lässt sich der Entwicklungsstatus einer Küste nicht allein am Sedimentbudget festmachen. Es gibt Küstenabschnitte, die langfristig stabil sind, da Sediment lediglich an ihnen entlang transportiert wird.

In vielen Küstenregionen wird der natürliche Sedimenteintrag heute durch Bauwerke wie etwa Staudämme behindert. Zwar sind nur 20 Prozent der Küstengebiete weltweit Lockergesteinsküsten aus Sand, Schlack oder Kies, doch mehr als die Hälfte ist heute von Erosion betroffen. Natürlich passen sich die Lockergesteinsküsten grundsätzlich schnell an Veränderungen an, weil sich die Sedimente vergleichsweise leicht umlagern – Materialdefizite an einer Stelle werden durch neue Sedimentanlieferung wieder ausgeglichen. Doch ob der Charakter einer solchen Küste erhalten bleibt, hängt im Einzelfall vor allem von der Anstiegsrate des Meeresspiegels, der Stabilität des Sediments und der Sedimentzufuhr ab. Selbst

3.7 > Der alte Leuchtturm der ostfriesischen Insel Memmert stand einst in den Dünen und wurde durch Erosion im Laufe von Jahrzehnten freigespült.



Küstenschutzmaßnahmen tragen nicht nur zum Erhalt von Küsten bei. Sie können Küsten auch verändern. So ist es durchaus möglich, dass man durch den Schutz eines Küstenabschnitts andere Bereiche schädigt. Schützt man ein Gebiet durch Bauwerke wie Wellenbrecher vor Erosion, bleibt an benachbarten, nicht geschützten Gebieten möglicherweise die existenziell wichtige Sedimentzufuhr aus. Verglichen mit Lockergesteinsküsten werden die Folgen eines Meeresspiegelanstiegs an Steil- und insbesondere Festgesteinsküsten weit weniger schwerwiegend sein. Weltweit machen Steil- und Festgesteinsküsten rund 80 Prozent aller Küsten aus.

Sedimente lassen die Erdkruste sinken

Dass Küstengebiete unter dem Gewicht eiszeitlicher Gletschermassen absinken, leuchtet ein. Doch auch Sedimente können sich zu solch mächtigen Paketen ablagern, dass sie die Lithosphäre, die Erdkruste, niederdrücken. Diese senkt sich zunächst ab und hebt sich später wieder, wenn die Belastung nachlässt. Im Fall der Gletscher geschieht das, wenn nach dem Ende der Eiszeit das Eis taut. Die Aus-

gleichsbewegungen können über mehrere Zehntausend Jahre andauern. Ein Beispiel ist die skandinavische Landmasse, die sich noch heute jährlich um bis zu 9 Millimeter hebt. Manchmal richtet sich die Erdkruste dabei ungleichmäßig auf, sodass ein Teil weiter absinkt, während sich der andere hebt.

Mächtige Sedimentpakete bilden sich häufig in Deltaregionen, wo die Flüsse Unmengen von Sediment ins Meer spülen. Durch das Anhäufen der Sedimente gibt die Lithosphäre allmählich nach. Dadurch sinkt der Untergrund ab, sodass der Meeresspiegel relativ zum Land ansteigt. In manchen Fällen wird dieses isostatische Absinken durch die langsam in die Höhe wachsenden Sedimentmassen kompensiert. In anderen Fällen aber wird das Sediment selbst durch die zunehmende Auflast zusammengedrückt, sodass die Landmasse dennoch sinkt. Auch der Mensch beeinflusst das Absinken, beispielsweise durch die Förderung von Grundwasser, Erdöl oder Erdgas etwa im Niger-Delta. Es gibt Regionen, in denen sich die Landoberfläche durch das Zusammenspiel der genannten Faktoren um bis zu 5 Zentimeter jährlich absenkt. Der Meeresspiegel steigt dort entsprechend.

Der Mensch prägt das Gesicht der Küsten

Die Sedimentation hat in den vergangenen 8000 Jahren seit der letzten Phase des nacheiszeitlichen Meeresspiegelanstiegs erheblich zur Küstenentwicklung beigetragen. Durch Ablagerung von transportiertem Material wuchs die Küstenlandfläche, in bestimmten Regionen entstanden große Flussdeltas. Vor allem Flüsse sind wichtige Transportbänder, die Sedimente zur Küste tragen. Wie viel sie transportieren, hängt von mehreren Faktoren ab:

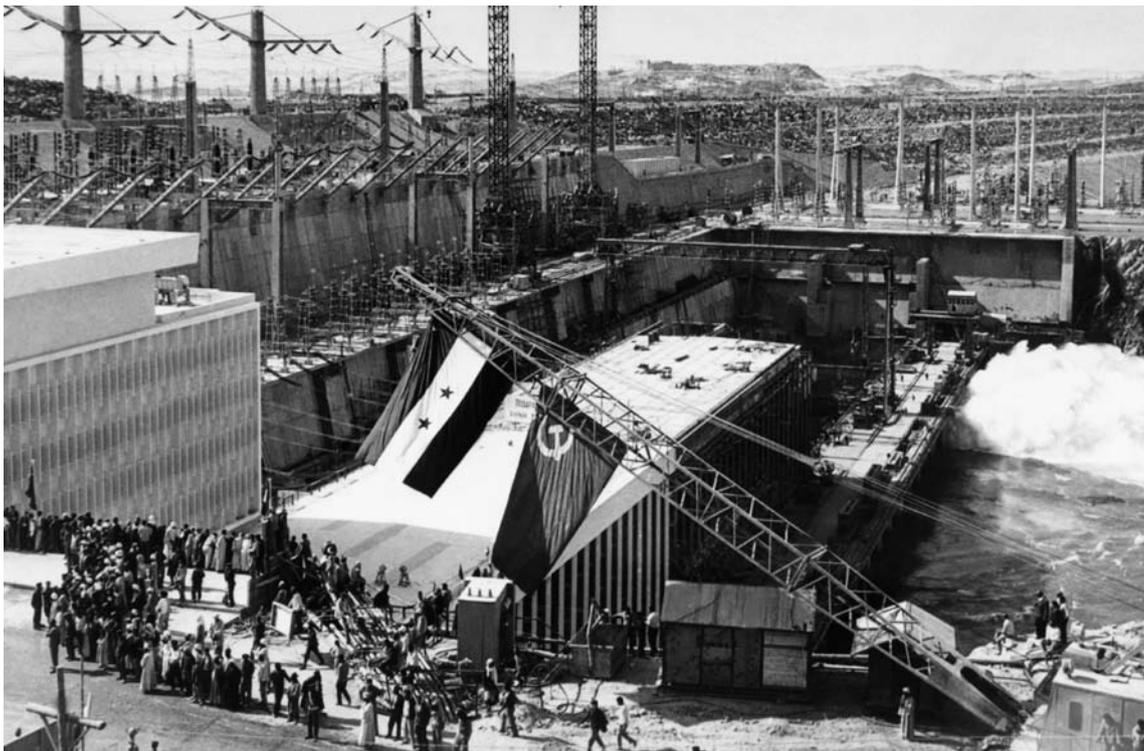
- der Größe des Flusseinzugsgebiets von der Quelle bis zur Mündung;
- dem Relief des Einzugsgebiets (Flüsse mit steilem Relief, die etwa durch Gebirge fließen, transportieren mehr Sediment als Flüsse, die durchs Flachland fließen);
- der Gesteins- und Sedimentzusammensetzung (zum Beispiel der Korngröße) oder der Menge des aufgrund von Verwitterung und mechanischer Erosion verfügbaren Sediments;
- dem Klima im Einzugsgebiet und dessen Auswirkung auf die Verwitterung;

- der Menge des abfließenden Oberflächenwassers und der Speicherkapazität des Bodens (wie viel Wasser abfließt, hängt auch von den Niederschlagsmengen ab, die wiederum vom Klima beeinflusst werden).

Waldrodung, Überweidung und ungünstige Felderwirtschaft führen besonders in tropischen Regionen zu forcierter Bodenerosion. Werden die Sedimente nicht durch Staudämme zurückgehalten, lagern sie sich vor allem im Küstengebiet ab. Das kann Konsequenzen haben: Zum einen können die Sedimente das Wasser trüben, die Gewässergüte verändern und dadurch die Wasserorganismen erheblich beeinträchtigen. Die Trübung vermindert zudem die Lichteinstrahlung und setzt damit die **Primärproduktion** herab.

Andererseits kann es aber auch zu Algenblüten kommen, weil mit den Sedimenten zugleich viele Nährstoffe in die Flüsse und ins Küstenmeer gespült werden. Sterben diese Algen ab, werden sie von Mikroorganismen zersetzt, die Sauerstoff verbrauchen. Dadurch entstehen lebensfeindliche, sauerstoffarme Zonen. Die Artenvielfalt schrumpft in diesen Gebieten.

In vielen Regionen herrscht hingegen ein Mangel an Sedimenten, weil Staudämme das Wasser zurückhalten. Weltweit sind mehr als 41 000 große Staudämme in Betrieb. Hinzu kommen viele kleinere Dämme und Wasserreservoirs. Zusammen stauen sie 14 Prozent des weltweiten Gesamtabflusses der Flüsse und gewaltige Mengen Sediment. Damit geht der Küste Sedimentnachschub verloren. Die Erosion verstärkt sich. Fatal ist dieses Sedimentdefizit dort, wo der Boden unter den alten, schweren Sedimentpaketen absinkt. Hier fehlt dann frisches Sediment, das sich dort normalerweise ablagern und damit das Absinken kompensieren würde. Sinkt das Land ab, sickert sukzessive Salzwasser in den Flussmündungsbereich, sodass das Grundwasser versalzt. Ein Beispiel dafür ist der Nil. Vor dem Bau des Assuan-Staudamms spülten jährlich wiederkehrende Überschwemmungen fruchtbare Sedimente aus dem Landesinnern in das Nil-Delta am Mittelmeer. Die Sedimente waren nicht nur für die Bauern an den Ufern des Nils lebenswichtig, sondern auch essenziell, um das Absinken der schweren Deltaregion zu kompensieren. Mit dem Dammbau in den 1960er



3.8 > Als technische Meisterleistung feierte man den Assuan-Staudamm bei seiner Inbetriebnahme 1968. Von den Umweltproblemen wie etwa der Versalzung der Küste ahnte man damals noch nichts. 1971 wurde der Staudamm dann offiziell eröffnet. Die Bauarbeiten hatten rund elf Jahre gedauert.

3.9 > Bei besonders hohen Wasserständen in der Lagune von Venedig werden immer wieder Teile der Stadt wie etwa der Markusplatz überspült. Acqua alta nennen die Italiener das Hochwasser.

Jahren blieben die Überflutungen und Sedimenttransporte aus: Nachhaltige Ernterückgänge und massive Küstenerosion sind die Folge. Ähnliche Probleme sind für den vor Kurzem fertiggestellten Drei-Schluchten-Staudamm in China im Jangtse-Delta zu erwarten.

Neue Untersuchungen von der nordamerikanischen Atlantikküste, die mit der Auswertung von Satellitenbildern und topographischen Karten einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren umfassen, legen nahe, dass auch der Meeresspiegelanstieg die wichtige Sedimentation behindert und zu einer Veränderung der Küsten führen wird. So nimmt man an, dass ein Meeresspiegelanstieg um 1 Meter im Mittel einen Küstenrückgang von etwa 150 Metern nach sich ziehen wird. Die Forscher gehen dabei davon aus, dass sich die Sedimentbilanz (Erosion und Ablage-

rung) im Gleichgewicht befindet. Die genannten Beispiele machen jedoch deutlich, dass das kaum der Fall ist. Bei den Berechnungen müsste man daher zumindest den Sedimenttransport entlang der Küste und die Änderungen des Sedimentationsgleichgewichts berücksichtigen, die der Meeresspiegelanstieg bewirken wird. Dies ist im Detail bisher nicht der Fall. Der Küstenrückgang könnte daher noch drastischer ausfallen.

Die Auswirkungen des Wasserbaus

In vielen Flussmündungsgebieten wechseln sich Ein- und Ausstrom von Meerwasser im Rhythmus der Gezeiten ab und vermischen sich dabei mit dem kontinuierlich abfließenden Frischwasser des Flusses. Mitgeführte Sedimente von Land und von See können sich bei nachlassender Strömung ablagern. Der Sedimenthaushalt befindet sich in einem sensiblen Gleichgewicht. Der Bau von Dämmen, die Vertiefung von Fahrrinnen oder andere Baumaßnahmen können dieses Gleichgewicht erheblich stören. Die Auswirkungen sind oftmals schwerwiegend.

Stark umstritten sind heute unter anderem die Fahrrinnenvertiefungen. 95 Prozent des globalen Handels werden über den Schiffsverkehr abgewickelt. Die großen Häfen der Welt liegen aus logistischen Gründen überwiegend an Flussmündungen. Da immer größere Schiffe mit entsprechendem Tiefgang zum Einsatz kommen, müssen die Fahrrinnen vertieft werden. Zusätzlich werden die Schiffswege durch Uferbauwerke stabilisiert und die Strömung durch Leitwerke optimiert. Wegen der Fahrrinnenvertiefungen können Sedimente mit darin gebundenen Schadstoffen freigesetzt werden. Zudem kann sich die Fließgeschwindigkeit erhöhen, was Sedimentumlagerungen verstärkt. Auch der Tidenhub kann durch das größere ein- und ausströmende Wasservolumen ansteigen. Das wirkt sich ebenfalls auf den Sedimenthaushalt aus, denn schneller strömendes Wasser hat mehr Energie, um Sedimente zu bewegen. Meeresspiegelanstieg und Hochwasserereignisse verstärken diese Effekte. Schon jetzt diskutiert man, wie sich all das auf die Standsicherheit der Flussdeiche auswirkt. Der intensive Schiffsverkehr verschärft die Situation noch, weil durch den Wellenschlag der Schiffe oftmals das Flussufer erodiert. Die Entnahme von Sediment oder Sand – beispielsweise für Strandauf-





3.10 > Wäre die Küste nicht durch Deiche geschützt, ergäbe sich bei einem Meeresspiegelanstieg von 2 Metern ein solches Bild. Die rot gefärbten Gebiete wären dann permanent überflutet. Nach den aktuellen Prognosen könnte der Meeresspiegel bereits bis Ende dieses Jahrhunderts um 180 Zentimeter steigen.

spülungen auf der Insel Sylt – verändern die Gestalt des Meeresbodens. Langfristig kann sich das durchaus auf den Schutz der Küste auswirken. So ist es möglich, dass eine Seegrundvertiefung die Wellenbrecherzone Richtung Land verlagert. Darüber hinaus wird durch die Sandentnahme der Lebensraum der Meeresorganismen verändert. Das geschieht aber auch im umgekehrten Fall, wenn Sand aufgeschüttet, beispielsweise als Baggergut im Meer verklappt wird. Diese Sedimente stammen zu 80 bis 90 Prozent aus Maßnahmen wie Fahrrinnenvertiefungen. Hunderte Millionen Kubikmeter Sediment werden jährlich weltweit verklappt. Die im Bereich der Verklappstellen lebenden Meeresbewohner werden überdeckt, sofern sie nicht fliehen können.

Wenn die Küstenstädte wachsen

Auch durch das ungeheure Wachstum der Küstenstädte schädigt der Mensch den Lebensraum. Oft müssen neue Landflächen im Meer dazugewonnen werden, um Raum für die ausufernde Bebauung zu schaffen. So sind weltweit

schon mehrere Großprojekte wie der Bau des Flughafens Hongkong angeschoben worden. Für das Areal wurde eine Fläche von mehr als 9 Quadratkilometern aufgespült. Größere Dimensionen erreicht der Hafen von Tianjin in China, der rund 30 Quadratkilometer Meeresfläche verschlingt. Diese Eingriffe haben zweifellos Auswirkungen auf die unmittelbar angrenzende Küstenzone. Beispielsweise lösten Aufschüttungen einer Fläche von 180 Hektar zum Bau des Flughafens in Nizza 1979 einen verheerenden Erdbeben aus. Dieser hatte einen Tsunami zur Folge, der 23 Menschen das Leben kostete.

Der Klimawandel verändert die Küsten

Um das künftige Schicksal der Küsten richtig einschätzen zu können, müssen Forscher zunächst klären, ob die heute messbaren Veränderungen tatsächlich auf einen Klimawandel zurückzuführen sind oder ob sie das Ergebnis natürlicher Klimavariabilität sind. Von einem Klimawandel kann man erst dann sprechen, wenn sich klimatisch bedingte Veränderungen statistisch nachweisbar von

natürlichen Schwankungen abheben. Klimawandel ist also nicht mit Klimavariabilität gleichzusetzen. Die Wissenschaftler benötigen dafür Messwerte und Beobachtungen, die repräsentative Zeiträume abdecken. Schon heute weiß man, dass die globale Erwärmung nicht an allen Orten gleichermaßen zu höheren Luft- und Wassertemperaturen führen wird und dass es keineswegs immer allein um die Veränderung der Temperatur geht. Die Folgen des Klimawandels können völlig unterschiedlich sein. Die folgenden Beispiele machen das deutlich.

Schmelzen von Meereis und Auftauen von Permafrostböden

Das Meereis der subpolaren und polaren Küstengewässer wirkt wie ein Puffer zwischen der Atmosphäre und dem Meerwasser. Es verhindert, dass Stürme Wellen aufbauen, die als Brandung gegen die Küsten rollen und dort Sedimente abtragen. Verkleinern sich die Eismassen durch das Abschmelzen, geht diese Pufferwirkung verloren. Auch Sedimente, die zuvor durch die Eisbedeckung geschützt waren, werden verstärkt erodiert. Dauerhaft steinhart gefrorene Böden, sogenannte **Permafrostböden**, tauen auf. Auch sie werden an der Küste durch Wind und Wellen viel stärker abgetragen als die gefrorene Landmasse. Andererseits aber findet die typische Bodenerosion durch Eisberge und Gletscher nicht mehr statt.

Veränderung der Süßwasserbilanz, des Niederschlags und des Sedimenteintrags

Der Klimawandel wird vermutlich dazu führen, dass die Inlandgletscher abschmelzen und zugleich die Menge des für den Erhalt der Gletscher nötigen Neuschnees zurückgeht. Damit wird sich nach und nach auch der Abfluss von Süßwasser aus den Bergen verringern. Wasserknappheit könnte die Folge sein. Die Menschen könnten dem begegnen, indem sie Wasser verstärkt in Reservoiren zurückhalten. Allerdings gelangt dann weniger Süßwasser und weniger Sediment ins Meer. Zugleich werden andernorts mit der globalen Erwärmung erhöhte Niederschlagsraten erwartet – beispielsweise in den **Monsunregionen** der Welt. Die starken Monsunregen und Wasserabflüsse werden vermehrt zu Überschwemmungen führen und große Mengen an Sedimenten und Nährstoffen über die Flüsse ins Küstenmeer spülen.

Überflutung von Inseln und Küsten

Der durch den Klimawandel bewirkte Meeresspiegelanstieg wird zur Überflutung vieler Küstengebiete und Inselgruppen führen. Es wird erwartet, dass diese Regionen nicht nur kurzzeitig, sondern permanent überschwemmt sein werden. Diese Überflutungen kann man also nicht mit den vorübergehenden, eher episodischen Überschwemmungen von Landgebieten gleichsetzen, die in näherer Zukunft häufiger eintreten werden. Schon im kommenden Jahrhundert oder kurz danach könnte der Meeresspiegelanstieg die 2-Meter-Marke erreichen.

Dieses Szenario basiert allerdings nur auf topographischen Daten. Deiche und andere Schutzbauten werden dabei nicht berücksichtigt. In der Simulation lässt man die Wassermassen einfach über die Küstenform strömen. Auch bezieht dieses Modell den verstärkten Abtrag von Land durch Küstenerosion nicht mit ein, der mit dem Anstieg des Meeresspiegels vermutlich einhergehen wird. Durch die Erosion dürfte sich die gesamte Küsten- und damit auch die Brandungszone landeinwärts verschieben. Damit wirkt die zerstörerische Kraft des Wassers auf ehemals geschützte Bereiche der Küste ein. Auch heute schon reißen Sturmfluten schützende Vegetation fort. Diese Effekte werden sich künftig intensivieren. Die eigentlich flach ansteigende Küste, auf der die Brandung ausrollen kann, wird steiler. Dieses steile Küstenvorland bietet künftigen Stürmen mehr Angriffsfläche. Die Erosion gewinnt an Dynamik. Das Küstenvorland verliert seine Pufferwirkung. Zu den gefährdeten Regionen gehören auch Gebiete, die heute noch durch Deiche geschützt werden. Zwar wird bei Deichbauten an der Nord- und Ostsee auf die Bemessungshöhe der Deichkrone zusätzlich zu den maximalen Sturmereignissen ein Klima-Sicherheitsfaktor von 30 bis 90 Zentimetern aufgeschlagen, um den künftigen Meeresspiegelanstieg zu berücksichtigen. Bei einem Meeresspiegelanstieg von 2 Metern aber wird das nicht ausreichen. Schon heute liegen viele dicht besiedelte Gebiete im Nordseeraum unterhalb des Mittleren Tidehochwassers beziehungsweise im Ostseeraum auf heutigem Meeresspiegelniveau.

An anderen Küsten wiederum befinden sich komplexe und bedeutende Ökosysteme. Diese produzieren Biomasse, die mitunter einen direkten Einfluss auf die Gestalt der Küste hat. Durch das Wachstum von Korallen etwa kön-

Tidehochwasser und Springtide
Mit dem Mittleren Tidehochwasser (MThw) bezeichnet man den durchschnittlichen Hochwasserstand an einem bestimmten Ort an der Küste. Besonders hoch über dem MThw auflaufende Fluten sind die Springfluten oder Springtiden. Sie treten regelmäßig bei bestimmten Stellungen von Sonne und Mond ein. Gefährlich wird es an der deutschen Nordseeküste, wenn schwere Weststürme mit der Springtide zusammenfallen.

nen neue Inseln entstehen. Zugleich sind Korallenbänke wichtige Bollwerke, die die Brandung brechen. Manchmal kompensiert das Korallenwachstum sogar den Anstieg des Meeresspiegels. Ob die Bildung neuer Korallen auch künftig mit dem Anstieg des Meeresspiegels mithalten kann, hängt auch von der Geschwindigkeit des Anstiegs und von der Wassertemperatur ab. Fachleute befürchten, dass sich mit dem Klimawandel die Lebensbedingungen der anpassungsfähigen, aber sensiblen Korallen verschlechtern; erstens, weil die Wassertemperatur mancherorts für sie schon heute zu hoch ist; zweitens, weil die Korallen mit dem prognostizierten Meeresspiegelanstieg oder eventuellen Küstensenkungen kaum werden Schritt halten können. An anderen flachen Küstenabschnitten wie etwa Flussmündungen sind Mangroven und Marschen von Überflutung bedroht, die heute ebenfalls ein natürlicher Schutz gegen Sturmfluten sind. Versinken die Mangroven und Marschen, können Wellen weit ins Land vordringen und großen Schaden anrichten. Nur in ganz seltenen Fällen werden solche Veränderungen durch einen verstärkten Sedimenteintrag aus dem Hinterland kompensiert.

Extreme Wasserstände

Derzeit geht man davon aus, dass durch die globale Erwärmung Extremwetterereignisse wie etwa tropische Wirbelstürme oder Sturmfluten häufiger auftreten. Diese dürften die Folgen des Meeresspiegelanstiegs noch verschärfen, denn wenn der Meeresspiegel höher liegt, ist die zerstörerische Kraft eines Sturms an der Küste noch deutlich größer. Experten erwarten vor allem für die gemäßigten und tropischen Regionen eine erhöhte Sturmaktivität. Ob die Häufigkeit und Stärke der Stürme weltweit zunehmen werden, darüber gibt es derzeit noch keinen Konsens, da verschiedene wissenschaftliche Rechenmodelle und Messdaten unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Sturmfluten entstehen durch das Zusammenspiel von Sturmsystemen und Gezeiten. Wenn bei Flut, speziell bei Springflut, Sturmwinde das Wasser gegen die Küste drücken, potenziert sich das Überschwemmungsrisiko für große Landstriche. Solche Stürme können mehrere Tage anhalten und das Wasser so stark ansteigen lassen, dass es noch nicht einmal bei Ebbe abfließt.

Stürme können auch in Nebenmeeren wie der Ostsee, in denen es kaum Gezeiten gibt, verheerende Auswir-



kungen haben. Wie in einer Badewanne staut der Wind die Wassermassen in einem Teil des Beckens, die dann zurückschwappen, sobald der Wind nachlässt oder dreht. Bläst er nun etwa aus entgegengesetzter Richtung, verstärken sich beide Faktoren und der Wasserstand kann an der deutschen Ostseeküste um mehr als 3 Meter ansteigen. Durch starke Niederschläge wird diese Situation verschärft, da das Regen- oder Flusshochwasser wegen des dann ohnehin hohen Wasserstands an der Küste nicht abfließen kann.

Häufung der Hochwasser

Durch den Anstieg des Meeresspiegels nimmt nicht allein die Wasserstandshöhe zu. Fatal ist, dass besonders hohe Sturmflutwasserstände immer häufiger eintreten, wie das Beispiel der Sturmflutgefährdung für Deutschland zeigt: Bei einem Meeresspiegelanstieg von 1 Meter werden bedrohliche Sturmfluten häufiger eintreten, weil das Basisniveau nun um 1 Meter höher liegt. Dann könnte ein Jahrhundert-Wasserstand, wie er bei der Sturmflut von 1976 an der deutschen Nordseeküste eingetreten ist, künftig alle zehn Jahre passieren. Die Wiederholungswahrscheinlichkeit von schweren Sturmfluten wird sich also deutlich erhöhen. An der deutschen Ostseeküste mit ihren geringeren Sturmflutwasserständen wäre dieser Effekt sogar noch ausgeprägter: Ein Jahrhundert-Hochwasser mit einer Höhe von 2,50 Meter über **Normalnull** (NN) würde dort sogar alle zwei bis fünf Jahre eintreten.

3.11 > Die Sturmflut von 1976 gilt als die bis heute schwerste registrierte Sturmflut an der deutschen Nordseeküste und richtete wie hier beim Deichbruch in der Haseldorfer Marsch an der Elbe durchaus schwere Schäden an. In Cuxhaven erreichte der Pegel mit 5,1 Meter über dem normalen Wasserstand eine Rekordhöhe. Die Folgen waren dennoch weit weniger verheerend als bei der Flut von 1962, weil man in der Zwischenzeit vielerorts die Deiche verstärkt und erhöht hatte.

Der Kampf um den Lebensraum Küste

> Mehr als eine Milliarde Menschen leben heute in tief liegenden Küstenregionen – die meisten davon in Asien. Einige dieser Gebiete könnten schon im Laufe dieses Jahrhunderts überschwemmt werden. Die Bewohner werden Strategien gegen das Wasser entwickeln oder Gebiete aufgeben müssen. Seit einiger Zeit versucht man zu ermitteln, welche Regionen es am härtesten treffen wird.

Die bange Frage, wie schlimm es wird

Die vom Menschen durch intensive Nutzung stark in Mitleidenschaft gezogenen Küstenräume geraten durch den Klimawandel immer mehr unter Stress. Es stellt sich die Frage, ob oder inwieweit diese auch in den kommenden Jahrzehnten bis Jahrhunderten ihre elementare Bedeutung als Lebens- und Wirtschaftsraum behalten können oder ob sie sich vielmehr zu einer Bedrohung des Menschen entwickeln. Offen ist auch, wie stark sich die Küstenökosysteme und Lebensräume wie zum Beispiel Mangroven, Korallenriffe, Seegraswiesen und Salzmarschen verändern werden, die vielerorts Lebens- und Nahrungsgrundlage der Küstenbewohner sind.

Mit verschiedenen Studien haben Wissenschaftler in den vergangenen Jahren versucht, das Ausmaß der vom Meeresspiegelanstieg ausgehenden Gefährdung abzuschätzen. Um die gefährdete Fläche entlang der Küsten

erfassen zu können, muss man zunächst analysieren, wie hoch die Landflächen weltweit über dem Meeresspiegel liegen. Das ist schwierig, weil es für viele Küstenregionen bisher noch keine verlässlichen topographischen Karten gibt. Grob geschätzt leben weltweit mehr als 200 Millionen Küstenbewohner unterhalb von 5 Metern (über Normalnull). Diese Zahl wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf schätzungsweise 400 bis 500 Millionen ansteigen.

Darüber hinaus werden in diesem Zeitraum die Millionenstädte an den Küsten weiterwachsen. Neue Städte kommen hinzu – insbesondere in Asien. Für Europa schätzt man, dass bei einem Meeresspiegelanstieg von 1 Meter etwa 13 Millionen Menschen bedroht sein würden. Die Folgen wären unter anderem hohe Kosten für Küstenschutzmaßnahmen. In Extremfällen könnten Umsiedlungsmaßnahmen notwendig werden. Unterhalb von 20 Metern leben heute weltweit insgesamt sogar eine Milliarde Menschen auf einer Landfläche von etwa acht Millionen Quadratkilometern. Das entspricht etwa der Fläche Brasiliens. Allein diese Zahlen machen klar, wie schwer ein Verlust der Küstengebiete wiegen würde. Die Untergruppe Küstenmanagement (Coastal Management Subgroup) des IPCC legt weitere Merkmale zugrunde, um die Verletzlichkeit der Küstengebiete zu ermitteln und die Gefährdung einzelner Küstenländer miteinander vergleichen zu können:

- die ökonomische Wertschöpfung (Bruttoinlandsprodukt, BIP) im überflutungsgefährdeten Gebiet;
- die Ausdehnung der urbanen Siedlungsflächen;
- die Ausdehnung der landwirtschaftlichen Nutzflächen;
- die Zahl der vorhandenen Arbeitsplätze;
- die Größe/Ausdehnung der Küstenfeuchtgebiete, die als Überflutungspuffer dienen können.

3.12 > Der Zyklon Aila traf Bangladesch im Jahr 2009 mit voller Wucht. Tausende Menschen verloren ihr Zuhause. Diese Frau rettete sich mit ihrer fünfköpfigen Familie in einen Unterstand, nachdem die aufgepeitschten Wassermassen einen Damm durchbrochen hatten.





Wie der Klimawandel die Küsten Norddeutschlands bedroht

Sämtliche Küsten Norddeutschlands haben zusammen eine Länge von ungefähr 3700 Kilometern. Davon entfallen auf die Nordseeküste mitsamt seinen Inseln 1580 Kilometer, auf die Ostseeküste inklusive Boddengewässer und Inseln etwa 2100 Kilometer. Als potenziell überflutungsgefährdet gelten die Gebiete an der Nordsee, die nicht höher als 5 Meter über dem Meeresspiegel liegen. An der Ostseeküste zählen dazu die Bereiche bis 3 Meter über dem Meeresspiegel. Das entspricht zusammen einer Gesamtfläche von 13 900 Quadratkilometern. Ein Großteil dieser Fläche ist derzeit durch Deiche geschützt. In den überflutungsgefährdeten Gebieten leben rund 3,2 Millionen Menschen. Die in diesen Regionen vorhandenen volkswirtschaftlichen Werte belaufen sich auf mehr als 900 Milliarden Euro. Zudem gibt es hier mehr als eine Million Arbeitsplätze.

Durch Sturmfluten und Sturmhochwasser sind besonders die Großstädte bedroht. Im Küstenbereich der Nordsee zählen dazu vor allem Hamburg und Bremen, im Bereich der Ostsee insbesondere Kiel, Lübeck, Rostock und Greifswald. Vielen Tourismuszentren an Nord- und Ostsee droht Küstenerosion. Darüber hinaus können langfristig große Teile der ökologisch wertvollen Salzwiesen und Wattflächen verloren gehen. Sicher ist, dass die Kosten für Küstenschutzmaßnahmen, hauptsächlich Deichbau und Sandvorspülungen, steigen werden.

Mittlerweile hat man recht genau ermittelt, welche Nationen besonders betroffen sein würden, weil dort ein extrem hoher Anteil der Bevölkerung in der Küstenregion lebt. Vor allem Bangladesch und Vietnam sind demnach speziell gefährdet. Auf den niedrig gelegenen Inselarchipelen wie etwa den Malediven und den Bahamas ist inzwischen nahezu die gesamte Bevölkerung und damit auch der größte Teil der Volkswirtschaft bedroht. Nach absoluten Werten nimmt China den ersten Rang ein.

Zu den stark bedrohten Gebieten in Europa zählen vor allem der Osten Englands sowie der Küstenstreifen, der sich von Belgien über die Niederlande und Deutschland bis nach Dänemark zieht, außerdem die südliche Ostseeküste mit den Mündungen von Oder und Weichsel. Auch am Mittelmeer und am Schwarzen Meer gibt es dicht besiedelte, überflutungsgefährdete Räume zum Beispiel das Po-Delta in Norditalien und die Lagune von Venedig sowie die Deltas von Rhône, Ebro und Donau. Schon heute liegen einige dicht besiedelte Gebiete in den Niederlanden, England, Deutschland und Italien unterhalb des nor-

malen Flutwasserstands. Diese Gebiete wären ohne Küstenschutzmaßnahmen also bereits überflutet. Die Frage, wie schnell der Meeresspiegel steigt, ist für diese Regionen deshalb von besonderem Interesse. Schon heute muss geklärt werden, wie der Küstenschutz intensiviert werden kann, wie sich die Gesellschaft anpassen kann oder ob künftig sogar Siedlungen aufgegeben werden müssen.

Aufgrund fehlender Küstenschutzmaßnahmen wird vermutlich bereits ein moderater Meeresspiegelanstieg von nur wenigen Dezimetern zahlreiche Küstenbewohner in vielen Gebieten Asiens, Afrikas und Lateinamerikas aus ihrer Heimat vertreiben und damit zu Meeresflüchtlingen machen. Die volkswirtschaftlichen Schäden dürften beträchtlich ausfallen. Die Infrastrukturen großer Hafenstädte und vor allem die regionalen Handels- und Transportnetzwerke, die oft über Küstenschifffahrt oder über Flüsse abgewickelt werden, wären ebenfalls davon betroffen. Fachleute haben recht genau bilanziert, welche Konsequenzen der Meeresspiegelanstieg für die deutschen Küstengebiete hat.

3.13 > Schwere vierfüßige Tetrapoden sollen die Küste von Sylt in der Nähe des Ortes Hörnum vor der Gewalt der Sturmfluten schützen. Derartige Schutzmaßnahmen sind ausgesprochen kostspielig.

3.14 > In den Niederlanden bereitet man sich schon heute auf künftige Überflutungen vor: Ingenieure haben erste schwimmende Siedlungen wie hier bei Maasbommel errichtet. Die amphibischen Häuser sind an Pfosten verankert und reagieren flexibel auf Hochwasser.



Die alte Losung gilt auch morgen: Wer nicht deichen will, muss weichen

Seit Menschen Küsten besiedeln, müssen sie sich mit dem Wandel ihres Lebensraums und der Bedrohung durch Stürme und Überflutungen arrangieren. Im Laufe der Zeit entwickelten die Küstenbewohner Schutzstrategien, mit denen sie sich gegen die Naturgewalten zur Wehr setzten. Heute unterscheidet man vier Strategien, die keineswegs immer langfristig erfolgreich sind:

1. Anpassung von Gebäuden und Siedlungen (Warften, auf Erdhügeln erbaute Höfe, Pfahlbauten und andere Maßnahmen);
2. Schutz/Verteidigung durch den Bau von Deichen, Sperrwerken oder Ufermauern;
3. Rückzug durch Aufgabe oder Verlagerung gefährdeter Siedlungen (Migration);
4. Abwarten in der Hoffnung, dass die Bedrohung nachlässt oder sich räumlich verlagert.

In Europa und auch Teilen von Ostasien (Japan, China) hat sich früh eine Risikokultur entwickelt: Auf die Phasen des Rückzugs und der Anpassung bis zum Mittelalter folgte in jüngerer Zeit die Strategie der Verteidigung, die

dann auch in einigen später besiedelten Räumen wie Nordamerika übernommen wurde. Es ist teuer und technisch aufwendig, niedrig gelegene Gebiete und Küstenstädte wirkungsvoll gegen Überflutung, Landverlust, Versäuerung oder Grundwasserversalzung zu schützen. Das Beispiel der Niederlande aber zeigt, dass eine kleine und wohlhabende Industrienation durchaus in der Lage ist, angesichts eines hohen Gefährdungspotenzials die Strategie der Verteidigung langfristig zu verfolgen – immerhin liegen knapp zwei Drittel des Landes unter dem normalen Flutwasserstand. Auch Deutschland betreibt einen vergleichsweise hohen Aufwand, um die deutlich längere Küstenlinie instand zu halten und durch Deiche und andere Bauten zu schützen. Jährlich geben die Niederlande und Deutschland zusammen circa 250 Millionen Euro für den Küstenschutz aus. Das sind zwar nur 0,01 Prozent des deutschen und 0,05 Prozent des niederländischen Bruttonationaleinkommens, jedoch ist zu bedenken, dass diese Summen allein für die Erhaltung beziehungsweise Verstärkung bereits bestehender Küstenschutzanlagen aufgewendet werden. Viele ärmere Küsten- und Inselnationen sind nicht in der Lage, Küstenschutz in ähnlich großem Stil zu betreiben. Ihnen bleiben bei steigendem Meeres-

Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf das natürliche Küstensystem		Mögliche Schutz- und Anpassungsmaßnahmen	Relative Kosten der Maßnahmen
1. Überflutung niedriger Flächen und daraus resultierende Schäden	a. Sturmfluten b. Rückstau in Flussmündungen	1. Deiche und Sperrwerke [S] 2. Warften, flutsichere Gebäude(standards) [A] 3. Ausweisung von Risikozonen [A/R] 4. Angepasste Raum- und Bebauungsplanung [A/R]	1. Sehr hoch (Bau, Erhaltung) 2. Mittel bis hoch 3. Sehr niedrig (einmalig) 4. Mittel (wiederholt)
2. Verlust bzw. Veränderung von Küstenfeuchtgebieten		5. Angepasste Flächennutzungsplanung [A/R] 6. Deichrückverlegung [A/R] 7. Vorlandgewinnung [S/A] 8. Sandvorspülungen/Sedimentsicherung [S]	5. Niedrig bis mittel (laufend) 6. Sehr hoch (einmalig) 7. Hoch (wiederholt) 8. Mittel/Niedrig (laufend)
3. Direkte und indirekte morphologische Auswirkungen, insbesondere Erosion von Stränden und Steilufern		9. Bau von Buhnen, Deckwerken, Ufermauern [S] 10. Sandvorspülungen/Dünensicherung [S] 11. Unterwasserriffe, Wellenbrecher [S] 12. Bebauungsfreie Zonen [R]	9. Mittel bis hoch (Bau) 10. Mittel/Niedrig (laufend) 11. Mittel bis hoch (Bau) 12. Niedrig bis hoch (einmalig)
4. Eindringen von Salzwasser	a. ins Oberflächenwasser b. ins Grundwasser	13. Wehre und Siele gegen Salzwassereinstrom [S] 14. Angepasste/Reduzierte Wasserentnahme [A/R] 15. Einpumpen von Süßwasser [S] 16. Angepasste Wasserentnahme [A/R]	13. Hoch (Bau, Erhaltung) 14. Niedrig (laufend) 15. Mittel (wiederholt) 16. Niedrig (dauerhaft)
5. Höhere (Grund-) Wasserstände und eingeschränkte Drainierung der Böden		17. Verbesserung der Boden-/Landdrainage [S] 18. Bau von Schöpfwerken [S] 19. Geänderte Flächennutzung [A] 20. Ausweisung Flutgebiete/Risikogebiete [A/R]	17. Hoch (laufend) 18. Sehr hoch (Bau, Erhaltung) 19. Niedrig (dauerhaft) 20. Sehr niedrig (wiederholt)

3.15 > Der Anstieg des Meeresspiegels wirkt sich auf die Küsten und ihre Bewohner unterschiedlich aus. Der Mensch kann sich durchaus mit Gegenmaßnahmen schützen. Die Kosten des Schutzes können aber beträchtlich sein und langfristig den Nutzwert übersteigen. Die Maßnahmen werden unterschieden in: [S] – Schutzmaßnahmen, [A] – Anpassungsmaßnahmen und [R] – Rückzugsmaßnahmen.

3.16 > Staaten mit der weltweit höchsten Bevölkerungszahl und dem höchsten Bevölkerungsanteil in niedrig gelegenen Küstengebieten. Ausgenommen sind Länder mit weniger als 100 000 Einwohnern. Nicht berücksichtigt wurden ferner 15 kleine Inselstaaten mit einer Gesamtbevölkerung von 423 000 Einwohnern.

Staaten, geordnet nach Bevölkerung in niedrig gelegenen Küstenregionen – Top Ten			Staaten, geordnet nach Bevölkerungsanteil in niedrig gelegenen Küstenregionen – Top Ten		
Staat	Bevölkerung in niedrig gelegenen Küstenregionen (10 ³)	% der Bevölkerung in niedrig gelegenen Küstenregionen	Staat	Bevölkerung in niedrig gelegenen Küstenregionen (10 ³)	% der Bevölkerung in niedrig gelegenen Küstenregionen
1. China	127 038	10 %	1. Malediven	291	100 %
2. Indien	63 341	6 %	2. Bahamas	267	88 %
3. Bangladesch	53 111	39 %	3. Bahrain	501	78 %
4. Indonesien	41 807	20 %	4. Surinam	325	78 %
5. Vietnam	41 439	53 %	5. Niederlande	9 590	60 %
6. Japan	30 827	24 %	6. Macao	264	59 %
7. Ägypten	24 411	36 %	7. Guyana	419	55 %
8. USA	23 279	8 %	8. Vietnam	41 439	53 %
9. Thailand	15 689	25 %	9. Dschibuti	250	40 %
10. Philippinen	15 122	20 %	10. Bangladesch	53 111	39 %

spiegel nur die Alternativen Anpassung oder Rückzug. Doch auch Umsiedlungsprojekte, wie sie seit 2007 auf den Carteret-Inseln, die zu Papua-Neuguinea gehören, durchgeführt werden, sind teuer. Die Kosten der Migration von 1700 Personen sind noch nicht genau abzuschätzen, werden aber viele Millionen US-Dollar kosten.

Für die verschiedenen Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs gibt es unterschiedliche Bekämpfungs- und Handlungsstrategien. Ob eine Maßnahme regional oder lokal angewendet wird, hängt vor allem von den Kosten und den geologischen Gegebenheiten vor Ort ab. Im Ganges-Brahmaputra-Delta von Bangladesch etwa würden schwere Seedeiche im weichen Untergrund absacken. Außerdem fehlt es an Geld, um Hunderte Kilometer Deich zu errichten. Die Kosten für ein solches Deichbauprojekt dürften bei mehr als 20 Milliarden Euro liegen – gut hundert Mal mehr als die jährlichen Küstenschutzkosten der Niederlande und Deutschlands zusammen. Die nationale Wirtschaft Bangladeschs würde das nicht verkraften. In anderen Gebieten fehlt es schlicht an Baumaterial, um die

Küste zu schützen. Auf Koralleninseln fehlt es vielfach an Sediment für Aufspülungen sowie an Platz und Baumaterial für Deiche und Mauern. Selbst wenn ausreichend Geld zur Verfügung stünde, würden diese Inseln dem Meeresspiegelanstieg weitgehend schutzlos ausgeliefert bleiben. Die Bedrohung durch den Meeresspiegelanstieg wird dort heute auch dadurch verschärft, dass Korallenkalk aus den Riffen entnommen und zum Bau von Hotelkomplexen verwendet wird.

Was der steigende Meeresspiegel für die Küsten- und Inselnationen und ihren Küstenschutz im 21. Jahrhundert bedeuten mag, ist erst in Ansätzen absehbar und hängt entscheidend von Umfang und Geschwindigkeit der Entwicklung ab: Wenn der Meeresspiegel bis 2100 um deutlich mehr als einen Meter ansteigt, dann werden die Deiche und Schutzbauwerke vielerorts nicht mehr hoch oder stabil genug sein. In vielen Regionen wird man neue Hochwasserschutzanlagen errichten und die Entwässerung im Binnenland aufwendig ausbauen müssen. Experten erwarten, dass die jährlichen Ausgaben für den Küsten-

schutz in Deutschland auf etwa eine Milliarde Euro klettern könnten – bei zu schützenden Sachwerten hinter den Deichen in Höhe von 800 bis 1000 Milliarden Euro. Weltweit dürfte der Aufwand tausendfach höher liegen. Während für einige Länder der Kostenaufwand für Verteidigungs- und Anpassungsmaßnahmen lohnend erscheint, weil sich hinter den Deichen große volkswirtschaftliche Werte angehäuft haben, werden vor allem die ärmeren Küstengebiete wohl verloren gehen oder unbewohnbar werden. Die Bewohner werden zu Umweltflüchtlingen.

Vermutlich können Industrieländer noch einige Zeit mit teurer und aufwendiger Küstenschutztechnologie das Meer zurückhalten. Aber die Verteidigungsstrategie wird selbst dort langfristig der Anpassung oder gar dem Rückzug weichen müssen. Extrem aufwendige Verteidigungsanlagen wie die Sperrwerke von London, Rotterdam und Venedig werden wohl Einzelprojekte bleiben. Für die meisten anderen Gebiete wird es sinnvoller sein, moderne Risikomanagement-Konzepte zu entwickeln, um die Risiken beherrschbarer zu machen.

CONCLUSIO

Die Zukunft der Küste – Verteidigung oder geordneter Rückzug?

Die Gestalt der Küstenzonen wird durch ein Gleichgewicht verschiedener Faktoren wie Erosionsstabilität, Sedimentation, Seegang, Sturmhäufigkeit oder von Meeresströmungen gesteuert. Die Klimaerwärmung, der Meeresspiegelanstieg oder menschliche Eingriffe können diese Faktoren überlagern oder verstärken und somit die Gleichgewichtszustände der Küsten beeinflussen. Meist können Gleichgewichtsstörungen im natürlichen System bis zu einem bestimmten kritischen Umschlagspunkt kompensiert werden. Wird dieser erreicht, sind die Veränderungen aber unumkehrbar. Eine Rückkehr zum Gleichgewichtszustand ist dann nicht mehr möglich. Die Aktivitäten des Menschen und die Effekte des Klimawandels zusammen bringen viele Küstenabschnitte näher an ihren jeweiligen Umschlagspunkt heran. Baumaßnahmen oder die Einbringung von Substanzen wie etwa Baggergut müssen daher künftig besonders effektiv und nachhaltig geplant werden. Dafür ist ein integriertes Küstenzonenmanagement erforderlich. Zweifellos wird sich der Anstieg des Meeresspiegels zunächst nur langsam beschleunigen und bis weit über das 21. Jahrhundert fortsetzen. Viele Küstengebiete werden nach und nach unbewohnbar werden. Menschen werden ihre Heimat und einen Teil ihrer Kultur verlieren. Reiche

Küstenländer werden diesen Prozess für einige Zeit aufhalten können, für die Schutz- und Anpassungsmaßnahmen aber immense finanzielle und technische Mittel aufwenden müssen. So wird man an der deutschen Nord- und Ostseeküste vorerst nicht von der Strategie der Verteidigung abweichen. Das Verhältnis von Küstenschutzkosten zu Nutzen (für Menschen und Sachwerte) ist positiv. Langfristig werden sich die Menschen aber auch aus diesen Küstengebieten zurückziehen oder an das Vorrücken des Meeres anpassen müssen. In den Niederlanden werden bereits heute erste schwimmende Siedlungen errichtet, die, fest vertäut, bei Hochwasser aufschwimmen können. Hier verfolgt man die Strategie der Anpassung: Der Mensch lernt, mit dem Wasser zu leben. Für die Zukunft wird man vielerorts ähnliche nachhaltige Raum- und Flächennutzungsplanungen durchführen müssen. Das gilt insbesondere für den stark gefährdeten Küstenstreifen unterhalb von 5 Metern. Denkbar ist auch die Einrichtung von Pufferzonen in Siedlungsgebieten, in denen nur nach bestimmten, risikoarmen Vorgaben gebaut werden darf. Schon heute dürfen in manchen überflutungsgefährdeten Gebieten im Erdgeschoss keine hochwertigen Wohn- oder Geschäftsräume eingerichtet werden. Mittelfristig aber gibt es vor allem ein Ziel: Das Ausmaß des Klimawandels und des Meeresspiegelanstiegs durch Klimaschutzmaßnahmen so gering wie möglich zu halten.

4

Endstation Ozean – von der Verschmutzung der Meere



> Durch Produktion und Verbrauch von Lebensmitteln, Industrie- und Konsumgütern erzeugt die Menschheit große Mengen Abfall. Ein beträchtlicher Teil landet früher oder später im Ozean. Problematisch ist auch die zunehmende Verschmutzung der Küstengewässer mit Nähr- und Schadstoffen. Und immer wieder entdeckt man giftige Substanzen, die sich in Meerestieren anreichern.



Die Überdüngung der Meere

> Flüsse tragen Nährstoffe aus der Landwirtschaft und aus ungeklärten Abwässern in die Ozeane. Vielerorts kommt es dadurch zu Massenvermehrungen von Algen. In manchen Regionen verändern sich ganze Lebensräume. In einigen europäischen Gebieten konnte man die Nährstoffflut eindämmen. Weltweit aber verschlechtert sich die Situation.

Lebensader der Küstenmeere – die Flüsse

Zu den produktivsten Meeresregionen gehören die Küstengebiete. Hier werden weltweit die meisten Fische, Muscheln und Meeresfrüchte gefangen. Der Grund für diese hohe Produktivität sind Nährstoffe, die durch die Flüsse vom Land ins Meer gespült werden. Dazu zählen vor allem Phosphat- und Stickstoffverbindungen, die Pflanzen für ihr Wachstum benötigen. Auch das Phytoplankton im Meer, zu dem insbesondere mikroskopisch kleine Algen gehören, nutzt diese Substanzen. Dank der großen Nährstoffzufuhr wächst das Phytoplankton in den Küstengebieten ausgezeichnet. Es wird von Zooplankton, Kleinkrebsen oder Fischlarven sowie anderen Lebewesen gefressen und bildet damit die Basis für die Nahrungsnetze im Meer.

Die hohe Produktivität macht die Küstengebiete auch für die Aquakultur zunehmend interessant. So hat sich die Produktion von Meerestieren aus Aquakultur zwischen 1970 und 2005 weltweit um das 15-Fache erhöht. Doch

nicht allein die Flüsse tragen Nährstoffe in die Küstengewässer. An der Westküste Afrikas zum Beispiel fördern Strömungen nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe an die lichtdurchflutete Meeresoberfläche. Auch in diesen sogenannten **Auftriebsgebieten** bewirken die Nährstoffe ein starkes Algenwachstum, eine erhöhte Produktivität des gesamten Nahrungsnetzes und letztlich eine Zunahme der Fischereierträge. Ein natürliches Maß an Nährstoffen ist also positiv und lebenswichtig für die Meeresorganismen der Küstengebiete.

Zu viel des Guten

In vielen dicht besiedelten Regionen der Erde aber gelangen zu viele Nährstoffe in die Küstengewässer. Einen Großteil trägt die intensive Landwirtschaft durch den Einsatz von Kunstdüngern bei, die mit dem Regen in die Flüsse gespült werden. Zwischen 1970 und 2005 hat sich allein die Menge des weltweit eingesetzten Stickstoffdüngers fast verdreifacht. Darüber hinaus werden Stickstoff- und Phosphatverbindungen auch mit ungeklärtem Abwasser und durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen über die Atmosphäre ins Meer eingetragen. Durch die großen Nährstoffmengen in den Küstengewässern werden die Produktion und der Abbau von organischem Material unnatürlich verstärkt. Fachleute nennen diesen Vorgang Eutrophierung. Der Nährstoffeintrag ist so groß, dass sich das Phytoplankton über die Maßen entwickelt. So bilden sich regelrechte Algenblüten. In der Nordsee und im Wattenmeer kommt es von Zeit zu Zeit zu einer Massenvermehrung von Algen, die in der Brandung zu Schaum geschlagen werden. Dabei bilden sich zum Teil meterhohe Haufen, die an Eischnee erinnern. Gefährlich wird es, wenn sich toxische Algen ausbreiten. Diese vergiften

4.1 > Durch die Eutrophierung wird das Wachstum von Algen angeregt, die in der Brandung zu Schaum geschlagen werden, wie beispielsweise an der deutschen Nordseeküste.





4.2 > Die Überdüngung der Meere wird häufig erst durch das massenhafte Auftreten von Grünalgen sichtbar. Im Vorfeld der olympischen Segelwettbewerbe 2008 in Qingdao mussten sie in Handarbeit von der Wasseroberfläche entfernt werden.

nicht nur die Lebewesen im Meer, wie etwa Fische und Muscheln. Über den Umweg der Nahrungskette nehmen auch Menschen die Gifte auf. Inzwischen sind zahlreiche Fälle bekannt, bei denen Menschen nach dem Verzehr vergifteter Muscheln gestorben sind. Wissenschaftler konnten nachweisen, dass auch Meeressäuger an Algengiften verenden, die sie mit der Nahrung aufnehmen. Derartige toxische Algenblüten treten beispielsweise entlang der texanischen Küste auf. Sie verfärben das Wasser und werden daher auch als „red tides“ oder „brown tides“ bezeichnet.

Doch selbst die Blüten ungiftiger Algen werden zum Problem, sobald die Algen sterben. Die toten Algen sinken ab und werden dabei von Mikroorganismen abgebaut, die den Sauerstoff im Meerwasser verbrauchen. Niedrige Sauerstoffkonzentrationen im Wasser können zum Absterben von Fischen und Schalentieren führen. Nimmt der Sauerstoffgehalt ab, flüchten zunächst die Tiere, die sich aktiv bewegen können, zum Beispiel Fische und Krebse. Im Boden nimmt zugleich die Zahl der Tiere ab, die auf eine gute Versorgung mit Sauerstoff angewiesen sind. Sinkt die Sauerstoffkonzentration noch weiter, verschwinden auch

die meisten anderen im Boden lebenden Arten. Zurück bleiben einige wenige Spezies, die auch geringe Sauerstoffkonzentrationen überstehen. Wenn das Bodenwasser schließlich gänzlich sauerstofffrei ist, sterben selbst diese Organismen ab.

Die Eutrophierung lässt allerdings nicht nur das Phytoplankton erblühen. Sie wirkt sich auch auf größere Pflanzen aus und verändert oftmals ganze Küstenökosysteme. Ein Beispiel ist die Bildung von Grünalgenmassen im Jahr 2008, als der olympische Segelwettbewerb an der chinesischen Küste bei Qingdao durch einen riesigen Grünalgent Teppich behindert wurde. In anderen Fällen führt die Eutrophierung zum Verschwinden von Seegraswiesen (Kapitel 5) oder zur Veränderung der Artenzusammensetzung in bestimmten Lebensräumen. Kurz: Die Eutrophierung ist ein Beispiel dafür, wie sich Veränderungen auf dem Festland auf das Meer auswirken, denn die Ozeane sind über die Flüsse und die Atmosphäre mit der Landmasse verbunden. Um die negativen Effekte der Eutrophierung zu reduzieren, wird versucht, die Einträge von Phosphat- und Stickstoffverbindungen in die Küstengewässer zu verringern.

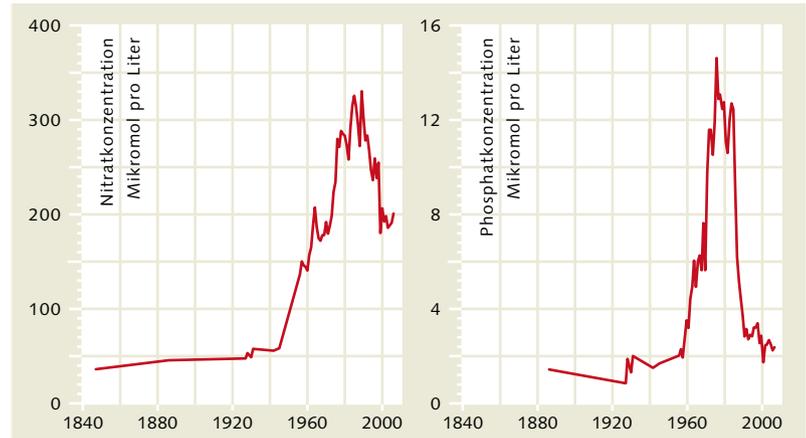
4.3 > Wenn die Bedingungen für das Phytoplankton günstig sind, treten in den Meeren immer wieder Algenblüten auf, beispielsweise in der Ostsee. Durch die Massenvermehrung von Cyanobakterien, vormals als Blaualgen bezeichnet, verfärbt sich das Wasser in diesen Gebieten grün. Solche Phänomene sind durchaus natürlich, doch gibt es solche Blüten aufgrund der Überdüngung heute ungewöhnlich häufig.



Eine Trendumkehr ist möglich

Wie sich in Europa der Eintrag von Nährstoffen über die Flüsse ins Meer entwickelt hat, lässt sich gut am Beispiel der Nordsee und des Rheins zeigen, da für beide ausführliche Daten vorliegen. Erste Beobachtungen stammen aus der Mitte des 19. Jahrhunderts. Über Jahrzehnte wurden an der deutsch-niederländischen Grenze Wasserproben aus dem Rhein entnommen und analysiert. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts verzeichneten die Forscher in der Nähe des Grenzortes Lobith einen starken Anstieg der Phosphat- und Nitratkonzentrationen. Seit Mitte der 1980er Jahre gehen die Konzentrationen dank geeigneter Maßnahmen wieder kontinuierlich zurück. Ursachen für den Anstieg waren die wachsenden Einträge aus der Landwirtschaft und der Industrie sowie die Einleitung ungeklärter kommunaler Abwässer. Eine bedeutende Phosphatquelle waren Waschmittel, in denen Phosphate zur Entkalkung des Waschwassers eingesetzt wurden. Ein Verbot dieser Waschmittel führte dann bereits in den 1970er Jahren zur Abnahme der Phosphatkonzentration im Wasser des Rheins. Ab den 1980er Jahren sank dann auch die Stickstoffkonzentration im Flusswasser. Das ist zum einen auf verbesserte Düngungsmethoden in der Landwirtschaft zurückzuführen, durch die weniger Nährstoffe aus den Äckern ausgespült werden. Ein zweiter Grund ist die bessere Klärung von industriellen und kommunalen Abwässern. 1987 schließlich einigten sich die Umweltminister der Nordseeanrainerstaaten auf das Ziel, die durch die Flüsse transportierten Phosphat- und Stickstoffmengen zu halbieren. Für die Phosphate wurde dieses Ziel schnell erreicht. Für die Stickstoffverbindungen benötigte man 25 Jahre. Allerdings trägt der Rhein trotz schrumpfender Phosphat- und Stickstoffkonzentrationen im Flusswasser noch immer große Nährstoffmengen in die Nordsee, denn er fließt durch ein agrartechnisch hochentwickeltes und intensiv genutztes Gebiet. Die Nitratfrachten sind daher noch immer höher als in vorindustrieller Zeit vor 150 Jahren. Ähnlich ist die Situation in anderen europäischen Flussgebieten und in den USA.

Für einige Teile Europas haben also politische Entscheidungen zu einer Trendumkehr und einer Abnahme der Nährstoffeinträge ins Meer geführt. Weltweit aber zeichnet sich eine ganz andere Tendenz ab. Modellrechnungen



4.4 > Zur Eutrophierung der Küstengewässer tragen vor allem Nitrate (Stickstoffverbindungen) und Phosphate bei, die durch die großen Flüsse ins Meer gespült werden. Ab der Mitte des vergangenen Jahrhunderts nahm beispielsweise im Rhein in der Nähe des Grenzortes Lobith die Konzentration der Nährstoffe enorm zu. Ursachen waren die intensive Nutzung von Kunstdüngern in der Landwirtschaft und die schlechte Klärung von Abwässern. Durch Gegenmaßnahmen wie das Verbot phosphathaltiger Waschmittel und bessere Düngungstechnik konnten die Einträge seit den 1980er Jahren erheblich reduziert werden. In vielen anderen Küstenregionen der Welt hingegen nehmen die Nährstoffkonzentrationen weiter zu.

haben ergeben, dass der Einsatz von Düngemitteln aufgrund des Bevölkerungswachstums und der Intensivierung der Landwirtschaft in vielen Regionen zunimmt. Entsprechend steigen in vielen Küstengebieten die Phosphat- und Stickstoffmengen, die über die Flüsse ins Meer eingetragen werden. Vor allem in Südostasien spülen die Flüsse mehr und mehr Nährstoffe ins Meer. Fachleute gehen davon aus, dass diese Mengen weiter ansteigen.

Ein weltweites Problem

Seit den 1960er Jahren treten die Effekte der Eutrophierung deutlich zutage. Forscher entdeckten immer häufiger Algenblüten, sauerstoffarme Zonen in den Küstenregionen oder Veränderungen der Küstenökosysteme. Inzwischen hat man in vielen Studien die Ursachen der Eutrophierung genauer analysiert. Als sicher gilt, dass es tatsächlich einen direkten Zusammenhang zwischen den Umweltveränderungen und den Nährstoffeinträgen gibt. Wie die Phosphate und Stickstoffe zusammenwirken, darüber waren sich die Forscher aber lange uneins. So nahmen manche Experten an, dass für das Algenwachstum das

Der Mississippi und die Todeszone im Golf von Mexiko

Kein anderer nordamerikanischer Fluss hat ein so großes Einzugsgebiet wie der Mississippi. Entsprechend groß sind die Nährstoffmengen, die er in den Golf von Mexiko spült. Da das Süßwasser leichter als das salzige Meerwasser ist, lagert es sich auf dem Meerwasser ab. Dieses Phänomen nennt man Stratifizierung. Diese Süßwasserschicht verhindert wie eine Decke, dass das Meerwasser Gase wie zum Beispiel Sauerstoff mit der Atmosphäre austauscht. Derartige Stratifizierungen kennt man auch aus anderen Küstengebieten, etwa der Ostsee zwischen Dänemark und Schweden oder aus den norwegischen Fjorden. Im Fall des Mississippi aber ist die Situation verschärft, weil das Flusswasser besonders viele Nährstoffe enthält. Die Nährstoffe führen zu üppigem Algenwachstum. Wenn die Algen sterben, sinken ihre Überreste in die untere Wasserschicht. Dort werden sie durch Bakterien abgebaut, die Sauerstoff verbrauchen. Dadurch nimmt die Sauerstoffkonzentration in der tief gelegenen Salzwasserschicht gefährlich ab. Frei bewegliche Organismen fliehen vor dem Sauerstoffmangel. Weniger mobile Lebewesen wie etwa Muscheln sterben. Daher werden die sauerstoffarmen Gebiete vor der Küste von Louisiana und Texas „dead zone“, Todeszone, genannt. Im Jahr 2002 wurden niedrige Sauerstoffkonzentrationen auf einer Fläche von mehr als 20 000 Quadratkilometern beobachtet. Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass die mit der

Stratifizierung einhergehenden Sauerstoffprobleme erst seit Mitte des letzten Jahrhunderts vermehrt auftreten. Der Grund dafür dürften die angestiegenen Nährstoffkonzentrationen, insbesondere der Stickstoffe, sein, die sich seit den 1950er Jahren verdreifacht haben. Die Stratifizierung im nördlichen Golf von Mexiko ist an sich ein natürliches Phänomen, das vor allem in niederschlagsreichen Jahren ausgeprägt ist. Sturmereignisse wie Hurrikans können das Wasser stark durchmischen und der Stratifizierung sogar entgegenwirken. Dennoch ist die Nährstofffracht des Mississippi zu groß. Mithilfe eines Managementplans versucht man nun, die Nährstoffeinträge zu reduzieren, um die Todeszone auf eine maximale Größe von etwa 5000 Quadratkilometern zu begrenzen. Zu den Maßnahmen gehören eine verbesserte Klärung der Abwässer, eine Optimierung der Düngung und die Schaffung von Überflutungsflächen entlang der Flüsse, die beträchtliche Nährstoffmengen abfangen können.

4.5 > Der Mississippi schleppt Unmengen von Sedimenten (gelbbraun) und Nährstoffen in den Golf von Mexiko, die durch den Wind nach Westen die Küste entlang transportiert werden. Die Nährstoffe bewirken ein starkes Algenwachstum (grün). Durch den bakteriellen Abbau der Algen in der Tiefe wird Sauerstoff verbraucht. Dadurch entsteht in einem weiten Areal entlang der US-Küste eine völlig sauerstofffreie Todeszone.



„Minimumgesetz“ gilt, das der Agrarwissenschaftler Carl Sprengel 1828 formulierte. So benötigt eine Pflanze mehrere Nährstoffe, um zu gedeihen. Fehlt ein Nährstoff, kann sie nicht wachsen. Demnach ist das Wachstum der Pflanzen also immer nur durch den einen Stoff limitiert, der gerade nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung steht. Entsprechend dachte man, dass es ausreichend wäre, nur einen Nährstoff aus dem Abwasser und den Flüssen zu entfernen, um das Algenwachstum zu stoppen, also Phosphat oder Stickstoff. Damit hätte man erhebliche Kosten für die Wasseraufbereitung sparen können. Diese Annahme ist jedoch zu simpel, denn immer mehr Experimente und Beobachtungen weisen darauf hin, dass oft mehrere Faktoren zugleich das Pflanzenwachstum limitieren. Experten nennen dieses Phänomen Co-Limitierung. Die Eutrophierung lässt sich demnach nur erfolgreich bekämpfen, wenn Phosphat und Stickstoff zugleich reduziert werden. Das ist jedoch nicht einfach, vor allem, weil sich die Stickstoffe, die in der Landwirtschaft freigesetzt werden, nicht einfach eindämmen lassen. Das Gleiche gilt für Stickstoffe, die aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl oder Kohle stammen und über die Atmosphäre eingetragen werden. Daher dürften Eutrophierungen der Küstengewässer auch künftig auftreten.

Ein Beispiel für stark eutrophierte Gebiete ist die Deutsche Bucht. Vor allem während der 1980er Jahre sank dort die Sauerstoffkonzentration in den tieferen Wasserschichten bedenklich. Im Wattenmeer wiederum beobachtete man eine Zunahme der Primärproduktion, des Algenwachstums. Das Seegras verschwand, eine Pflanze, die in der Nordsee und im Wattenmeer einzigartige Lebensräume bildet. Es wurde von wuchernden Grünalgen verdrängt, die sich massenhaft vermehrten. Weltweit sind vor allem Gewässer mit geringem Wasseraustausch von der Eutrophierung betroffen, weil die Nährstoffe kaum fortgetragen werden. Dazu gehören die Bucht von Tokio, der Long-Island-Sound in den USA, die Ostsee oder auch einige Fjorde in Norwegen. Auch im Mittelmeer wurden an verschiedenen Stellen wie der nordöstlichen Adria oder der Bucht von Athen Eutrophierungserscheinungen und eine Zunahme des Phytoplanktons beobachtet. Ein Spezialfall ist der Golf von Mexiko, wo der Mississippi so viele Nährstoffe einträgt, dass entlang der Küste ein ausgedehntes sauerstoffarmes Gebiet entstanden ist.

Ist eine Besserung in Sicht?

Durch gezielte Maßnahmen, wie zum Beispiel die Wasser-Rahmenrichtlinie aus dem Jahre 2000 oder die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, die 2008 in Kraft trat, versucht die Europäische Union die Wasserqualität der europäischen Küstengewässer zu verbessern. Wichtige Parameter zur Bewertung der Gewässergüte sind eine ausreichende Sauerstoffkonzentration, geringe Nährstoffmengen sowie das Vorhandensein bestimmter Algenarten und Bodenlebewesen. Wo immer das möglich ist, sollen die ehemals eutrophierten Gewässer in den natürlichen Zustand oder zumindest in einen nur gering beeinflussten Zustand zurückversetzt werden. Zur Überwachung dieser Maßnahmen soll darüber hinaus ein verbessertes Monitoring, eine Langzeitbeobachtung, durchgeführt werden, um Veränderungen und deren Ursachen identifizieren zu können.

Aufgrund des Wachstums der Weltbevölkerung wird die Eutrophierung noch über Jahrzehnte ein Problem sein. Eine weltweite Reduzierung der in die Küstengewässer eingetragenen Nährstoffmengen ist nicht in Sicht. Das Dilemma: Für die Menschheit ist die Landwirtschaft und die Produktion von Getreide lebenswichtig. Mit ihr aber gelangen Unmengen von Düngemitteln in die Flüsse und das Meer. Es gilt daher, mithilfe von meist kostensspieligen Reduktionsmaßnahmen eine Balance zwischen dem Nährstoffeintrag aus der Landwirtschaft und den negativen Auswirkungen auf die Küstenökosysteme zu finden.

Besonders problematisch ist, dass sich eutrophierte Küstenökosysteme nicht gänzlich in ihren Ursprungszustand zurückversetzen lassen. Die Eutrophierung ist nicht komplett reversibel! So zeigen Studien an mehreren europäischen Küstensystemen, dass eine längere Eutrophierungsperiode nachhaltige Änderungen im Ökosystem bewirkt, die sich nicht einfach durch eine Verringerung der Nährstoffeinträge rückgängig machen lassen. Das Beispiel Wattenmeer aber macht deutlich, dass geeignete Maßnahmen zu einer Abnahme der Nährstoffmengen und zu einer Verbesserung der Meeresumwelt führen können. Im nördlichen Wattenmeer zum Beispiel gibt es Anzeichen dafür, dass sich mit der Abnahme der Nährstoffmengen und der Algenblüten die Seegrasbestände erholt und wieder vergrößert haben.

Organische Schadstoffe in der Meeresumwelt

> Schon lange ist bekannt, dass sich bestimmte Gifte in der Natur und in Lebewesen anreichern. Gesundheitsschäden sind die Folge. Viele Substanzen wurden deshalb verboten. Doch tauchen in der Umwelt immer wieder neue giftige Stoffe auf, deren Gefahr man zunächst nicht erkannt hat. Ein aktuelles Beispiel sind die polyfluorierten Verbindungen. Bislang ist dieses Problem ungelöst.

Die Kehrseite unseres Konsums

Chemische Produkte braucht jeder – als Kunststoff für das Computergehäuse, als Bodenbelag in der Sporthalle oder Gummisohle im Joggingsschuh. Die Einsatzgebiete sind vielfältig und so wird heute in der Industrie eine Fülle verschiedener Chemikalien genutzt. Nach Angaben der Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) sind weltweit etwa 100 000 unterschiedliche chemische Substanzen im Umlauf. Allein in Europa werden circa 10 000 Chemikalien jeweils in einer Größenordnung von mehr als zehn Tonnen pro Jahr produziert und vermarktet. Davon sind schätzungsweise 1 bis 3 Prozent problematisch. Zu diesen umweltrelevanten Schadstoffen zählen beispielsweise die bekannten Schwermetalle Blei und Quecksilber, die aus der Verbrennung von Heizöl, aus dem Bergbau oder aus industriellen Abgasen und Abwässern stammen. Eine andere problematische Stoffklasse sind die langlebigen organischen Schadstoffe, die sogenannten POPs (persistent organic pollutants).

Langlebig und giftig – POPs

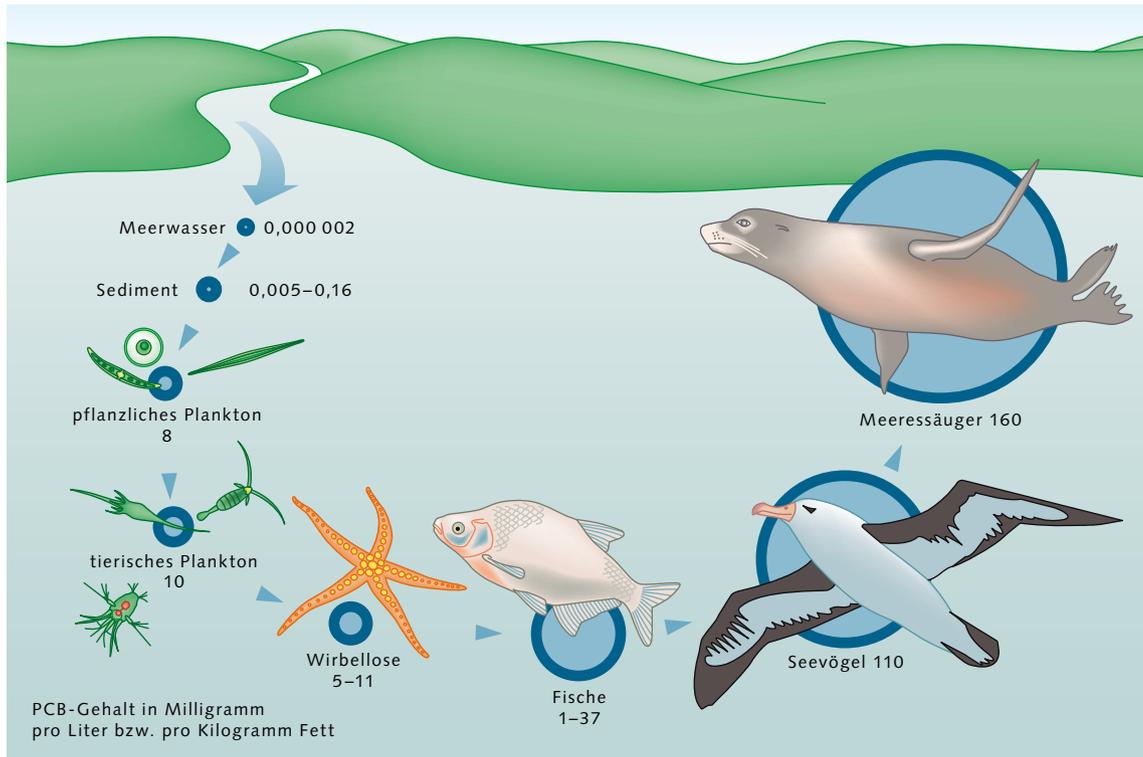
Entsprechend der Stockholm-Konvention, der sogenannten POPs-Konvention aus dem Jahre 2001, werden giftige und zugleich langlebige organische Schadstoffe als POPs bezeichnet. Dazu gehören Schädlingsbekämpfungsmittel wie DDT und Lindan, Industriechemikalien – wie zum Beispiel polychlorierte Biphenyle (PCB) – oder Nebenprodukte, die bei der industriellen Fertigung oder bei Verbrennungsprozessen entstehen, beispielsweise Dioxine. Da derartige Stoffe sehr stabil und somit nur schwer abbaubar sind, können sie über große Entfernungen transportiert werden und sich in der Umwelt anreichern.

Problematisch ist, dass POPs im Fettgewebe oder in Organen von Lebewesen gespeichert werden. Dort können sie toxische Wirkungen entfalten. Sie greifen beispielsweise in den Hormonhaushalt ein, lösen Krebs aus, verändern das Erbgut oder schwächen das Immunsystem.

Bei Meeressäugern sind verschiedene Auswirkungen von POPs untersucht worden. Bei Ringel- und Kegelrobben aus der Ostsee wurden Verengungen und Tumoren in der Gebärmutter festgestellt, die zu einer Abnahme der Geburtenrate führten. Weiterhin wurden Darmgeschwüre sowie eine Abnahme der Knochendichte und damit Veränderungen am Skelettsystem beobachtet. Bei Seehunden und Schweinswalen fand man Hinweise darauf, dass POPs das Immunsystem und das Hormonsystem schwächen. Diskutiert wird in diesem Zusammenhang auch, ob diese Schadstoffe und die Schwächung des Immunsystems einen Einfluss auf die Ausbreitung von Epidemien haben – beispielsweise das Seehundsterben in der Nordsee in den Jahren 1988 und 2002, das vermutlich durch eine epidemieartige Verbreitung des Hundestaube-Erregers ausgelöst wurde.

4.6 > Tausende von an Hundestaube verwendeten Seehunden mussten in den Jahren 1988 und 2002 an deutschen Stränden eingesammelt und entsorgt werden.





4.7 > Das Problem der Anreicherung von Giften in der marinen Nahrungskette ist lange bekannt. Wie dieser Prozess abläuft, lässt sich am Beispiel des klassischen Umweltgifts PCB (polychlorierte Biphenyle) zeigen.

Menschen nehmen POPs vor allem über die Nahrung und das Trinkwasser, aber auch über die Atmung (insbesondere durch Staubpartikel) und über die Hautoberfläche (durch direkten Kontakt mit der Chemikalie) auf. Lebewesen, die wie der Mensch oder Meeressäuger am Ende der Nahrungskette stehen, weisen in der Regel die höchsten Konzentrationen auf.

Ein neues Sorgenkind – polyfluorierte Verbindungen

Neben den oben erwähnten klassischen POPs wurden Ende der 1990er Jahre in der Umwelt weitere toxische und langlebige Verbindungen unnatürlichen Ursprungs entdeckt, die man aufgrund unzureichender technischer Analysemethoden zuvor nicht hatte nachweisen können. Dazu gehören die polyfluorierten Verbindungen (polyfluorinated compounds, PFCs). Polyfluorierte Verbindungen werden seit mehr als 50 Jahren in vielen Bereichen des täglichen Lebens genutzt. Sie werden vor allem als Fluorpolymere in der Textilindustrie, beispielsweise in der

Herstellung atmungsaktiver Membranen für Outdoor-Jacken, verwendet und in der Papierindustrie zur Produktion von schmutz-, fett- und wasserabweisenden Papieren (beispielsweise Fast-Food-Verpackungen) genutzt. Auch bei der Imprägnierung von Möbeln, Teppichen und Bekleidung sowie als Antihafbeschichtung von Kochgeschirr (beispielsweise Teflonpfannen) kommen sie zum Einsatz.

Man nimmt an, dass im vergangenen Jahrzehnt insgesamt sechs Hersteller weltweit jährlich rund 4500 Tonnen PFCs erzeugten, eine – verglichen mit anderen Chemikalien – eher geringe Menge. Dennoch ist die Substanzgruppe wegen ihrer umweltrelevanten Eigenschaften von Bedeutung, denn manche der PFCs reichern sich besonders stark in Organismen an.

Derzeit kennt man mehr als 350 verschiedene polyfluorierte Verbindungen. Der bekannteste Vertreter dieser Substanzgruppe ist PFOS (Perfluorooctansulfonat). Aus Tierversuchen mit PFOS schließen Forscher, dass beim Menschen mit ernststen Gesundheitsschäden zu rechnen ist, wenn er wiederholt PFOS aufnimmt. Betroffen könnte unter anderem die Leber sein. Darüber hinaus ist PFOS

möglicherweise krebserregend. Vermutet wird auch, dass es bei den Nachkommen zu Entwicklungsschäden führt. PFOS wurde deshalb kürzlich als erste polyfluorierte Verbindung als POP im Sinne des Stockholmer Übereinkommens eingestuft und damit in die Liste der besonders gefährlichen Chemikalien aufgenommen, die weltweit verboten werden sollen.

Vorkommen polyfluorierter Verbindungen

Polyfluorierte Verbindungen werden zwar schon seit etwa einem halben Jahrhundert industriell hergestellt. In der Umwelt lassen sie sich aber erst seit wenigen Jahren dank neuer chemisch-analytischer Methoden nachweisen. In der Natur kommen derartige polyfluorierte Verbindungen nach derzeitigem Kenntnisstand normalerweise nicht vor. Inzwischen aber lassen sie sich in Wasser, Boden, Luft und Lebewesen auf der ganzen Welt nachweisen – auch im Menschen. Zahlreiche Lebensmittel, menschliches Blut und Muttermilch sind bereits erheblich mit PFCs belastet. Vor allem die Verbreitung von PFOS ist gut untersucht. Die Substanz findet man in vergleichsweise hohen Konzentrationen weltweit in Fischen, Robben oder Seev-

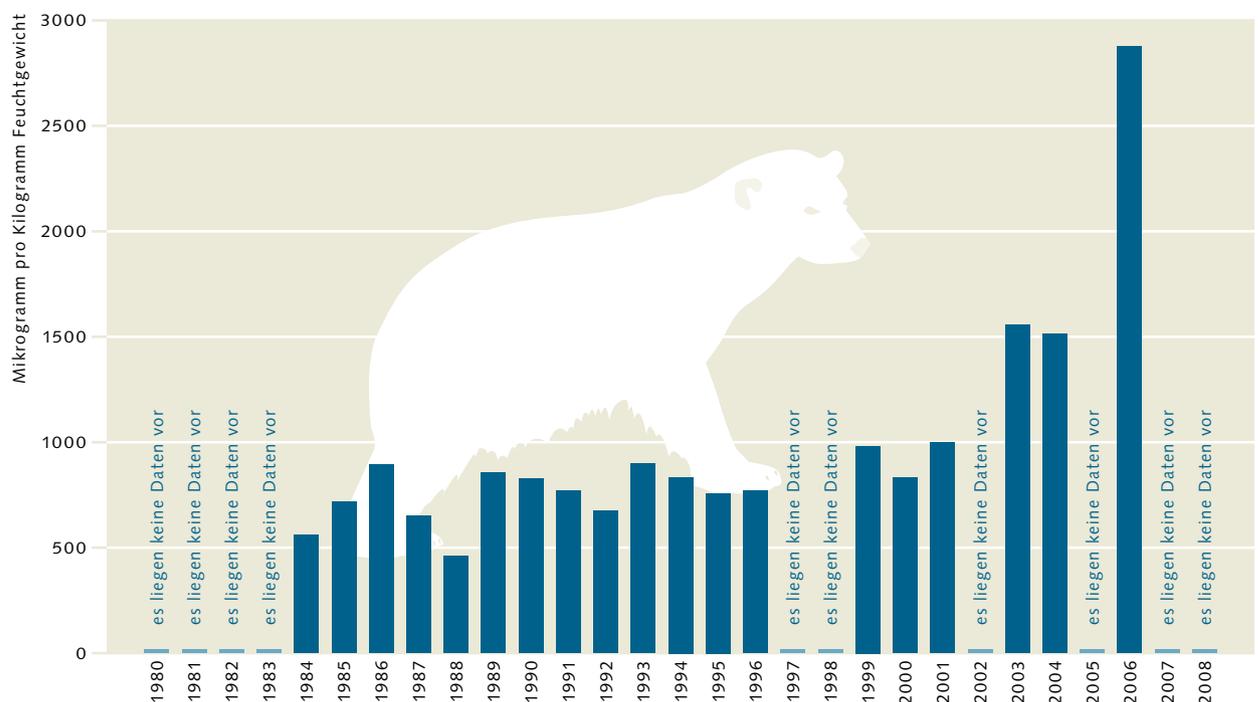
geln und vor allem in arktischen Eisbären als Endgliedern der Nahrungskette. Kanadischen und dänischen Berichten zufolge wurde in Leberproben von Eisbären aus Kanada, Alaska und Grönland in den vergangenen Jahrzehnten ein starker Anstieg der PFOS-Konzentration ermittelt.

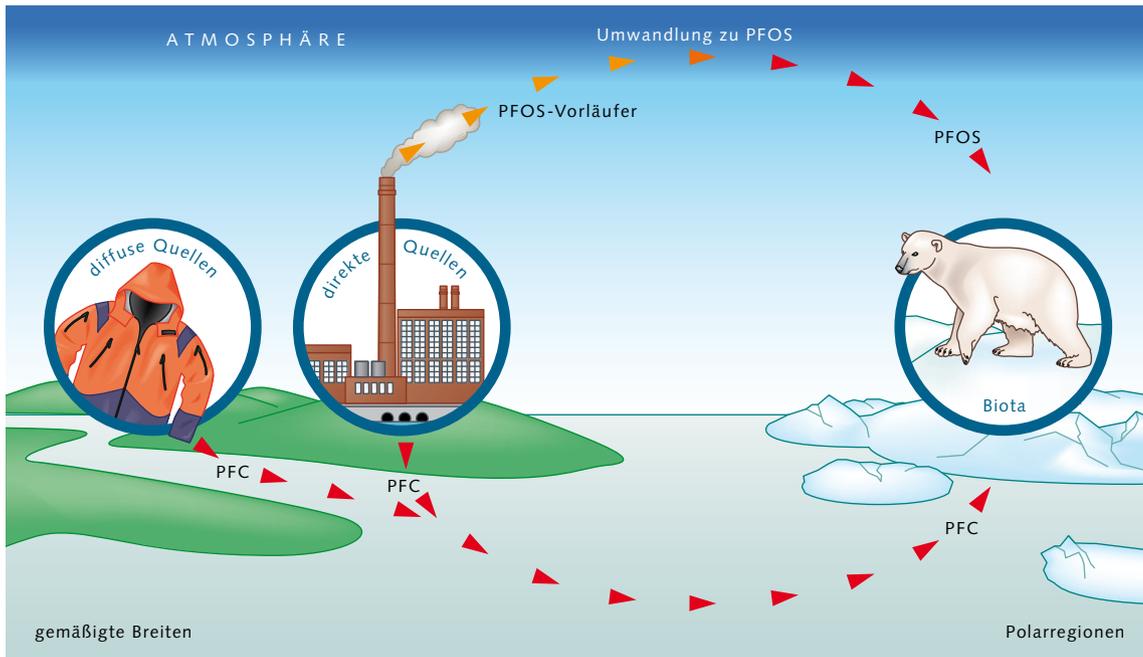
Im Vergleich zu anderen umweltrelevanten POPs, wie etwa den polychlorierten Biphenylen, weisen PFCs beachtlich hohe Werte auf. So lag die mittlere PFC-Konzentration laut schwedischen Untersuchungen an menschlichem Blut aus den Jahren 1994 bis 2000 20- bis 50-fach höher als die der polychlorierten Biphenyle und circa 300- bis 450-fach höher als die von Hexachlorbenzol, zwei klassischen organischen Schadstoffen, deren Gefährlichkeit seit Jahrzehnten bekannt ist.

Transportwege der polyfluorierten Verbindungen

Funde von PFCs und insbesondere PFOS in marinen Säugetieren, wie Robben oder Eisbären der Arktis, sowie im Blut der arktischen Bewohner, der Inuit, werfen die Frage auf, wie diese Stoffe ins Meer und sogar bis in die Arktis gelangen können. Zum einen gibt es zahlreiche diffuse Quellen – so lösen sich PFCs beim Gebrauch von den

4.8 > In den vergangenen Jahren haben die PFOS-Konzentrationen in den Lebern ostgrönländischer Eisbären deutlich zugenommen. Die Messwerte wurden aus tiefgefrorenen Leberproben gewonnen.





4.9 > PFCs können entweder in Gewässern oder in der Luft über große Entfernungen transportiert werden. So gelangen sie beispielsweise auf direktem Weg über Abwasser in die Flüsse und schließlich ins Meer. Sie können aber auch indirekt über die Atmosphäre transportiert werden. So entweichen beispielsweise flüchtige PFC-Vorläufer in die Luft, werden hier zu PFOS umgewandelt und kommen in Niederschlägen oder im Staub an anderer Stelle wieder zurück auf die Erdoberfläche.

oben erwähnten Alltagsgegenständen ab, von Teppichböden, Outdoor-Bekleidung, Pfannen oder Fast-Food-Papier. Darüber hinaus aber werden größere Mengen PFCs in Deutschland über kommunale und industrielle Kläranlagen, die diese Verbindungen nicht gezielt zurückhalten können, in die Flüsse eingetragen. Von hier aus gelangen die polyfluorierten Verbindungen in die Nordsee. Anschließend können sie mit den Hauptströmungen der Nordsee und des Atlantischen Ozeans bis in die Arktis transportiert werden, wo sie von Kleinstlebewesen im Wasser aufgenommen und über die Nahrungskette in höheren Organismen und schließlich in den Organen von Eisbären oder Menschen angereichert werden.

PFCs werden aber auch durch Luftmassenbewegungen in der Atmosphäre über weite Strecken transportiert. Zwar sind Verbindungen wie PFOS nicht flüchtig. Doch es entweichen flüchtige Vorläuferverbindungen aus den technischen Herstellungsprozessen in die Luft. In der Atmosphäre können diese chemischen Vorläufer dann durch physikalische und chemische Prozesse zu stabilen Endprodukten wie PFOS umgesetzt werden. Diese werden mit den Niederschlägen aus der Luft gewaschen und in gelöster Form oder an Staubpartikel gebunden ins Meerwasser eingetragen oder auf dem Festland oder dem Eis

abgelagert. So können PFCs große Distanzen überwinden und weit entfernt vom Ort ihrer Herstellung oder Verwendung in der Umwelt nachgewiesen werden.

Schutz vor neuen Schadstoffen

Noch vor wenigen Dekaden kannte man PFCs gar nicht. Heute sind sie über den ganzen Globus verbreitet. Sie finden sich im Wasser, in der Luft, in den Lebewesen und auch in uns Menschen. Es ist abzusehen, dass sie Generationen überdauern werden. Diese Stoffgruppe zeigt beispielhaft, dass man offensichtlich nie sämtliche Auswirkungen neuer chemischer Produkte auf die Umwelt sowie deren Spätfolgen vorhersehen kann. So wird es auch in der Zukunft in der marinen Umwelt immer wieder Stoffe geben, die man anfänglich für unschädlich hält, deren unerwünschte Einflüsse aber erst nach einiger Zeit erkennbar werden. Immerhin gibt es mittlerweile zahlreiche Bemühungen, die weitere globale Verteilung von Schadstoffen einzugrenzen. So versucht man die Gefährlichkeit von Chemikalien heute durch Risikobewertungen zu ermitteln, bevor man diese in den Verkehr bringt. Zudem gibt es Selbstverzichtserklärungen der Produzenten oder gesetzliche Regelungen. Ein Anfang ist also gemacht.

Allgegenwärtig – der Müll im Meer

> Alljährlich gelangen große Mengen Müll ins Meer. Weil vor allem Plastikreste besonders haltbar sind, nimmt die Masse ständig zu – mit oft tödlichen Folgen für eine Vielzahl von Meerestieren. Eine Gefahr geht möglicherweise auch von den mikroskopisch kleinen Abbauprodukten aus, die man erst in jüngster Zeit näher untersucht. An einer wirkungsvollen Strategie zur Eindämmung der Müllflut aber fehlt es bislang, obwohl das Problem nicht neu ist.

Die Herkunft des Abfalls

Wer nach einem Sturm einen Strandspaziergang macht, bekommt eine Ahnung davon, wie viel Müll in den Ozeanen treibt: Plastikflaschen, Fischkisten und Glühbirnen, Badelatschen, Fetzen von Fischernetzen und Bretter liegen verstreut im Sand. Der Anblick ist weltweit der gleiche, denn die Meere sind voll mit Abfällen. Die Mengen sind beträchtlich. So schätzte die National Academy of Sciences in den USA den jährlichen Eintrag in die Ozeane bereits 1997 auf rund 6,4 Millionen Tonnen. Die tatsächliche Menge des durch die Meere vagabundierenden Mülls ist aber schwer abzuschätzen, weil er ständig in Bewegung und daher kaum fassbar ist.

Erschwerend kommt hinzu, dass der Abfall auf vielen Wegen ins Meer gelangt. Der größte Teil stammt vom Land. Der Müll wird mit Abwässern über die Flüsse ins Meer gespült oder von Müllkippen an der Küste ins Wasser geweht. Vielerorts lassen Badegäste ihre Abfälle achtlos am Strand liegen.

Auch die Schifffahrt trägt zur Vermüllung der Meere bei. Dazu zählen Abfälle von Handels- und Sportschiffen, die über Bord geworfen werden oder versehentlich ins Wasser fallen, und vor allem auch verloren gegangene Fischernetze. Da der Müll zu einem großen Teil aus Plastik besteht, das im Wasser nur sehr langsam abgebaut wird und häufig Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte überdauert, wächst das Müllvolumen stetig.

Wissenschaftliche Untersuchungen haben ergeben, dass die Müllmenge in verschiedenen Meeresgebieten unterschiedlich groß ist. In vielen Bereichen zählten die Forscher zwischen 0 und 10 Plastikteilen pro Quadratkilometer. Im Ärmelkanal waren es zwischen 10 und 100 Teilen. In den Küstengewässern Indonesiens schließlich wur-

den je Quadratmeter 4 Müllteile gemessen – ein Vielfaches des Durchschnittswerts.

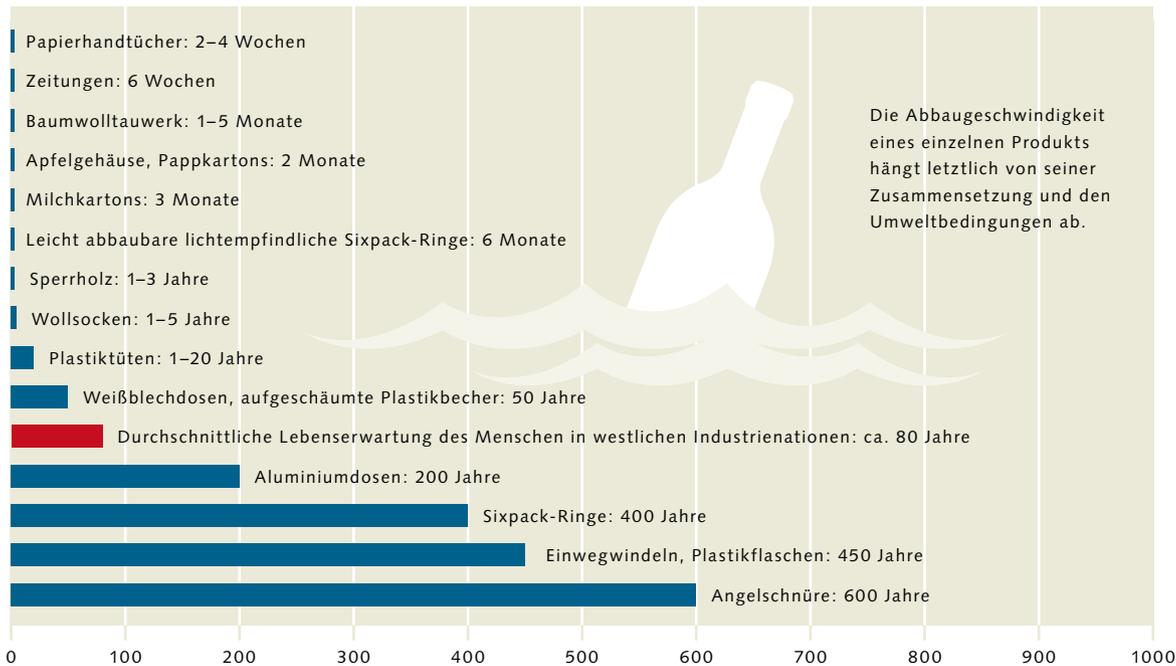
Doch nicht allein die Küsten sind betroffen, denn, getrieben durch Wind und Meeresströmungen, wandert der ausgesprochen langlebige Müll sehr weit. So findet man Müll heute selbst an entlegenen Stränden und auf unbewohnten Inseln.

1997 entdeckten Forscher, dass sich der treibende Müll mitten im Ozean sammelt – beispielsweise im Nordpazifik. Permanent rotieren dort gigantische Wassermengen in mehreren Hundert Kilometern breiten Wirbeln, die durch gleichmäßige Winde angetrieben werden. Hier endet die Weltreise des Plastikmülls. Der Abfall kreist ununterbrochen. Ständig kommt neuer Müll hinzu. Great Pacific Garbage Patch (Großer pazifischer Müllfleck) nennen Umweltforscher den Wirbel inzwischen. Bedenkt man, dass sich der Müll auf offener See, mehrere Tausend Kilometer vom Festland entfernt befindet, ist die Müllmenge erschreckend groß: Auf einem Quadratkilometer konnten Wissenschaftler fast eine Million Plastikteile nachweisen. Allerdings handelte es sich dabei meist um kleine Plastikbruchstücke, die mit feinmaschigen Netzen aus dem Wasser gefischt worden waren. Im Ärmelkanal und bei vielen anderen Studien hatten Forscher die Müllteile hingegen im Vorbeifahren vom Schiff aus gezählt.

Schon die treibenden Meeresmüllmengen sind beträchtlich. Rund 70 Prozent der Abfälle aber, so schätzt man, sinken früher oder später zu Boden. Zu den besonders betroffenen Gebieten zählen die Küstengewässer dicht besiedelter oder touristisch stark genutzter Regionen wie etwa Europa, die USA, die Karibik oder Indonesien. In europäischen Gewässern wurden auf dem Meeresboden pro Quadratkilometer bis zu 100 000 mit dem bloßen Auge sichtbare Müllteile gezählt. In Indonesien waren es sogar

Die Top Ten der weltweit häufigsten Müllteile im Meer:

- 1 Zigaretten/
Zigarettenfilter
- 2 Tüten (Plastik)
- 3 Lebensmittelverpackungen
- 4 Deckel/
Verschlüsse
- 5 Getränkeflaschen (Plastik)
- 6 Tassen, Teller, Gabeln, Messer, Löffel (Plastik)
- 7 Glasflaschen
- 8 Getränkedosen
- 9 Strohhalme, Rührstäbchen (Plastik)
- 10 Papiertüten



4.10 > Die Müllmenge nimmt in den Ozeanen beständig zu. Viele der Abfälle bauen sich nur langsam ab. Besonders haltbar sind Kunststoffflaschen oder Fischleinen aus Nylon. Zwar zerbrechen viele Plastikteile in kleinere Stückchen. Bis diese ganz verschwunden sind, vergehen aber Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte (Schätzwerte).

bis zu 690 000 Teile pro Quadratkilometer. In vielen Fällen ist der Müll harmlos. Immer wieder aber sterben Tiere daran, die am Meeresgrund nach Nahrung jagen – Robben oder Otter zum Beispiel, die sich von Fischen, Krebsen oder Seeigeln ernähren.

Winzig klein und doch gefürchtet – Mikroplastik

Seit einigen Jahren konzentrieren sich Wissenschaftler zunehmend auf das, was vom Plastikmüll übrig bleibt, wenn er Wellen, Salzwasser und Sonnenstrahlung lange ausgesetzt war. Die Kunststoffe zerfallen in winzig kleine Plastikteilchen, das sogenannte Mikroplastik. Mikroplastik lässt sich heute weltweit vielerorts im Wasser, in Sänden und im Sediment am Meeresboden nachweisen. Die winzigen Partikel sind mit 20 bis 50 Mikrometer kleiner als der Durchmesser eines Haars. Meeresorganismen wie etwa Muscheln filtern diese Partikel aus dem Wasser. In Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass sich das Mikroplastik nicht nur im Magen der Schalentiere sammelt, sondern im Gewebe und sogar in der Körperflüssigkeit anreichert. Noch ist unklar, welche Konsequenzen das hat. Da viele Kunststoffe giftige Zusätze wie Weichma-

cher, Lösemittel oder andere chemische Substanzen enthalten, wird befürchtet, dass Mikroplastik zur Vergiftung von Meereslebewesen und über die Nahrungskette möglicherweise auch des Menschen führen könnte.

Die stillen Fänger – Geisternetze

Eine besondere Bedrohung für Meereslebewesen sind sogenannte Geisternetze. Dabei handelt es sich um Netze, die beim Fischen abgerissen und verloren gegangen sind, oder um beschädigte Altnetze, die absichtlich über Bord geworfen wurden. Solche Netze können noch für Jahre im Meer treiben. Sie sind eine Gefahr für Fische, Schildkröten, Delfine und andere Organismen, die darin hängen bleiben und verenden. In dem schwebenden Wirrwarr verfangen sich weitere Netze, Fangleinen oder andere Müllteile, sodass die Geisternetze mit der Zeit zu Flößen von vielen Hundert Metern Durchmesser anwachsen können. Manche Netze sinken auf den Meeresboden ab und können dort beträchtlichen Schaden anrichten. Getrieben von der Strömung, können sie Korallen abreißen und andere Lebensräume, wie zum Beispiel Wälder aus Meeresschwämmen, schädigen.

Die Folgen der Vermüllung für den Menschen

Lange hielt man den Müll in den Meeren für ein rein ästhetisches Problem. Allein die Seebäder bekämpften den Müll, indem sie regelmäßig die Abfälle vom Strand räumten. Doch in dem Maße, wie die Müllmassen wuchsen, nahmen die Probleme zu. Wie die Menge des Mülls selbst lassen sich auch seine Folgekosten nur schwer quantifizieren. In einer Studie aber konnten britische Forscher zeigen, dass die Konsequenzen der Vermüllung für den Menschen und insbesondere die Küstengemeinden durchaus ernst sind. Zu den wichtigsten Folgen zählen:

- Gesundheitsrisiken für den Menschen: Verletzungsgefahr durch Glasscherben, angespülte Spritzen oder Chemikalien;
- steigende Kosten für die Säuberung von Stränden, Häfen oder Meeresabschnitten und Folgekosten durch Bereitstellen von Installationen für die Entsorgung;
- abschreckende Wirkung auf Touristen, insbesondere wenn Küstenabschnitte als verschmutzt gebrandmarkt sind – die Folge sind Einbußen im Fremdenverkehrsgeschäft;
- Schäden an Schiffen: zerbeulte Rümpfe, abgerissene Anker, Schiffsschrauben, die sich in Netzresten oder Leinen verfangen;
- Schäden für die Fischerei: zerrissene Netze, verschmutzte Reusen, verschmutzte Fänge; die Menge des gefange-

nen Fisches kann durch mit Müll verstopfte Netze abnehmen;

- Schäden für die Landwirtschaft entlang der Küsten: verschmutzte Felder, Raine und Zäune durch zahlreiche herangewehte Plastik- und Müllteile aus dem Meer; Vergiftung von Vieh durch Fressen von Plastikteilen, Tüten.

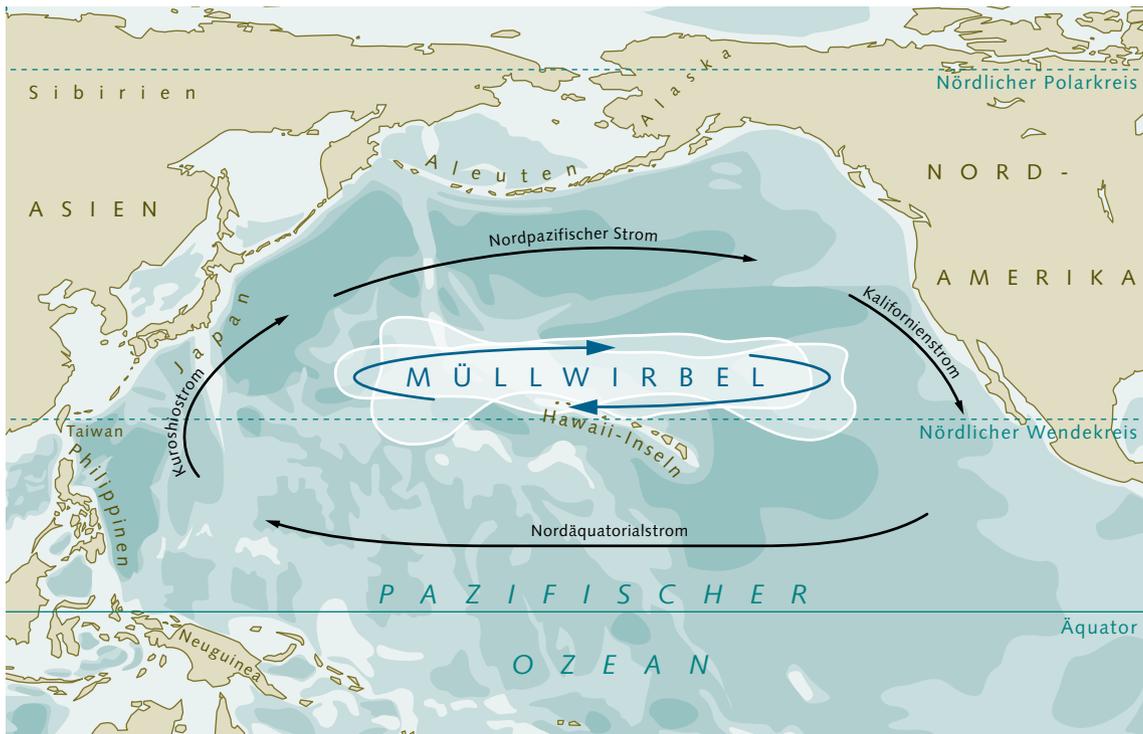
Die Folgen der Vermüllung für die Tiere

Geradezu katastrophal wirkt sich die große Menge an Müll auf Meerestiere aus. Seevögel, wie etwa Albatrosse oder Eissturmvögel, picken Plastikteile von der Wasseroberfläche, verschlucken diese und verfüttern sie oftmals sogar an ihre Jungen. Nicht selten verhungern die Tiere, weil sich ihr Magen statt mit Nahrung mit Müll füllt. Untersuchungen des Mageninhalts von Seevögeln haben gezeigt, dass 111 von 312 Seevogelarten Plastikteile zu sich nehmen. Zum Teil hatten 80 Prozent aller Vögel einer Art Abfälle geschluckt.

In einer anderen Studie wurden 47 Nordseeschweinswale untersucht. Zwei Individuen hatten Nylonfäden und Plastikteile verschluckt. In anderen Fällen kann der Abfall sogar zur tödlichen Falle werden. So verheddern sich Delfine, Schildkröten, Seehunde oder Seekühe in Netzresten oder Schnüren. Manche Tiere ertrinken. Andere tragen Verkrüppelungen davon, weil Plastiknetze und -fäden oder

4.11 > Eine Suppenschildkröte hat sich im Komoren-Archipel im Indischen Ozean in einer Plastiktüte verfangen. Zum Verhängnis wird diesen Tieren der Abfall, wenn sie sich darin so verheddern, dass sie nicht mehr zum Atmen auftauchen können.





4.12 > Im Great Pacific Garbage Patch zwischen Hawaii und Nordamerika kreisen Unmengen von Müll. Viele Plastikteile trieben Tausende von Kilometern über das Meer, ehe sie vom Wasserwirbel eingefangen wurden.

Gummiringe das Wachstum der Gliedmaßen oder des Körpers behindern.

Und noch eine Gefahr geht vom Plastikmüll aus: Da die unverwüstlichen Abfälle Tausende von Seemeilen über das Meer treiben und viele Jahre alt werden können, stellen sie für viele Meerestiere ideale Flöße dar. Fremde Arten können auf ihnen ganze Ozeane überqueren und Distanzen überbrücken, die sonst unüberwindlich wären. Der Plastikmüll kann damit zur Verschleppung von Arten in neue Lebensräume beitragen. In einzelnen Fällen kann dadurch das Gleichgewicht eines Habitats aus den Fugen geraten (Kapitel 5).

Einsicht ist der erste Weg zur Besserung

Nur langsam setzt sich die Einsicht durch, dass der Meeresmüll ein ernst zu nehmendes Problem ist. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) bemüht sich daher, durch intensive Öffentlichkeitsarbeit auf die gefährliche Situation aufmerksam zu machen. Das Programm ist vor allen Dingen bemüht, die Lage auf regionaler Ebene in Zusam-

menarbeit mit Nichtregierungsorganisationen und staatlichen Behörden zu verbessern. Dazu gehören Praktiken und Regelungen, die in Westeuropa zum Teil bereits selbstverständlich sind: Systeme für die Mülltrennung und das Recycling sowie Flaschenpfand. So zeigen diverse Müllfassungen deutlich, dass der Abfall in der Nordsee weniger vom Land als vielmehr vom Schiffsverkehr stammt. In vielen Staaten ist die Situation anders. Hier wird Müll oftmals unachtsam in die Umwelt entsorgt und früher oder später ins Meer gespült. Der Schiffsverkehr spielt dort eine eher kleine Rolle. Daher weist das UNEP nachdrücklich auf die Bedeutung effizienter Müllmanagementsysteme hin.

Darüber hinaus unterstützt das UNEP medienwirksame Müllsammelaktionen, wie etwa das jährliche International Coastal Cleanup (ICC), die Internationale Küstensäuberung. Weltweit sammeln Ehrenamtliche und vor allem Kinder und Jugendliche den Müll an Stränden und Ufern auf. Das Ziel ist, vor allem bei jungen Menschen ein Bewusstsein für das globale Meeresmüllproblem zu schaffen. Allein im Jahr 2009 beteiligten sich am ICC immerhin rund 500 000 Menschen aus knapp 100 Nationen. Bevor



4.13 > Vom Müll im Meer sind auch die Laysanalbatrosse im Pazifik betroffen, die beim Fischen versehentlich Plastikteile verschlucken. Fein säuberlich hat der Fotograf angespülte Abfälle arrangiert. Derartige Gegenstände findet man typischerweise im Magen der Albatrosse. Viele Vögel verenden daran.

man den gesammelten Abfall an Land entsorgt, wird jedes Einzelteil protokolliert. Zwar werden die Daten von Laien erfasst und sind damit durchaus fehlerbehaftet. Dennoch liefert der International Coastal Cleanup alljährlich einen recht detaillierten Eindruck des Müllstatus weltweit.

Überhaupt ist die Erfassung von Abfällen im Meer, das regelmäßige Monitoring, ein wichtiges Werkzeug, um abschätzen zu können, wie sich die Situation entwickelt. In verschiedenen Regionen der Welt werden die Müllfunde an der Küste bereits seit vielen Jahren von geschulten Personen protokolliert. Für den Bereich des Nordostatlantiks etwa gibt es bereits seit zehn Jahren einheitliche Erfassungsstandards, die die Mitgliedsländer der Oslo-Paris-Konvention (OSPAR) zum Schutz der Meeresumwelt vereinbart haben. Demnach wird drei- bis viermal jährlich an rund 50 verschiedenen Orten am Nordostatlantik ein je 100 Meter breiter Küstenstreifen abgesucht. Die Erkenntnis, dass der Müll in der Nordsee vor allem aus der Schifffahrt stammt, ist diesem Monitoring zu verdanken.

Vereinbarungen mit geringer Schlagkraft

Seit einigen Jahren versucht man die Müllflut mit internationalen Vereinbarungen einzudämmen. Dazu zählt unter anderem das Internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung (MARPOL 73/78). In Anhang V schreibt es der Schifffahrt seit 1988 vor, welche Abfälle an Bord gesammelt werden müssen. Laut MARPOL dürfen beispielsweise Speisereste nur außerhalb der 12-Seemeilen-Zone entsorgt werden. Plastikmüll darf nicht über Bord geworfen werden. Die EU-Richtlinie über Hafenauffangeinrichtungen für Schiffsabfälle und Ladungsrückstände wiederum schreibt Schiffen vor, Abfälle im Hafen zu entsorgen. Häfen sind verpflichtet, dafür adäquate Müllsammelstellen einzurichten. Die Schiffseigner müssen sich über eine Gebühr an den Kosten beteiligen.

Entsorgt ein Schiffsführer die Abfälle nicht, können die Hafenbehörden den nächsten Zielhafen des Schiffs informieren, wo dann eine Überprüfung des Schiffs angeordnet werden kann. Kritiker bemängeln, dass die Überprüfung der Schiffe und die Kommunikation zwischen den Häfen nicht ausreichend ist. Die Tatsache, dass die Müllmengen an der Nordseeküste bislang nicht abgenommen haben, spricht ebenfalls dafür, dass die internationalen Vereinba-

rungen nicht schlagkräftig genug sind. Anhang V des MARPOL-Übereinkommens wird daher überarbeitet. Gegen die Müllmengen, die von Land ins Meer gelangen, können die Vereinbarungen ohnehin nichts ausrichten. Besserung erhofft man sich von der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, mit der die EU den Meeresumweltschutz bis zum Jahr 2020 verbessern will. Neben Aspekten wie der Meeresverschmutzung durch Schadstoffe oder der Lärmbelastung von Meeressäugern behandelt die Richtlinie auch das Thema Müll. Bis zum Jahr 2012 wird die momentane Situation analysiert, bis 2015 soll ein Maßnahmenkatalog verabschiedet werden. 2020 sollen dann alle Maßnahmen umgesetzt sein.

Der künftige Kampf gegen den Müll

Experten sind sich darin einig, dass man die Vermüllung der Meere nur stoppen kann, wenn man den Eintrag von Land eindämmt. Im Sinne des UNEP werden viele Staaten dafür wirksame Müllvermeidungs- und Müllmanagementpläne entwickeln müssen. Angesichts der gigantischen Müllmengen erscheint das heute fast aussichtslos. Vielversprechend ist daher der Ansatz der Umweltbildung und -erziehung. Die Popularität des International Coastal Cleanup lässt hoffen, dass sich weltweit die Einsicht durchsetzt, Müll vermeiden zu müssen.

Was das Problem der Geisternetze betrifft, mahnt das UNEP stärkere Kontrollen an. Fischer sollen demnach überprüft werden und über den Verbleib ihrer Netze Buch führen müssen. Darüber hinaus arbeitet man an der Entwicklung von akustisch reflektierenden Netzen, die beispielsweise von Delfinen besser wahrgenommen werden können. Erfreulich ist auch das Konzept Fishing for Litter, das sich derzeit in Schottland und Skandinavien etabliert. Fischer und Hafenbehörden haben sich zusammengetan, um Müll, der beim Fischfang in den Netzen hängen bleibt, an Land zu entsorgen. Statt den Müll ins Meer zurückzuwerfen, wird er an Bord gesammelt und schließlich im Hafen abgeliefert. Inzwischen arbeitet man an Anlagen, mit denen Netzreste recycelt werden sollen. Damit wird deutlich, dass sich das globale Müllproblem vermutlich nur durch viele Einzelmaßnahmen lösen lässt. Ohne ein weltweites Engagement der Menschen wird das freilich nicht möglich sein.

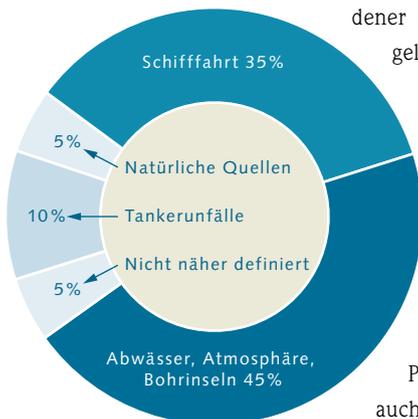
Die Verschmutzung der Meereslebensräume durch Öl

> Die Verschmutzung der Ozeane durch Öl ist eine der auffälligsten Formen von Umweltschäden im Meer. Öl gelangt nicht allein durch spektakuläre Unfälle von Tankern oder auf Bohrplattformen ins Wasser, sondern vor allem auch aus diffusen Quellen – aus Leckagen bei der Ölförderung, durch illegale Schiffstankreinigungen auf See oder über die Flüsse. Mit Maßnahmen wie der Ausweisung von Meeresschutzgebieten, verstärkten Kontrollen oder dem Einsatz von Doppelhülentankern versucht man heute, die Ölverschmutzung einzudämmen.

Wie das Öl ins Meer gelangt

Von der Verschmutzung der Meere durch Öl nimmt die Öffentlichkeit meist dann Notiz, wenn ein Öltanker in schwerer See zerbricht oder eine Plattform havariert, wie im Frühjahr 2010 die „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko. In solchen Fällen treiben oftmals Ölteppiche auf die Küsten zu und Meeresvögel oder Seehunde verenden. Spektakuläre Tankerunfälle aber tragen nur etwa zu 10 Prozent zur globalen Ölverschmutzung der Meere bei. Das meiste Öl gelangt auf vielen, eher verborgenen Wegen ins Wasser. Entsprechend ungenau sind die Schätzungen der weltweiten Einträge. Rund 5 Prozent stammen aus natürlichen Quellen, circa 35 Prozent aus dem laufenden Betrieb der Tank- und übrigen Schifffahrt inklusive illegaler Einleitungen und Tankreinigungen. Darüber hinaus werden zu den Öleinträgen auch die flüchtigen Ölbestandteile gezählt, die aus Verbrennungsprozessen verschiedener Art über die Atmosphäre ins Wasser gelangen. Dieser atmosphärische Anteil bringt es zusammen mit den Einträgen aus kommunalen und industriellen Abwässern sowie aus Bohrinseln auf immerhin 45 Prozent. Weitere 5 Prozent stammen aus nicht näher definierten Quellen.

4.14 > Öl gelangt auf verschiedenen Wegen ins Meer. Gut ein Drittel stammt allein aus dem regulären Schifffahrtsbetrieb – ohne dass sich Unfälle ereignen.



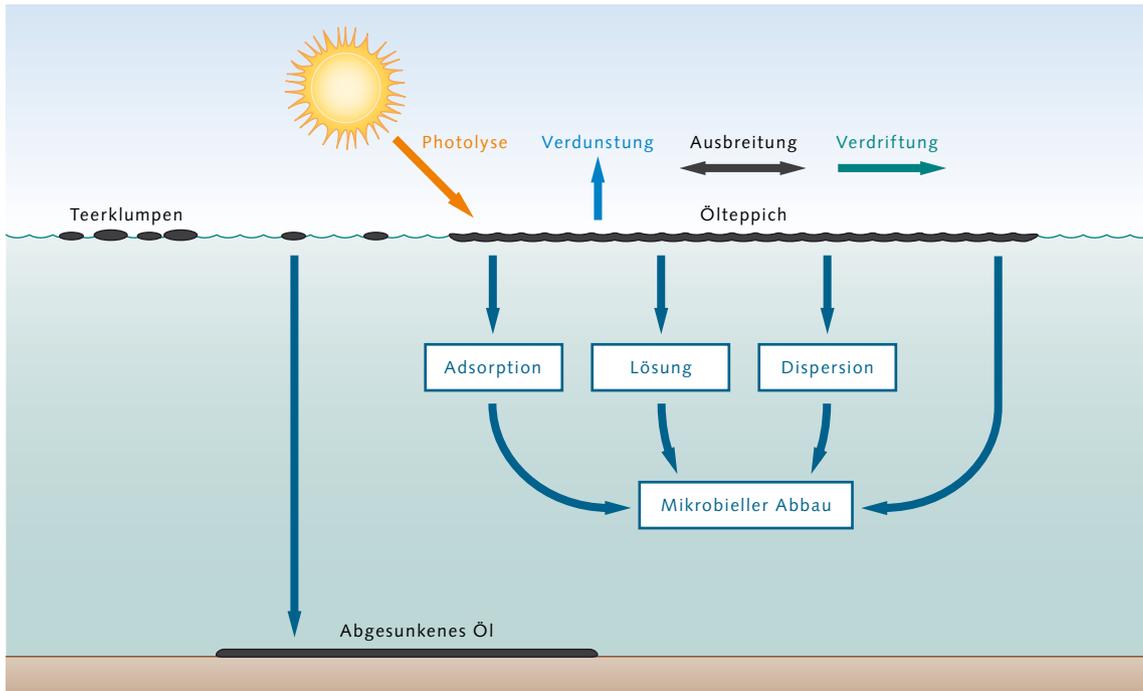
Abgesehen davon, dass heute zunehmend pflanzliche Öle wie etwa Palmöl produziert werden und damit auch in die Umwelt gelangen, handelt es sich bei Ölverschmutzungen zum allergrößten Teil um Öle aus fossilen Quellen. Diese sind in Jahrmillionen aus Ablagerungen mikroskopisch kleiner Meeresorganismen, vor allem Kieselalgen, entstanden (Kapitel 7).

Dieses Rohöl besteht aus etwa 10 000 unterschiedlichen Einzelsubstanzen. Davon machen Kohlenwasserstoffe mit mehr als 95 Prozent den Hauptbestandteil aus, wobei die genaue Zusammensetzung von Entstehungsort zu Entstehungsort stark schwanken kann. Daneben enthält Rohöl Schwermetalle und Stickstoffverbindungen.

Wie stark Mineralöle und ihre Inhaltsstoffe die verschiedenen Meereslebensräume mit ihren Pflanzen und Tieren in Mitleidenschaft ziehen, ist von Fall zu Fall sehr verschieden. Große Ölunfälle stellen die massivste Störung dar, wobei die Auswirkungen meist regional begrenzt sind. Seit der Havarie des Tankers „Torrey Canyon“ im Jahr 1967, der mit rund 115 000 Tonnen Öl auf ein Riff vor der südenspanischen Küste auflief und damit die erste große Ölpest verursachte, hat es viele Feldstudien gegeben, die mittlerweile eine recht klare Abschätzung der Folgen unterschiedlicher Öle auf Organismen und Lebensräume zulassen. Doch kein Ölunfall gleicht dem anderen bis ins Detail, denn welche Folgen ein solcher hat, hängt von verschiedenen Bedingungen ab.

Entscheidend ist beispielsweise, wie schnell das Öl abgebaut wird oder von der Meeresoberfläche in die Tiefe absinkt, wo es vergleichsweise wenig Schaden anrichten kann. Dieser Abbau wird durch physikalische, chemische und biologische Prozesse beeinflusst. Je nach Umgebungsbedingungen, zum Beispiel Temperatur, Nährstoffgehalt im Wasser, Wellenschlag, dauert der bakterielle Abbau der Erdölkohlenwasserstoffe unterschiedlich lang. In den ersten Stunden, mitunter aber auch Wochen wird das Öl vor allem durch folgende chemische und physikalische Vorgänge verändert:

- Verdunstung von flüchtigen Ölbestandteilen;
- Ausbreitung des ausgelaufenen Öls in Form von großen Ölteppichen, die auf der Wasseroberfläche treiben;



4.15 > Das Öl wird im Meer auf ganz unterschiedliche Weise verändert und abgebaut. Meist bildet es direkt nach einem Unfall breite Teppiche, die auf dem Wasser schwimmen. Während ein Teil des Öls verdunstet oder absinkt, werden andere Ölbestandteile von Bakterien verarbeitet oder durch die Sonnenstrahlung zerstört. Schließlich verklumpt das Öl, was den bakteriellen Abbau erschwert.

- Bildung von Dispersionen (kleine Öltröpfchen in der Wassersäule) und Emulsionen (größere Öltröpfchen im Wasser oder Wasser in Öl);
- Photooxidation (molekulare Veränderung von Ölbestandteilen durch Lichteinstrahlung) und Lösung.

Prozesse wie die Sedimentation und der Abbau durch Bakterien hingegen können sich über Monate oder sogar Jahre hinziehen. Unter günstigen Bedingungen sind sie in manchen Fällen aber bereits innerhalb weniger Tage abgeschlossen. Der Grund für diese Diskrepanz: Zum einen werden die verschiedenen im Öl enthaltenen Stoffgruppen unterschiedlich schnell biologisch abgebaut. Die Abbaugeschwindigkeit hängt vor allem von der molekularen Struktur der Ölbestandteile ab. Je komplexer die Kohlenwasserstoffmoleküle sind, desto länger dauert der Abbau durch Mikroorganismen. Zum anderen wird die Abbaugeschwindigkeit der verschiedenen Kohlenwasserstoffe durch die folgenden Faktoren erhöht:

- hohe Temperaturen (fördert Bakterienaktivität);
- große Oberfläche des Ölteppichs (Vergrößerung gegebenenfalls durch Einsatz von Dispersionsmitteln, sogenannten Dispergatoren, oberflächenaktiven Substanzen, die eine Bildung von Dispersionen begünstigen);

- gute Sauerstoffversorgung der Bakterien;
- gute Nährstoffversorgung der Bakterien;
- geringe Menge an Fressfeinden, die die Zahl der Bakterien reduzieren würden.

Einige der oben genannten Prozesse beeinflussen das Ausmaß der Ölschäden ganz erheblich. So führt zum Beispiel die Bildung von Wasser-in-Öl-Emulsionen zur Entstehung des „chocolate mousse“. Diese Erscheinungsform des Öls kann das bis zu Vierfache des ursprünglichen Volumens einnehmen, macht eine Bekämpfung durch chemische Dispergatoren unmöglich und erschwert das Abpumpen von der Wasseroberfläche.

Wie das Öl die Lebensräume schädigt

Da sich im Fall eines großen Ölunfalls meist nicht die gesamte Küste schützen lässt, müssen die Behörden bei der Ölbekämpfung Prioritäten setzen. Besonders schützenswert sind natürlich bestehende offizielle Schutzgebiete wie Nationalparks oder empfindliche Meeresgebiete. Bei der Bekämpfung der Ölverschmutzung haben sie in jedem Fall eine hohe Priorität. Meist sind aber selbst die Schutzgebiete zu groß, um sie in Gänze zu schützen. Hier

können sogenannte Sensitivitätsabstufungen helfen, die beschreiben, wie empfindlich die verschiedenen Küstenabschnitte gegenüber Ölverschmutzungen sind. In Ausnahmefällen ist es sogar möglich, „Opfergebiete“ zu definieren – im Sinne des Naturschutzes weniger wichtige Bereiche, die gar nicht geschützt werden.

Bei diesen Sensitivitätsabstufungen wird beispielsweise berücksichtigt, ob es sich um „energiereiche“ Küstenformationen wie etwa Fels- oder Sandküsten handelt, die direkt von der Brandung umspült werden, oder um vergleichsweise ruhige, „energiearme“ Gebiete, wie zum Beispiel das Wattenmeer, die durch Sandbänke oder vorgelagerte Inseln geschützt sind. Natürlich können auch innerhalb der hier beschriebenen großen Lebensräume weitere detaillierte Sensitivitätsabstufungen für die gezielte Ölbekämpfung vorgenommen werden.

EXPONIERTE FELS- UND SANDKÜSTEN: Als vergleichsweise wenig empfindlich werden exponierte Fels- und Sandküsten eingestuft, da sie durch Wellenschlag recht schnell von angeschwemmtem Öl gereinigt werden. Dennoch können schwere Ölunfälle die Zusammensetzung der Artengemeinschaften in diesen Lebensräumen für längere Zeit verändern. In solchen Fällen können die Bestände ehemals dominierender Arten wie zum Beispiel Krebs- und Weichtiere abnehmen. In Felsspalten, grobem Kies und in Muschelbänken kann sich das Öl durchaus mehrere Jahre lang halten.

SANDSTRÄNDE: Im Fall der Sandstrände ist die Situation anders. Wie stark das Öl in den Boden eindringt und wie lange es dort verbleibt, hängt vor allem von der Gestalt des Strandes ab: Ein weitläufiger Strand mit wenig Brandung und verzweigten Prielsystemen beispielsweise ist wesentlich anfälliger als ein steiler, gleichförmiger Strand. Grobkörniges Sediment erleichtert das Eindringen des Öls, erschwert die Reinigung und erhöht die Gefahr von Folgeschäden durch wieder freikommendes Öl. Als besonders empfindlich werden Strandgebiete eingestuft, die von gefährdeten Arten wie etwa Schildkröten als Lebens- oder Reproduktionsraum genutzt werden.

KORALLENRIFFE: Auch Korallenbestände reagieren offenbar empfindlich auf Ölverschmutzungen. Verschiedene Untersuchungen machen deutlich, dass sich geschädigte Korallenbestände nur langsam regenerieren. Ölverschmutzungen können zudem ganze Lebensgemein-

schaften verändern. So können sich bei Ölverschmutzungen beispielsweise wenig empfindliche Algenarten ansiedeln, wo zuvor Korallen lebten. Kaum untersucht ist bisher, wie sich Ölunfälle auf die Beziehungen zwischen Korallen und den vielen mit ihnen assoziierten Arten auswirken. Die enge Verzahnung zahlreicher spezialisierter Arten und die hohe Bedeutung von Symbiosen innerhalb solcher Ökosysteme lassen nach schweren Ölunfällen weitreichende Langzeitfolgen erwarten.

MANGROVEN: Mangroven zählen zu den Lebensräumen, die besonders empfindlich auf Ölverschmutzungen reagieren. Dort kann ein Ölunfall vor allem Bäume sowie die auf ihnen und im Sediment siedelnden empfindlichen Tiere stark schädigen – zum einen durch giftige Kohlenwasserstoffe, zum anderen durch die Abdeckung mit Öl und das Abschneiden von der Luft- und Frischwasserzufuhr. Die Regeneration der geschädigten Pflanzen- und Tierbestände ist ein langwieriger Prozess. Da in den Mangroven die schädlichen Kohlenwasserstoffe nur langsam aus dem Sediment freigesetzt werden, wird die Erholung des Lebensraums noch zusätzlich verzögert.

WEICHBÖDEN UND PLATEN: Als besonders empfindlich oder hoch sensitiv werden auch Küstenbereiche mit Weichböden und Platen (Sandbänken) wie etwa das Wattenmeer an der Nordseeküste eingestuft. Die in hoher Dichte auf und in dem Sediment lebenden Organismen dienen Fischen und Vögeln als Nahrungsgrundlage. Zwar dringt meist nur wenig Öl in die oft wassergesättigten feinen Poren schllickiger Böden ein. Diese sind aber in der Regel dicht von grabenden Tieren besiedelt, durch deren Gänge das Öl tiefer in den Boden sinkt. Andererseits trägt die als Bioturbation bezeichnete grabende Tätigkeit der Bodenorganismen zum Ölabbau bei. Das Sediment wird umgewälzt. Tiefere Schichten werden belüftet und verölte Sedimente an die Oberfläche befördert. Dank der guten Sauerstoffversorgung wird das Öl dort schneller durch Bakterien abgebaut. Werden die Bodenlebewesen jedoch vom Öl getötet, stoppt die Bioturbation. Damit verbleibt das Öl länger im Boden und beeinträchtigt den Lebensraum langfristig.

SALZWIESEN: Wie sich Öl auf die wirbellose Fauna von Salzwiesen wie etwa Insekten oder Würmer auswirkt, wurde bisher kaum untersucht. Die Vegetation allerdings kann durch Verölungen über lange Zeit geschädigt wer-



4.16 > Mit einer Kette aus aufblasbaren Schwimmern versucht ein Spezialschiff Rohöl einzufangen, das der Öltanker „Sea Empress“ verloren hat, nachdem er 1996 vor der Küste von Wales auf Grund gelaufen war. Bei rauer See ist der Einsatz solcher Ölskimmer allerdings oft wirkungslos.

Verklebt und vergiftet – die Konsequenzen für Pflanzen und Tiere

Die wohl bekannteste durch Öl hervorgerufene Schädigung von Lebewesen ist die Verschmutzung des Gefieders von Wasservögeln. Die Verunreinigung führt dazu, dass dessen lebenswichtige Funktionen, Wasserabweisung und Wärmeisolierung, nicht mehr gewährleistet sind. Wenn größere Teile des Gefieders verschmutzt sind, kühlt der Vogel aus und stirbt. Ähnlich kann sich die Verölung des Fells von Meeressäugern auswirken. Verklebtes Fell isoliert nicht gegen kalte Luft und kaltes Wasser. Die Tiere werden geschwächt und können ebenfalls sterben.

Bei Pflanzen führt eine Verölung der Triebe dazu, dass der Gasteransport von den Blättern zu den Wurzeln unterbrochen wird, sodass die Pflanze eingeht. Wasserfiltrierer wie Muscheln, aber auch Organismen wie Schnecken und Würmer, die ihre Nahrung vom Boden aufsammeln, nehmen Öl häufig mit der Nahrung auf. Die giftigen Kohlenwasserstoffe können sogar in den Nahrungsketten weitertransportiert werden, etwa durch Tiere, die ölverschmutzte Muscheln fressen. Vögel und Säugetiere verschlucken häufig Öl, wenn sie versuchen, ihr verunreinigtes Gefieder oder Fell zu reinigen. Weichhäutige Tiere wie zum Beispiel Fische und viele Wirbellose nehmen Erdölkohlenwasserstoffe hingegen hauptsächlich über die Haut und insbesondere die stark durchspülten Kiemen auf.

Die Erdölkohlenwasserstoffe können auf verschiedene Organismen ganz unterschiedlich wirken. Bei vielen Tieren werden vor allem das Wachstum und der Stoffwechsel beeinträchtigt. Studien zeigten, dass Hummer und Wattwürmer mit verminderter Nahrungsaufnahme reagierten. Miesmuscheln und Fische wiederum wuchsen unter dem Einfluss von Ölverschmutzungen schlechter. Immer wieder beobachtet man Verhaltensänderungen als Reaktion auf Verölungen. Robben zeigten ein ausgesprochen lethargisches Verhalten, was auf Nervenschädigungen durch das Einatmen flüchtiger Erdölkohlenwasserstoffe unmittelbar nach einem Ölunfall zurückgeführt wurde.

Auch die Fortpflanzung zahlreicher Meeresorganismen wird in Mitleidenschaft gezogen. So kann eine Vergiftung durch Öl zu genetischen Schäden führen: Bei Lachsen erhöhte sich nach einem Ölunfall die Sterblichkeit der Eier. Bei Heringen wiederum waren zahlreiche frisch geschlüpfte Nachkommen missgebildet. Auch für Mangrovenbäume konnte man nachweisen, dass sich mit der Konzentration bestimmter Kohlenwasserstoffe im Sediment die Zahl genetischer Mutationen erhöht. Häufig schädigen die toxischen Ölinhaltstoffe auch die Reproduktionsorgane der Meeresorganismen. So erhöhte sich die Zahl steriler Muscheln im Jahr nach einem Ölunfall deutlich. Für Korallen konnte gezeigt werden, dass in chronisch ölverschmutzten Gebieten die Zahl der Nachkommen abnimmt.

Hinzu kommt bei vielen Meerestieren ein Orientierungsverlust, denn viele Organismen finden sich in ihrer Umwelt zurecht, indem sie feinste Konzentrationen bestimmter Substanzen wahrnehmen. Auf diese Weise sind sie in der Lage, Beute, Feinde oder Sexualpartner zu lokalisieren. Bei diesen natürlichen Substanzen handelt es sich um **biogene** Kohlenwasserstoffe, deren molekularer Aufbau manchen Kohlenwasserstoffen aus Rohöl ähnelt. Gelangen durch einen Ölunfall große Mengen der fremden Kohlenwasserstoffe ins Wasser, sind die natürlichen Stoffe kaum mehr wahrnehmbar. Das erschwert die Suche nach einem Sexualpartner oder nach Nahrung erheblich.



4.17 > In der Bucht von San Francisco versucht sich ein Vogel vom Öl zu befreien, das das Containerschiff „Cosco Busan“ 2007 nach einer Kollision mit einem Brückpfeiler verloren hat. Unfälle wie dieser tragen mit zur chronischen Ölverschmutzung der Meere bei.

den, was weitreichende Folgen für die in den Wiesen brütenden und rastenden Vögel mit sich bringt, die entweder ebenfalls verölt werden oder ihre Nahrungsgrundlage verlieren können.

Zusammenfassend können folgende Regenerationszeiten angenommen werden:

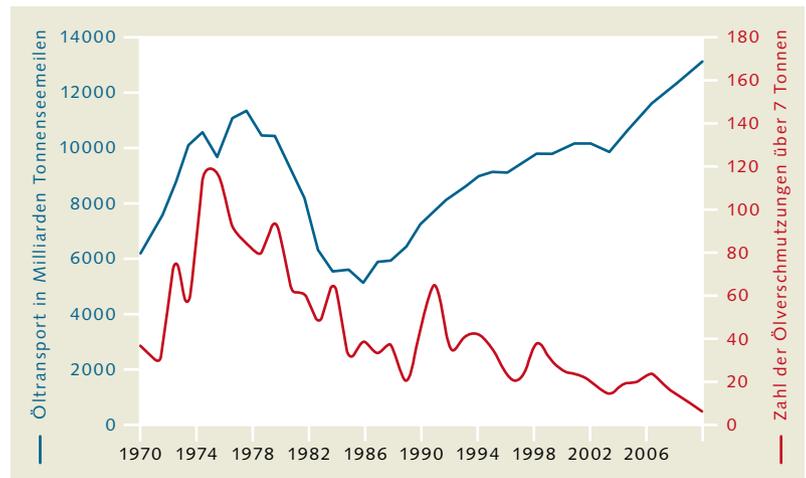
- exponierte Fels- und Sandküsten: wenige Monate bis 5 Jahre;
- geschützte Felsküsten und Korallenriffe: 2 bis mehr als 10 Jahre;
- geschützte Weichböden, Salzwiesen und Mangroven: 2 bis mehr als 20 Jahre.

Bekämpfung von Ölunfällen und Ölverschmutzung

Einmal abgesehen von Ölunfällen in der Tiefsee wie etwa nach der Explosion der Ölplattform im Frühjahr 2010 im Golf von Mexiko, lässt sich eine Ölverschmutzung am besten bekämpfen, solange das Öl noch auf dem Wasser schwimmt. In technischer Hinsicht bevorzugen einige Staaten die ausschließlich mechanische Bekämpfung, beispielsweise mit Ölskimmern oder auf dem Wasser schwimmenden Ölbarrieren.

Andere befürworten eine chemische Bekämpfung, überwiegend mit Dispergatoren, die oftmals in großen Mengen von Flugzeugen versprüht werden. Wie gut diese Chemikalien wirken, hängt allerdings sehr stark von der Art des Öls und von seinem Zustand ab. Ein Problem ist, dass Dispergatoren grundsätzlich nur kurze Zeit nach einem Unfall eingesetzt werden können, da die oben erwähnten chemisch-physikalischen Prozesse die Wirkung bereits nach wenigen Stunden verhindern. Für den Fall, dass herantreibende Ölteppiche empfindliche Küstenabschnitte bedrohen, kann ihr Einsatz aber durchaus sinnvoll sein. Dank der Dispergatoren sinkt das Öl von der Oberfläche in die Tiefe ab. Damit verringert sich die Gefahr, dass Seevögel oder empfindliche Pflanzen verölt werden.

Bei der Havarie der Bohrinsel „Deepwater Horizon“ 2010 strömte das Öl jedoch in großer Wassertiefe aus dem Bohrloch und befand sich, teilweise als riesige Ölwolke, im gesamten Wasserkörper. Für Unfälle dieser Art und diesen Ausmaßes gibt es bislang nur wenig Erfahrung. Zur Erstbekämpfung wurden enorme Mengen von Dispersi-



4.18 > Obwohl die über die Ozeane transportierte Ölmenge seit den 1970er Jahren deutlich gestiegen ist, hat die Zahl der durch Tankerunfälle, technische Defekte oder Unachtsamkeit verursachten Ölverschmutzungen im Meer deutlich abgenommen. Der Einbruch des Öltransports in den späten 1970er Jahren ist auf die damalige Wirtschaftskrise zurückzuführen. Berücksichtigt wurden in der Statistik Kontaminierungen mit über 7 Tonnen Öl, da kleinere Verschmutzungen meist nicht ausreichend erfasst werden.

onsmitteln eingesetzt, mit bisher nicht absehbaren ökologischen Folgen.

Auch die sogenannte Bioremediation kann in geeigneten, vor allem nährstoffarmen Meeresgebieten erfolgreich sein. Bei diesem Verfahren gibt man Nährstoffe ins Wasser, die das Wachstum Öl abbauender Bakterien fördern. Für alle Bekämpfungsstrategien gilt grundsätzlich, dass sie nur dann sinnvoll und effektiv eingesetzt werden können, wenn sie Teil eines übergeordneten nationalen Bekämpfungsplans (Contingency Plan) sind, nach dem gut trainierte Einsatzkräfte im Ernstfall strukturiert vorgehen können. In den USA, Deutschland, den übrigen Nordseeanrainern und einigen anderen Staaten gibt es derartige Pläne bereits seit mehreren Jahren. Dort sind die Zeiten vorbei, in denen Behörden bei Ölunfällen mangels klarer Zuständigkeiten, hinreichenden Materials und genügend Personals oft wenig effektiv und unangemessen reagierten.

Doch solche technischen Managementstrategien allein reichen nicht. Für einen wirksamen Schutz des Meeres vor Ölverschmutzungen müssen globale und regionale Abkommen ausgearbeitet werden. Ferner muss man kon-

4.19 > Gleich säckeweise sammeln Arbeiter am Strand des beliebten US-Seebads Gulf Shores ölverklebte Algenmassen zusammen. Der Ort an der Küste des Bundesstaats Alabama gehört zu jenen Gemeinden am Golf von Mexiko, die im Juni 2010 durch Öl aus der havarierten Plattform „Deepwater Horizon“ verschmutzt worden sind.



trollieren, ob diese tatsächlich umgesetzt und angewendet werden. Ein positives Beispiel ist das Internationale Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung (MARPOL 73/78), mit dem 1983 unter anderem Meereschutzgebiete ausgewiesen wurden, in denen der Tankerverkehr ganz oder teilweise eingeschränkt ist. Das Übereinkommen bewirkte einen starken Rückgang der Tankerunfälle während der 1980er Jahre. MARPOL 73/78 brachte auch neue Auflagen zur betriebsbedingten Einleitung von Öl mit sich. Außerdem ebnete es den Weg zum Bau von Doppelhüllentankern. Zu einem weiteren Rückgang der Unfälle während der folgenden Jahrzehnte trugen sowohl der OPA (Oil Pollution Act) der Vereinigten Staaten von Amerika im Jahr 1990 als auch der von der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (**International Maritime Organization, IMO**) verabschiedete ISM-Code (International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention) von 1998 bei.

Die Zukunftsaussicht – verhalten optimistisch

Zweifellos hat sich die Verschmutzung der Ozeane mit Öl in den vergangenen Jahrzehnten verringert. Internationale Abkommen, die Ausweisung von Schutzgebieten und die verbindliche Einführung der Doppelhüllentanker tragen dazu bei. Gleichzeitig kann man angesichts der „Deepwater-Horizon“-Katastrophe kaum von einer entspannten Situation für die Meeresumwelt sprechen. Darüber hinaus wird sich die illegale Einleitung von Öl durch Tankreinigungen, die immerhin zu einem Drittel zur Verschmutzung beiträgt, ohne schärfere Kontrollen und drastische Strafen nicht wirklich bekämpfen lassen. Schwierig wird auch in Zukunft die Ölbekämpfung in Flachwassergebieten wie dem Wattenmeer bleiben, da Bekämpfungsschiffe bis heute kaum in Wassertiefen von weniger als 2 Metern arbeiten können. Auch das spricht dafür, die Sicherheit der Handelsschiffe weiter zu erhöhen.

Es gibt viel zu tun ...

Obwohl seit Jahrzehnten bekannt ist, dass die Verschmutzung der Meere katastrophale Folgen haben kann, setzt der Mensch auch heute noch Millionen Tonnen von problematischen Substanzen frei. Dazu zählen Stoffe, die bei der Herstellung oder dem Gebrauch von Produkten in die Umwelt gelangen, Abfälle oder auch Öl. In einem aber unterscheidet sich die heutige Situation von der früheren. Während die Menschheit bis vor wenigen Jahrzehnten ganz bewusst Abfälle in den Meeren entsorgte, gelangt heute der größte Teil der Abfall- und Schadstoffe auf vielen verschiedenen Wegen indirekt ins Meer.

Genau das macht die Bekämpfung der Verschmutzung so schwierig. Denn um die Situation zu verbessern, ist ein ganzes Bündel an Maßnahmen nötig. Um etwa die Überdüngung der Meere mit Nährstoffen in den Griff zu bekommen, müssen an Land Kläranlagen gebaut und die Menge der Düngemittel in der Landwirtschaft reduziert werden. Dass sich die Nährstofffracht dadurch tatsächlich reduzieren lässt, zeigt die steigende Wasserqualität in den Flüssen Westeuropas. Letztlich liegt es in der Verantwortung jeder einzelnen Nation, geeignete Maßnahmen zur Gewässerreinigung festzulegen.

Substanzen, die sich über die Luft in der Umwelt verbreiten, sind ungleich schwerer zu fassen. Das gilt für Stickstoffe aus der Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle genauso wie für Industriechemikalien wie etwa die polyfluorierten Verbindungen oder andere langlebige Moleküle. Auch hier müssen die Schadstoffe möglichst bereits an der Quelle aufgefangen werden.

Allerdings ist in manchen Fällen die Herkunft der Substanzen noch gar nicht bekannt. Eine vielversprechende Lösung sind hier fundierte Risikobewertungen, mit denen sich noch vor der Markteinführung einer Substanz abschätzen lässt, welche Gefahren von ihr ausgehen. Während sich Substan-

zen wie die polyfluorierten Verbindungen nur schwer fassen lassen, weil sie nicht nur bei der Produktion, sondern auch beim Gebrauch freigesetzt werden, liegt die Lösung für die Vermüllung der Ozeane auf der Hand: Abfall gehört in den Mülleimer. In Ländern wie den Niederlanden oder Deutschland ist das heute selbstverständlich, denn durch Recycling- oder Pfandsysteme hat man die Ströme der Einwegverpackungen recht gut kanalisiert. In vielen anderen Nationen aber fehlen Müllverwertungssysteme. Allerdings macht ein Abfallmanagement erst dann wirklich Sinn, wenn die Bevölkerung für das Problem Müll sensibilisiert ist. Inzwischen gibt es weltweit gute Beispiele für eine wirkungsvolle Umwelterziehung.

Anders als beim Müll gibt es bei der Ölverschmutzung eigentlich einen positiven Trend: Die Ölmengen im Meer nehmen seit Jahren ab. Ob dazu die schärferen Kontrollen von Handelsschiffen, Überwachungsflüge oder die verbesserte Schiffssicherheit beigetragen haben, lässt sich schwer sagen. Damit ist derzeit auch unklar, mit welchen Maßnahmen man die Ölverschmutzung künftig weiter wesentlich verringern kann. Sicher ist, dass man die Gefahr großer Tankerhavarien heute deutlich ernster nimmt als noch vor wenigen Jahren.

Katastrophen wie die Explosion der Ölplattform „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko machen aber deutlich, dass der Mensch dem Ölproblem immer wieder hilflos gegenübersteht. Offen ist derzeit, ob der Trend zur Ölförderung in immer größeren Tiefen die Verölung der Ozeane verschlimmert. Immerhin gibt es, wie das aktuelle Beispiel zeigt, bislang kaum Strategien für eine Ölbekämpfung in der Tiefsee. Die Entwicklung von Notfalltechnologien für die Ölförderung und das Bohren in großer Tiefe sind daher dringend geboten. Zwar hat die Erdölindustrie angekündigt, freiwillig eine schnelle Eingreiftruppe aufzubauen. Doch müssen diese Maßnahmen durch neutrale Instanzen überwacht werden.

5

Auswirkungen des Klimawandels auf das marine Ökosystem



> Dass der Klimawandel die Lebensgemeinschaften im Meer verändern wird, steht außer Frage. Zwar haben Veränderungen in den Ökosystemen meist mehrere Ursachen, doch spielen der steigende Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre und die globale Erwärmung eine entscheidende Rolle. Offen ist, wie stark Lebensgemeinschaften dadurch ins Wanken geraten.



Biologische Systeme im Stress

> Grundsätzlich sind Lebewesen gut an natürliche Bedingungsschwankungen in ihrer Umwelt angepasst. Sie ertragen für begrenzte Zeit sogar extreme Situationen. Der Klimawandel aber verändert manche Lebensräume so stark, dass für viele Arten der Stress zu groß wird. Kommen mehrere ungünstige Faktoren zusammen, können diese in der Summe sogar zum Aussterben von Arten führen.

Lebensräume verändern ihr Gesicht

Nicht nur Menschen können gestresst sein. Auch marine Pflanzen und Tiere geraten durch sogenannte Stressoren unter Druck – durch veränderte Bedingungen in ihrem Lebensraum. Stress gab es schon immer. Durch den Klimawandel aber nimmt er seit einigen Jahren ganz offensichtlich zu. Manchmal wird Stress schon durch einzelne Stressoren ausgelöst. Im Meer kann das beispielsweise eine durch Stürme verstärkte Sedimentation sein, die die Bodenlebewesen bedeckt, oder ein durch Algenblüten bewirkter Lichtmangel in tieferen Wasserschichten. Der Klimawandel fördert aber unerwünschterweise oftmals mehrere Stressoren gleichzeitig: Er verursacht „multiplen Stress“. So können an einem Standort zugleich die Temperatur, das Lichtangebot und der pH-Wert aus dem für die Lebewesen optimalen Bereich driften. Mitunter wirken auch aus fremden Regionen eingeschleppte Arten als Stressoren – als Fraßfeind, Krankheitserreger oder Nahrungskonkurrent.

Erschwerend kommt hinzu, dass die verschiedenen Stressoren nicht immer unabhängig voneinander wirken, sondern sich in manchen Fällen aufsummieren oder gar verstärken. Nicht immer führt das gleich zum Tod. In vielen Fällen beeinträchtigen die Stressoren vorerst nur die Leistungsfähigkeit eines Organismus. Dadurch verändern sich die Interaktionen des geschwächten Lebewesens mit seiner Umwelt, mit Fraßfeinden, Parasiten, Konkurrenten, Krankheitserregern oder Reproduktionspartnern. Diese Effekte können die oben beschriebene sogenannte Primärwirkung der Stressoren, beispielsweise durch Lichtmangel erzeugten Stress, deutlich übertreffen. Am weiter unten gezeigten Beispiel des Blasentang werden diese Zusammenhänge verdeutlicht.

Zu viele Umweltveränderungen auf einmal

Zu den häufigsten Stressoren, die im Zuge des Klimawandels verstärkt auftreten und auf marine Ökosysteme wirken, gehören:

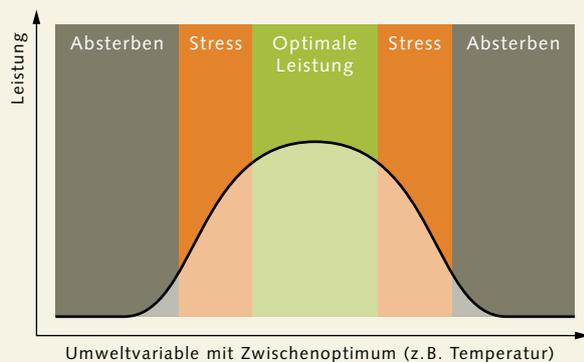
- die allmähliche Versauerung des Meerwassers und damit einhergehend eine mögliche Beeinträchtigung von Kalzifizierungsprozessen, der Kalkbildung bei Meeresorganismen (Kapitel 2);
- die Erwärmung des Meerwassers und die damit verbundenen Sekundäreffekte wie etwa eine stärkere Schichtung des Wassers, die Erhöhung von Stoffwechselraten der Organismen oder die Veränderungen von Löslichkeitskonstanten und damit der Menge von bestimmten im Wasser gelösten Substanzen wie etwa Gasen oder Karbonaten;
- die Aussüßung oder Versalzung in Randmeeren und die damit einhergehende Beeinträchtigung des Ionenhaushalts lebender Zellen (Kapitel 2);
- die Eutrophierung, das heißt die übermäßige Anreicherung des Wassers mit Nährstoffen, und andere Arten der chemischen Verschmutzung des Meerwassers. So erwarten Klimaforscher für weite Bereiche des Ostseeraums künftig erhöhte Niederschlagsraten. Mit dem zunehmenden Regen würde dann verstärkt Dünger aus der Landwirtschaft ins Meer gelangen (Kapitel 4);
- die Veränderungen von küstennahen Strömungs- und Sedimentationsprozessen durch menschliche Baumaßnahmen, die zum Teil Folge des Klimawandels und des steigenden Meeresspiegels sind. Dazu zählen Häfen, Wellenbrecher oder Deiche (Kapitel 3);
- die Ausbreitung exotischer Arten in neue Lebensräume. Es ist zu erwarten, dass sich als Folge des multiplen Stresses die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften

Wie Stress entsteht und wie er wirkt

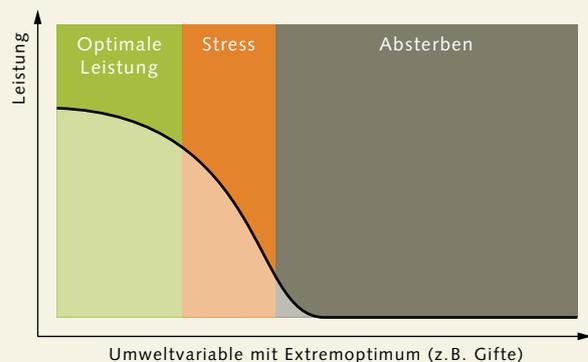
Auf einen Organismus in seinem Lebensraum wirken verschiedene Umwelteinflüsse, an die er in der Regel auch bei Schwankungen recht gut angepasst ist. Diese Anpassung der Lebewesen an die abiotischen Bedingungen ihres Verbreitungsgebiets, also die chemischen und physikalischen Gegebenheiten, hat über Tausende oder gar Millionen von Jahren, über evolutive Zeiträume stattgefunden. Stress entsteht, wenn diese Umweltvariablen vorübergehend oder dauerhaft deutlich außerhalb des Bereichs liegen, an den ein biologisches System (eine Zelle oder Art) angepasst ist. Derartige Stresssituationen können auf verschiedene Weise erzeugt werden:

- durch vorübergehende Schwankungen der abiotischen Bedingungen (zum Beispiel Jahreszeiten, Wetteranomalien);
- wenn im Wasser frei schwimmende Organismen, wie zum Beispiel planktische Larven, aus dem Zentrum des Lebensraums verdriften und sich an den Rändern des Verbreitungsgebiets ansiedeln, wo für sie keine optimalen Umweltbedingungen herrschen;
- wenn sich Klimazonen schneller verschieben, als sich die Arten evolutiv daran anpassen können.

Nicht immer sind Organismen Veränderungen schutzlos ausgeliefert. Sie können sich durchaus an neue Bedingungen anpassen und auf Stress reagieren. Eine Anpassung ist auf dreierlei Weise möglich. Am schnellsten, innerhalb von Tagen oder Wochen, wirkt die phänotypische Plastizität: Individuen stellen sich durch Veränderungen der Wuchsform, des Stoffwechsels oder der Ernährungsweise auf die neuen Gegebenheiten in ihrem Lebensraum ein. Das ist natürlich nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Relativ schnelle Anpassungen über wenige Generationen sind auch über selektive Prozesse möglich: Sind in einer Population Genotypen, also Individuen mit bestimmten, nicht direkt sichtbaren, aber im Erbgut verankerten Eigenschaften, vorhanden, die mit den neuen Umweltbedingungen besser als andere Artgenossen zurechtkommen, so werden sich diese recht schnell durchsetzen. Die Leistungs- und Überlebensfähigkeit der Population ist somit gewährleistet. Evolutive Prozesse im klassischen Sinn, das zufällige Auftauchen einer Mutation, welche das Überleben in der sich verändernden Umwelt ermöglicht, werden bei vielen Arten mit langen Generationsdauern meist zu langsam sein, um mit den künftigen durch den Klimawandel verursachten Veränderungen in ihren Lebensräumen Schritt halten zu können.



5.1 > Verschiedene Umweltvariablen wirken sich unterschiedlich auf Organismen aus. So gedeihen viele Lebewesen am besten bei moderaten Temperaturen – dem sogenannten Zwischenoptimum (links). Wird es kälter oder wärmer, verschlechtert sich die Situation. Die Leistungsfähigkeit der Lebewesen nimmt ab. Anders verhält es sich



im Fall des Extremoptimums: In einem sauberen Lebensraum funktioniert der Organismus optimal. Breiten sich Gifte im Lebensraum aus, nimmt die Leistung ab. In beiden Fällen erfährt das Tier oder die Pflanze Stress, der zum Tod führen kann. Hält der Stress länger an, kann die Art im betroffenen Gebiet sogar ganz aussterben.

ten verändert. Außerdem könnten sich geographische Verbreitungszonen verschieben, sodass Arten in ihren angestammten Heimatgebieten aussterben. Denkbar ist auch, dass sich exotische Spezies in fremden Regionen neu etablieren.

Der Blasentang – eine Spezies im Dauerstress

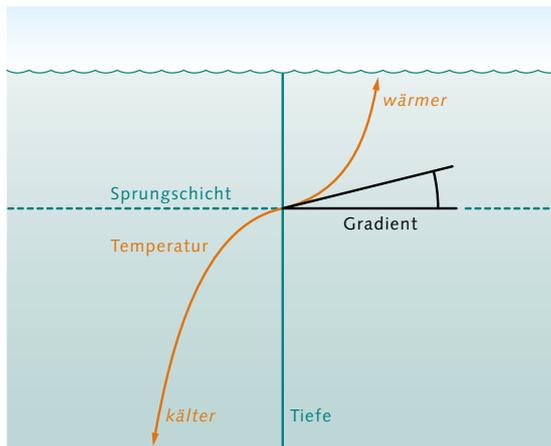
Der Blasentang, *Fucus vesiculosus*, ist eine Großalge der gemäßigten Breiten, die in der Nord- und Ostsee häufig vorkommt. Er besiedelt vor allem die **Gezeitenzone**, ist aber auch gelegentlich bis in 12 oder gar 15 Metern Tiefe anzutreffen. Der Blasentang erfüllt eine Reihe wichtiger Aufgaben im Ökosystem. Er ist zugleich Nahrungsquelle für verschiedene Organismen und wichtiger Sauerstofflieferant. Er bietet Jungtieren Schutz und dient diversen Spezies als **Substrat**, auf dem sie sich ansiedeln. In den vergangenen vier Jahrzehnten ist sein Bestand in der west-

lichen Ostsee um mehr als 90 Prozent zurückgegangen, in vielen Gebieten kommt er nicht mehr bis in 12, sondern nur noch bis in 3 Metern Tiefe vor. Lange hat man den Schwund in der Tiefe auf den Umweltstressor Eutrophierung zurückgeführt (Kapitel 4). Man vermutete, dass der Nährstoffüberschuss im Wasser zu dichteren Planktonblüten führt, sodass weniger Licht bis zum Meeresgrund dringt. Man nahm ferner an, dass Lichtmangel, wie er während einer Planktonblüte am Meeresboden herrscht, die Verteidigungsfähigkeit des Blasentangs gegen Fraßfeinde einschränkt. Zudem sieht es so aus, als könne sich der Blasentang mit abnehmendem Licht schlechter gegen Bakterien zur Wehr setzen.

Doch diese Erklärung ist unzureichend, da der Blasentang erstens Energie speichern kann und so auch dunklere Zeiten übersteht, zweitens auch noch bei sehr niedrigem Lichtangebot wächst. Selbst wenn man berücksichtigt, dass durch die Eutrophierung verstärkt Organismen wie

5.2 > Der Blasentang *Fucus vesiculosus* ist in Europa weit verbreitet. Durch den Klimawandel aber könnte er in manchen Gebieten aussterben.

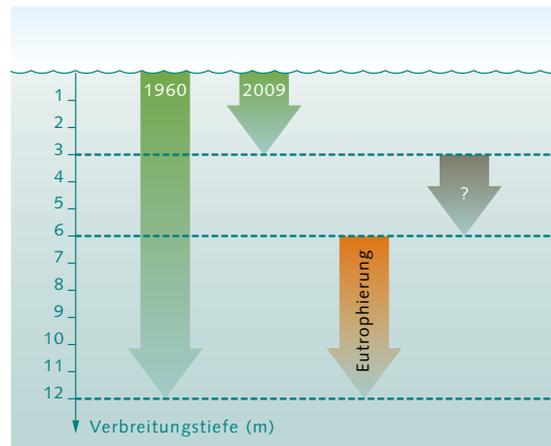




5.3 > Als Sprungschicht bezeichnet man die Trennungszone zwischen dem warmen, oberflächennahen Wasser und dem kalten Wasser in der Tiefe. Der Gradient ist ein Maß dafür, wie stark die Temperaturänderung zwischen warmem und kaltem Wasser an der Sprungschicht ist.

zum Beispiel Mikroalgen auf der Blasentangoberfläche wachsen, was zu weiterer Licht- und Nahrungskonkurrenz zwischen Alge und Tang führt, müsste der Blasentang noch bis in 6 Metern Tiefe hinab wachsen können. Erst unterhalb dieser Marke wäre das durch Lichtmangel und Nahrungskonkurrenz verursachte Energiedefizit so hoch, dass es für ihn tödlich wäre. Warum sich die Pflanze also bereits ab 3 Metern Tiefe rar macht, lässt sich damit nicht beantworten.

Inzwischen geht man davon aus, dass der Schwund im relativ flachen Bereich zwischen 3 und 6 Metern folgende Ursachen hat: Zum einen führt die bereits heute messbare Erwärmung des Meerwassers dazu, dass mit steigender Stoffwechselrate die Fraßfeinde hungriger und der bakterielle Befall intensiver wird. Zudem beeinträchtigen schnelle Temperatursprünge in verschiedenen Wassertiefen die Verteidigungsfähigkeit gegen Angreifer. Gerade in der Tiefe um 4 bis 5 Meter befindet sich im Sommer oft eine Sprungschicht. Der damit einhergehende Temperatursprung über wenige Tiefenzentimeter wird mit zunehmender Wassererwärmung schärfer. Schwappt eine solche Sprungschicht auf und ab, bedeutet dies für einen in dieser Tiefe wachsenden Blasentang schnelle und starke Temperaturschwankungen – und dadurch verringerte Verteidigungsfähigkeit.



5.4 > Um 1960 kam der Blasentang in der westlichen Ostsee bis in 12 Metern Tiefe vor, 2009 nur noch bis in 3 Metern. Der durch Eutrophierung verursachte Lichtmangel trägt erheblich zum Schwund zwischen 6 und 12 Metern bei. Den Rückgang zwischen 3 und 6 Metern aber kann man damit nicht erklären.

In den vergangenen Jahren ist außerdem ein neuer biologischer Stressor hinzugekommen: die aus Südostasien eingeschleppte Rotalge *Gracilaria vermiculophylla*. Die Ansprüche dieser Art an den Lebensraum ähneln stark denen des Blasentangs. Das Problem: Anders als der Blasentang kann sich die Rotalge ungeschlechtlich vermehren, was sie besonders reproduktiv macht. Darüber hinaus ist sie toleranter gegenüber Schwankungen der abiotischen Standortbedingungen und außerdem weniger attraktiv für Fraßfeinde. Mehr noch, die Fraßfeinde des Blasentangs nutzen die Rotalge als Schutzhabitat, in dem sie Zuflucht vor ihren Feinden finden. Problematisch ist auch, dass chemische Ausdünstungen von *Gracilaria* die Keimungsfähigkeit von *Fucus*-Eiern beeinträchtigen.

Fucus ist also einer Vielzahl von Stressoren und deren direkten und indirekten Effekten ausgesetzt: Lichtreduktion, Besiedlungs- und Fraßdruck oder der Nahrungskonkurrenz durch Algen. Alles zusammen schwächt das Wachstum und die Keimung. Damit haben die *Fucus*-Bestände den Verlusten durch Fraß und Konkurrenz immer weniger entgegenzusetzen. Das Beispiel *Fucus* macht deutlich, dass die direkten Effekte des Klimawandels zunächst gering sein mögen. Durch die Veränderung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Organismen aber sind sie dennoch vernichtend.

Störung im Planktonkreislauf

> Aktuelle Experimente und Studien zeigen, dass der Klimawandel, besonders die Erwärmung der Erde, eingespielte biologische Systeme aus dem Takt bringt. Für manche Lebewesen ist das fatal. Beunruhigend ist vor allem, dass sich der Lebensrhythmus der wichtigsten Nahrungsgrundlage in den Ozeanen, der des pflanzlichen Planktons, verändert.

Lebenswichtige Einzeller

Das Plankton ist von enormer Bedeutung als Nahrungsquelle für das Leben im Meer. Das Phytoplankton, Algen und Cyanobakterien, nimmt im Wasser gelöste Nährstoffe auf, wächst und teilt sich. Dadurch wird im Meer die Biomasse produziert, von der sich Zooplanktonorganismen, wie Kleinkrebse und Fischlarven, ernähren. Das Zooplankton wiederum wird von Fischen und ihren Larven gefressen. Das Plankton spielt somit in den **biogeochemischen** Kreisläufen des Ozeans eine Hauptrolle. Durch den Klimawandel bewirkte Veränderungen des Planktons werden daher in der Zukunft auch einen entscheidenden Einfluss auf das Funktionieren des gesamten **pelagischen Systems** haben.

Das Planktonwachstum kommt aus dem Takt

Zum Plankton gehören überwiegend kurzlebige Organismen. Diese vermehren sich in der Regel so schnell, dass innerhalb eines Jahres mehrere Generationen entstehen können. Grundsätzlich folgt die Entwicklung der Planktonorganismen einem regelmäßigen Jahreszyklus, der mit der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons beginnt. Dementsprechend bewirkt das zunehmende Lichtangebot im Frühjahr, dass die Menge des Phytoplanktons extrem schnell zunimmt. Schon wenige Wochen nach dem winterlichen Minimum erreicht die Biomasse einen Jahres Spitzenwert. Danach nimmt die Biomasse wieder kontinuierlich ab. Zum einen, weil das Zooplankton das Phytoplankton wegrisst, zum anderen, weil die im Wasser gelösten Pflanzennährstoffe während der Blüte stark aufgezehrt wurden und absinken. Die Phytoplankter finden also im Wasser immer weniger Nahrung.

In nährstoffarmen und kalten Meeresgebieten ist die Frühjahrsblüte die einzige, in vielen anderen Meeresgebieten die größte Nahrungszufuhr für das Zooplankton im Jahresverlauf. Damit ist die Frühjahrsblüte auch für die Ernährung der Fische, die sich vor allem von Zooplankton ernähren, von größter Bedeutung. Die Bodenlebewesen wiederum profitieren von den großen Mengen absinkenden organischen Materials, den Resten der abgestorbenen Phyto- und Zooplanktonorganismen.

Das kurzlebige Plankton reagiert ausgesprochen schnell auf physikalische und chemische Veränderungen im Meer oder Schwankungen im Nahrungsangebot. Gelegentlich kann die Größe der Populationen innerhalb nur weniger Tage oder Wochen extrem variieren. In anderen Fällen verändert sich die Zusammensetzung der Planktongemeinschaften: Bestimmte Planktonarten dominieren auf einmal. Veränderungen durch den Klimawandel sind in jedem Fall schon erkennbar. Einige davon entsprechen den Erwartungen: So wie die Obstbaumblüte an Land beginnt auch die Frühjahrsblüte des Planktons in vielen Meeresgebieten früher. Zudem verschieben sich die Verbreitungsgebiete von Planktonarten aufgrund der Meerese Erwärmung weiter Richtung Pol. Ein Beispiel ist die nach Norden gerichtete Ausbreitung der für die gemäßigte Zone charakteristischen Copepoden-Art *Calanus helgolandicus*, eines Kleinkrebses, der die in skandinavischen Breiten heimische Art *Calanus finmarchicus* verdrängt. Da beide Arten wichtige Fischnährtiere sind und ein ähnliches Nahrungsspektrum haben, sollte das keine gravierenden Auswirkungen auf das Funktionieren des Ökosystems haben. Aber nicht alle Veränderungen in den Plankton-Lebensgemeinschaften sind so unbedenklich. In manchen Fällen führt die Erwärmung des Wassers dazu, dass der Zooplanktonnachwuchs zu früh schlüpft und verhungert.

Die Copepoden

Copepoden (Ruderfußkrebse) zählen zu den Krebsen (Crustacea). Sie besiedeln sowohl Meerwasser als auch Süßwasser. Die meist nur wenige Hundert Mikrometer bis wenige Millimeter großen Tiere sind die artenreichste Gruppe der Crustaceen (etwa 14 000 Arten) und machen den größten Anteil des marinen Zooplanktons aus. Copepoden stellen damit eine wichtige Nahrungsgrundlage für Fische und andere Krebsarten dar.

Plankton-Experiment: Klimawandel im Wassertank

Forscher haben den Einfluss von Klimaänderungen auf die Frühjahrsblüte des Phytoplanktons experimentell untersucht. Dazu wurden 1,4-Kubikmeter-Tanks mit Planktonorganismen befüllt, wie es dem Entwicklungsstand des Phytoplanktons im Spätwinter entspricht. In Klimakammern wurden die Tanks unterschiedlichen Lichtangeboten und verschiedenen Verläufen der Frühjahrs Temperaturen ausgesetzt. Simuliert wurden dabei ein gegenwärtiger Durchschnittsverlauf der Frühjahrs Temperatur sowie Erwärmungen um 2, um 4 und um 6 Grad Celsius. Die Ergebnisse sind beeindruckend: Die Frühjahrsblüte trat pro Grad Celsius Temperaturerhöhung um 1 bis 1,5 Tage früher ein. Ein besseres Lichtangebot verstärkte diesen Effekt. Das Zooplankton reagierte noch deutlicher auf die Erwärmung: Die Copepoden-Larven, die Nauplien, schlüpfen pro Grad Temperaturerhöhung um bis zu 9 Tage früher. Die Auswirkungen waren fatal, denn die meisten Nauplien schlüpfen vor der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons. Sie fanden keine Nahrung und verhungerten. Damit fiel eine ganze Generation aus.

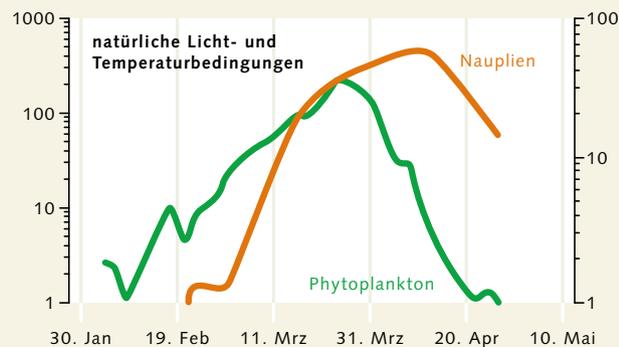
Nicht nur der Beginn der Frühjahrsblüte verschob sich aufgrund der Erwärmung. Auch die Gesamtbioasse des Phytoplanktons und seine Zusammensetzung änderte sich – zum Nachteil des Zooplanktons. Unter normalen Bedingungen dominierten großzellige Kiesel-

algen, die eine gute Nahrungsbasis für Copepoden sind. Unter wärmeren Bedingungen hingegen dominierten kleine **Flagellaten**. Copepoden können diese nur schlecht fressen. Die Folgen sind eindeutig: Die Tiere wachsen langsamer, sie produzieren weniger Eier und dadurch weniger Nachkommen.

Die Erwärmung des Wassers kann aber nicht nur für die Nahrungskette Phytoplankton – Zooplankton – Fisch negative Folgen haben. Sie wirkt sich auch auf die Speicherung des Klimagases CO₂ im Meer aus, auf die sogenannte biologische CO₂-Pumpe (siehe Kasten nächste Seite). Denn unter wärmeren Bedingungen verstärkt sich die Respiration von Zooplankton und Bakterien, also der Atemstoffwechsel, der CO₂ freisetzt. Dadurch wird das zunächst durch das Phytoplankton aufgenommene CO₂ wieder im Oberflächenwasser freigesetzt. Damit verringert sich der CO₂-Anteil, der in der Biomasse gebunden bleibt und als organische Substanz zum Meeresgrund absinkt und dort letztlich als Kohlenstoff am Boden eingelagert wird. Das ist vor allem deshalb problematisch, weil sich so ein fataler Rückkopplungsmechanismus des Klimawandels ergibt: Durch die Klimaerwärmung wird ein Mechanismus geschwächt, der der Atmosphäre bisher einen Teil des anthropogenen, klimaschädlichen CO₂ entzogen hat.

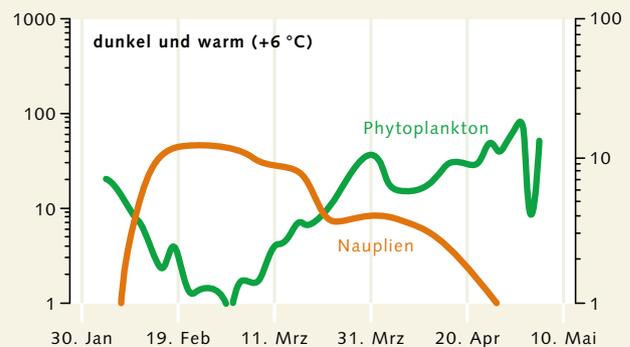
Menge Phytoplankton in Kohlenstoff
(Mikrogramm pro Liter)

Anzahl Nauplien
pro Liter



Menge Phytoplankton in Kohlenstoff
(Mikrogramm pro Liter)

Anzahl Nauplien
pro Liter



5.5 > Für gewöhnlich setzt die Vermehrung des Phytoplanktons (grüne Linie) mit dem zunehmenden Lichtangebot gegen Ende des Winters vor dem Schlüpfen der Zooplanktonlarven (Nauplien, rote Linie) ein. Damit steht den Zooplanktern beim Schlüpfen genug Nahrung zur Verfügung. Ist hingegen wenig Licht vorhanden und das Wasser um 6 Grad wärmer, schlüpfen die Zooplankter schon vor der Phytoplank-

tonblüte. Das ist fatal, denn in diesem Fall fehlt den Zooplanktonlarven die Nahrung. Sie verhungern. Das ist vor allem deshalb beunruhigend, weil Forscher zum Beispiel für die Ostsee genau dieses Szenario voraussagen: Aufgrund stärkerer Bewölkung dringt deutlich weniger Licht ins Wasser. Zugleich dürfte sich durch die Klimaerwärmung die Wassertemperatur erhöhen.

Die CO₂-Pumpe im Ozean

Der Begriff bezeichnet den Transport organischen Kohlenstoffs mittels Sedimentation in die Tiefen der Meere, wo er sich als Sediment ablagert. Zunächst bindet das Phytoplankton CO₂ im Rahmen der Photosynthese und wandelt es in organischen Kohlenstoff um. Der Großteil dieses Kohlenstoffs wird aber durch Respiration wieder freigesetzt, und zwar vom Phytoplankton selbst oder von Zooplanktern und Bakterien, die sich von lebendem oder abgestorbenem Phytoplankton ernähren. Findet die Respiration nahe der Wasseroberfläche statt, kann das freigesetzte CO₂ wieder an die Atmosphäre abgegeben werden. Nur ein winziger Teil der nahe der Meeresoberfläche produzierten organischen Masse sinkt ins Tiefenwasser, das nicht saisonal mit der Atmosphäre in Kontakt kommt, unterhalb der permanenten Sprungschicht. Nur dieser Teil des bei der Primärproduktion entstehenden organischen Kohlenstoffs bindet atmosphärisches CO₂ dauerhaft und wird als CO₂-Pumpe bezeichnet.

Eine wachsende Bedrohung: Harmful Algal Blooms

Harmful Algal Blooms (HABs, schädliche Algenblüten) sind Massenentwicklungen giftiger oder auf andere Art schädlicher Phytoplankter. Sicher ist, dass HABs weltweit zunehmen. Warum das so ist, weiß man bislang allerdings nicht ganz genau. Als Hauptursache gilt die Eutrophierung, die Überdüngung des Wassers mit Nährstoffen, aber auch der Klimawandel scheint eine Rolle zu spielen. Die schädlichen Algenblüten treten üblicherweise in den Sommermonaten auf, wenn die Wassersäule thermisch geschichtet ist: Eine erwärmte, leichte Oberflächenschicht liegt auf einer kälteren, schwereren Tiefenschicht. Der Temperaturgradient in der dazwischenliegenden Sprungschicht ist umso ausgeprägter, je wärmer das Oberflächenwasser ist.

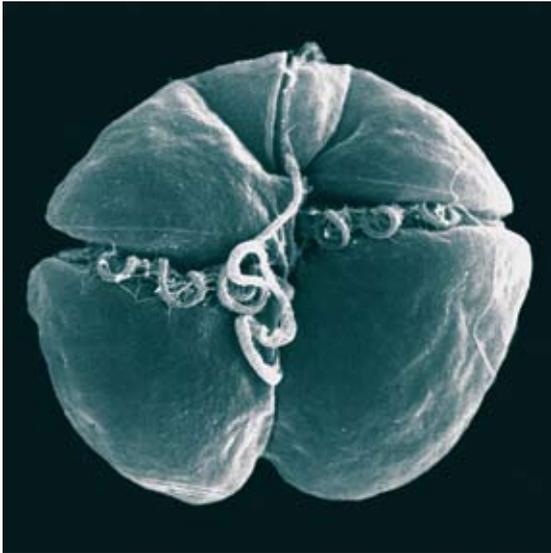
Ein größerer Temperaturgradient bedeutet, dass sich die Wassermassen an der Sprungschicht kaum durchmischen, da der Dichteunterschied, kalt und schwer zu warm und leicht, wie ein Widerstand wirkt. Daher gelangen kaum Nährstoffe aus der Tiefe an die Oberfläche. Sind die Nährstoffe an der Oberfläche durch das Phytoplanktonwachstum aufgezehrt, fehlt es also an Nachschub. Die für den Sommer charakteristische vertikale Trennung in eine Zone mit genug Licht und zu wenig Nährstoffen sowie eine Zone mit zu wenig Licht und ausreichend Nährstoffen



5.6 > Die stark nesselnde, für Menschen aber normalerweise nicht tödliche Leuchtqualle *Pelagia noctiluca* trat in den vergangenen Jahren gehäuft im Mittelmeer auf.

wird also durch die Sprungschicht verschärft. Hier haben große bewegliche Phytoplankter einen Vorteil. Sie können durch vertikale Wanderungen zwischen dem tiefen nährstoffreichen Wasser und den sonnendurchfluteten oberflächennahen Bereichen hin- und herwandern, wo sie Photosynthese betreiben. Hierzu gehören zahlreiche Dinoflagellaten und in der Ostsee vor allem auch Cyanobakterien, die ihr spezifisches Gewicht regulieren und wie ein Taucher auf- und absteigen können. Problematisch ist, dass es in beiden Gruppen zahlreiche toxische Arten gibt. Nehmen Muscheln diese Organismen auf, werden sie für den Menschen ungenießbar oder sogar tödlich.

Zum Teil geben die Planktonorganismen die Gifte auch direkt ins Wasser ab. In manchen Fällen sind diese sogar in Aerosolen nachweisbar – kleinen, in der Luft schwebenden Tröpfchen, die durch Wellenschlag in der Brandung entstanden sind. Ein besonders berüchtigter Vertreter ist der Dinoflagellat *Karenia brevis*, dessen regelmäßig vor Florida vorkommende Blüten Fischsterben, Muschelvergiftungen, Entzündungen bei Badenden und im Extremfall sogar Asthma bei Strandbesuchern verursachen. Fachleute schreiben die Häufung dieser Blüten der Klimaerwärmung zu. Wie erwähnt, gibt es auch unter den

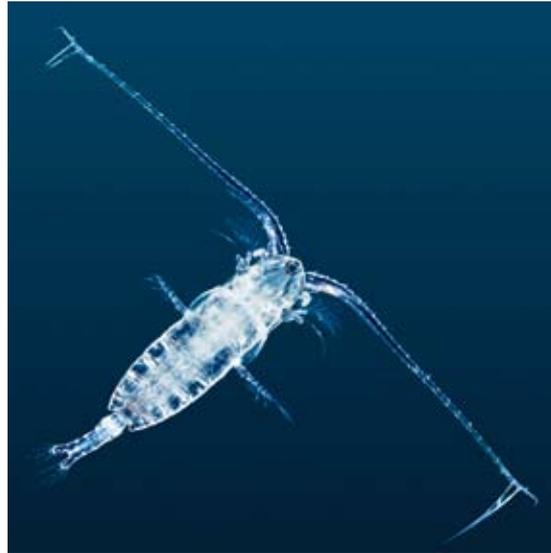


5.7 > Der Dinoflagellat *Karenia brevis* kommt vor allem im Golf von Mexiko vor. Sein Nervengift Brevetoxin A kann beim Menschen zu Entzündungen und Asthmaanfällen führen.

Cyanobakterien zahlreiche giftige Stämme. Zwar wurden Untersuchungen bislang vor allem an Cyanobakterien durchgeführt, die im Süßwasser leben – insbesondere in Gewässern, aus denen Trinkwasser gewonnen wird oder in denen Badende durch dichte Cyanobakterienblüten gefährdet sind. Doch auch in der Ostsee wurden toxische Stämme verschiedener Cyanobakterien wie etwa *Nodularia spumigena* nachgewiesen.

Quallen werden zum Problem

Nicht nur HABs treten immer öfter massiv auf. Darüber hinaus beobachten Wissenschaftler zunehmende Massenvermehrungen bei Quallen. Die Folgen dieser explosionsartigen Vermehrungen sind bekannt: verletzte Badegäste, verstopfte Fischernetze, Nahrungskonkurrenz für Fische, Fraßdruck auf Fischeier und -larven. Die möglichen Ursachen dieser Massenvermehrungen sind durchaus umstritten. Ein wesentliches Problem ist vermutlich die Überfischung der Meere. Zooplankton fressende Fische sind Nahrungskonkurrenten der Quallen. Fehlen die Fische, bietet sich den Quallen ein reich gedeckter Tisch. Bekannt ist inzwischen auch, dass Quallen robuster als viele Fisch-



5.8 > Mikroskopisch kleine Ruderfußkrebse wie diese *Calanus*-Art sind weit verbreitet und gehören zu den wichtigen Nahrungsorganismen der Fische.

arten sind und deutlich niedrigere Sauerstoffkonzentrationen ertragen. Sauerstoffmangel im Meer wiederum tritt zunehmend infolge der Eutrophierung auf. Durch Eutrophierung bildet sich mehr Biomasse. Damit sinkt auch mehr organische Substanz ins Tiefenwasser ab, die dort von sauerstoffzehrenden Mikroorganismen abgebaut wird. Die Folge ist Sauerstoffmangel. Der Klimawandel kann diese Situation noch verschärfen, denn er führt zu einer Erwärmung der Meeresoberfläche. Dadurch werden Austauschprozesse verlangsamt, weil sich das sauerstoffreiche Oberflächenwasser weniger mit dem kalten Tiefenwasser mischt. Durch die Mikroorganismen in der Tiefe gezehrter Sauerstoff wird nur in geringem Maße ersetzt. Zunehmende Quallenplagen könnten somit die Folge kombinierter Stressoren sein.

Der Klimawandel wird also zu einer Neustrukturierung der pelagischen Lebensgemeinschaften führen, was Nachteile für die klassische Nahrungskette Phytoplankton – Zooplankton – Fische haben wird. Quallen hingegen werden davon profitieren. Es ist anzunehmen, dass die Überfischung und die Eutrophierung der Küstengewässer zudem synergistische Effekte haben werden, die die Situation weiter verschärfen.

Neue Arten in fremden Revieren

> Schon lange verfrachten Menschen Lebewesen von einem Teil der Welt in einen anderen – manchmal unbeabsichtigt, manchmal aber auch bewusst. Ganze Ökosysteme wurden dadurch bereits verändert. Der Klimawandel könnte diese Probleme verschärfen, denn mit der Erwärmung des Wassers könnten zuwandernde Arten häufiger gute Lebensbedingungen vorfinden.

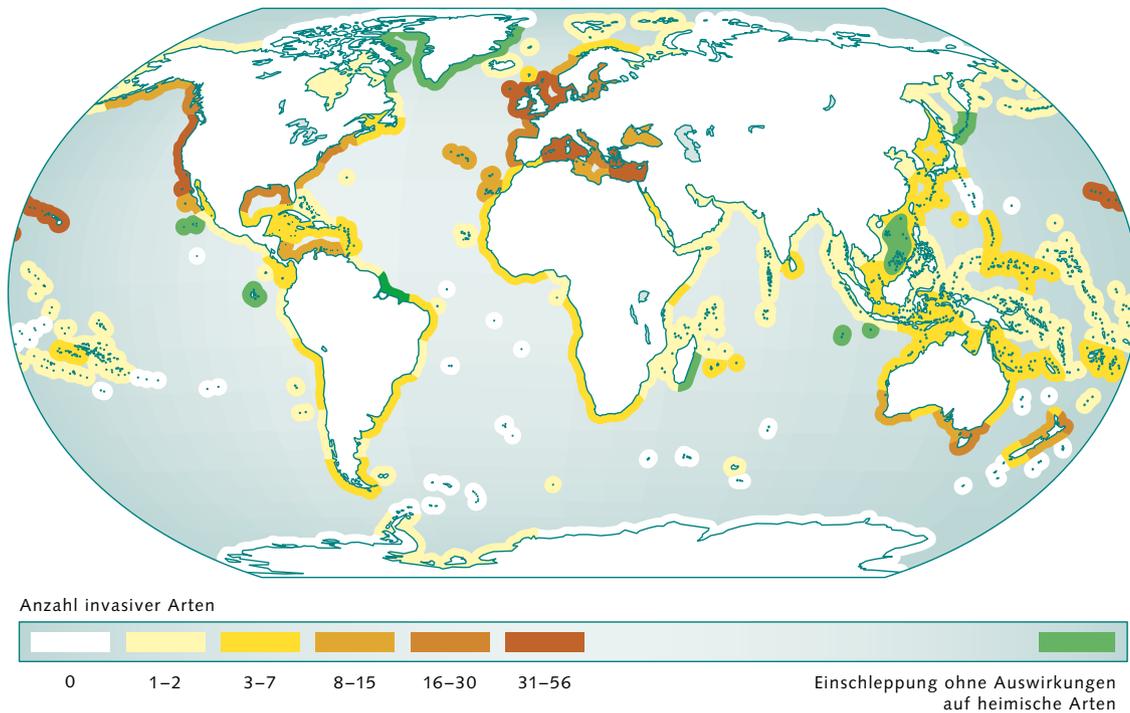
Die Ursachen der Verschleppung von Meeresorganismen

Seit Menschen die Meere befahren, reisen mit ihnen auch andere Arten um den Globus. Dabei handelt es sich nicht nur um nützliche Pflanzen und Tiere oder Schädlinge wie Krankheitserreger oder Ratten, sondern vor allem auch um Meeresorganismen. Historische Aufzeichnungen und archäologische Funde belegen, dass Segelschiffe der frühen Entdecker von bis zu 150 verschiedenen Meeresorganismen besiedelt waren, die auf oder in den hölzernen Rümpfen lebten oder Metallteile wie die Ankerkette als **Substrat** nutzten. Störte der Bewuchs, wurden die Lebewesen unterwegs abgekratzt. In anderen Fällen blieben die Organismen auf dem verrottenden Rumpf zurück, wenn ein Schiff nicht mehr zu reparieren war. Es überrascht deshalb kaum, dass viele holzbohrende Arten wie der Schiffsbohrwurm *Teredo navalis* heute weltweit verbreitet sind. Ob diese Arten schon vor Beginn der europäischen Entdeckungsreisen Kosmopoliten waren, lässt sich heute allerdings nicht mehr feststellen. Wie der Mensch zur Ausbreitung vieler Arten beiträgt, weiß man aber sehr genau. Durch Globalisierung, Handel und Tourismus werden immer mehr Meeresorganismen über die Ozeane transportiert. Es wird geschätzt, dass allein in den Ballastwassertanks von Frachtern, die den Schiffen Gleichgewicht verleihen, ständig mehrere Zehntausend verschiedene Arten zwischen geographisch weit entfernten Regionen unterwegs sind. Die meisten dieser Exoten sterben während der Reise oder am Zielort, und von den Überlebenden schafft es nur ein Bruchteil, sich erfolgreich zu vermehren und eine neue **Population** aufzubauen. Doch, wie eine Untersuchung in sechs Häfen in Nordamerika, Australien und Neuseeland zeigte, etabliert sich trotz aller Hinder-

nisse ein- bis zweimal pro Jahr an jedem der untersuchten Orte eine neue Art erfolgreich.

Geographische Barrieren können auch durch Kanäle überwunden werden. So sind bereits mehr als 300 Spezies durch den Suezkanal aus dem Indischen Ozean ins Mittelmeer eingewandert. Darüber hinaus werden Flüsse und andere Wasserstraßen für den Artenaustausch, wie etwa zwischen der Ostsee und dem Schwarzen Meer, verantwortlich gemacht. Eine weitere wichtige Ursache für die Verschleppung von Meeresorganismen ist der Handel mit lebenden Meeresorganismen für die Aquakultur, die Aquaristik oder die Nahrungsmittelindustrie.

Fachleute teilen die Küstengewässer der Welt in insgesamt 232 Ökoregionen auf, die entweder durch geographische Barrieren wie etwa Landbrücken voneinander getrennt sind oder sich durch unterschiedliche Umweltbedingungen wie etwa den Salzgehalt deutlich voneinander unterscheiden. Wie eine Analyse aus dem Jahr 2008 ergab, wurden durch den Menschen bereits in mindestens 84 Prozent dieser 232 Ökoregionen neue Arten eingeschleppt. Untersuchungen in Nord- und Ostsee haben ergeben, dass sich dort jeweils mindestens 80 bis 100 exotische Arten etablieren konnten. In der Bucht von San Francisco wurden bereits sogar 212 fremde Arten nachgewiesen, und für die Hawaii-Inseln geht man davon aus, dass etwa ein Viertel der ohne Mikroskop zu erkennenden Meeresorganismen eingeschleppt sind. Über die Verbreitung von Mikroorganismen und anderen Lebewesen, die sich nur schwer bestimmen lassen, weiß man aber noch relativ wenig. Lückenhaft sind die Bestandsaufnahmen auch für viele Meeresgebiete, die sich nur schwer erreichen lassen. Fachleute gehen grundsätzlich davon aus, dass sich fremde Organismen künftig durch die Klimaerwärmung in manchen Regionen noch besser etablieren



5.9 > In bestimmten Küsten-Ökoregionen der Erde machen sich invasive Arten besonders häufig breit. Betroffen sind vor allem die gemäßigten Breiten. Regionen, in denen Einwanderer heimische Arten nicht beeinträchtigen oder verdrängen, sind grün markiert.

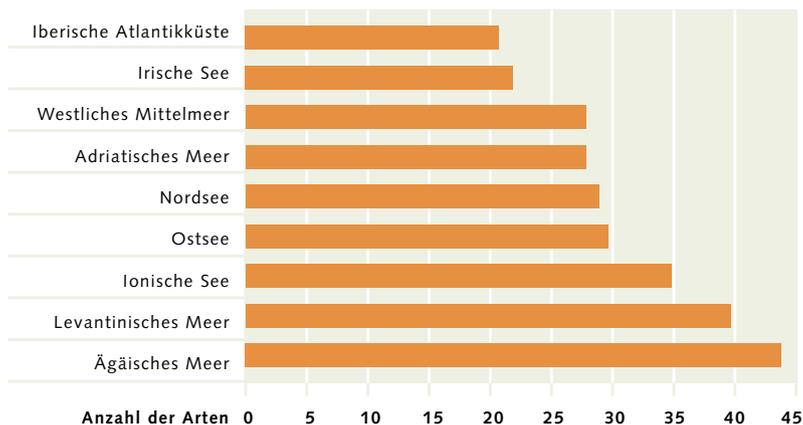
können. Wärme liebende Lebewesen aus Südostasien zum Beispiel könnten dann auch in Gebieten Fuß fassen, die bislang für sie zu kalt waren.

Neue Arten verändern die Biodiversität

Viele Exoten fügen sich in die einheimische Flora und Fauna ein, ohne diese zu dominieren. Damit erhöhen sie die Vielfalt der Artengemeinschaft. Durch Naturkatastrophen können mitunter Lebensräume völlig zerstört werden und ganze Artengemeinschaften aussterben. In solchen Fällen entwickelt sich in den betroffenen Regionen häufig durch Neueinwanderung ein ganz neues Artengefüge. Ein Beispiel dafür ist die Ostsee, die erst nach der letzten Eiszeit – also in erdgeschichtlich jüngster Zeit – entstand und in ihrer heutigen Form als Brackwassermeer nur etwa 7000 Jahre alt ist. Dort hat sich mit der Alge *Fucus radicans* nur eine einzige Art evolutiv entwickelt. Alle anderen heute heimischen Arten sind aus Lebensräumen wie der Nordsee oder dem Weißen Meer eingewandert. Die Artenwanderung ist also nicht immer problematisch oder durch den Menschen verursacht.

Seit Christoph Kolumbus 1492 Amerika erreichte, hat der Austausch zwischen weit entfernten Erdteilen ständig zugenommen. Damit wird es immer wahrscheinlicher,

dass es Arten gelingt, auch solche Ökoregionen zu erreichen, die weit von ihrem natürlichen Herkunftsgebiet entfernt sind. Mitunter können neue Arten dann zum Problem werden. Sie verdrängen heimische Arten und können damit die Biodiversität, die Artenvielfalt, verringern. Das kann besonders dann passieren, wenn es am neuen Standort keine Feinde für sie gibt. Die australische Grünalge *Caulerpa taxifolia* zum Beispiel hatte 15 Jahre nach ihrer ersten Entdeckung bei Monaco bereits 97 Prozent aller geeigneten Böden zwischen Toulon und Genua überwachsen und sich bis in die nördliche Adria und nach Sizilien ausgebreitet. Die Alge bildet Abwehrstoffe, die sie für die meisten Pflanzenfresser ungenießbar macht. Organismen aber, die sich von *Caulerpa* ernähren und an die Abwehrstoffe angepasst sind, fehlen im Mittelmeer. Auch die asiatischen Algen *Sargassum muticum* und *Gracilaria vermiculophylla* bildeten nach ihrer Einschleppung nach Europa an manchen Küsten monokulturähnliche Bestände. Der nordpazifische Seestern *Asterias amurensis* wiederum etablierte sich Mitte der 1980er Jahre in Südostaustralien. Zwei Jahre nach seiner ersten Entdeckung in Port Philipp Bay, einer großen Bucht vor Melbourne, zählte man dort bereits mehr als 100 Millionen Exemplare. Auch für den Seestern gab es in seinem neuen Lebensraum so gut wie keine Feinde, sodass er einheimische Seesterne,



5.10 > Anzahl ökologisch oder wirtschaftlich problematischer eingeschleppter Arten in besonders betroffenen Meeresregionen Europas.

Muscheln, Krebse und Schnecken stark dezimieren konnte. Die Biomasse der Seesterne übertraf schließlich sogar die Gesamtmenge aller in der Region gefischten Meerestiere.

In 78 Prozent der 232 Küsten-Ökoregionen der Welt wurden bereits derartige Fälle nachgewiesen, in denen neu eingeschleppte Arten einheimische Arten verdrängten. Besonders aus den gemäßigten Breiten, jenen Gebieten der Erde, in denen es weder besonders heiß noch kalt ist, sind viele Fälle bekannt. Abgesehen von Hawaii und Florida liegen die 20 am stärksten von eingeschleppten Meeresorganismen heimgesuchten Küsten-Ökoregionen ausschließlich im gemäßigten Nordatlantik und Nordpazifik oder in Südaustralien, und immerhin neun dieser Regionen liegen in Europa. Standorte wie die Bucht von San Francisco werden inzwischen von eingeschleppten Arten dominiert. Dort werden die fremden Spezies immer öfter als eine Bedrohung für die marine Biodiversität betrachtet, obwohl bisher noch kein einziger Fall bekannt geworden ist, in dem eingeschleppte Arten zum Aussterben einheimischer Organismen geführt hätten.

Die wirtschaftlichen Folgen der Einschleppung fremder Arten

Eingeschleppte Meeresorganismen können der Fischerei wirtschaftliche Einbußen beschern. So hat die aus Ame-

rika stammende Rippenqualle *Mnemiopsis leidyi* vor 25 Jahren zum Zusammenbruch der Küstenfischerei im Schwarzen Meer geführt, das zu jener Zeit bereits durch Überfischung und Eutrophierung ökologisch geschwächt war. 1982 wurden dort erstmals Exemplare gesichtet, die wahrscheinlich mit Ballastwasser eingeschleppt worden waren. Die Art breitete sich rasch aus und verdrängte dabei einheimische Arten, insbesondere Fische, von deren Eiern und Larven sie sich ernährte. Die Erträge der Fischerei brachen um fast 90 Prozent ein. 1989 zählte man dort mit 240 Exemplaren pro Kubikmeter Wasser die meisten *M. leidyi* weltweit. Erst die unbeabsichtigte Einführung der Rippenqualle *Beroe ovata*, eines Fressfeinds, konnte die Population zurückdrängen und eine Erholung der Fischbestände ermöglichen. Auch an der nordamerikanischen Ostküste machen eingeschleppte Arten Probleme. Dort verursachte die europäische Strandkrabbe *Carcinus maenas* Ertragsrückgänge in der Muschelfischerei.

Gelegentlich geht von neu eingewanderten Meeresorganismen sogar eine Gefahr für die Gesundheit des Menschen aus. Ein Beispiel sind die Mikroalgen der Gattung *Alexandrium*, die Nervengifte bildet. *Alexandrium*-Arten wurden in letzter Zeit an vielen Küsten entdeckt, an denen sie vor wenigen Jahrzehnten wahrscheinlich noch nicht vorgekommen waren. Solche Phänomene können durchaus negative Folgen für den Tourismus haben.

Fremde Arten werden nicht nur im Ballastwasser von Schiffen über die Meere transportiert. Häufig siedeln Unternehmer aus anderen Ländern stammende marine Organismen für die Zucht in Aquakulturen in artfremden Lebensräumen an. Dies mag kurzfristig wirtschaftliche Gewinne bringen. Es besteht aber die Gefahr, dass die importierte Art einheimische verdrängt und so mittel- oder langfristig zu ökonomischen oder ökologischen Schäden führt. Studien haben ergeben, dass von 269 untersuchten eingeschleppten Meeresorganismen immerhin 34 Prozent bewusst für die Zucht in Aquakulturen importiert worden sind. Ein Beispiel ist die Japanische Riesenauster *Crassostrea gigas*, die in mindestens 45 Ökoregionen angesiedelt wurde und in diesen heimisch geworden ist. Insbesondere zwischen 1964 und 1980 wurden große Mengen von Saataustern nach Europa importiert. Die ökologischen Auswirkungen waren in vielen Fällen verheerend. In Nordamerika und Australien bildet die Riesen-

auster dichte Bestände, die die einheimischen Arten verdrängen. Häufig bewirken die Muscheln außerdem eine Eutrophierung der Küstengewässer, da sie unverdauliche Partikel mit einem selbst produzierten Schleim ausscheiden – eine zusätzliche organische Belastung des Wassers. Auch in Frankreich wurde beobachtet, dass Riesenaustern zur Verschmutzung der Gewässer führen. Außerdem wurde ein Rückgang des Zooplanktons und auch größerer Tiere beobachtet. In den Niederlanden und in Deutschland neigt die Riesenauster dazu, auf Miesmuschelbänken zu siedeln. Damit verdrängt sie eine traditionell fischereilich genutzte Art.

Man nimmt an, dass neben der Riesenauster mindestens 32 weitere Arten unbeabsichtigt in die Nordsee eingeführt wurden – darunter die Pantoffelschnecke *Crepidula fornicata* und die Alge *Gracilaria vermiculophylla*, die sich beide als ökologisch problematisch erwiesen. Um künftig derartige Schäden zu vermeiden, könnte ein einheitliches Bewertungssystem hilfreich sein. Mit diesem könnte man einschätzen, wie groß das Potenzial einer Art ist, andere Organismen zu verdrängen. Zudem könnte man damit abwägen, welche Vor- und Nachteile die Einführung einer fremden Art in einen Lebensraum hat.

Seit geraumer Zeit versuchen Experten durch Vergleiche zwischen problematischen und harmlosen eingeschleppten Arten Eigenschaften zu identifizieren, die auf ein hohes Verdrängungspotenzial hinweisen. So schwimmen beispielsweise manche Algenarten auf, während andere absinken. Davon hängt ganz entscheidend ab, ob die Art verdriftet und sich ausbreiten kann. Bislang ist es aber schwierig, von einzelnen Eigenschaften einer Art auf ihr Verdrängungspotenzial zu schließen. Daher wird es vielleicht niemals möglich sein, eine sichere Vorhersage über das Verhalten einer Art an einem neuen Standort zu machen, weil zahlreiche Einflussgrößen eine Rolle spielen. Erschwert wird die Vorhersage dadurch, dass sich eine neue Art über einen längeren Zeitraum und mehrere Phasen im neuen Lebensraum etabliert: Auf eine Expansionsphase, in der sich die Art stark verbreitet, folgt meist zunächst ein Rückgang, ehe sich die Art völlig an den neuen Lebensraum angepasst hat. Will man das Verdrängungspotenzial einer Art korrekt einschätzen, muss man wissen, in welcher dieser Phasen sich die Art gerade befindet. Das aber lässt sich nur schwer feststellen.

Maßnahmen gegen die Arteinschleppung

Im Jahr 2004 wurde von der IMO (International Maritime Organization, Internationale Seeschifffahrts-Organisation) eine Konvention zur Ballastwasserbehandlung verabschiedet. Die Erstunterzeichnerstaaten, die zusammen für etwa ein Viertel des weltweiten Seeverkehrs verantwortlich sind, verpflichteten sich, in ihren Seehäfen Anlagen zur Behandlung von Ballastwasser zu installieren. 2016 sind solche Anlagen auch an Bord von Schiffen vorgeschrieben. Verstärkt wird die internationale Zusammenarbeit auch durch die Initiativen des ICES (International Council for the Exploration of the Sea, Internationaler Rat für Meeresforschung), der Mitte der 1990er Jahre einen Verhaltenskodex zum Umgang mit exotischen Arten in der Aquakultur verabschiedete und unter anderem Quarantänemaßnahmen empfahl. Der gemeinsame europäische Markt hat den Artaustausch zwischen den Mitgliedstaaten der EU erleichtert. Der Transport von Saataustern beispielsweise hat als Ursache der Arteinschleppung innerhalb der EU inzwischen eine ähnliche Bedeutung wie das Ballastwasser. Zugleich wurde der Import von Austern aus Nicht-EU-Gebieten weitgehend eingestellt. Die internationale Zusammenarbeit innerhalb der EU hat also einerseits den Schutz vor Arteinschleppung aus außereuropäischen Bioregionen verbessert, andererseits aber den Artaustausch zwischen den verschiedenen Bioregionen der EU eher verstärkt.

Lassen sich Einschleppungen künftig vermeiden?

Beim Umgang mit exotischen Meeresorganismen ist Vorsicht geboten, denn Arteinschleppungen ins Meer sind meist irreversibel. Eine mechanische Beseitigung bereits etablierter Arten ist praktisch unmöglich. Sie würde aufwendige Taucheinsätze erfordern. Viele Arten durchleben mikroskopische Überdauerungs- oder Larvenstadien, in denen sie frei schwimmen. In solchen Phasen entziehen sich die Organismen völlig der Kontrolle. Es ist denkbar, natürliche Feinde im neuen Lebensraum anzusiedeln, aber auch diese Organismen könnten sich später als Bedrohung erweisen. Politik und Umweltmanagement werden daher verstärkt die wesentlichen Ursachen der Arteinschleppung kontrollieren müssen. Wichtig wäre dabei eine möglichst lückenlose Überwachung, etwa von Aquakulturen oder Ballastwasser. Alleingänge auf nationaler oder lokaler Ebene dürften aber kaum von Erfolg gekrönt sein. Aussichtsreicher sind internationale Strategien, die von allen Anrainern einer Ökoregion getragen werden.

Die Rolle der biologischen Vielfalt im Meer

> Lange Zeit war unklar, inwieweit die biologische Vielfalt im Meer von Bedeutung ist. Inzwischen gilt als sicher, dass sie ein Ökosystem funktionstüchtig und leistungsfähig hält. Außerdem macht sie Lebensräume widerstandsfähiger gegen Umweltveränderungen. Doch das eingespielte Artgefüge gerät mehr und mehr durcheinander.

Das schnelle Verschwinden der Arten

Seit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert hat die biologische Vielfalt im Meer dramatisch abgenommen. Die Hauptursachen für den Verlust sind die Zerstörung von Lebensräumen durch Schleppnetzfisherei, die Verschmutzung und Überdüngung der Meere sowie der voranschreitende Klimawandel. Die biologische Vielfalt schrumpft dabei vermutlich schneller als jemals zuvor in der Erdgeschichte. Gleichzeitig kennt man nur einen Bruchteil der Arten in der Tiefsee oder den Polarmeeren, sodass der Artenverlust im Meer noch weniger als der an Land erfasst und bewertet werden kann.

Warum ist biologische Vielfalt im Meer wichtig?

Jedes Ökosystem erbringt bestimmte Leistungen, die für Lebewesen essenziell sind. Eine der bedeutendsten Leistungen von Meeresökosystemen ist der Aufbau pflanzlicher Biomasse aus Sonnenlicht und Nährstoffen (Primärproduktion), die Nahrungsgrundlage aller anderen Arten im Meer und letztlich auch des Menschen ist. Etwa die Hälfte der weltweiten Primärproduktion geht auf mikroskopisch kleine Pflanzen zurück, das Phytoplankton im Meer, das wächst und sich teilt. Eine weitere Ökosystemleistung ist die Bildung von Lebensräumen, sogenannten Strukturen, in Küstenökosystemen. So bilden Großalgen, Seegras oder Korallen großräumige unterseeische Wälder, Unterwasserwiesen oder Riffe, die Lebensraum für viele weitere Arten wie Schnecken, Krebse und Fische sind. Die Algenwälder und Seegraswiesen in der Ostsee sind lebenswichtige **Habitats** für Fischbrut und Jungfische, die hier heranwachsen, bevor sie als Erwachsene ins offene

Meer schwimmen. Schnecken und kleine Krebse wiederum weiden von den Großalgen oder vom Seegras aufwachsende Mikroalgen ab. Damit stellen sie sicher, dass die strukturbildenden Pflanzen nicht überwuchert werden und ausreichend wachsen können – das ist ihre Ökosystemleistung. Die mikroalgenfressenden Schnecken und Krebse selbst sind Nahrungsgrundlage größerer räubernder Krebse und Fische.

Da Seegras und Großalgen langlebig und eine schlechte Futterquelle für weidende Krebse und Schnecken sind, werden sie recht alt. Sie speichern in ihrer Biomasse für lange Zeit Nährstoffe wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die aus der Landwirtschaft durch die Flüsse ins Meer gespült werden. Seegras und Großalgen fungieren daher in Küstenökosystemen als eine Art biologische Kläranlage.

Wissenschaftler haben sich gefragt, ob der dramatische Verlust der biologischen Vielfalt Konsequenzen für das stabile Funktionieren von Ökosystemen hat. Diese Frage kann nach zehn Jahren intensiver Forschung mit einem klaren Ja beantwortet werden. Vor allem Experimente in Küstenökosystemen wie Seegraswiesen oder Großalgenwäldern haben gezeigt, dass die biologische Vielfalt im Meer unerlässlich ist, um die oben erwähnten Ökosystemleistungen aufrechtzuerhalten. In diesen Experimenten wurde auf unterschiedliche Weise die Artenvielfalt verringert, um die Ökosystemleistungen von artenreichen und artenarmen Gebieten miteinander zu vergleichen. In einem Freilandexperiment wurde beispielsweise die Anzahl der Großalgenarten künstlich reduziert, indem man einige zu Beginn der Wachstumsperiode entfernte. Tatsächlich verringerte sich in diesem artenarmen Lebensraum die Algenbiomasse insgesamt – und damit auch die Nahrung für die Konsumenten sowie die Zahl der verfüg-



5.11 > In Kelpwäldern, wie diesem vor Kalifornien, leben Hunderte Fischarten, unter anderem der gelbliche Greenie, *Sebastes flavidus*.

baren **Habitats**. In einem anderen Experiment wurde die Artenanzahl der Weidegänger reduziert, welche die auf dem Seegras wachsenden Mikroalgen abweiden. Es stellte sich heraus, dass artenarme Weidegängergemeinschaften insgesamt weniger Mikroalgen abgrasen als artenreiche. Letztlich führte der Artenverlust zu verringertem Seegraswachstum, weil die aufwachsenden Mikroalgen die Photosynthese des Seegrases behindern. Die Experimente zeigen, dass sich die Verminderung der biologischen Vielfalt in beiden Fällen negativ auf die Strukturen des Lebensraums auswirkt – ganz gleich, ob man die Artenzahl der Produzenten, der Großalgen, oder die der Konsumenten wie beispielsweise der Weidegänger verringert.

Wie funktioniert biologische Vielfalt?

Verschiedene Arten haben unterschiedliche physikalische und biologische Ansprüche. Genau damit lassen sich die positiven Effekte biologischer Vielfalt erklären. So gibt es Algenarten, die optimal unter starker Lichteinstrahlung wachsen, während andere Schwachlicht bevorzugen. Das

führt dazu, dass die eine Algenart dem Licht entgegenwächst und eine Algenkrone ähnlich wie eine Baumkrone bildet, während die andere optimal darunter im Schatten wächst. Dies hat zwei Konsequenzen: Erstens können beide Arten stabil zusammenleben, ohne sich gegenseitig zu verdrängen. Zweitens nutzen beide Arten zusammen das Licht optimal aus. Sie bilden gemeinsam mehr Nahrung für andere Arten als eine Art allein. Diese komplementäre Nutzung der vorhandenen Ressourcen, der sogenannte Komplementaritätseffekt, ist ein wichtiges positives Charakteristikum biologischer Vielfalt.

Andererseits wird eine Ökosystemleistung wie das Abweiden von Seegras häufig von einzelnen sehr effektiven Arten erbracht. Ein Beispiel: Wirbellose Algenfresser wie etwa Asseln und Schnecken unterscheiden sich in ihrer Nahrungspräferenz. Weidende Schnecken haben eine kräftige Raspelzunge und weiden damit vorzugsweise flache Mikroalgenrasen ab, während Asseln eher hoch wachsende fadenförmige Algen bevorzugen. Ist die Algenflora auf Seegrasblättern von flach wachsenden Mikroalgen dominiert, wird das Seegras hauptsächlich von den

Kelpwald

Als Kelpwald bezeichnet man dichte Algenwälder, in denen die Kelpalgen dominieren. Dabei handelt es sich um teils mehrere Meter lange dünne Braun- und Rotalgen. Kelpwälder kommen vor allem an der Westküste Amerikas, an der Küste Argentiniens, vor der Westküste Afrikas sowie vor Australien und Neuseeland vor. Sie sind einzigartige Ökosysteme mit charakteristischen Artengemeinschaften.

Schnecken beweidet. Enthält das Wasser viele Nährstoffe, dominieren eher fädige Algen, und Asseln halten das Seegras von Algen frei. Welche der beiden Arten diese Leistung übernimmt, hängt also von der jeweiligen Umweltbedingung ab. Wird eine Ökosystemleistung hauptsächlich durch eine Art und nicht von mehreren gleichzeitig erbracht, spricht man vom Selektionseffekt. Die jeweilige Umwelt selektiert sozusagen die momentan optimal funktionierende Art.

Wichtig ist nicht allein die Anzahl der Arten. Von Bedeutung ist auch, wie viele Individuen der verschiedenen Arten vorkommen beziehungsweise welche Art dominant ist. Der Selektionseffekt bewirkt, dass sich natürliche Gemeinschaften meist aus wenigen dominanten und vielen seltenen Arten zusammensetzen. Unter stabilen Umweltbedingungen werden Ökosystemleistungen, wie der Aufbau von Pflanzenbiomasse, deshalb häufig durch einzelne dominante Arten mit optimalen Merkmalen aufrechterhalten. Die vielen seltenen Arten spielen hierbei zunächst eine untergeordnete Rolle. Ändern sich aber die Umweltbedingungen, sind sie häufig am Zug. So kann eine zuvor noch unbedeutende Art plötzlich zur vorherrschenden werden.

Auch im Meer dominieren an einem Standort oft sehr wenige Arten. Es gibt sogar Extremfälle, in denen eine einzige Art überwiegt. Zu diesen Ökosystemen zählen unter anderem Seegraswiesen oder Kelpwälder. Hier wird die biologische Vielfalt nicht durch den Artenreichtum, sondern durch die genotypische Vielfalt der Seegraspflanzen derselben Art gewährleistet: Zwar gehören alle Pflanzen zur selben Spezies, in ihrem Erbgut aber gibt es versteckte Unterschiede.

Wie anderswo die Artenvielfalt hält in der Seegraswiese die genotypische Vielfalt die Ökosystemleistung aufrecht – also die unsichtbaren genetischen Unterschiede zwischen den Individuen derselben Art. So zeigten Seegraswiesen, in denen man experimentell mehrere verschiedene Genotypen zusammen anpflanzte, höhere Sprossdichten und eine höhere Gesamtbiomasse. Darüber hinaus erhöhte sich auch die Zahl der Weidegänger. Durch die vergrößerte genotypische Vielfalt verbesserte sich folglich insgesamt die Ökosystemleistung Nahrungsproduktion. Es stand mehr Seegras zur Verfügung und auch für räubernde Fische verbesserte sich das Nahrungsangebot, weil es

viele Weidegänger gab. Mehr noch: Selbst die Widerstandskraft von Ökosystemen gegenüber bestimmten Störungen und Umweltveränderungen kann durch genotypische Vielfalt verbessert werden. So erholte sich ein Seegrasgebiet mit hoher genotypischer Vielfalt nach einer ungewöhnlichen Hitzewelle schneller als Gebiete mit niedriger Vielfalt.

Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird vermutlich die Vielfalt der seltenen Arten oder Genotypen erheblich an Bedeutung gewinnen. Diese sind eine potenzielle „biologische Versicherung“ für die Aufrechterhaltung von Ökosystemleistungen. Sie können noch unbekannte Merkmale oder genetische Informationen besitzen, die sie unter den neuen Umweltbedingungen anpassungsfähig und damit widerstandsfähiger und produktiver machen als die ursprünglich dominanten Arten oder Genotypen.

Wie gefährdet ist die biologische Vielfalt?

Durch rapide Veränderungen von Wassertemperatur, Salzgehalt und der Nährstoffkonzentration, aber auch durch Überfischung, Lebensraumzerstörung und eingeschleppte Arten wird die biologische Vielfalt im Meer weltweit mit wachsender Geschwindigkeit verloren gehen. Daran gibt es keinen Zweifel: In der Summe sind die Störungen so groß, dass weitere Arten verschwinden werden. Damit verringert sich auch die stabilisierende Wirkung der ehemals vielfältigen Lebensgemeinschaften, was zu gefährlichen Effekten führen kann – zu Lebensräumen, die ihre Ökosystemleistung nicht mehr erbringen können oder an Widerstandskraft verlieren. So verwandeln sich Korallenriffe mit hoher biologischer Vielfalt durch Überfischung und Nährstoffeintrag in artenarme Lebensräume, in denen wenige Algenarten dominieren. Es fehlt an Riffischen, die die Korallen ursprünglich von aufwachsenden Algen frei gehalten haben, sodass sich nun keine neuen Korallenlarven ansiedeln können.

Die europäischen Blasentangwälder wiederum werden durch artenarme Lebensgemeinschaften verdrängt, die von Fadenalgen dominiert sind. Fadenalgen aber sind ein schlechter Lebensraum für Jungfische und andere Organismen. Zum einen produzieren sie weniger Sauerstoff, zum anderen speichern sie Nährstoffe zudem nur kurzfristig, da sie anders als Blasentangwälder vergleichsweise

kurzlebig sind und gern von Schnecken und Krebsen gefressen werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Fadenalgen und die aufgrund der nun höheren Nährstoffkonzentrationen im Meerwasser massiv wuchernden Phytoplanktonblüten die frischen Tangkeimlinge beschatten. Im Ergebnis wird deren Wachstum nachhaltig behindern. Das Verschwinden einer Art, wie in diesem Fall des

Blasentangs *Fucus vesiculosus*, der wichtige Ökosystemstrukturen schafft, kann also die Umweltbedingungen und damit auch den Lebensraum für andere Arten zu deren Nachteil verändern. In letzter Konsequenz führt das dazu, dass die biologische Vielfalt noch weiter schwindet und das Ökosystem seine Leistung künftig nicht mehr erbringen kann.

CONCLUSIO

Die Folgen des Klimawandels für die biologische Vielfalt im Meer

Der globale Klimawandel wird zwangsläufig dazu führen, dass sich in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten zahlreiche Umweltvariablen mehr oder weniger gleichzeitig verändern. Wie stark einzelne Arten und Lebensgemeinschaften davon betroffen sein werden, hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab. Noch kann niemand sicher abschätzen, inwieweit sich die Lebensbedingungen in verschiedenen marinen Ökosystemen regional verändern werden. So könnten antarktische Planktonalgen von einer Meerwassererwärmung sogar profitieren und Süßwasser liebende Arten in der östlichen Ostsee von der Aussüßung ihres Lebensraums. In manchen Lebensräumen wird die Einwanderung fremder Spezies möglicherweise sogar eine Zeit lang die Artenvielfalt erhöhen. In den meisten Fällen jedoch wird die Verschiebung von Umweltgemeinschaften zu Stress führen, der die Toleranz der Organismen übersteigt. So wird der an Kaltwasser angepasste Blasentang an seinem südlichen Verbreitungsrand vor Portugal durch die künftige Erwärmung wohl über seine Toleranzgrenzen hinaus gestresst werden. Dieser abiotische Stress könnte auch dadurch verschärft werden, dass die Veränderungen schneller eintreten, als sich die Art daran anpassen kann. Arten, die sich an die abiotischen Veränderungen nicht anpassen können, werden sich in günstigere Habitate zurückziehen müssen, um zu bestehen. Können sie sich aber nicht schnell genug

oder hinreichend verbreiten oder in ihrer neuen Lebensgemeinschaft behaupten, werden sie aussterben. In beiden Fällen sind lokale Artverschiebungen zu erwarten. Sensitive Arten verschwinden, opportunistische, anpassungsfähigere Arten hingegen werden häufiger. Zu diesen gehören auch viele eingeschleppte Spezies. Die Neustrukturierung des Artenmenüs einer Lebensgemeinschaft kann letztlich auch die Funktionalität der Gemeinschaft verändern. Welche Ökosystemleistungen die marinen Lebensgemeinschaften in Zukunft erbringen werden, ob sie die bislang existierenden besser oder schlechter ausüben, ob bislang erbrachte Leistungen völlig verschwinden oder sich nur jahreszeitlich oder räumlich verlagern, hängt davon ab, ob die ökologischen Funktionen einer verschwindenden Art durch andere bereits vorhandene oder neu eingeschleppte Arten ersetzt werden können. In einzelnen Fällen mögen Ökosysteme die regionale Veränderung der Artengemeinschaft beispielsweise durch Zuwanderung verkraften. Global gesehen aber werden Arten verloren gehen und Ökosysteme ihr Gesicht verändern. Welche Konsequenzen der Ausfall einer Art haben kann, zeigt eindrucksvoll das klassische Beispiel des in Kelpwäldern heimischen Seeotters. Seeotter ernähren sich unter anderem von Seeigeln, die Kelptange fressen. Da die Seeotter in manchen Gebieten intensiv bejagt wurden, konnten sich die Seeigel explosionsartig vermehren und die Kelpwälder großräumig zerstören. Damit veränderte sich nicht nur der Lebensraum, sondern mancherorts sogar die Strömung in Küstennähe.

6

Von der Ausbeutung einer lebenden Ressource – die Fischerei



> Jahrzehntlang wuchs die weltweite Fangmenge in der Fischerei – mit der Folge, dass viele Fischbestände heute als überfischt oder zusammengebrochen gelten. Schuld sind eine verfehlte Fischereipolitik und ein falsches Fischereimanagement. Kurzfristige Gewinne scheinen Vorrang vor einem schonenden und langfristig wirtschaftlichen Fischfang zu haben. Zwar gab es Versuche, die Situation zu ändern. Bislang sind die Bemühungen jedoch oft gescheitert.



Die Meeresfischerei – Stand der Dinge

> **Fisch ist eine wichtige Nahrungsgrundlage des Menschen. Der geschätzte Wert des weltweit angelandeten Fisches beträgt jährlich etwa 90 Milliarden US-Dollar. Damit ist die Fischerei ein bedeutender Wirtschaftszweig. Doch in vielen Regionen der Weltmeere sind die Bestände durch permanente Überfischung bedroht.**

Raubbau im großen Stil

Weltweit werden im Fischerei- und Aquakultursektor jährlich etwa 140 Millionen Tonnen Fisch gefangen beziehungsweise Fischereierzeugnisse produziert. Bis Anfang der 1990er Jahre war die Entwicklung der marinen Fischerei durch eine nahezu kontinuierliche Fangmengensteigerung gekennzeichnet. Zwischen 1950 und 1990 vervierfachen sich die weltweiten Anlandungen von unter jährlich 20 auf circa 80 Millionen Tonnen. Seit den 1990er Jahren ist die Gesamtmenge der im Meer gefangenen Fische, Muscheln und Krebse in etwa konstant geblieben.

Wegen der großen Nachfrage nach Fischereierzeugnissen wird auch die Fischzucht zunehmend ausgebaut, vor allem in asiatischen Ländern. Der Aquakultursektor gehört mit einem jährlichen Wachstum von etwa 7 Prozent zu den am stärksten expandierenden Lebensmittelsektoren. Sein Anteil an der für den Verzehr bestimmten globalen Fischproduktion beträgt heute mehr als 40 Prozent. Allerdings sind viele der in Aquakultur gezüchteten Fische Raubfische und benötigen andere Fische als Futter. Wild gefangene Fische werden deshalb zur Fütterung eingesetzt. Obwohl die Mengen je nach Fischart stark schwanken, werden im Mittel pro Kilogramm produziertem Fisch etwa 5 Kilogramm Fischmehl und -öl verfüttert. Zudem

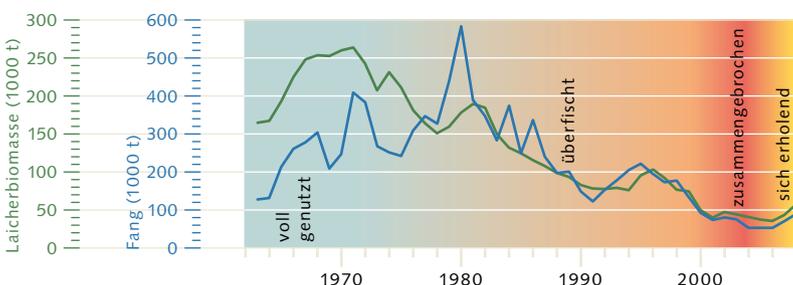
werden wild gefangene Fische als Besatz zur Aufzucht genutzt. In Aquakultur aufgezogene Fische zu verzehren bedeutet also keineswegs, dass dadurch automatisch wild lebende Fische geschützt würden.

Der Ausbau der marinen Fischerei hat erheblich zum Schrumpfen und teilweise zum Zusammenbruch der weltweiten Fischbestände beigetragen. Von der Überfischung sind besonders langlebige Arten wie etwa der Rotbarsch betroffen, die erst in hohem Alter Nachkommen zeugen. Im Extremfall kann es sogar zum Zusammenbruch des Bestands kommen. So ist beispielsweise der nordwestatlantische Kabeljaubestand vor Amerika nach Jahren der Überfischung zusammengebrochen.

Wenn der Nachwuchs ausbleibt

Auch der Nordsee-Kabeljaubestand wurde durch intensiven Fang erheblich reduziert. An ihm lassen sich geradezu exemplarisch die Folgen des Raubbaus im Meer aufzeigen (siehe Kasten übernächste Doppelseite). Als Bestand bezeichnen Experten eine sich selbst erhaltende Population einer Spezies in einer geografisch begrenzten Region. Von besonderer wissenschaftlicher Bedeutung ist der Laicherbestand, das heißt die fortpflanzungsfähigen Tiere des Fischbestands. Die Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization, FAO) gibt keine exakten Definitionen für die verschiedenen Zustandsklassen. Der Übergang zwischen dem voll genutzten und dem überfischten Zustand beispielsweise ist daher nicht ganz scharf. Als voll genutzt gilt gemäß FAO ein Bestand, der nah am maximalen Ertrag bewirtschaftet wird und keinen Raum für eine Ausweitung der Fänge lässt. Als überfischte gilt ein Bestand, der über ein nachhaltiges Maß hinaus genutzt wird. Das zeigt sich

6.1 > Das Beispiel des Nordsee-Kabeljaus zeigt, dass ein Fischbestand zusammenbricht, wenn nicht mehr ausreichend Altfische (Laicher, grün) zur Verfügung stehen, die Nachwuchs zeugen.





6.2 > Fisch wird heute im großen Stil in Aquakulturbetrieben gezüchtet, wie hier auf der chinesischen Insel Hainan. Die Fischfarmen tragen jedoch nicht zwangsläufig zum Schutz von Wildfischen bei, da dort große Mengen Fischmehl oder wild gefangener Kleinfische verfüttert werden.

daran, dass der Bestand kontinuierlich abnimmt. Zusammengebrochen ist ein Bestand, bei dem die Fänge auch bei hohem Fangaufwand deutlich unterhalb des historisch beobachteten Niveaus liegen. Der Bestand gilt als sich erholend, wenn die Fänge nach einem Zusammenbruch schließlich wieder zu steigen beginnen.

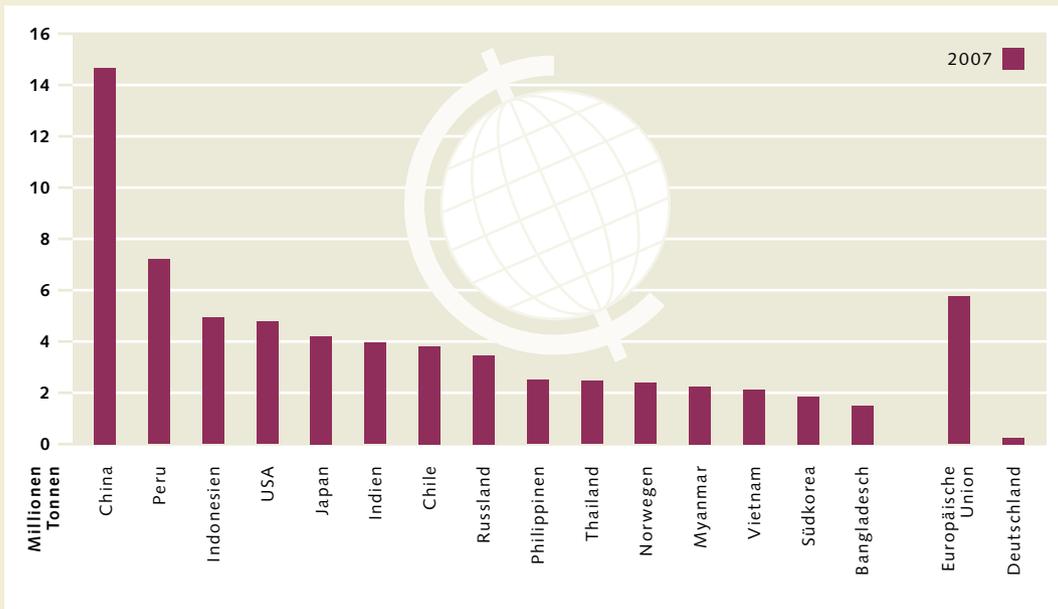
Nach Schätzungen der FAO hat der Anteil überfischter und zusammengebrochener Bestände seit den 1970er Jahren kontinuierlich zugenommen. Der Anteil noch nicht voll genutzter Bestände wiederum war 2006 um die Hälfte niedriger und lag bei etwa 20 Prozent. Ein Grund für diese Entwicklung ist die immer effizientere Fangtechnik. Dazu zählen technisch verbesserte Hilfsmittel zur Ortung der Fischschwärme und eine steigende Motorleistung der Fangschiffe.

Der Bau großer Fabrikschiffe macht es möglich, große Mengen Fisch noch auf See einzufrieren. So können Schiffe auch fernab der Anlandungshäfen auf Fischfang gehen. Die Weiterentwicklung der Fangtechniken führt auch dazu, dass in immer größeren Tiefen gefischt werden kann. Aufgrund mangelnder Alternativen greift die kom-

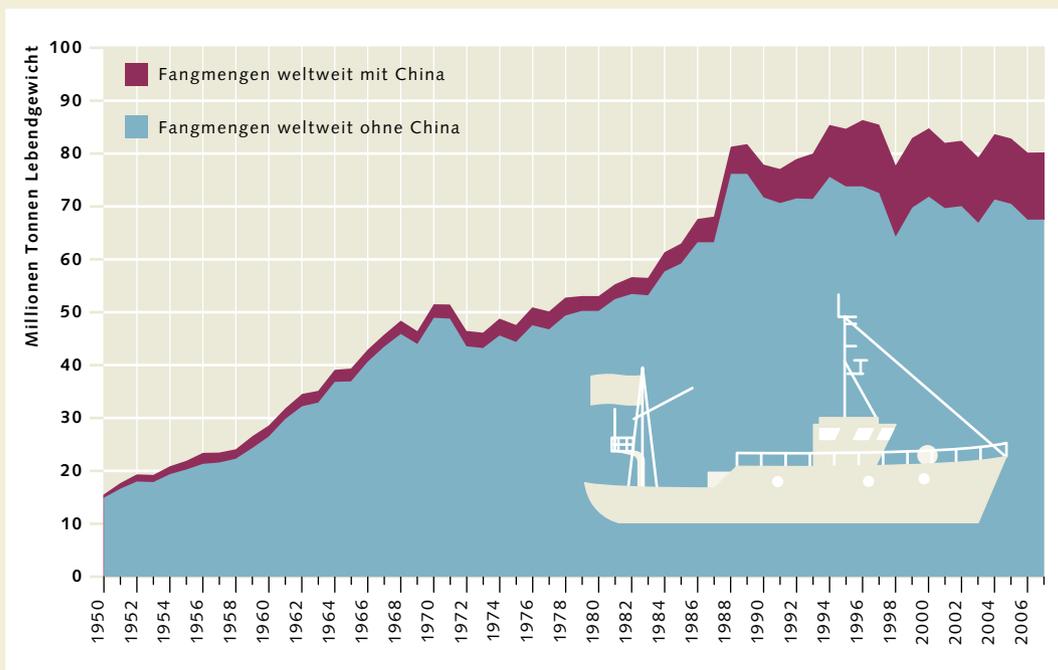
merzielle Fischerei außerdem zunehmend auf Spezies zurück, die bislang als unrentabel, minderwertig oder als für den Verzehr nicht geeignet galten.

Von der Schwierigkeit der Bestandsschätzung

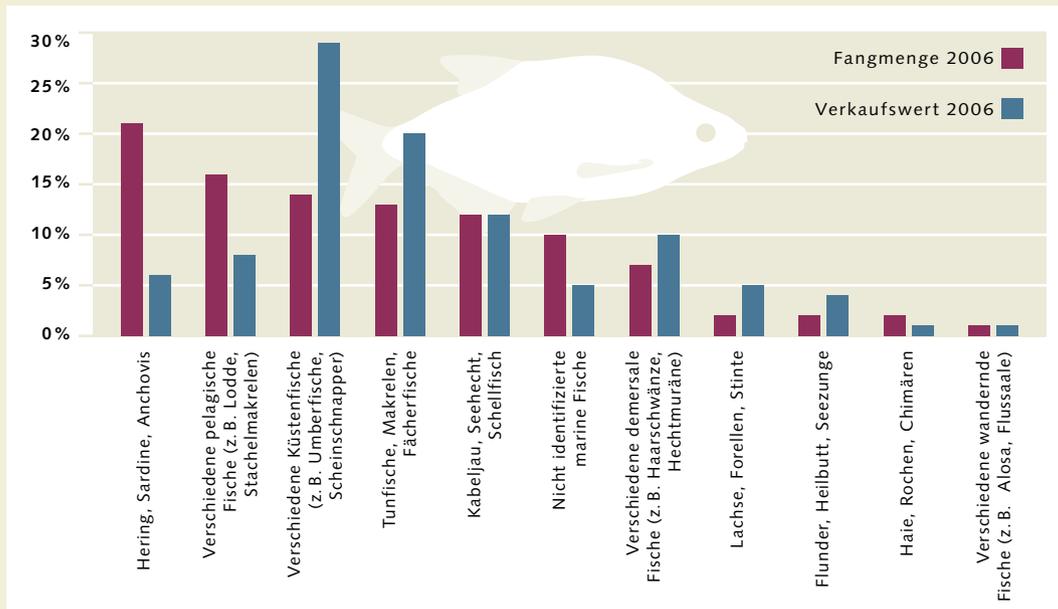
Grundsätzlich ist es schwierig, die Fischbestände richtig abzuschätzen, denn direkt zählen kann man Fische nicht. So werden die weltweiten Fischbestände heute mithilfe mathematischer Modelle geschätzt. Eine wichtige Datengrundlage sind die aktuellen Fangmengen der Fischerei. Berücksichtigt wird in den Modellen auch der Aufwand, der getrieben werden muss, um diese Menge Fisch zu fangen – beispielsweise die Zahl der Fangtage oder die Flottengrößen. Denn je weniger Fisch im Meer vorhanden ist, desto größer ist der Aufwand, um eine bestimmte Menge Fisch zu fangen. Allerdings werden heute nicht alle Fänge gemeldet, sodass die Datengrundlage lückenhaft sein kann. In die mathematischen Modelle fließen daher auch Informationen von wissenschaftlichen Probefängen ein, die Fischereibiologen regelmäßig durch-



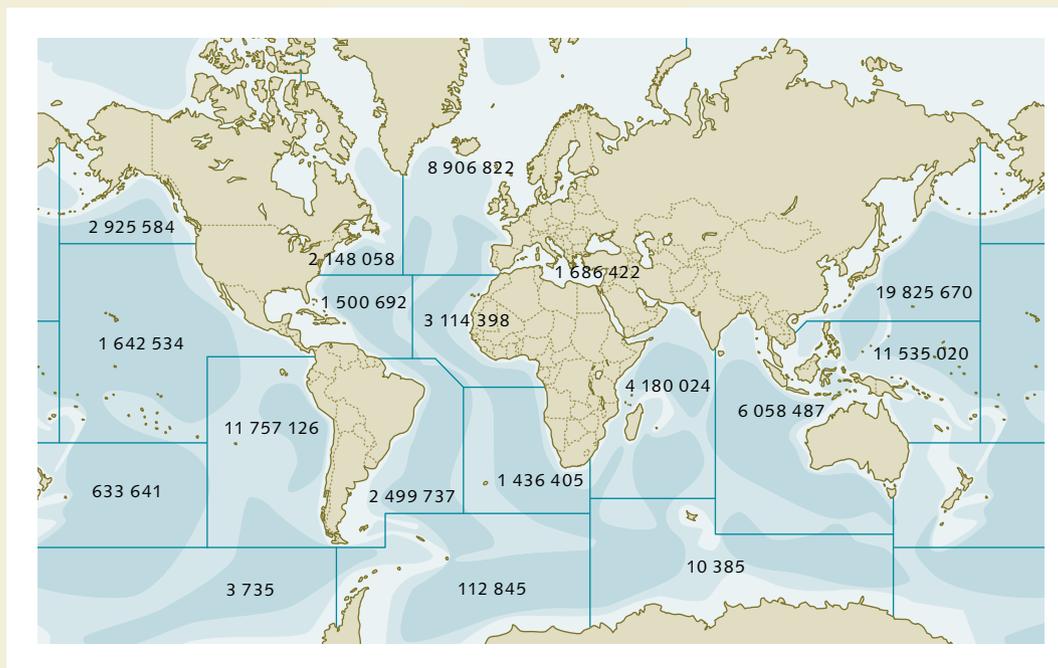
6.3 > Die wichtigsten Fischereinationen nach Fangmenge.



6.4 > Entwicklung der marinen Fangmengen seit 1950 weltweit.



6.5 > Fangmengen und Anlandewerte nach Gruppen von Fischarten.



6.6 > Fänge nach Regionen in Tonnen Lebendgewicht (2007).

Das Schicksal des Kabeljaus

Der nordatlantische Kabeljau, in manchen Regionen, insbesondere in der Ostsee, auch als Dorsch bezeichnet, war lange Zeit in weiten Teilen Nordeuropas und auf den Inseln des Nordatlantiks ein beliebtes Grundnahrungsmittel. Seine Populationsstärke war groß, und er war leicht zu fangen. Er war Hauptbestandteil des englischen Nationalgerichts Fish and Chips und in Norwegen traditionell als getrockneter Stockfisch beliebt. Die Lebensräume der bis zu 1,5 Meter großen, am Meeresgrund lebenden Fische sind die Küstengebiete des Atlantischen Ozeans. Der Kabeljau ist sowohl in Küstennähe als auch in Tiefen bis zu 600 Metern zu finden. Die Nachzucht in Aquakulturbetrieben gestaltet sich bislang schwierig. Wie abhängig die Fischereinationen von den Kabeljaubeständen waren, zeigte sich in den sogenannten Kabeljaukriegen (Cod Wars) in den Jahren von 1958 bis 1975. Es kam zu einer Reihe von politischen Auseinandersetzungen, nachdem Island, in Sorge um traditionelle Fanggründe und die gestiegene Konkurrenz durch ausländische Hochseetrawler, die Ausschließliche Wirtschaftszone (Kapitel 10) schrittweise von ehemals 3 auf 200 Seemeilen ausweitete. Island konnte damit den nordatlantischen Kabeljaubestand vor der Überfischung durch andere Fischereinationen schützen. Während der nordatlantische Bestand bis heute Erträge von etwa einer Million Tonnen jährlich liefert, ist der nordwestatlantische Bestand mit seinem Verbrei-



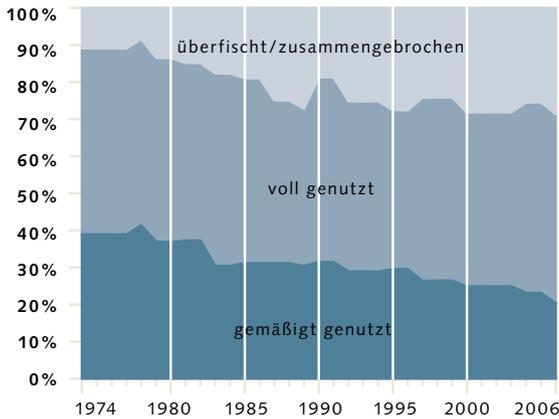
6.7 > Kampf um Fisch: Welche Bedeutung der Wirtschaftsfaktor Fischerei für manche Nationen hat, wurde während der Kabeljaukriege im Nordostatlantik deutlich. Im Streit um die Fanggründe schickten England und Island sogar Kriegsschiffe los. Am 7. Januar 1976 kollidierte das isländische Patrouillenboot „Thor“ (links, hinten) etwa 35 Seemeilen vor der isländischen Küste mit der britischen Fregatte

tungsgebiet an der Ostküste Nordamerikas ein prominentes Beispiel für misslungenes Fischereimanagement. Die mit jährlich etwa 600 000 Tonnen Fanggewicht einst sehr ertragreichen Bestände um Neufundland sind nach Jahren der Überfischung zusammengebrochen.

Wie konnte es so weit kommen? Nachdem die Fischerei jahrhundertlang vor allem nahe der Küste mit kleineren Fischerbooten betrieben wurde, begann die Fischereiwirtschaft 1950 mit dem industriellen Grundfischfang mit Schleppnetztrawlern auch in tieferen Gewässern zu fischen. Die Fangmengen stiegen kurzfristig stark an und führten zu einem Rückgang der Populationsgröße. Die Regulierungsversuche durch internationale Fangquoten und die Bemühungen Kanadas, dem Problem durch eine Ausweitung der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) Herr zu werden, konnten den drastischen Ertragsrückgang nicht mehr stoppen. Nachdem der Bestand gegen Ende der 1980er Jahre vollständig kollabierte, musste 1992 zunächst die industrielle Fischerei und 2003 schließlich auch die handwerkliche Fischerei in den Küstengemeinden Neufundlands eingestellt werden, mit erheblichen sozialen und ökonomischen Folgen. Biologen vermuten, dass das Meeresökosystem infolge der starken Eingriffe in einen neuen Zustand gekippt ist, wodurch sich die Bestände trotz eines vollständigen Fangstopps nicht wieder erholen werden.



„Andromeda“ (vorn). Aus britischer Sicht kam es zu dem Zusammenstoß, nachdem die „Thor“ versucht hatte, die Fangnetze des britischen Trawlers „Portia“ (rechts, Mitte) zu kappen. Bei dem Manöver änderte die „Thor“ abrupt den Kurs und rammte die Fregatte. Die Nationen waren so zerstritten, dass Island zeitweilig sogar die diplomatischen Beziehungen zu Großbritannien abbrach.



6.8 > Weltweit hat die Nutzungsintensität wirtschaftlich relevanter Fischbestände deutlich zugenommen.

führen. Dazu gehören auch Daten über die Altersstruktur der Fischbestände oder die Bestandsdichte.

Gemessen am Gesamtgewicht der gefangenen Fische wird die Liste der bedeutendsten Fangnationen mit deutlichem Abstand von der Volksrepublik China angeführt, deren jährliche Anlandungsmenge auf mehr als 14 Millionen Tonnen geschätzt wird. Mit jährlich etwa 7 Millionen Tonnen Fanggewicht belegt Peru den zweiten Platz. Regional betrachtet sind der Nordwestpazifik (19,8 Millionen Tonnen) und der Südostpazifik (11,8 Millionen Tonnen) die Fischereigebiete mit den größten Fangmengen überhaupt. Der mengenmäßig wichtigste Fisch ist die peruanische Sardelle mit einer Fangmenge von 7 bis 10 Millionen Tonnen, die unter anderem von Peru gefischt wird, gefolgt vom Alaska-Pollak (2,9 Millionen Tonnen) und dem Atlantik-Hering (2,4 Millionen Tonnen).

Milliarden verdienen – mit Fischmehl und Schlemmerfilets

Der geschätzte Wert der weltweit angelandeten Fische beträgt etwa 90 Milliarden US-Dollar. Noch größer ist die Wertschöpfung in der verarbeitenden Industrie, die aus dem Frischfisch diverse Fischprodukte herstellt. In ihrem ökonomischen Wert unterscheiden sich die einzelnen Fischarten stark voneinander. Dies liegt einerseits an den unterschiedlich großen Angebotsmengen auf den Weltmärkten. Andererseits sind verschiedene Fischarten bei

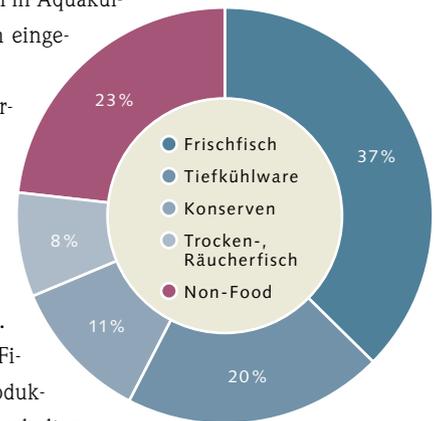
Konsumenten unterschiedlich beliebt. Für seltene Tunfischarten werden auf dem asiatischen Markt Preise von mehr als 100 Euro pro Kilo gezahlt, während Fischer für ein Kilo Sprotten nur etwa 10 bis 20 Cent bekommen.

Welche Preise für Fischereiprodukte letztendlich zu erzielen sind, hängt auch davon ab, wie die Fänge verarbeitet werden. Die Anteile der verschiedenen Verarbeitungsformen sind in den letzten Jahren in etwa konstant geblieben. Etwa drei Viertel des Fischfangs sind direkt für den menschlichen Verzehr bestimmt. Davon gelangt etwa die Hälfte als Frischfisch zu den Endverbrauchern, ein Viertel wird zu Tiefkühlware verarbeitet und ein weiteres Viertel wird durch Räuchern oder Beizen konserviert oder in Konserven auf den Markt gebracht. Die restlichen 23 Prozent des Fischfangs werden vor allem für die Futtermittelindustrie zu Fischmehl und -öl verarbeitet und zum Beispiel zur Aufzucht von Fischen in Aquakulturen oder zur Aufzucht von Hühnern eingesetzt.

Je nach Region hat die Fischerei unterschiedliche Bedeutung für die Ernährung der Menschen. Der Konsum von Fischereiprodukten schwankt vor allem in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit alternativer Nahrungsquellen und der Nähe zum Meer erheblich. Weltweit beträgt die Versorgung mit Fischereierzeugnissen, inklusive der Produkte aus inländischer Fischerei und Aquakultur, etwa 16,4 Kilogramm Lebendgewicht je Person pro Jahr (Durchschnitt 2003 bis 2005). Der Verbrauch in den Ländern der Europäischen Union (EU-15) liegt mit einem Pro-Kopf-Konsum von 25,7 Kilogramm jedoch weit über diesem Durchschnittswert. Im Gegensatz zu Ländern wie Spanien (42,6 Kilogramm) und Portugal (55,4 Kilogramm), in denen traditionell viel Fisch gegessen wird, liegt der Verbrauch an Fischereiprodukten pro Person in Deutschland mit 14,3 Kilogramm pro Jahr in etwa auf Weltniveau.

Weltweit wird die Zahl der Fischer und Aquakulturbetreiber auf etwa 43,5 Millionen geschätzt, von denen der Großteil aus den asiatischen und afrikanischen Ländern stammt. Mit mehr als 12 Millionen Beschäftigten im Fischfang und der Aquakultur entfällt der größte Anteil auf die Volksrepublik China.

6.9 > Verwertung des Fischfangs nach Mengenanteilen 2006. Beim Bereich Non-Food handelt es sich zum großen Teil um Fischmehl oder Fischöl, das in Fischfarmen oder in der Tierzucht verwendet wird.



Die Ursachen der Überfischung

> Grundsätzlich hat man verstanden, wann und warum Fischbestände zusammenbrechen. Eine entscheidende Rolle spielt die weltweite Nachfrage nach Fisch und die Intensität, mit der den Fischen nachgestellt wird. Doch spielen auch ökologische Gründe eine wichtige Rolle. Noch aber muss man die Einflussfaktoren im Detail erforschen, um die Ursachen der Überfischung restlos aufzuklären.

Das Schwinden der Fische – zu komplex für einfache Erklärungen

Ob ein Fischbestand auf lange Zeit erhalten bleibt oder aber an den Rand des Zusammenbruchs getrieben wird, hängt davon ab, wie viel man fängt. Diese Fangmenge wird vor allem durch die Höhe des betriebenen Fischereiaufwands bestimmt. Unter dem Begriff Fischereiaufwand fasst man die Flottenstruktur einer Fischerei, das Fanggerät und die Fangtechnik sowie den zeitlichen Umfang der Fangtätigkeit zusammen. Zum anderen beeinflusst die Nachfrage der Konsumenten, etwa nach bestimmten Fischarten oder Verarbeitungsformen, die Fangmengen, denn die Nachfrage bestimmt letztlich, in welchem Umfang sich der Fischereiaufwand für die Fischer lohnt.

Außerdem werden die Fangmöglichkeiten durch eine Vielzahl ökologischer Einflussfaktoren determiniert. Das Meeresökosystem umfasst neben den verschiedenen Fischbeständen, die jeweils durch ihre Bestandsdichte und Altersstruktur charakterisiert sind, die belebte und die unbelebte Umwelt. Zur belebten Umwelt zählen Räuber wie Meeressäugetiere, Vögel und Raubfische, außerdem Beute wie etwa Plankton und andere Fischarten. Auch Tier- und Pflanzenarten, die mit den Fischbeständen auf andere Art in Wechselwirkung stehen, indem sie wie etwa Korallen die Lebensumwelt der Fische prägen, gehören zur belebten Umwelt. Wichtige Parameter der unbelebten Umwelt sind Temperatur, Salz- und Sauerstoffgehalt sowie die Qualität des Wassers.

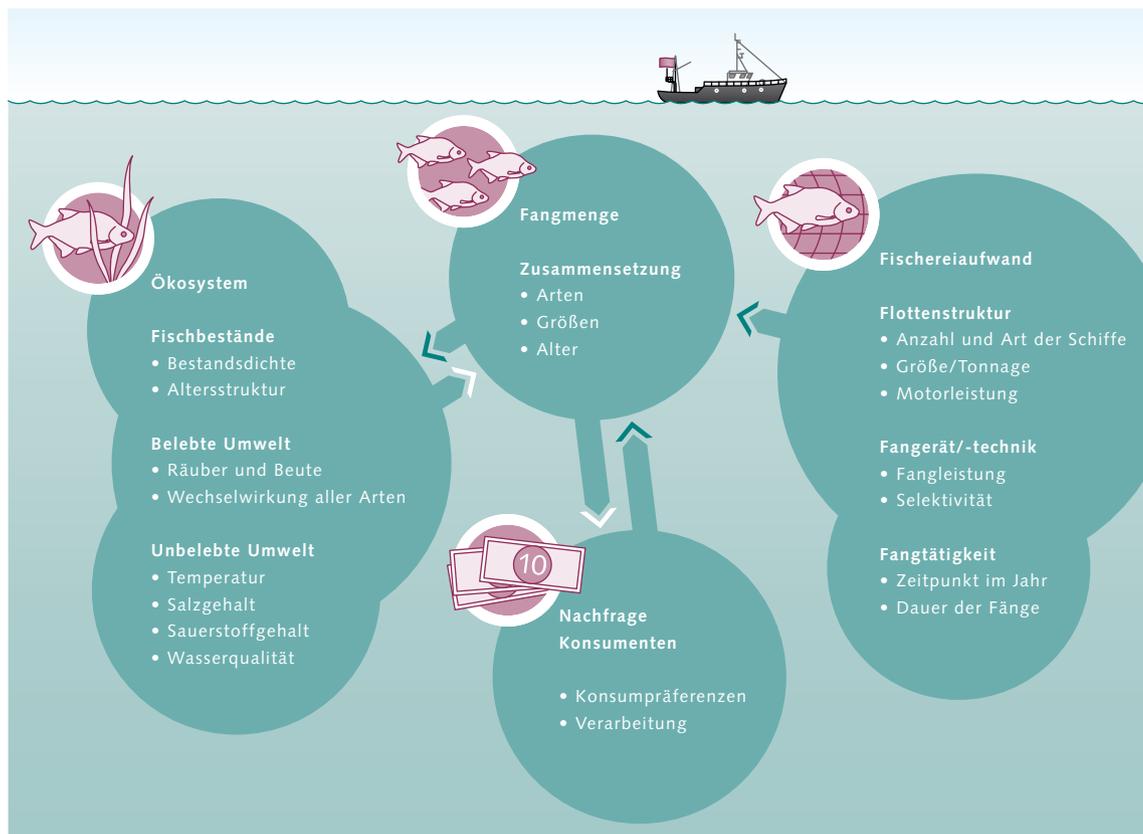
Die Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren im gesamten Ökosystem sind aufgrund ihrer hohen Komplexität schwer zu bestimmen. Außerdem können sie sich im Laufe der Zeit ändern, etwa infolge des Klimawandels (Kapitel 1, 2 und 5). Zudem haben Konsumentennachfrage und Fischereiaufwand mittelbar Auswirkungen auf das Meeresökosystem. Je nach Umfang und Zusammensetzung der Fangmenge ändern sich Altersstruktur und Dichte der Fischbestände, was wiederum Folgen für das Zusammenleben der verschiedenen Meerestier- und Pflanzenarten hat.

Nachhaltiges Management – die Alaska-Seelachs-Fischerei

Ein Beispiel für gutes und nachhaltiges Management ist die Alaska-Seelachs-Fischerei. Im Pazifik gibt es mehrere Bestände des Alaska-Seelachses, fünf von ihnen werden gemäß den US-amerikanischen Groundfish Fishery Management Plans (FMPs) bewirtschaftet. In diesen Plänen empfehlen Expertengruppen für verschiedene Fischarten genaue Fangmengen. Sie sehen vor, die Fischbestände nach dem MSY-Prinzip zu befischen. Im Moment liegen die Bestände im Schnitt bereits bei knapp 80 Prozent des Bestandes, der den MSY ermöglicht. Durch den moderaten Fischfang werden dem Meer nur wenige Fische entnommen, vermutlich sogar weniger als nötig. Trotzdem können die Fischer derzeit immerhin etwa 1,1 Millionen Tonnen jährlich fangen, hauptsächlich in der Beringsee und nahe der Aleuten. Die Fischer verwenden Netze, die nur durch das Wasser gezogen und nicht über den Meeresboden geschleppt werden. So werden Bodenlebewesen in großem Umfang geschont. Durch sorgfältige Wahl von Netzen mit geeigneter Maschenweite und andere technische Maßnahmen wird außerdem der Beifang erheblich reduziert.

Ökologische und ökonomische Zielgrößen der Fischereipolitik

In den Absichtserklärungen des Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung (World Summit on Sustainable Development, WSSD) in Johannesburg 2002 wurde festgelegt, welche Fischmenge jährlich maximal gefangen werden sollte, um die Fischbestände der Welt zu schützen. Diese



6.10 > Schema einer Meeresfischerei. Die weißen Pfeile stehen für den tatsächlichen Weg vom Fisch aus dem Meer zum Konsumenten. Die dunkelgrünen Pfeile stellen die Wirkungen der Konsumentennachfrage und des Fischereiaufwands auf die Fangmenge und das Meeres-Ökosystem dar.

Fangmenge wird als maximaler nachhaltiger Ertrag (MSY, maximum sustainable yield) bezeichnet. Der MSY gibt die größtmögliche jährliche Fangmenge für einen Fischbestand an, die über einen unbefristeten Zeitraum angelandet werden kann, ohne den Bestand zu gefährden. Wie viel Fisch dauerhaft gefangen werden kann, hängt von der Größe des Fischbestands ab. Bei vielen Fischbeständen liegt die MSY-Bestandsgröße bei etwa der Hälfte des natürlichen Gleichgewichtsbestands ohne Fischerei. Da sich Fischarten hinsichtlich ihres ökonomischen Wertes unterscheiden, ist die ökonomisch relevante Größe nicht die Fangmenge in Tonnen, sondern der Wert des Fangtrags. Daneben sind die Fangkosten die zweite wichtige ökonomische Größe der Fischerei. Ein höherer Fangaufwand führt aufgrund höherer Betriebskosten, wie Aufwendungen für Löhne, Treibstoff und Ausrüstung, zu höheren Kosten. Fischen lohnt sich vor allem dann, wenn die Differenz zwischen dem Fangtragswert und den Kosten hinrei-

chend groß ist. Analog zum MSY bezeichnet man den nachhaltigen Ertrag, bei dem diese Differenz am größten ist, als maximalen ökonomischen Ertrag (MEY, maximum economic yield).

Ökonomische Anreize zur Überfischung

Aus ökonomischer Sicht entsteht das Problem der Überfischung, weil es sich bei Meeres-Fischbeständen um eine sogenannte Gemeinschaftsressource handelt: Ein gefangener Fisch gehört dem Fischer, nicht so aber ein Fisch im Meer. Volkswirtschaftlich gesehen hat ein Fisch im Meer dadurch einen Wert, dass er sich reproduziert und auch selbst weiter an Gewicht zunimmt. Das bedeutet, dass der Fangtragswert in der Zukunft steigt, wenn der Fisch im Meer bleibt. Einen Fisch zu fangen hat also einen Preis, da dieser Wert dann verloren geht. Bei überfischten Beständen, die eine Erholung besonders nötig haben, kann dieser

6.11 > Auch heute noch ist die Hochseefischerei Knochenarbeit. Längst aber hat man die Schiffe mit modernster Fang- und Ortungstechnik ausgestattet, um den Fischen nachzustellen.



Preis sogar größer sein als der Marktpreis eines gefangenen Fisches. Da es sich bei Fisch um eine Gemeinschaftsressource handelt, zahlt bei einer offenen, vollkommen unregulierten Fischerei jedoch niemand den wahren volkswirtschaftlichen Preis. Aus diesem Grund werden die volkswirtschaftlichen Kosten des Fischfangs unterschätzt, und es wird deutlich mehr gefangen, als ökonomisch sinnvoll ist.

Hat ein Fischbestand die Größe, die den maximalen ökonomischen Ertrag erlaubt, dann gibt es für den einzelnen Fischer einen starken Anreiz, zusätzliche Schiffe einzusetzen oder zusätzliche Schichten zu fahren, um so seinen persönlichen Gewinn weiter zu erhöhen. In einer offenen Fischerei führt das dazu, dass der Aufwand so lange gesteigert wird, bis für praktisch keinen Fischer mehr Gewinne möglich sind.

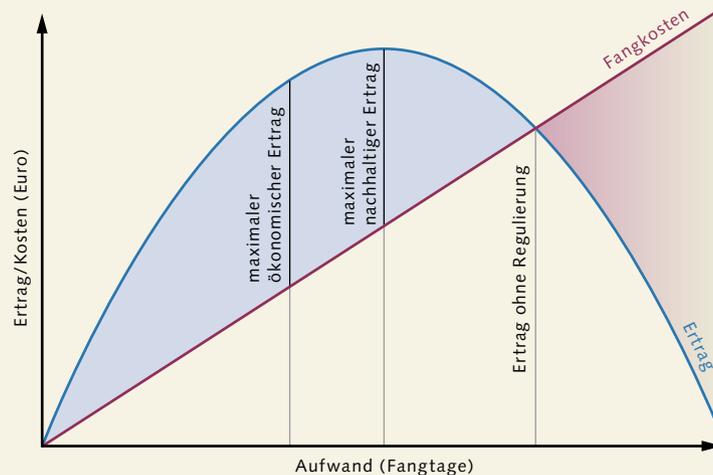
Zudem ermöglichen staatliche Beihilfen die Aufrechterhaltung der Fischerei, auch wenn die direkten Kosten des Fischereiaufwands bereits über dem Wert des Fangertrags liegen. So werden die individuellen Kosten der Fischer in vielen Fällen durch direkte oder indirekte Subventionen gesenkt. Jährlich werden weltweit über 10 Milliarden US-Dollar in Form von Treibstoffvergünstigungen oder Modernisierungsprogrammen gezahlt, etwa 80 Prozent davon in den Industriestaaten.

Berechnungen der Weltbank zufolge müsste der weltweite Fischereiaufwand um 44 bis 54 Prozent gesenkt werden, um den gesamten wirtschaftlichen Nutzen zu maximieren, das heißt den maximalen ökonomischen Ertrag zu realisieren. Die aufgrund der Überfischung entgangenen zukünftigen Erträge schätzt die Weltbank derzeit auf etwa 50 Milliarden US-Dollar jährlich – eine erhebliche Summe im Verhältnis zum gesamten Wert der weltweit angelandeten Fische von rund 90 Milliarden US-Dollar.

Eine große zusätzliche Schwierigkeit für eine erfolgreiche, im Sinne des MEY regulierte Fischerei liegt darin, die Regulierung dauerhaft durchzusetzen und zu kontrollieren. Die Profitabilität der Fischerei kann nämlich dazu führen, dass Fischer versucht sind, durch illegale Anlandungen hohe Gewinne zu erzielen. Schätzungen gehen davon aus, dass etwa ein Drittel der Produkte, die in den Handel gelangen, illegal oder unter Umgehung internationaler Abkommen gefangen wurde. Durch die illegale

Bis wann sich Fischen lohnt

Ob sich das Fischen langfristig lohnt, lässt sich ermitteln, indem man den Ertrag, die Fangkosten und den Aufwand zusammen betrachtet. Ein bestimmter langfristig konstanter Aufwand führt zum maximalen nachhaltigen Ertrag (MSY). Dieser gibt die größtmögliche jährliche Fangmenge für einen Fischbestand an, die über einen unbefristeten Zeitraum angelandet werden kann, ohne den Bestand zu gefährden. Der MEY (maximaler ökonomischer Ertrag) wiederum ist eine monetäre Größe. Er entspricht dem maximalen jährlichen Gewinn aus dem Fischfang und ergibt sich aus der maximalen Differenz von Ertrag und Fangkosten. Der MEY wird schon bei einem geringeren Aufwandsniveau erreicht als der MSY. Ohne Regulierung würde der Fangaufwand so lange erhöht, wie es sich lohnt, Fische zu fangen, also solange der Gewinn aus dem Fischfang positiv ist. Der Aufwand ohne Regulierung ergibt sich als der Punkt, bei dem Fangenertrag und Kosten gleich hoch sind.



Fischerei (IUU-Fischerei, illegal, unreported and unregulated) werden infolgedessen Bemühungen zur Erhaltung der Bestände behindert. IUU-Fischerei betreiben nicht nur einzelne Privatunternehmen, die bewusst gegen Rechte verstoßen. Hinzu kommen Fahrzeuge, die unter der Fahne von Nationalstaaten agieren, deren Auflagen nicht den internationalen Standards entsprechen oder die nicht in der Lage sind, Kontrollmechanismen zu etablieren. Die IUU-Fischerei schadet daher vor allem der handwerklichen Fischerei in den Küstengebieten der Entwicklungsländer. Weltweit schätzt man den wirtschaftlichen Schaden der IUU-Fischerei auf bis zu 10 Milliarden US-Dollar jährlich.

Klassische Ansätze des Fischereimanagements

> Schon seit vielen Jahren versuchen Behörden, den Fischfang durch verschiedene Regulierungsinstrumente zu kontrollieren, um die Bestände zu schonen. Dazu gehören Fangquoten, die Begrenzung der Fangtage oder auch der Motorleistung der Schiffe. Doch viele Maßnahmen verpuffen, weil Quoten und Begrenzungen nicht hinreichend knapp bemessen sind, nicht ausreichend kontrolliert wird oder weil die Reglements schlicht am Fischereialltag vorbeigehen.

Wie sich Überfischung vermeiden lässt

Überfischung bedeutet, dass die jährlichen Fangmengen weder nachhaltig noch wirtschaftlich sinnvoll sind. Letztlich sind die zu hohen Fangmengen das Ergebnis eines zu hohen Fangaufwands. Da die Fischbestände schrumpfen, muss man immer mehr Aufwand betreiben, um eine bestimmte Menge Fisch zu fangen. Die Fischereipolitik oder ein zentrales Fischereimanagement setzt daher entweder direkt bei den Fangmengen oder indirekt beim Fischereiaufwand an.

Die Fangmengen verringern

Um die gesamte Fangmenge auf das biologisch und wirtschaftlich sinnvolle Maß zu beschränken, legen die Behörden Gesamtfangquoten (total allowable catch, TAC) fest. Idealerweise sind die Gesamtfangquoten so gewählt, dass sie langfristig zum maximalen ökonomischen Ertrag füh-

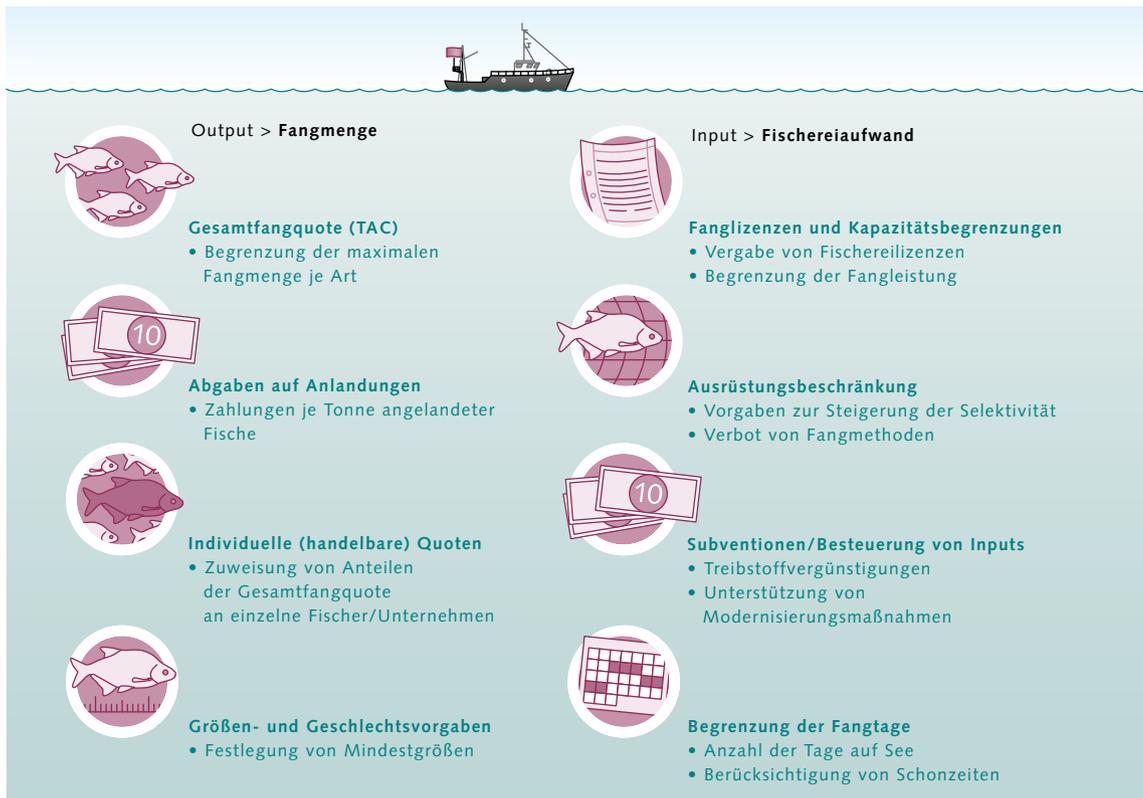
ren. Gesamtfangmengen genügen in der Regel jedoch nicht, um wirtschaftliche Effizienz sicherzustellen. Denn wenn eine neue Fangsaison mit begrenzter Gesamtquote beginnt, wird jeder Fischer versuchen, sich einen möglichst großen Anteil der Quote zu sichern, indem er einen kurzfristig sehr hohen Fangaufwand betreibt. Ist die Quote dann nach relativ kurzer Zeit erschöpft, bleibt die Fangkapazität bis zur nächsten Fangsaison ungenutzt. Um für einzelne Fischer Planungssicherheit über die gesamte Fangperiode zu schaffen, wird die Gesamtfangquote daher auf einzelne Schiffe, Fischer oder Produktionsgemeinschaften verteilt.

Ansätze der Fischereipolitik, bei denen Fischer auf die eine oder andere Weise das Recht erhalten, langfristig Fisch in einer von ihnen selbst bestimmten Menge zu fangen, bezeichnet man als rechtebasiertes Fischereimanagement. Prominentestes Beispiel sind individuell transferierbare Quoten (individual transferable quotas, ITQs). Bei dieser Methode bekommen Fischer individuelle Fangquoten zugeteilt, die sie frei mit anderen Fischern handeln können. Das führt dazu, dass Fischer, die relativ unwirtschaftlich arbeiten, ihre Quoten verkaufen werden, während wirtschaftlichere Betriebe Quoten hinzukaufen. Langfristig hat dies zur Folge, dass sich die Quoten auf wenige Fischereibetriebe konzentrieren und die erlaubte Gesamtfangmenge insgesamt zu geringeren Kosten eingebracht wird.

In der Tat sind solche Konzentrationsprozesse zu beobachten. In Neuseeland zum Beispiel, wo es seit 1986 ein System individuell transferierbarer Quoten gibt, lag die Zahl der Quotenbesitzer im Jahr 2000 um etwa ein Drittel niedriger als im Jahr 1990. Ganz offensichtlich lassen sich nicht alle gesellschaftlichen Ziele durch individuell transferierbare Quoten allein erreichen, etwa dann

6.12 > Auf dem Tokioter Fischmarkt werden tiefgefrorene Tunfische gehandelt. Japan ist die fünftgrößte Fischereination der Welt.





6.13 > Klassische Ansätze im Fischereimanagement können entweder direkt bei den Fangmengen ansetzen oder versuchen, den Fischereiaufwand zu beschränken. Die Kontrolle der Vorgaben ist oftmals mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden.

nicht, wenn man kleine, wirtschaftlich nicht so effiziente Fischereibetriebe erhalten möchte. Da kleine Fischereibetriebe ihre Quoten freiwillig verkaufen, sind sie aber dadurch offenbar besser gestellt als ohne die Möglichkeit des Quotenhandels.

Quoten werden in der Regel nach Fischarten getrennt in Tonnen angegeben. Der tatsächliche Fang besteht jedoch aus Fischen verschiedener Altersklassen, verschiedener Qualität und damit unterschiedlichen Werts. Das verleitet Fischer häufig zum High-Grading. Darunter versteht man den Rückwurf minderwertiger Fänge in das Meer, um die Quote mit hochwertigen Fischen zu füllen. Diese Praxis reduziert die Bestände, ohne dem Verbraucher einen Nutzen zu bringen. In manchen Fischereien beträgt der Anteil der Rückwürfe 40 Prozent der Fänge und mehr. Dieser sogenannte Beifang wird wie Abfall ins Meer geworfen.

Die Bilanz des rechtbasierten Fischereimanagements ist trotz dieser Effekte aber insgesamt als positiv zu bewerten. Neue Untersuchungen mit großen Datensätzen

belegen, dass diese Art des Managements nicht nur wirtschaftliche Effizienz, sondern darüber hinaus auch die Nachhaltigkeit der Fischerei fördert. So lag der Anteil zusammengebrochener Bestände in derartig regulierten Fischereien bei 14 Prozent. Dieser Wert liegt damit weit unter dem Wert von 28 Prozent, der sich bei Fischereien ergibt, in denen solche Rechte fehlen.

Als Alternative zu handelbaren Quoten ließe sich Überfischung auch mithilfe von Fangabgaben regulieren. Fangabgaben wirken ähnlich wie individuell handelbare Quoten. Der Unterschied besteht darin, dass der Fischer nicht für zusätzliche Quoten zahlt, sondern pro Menge tatsächlich gefangenen Fisches einen bestimmten Betrag an eine Behörde abführt. Die Fangabgabe sorgt dafür, dass der Fisch seinen wahren volkswirtschaftlichen Preis bekommt, sodass kein Anreiz zur Überfischung mehr besteht. Sie kann jedoch nur dann optimal festgesetzt werden, wenn Informationen über die Struktur und die Größe der Fischbestände vorliegen, ähnlich wie bei der Festlegung von Fangquoten.

Ein Negativbeispiel – das EU-Fischereimanagement

Ein Beispiel für ein weitgehend gescheitertes Fischereimanagement ist die gegenwärtige Gemeinsame Fischereipolitik (GFP) der Europäischen Gemeinschaft. Die GFP hat zum Ziel, die Nachhaltigkeit der Fischbestände und die Wettbewerbsfähigkeit der Fischereiwirtschaft zu fördern. Nichtsdestotrotz haben sich in den vergangenen Jahren nicht nur die Fischbestände zum Teil dramatisch verringert, auch die Gewinne der Fischereiwirtschaft sind ganz erheblich zurückgegangen.

Das hat vor allem einen Grund: Zwar gibt die EU-Kommission dem EU-Ministerrat alljährlich auf Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse Empfehlungen zur zulässigen Gesamtfangmenge. Diese werden jedoch häufig vom Ministerrat übergangen, denn für die Minister geht der kurzfristige Schutz von Arbeitsplätzen in der Regel vor Nachhaltigkeit. So liegt die jährliche Fangmenge im Durchschnitt 48 Prozent über der wissenschaftlichen Empfehlung. Der Befund, dass 88 Prozent der europäischen Bestände gemessen am maximalen nachhaltigen Ertrag (MSY) überfischt sind, ist auch auf diese zu hohen Fangmengen zurückzuführen. Darüber hinaus sind die Mindestanlandegrößen der Fische sogar so klein, dass 50 Prozent der Fische gar keine Chance zur Reproduktion haben, bevor sie gefangen werden. Die Maschenweite der gesetzlich zugelassenen Netze ist wiederum so klein, dass sogar noch kleinere Fische als die erlaubten Mindestanlandegrößen gefangen werden können. Diese Fische – bis zu 40 Prozent des Fangs – werden in der Regel tot ins Meer zurückgeworfen.

Die GFP setzt eine Vielzahl regulierender Instrumente ein, wie zum Beispiel Beschränkungen der jährlichen Fangmenge, der Fangtage, der Zahl, Größe und Motorleistung der Fangschiffe. Neben zahlreichen Bestimmungen bezüglich der Fangtechnik, beispielsweise der Maschenweiten der Netze, können bestimmte Fanggebiete geschlossen werden.

Diese Regulierungen müssen durch Kontrollen und Sanktionen durchgesetzt werden. In einer so heterogenen Staatengemeinschaft wie der EG ist das allerdings sehr schwierig, denn jeder Mitgliedstaat setzt diese Kontrollen unterschiedlich effektiv um. Für einen Mitgliedstaat gibt es kaum einen Anreiz, seine Fischer streng zu kontrollieren, wenn Nachbarstaaten, die in denselben Gewässern fischen, dies nicht tun.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass Beifang nicht erfasst und nicht sanktioniert wird. Fischer können so über ihre Quote hinaus fangen und den jeweiligen Überschuss wieder über Bord werfen. Diese durchaus gängige Praxis, die als High-Grading bezeichnet wird,

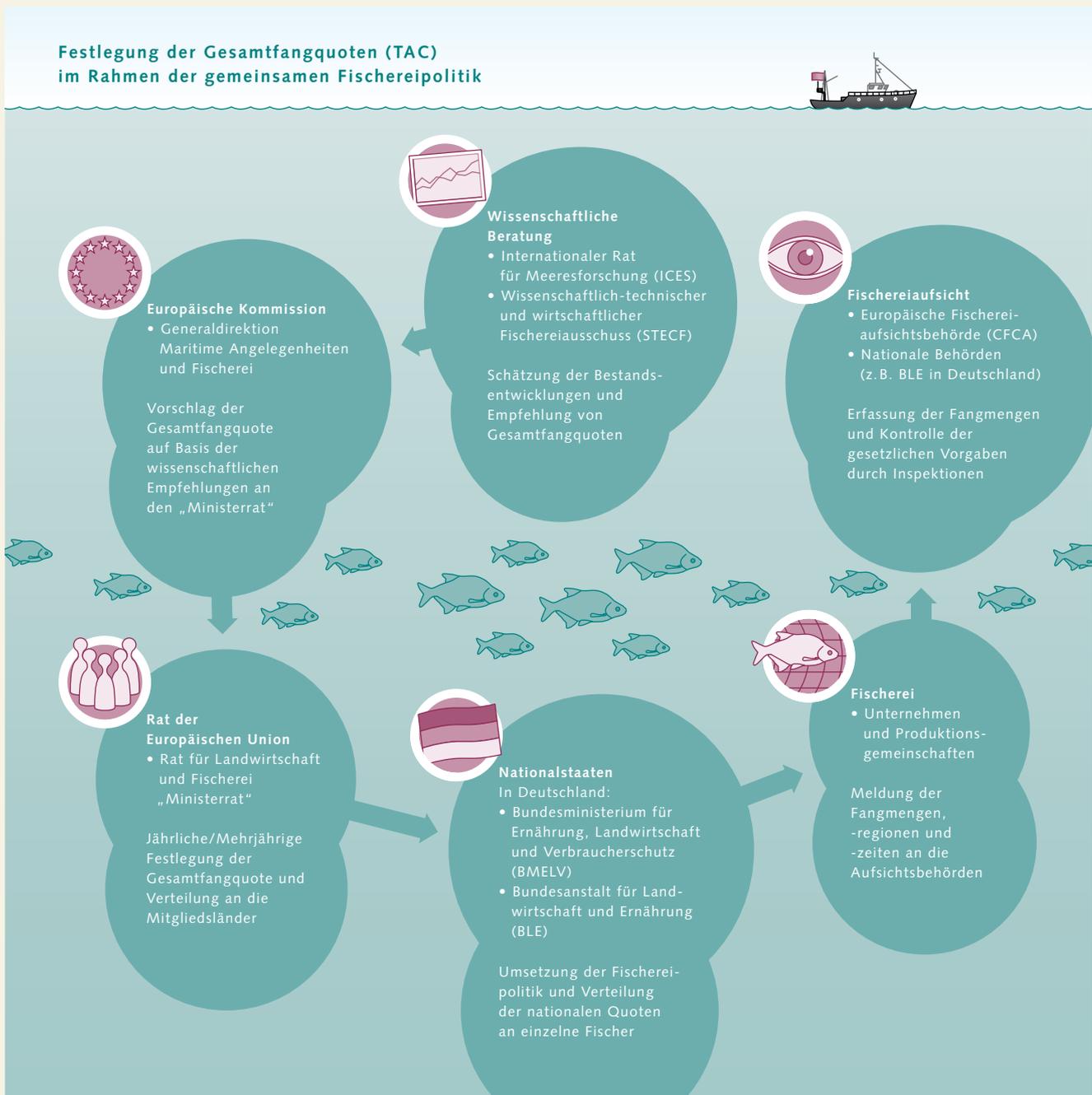
untergräbt regelmäßig die vom Ministerrat jährlich festgesetzten Fangquoten.

Um dem entgegenzuwirken, wurde 2007 die EU-Fischereiaufsichtsbehörde (EUFA) gegründet. Sie hat die Aufgabe, die Überwachung, Kontrolle und Durchsetzung der GFP-Vorschriften zu koordinieren. Jedoch fehlt es noch immer an zuverlässigen Daten über Fangmengen, Regelverstöße und illegale Fischerei. Manches spricht auch dafür, dass die EU-Kommission das Fehlverhalten der Mitgliedstaaten kaum sanktioniert. Von der Möglichkeit, einzelne Mitgliedstaaten nach Artikel 226/228 EG-Vertrag vor dem Europäischen Gerichtshof (EuGH) zu verklagen, weil sie die Maßnahmen der GFP in ihrem Land nicht durchsetzen, macht die Kommission nur selten Gebrauch.

Zusätzlich schaffen Subventionen für die europäische Fischereiwirtschaft falsche Anreize. Zwischen den Jahren 2000 und 2006 wurden rund vier Milliarden Euro an Subventionen gezahlt, unter anderem für die Modernisierung von Flotten und für die fischverarbeitende Industrie. Zugleich gibt es zahlreiche Vorschriften, wie diese Subventionen im Einzelnen eingesetzt werden dürfen. Diese sollen verhindern, dass die Überkapazitäten der Fischereiflotte vergrößert werden. Insgesamt bestehen in der EG schätzungsweise 2000 fischereibezogene Regeln und Vorschriften, die oft nur schwer zu verstehen und zum Teil sogar widersprüchlich sind. Aus juristischer Sicht besteht ein weiterer Grund für das Scheitern der GFP in der mangelnden Transparenz dieser von der EG beschlossenen Maßnahmen.

Eine Einigung zwischen den zuständigen Ministern der Mitgliedstaaten, die im Ministerrat über die jährlichen Gesamtfangmengen entscheiden, ist angesichts der unterschiedlichen Interessen, Prioritäten und politischen Wahltermine nur schwer zu erzielen. Insofern handelt es sich bei den beschlossenen Maßnahmen der GFP regelmäßig um den kleinsten gemeinsamen Nenner. Angesichts der Missstände plant die EU eine weitreichende Reform der GFP. Gegenwärtig werden zahlreiche Vorschläge diskutiert, wie eine neue GFP, die im Jahr 2012 beschlossen werden soll, ausgestaltet werden könnte. Um die neue GFP zu legitimieren, sollen die bestehenden regionalen Beratungsgremien, die die verschiedenen Interessengruppen der Fischer, Wissenschaftler, Politiker und Umweltverbände zusammenführen, ausgebaut werden. Zwar ist es noch zu früh für eine abschließende Bewertung. Es ist aber zu hoffen, dass auf diesem Weg ein höheres Maß an Transparenz und eine breitere Unterstützung für die Ziele der GFP erreicht werden.

**Festlegung der Gesamtfangquoten (TAC)
im Rahmen der gemeinsamen Fischereipolitik**



6.14 > Verschiedene Fischereimethoden wirken sich unterschiedlich stark auf die Fischbestände und die Meeresumwelt aus.

Fanggerät	Funktionsweise	Beifang anderer Fischarten	Beifang von Schildkröten, Seevögeln oder Säugetieren	Negative Folgen für den Meeresboden
Stellnetz	Das Stellnetz wird an einer Position im Wasser verankert; Fisch verfängt sich in den Maschen	Gering; nicht zuletzt, weil gezielt in ausgesuchten Gebieten eingesetzt	Zum Teil hoch; Einsatz von akustischen Schreckgeräten (Pinger) kaum wirkungsvoll	Gering
Reuse	Die Reuse wird an einer Position im Wasser verankert; Fisch wird in blind endendem Netzsack gefangen	Unproblematisch, weil der Beifang überlebt	Netze sollten gegen Vögel abgedeckt werden; über verfangene Säugetiere und Schildkröten liegen kaum Informationen vor	Gering
Ringwade	Die Ringwade ist ein Netz, das kreisförmig um einen Schwarm gelegt und dann am unteren Rand zusammengezogen wird, sodass die Fische wie in einem Kescher gefangen sind	Gering, da gezielt Fischschwärme einer Art befischt werden	Häufiger Beifang von Delfinen, inzwischen sind Fluchtmöglichkeiten eingebaut	Keine
Pelagisches Schleppnetz	Die trichterförmigen Netze werden von ein oder zwei Schiffen geschleppt. Die Fische werden wie mit einem Kescher eingefangen und sammeln sich am Ende des Netzes in einer Tasche, dem sogenannten Steert	In manchen Gebieten problematisch, abhängig von der Zielart	Gering	Keine
Grundschleppnetz	Funktionsweise wie beim pelagischen Schleppnetz, nur direkt über den Boden gezogen	In manchen Gebieten problematisch, abhängig von der Zielart	Gering	Hoch, abhängig von der Beschaffenheit des Grundtaus
Baumkurre	Das Netz wird an einem schweren Metallgestänge über den Meeresboden geschleppt	In manchen Gebieten problematisch, abhängig von der Zielart	Gering	Sehr hoch, Gestänge und Ketten durchpflügen zentimetertiefe den Boden
Langleine	An einer langen Mutterleine wird eine große Zahl kleiner Nebenleinen mit zahlreichen Haken und Ködern befestigt	In manchen Gebieten problematisch, abhängig von der Zielart; häufigster Beifang sind Haie	In manchen Fischereien problematisch, gefährlich für Seevögel und Schildkröten	Keine

Die große Schwierigkeit besteht darin, dass Fischer derartige direkte Zahlungen ablehnen, da sie ihre Gewinne im Gegensatz zu kostenlos vergebenen Quoten schmälern. So spielen Fangabgaben in der praktischen Fischereipolitik gegenwärtig tatsächlich nur eine untergeordnete Rolle.

Den Aufwand beschränken

Der Fischfang lässt sich nicht nur durch die Festlegung von Fangmengen, sondern auch durch eine Begrenzung des Fischereiaufwands regulieren. So lässt sich die Fangkapazität begrenzen, indem nur eine bestimmte Zahl an Lizenzen für Fangschiffe vergeben oder indem die Motorleistung oder die Größe der einzelnen Schiffe begrenzt wird. Darüber hinaus kann die Fangdauer beschränkt werden, beispielsweise durch eine bestimmte Zahl von Fangtagen auf See.

Eine aufwandsbasierte Regulierung bietet jedoch auch Schlupflöcher. Nicht selten umgehen Fischer die begrenzten Fangzeiten, indem sie die Fangkapazität erhöhen. Auf diese Weise kann die gleiche Menge Fisch in wenigen Tagen auf See gefangen werden. Ein bekanntes Beispiel ist die pazifische Heilbutt-Fischerei, bei der Ende der 1980er Jahre nur drei Fangtage pro Jahr zugelassen wurden. Wie sich zeigte, wurde in dieser kurzen Zeit mit einer geradezu gigantischen Flotte die gleiche Menge gefangen, die in der Vergangenheit innerhalb eines ganzen Jahres gefischt wurde.

Darüber hinaus muss die aufwandsbasierte Regulierung laufend an den Stand der aktuellen technischen Entwicklung angepasst werden. Eine immer effizientere Technik zur Ortung der Fische macht es beispielsweise möglich, die gleiche Menge Fisch in immer geringerer Zeit aufzuspüren und zu fangen. Außerdem werden immer detailliertere Vorschriften erforderlich, was letztlich zu Überregulierung und hohen volkswirtschaftlichen Kosten führt. Einig sind sich die Experten allerdings darin, dass bestimmte Vorschriften für Fangtechnik und Fangmethoden nötig sind. So sind in vielen Regionen Fangmethoden verboten, die das Meeres-Ökosystem besonders schädigen, wie zum Beispiel das Fischen mit Sprengstoffen, bei dem tatsächlich alle Fische in einem bestimmten Umkreis getötet werden.



Die Fangrechte verteilen

Eine Alternative zu zentralen Fischereimanagement-Ansätzen sind territoriale Nutzungsrechte (territorial use rights in fisheries, TURF). Dabei wird einzelnen Nutzern oder bestimmten Nutzergruppen wie etwa Genossenschaften langfristig das Recht zugestanden, ein räumlich begrenztes Meeresgebiet exklusiv zu nutzen. Fangmengen und Fangaufwand werden vom einzelnen Fischer oder der Nutzergruppe selbst festgelegt. Diese privatwirtschaftlich organisierte Selbstverwaltung kann auch zu einer erheblichen Senkung der staatlichen Regulierungs- und Kontrollausgaben führen. Zugleich haben die Nutzer ein Eigeninteresse daran, die Bestände nicht zu überfischen, denn nur so können sie ihr zukünftiges Einkommen sichern. Ein exklusives Nutzungsrecht für einen Bestand von Fischen oder anderen lebenden Ressourcen des Meeres lässt sich aber nur für Arten definieren, die kaum wandern, wie zum Beispiel Krebstiere und Muscheln. Ein Beispiel für ein erfolgreiches Management mit territorialen Nutzungsrechten ist die handwerkliche Küstenfischerei in Chile, die vor allem am Meeresboden lebende Arten befischt, besonders Seeigel und Austern. Dort zeigt sich, dass die Fischer im eigenen Interesse darauf achten, nachhaltig zu fischen, wenn sie die Möglichkeit haben, die Erträge einer solch nachhaltigen Fischerei langfristig zu nutzen.

6.15 > Das Dynamitfischen ist fast überall verboten, weil durch die Explosion unzählige Tiere verenden. In Gebieten, die von Behörden kaum kontrolliert werden, praktizieren Fischer diese radikale Fangmethode dennoch – so wie hier in Brasilien.

Wege in eine bessere Fischereiwirtschaft

> Um die Situation zu verbessern und eine sinnvolle Nutzung der Fischbestände zu erreichen, muss das bestehende Fischereimanagement dringend verändert werden. Für den Schutz der Fische sollte man künftig außerdem verstärkt die ökologischen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Fischarten und ihrem Lebensraum berücksichtigen, denn bisher wurden Fischbestände meist isoliert betrachtet.

Eine Besserung ist möglich

Angesichts der beschriebenen Schwachstellen ist eine Reform des bestehenden Fischereimanagements dringend notwendig. Sinnvoll wäre es zunächst, die klassischen Instrumente zur Regulierung der Fangmenge weitaus konsequenter anzuwenden und besser durchzusetzen. Dabei ist vor allem zu beachten, dass eine Quote nur dann eine Wirkung entfalten kann, wenn sie hinreichend knapp bemessen ist. Zusätzlich zu verbesserten Fangquotenregelungen können Instrumente wie die Einführung mariner Schutzgebiete und die Zertifizierung nachhaltiger Fischerei zu einem nachhaltigen Fischereimanagement beitragen.

Marine Schutzgebiete – Schonräume für bedrohte Spezies

Unter marinen Schutzgebieten versteht man geografisch abgegrenzte Bereiche des Meeres, in denen wirtschaftliche Aktivitäten – insbesondere die Fischerei – ganz oder teilweise verboten sind. Solche Gebietsschließungen dienen dem Schutz mariner Ökosysteme, insbesondere dem Schutz gefährdeter Arten oder einzigartiger Lebensräume wie etwa Korallenriffen. Seit 2004 schränkt zum Beispiel die North East Atlantic Fisheries Commission (NEAFC, Nordostatlantische Fischereikommission) den Einsatz von Grundschleppnetzen in einigen Teilgebieten ein, um Kaltwasserkorallen zu schützen.

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass marine Schutzgebiete zur Erholung von Fischbeständen beitragen können. Ein Vorteil der Schutzgebiete liegt darin, dass sie sich verhältnismäßig einfach einrichten und überwachen lassen. Durch satellitengestützte Ortungs- und elektro-

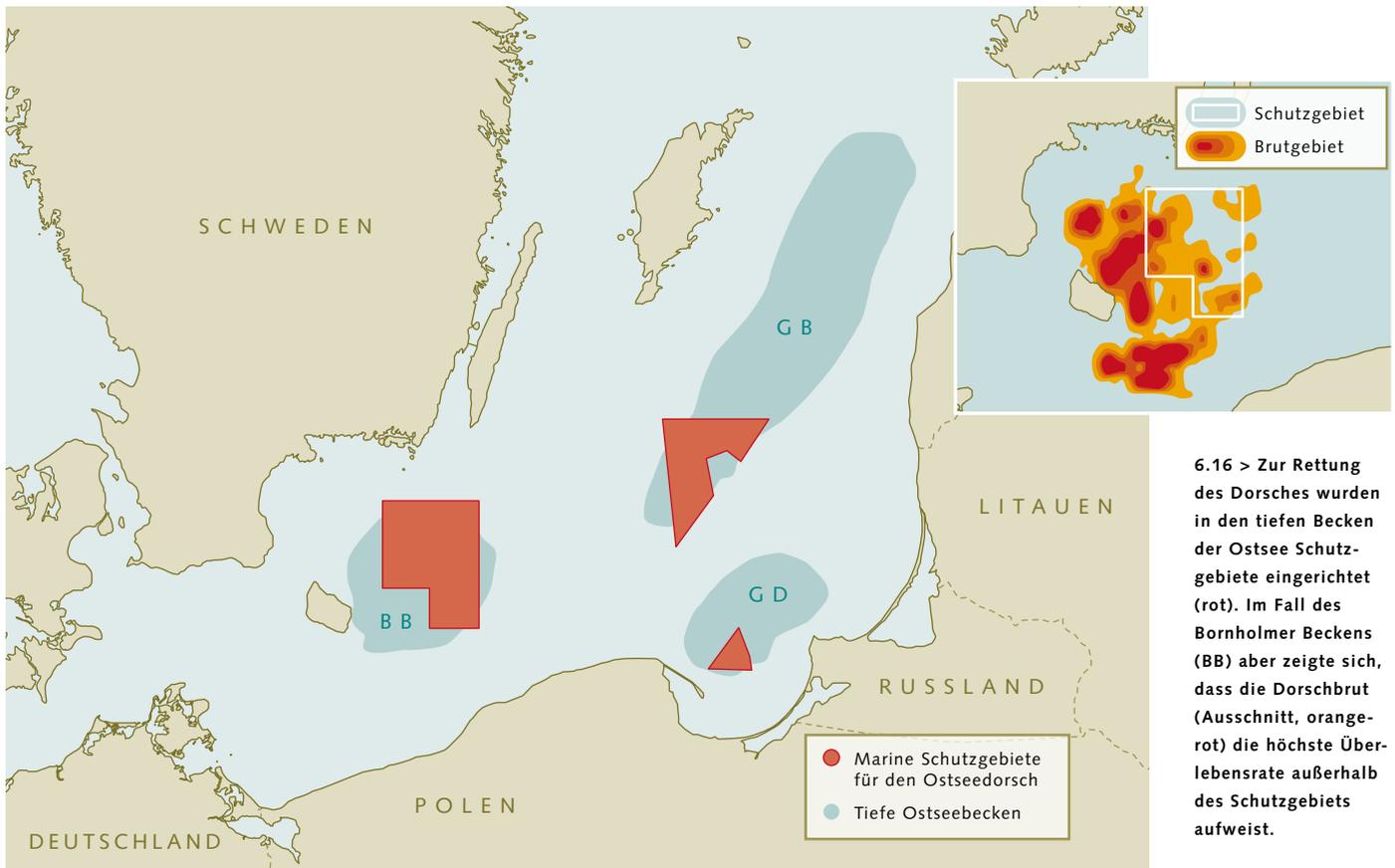
nische Logbuchsysteme, sogenannte Vessel Detection Systems (VDS, Schiffsortungssysteme) und Vessel Monitoring Systems (VMS, Schiffsüberwachungssysteme), lassen sich die Routen industrieller Fangschiffe verfolgen. Ein Problem besteht jedoch darin, die richtige Größe des Schutzgebiets zu definieren. Ist das Schutzgebiet zu klein, hat es nur einen geringen Effekt, da Fische aus dem Schutzgebiet hinauswandern und dort gefangen werden. Tatsächlich wurde am Rand bestehender Schutzgebiete eine höhere Fangaktivität beobachtet als anderswo. Ist das Schutzgebiet hingegen zu groß, kann sich der Bestand innerhalb des Schutzgebiets zwar erholen. Der Fischerei aber dient das nicht, da sie den höheren Bestand des Schutzgebiets nicht nutzen kann.

Tendenziell sind Gebiete, die Jungfischen als Rückzugsgebiet dienen, als Schutzgebiete für das Fischereimanagement am ehesten geeignet. Auch stark überfischte Meeresregionen, wo ohnehin nur noch wenig Fisch gefangen werden kann, bieten sich als marine Schutzgebiete an. Die Rückzugsgebiete der Jungfische verschiedener Arten können aber in völlig unterschiedlichen Regionen des Meeres liegen. Ein einzelnes Schutzgebiet dient damit nicht immer dem Schutz mehrerer Fischarten zugleich.

Die schwierige Suche nach dem richtigen Schutzgebiet – der Ostseedorsch

Es ist ausgesprochen schwierig, die richtige Region für ein marines Schutzgebiet zu finden. Das verdeutlicht das Beispiel des Ostseedorschs.

Durch starken Fischfang und ungünstige Umweltbedingungen wie etwa Sauerstoffarmut in der Tiefe nahm der Bestand des Ostseedorschs in den 1980er Jahren stark ab. Innerhalb weniger Jahre sackte er auf circa ein Siebtel des



6.16 > Zur Rettung des Dorsches wurden in den tiefen Becken der Ostsee Schutzgebiete eingerichtet (rot). Im Fall des Bornholmer Beckens (BB) aber zeigte sich, dass die Dorschbrut (Ausschnitt, orange-rot) die höchste Überlebensrate außerhalb des Schutzgebiets aufweist.

Ausgangswerts. Der Bestand liegt, trotz einer Erholung in den letzten Jahren, immer noch weit unterhalb eines Niveaus, das zum MSY, zum maximalen nachhaltigen Ertrag, führen würde.

Um den Fang von Laichpopulationen einzuschränken und den stark dezimierten Bestand zu stabilisieren, wurden in Teilbereichen der Ostsee Fangverbotszonen eingerichtet. Für den Fortbestand des Dorsches ist vor allem das Bornholmer Becken (BB) von Bedeutung, da die Überlebensrate der Eier und Larven in den östlicheren Laichgebieten, wie dem Gotlandbecken (GB) und dem Danziger Tief (GD), aufgrund des häufigen Sauerstoffmangels relativ niedrig ist. Die Fangverbotszone im Bornholmer Becken wurde erstmals 1995 in der Zeit von Mai bis August eingerichtet. Trotz einer schrittweisen Ausweitung des Schutzgebiets in den folgenden Jahren ließ sich keine deutliche Bestandsverbesserung beobachten. Der Grund: Zwar liegt das Schutzgebiet in einem Bereich mit hohem

Laichaufkommen. Aktuelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass es räumliche Unterschiede in der Sterblichkeit gibt. Die höchsten Überlebensraten von Larven und Jungfischen sind offenbar an den Rändern des Bornholmer Beckens zu finden, das heißt außerhalb des derzeitigen Schutzgebiets.

Diese Untersuchung zeigt, dass die Lage des Schutzgebiets möglicherweise falsch gewählt wurde. Die für den Fortbestand wichtigen Regionen werden nur unzureichend geschützt, und es besteht sogar die Gefahr, dass das Schutzgebiet kontraproduktiv wirkt, da sich die Fischerei direkt in die bedeutenderen Laichgebiete verlagert. Trotz dieser Schwierigkeiten sind Schutzgebiete ein wichtiger Baustein für den Erhalt oder die Wiederaufstockung eines Bestands. Allerdings verdeutlicht das Beispiel auch, dass sich Schutzzonen nur dann sinnvoll einrichten lassen, wenn hinreichende ökologische und ökonomische Kenntnisse vorliegen.

6.17 > Der Kabeljau oder auch Dorsch ist im Nordatlantik weit verbreitet. Seine westlichen Bestände wurden durch die Fischerei erheblich dezimiert. In der Ostsee hat man Schutzgebiete eingerichtet.



Die Zertifizierung nachhaltiger Fischerei

Unberücksichtigt bleiben im klassischen Fischereimanagement im Allgemeinen auch die komplexen ökonomischen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflussgrößen – beispielsweise die Nachfrage der Verbraucher nach verschiedenen Arten von Fisch. Aus diesem Grund schlagen Nichtregierungsorganisationen und einige privatwirtschaftlich geförderte Initiativen einen anderen Lösungsweg vor: Sie möchten durch Informationskampagnen und die Zertifizierung nachhaltiger Fischereiprodukte die Konsumentennachfrage so beeinflussen, dass überfischte Arten weniger nachgefragt und stattdessen Produkte aus nachhaltiger Fischerei gewählt werden. Die Idee dieses Ansatzes ist es, die Produzenten über die veränderte Kundennachfrage langfristig dazu zu bewegen, entsprechend nachhaltig zu wirtschaften.

So ist die Zertifizierung an bestimmte Produktionskriterien gebunden, beispielsweise den Verzicht darauf, gefährdete Bestände zu befischen oder destruktive und besonders kritische Fangtechniken einzusetzen, beispielsweise

die Fischerei mit Grundschieppnetzen, die die Lebensräume am Meeresboden zerstören. Zu den bekanntesten Initiativen gehören der Marine Stewardship Council (MSC) sowie die Friend of the Sea-Initiative. Der MSC wurde 1997 von einer bekannten Umweltschutzorganisation und einem internationalen Lebensmittelkonzern gegründet und ist seit 1999 als eigenständige Einrichtung tätig. Die Friend of the Sea-Initiative wurde ebenfalls von einer Umweltschutzorganisation ins Leben gerufen. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass sie auch Aquakulturprodukte zertifiziert.

Die Kritiker dieser Zertifizierungsansätze bemängeln oftmals unzureichende ökologische Anforderungen für zertifizierte Fischereiprodukte. Strittig ist auch, inwieweit die Nachfrage nach zertifiziertem Fisch die Nachfrage nach konventionell gefangenem Fisch tatsächlich ersetzt oder dann doch eher eine zusätzliche Nachfrage nach Fischprodukten darstellt. Insgesamt können daher nachfrageorientierte Ansätze ein gutes Fischereimanagement sinnvoll ergänzen – sind aber allein für sich genommen unzureichend.



6.18 > Der Marine Stewardship Council wurde 1997 von der Naturschutzorganisation WWF und dem Lebensmittelkonzern Unilever gegründet, um den schonenden Fischfang zu fördern.

CONCLUSIO

Ist nachhaltiger Fischfang möglich?

Die Fischerei trägt wesentlich zur Ernährung der Menschheit bei und ist eine Einkommensquelle für Millionen Menschen. Die allermeisten Fischbestände weltweit sind gegenwärtig aber bis an ihre Tragfähigkeitsgrenze oder darüber hinaus befischt. Für eine nachhaltige Fischerei wäre es zunächst sinnvoll, die klassischen Instrumente zur Regulierung der Fangmenge weitaus konsequenter als bisher anzuwenden und besser durchzusetzen. Dabei ist vor allem zu beachten, dass eine Quote nur dann eine Wirkung entfalten kann, wenn sie hinreichend knapp bemessen ist. Grundvoraussetzungen für eine nachhaltige und effiziente Fischereiwirtschaft sind handlungsfähige nationale und internationale Institutionen, die die Fischereipolitik etablieren und überwachen. Zu den großen Herausforderungen der

Zukunft gehört es, die Zusammenhänge zwischen dem Einfluss der Menschen auf die Ökosysteme und der Entwicklung der natürlichen Ressourcen besser zu verstehen, um eine nachhaltige und wirtschaftliche Meeresfischerei zu erreichen. Außerdem muss ein erfolgreiches Fischereimanagement die ökonomischen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Fischereien berücksichtigen.

Der Schutz der natürlichen Ressourcen ist letztendlich die entscheidende Voraussetzung dafür, dass auch dauerhaft ökonomische Gewinne erzielt werden können. Ein erfolgreiches Fischereimanagement steigert die Profitabilität und die Produktivität der Fischereiindustrie. Haben die Bestände die Möglichkeit, sich zu erholen, kommt dieser Umstand auch der Fischerei zugute. Bei deutlich niedrigeren Fangkosten wären dann langfristig höhere Erträge möglich.

7

Bodenschätze und Energie aus dem Meer



> Der Energie- und Rohstoffhunger der Menschheit wächst. Je knapper die Ressourcen an Land sind, desto interessanter wird der Abbau von Bodenschätzen im Meer. Vor allem die Tiefsee lockt mit Brennstoffen und Erzen. Doch auch Wind und Wellen könnten einen Teil des Energiebedarfs decken.



Fossile Brennstoffe

> Erdöl und Erdgas sind die wichtigsten Rohstoffe moderner Industriegesellschaften. Doch die Vorräte schwinden, und die Preise steigen. Für die Ölkonzerne werden damit auch jene Ressourcen interessant, die bislang nur schwierig und teuer zu erschließen waren: die Gas- und Öllagerstätten tief im Meer. Schon heute liegt der Offshore-Anteil der weltweiten Gas- und Ölfördermenge bei gut einem Drittel.

Abhängigkeit von Öl und Gas

Ohne Erdgas, Erdöl und Kohle stünde unsere Welt still. Kaum ein Auto, kaum eine Bahn, kaum ein Schiff würde fahren. In den meisten Büros gingen die Computer und das Licht aus. Die modernen Industrienationen sind von fossilen Rohstoffen fast gänzlich abhängig. In den vergangenen drei Jahrzehnten stieg der Energieverbrauch weltweit um 70 Prozent. Bis zum Jahr 2030 wird die Menschheit den Verbrauch nach Schätzungen der Internationalen Energieagentur (IEA) in Paris noch einmal um gut die Hälfte nach oben treiben. Die größten Energieverbraucher sind heute die USA, China und Russland. Auch in diesen Nationen wird die Energienachfrage weiter steigen. Angesichts des wachsenden Bedarfs und steigender Preise dürften künftig verstärkt Gas- und Öllagerstätten im Meer interessant werden, deren Abbau bislang zu teuer war.

Entstehung und Erkundung der fossilen Energieträger

Gas und Öl entstehen im Laufe von Jahrmillionen im Meer, weil Biomasse, abgestorbene Tiere und Pflanzen, in die Tiefe absinkt. Zusammen mit Partikeln, die vom Land ins Meer gespült werden, bildet sie am Meeresboden kilometerdicke Sedimentpakete. Unter den dort herrschenden hohen Drücken und Temperaturen wandeln Bakterien die Biomasse in Vorläufersubstanzen um, aus denen sich schließlich Kohlenwasserstoffe bilden. Diese können bestimmte Gesteins- und Sedimentschichten durchdringen. Sie wandern durch den Boden per Auftrieb nach oben. Diesen Prozess nennt man Migration. In manchen Fällen sammeln sich die Kohlen-

wasserstoffe an undurchlässigen Schichten. Nur dort bilden sich schließlich die eigentlichen Lagerstätten. Je nach Umgebungsbedingungen entsteht Gas oder Öl.

Die heutigen Vorkommen der fossilen Energieträger sind zwischen 15 und 600 Millionen Jahre alt. In diesem Zeitraum haben sich die Kontinentalplatten verschoben und Meere in Landmassen verwandelt, sodass heutige Rohstofflager sowohl im Meer als auch an Land zu finden sind. Für die heutigen Vorkommen im Meer gilt, dass Gas und Öl in der Regel nur dort zu finden sind, wo mächtige Sedimente den Meeresboden bedecken.

Bei der Suche nach neuen Lagerstätten, der Prospektion, bedient man sich heute seismischer Geräte. Bei diesen Verfahren erzeugt man Schallwellen, die von den Gesteins- und Sedimentschichten im Boden zurückgestreut werden. Anhand der akustischen Muster können Geologen ablesen, ob im Boden Schichten vorhanden sind, in denen Gas oder Öl lagern könnten. Auf See werden die Schallwellen durch eine sogenannte Airgun erzeugt – eine Art Unterwasser-Knallgerät, das mit Druckluft arbeitet. Die rückgestreuten Echos werden dann über Hydrophone am Meeresboden oder am Forschungsschiff empfangen.

Die Zukunft des Öls liegt im Meer

Seit Beginn der industriellen Ölförderung Mitte des 19. Jahrhunderts wurden 147 Milliarden Tonnen Öl aus den Lagerstätten rund um den Globus gepumpt – die Hälfte davon allein in den vergangenen 20 Jahren. Nur im Jahr 2007 lag der Mineralölverbrauch weltweit bei insgesamt rund 3,9 Milliarden Tonnen. Es steht außer Frage, dass die Förderung schon in naher Zukunft nicht mehr mit dem jährlich wachsenden Bedarf Schritt halten

kann. Experten erwarten, dass in den kommenden zehn Jahren der sogenannte Peak Oil erreicht wird, der historische Scheitelpunkt der weltweiten Ölförderung.

Derzeit schätzt man die konventionellen, das heißt die leicht und kostengünstig mit heutiger Technik gewinnbaren Ölreserven auf gut 157 Milliarden Tonnen. Davon sind 26 Prozent (41 Milliarden Tonnen) in Offshore-Gebieten zu finden. Aus dem Meer gefördert wurden im Jahr 2007 1,4 Milliarden Tonnen Öl, was etwa 37 Prozent der jährlichen Ölproduktion entspricht. Damit ist der Offshore-Anteil der Förderung schon heute relativ hoch. Die ergiebigen Gebiete sind derzeit die Nordsee und der Golf von Mexiko, der Atlantik vor Brasilien und Westafrika, der Arabische Golf und das Meer vor Südostasien.

Seit einigen Jahren schon gibt es einen Trend zu immer größeren Wassertiefen. 2007 wurde Öl bereits aus 157 Feldern gefördert, die mehr als 500 Meter tief liegen. Im Jahr 2000 waren gerade einmal 44 solcher Felder in Betrieb. 91 Prozent dieser Felder liegen im sogenannten Goldenen Dreieck im Atlantik zwischen dem Golf von Mexiko, Brasilien und Westafrika. Während die Fördermenge in der mit durchschnittlich 40 Metern Tiefe relativ flachen Nordsee in den kommenden Jahren abnehmen wird, dürfte sie vor allem im Goldenen Dreieck, vor Indien, im Südchinesischen Meer und im Kaspischen Meer vor Kasachstan weiter wachsen.

Die tieferen Meeresgebiete bergen für die Zukunft also zusätzliches Potenzial. Experten gehen deshalb

	IEA (2008) USD pro Barrel	Petrobras (2008) USD pro Barrel
Naher Osten	3–14	7–19
GUS-Staaten	k. A.	15–35
Tiefsee	32–65	23–45
Enhanced Oil Recovery	30–82	25–63
Arktis	32–100	25–50
Übrige Regionen	10–40	12–30

7.1 > Gewinnungskosten von konventionellem Erdöl nach Art und Region nach Schätzung der IEA und des Ölkonzerns Petrobras (Enhanced Oil Rec.: verbesserte Nutzung alter Ölfelder).

davon aus, dass sich der Offshore-Trend mit der zu erwartenden Verknappung des Öls fortsetzen wird. Die Förderung hier aber ist aufwendig und kostspielig. So benötigt man beispielsweise für die Ausbeutung von Feldern in großer Tiefe Ölförder- und Produktionsschiffe oder fest montierte Pumpstationen am Meeresgrund.

Offshore-Gas und seine Chancen

Auch der Erdgasverbrauch wächst permanent. Im Jahr 2007 lag er weltweit bei gut 3 Billionen Kubikmetern, etwa 520 Milliarden Kubikmeter mehr als noch im Jahr 2001. Zum Vergleich: Ein deutscher Haushalt benötigt jährlich etwa 3500 Kubikmeter Gas. Die größten Erdgasverbraucher sind die USA, auf die allein etwa ein Viertel des Welt-Gasverbrauchs entfällt, gefolgt von Russland, Iran, Japan und Deutschland.

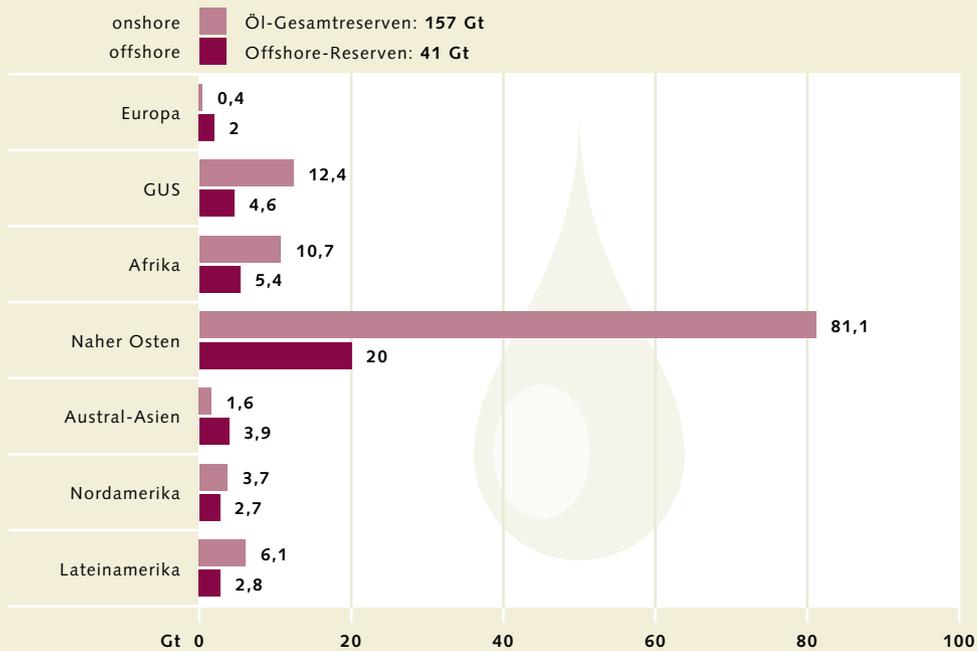
Die Erdgasvorkommen sind recht ungleich über den Globus verteilt. Was die Lagerstätten an Land betrifft, verfügen die GUS-Staaten und der Nahe Osten über fast drei Viertel der Welt-Gasreserven. Offshore sieht das Bild ein wenig anders aus. Hier ist der Nahe Osten Spitzenreiter. In dieser Region ist im Meeresboden sogar deutlich mehr Gas vorhanden als in den dortigen Landlagerstätten. Als weltweit größtes Vorkommen gilt das Erdgasfeld South Pars/North Field im Persischen Golf an der Grenze von Iran und Katar. Hier werden allein 38 Billionen Kubikmeter Gas vermutet. Das ist eine gewaltige Menge, wenn man bedenkt, dass die weltweiten Reserven auf 183 Billionen Kubikmeter Erdgas geschätzt werden. Weitere wichtige potenzielle Offshore-Regionen sind die Nordsee, der Golf von Mexiko, Austral-Asien, Afrika und die GUS-Staaten sowie das Goldene Dreieck, in dem Gas auch als Nebenprodukt der Erdölindustrie gewonnen wird.

Das wichtigste Fördergebiet ist derzeit noch die Nordsee. Andere Regionen werden ihr in den kommenden Jahren aber den Rang ablaufen. Im Nahen Osten, aber auch vor Indien und Bangladesch, Indonesien und Malaysia wird die Erdgasförderung in nächster Zeit anziehen.

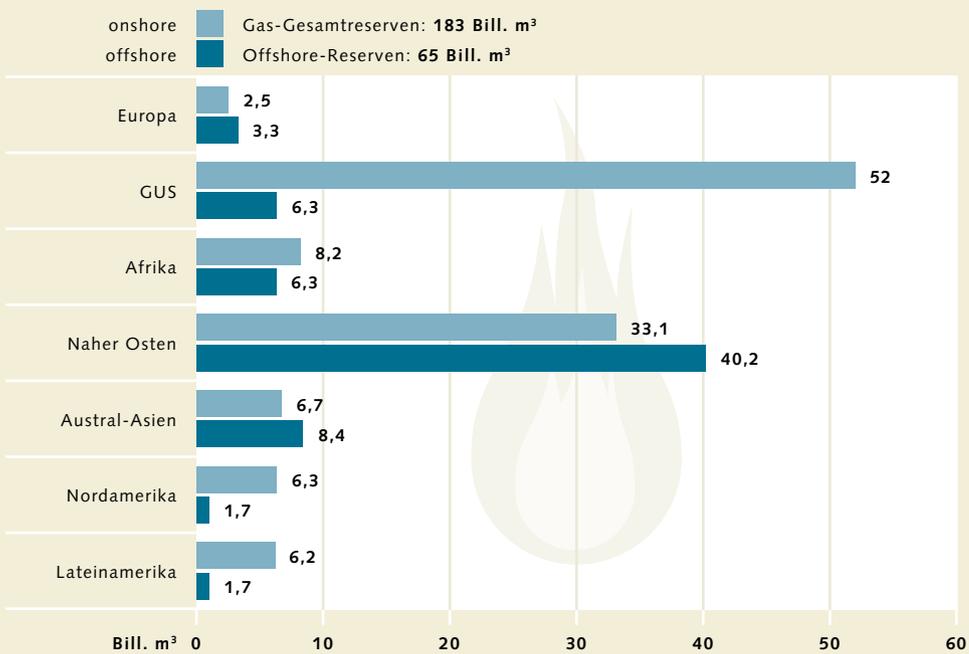
Momentan liegt der Offshore-Anteil der weltweiten Gasfördermenge mit 65 Billionen Kubikmetern bei gut einem Drittel. Künftig wird die Offshore-Förderung von Erdgas weiter zunehmen. So ist die Erdgasförderung aus

Reserve und Ressource

Als Reserve bezeichnet man die Vorräte eines Energierohstoffs, die mit großer Genauigkeit erfasst wurden und sich mit der gängigen Förder-technik wirtschaftlich fördern lassen. Der Begriff Ressource hingegen meint die Menge eines Energierohstoffs, die geologisch nachgewiesen ist, aber derzeit nicht wirtschaftlich gewonnen werden kann, und außerdem jene Menge, die noch nicht nachgewiesen worden, aber in einem Gebiet aufgrund der geologischen Charakteristika zu erwarten ist.



7.2 > Weltweite Verteilung der Reserven an konventionellem Erdöl 2007 onshore und offshore nach Regionen.



7.3 > Weltweite Verteilung der Reserven an konventionellem Erdgas 2007 onshore und offshore nach Regionen.

Offshore-Feldern zwischen 2001 und 2007 um knapp 20 Prozent gewachsen. Davon kamen je ein Viertel aus der Nordsee und Austral-Asien und etwa 15 Prozent aus dem Golf von Mexiko sowie dem Nahen Osten. Der Trend ist, wie beim Erdöl, klar: Die Förderung wächst offshore stärker als onshore. Und auch beim Erdgas strebt man in immer größere Meerestiefen. Den Rekord hält derzeit das Cheyenne-Gasfeld im Golf von Mexiko, aus dem in 2740 Metern Tiefe gefördert wird.

Mit Vollgas über die Weltmeere – Flüssigerdgas

Bei der Eroberung der Meere spielt verflüssigtes Erdgas eine wichtige Rolle – das sogenannte LNG (Liquefied Natural Gas). Gekühlt und verflüssigt, kann Erdgas in riesigen Tankern über die Ozeane billiger transportiert werden als durch Pipelines. LNG macht schon jetzt ein Viertel des globalen Gashandels aus. Auch in Zukunft wird Erdgas, statt es in Pipelines über Land zu schicken, immer häufiger verschifft. An Land sind Pipelines bis zu etwa 3000 Kilometern Länge billiger als die Erdgas-Verflüssigung und -Verschiffung von Hafen zu Hafen. Am Meeresgrund dagegen lohnen sich Pipelines schon ab dem ersten Meter nicht. Viel eher rentiert sich die LNG-Verschiffung von der Offshore-Förderanlage zum Land.

Eine LNG-Anlage verflüssigt Erdgas, indem sie den Rohstoff auf etwa minus 160 Grad Celsius abkühlt. Solche LNG-Anlagen haben einen hohen Energieverbrauch und tragen wesentlich zu den Kosten der LNG-Transportkette bei. Doch schon jetzt ist abzusehen, dass der LNG-Anteil am Erdgashandel in Zukunft deutlich zunehmen wird. In den kommenden 15 Jahren soll der Markt jedes Jahr um 8 Prozent wachsen, viel stärker expandieren als der Handel mit Pipelinegas. Mehrere Verflüssigungsanlagen sind bereits in Betrieb.

Kürzlich wurde in Norwegen eine LNG-Anlage in Betrieb genommen, die Erdgas aus der Barentssee verflüssigt. Das Erdgas wird dabei erst aus dem Gasfeld Snøhvit – zu Deutsch Schneewittchen – ans Festland nach Hammerfest gepumpt und dort dann entsprechend verarbeitet. Bald sollen auch vor der westafrikanischen Küste erste LNG-Anlagen direkt im Meer über den Gasfeldern errichtet werden. Tanker können dann vor Ort anlegen.

Sonderfall Arktis

Mit dem durch den Klimawandel verursachten Wegschmelzen des arktischen Meereises wächst die Hoffnung der arktischen Nationen, künftig die Erdgas- und Erdölvorräte in der Nordpolarregion ausbeuten zu können. Aktuelle wissenschaftliche Arbeiten gehen davon aus, dass dort tatsächlich beträchtliche Vorkommen zu finden sind. So wird vermutet, dass in den Meeresgebieten nördlich des Polarkreises etwa 30 Prozent der bislang noch unentdeckten Gasmengen und 13 Prozent des unentdeckten Öls ruhen. Nach Ansicht der Wissenschaftler sind die Gasvorräte beträchtlich und liegen vor allem in den russischen Gewässern. Die geringeren Ölvorräte hingegen dürften die Weltölproduktion kaum beeinflussen. Ob und wann eine Förderung in der Arktis beginnt, kann derzeit aber noch keiner sagen. Nicht zuletzt weil noch eine Reihe rechtlicher Fragen zu klären ist (Kapitel 10). Zudem ist eine Förderung in diesen unerschlossenen Gebieten derzeit nicht wirtschaftlich, da man sie nur mit aufwendigen und teuren Eisbrechereinsätzen erkunden kann.

Die Endlichkeit von Öl und Erdgas

Sicher ist, dass der Abbau von Erdöl und Erdgas im Meer zunehmen wird. Die Technik ist längst etabliert. Allein die Kosten liegen derzeit noch deutlich höher als beim Abbau an Land oder in Flachwassergebieten. Mit sich verknappenden Gas- und Ölvorräten und steigenden Ölpreisen aber wird der Abbau bislang unrentabler Vorkommen wirtschaftlich. Offshore-Felder werden damit künftig wesentlich zur Energieversorgung der Industriegesellschaft beitragen können. Wie lange die weltweiten Öl- und Gasreserven und -ressourcen reichen, lässt sich nicht mit Bestimmtheit sagen – insbesondere weil sich die künftige Entwicklung des Verbrauchs nur schwer vorhersagen lässt. Aus heutiger Sicht werden beispielsweise die Erdgasressourcen vermutlich bis weit in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts die Versorgung sicherstellen können. Wird aber Erdgas künftig verstärkt für Autos oder zur Stromproduktion in Kraftwerken eingesetzt, dann könnte das die Vorräte deutlich schneller aufzehren.

Marine mineralische Rohstoffe

> Erdgas und Erdöl werden schon seit Jahrzehnten aus den Ozeanen gewonnen. An den Erz- und Mineralienvorkommen am Meeresgrund hingegen bestand bislang wenig Interesse. Doch durch die steigenden Rohstoffpreise wird der Meeresbergbau jetzt interessant. So wird erwartet, dass die Ernte von Massivsulfiden und Manganknollen schon in wenigen Jahren beginnt.

Der Meeresboden – Rohstofflager der Menschheit

Die Ozeane bergen einen Schatz an wertvollen Rohstoffen. Sand und Kies sowie Öl und Gas werden bereits seit vielen Jahren im Meer abgebaut. Darüber hinaus fördert man aus den flachen Schelf- und Strandbereichen Minerale, die durch Erosion aus dem Hinterland an die Küste transportiert worden sind. Dazu gehören zum Beispiel die Diamanten vor der Küste Südafrikas und Namibias sowie Vorkommen von Zinn, Titan und Gold entlang der Ufer Afrikas, Asiens und Südamerikas.

Seit Kurzem nun gibt es Bestrebungen, den Meeresbergbau auf die Tiefsee auszuweiten. Im Fokus stehen die Manganknollen, meist in Wassertiefen jenseits der 4000 Meter vorzufinden, Gashydrate (in Bereichen zwischen 350 und 5000 Metern), die Kobaltkrusten entlang der Flanken submariner Gebirgszüge (zwischen 1000 und 3000 Metern) sowie die Massivsulfide und die Sulfidschlämme, die sich im Raum vulkanischer Aktivität an den Plattengrenzen in Wassertiefen zwischen 500 und 4000 Meter bilden.

Bereits in den 1980er Jahren gab es ein sehr großes Interesse am Abbau von Manganknollen und Kobaltkrusten. Diese erste Meeresbergbau-Euphorie führte auch zur Bildung der Meeresbodenbehörde der Vereinten Nationen in Jamaika (International Seabed Authority, ISA) sowie zur Unterzeichnung der Verfassung der Meere UNCLOS (United Nations Convention on the Law of the Sea) im Jahr 1982. Dieses große Abkommen bildet seit seinem Inkrafttreten 1994 für alle Unterzeichner die Grundlage für die Nutzung mariner Rohstoffe am Meeresboden außerhalb der Hoheitsgebiete der Länder (Kapitel 10).

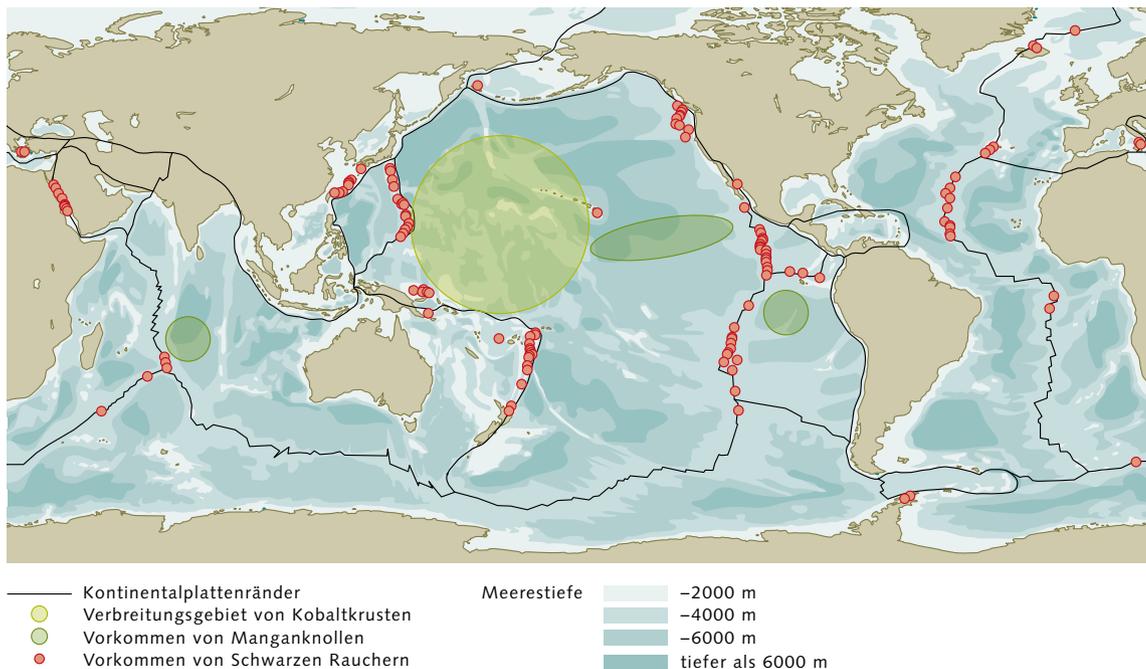
Doch das rohstoffpolitische Interesse der Industrieländer schwand. Zum einen sanken die Rohstoffpreise – es hätte sich nicht mehr gelohnt, die Brocken aus der Tiefsee emporzuholen und die darin enthaltenen Metalle nutzbar zu machen. Zum anderen fand man neue Landlagerstätten, die billiger auszubeuten waren. Das derzeit wiedererstarke Interesse ist auf die in den letzten Jahren stark gestiegenen Rohstoffpreise – und dem damit lukrativer gewordenen Schürfgeschäft – sowie insbesondere auf das kräftige Wirtschaftswachstum in Ländern wie China und Indien zurückzuführen, die große Mengen an Rohstoffen auf dem Weltmarkt einkaufen.

Auch die letzte Wirtschaftskrise wird diesen Trend vermutlich nicht lange aufhalten. Zusätzlich spielen auch geopolitische Überlegungen der Industrie- und Schwellenländer zur Ressourcensicherung eine Rolle. Gerade Nationen, die nicht über eigene Reserven verfügen, halten angesichts steigender Rohstoffnachfrage in den Weiten der Ozeane nach exterritorialen Claims Ausschau.

Manganknollen

Manganknollen sind kartoffel- bis salatkopfgroße Mineralienklumpen, die mit bis zu 75 Kilogramm pro Quadratmeter riesige Bereiche der Tiefseeebenen bedecken. Sie bestehen hauptsächlich aus Mangan, Eisen, Silikaten und Hydroxiden und wachsen mit einer Geschwindigkeit von nur 1 bis 3 Millimetern pro Million Jahre um einen Kristallisationskeim. Die chemischen Elemente werden dabei aus dem Meerwasser aufgenommen oder stammen aus dem Porenwasser der darunter ruhenden Sedimente. Die höchsten Knollendichten finden sich vor der Westküste Mexikos (in der sogenannten Clarion-

Kontinentalplatten
Die Erdkruste besteht aus mehreren Kontinentalplatten, die permanent in Bewegung sind. Pro Jahr verschieben sie sich um wenige Zentimeter. Diese Kontinentalverschiebung bedeutet, dass sich Platten an manchen Stellen voneinander entfernen. An diesen Plattengrenzen reißt die Erdkruste auf. Aus den Rissen quillt ständig frische Magmamasse, die sich im Laufe der Zeit am Grund der Ozeane zu großen Meeresrücken anhäuft.



7.4 > Der Meeresboden steckt voller Rohstoffe. Je nach Ursprung konzentrieren sie sich in bestimmten Regionen.

Clipperton-Zone), im Peru-Becken und im Indischen Ozean. In der Clarion-Clipperton-Zone liegen die Manganknollen auf den Sedimenten der Tiefseeebene auf einer Fläche von mindestens 9 Millionen Quadratkilometern – ein Gebiet von der Größe Europas. Die Anreicherungen in diesem Bereich sind vermutlich auf einen erhöhten Eintrag von manganhaltigen Mineralien in das Sediment zurückzuführen, die vom **ostpazifischen Rücken** durch hydrothermale Aktivität, also durch Warmwasserquellen am Meeresboden, aus dem Erdinnern freigesetzt und durch die Meeresströmungen über weite Gebiete verbreitet werden.

Manganknollen bestehen vor allem aus Mangan und Eisen. Die wirtschaftlich interessanteren Elemente wie etwa Kobalt, Kupfer und Nickel sind in geringerer Konzentration vorhanden und bringen es zusammen auf etwa 3 Gewichtsprozent. Hinzu kommen noch Spuren anderer bedeutsamer Elemente wie Platin oder Tellur, die in der Industrie für verschiedene Hightechprodukte benötigt werden.

Der Abbau selbst stellt grundsätzlich kein großes technisches Problem dar, da die Knollen relativ einfach vom Meeresboden gesammelt werden können. Schon 1978 hatte man Manganknollen in ersten Fördertests erfolg-

reich an die Meeresoberfläche transportiert. Um die Knollen in Massen abbauen zu können, müssen aber noch offene Fragen geklärt werden. So sind die Dichten der Knollenvorkommen oder die Variabilität der Metallgehalte nicht im Detail bekannt. Neuere Untersuchungen zeigen zudem, dass die Tiefseeebenen nicht so flach sind, wie noch vor 30 Jahren angenommen. Viele vulkanische Erhebungen schränken die Abbauflächen ein.

Ein bergmännischer Abbau der Manganknollen würde darüber hinaus Teile des Ozeangrunds verbrauchen, geschätzte 120 Quadratkilometer Meeresboden pro Jahr, eine Fläche von der Größe der Stadt Kiel, wobei gewaltige Mengen an Sediment, Wasser und zahllose Lebewesen mitgefördert würden. Der Eingriff in den Lebensraum Tiefsee ist erheblich. Ob und wie eine Wiederbesiedlung der abgeernteten Areale erfolgt, ist bisher kaum geklärt.

Seit 2001 wurden von der ISA mehrere Lizenzen zur Erkundung von Manganknollenfeldern an staatliche Institutionen vergeben. Noch dreht es sich nicht um einen Abbau, sondern zunächst um die genaue Untersuchung der potenziellen Abbaugelände. Auch Deutschland hat sich 2006 für 15 Jahre die Rechte an einem 150 000 Quadratkilometer großen Gebiet gesichert – der



Schnitt durch eine Manganknolle: In Jahrmillionen lagern sich Mineralien an einem Keim an.

doppelten Größe Bayerns. Über Kooperationen mit Entwicklungsländern (Tonga, Nauru) haben im vergangenen Jahr erstmalig auch Industriefirmen Anträge auf die Exploration von Manganknollenfeldern in der offenen See gestellt.

Kobaltkrusten

Kobaltkrusten entstehen in Wassertiefen von 1000 bis 3000 Metern an den Flanken submariner Vulkane und finden sich deshalb bevorzugt in Regionen mit starker vulkanischer Aktivität wie etwa den Hoheitsgewässern der Inselstaaten des Südpazifiks. Die Krusten bilden sich, indem sich im Wasser gelöstes Mangan, Eisen sowie eine ganze Reihe von Spurenmetallen (Kobalt, Kupfer, Nickel, Platin) auf den vulkanischen Substraten ablagern.

Die Wachstumsgeschwindigkeit ist mit der von Manganknollen vergleichbar. Auch die Kobaltkrusten enthalten nur geringe Mengen der wirtschaftlich interessanten Wertstoffe; es müssen also Tonnen an Rohmaterial gefördert werden, um daraus relevante Mengen der Metalle zu gewinnen. Allerdings sind die Gehalte an Kobalt (bis zu 2 Prozent) und auch Platin (bis 0,0001 Prozent) etwas höher als in Manganknollen. Die marine Förderung von Kobalt ist insbesondere deshalb interessant, weil es an Land in nur wenigen – teilweise politisch instabilen – Staaten (Kongo, Zaire, Russland, Australien und China) zu holen ist, aus deren Abhängigkeit man sich lösen könnte, wenn sich die Meere als alternatives Schürfvier erwiesen.

Der Abbau von Kobaltkrusten ist technisch deutlich schwieriger als der von Manganknollen. Zum einen ist darauf zu achten, dass nur die Kruste und nicht das darunterliegende Vulkangestein abgetragen wird. Zum anderen sind die Hänge der Vulkane ausgesprochen schroff und steil, was den Einsatz von Abbaumaschinen erschwert. So verwundert es nicht, dass für den Kobaltkrusten-Abbau bislang erst Konzeptstudien vorliegen.

Auch die Kobaltkrusten-Förderung dürfte erhebliche Auswirkungen auf die Bodenlebewesen haben. Daher sollten in jedem Fall vorher Umweltverträglichkeitsprüfungen durchgeführt werden. Eine Kontrolle durch die ISA ist meist nicht möglich, da sich viele Kobaltvorkommen in den Hoheitsgewässern von Staaten befinden.

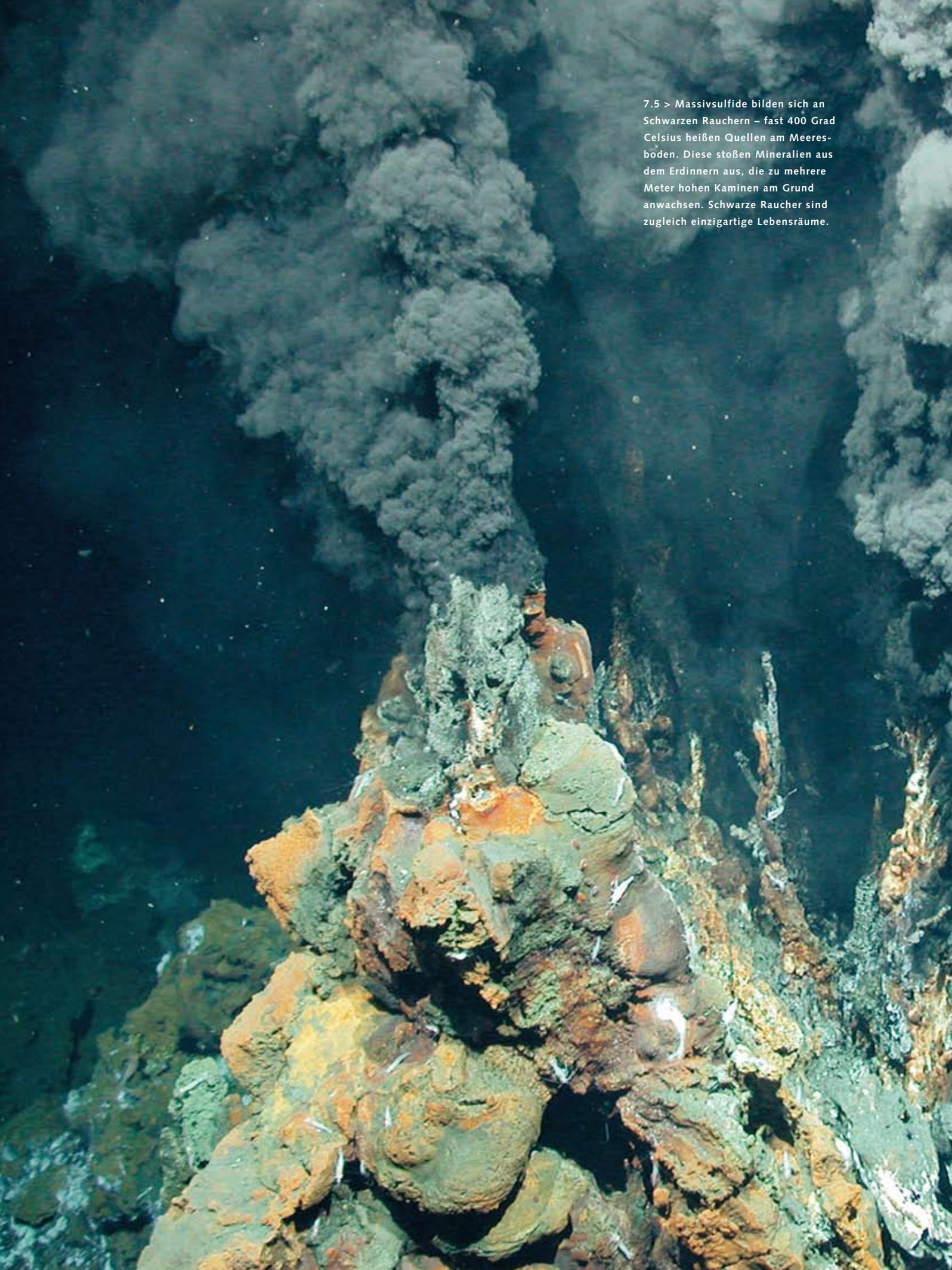
Massivsulfide

Bei dem dritten Rohstoff handelt es sich um schwefelhaltige Erze, die an den Schwarzen Rauchern entstehen. Solche Massivsulfidvorkommen bilden sich an submarinen Plattengrenzen, wo durch das Zusammenwirken von vulkanischer Aktivität und Meerwasser ein Wärme- und Stoffaustausch zwischen den Gesteinen der Erdkruste und dem Ozean stattfindet.

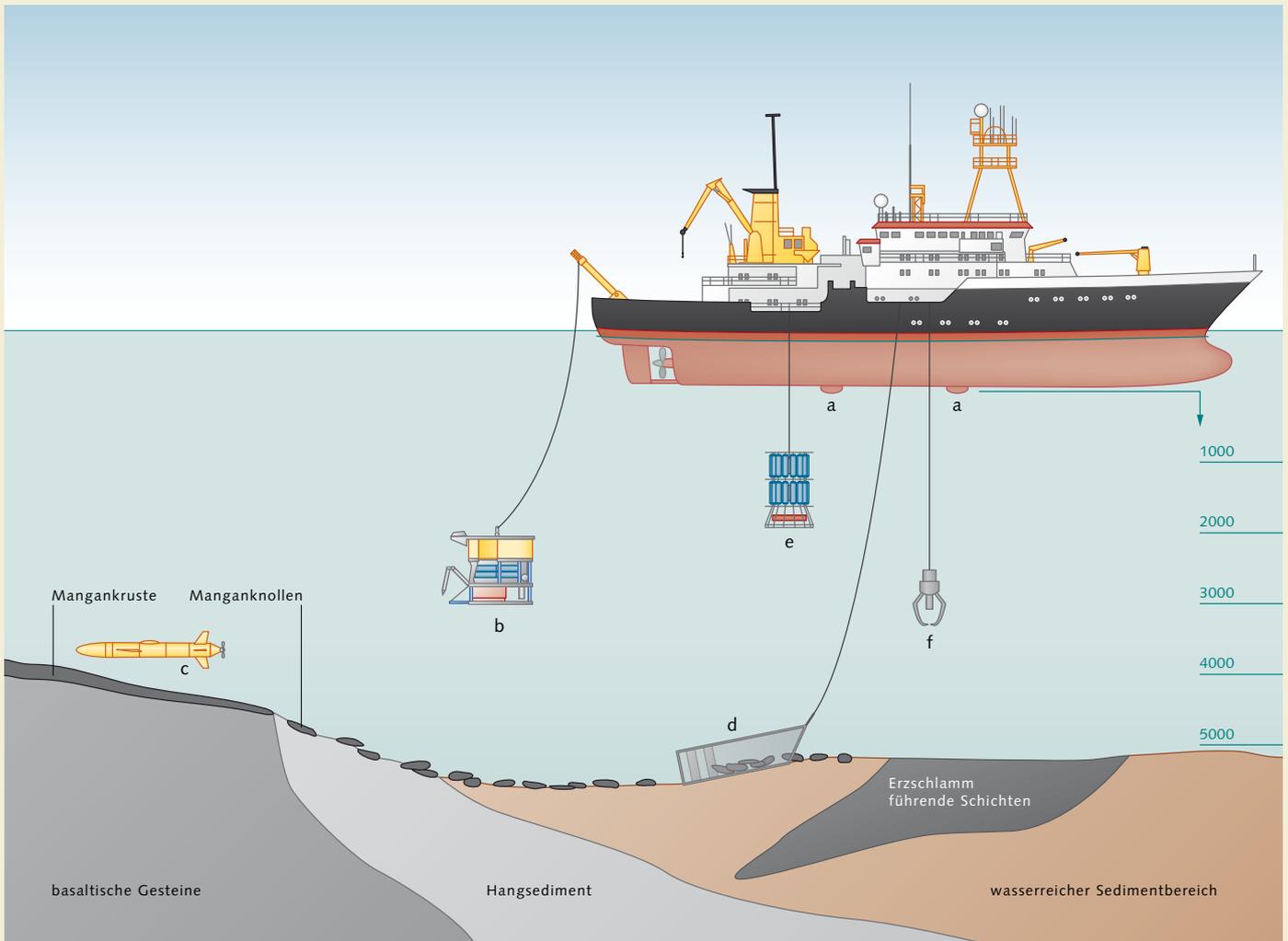
Kaltes Meerwasser wird dabei entlang von Spalten bis zu mehrere Kilometer tief in den Meeresboden gepresst. In der Nähe einer Wärmequelle, wie etwa einer Magmakammer, wird das Meerwasser auf Temperaturen von mehr als 400 Grad Celsius erhitzt. Aufgrund der Erwärmung steigt das Wasser sehr schnell auf und schießt zurück ins Meer. Diese hydrothermale Lösung transportiert dabei aus dem Gestein und aus dem Magma gelöste Metalle, die sich am Meeresboden ablagern und nach und nach aufschichten. So entstehen die Massivsulfidvorkommen und die charakteristischen Kamine der Schwarzen Raucher.

Diese wurden erstmals 1978 am ostpazifischen Rücken entdeckt. Lange nahm man an, dass sich für den Bergbau interessante Massivsulfide nur an den **mittel-ozeanischen Rücken** bilden, da hier die vulkanische Aktivität und Wärmeproduktion besonders hoch ist. Inzwischen sind aber mehr als 200 Vorkommen in allen Weltmeeren bekannt. Fachleute schätzen, dass am Meeresboden insgesamt sogar 500 bis 1000 große Vorkommen existieren. Dabei gibt es deutliche Größenunterschiede. Die meisten Vorkommen messen nur einige Meter im Durchmesser und enthalten kaum nennenswertes Material.

Bisher sind nur wenige Massivsulfidvorkommen bekannt, die aufgrund ihrer Größe und Beschaffenheit wirtschaftlich interessant sind. Während die Schwarzen Raucher entlang des ostpazifischen Rückens und des zentralen Atlantiks überwiegend aus eisenreichen Schwefelverbindungen, den Sulfiden, bestehen, die keinen Tiefseebergbau lohnen, weisen die Vorkommen im Südwestpazifik erhöhte Kupfer-, Zink- und Goldgehalte auf. Diese südwestpazifischen Ressourcen befinden sich in vergleichsweise geringen Wassertiefen (weniger als 2000 Meter) und liegen in den Wirtschaftszonen von



7.5 > Massivsulfide bilden sich an Schwarzen Rauchern – fast 400 Grad Celsius heißen Quellen am Meeresboden. Diese stoßen Mineralien aus dem Erdinnern aus, die zu mehrere Meter hohen Kaminen am Grund anwachsen. Schwarze Raucher sind zugleich einzigartige Lebensräume.



7.6 > Bei der Suche nach Bodenschätzen wird der Meeresgrund mit einer Vielzahl von Geräten erkundet.

- a. Mithilfe von Echosloten wird ein Tiefenprofil des Meeresbodens erstellt.
- b. Ferngesteuerte Tauchroboter (Remotely Operated Vehicles, ROV) sind mit Kameras und Greifarmen ausgestattet. Damit nehmen sie Bilder vom Meeresboden auf und sammeln Gesteinsproben ein.
- c. Autonome Unterwasserfahrzeuge (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) können tief zum Meeresboden hinabtauchen. Sie sind mit Echosloten und verschiedenen Messsensoren ausgestattet und kehren nach ihrem rund 20-stündigen Einsatz zum Schiff zurück.
- d. Für die Großprobennahme wird hinter dem Schiff ein Metallkäfig (Dredge) hergeschleppt, der mehr Material fassen kann als ein Greifer.
- e. Mit Multisonden können in verschiedenen Tiefen Wasserproben genommen sowie chemische und physikalische Parameter gemessen werden.
- f. Mit Greifern können vom Schiff aus Einzelproben, etwa Gesteinsbrocken, genommen werden. Zur besseren Orientierung sind die Geräte mit Kameras ausgestattet.

Anrainerstaaten (Kapitel 10), was einem möglichen Abbau technologisch und politisch entgegenkommt. Denn über den Abbau in den nationalen Hoheitsgebieten können die Staaten selbst entscheiden. Den staatenlosen Tiefseeboden hingegen überwacht die Internationale Meeresbodenbehörde ISA (Kapitel 10).

Derzeitige Abbauszenarien sehen vor, überwiegend erkaltete, inaktive Massivsulfidvorkommen zu nutzen, die kaum von Lebewesen besiedelt sind. Noch aktive Schwarze Raucher dagegen scheiden momentan aus, weil diese meist vergleichsweise geringe Rohstoffmengen enthalten. Außerdem bieten sie, begünstigt durch das nährstoffreiche Wasser aus der Tiefe, zahlreichen, zum Teil auch endemischen, nur hier lebenden Organismen einen wichtigen Lebensraum.

Das größte bekannte Sulfidvorkommen befindet sich im Roten Meer, wo tektonische Kräfte Afrika und die Arabische Halbinsel auseinanderdriften lassen. Hier treten die Sulfide nicht als Schwarze Raucher, sondern in Form eisenreicher Erzschlämme mit erhöhten Gehalten an Kupfer, Zink und Gold auf. Dieses Vorkommen in Wassertiefen um die 2000 Meter ist seit den 1960er Jahren bekannt. Dank der schlammigen Konsistenz dieser Lagerstätten erscheint ein Abbau unproblematisch und wurde schon einmal in den 1980er Jahren erfolgreich getestet.

Von den drei hier genannten Rohstoffen am Meeresgrund kommen die Massivsulfide zwar mengenmäßig am geringsten vor, sie sind aber aufgrund ihrer hohen Wertstoffgehalte besonders interessant. So haben verschiedene Bergbaufirmen bereits Explorationslizenzen in nationalen Gewässern erworben und treiben die Technologie zur Erkundung und zum Abbau voran. In 2010 erteilte die ISA erstmals Schürfrechte für ein Vorkommen im Indischen Ozean an China. Bis dahin gab es nur Genehmigungen zur Erforschung der Tiefsee.

Darüber hinaus soll in naher Zukunft mit einem Abbau kupfer- und goldhaltiger Massivsulfide vor der Küste Papua-Neuguineas und Neuseelands begonnen werden. Der Abbau sollte ursprünglich schon früher starten, doch hat die letzte Wirtschaftslaute trotz relativ hoher Goldpreise auch großen Metall- und Bergbaukonzernen Umsatzeinbrüche beschert, sodass die Projekte kurzfristig angehalten wurden. Für die Zukunft

aber ist mit einer Erholung des Metallmarkts zu rechnen. Die Unternehmen dürften ihre Vorhaben daher alsbald fortführen.

Die künftige Entwicklung des Meeresbergbaus

Von allen drei Bodenschätzen, die in der Tiefsee darauf warten, gehoben zu werden, erscheint derzeit der Abbau von Massivsulfiden in den 200-Seemeilen-Zonen von Staaten des Westpazifiks (Papua-Neuguinea) am ehesten durchführbar. Trotz der letzten Wirtschaftskrise ist hier ein Beginn der Förderung in den nächsten Jahren möglich. Zwar mag sich für einzelne Unternehmen der Abbau von Massivsulfiden aufgrund des relativ hohen Gehalts an wertvollen Metallen lohnen. In der Summe aber sind die Metallmengen in den globalen Massivsulfidvorkommen kleiner als diejenigen von Erzlagerstätten an Land. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass der marine Abbau von Massivsulfiden einen entscheidenden Einfluss auf die weltweite Rohstoffversorgung hat.

Anders sieht es bei den Manganknollen und Kobaltkrusten aus. Dort können die Mengen an Kupfer, Kobalt und Nickel mit den Vorkommen an Land durchaus konkurrieren. Beim Kobalt übertreffen sie die bekannten Landvorkommen sogar deutlich. Derzeit werden pro Jahr ungefähr 70 000 Tonnen Kobalt an Land abgebaut und die weltweiten Landvorräte auf circa 15 Millionen Tonnen geschätzt. In den Manganknollen und Kobaltkrusten werden hingegen insgesamt rund 1000 Millionen Tonnen Kobalt vermutet.

Trotz dieser gewaltigen Ressource wird ein Abbau dieser Vorkommen am Meeresboden nur bei günstigen Marktbedingungen, also bei einer entsprechend großen Nachfrage und hohen Metallpreisen, mit den derzeit in ausreichender Menge an Land vorhandenen Erzen konkurrieren können. Zudem muss die Fördertechnik zunächst noch entwickelt werden. Die höheren technischen Schwierigkeiten beim Ablösen der Krusten vom Substrat und die raue Meeresbodenoberfläche verringern dabei zurzeit das ökonomische Potenzial der Kobaltkrusten noch weiter. Daher ist, wie es aussieht, in den nächsten Jahren nicht mit einem marinen Abbau von Kobaltkrusten zu rechnen.

Methanhydrat

> Bis vor zehn Jahren hatte noch kaum jemand von ihnen gehört, den Methanhydraten. Inzwischen aber werden diese chemischen Verbindungen als mögliche künftige Energiequelle im Meeresgrund diskutiert. Die Menge an Erdgas, die in den Hydraten gebunden ist, übersteigt die Erdgasreserven in konventionellen Lagerstätten um ein Vielfaches. Aber die Methanhydrate bergen nicht nur eine potenzielle Energiequelle, sondern auch ein Klimarisiko.

Brutstätte der Methanhydrate: der Meeresgrund

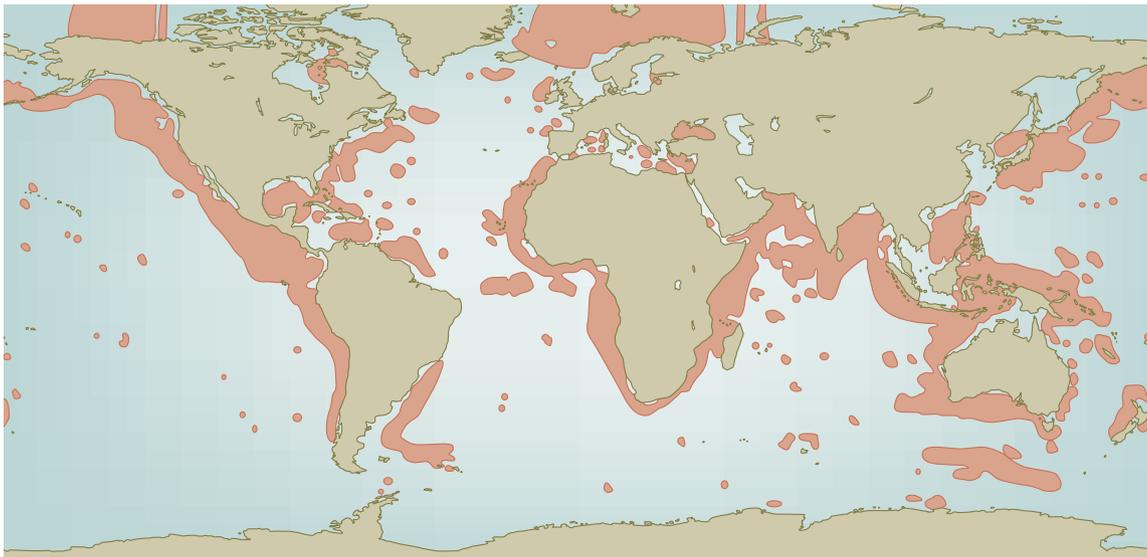
Methanhydrate sind eisähnliche weiße Festkörper, die aus Methan und Wasser bestehen. Die Methanmoleküle sind dabei in mikroskopisch kleinen Käfigen eingeschlossen, die aus Wassermolekülen aufgebaut sind. Methan wird vor allem durch Mikroorganismen gebildet, die in tiefen Sedimentschichten leben und dort organische Substanzen sehr langsam in Methan umwandeln. Die organischen Stoffe, aus denen das Methan gebildet wird, sind Überreste von **Plankton**, das vor langer Zeit im Ozean gelebt hat, zum Meeresboden gesunken ist und schließlich in die Sedimente eingebettet wurde.

Methanhydrate sind nur bei hohen Drücken von mehr als 35 bar und niedrigen Temperaturen stabil. Der Meeresgrund ist deshalb für die Bildung von Methanhydraten geradezu ideal: Das Bodenwasser der Ozeane und der Tiefseeboden sind mit 0 bis 4 Grad Celsius fast überall sehr kalt. Zudem herrscht ab einer Wassertiefe von circa 350 Metern ein ausreichend hoher Druck, um die Hydrate zu stabilisieren. Dringt man aber tiefer in die mächtigen Sedimentschichten am Meeresboden ein, steigen die Temperaturen durch die zunehmende Nähe zum Erdinnern wieder an. In Sedimenttiefen von mehr als etwa 1 Kilometer steigen die Temperaturen auf über 30 Grad Celsius, sodass keine Methanhydrate abgelagert werden können. Allerdings ist hier die Methanbildung besonders intensiv. Zunächst entstehen kleine Methangasblasen, die aus den Tiefen des Sediments aufsteigen und dann im kühlen Wasser am Meeresboden in Methanhydrate umgewandelt werden. Das Methan wird also in tiefen und warmen Sedimenthorizonten gebildet und erst in den kalten oberen Sedimentschichten in Methanhydrat

umgewandelt und fixiert. In flachen Randmeeren und Schelfbereichen gibt es keine Methanhydrate. Dort reicht der Druck am Meeresboden nicht aus, um die Hydrate zu stabilisieren. Am Boden der großen Ozeanbecken wiederum ist zwar der Druck hoch genug, dort sind aber kaum Hydrate vorzufinden, da nur wenig organische Substanz in die Tiefseesedimente eingebettet wird, die den Boden dieser Ozeanbecken bilden. Der Grund: Auf hoher See ist das Meerwasser vergleichsweise nährstoffarm, sodass dort wenig Biomasse produziert wird und absinkt. So kommen Methanhydrate im Wesentlichen an den Kontinentalrändern in Wassertiefen zwischen 350 und 5000 Metern vor. Zum einen wird dort genügend organische Substanz als Sediment abgelagert. Zum anderen sind die Temperatur- und Druckbedingungen so günstig, dass sich Methan in Methanhydrate umwandeln kann.

Bildung von Treibhausgas

In den Sedimentablagerungen der Kontinentalhänge schlummern gewaltige Massen Methanhydrat. Die globale Gesamtmenge an Methankohlenstoff, die in diesen Hydratvorkommen gebunden ist, beträgt ungefähr 1000 bis 5000 Gigatonnen Kohlenstoff – das ist in etwa 100- bis 500-mal mehr Kohlenstoff, als jährlich durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern (Kohle, Öl, Gas) in die Atmosphäre freigesetzt wird. Bei niedrigen Temperaturen sind die Methanhydrate am Meeresboden stabil. Erwärmt sich das Wasser und damit der Meeresboden, können die Hydrate jedoch zerfallen. Da Mikroorganismen das dabei entstehende Methangas zum Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) oxidieren, wird das Thema Methanhydrat derzeit intensiv im Kontext Klimawandel



■ Vorkommen von Methanhydraten

7.7 > Bekannt ist, dass Methanhydrate weltweit vor allem an den Kontinentalrändern zu finden sind. Schätzungen über die Menge der gesamten Vorkommen sind bislang aber recht ungenau.

diskutiert. Zwar würde Methan, das selbst als starkes Treibhausgas wirkt, aufgrund der Wandlung zu CO_2 nicht direkt als Methan aus dem Meer entweichen. Die Bildung und Freisetzung von Kohlendioxid aber ist beträchtlich. Ein weiteres Problem: Durch die Bildung des Kohlendioxids wird der Sauerstoff im Meerwasser aufgezehrt (Kapitel 2).

Im Jahr 2008 entdeckten britische und deutsche Wissenschaftler in einer Wassertiefe von 350 Metern Gasquellen am Kontinentalhang vor Spitzbergen, die wahrscheinlich durch schmelzende Hydrate gespeist werden. Langzeitmessungen der Wassertemperaturen vor Spitzbergen zeigen, dass sich die Bodenwassermassen und damit die Hangsedimente während der letzten Jahrzehnte deutlich erwärmt haben. Modelle sagen zudem voraus, dass der Meeresboden in den arktischen Gebieten während der kommenden Jahrzehnte und Jahrhunderte durch den Klimawandel weiter aufgeheizt wird. Wissenschaftler befürchten daher, dass dort in Zukunft große Mengen Methanhydrat schmelzen werden, wodurch verstärkt CO_2 in den Ozean und in die Atmosphäre gelangt. Der Sauerstoffgehalt des Meerwassers wird sich entsprechend verringern.

Hinzu kommt, dass das freigesetzte CO_2 nicht nur zu einer weiteren globalen Erwärmung beiträgt, sondern zu

einer Versauerung der Ozeane führt (Kapitel 2). Beispiele aus der geologischen Vergangenheit unterstützen dieses Szenario. Die geologischen Archive lassen vermuten, dass die Hydrate mehrmals in der Erdgeschichte in großem Ausmaß zersetzt wurden und es im Zuge dessen zu einer extremen globalen Erwärmung und zu einem massiven Artensterben am Meeresboden kam. Um herauszufinden, in welchem Ausmaß der zukünftige Klima- und Ozeanwandel durch die Freisetzung von Methangas am Meeresboden verstärkt wird, sind aber noch weitere Untersuchungen nötig.

Eine künftige Energiequelle?

Die riesigen Methanhydratvorkommen sind nicht nur ein Klimarisiko, sondern auch eine potenzielle Energiequelle. Die Menge an Erdgas, die in den Hydraten gebunden ist, übersteigt die Erdgasreserven in konventionellen Lagerstätten um ein Vielfaches. Erdgas, das aus konventionellen Quellen in die Versorgungsleitungen eingespeist wird, besteht bereits heute zu mehr als 95 Prozent aus Methan. Bislang war der Hydratabbau im Meer vergleichsweise teuer. Mit den steigenden Rohstoffpreisen rückt diese Ressource aber in den Fokus der Offshore-Industrie. Viele Wissenschaftler schätzen, dass der

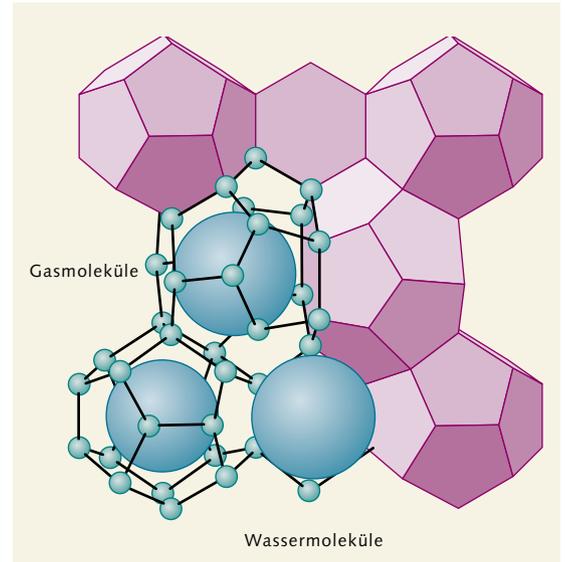


7.8 > Methanhydrat kommt weltweit vor. Dieser eisähnliche Block mit Wabenstruktur wurde während einer Forschungsfahrt vor der Küste Oregons vom Meeresboden geerntet.

Abbau der Hydrate ab einem Erdölpreis von etwa 50 bis 60 US-Dollar pro Barrel wirtschaftlich sein kann. Damit wäre die Gewinnung schon heute rentabel. Besonders in Japan, China, Indien, Südkorea und Taiwan werden derzeit große Anstrengungen unternommen, um die Hydratvorkommen in den nationalen Hoheitsgebieten zu erschließen.

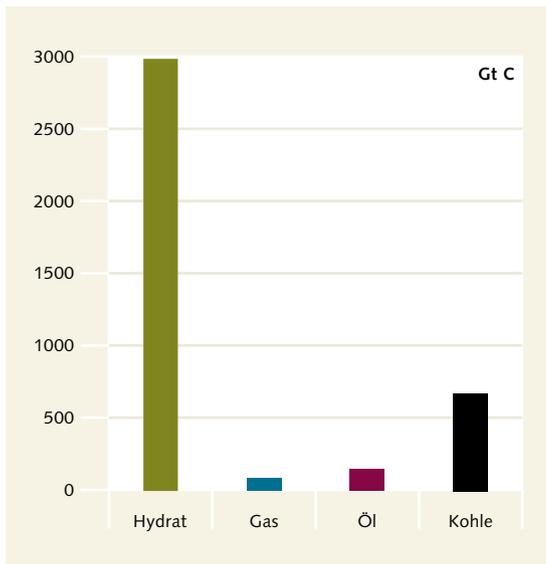
Kohlendioxidlager im Ozean

Gleichzeitig werden in Deutschland neue Technologien entwickelt, die für die Erkundung der Vorkommen und den Abbau der Hydrate genutzt werden können. Die Kernidee ist ganz einfach: Man erntet das Methan (CH_4) aus den Hydraten, indem man es gegen Kohlendioxid (CO_2) austauscht. Studien zeigen, dass das grundsätzlich möglich ist, weil flüssiges CO_2 spontan mit Methanhydrat reagiert. Ließe sich dieses Konzept tatsächlich wirtschaftlich umsetzen, hätte man zwei positive Effekte auf einmal erzielt, denn der Gasaustausch in den Hydraten ist sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus klimapolitischer Perspektive eine interessante Option.



7.9 > Im Methanhydrat sind die Methangasmoleküle fest in Käfige aus Wassermolekülen eingeschlossen. Mit steigender Temperatur wird dieser Käfig instabil. Das Gas entweicht wieder.

Erdgas ist eine relativ saubere fossile Energiequelle. So stoßen Erdgaskraftwerke etwa 50 Prozent weniger CO_2 aus als herkömmliche Kohlekraftwerke. Doch auch die Emissionen moderner Gaskraftwerke lassen sich noch beträchtlich verringern, wenn in den Kraftwerken die sogenannte CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage) eingesetzt würde. Dabei wird CO_2 direkt am Kraftwerk abgeschieden und im geologischen Untergrund gespeichert. Eine andere Option wäre, das CO_2 in die marinen Methanhydrate einzuleiten, wodurch nicht nur Methangas gewonnen, sondern auch das Kohlendioxid sicher unter Verschluss gehalten würde. Denn bei der Speicherung an Land liegt das CO_2 als superkritisches Fluid vor, das mobil und chemisch sehr aggressiv ist. Manche Experten befürchten, dass die unterirdischen Lager deshalb mit der Zeit möglicherweise leckschlagen könnten. Speicherte man Kohlendioxid stattdessen im kalten tiefen Meeresboden als Hydrat, wäre es viel sicherer entsorgt, denn CO_2 -Hydrate sind thermisch deutlich stabiler als Methanhydrate. Ihnen kann selbst eine Erwärmung des Meeresbodens überhaupt nichts anhaben.



7.10 > Die in Methanhydrat am Meeresboden gespeicherte Menge an Kohlenstoff (C in Gigatonnen) übersteigt die in Gas, Öl und Kohle um ein Vielfaches.

Aber auch dieser Ansatz birgt ökologische Risiken. So könnte beim Hydratabbau unkontrolliert Methan in das Bodenwasser entweichen. Um dieses Risiko auszuschließen, sollten nur tief liegende Hydratvorkommen erschlossen werden, die von einer mindestens 100 Meter mächtigen feinkörnigen Sedimentschicht überdeckt sind. Nur so kann das Methangas gezielt und kontrolliert über eine Bohrung gefördert werden, ohne dass es in die Umwelt gelangt. Zudem muss darauf geachtet werden, dass der Lagerstättendruck beim Abbau nur um maximal 10 bar erhöht wird, da die Sedimentschichten ansonsten aufreißen und große Methanmengen entweichen könnten.

Ist in Zukunft eine Methanföderung denkbar?

Die für einen Abbau erforderliche Technologie wurde bisher nur im Labormaßstab erprobt. Noch sind viele Jahre Entwicklungsarbeit nötig, um die Potenziale und Risiken zuverlässig einschätzen zu können und den Abbau im industriellen Maßstab zu realisieren.

An Land wurde die Erdgasgewinnung aus Methanhydraten indes schon im Jahr 2008 erstmals erfolgreich



7.11 > Auf dem Deck eines Forschungsschiffs entzünden Wissenschaftler Methangas, das aus einem zerfallenden Hydratbrocken entweicht.

von japanischen und kanadischen Wissenschaftlern getestet. In nördlichen Regionen lagern die Methanhydrate Hunderte von Metern tief unter den Permafrostablagerungen. Auch dort ist es kalt und der Druck hoch genug, dass sich Hydrate bilden können. Anders als die Lagerstätten im Meeresboden sind diese Hydratvorkommen aber leicht zugänglich und damit für Produktionstests geeignet. Die Tests zeigten, dass es möglich ist, Methanhydrate durch Wärmezufuhr oder Druckentlastung zu zersetzen und dadurch Erdgas zu gewinnen.

Derzeit soll an Land auch die Ernte von Methan durch die Einlagerung von Kohlendioxid getestet werden. Dazu wird ein norwegisch-amerikanisches Konsortium einen Produktionstest in Alaska durchführen. Die ersten Offshore-Versuche sind dann für die Jahre 2012 bis 2014 am Kontinentalhang vor Japan geplant. Wann und wie die Methanhydrate künftig abgebaut werden, hängt nicht zuletzt von den Ergebnissen dieser Felduntersuchungen ab. Und natürlich kommt es auch auf die Entwicklung der Weltmarktpreise für Erdgas und CO₂-Emissionsrechte an, die mit einem Einfluss darauf haben, wann der Abbau im Meer in großem Stil beginnen kann.

Regenerative Energien

> **Regenerative Energien wie etwa Sonnen- oder Windkraft wurden bislang vor allem an Land ausgebaut. Weitgehend ungenutzt ist die Energie, die im Meer steckt. Doch das ändert sich. Derzeit wird die Erzeugung von umweltfreundlicher Energie im Meer weltweit vorangetrieben. Die Erwartungen sind groß. Wind, Welle und Meeresströmung sollen künftig einen erheblichen Teil des Strombedarfs der Menschheit decken.**

Ein ungehobener Schatz

Die Meere stecken voller Energie. Gezeitenkräfte bewegen gewaltige Wassermassen. Starke Winde bauen mächtige Wellenberge auf. Fast 90 Prozent der weltweiten Windenergie stecken im Sturm über den Ozeanen. Wind, Welle und Strömung enthalten zusammen 300-mal mehr Energie, als die Menschheit verbraucht. Lange blieb dieser Vorrat ungenutzt. In den vergangenen Jahren aber hat man damit begonnen, die Energie zu ernten. Erste Offshore-Windparks wurden gebaut. In Hunderten von Projekten entstanden und entstehen Kraftwerke, die Strömungs- und Wellenenergie in Strom wandeln. Zu den wichtigsten regenerativen marinen Energien zählen:

- die Windenergie;
- die Wellenenergie;
- die Gezeitenenergie;
- die Strömungsenergie;
- die aus Temperaturunterschieden in verschiedenen Meerestiefen gewonnene Energie (Meereswärmekraftwerk);
- die durch Salzgehaltsunterschiede gewonnene Energie (Osmosekraftwerk).

Diese Energieressourcen könnten den Strombedarf der Menschheit theoretisch spielend decken. Doch wird sich künftig nur ein Teil davon nutzen lassen, weil viele Meeresregionen wie etwa die Tiefsee kaum zu erschließen sind oder eine Anbindung an das Stromnetz via Seekabel unerschwinglich wäre. In den küstennahen Gebieten wiederum scheiden viele potenzielle Standorte aus, weil sie der Fischerei oder Schifffahrt vorbehalten sind oder unter Naturschutz stehen. Dennoch könnten die erneuerbaren Energien künftig einen beträchtlichen Teil des weltweiten Strombedarfs decken.

Offshore-Windenergie

Die Erschließung der Windenergie ist derzeit am weitesten fortgeschritten. Zugleich ist sie besonders vielversprechend. Experten gehen davon aus, dass allein die Offshore-Windkraft künftig weltweit rund 5000 Terawattstunden Strom pro Jahr liefern könnte – rund ein Drittel des derzeitigen jährlichen globalen Stromverbrauchs von rund 15 500 Terawattstunden (TWh, 1 Terawattstunde entspricht 1 Billion Wattstunden). Für Europa wird erwartet, dass die Windenergieanlagen (WEA) auf See bis zum Jahr 2015 bereits rund 340 TWh jährlich liefern. Bis heute wurden weltweit rund 40 Offshore-Windenergieprojekte realisiert, die meisten in Großbritannien, Dänemark, den Niederlanden und Schweden. Dabei werden zwei Trends deutlich: Zum einen werden die Anlagen immer größer. Zum anderen wagt man sich in immer größere Tiefen vor, denn damit lassen sich die Windparkflächen enorm ausweiten. Baute man zu Beginn dieses Jahrhunderts noch in Küstennähe in Wassertiefen von 2 bis 6 Metern, so werden die Türme der Anlagen inzwischen in mehr als 40 Metern Wassertiefe im Meeresboden verankert.

Auch schwimmende Konzepte für noch größere Wassertiefen befinden sich in der Entwicklung. So hat unlängst ein norwegisch-deutsches Konsortium die erste schwimmende WEA vor Norwegens Küste errichtet.

Mit der Erfahrung von Tausenden an Land errichteten WEA ist die Windenergie-technik längst ausgereift. Die hohen Windgeschwindigkeiten und rauen Umweltbedingungen auf See erfordern aber technologische Verbesserungen. Dies haben auch die Probleme mit dem ersten großen Windpark in Dänemark gezeigt. In Deutschland wurden daher im ersten Hochsee-Windpark „Alpha Ventus“ zunächst nur zwölf Windenergieanlagen verschie-

dener Hersteller errichtet und getestet. Der Park liegt etwa 40 Kilometer vor der Nordseeinsel Borkum und wurde mit Unterstützung des Bundeswirtschaftsministeriums realisiert.

Die Errichtung von Offshore-Anlagen ist wegen der anspruchsvollen Gründungsarbeiten und des aufwendigen Anschlusses an das Stromnetz derzeit noch deutlich teurer als an Land. Nach Einschätzung von Fachleuten wird die Windenergie auf See, unterstützt durch Einspeisevergütung und Fördermaßnahmen, in den kommenden Jahren dennoch weiter deutlich wachsen.

Wellenenergie

Derzeit wird das technische Erzeugungspotenzial der Wellenenergie auf eine jährliche Leistung von 11 400 TWh geschätzt. Das nachhaltige Potenzial von jährlich 1700 TWh entspricht etwa 10 Prozent des weltweiten Strombedarfs. Es gibt eine Reihe verschiedener Wellenenergiekonzepte, die Strom auf unterschiedliche Weise erzeugen. Die meisten lassen sich drei Grundtypen zuordnen:

- das Prinzip „schwingende Wassersäule“ (Oscillating Water Column):
Bei diesem Typ strömt durch die Wellenbewegung Wasser in einer luftgefüllten Kammer auf und ab. Dabei wird Luft verdrängt und durch eine Turbine gepresst, die elektrischen Strom erzeugt. Erste Pilotanlagen dieser Art wurden in den vergangenen Jahren in Portugal, Schottland und Japan errichtet.
- das Prinzip „schwingende Körper“ (Oscillating Bodies):
Anlagen dieses Typs erzeugen elektrischen Strom, indem sie die Bewegung der Wellen umsetzen. Dazu zählen schwimmende Generatoren, bei denen sich ein Schwimmkörper an einem festen Widerlager entlang- oder auf- und abbewegt. Andere Systeme bestehen aus flexibel gelagerten Teilen, die sich gegeneinander bewegen und dabei Hydrauliköl unter Druck setzen. Das Öl wiederum treibt eine Turbine an. Für Aufsehen sorgte unlängst das britische System Pelamis, eine Art Seeschlange, die aus mehreren Gliedern zusammengesetzt ist und auf den Wellen reitet. Pelamis wurde 2008 vor Portugal als erstes Wellenenergiesystem weltweit über ein Seekabel ans Stromnetz angeschlossen. In Spanien und Portugal sind weitere Parks in Planung.

Der richtige Standort für grünen Strom

Bevor Energieanlagen im Meer errichtet werden, wird man künftig mit Umweltverträglichkeitsgutachten prüfen müssen, welche Auswirkungen die Technik auf die Meeresumwelt hat. Manch günstiger Standort wird aus Gründen des Umweltschutzes ausscheiden. Entsprechend unterscheiden Fachleute zwischen dem technischen Potenzial einer Energietechnik und dem nachhaltigen Potenzial. Das technische Potenzial fasst alle theoretisch möglichen Anlagenstandorte zusammen. Das nachhaltige Potenzial berücksichtigt Umweltaspekte wie etwa die Zerstörung von Flussläufen durch Gezeitenkraftwerke und schließt entsprechende Standorte aus. Das nachhaltige Potenzial ist demnach kleiner. Experten plädieren derzeit dafür, die Umwelt- und Raumplanung (Marine Spatial Planning) für regenerative Technologien im Meer zu vereinfachen. So wird über die Genehmigung von Windenergieanlagen oder Wellenkraftwerken bisher separat entschieden. Um Entscheidungsverfahren aber zu verkürzen, wäre es sinnvoll, gleich mehrere Energieerzeugungs-Technologien in die Raumplanung einzubeziehen und nicht einzelne Windparks, sondern allgemein Gebiete für regenerative marine Energieerzeugung auszuweisen. Damit würde auch die Kombination verschiedener Technologien in einem Meeresgebiet deutlich erleichtert – beispielsweise Windradmasten, an die zusätzlich Meeresströmungsanlagen montiert werden.

- das Prinzip „Überlaufen“ (Overtopping):
Ähnlich wie bei einem Staudamm wird beim Overtopping-System ein Reservoir mit Wasser gefüllt, aus dem eine Turbine gespeist wird. Gefüllt wird das Becken durch überlaufende Wellen, die durch Rinnen oder Rampen kanalisiert werden. In Dänemark und Norwegen wurden bereits Prototypen installiert, sowohl schwimmende als auch feste Systeme.

Gezeitenenergie

Gezeitenkraftwerke arbeiten ähnlich wie die Kraftwerke an einem Stausee – mit dem Unterschied, dass die Wassermassen nicht bergab fließen, sondern durch Ebbe und Flut hin- und herbewegt werden. Anders als bei anderen Formen der Meeresenergie nutzt man die Gezeitenenergie schon länger kommerziell. So wurde bereits 1966 an der nordfranzösischen Atlantikküste bei Saint Malo das La Rance-Gezeitenkraftwerk in Betrieb genommen, das den Fluss La Rance vom Meer trennt. Bei Flut strömt das Wasser durch die großen Turbinen des Kraftwerks flussaufwärts, bei Ebbe kehrt sich die Fließrichtung um. Mit

240 Megawatt (MW, 1 Megawatt entspricht 1 Million Watt) entspricht die Leistung der Anlage der eines Gaskraftwerks. Auch in Ländern wie Kanada, China und Russland wurden in den vergangenen 20 Jahren diverse solcher Anlagen errichtet. Diese waren aber deutlich kleiner. In diesem Jahr soll in Südkorea ein 260-MW-Gezeitenkraftwerk in Betrieb gehen, das in einen schon bestehenden Staudamm integriert wird.

In Großbritannien gibt es seit Langem Pläne, in der Mündung des Flusses Severn zwischen England und Wales ein großes Gezeitenkraftwerk zu errichten. Der Standort könnte so viel Energie liefern, um damit 7 Prozent des Strombedarfs im Vereinigten Königreich zu decken. Kritiker aber fürchten, dass durch den Bau der Dämme wichtige Natur- und Vogelschutzgebiete verloren gehen. Der Schaden für die Umwelt wäre beträchtlich. Inzwischen werden deshalb alternative Konzepte und Standorte diskutiert.

Strömungsenergie

Die Energie der Meeresströmungen lässt sich noch auf andere Weise ernten: mit Unterwasserrotoren, die durch die Wasserbewegung angetrieben werden. Schätzungen zufolge ließen sich mit derartigen Meeresströmungsanlagen und den Gezeitenkraftwerken zusammen weltweit insgesamt mehrere Hundert TWh elektrischer Strom pro Jahr ernten. Einige Rotorkonzepte werden bereits seit längerer Zeit getestet – etwa das System „Seaflow“, das 2003 vor der englischen Küste seinen prototypischen Betrieb aufnahm. Inzwischen dreht sich in der Meerenge Strangford Narrow vor der irischen Küste der Nachfolger „SeaGen“. Bei diesem Konzept wurden an den Turm der Anlage gleich zwei Rotoren montiert. Das erhöht die Stromausbeute und gleicht die hohen Kosten für Bau und Gründung aus.

Die Belastungen für solche Anlagen im Meer, durch Strömungen oder Wellenbewegungen etwa, sind deutlich höher als beim Windrad, daher sind auch hier noch ausführliche Langzeittests nötig. Dennoch ist die SeaGen-Technik eng an das Vorbild der Windräder angelehnt: So lässt sich je nach Strömung der Anstellwinkel der Rotoren und die Drehzahl variieren. Andere Konzepte setzen auf fixierte, nicht variable Systeme.

Energie aus Temperaturunterschieden

Meereswärmekraftwerke nutzen zur Stromerzeugung den Temperaturunterschied zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem Tiefenwasser. Um den Dampfkreislauf in einem solchen Kraftwerk (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC, Meereswärme-Energieumwandlung) betreiben zu können, muss die Temperaturdifferenz mindestens 20 Grad Celsius betragen. Derartige Kraftwerke eignen sich daher besonders für wärmere Meeresregionen. Das warme Wasser wird genutzt, um eine bei niedrigen Temperaturen siedende Flüssigkeit zu verdampfen. Der Dampf treibt eine Turbine an. Mit dem 4 bis 6 Grad kalten Meerwasser, das man aus mehreren Hundert Metern Tiefe heraufpumpt, wird der Dampf anschließend wieder gekühlt und verflüssigt.

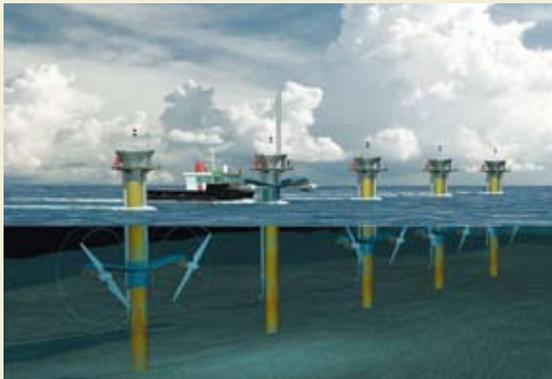
Bislang galt die OTEC-Technik als ausgesprochen kostspielig, da dafür mehrere Hundert Meter lange Rohrleitungen und starke Pumpsysteme erforderlich sind. Nachdem die US-Regierung die OTEC-Entwicklung und erste Tests Mitte der 1970er Jahre gefördert hatte, wurden die Gelder Anfang der 1980er Jahre gestrichen. In jüngster Zeit aber flammt das Interesse wieder auf. Ein amerikanisch-taiwanesisches Konsortium will jetzt auf Hawaii eine 10-MW-Anlage errichten. Zudem haben öffentliche Einrichtungen und Unternehmen in Frankreich die Initiative IPANEMA gestartet, die die erneuerbaren Energien im Meer und auch die OTEC-Technologie fördern soll. Nach Schätzungen könnten mit OTEC jährlich mehrere Tausend TWh Strom gewonnen werden. Anders als bei Wind und Wellen ist die Stromproduktion nicht Wetter-schwankungen unterworfen.

Energie aus Salzgehaltsunterschieden

Ein ganz anderes Verfahren zur Energieerzeugung ist das Osmosekraftwerk. Ein solches Kraftwerk nutzt den osmotischen Druck aus, der sich zwischen Süßwasser und Salzwasser aufbaut, wenn man beides mit einer speziellen wasserdurchlässigen Membran voneinander trennt. Zu diesem Zweck pumpt man Fluss- und Meerwasser in eine Doppelkammer. Die Technologie befindet sich noch im Labormaßstab. Im November 2009 aber haben norwegische Konsortialpartner ein erstes Kraftwerk am Oslo-



7.12 a > An mehreren Orten in Europa gibt es bereits Anlagen zur Ernte der Meeresenergie. Die älteste ist das La-Rance-Gezeitenkraftwerk bei Saint Malo in Frankreich, das bereits in den 1960er Jahren errichtet wurde. Mit einer Leistung von 240 Megawatt war es lange das größte seiner Art.



7.12 b > Die Energie der Strömung kann auch durch Unterwasserrotoren wie die SeaGen-Anlage vor der nordirischen Küste in elektrischen Strom umgewandelt werden. Bislang wurde eine Anlage errichtet, die ihren Strom schon in das öffentliche Netz an Land einspeist. Weitere sollen folgen.



7.12 c > Der Wellenenergiewandler „Pelamis“ reitet wie eine Seeschlange auf dem Meer. Er besteht aus mehreren Segmenten, die sich gegeneinander bewegen und dabei einen hydraulischen Druck aufbauen. Der wiederum treibt ein Turbine an. Derzeit ist eine neue Pelamisgeneration in Bau.



7.12 d > Im ersten Osmosekraftwerk der Welt am Oslofjord wird aus dem Salzgehaltsunterschied zwischen Salz- und Süßwasser Energie gewonnen. Die Wassermassen sind durch eine dünne Membran getrennt. An ihr baut sich durch die Salzgehaltsdifferenz ein Druck auf, der dann eine Turbine antreibt.



7.12 e > Windräder im Meer gibt es bereits vielerorts. Einer der größten Offshore-Windparks mit 48 Rotoren befindet sich in der Ostsee zwischen Dänemark und Schweden. Um die Energie ins schwedische Stromnetz einspeisen zu können, hat man hier eine Trafostation errichtet.

7.13 > Windräder werden heute meist in einer Wassertiefe von maximal 45 Metern errichtet, da der Bau der Masten sonst zu teuer ist. Eine Alternative sind schwimmende Windräder, die man mit Halteseilen am Grund verankert. Erste Prototypen werden bereits getestet.



fjord errichtet. Die Anlage dient vor allem der Weiterentwicklung der Technik. Die Stromausbeute ist mit wenigen Kilowatt noch gering. Künftig könnte man mit Osmosekraft weltweit 2000 TWh pro Jahr nachhaltig gewinnen.

Förderung von Energieanlagen der Zukunft

Es steht außer Frage, dass die Entwicklung von Technologien zur regenerativen Energiegewinnung im Meer einen gewaltigen Sprung nach vorn gemacht hat. Noch aber sind so gut wie alle Technologien, obgleich viele kommerziell vielversprechend erscheinen, auf Förderung angewiesen, denn in vielen Fällen werden sie von jungen und kleinen Unternehmen vorangetrieben. Neben den technischen und wirtschaftlichen Risiken

besteht eine Schwierigkeit darin, mit den Anlagen Projektgrößen zu erreichen, die die Rentabilität solcher Investitionen möglich machen. Eine Förderung der Technologien ist somit unerlässlich. Verschiedene Nationen bieten solche Programme. Das US-Ministerium für Energie (Department of Energy) und die Europäische Union fördern die Entwicklung bereits mit mehreren Hundert Millionen Euro. Auch die komplexen Genehmigungsverfahren für Anlagen oder Netzanschlüsse müssten vereinfacht werden. Während in Deutschland die Genehmigung von Offshore-Windanlagen vollständig in der Hand des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie liegt, müssen sich Anlagenbetreiber in den USA durch diverse Ämter und Genehmigungsverfahren kämpfen. Hier würden Erleichterungen der Sache dienen.

CONCLUSIO

Der Druck auf den Meeresboden wächst

Jahrhundertlang lieferten die Ozeane vor allem eine Ressource: Fisch und Meeresfrüchte. Erst seit wenigen Jahrzehnten verfügt die Menschheit über Technologien, die mehr aus den Ozeanen herausholen können – Bohrtechnologie zur Öl- und Gasförderung etwa. Hatte man bislang in relativ flachen Gebieten gebohrt, so dringen die Konzerne zunehmend in größere Tiefen vor. Das ist aufwendig und teuer, wird aber mit der Verknappung der Reserven an Land und weiter steigenden Preisen zunehmend rentabel. Gleiches gilt für die Metallvorräte, die im Meer in Manganknollen, Kobaltkrusten, Massivsulfiden oder Erzschlamm lagern. Der Abbau in der Tiefe wird in dem Maße interessant, wie die Metallpreise steigen – allerdings gilt das nur für besonders wertvolle Metalle wie Kupfer, Nickel oder Gold. Eine natur schonende Abbautechnik gibt es bisher aber nicht. Was die Methanhydrate betrifft, ist derzeit noch unklar, inwieweit der Abbau am Meeresboden technisch möglich und zugleich für Natur und Mensch ungefährlich ist. Zudem fehlt es hier fast gänzlich an Abbautechnologie. Viele wissenschaftliche Grundla-

gen müssen zunächst geklärt werden, beispielsweise ob Laborergebnisse auf den realen Abbau übertragen werden können. Gelänge es, Methan zu fördern und zugleich Kohlendioxid aus der Verbrennung von Öl und Gas langfristig sicher einzulagern, wäre die Methanernte am Meeresgrund sogar eine Klimaschutzoption.

Die im Sinne des Klimaschutzes nachhaltigste marine Energiegewinnung aber ist vermutlich die aus Strömung, Wellen und Wind. In den meisten Fällen wird man zunächst prüfen müssen, wie sich die Energieanlagen auf die Meeresumwelt auswirken. Auch hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. In Teilen ist die Technologie bereits reif für den Einsatz, andere Anlagenkonzepte befinden sich in der Pilotierungsphase. Inzwischen haben einige Staaten die anfänglichen bürokratischen Hürden bei der Planung und dem Bau der Meeresenergieanlagen abgebaut. Bevor diese im großen Stil eingesetzt werden, müssen die Staaten aber entscheiden, ob und wie sie die Meeresenergie fördern wollen, denn ohne anfängliche staatliche Unterstützung wird sich mittelfristig keine der aktuellen Technologien etablieren können.

8

Das Meer – der weltumspannende Transportweg



> Jahrzehntlang nahm der Seeverkehr enorm zu. Die Weltwirtschaftskrise aber bescherte der Branche einen jähen Absturz. Zwar ist eine Erholung der Märkte in Sicht, noch aber weiß niemand, wie sich der Globalisierungsprozess fortsetzen wird und ob die Wirtschafts- und Finanzmärkte sich als stabil erweisen werden. Zudem könnten die wachsende Pirateriegefahr und der Terrorismus den Seeverkehr erschweren.



Ein dynamischer Markt – der Weltseeverkehr

> Tanker, Massengutfrachter und Containerschiffe sind die wichtigsten Transportmittel unserer Zeit. Auf einigen wenigen Haupttrouten tragen sie jedes Jahr Milliarden Tonnen Güter um die Welt. Als Revolution gilt die Containerisierung der Schifffahrt, die den Warentransport effizienter gemacht hat. Trotz der Wirtschaftskrise könnte der maritime Aufschwung anhalten.

Wachstum durch Globalisierung

Seit jeher sind die Weltmeere für den Menschen ein wichtiger Transportweg. Anders als noch vor Jahrzehnten befördert die Schifffahrt heute aber kaum mehr Menschen, sondern fast ausschließlich Güter. Die Personenbeförderung zur See beschränkt sich seit dem Siegeszug des interkontinentalen Luftverkehrs auf Kurzstrecken (Fährverkehre in Ost- und Nordsee, Mittelmeer, Japan und Südostasien) und Kreuzfahrten, die in der jüngeren Vergangenheit einen enormen Aufschwung erfahren haben und für den Tourismus eine zunehmend lukrative Einnahmequelle darstellen.

Mit der fortschreitenden Globalisierung der Märkte hat der Gütertransport über See in den vergangenen Jahrzehnten enorm zugenommen. Von den 1950er Jahren bis zum Ausbruch der jüngsten Weltwirtschaftskrise entwickelte sich der internationale Handel mit einer nahezu durchweg doppelt so hohen Zuwachsrate wie die weltweite Wirtschaftstätigkeit insgesamt. Von 2000 bis 2008 nahm der Welthandel jährlich im Schnitt um 5,4 Prozent zu, während die globale Wirtschaftsaktivität, gemessen am Welt-Bruttoinlandsprodukt (BIP) jährlich nur um 3 Prozent zulegte. Durch den spektakulären Anstieg des Welthandels im Vergleich zum weltwirtschaftlichen Wachstum hat sich seit den 1950er Jahren der Anteil des Welthandels am Welt-BIP auf 45 Prozent mehr als verdreifacht, bei Gütern des verarbeitenden Gewerbes sogar mehr als vervierfacht.

Gemessen am Güterwert, vollziehen sich rund 23 Prozent des Welthandels zwischen Ländern mit einer gemeinsamen Grenze. Dieser Anteil ist über die letzten Jahrzehnte weitgehend konstant geblieben. Er differiert indes sehr stark zwischen den Kontinenten – je nach Entwick-

lungsniveau. In Europa und Nordamerika ist der Anteil mit 25 bis 35 Prozent am höchsten. Dieser Handel wird überwiegend mit Lkw und Eisenbahn abgewickelt. Der Handel zwischen Ländern ohne eine gemeinsame Grenze hingegen wird vor allem über See durchgeführt, bei Industriegütern freilich zunehmend auch im Luftfrachtverkehr. Dessen Steigerungsraten lagen in den vergangenen Jahren sogar mehr als doppelt so hoch wie die des Seeverkehrs. Welcher Verkehrsträger wie viel transportiert, hängt von den (relativen) Transportkosten und von der Wert-Gewicht-Relation des transportierten Gutes ab: Je höher der Warenwert je Gewichtseinheit ist, desto unbedeutender sind die Transportkosten. Wichtiger werden bei wertvollen Waren Pünktlichkeit und Verlässlichkeit.

Forschungsergebnisse von Ökonomen zeigen, dass Haushalte mit höherem Einkommen qualitativ höherwertige Produkte erwerben. Die Einwohner reicher Länder kaufen daher relativ mehr Qualitätsgüter. Steigende Einkommen beeinflussen die Transportnachfrage in diesem Sinne auf drei Wegen: Erstens sind Qualitätsgüter teurer. Sie haben daher eine höhere Wert-Gewicht-Relation und folgerichtig geringere Transportkosten im Verhältnis zu ihrem Wert. Mit steigendem Einkommen sind Konsumenten darüber hinaus eher bereit, bestimmte teure Produkte wie etwa Modeartikel zu erwerben. Zugleich wird erwartet, dass die Artikel innerhalb kürzester Zeit geliefert werden. Drittens ist die Lieferzeit selbst ein wichtiges Element der Produktqualität. Mit steigendem Einkommen wird sie für die Entscheidungsfindung des Kunden, der lange Wartezeiten nicht mehr in Kauf nehmen will, immer bedeutsamer. Alle diese Aspekte tragen mit dazu bei, dass der schnellere Luftfrachtverkehr in den vergangenen Jahren noch höhere Wachstumsraten erreichte als der Weltseeverkehr.

Wichtige ökonomische und wirtschaftspolitische Fachbegriffe in Kürze

Bruttoinlandsprodukt (BIP):

Das Bruttoinlandsprodukt ist ein Maß für die wirtschaftliche Leistung einer Volkswirtschaft in einem bestimmten Zeitraum. Es misst den Wert der im Inland hergestellten Waren und Dienstleistungen (Wertschöpfung), soweit diese nicht als Vorleistungen für die Produktion anderer Waren und Dienstleistungen verwendet werden.

General Agreement on Tariffs and Trade (GATT, Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen):

Das GATT ist ein internationales Zoll- und Handelsabkommen, das am 1. Januar 1948 in Kraft trat. Diese internationale Vereinbarung hat den Welthandel erleichtert, indem sie Zölle und andere Handelshemmnisse Schritt für Schritt abgebaut hat. Das GATT wurde durch die WTO abgelöst.

Just-in-time-Produktion (JIT, bedarfsgerechte Produktion):

Bei der JIT wird ein Produkt exakt zu dem Zeitpunkt fertiggestellt beziehungsweise geliefert, zu dem es auch benötigt wird. Dazu werden die einzelnen Herstellungsschritte zeitlich aufeinander abgestimmt. Güter oder Bauteile werden von den Zulieferbetrieben erst bei Bedarf direkt ans Montageband geliefert. Dadurch entstehen beim Produzenten nur direkt am Band sehr kleine Lagermengen und es entfallen längere Lagerungszeiten und hohe Lagerkosten.

North American Free Trade Agreement (NAFTA, Nordamerikanisches Freihandelsabkommen):

Die NAFTA ist ein Wirtschaftsverbund zwischen Kanada, den USA und Mexiko – und eine Freihandelszone auf dem nordamerikanischen Kontinent. Sie wurde 1994 gegründet, um zahlreiche Zölle abzuschaffen oder zeitlich begrenzt auszusetzen.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung):

Die OECD ist ein Zusammenschluss europäischer und außereuropäischer Staaten. Sie wurde 1948 gegründet, um ein gemeinsames Konzept für den Wiederaufbau Europas zu schaffen. Heute bestehen ihre Ziele darin, eine optimale Wirtschaftsentwicklung zu ermöglichen und in den Mitgliedstaaten einen hohen Lebensstandard und einen hohen Beschäftigungsgrad zu erreichen.

Offshoring (abgeleitet von „offshore“ – auf See, weitab vom Land):

Offshoring ist eine Form der geographischen Verlagerung unternehmerischer Funktionen und Prozesse ins Ausland, wo günstigere Rahmenbedingungen herrschen wie zum Beispiel geringere Arbeitskosten. In diesen Fällen werden die Arbeitsplätze von ihren ursprünglichen an kostengünstigere Standorte in Niedriglohnländer verschoben.

Outsourcing (Auslagerung):

Outsourcing bezeichnet in der Ökonomie die Abgabe von Unternehmensaufgaben und -strukturen an Fremdfirmen oder eigenständige Tochterunternehmen. Damit verbunden ist oft die Auslagerung von Arbeitsplätzen in kostengünstigere (weil häufig auch tarifungebundene) Tochtergesellschaften.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD, Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung):

Die UNCTAD ist ein ständiges Organ der Generalversammlung der Vereinten Nationen mit Sitz in Genf. Ihr Ziel ist es, den Handel zwischen Ländern mit unterschiedlichem Entwicklungsstand (hauptsächlich Industrieländer und Entwicklungsländer) zu fördern.

World Trade Organization (WTO, Welthandelsorganisation):

Die WTO ist eine internationale Organisation mit Sitz in Genf, die sich mit der Regelung von Handels- und Wirtschaftsbeziehungen beschäftigt. Sie ist die Nachfolgeorganisation des GATT, aus dem sie im Jahr 1995 hervorging, und hat zurzeit über 150 Mitglieder, die zusammen mehr als 90 Prozent des Welthandelsvolumens repräsentieren.

Zunehmende Skalenerträge:

Zunehmende Skalenerträge liegen vor, wenn die Produktion stärker zunimmt, als der Einsatz von Produktionsfaktoren erhöht wird. Im Seeverkehr können sich steigende Skalenerträge zum Beispiel durch den Einsatz größerer Schiffe ergeben, die den Transport einer größeren Ladungsmenge ermöglichen und eine Abnahme der Fixkosten je Produkteinheit bewirken. Auch Rationalisierungen, wie beispielsweise der Einsatz standardisierter Container, können zunehmende Skalenerträge bewirken.

Was den Seeverkehr antreibt

Dass der Weltseeverkehr derart zunehmen konnte, liegt wie erwähnt vor allem am Wachstum des Welthandels. Eine Rolle spielen aber auch institutionelle und technologische Faktoren:

Der Welthandel kam in der Vergangenheit insbesondere durch die Liberalisierungserfolge des GATT und der Nachfolgeorganisation WTO in Schwung. Von herausragender Bedeutung war ferner die wirtschaftliche Öffnung Chinas, die 2001 in den Beitritt Chinas zur WTO mündete. Chinas Exporte in die Welt vervierfachten sich innerhalb von fünf Jahren nach dem WTO-Beitritt. Um ein weiteres Beispiel für den durch Integration der Märkte intensivierten internationalen Handel zu geben: Die mexikanischen Exporte in die USA verdreifachten sich innerhalb von sechs Jahren nach Gründung der NAFTA.

Der Energie- und Rohstoffhunger in den Industriestaaten und in den Schwellenländern, vor allem in China und Indien, zog steigende Transporte von Gütern aus weit entfernten Ländern nach sich.

Die Revolutionen in den Informations- und Kommunikationstechnologien senkten die Kosten der Raumüberwindung dramatisch. Sie ermöglichten neue Netzwerkverbindungen und Produktionsabläufe wie etwa Just-in-time-Produktion, Outsourcing oder Offshoring und gaben der Logistik einen enormen Schub.

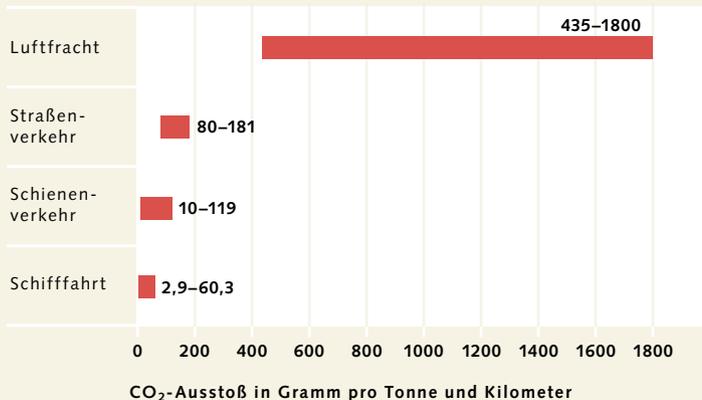
Dank der steigenden Nachfrage sanken die spezifischen Transportkosten. Die Größe der Schiffe nahm zu. Skalenerträge wurden ausgenutzt. Hinzu kamen technologische und organisatorische Innovationen in der Hafenwirtschaft – etwa im Stückgutverkehr. Von Bedeutung ist vor allem die Containerisierung, die wichtigste Transportrevolution des 20. Jahrhunderts.

Die zunehmende Verbreitung der offenen Schiffsregister, zu denen anfangs vor allem die Register Panamas und Liberias gehörten, erlaubte den Reedereien, die relativ niedrigen Kapitalkosten in den Industrieländern mit den niedrigen Arbeitslöhnen für geeignete Arbeitskräfte aus Entwicklungsländern, zum Beispiel den Philippinen, zu kombinieren. So ließen sich die vor allem in den Industriestaaten kräftig zunehmenden Arbeitskosten kompensieren. Darüber hinaus konnten die Reeder durch den Wechsel zu einem offenen Schiffsregister aus sehr kostspieligen Regulierungen (beispielsweise des nationalen Arbeitsrechts) flüchten. Es überrascht daher kaum, dass 2008 laut UNCTAD rund 55 Prozent der Welthandelsflotte in den zehn wichtigsten offenen und internationalen Registern geführt wurden. 1950 waren es gerade einmal 5 Prozent. Diese Entwicklung hat mit dazu beigetragen, dass sich die Schifffahrt zu einem globalen Wirtschaftssektor entwickelt hat. Was die Eigentumsverhältnisse betrifft, ist die Schifffahrt aber weit weniger global. Wenige Staaten besitzen einen Großteil der Flotte. So werden rund 54 Prozent der Welttonnage (gemessen an der Tragfähigkeit, „Deadweight Tonnage“, dwt) von Eigentümern (Reedereien) in Japan (16,0), Griechenland (15,3), Deutschland (9,5), China (8,4) und Norwegen (4,5) kontrolliert.

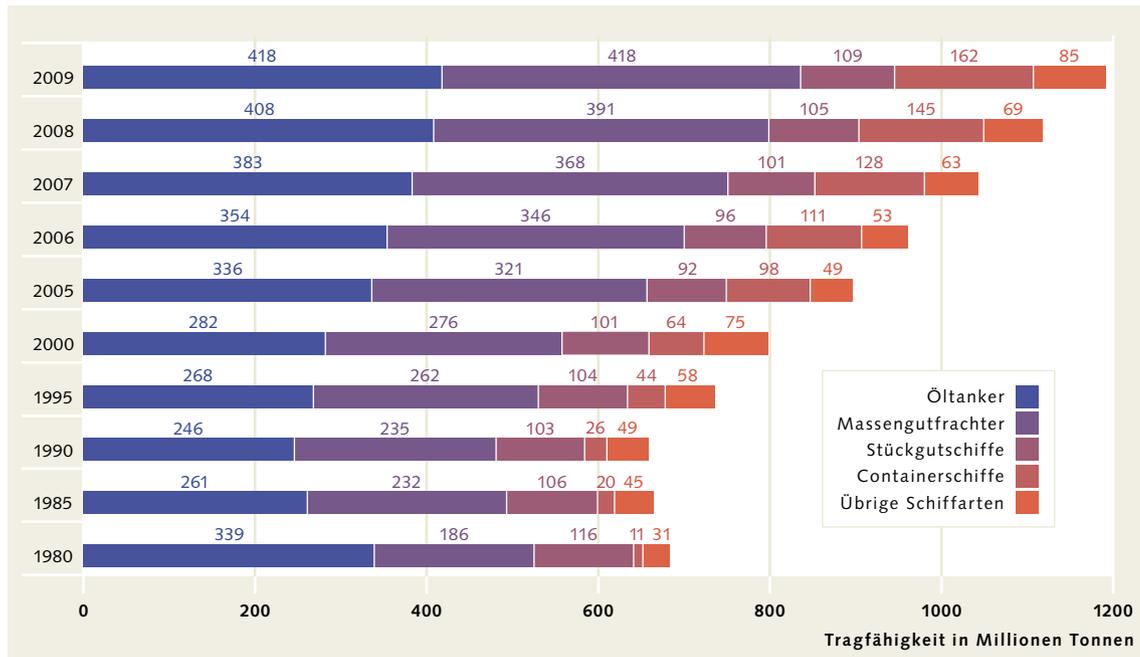
Die Welthandelsflotte bestand im Juli 2009 aus insgesamt 53 005 Schiffen. Davon waren der Anzahl nach: 31 Prozent klassische Stückgutschiffe, 27 Prozent Tanker,

Wie viel die Schifffahrt zum Treibhauseffekt beiträgt

Nach Schätzungen der Internationalen Seeschifffahrts-Organisation IMO ist der Weltseeverkehr für rund 3 Prozent der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich. Zu den Gesamtemissionen im Transportsektor trägt der Seeverkehr 10 Prozent, der Straßenverkehr 73 Prozent und der Luftverkehr 12 Prozent bei. Die Verluste aus Pipelines schlagen mit 3 Prozent zu Buche, der Schienenverkehr mit 2 Prozent. Experten rechnen damit, dass sich die Emissionen des Transportsektors ohne weitere Klimaschutzmaßnahmen bis 2050 verdoppeln werden. Die Emissionen des Seeverkehrs könnten sich in diesen Szenarien etwa verdreifachen.



8.1 > Im Vergleich zu anderen Transportmitteln sind Schiffe unschlagbar effizient.



8.2 > Die Entwicklung der Welthandelsflotte, geordnet nach Schiffstypen (Stand jeweils 1. Januar).

15 Prozent Bulk Carrier (Massengutfrachter), 13 Prozent Fahrgastschiffe, 9 Prozent Containerschiffe, 5 Prozent alle übrigen Schiffe.

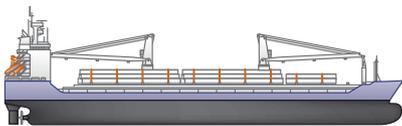
Hinsichtlich der Tragfähigkeit in dwt ergibt sich allerdings wegen der stark unterschiedlichen Schiffsgrößen eine andere Verteilung. So haben die Tanker und die Bulk Carrier jeweils einen Anteil von 35 Prozent, Containerschiffe 14 Prozent, die Stückgutschiffe (General Cargo Ships) 9 Prozent und die Fahrgastschiffe weniger als 1 Prozent. Insgesamt verfügt die Welthandelsflotte über eine Tragfähigkeit von knapp 1192 Millionen dwt.

Die modernen Schiffe – groß, schnell und hoch spezialisiert

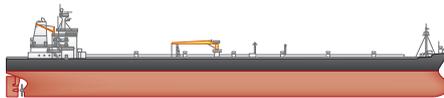
Zum Wachstum des Weltseeverkehrs haben auch schiffsspezifische Innovationen beigetragen. Folgende Aspekte sind von Bedeutung:

GRÖSSE: Die durchschnittliche Größe der Schiffe hat deutlich zugenommen. Größere Schiffe reduzieren die auf Ladungseinheiten bezogenen Kosten für Mannschaft, Treibstoff, Liegegebühren, Versicherung, Wartung und Unterhalt der Schiffe. Die Hafenbetreiber müssen auf zunehmende Schiffsgrößen mit dem Ausbau der Hafeneinrichtungen (Kaianlagen, Verkehrsanbindung an das Hinterland) und Hafenzufahrten (zum Beispiel durch Vertiefung der Fahrwinne) reagieren. Für sie steigen also die Kosten. Das kann den jeweiligen Eigentümern – meist den Staaten oder Kommunen – erhebliche finanzwirtschaftliche Probleme bereiten, wenn entsprechende Investitionen aus öffentlichen Haushalten finanziert, die Kosten aber nicht voll an die Hafennutzer weitergegeben werden.

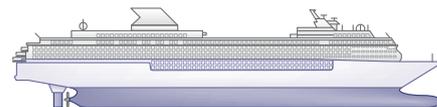
GESCHWINDIGKEIT: Die Schiffe der Welthandelsflotte können im Durchschnitt mit einer Geschwindigkeit von rund 15 Knoten fahren (1 Knoten = 1 Seemeile pro Stunde = 1,853 Kilometer pro Stunde), also 28 Kilometern pro Stunde, das entspricht etwa 670 Kilometern pro Tag. Jüngere Schiffe leisten 25 bis 30 Knoten (45 bis 55 Kilometer pro Stunde). Immerhin hat sich der Schiffsantrieb seit Erfindung des Schraubenpropellers deutlich verbessert, insbesondere durch den Einsatz von Doppelpropellern. Der Höhepunkt dieser Entwicklung war schon in den 1970er Jahren erreicht. Noch höhere Geschwindigkeiten zu erzielen bleibt eine Herausforderung und wäre ausgesprochen kostspielig. Experten sehen deshalb nur begrenzt weitere Verbesserungen der Durchschnittsgeschwindigkeit in der Handelsschifffahrt voraus.



Stückgutsschiff



Öltanker



Kreuzfahrtschiff

Wichtige Fachbegriffe des Seeverkehrs in Kürze

Bruttoregistertonne (BRT):

Die Bruttoregistertonne oder Bruttoreaumzahl (BRZ) ist ein Raummaß für die Größe von Handelsschiffen: 1 BRT = 100 Kubikfuß ≈ 2,83 Kubikmeter. Obwohl das Wort Tonne darin enthalten ist, darf die Bruttoregistertonne nicht mit Massenangaben wie der Tragfähigkeit gleichgesetzt werden. Ebenso wenig verwechselt werden sollte sie mit der Angabe der Standardverdrängung von Kriegsschiffen, der Standard-Tonne. Bruttoregistertonne (BRT) und Nettoregistertonne (NRT) wurden durch die Bruttoreaumzahl (BRZ) und die Nettoreaumzahl (NRZ) ersetzt, die Schiffsgröße und Volumen in Form eines errechneten dimensionslosen einfachen Zahlenwerts ausdrücken. Nach der BRZ oder NRZ berechnen sich die Gebühren für Hafennutzung (Hafengebühren), Kanal- oder Schleusendurchfahrt und Lotsen.

Deadweight Tonnage (dwt):

Mit Deadweight Tonnage wird die Tragfähigkeit eines Schiffs in Tonnen angegeben.

Frachtrate:

Mit dem Begriff Frachtrate werden im Bereich der Logistik die Geldbeträge bezeichnet, die der Transporteur für die Abwicklung einer Transportdienstleistung vom Kunden einfordert. Es gibt sogenannte All-in-Raten, in denen alle Nebenkosten wie Gebühren oder Kosten für die Dokumentation eingeschlossen sind, aber auch Raten, die nur die Kosten für den reinen Transport umfassen. Die Seefrachtraten variieren stark zwischen den verschiedenen Verkehrsgebieten.

Schiffsmaße:

Unter Schiffsmaßen versteht man unterschiedliche technische Daten wie Masse- und Raumangaben, Verdrängung, Tragfähigkeit, Tiefgang, Länge und Geschwindigkeit eines Schiffs. Angaben zu Schiffsgrößen und Schiffsleistungen variieren je nach Zweck und nationaler Maßeinheit.

Schiffsregister:

Jedes Schiff muss in das Schiffsregister eines Landes eingetragen werden. Das Schiff trägt die Flagge dieses Landes und gehört damit zum Hoheitsgebiet dieser Nation. Damit gelten an Bord alle Gesetze und Verordnungen (Arbeitsrecht, Sozialrecht und andere) des Landes. Einige Länder (zum Beispiel Panama, Liberia, Bahamas) aber haben sogenannte offene Schiffsregister, in die jeder Reeder sein Schiff eintragen lassen kann. Im offenen (Internationalen) Schiffsregister (ISR) eines Landes eingetragene Schiffe fahren unter der Flagge dieses Landes. Da das Arbeits- und Sozialrecht in vielen Ländern die Arbeiter weniger gut schützt als beispielsweise das europäische und es dort kaum Sicherheitsprüfungen oder Ähnliches gibt, ist die Arbeitskraft und damit das Fahren unter diesen Flaggen deutlich billiger (Billigflaggen).

TEU (Twenty-foot Equivalent Unit, Standardcontainer):

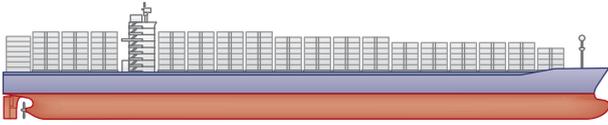
Mit TEU bezeichnet man die heute weltweit am häufigsten eingesetzten Transportcontainer. Ein TEU hat eine Länge von etwa 20 Fuß. Daher rührt auch die Bezeichnung Twenty-foot Equivalent Unit. Ein Fuß (englisch: foot) entspricht 30,48 Zentimetern. In Breite und Höhe misst ein TEU etwa 8 Fuß. Nicht nur Schiffe, auch Bahnwaggons und Sattelschlepper werden nach diesem Standard ausgelegt. Diese perfekte Normierung ist die Voraussetzung für einen nahtlosen Transport via Schiff, Lastwagen und Eisenbahn.

Tonnen-Seemeilen (tsm):

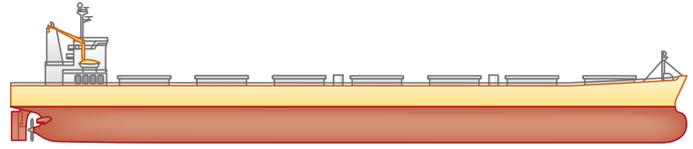
Maß für die Transportleistung. Die Transportleistung 1 tsm wird erbracht, wenn eine Tonne Ladung über eine Seemeile (1,853 km) befördert wird.

Trockenladung:

Trockenladung ist ein Sammelbegriff für alle nicht flüssigen Ladungen. Wichtige Trockenladungen sind zum Beispiel Eisenerz, Kohle, Getreide, Bauxit / Aluminiumoxid und Phosphat.



Containerschiff



Massengutfrachter

DESIGN: Das Design der Schiffe hat sich fundamental verändert – vom Holzschiff zum Stahlschiff und weiter zu Schiffen, die weitgehend aus Aluminium und Verbundmaterialien bestehen. Ziel der Designinnovationen war es, den Energieverbrauch und die Baukosten drastisch zu senken und gleichzeitig die Sicherheit zu erhöhen.

SPEZIALISIERUNG: Spezialisierungen im Schiffbau haben den Weltseeverkehr stark verändert. Es wurden zunehmend spezielle Schiffe für verschiedene Ladungen gebaut:

- Tanker für Rohöl, Ölprodukte, Chemikalien, Flüssiggas oder auch Fruchtsaftkonzentrat;
- Massengutfrachter für Massenschüttgüter wie Erz, Kohle, Getreide (Bulk Carrier);
- Massengutfrachter für Massenstückgüter wie Kraftfahrzeuge und Eisen;
- Kühlschiffe für Fruchttransporte aus Ländern der Südhalbkugel;
- Stückgutschiffe (General Cargo Ships);
- Containerschiffe, die auf längeren Strecken zunehmend die Aufgaben der Stückgutschiffe übernehmen;
- Fährschiffe mit Lkw-Beförderung sowie Roll-on/Roll-off-Schiffe (Ro-Ro Ships), bei denen die Ladung mit Sattelschleppern an und von Bord gerollt wird – beide übernehmen die Aufgaben der Stückgutschiffe auf kürzeren Strecken.

Mit der Spezialisierung sanken beispielsweise durch beschleunigten Ladungsumschlag die Kosten je transportierter Einheit. Es wurden also dort, wo Spezialschiffe ausgelastet werden konnten, steigende Skalenerträge realisiert.

AUTOMATISIERUNG: Im Schiffbau und Schiffsbetrieb wurden verschiedene Automatisierungstechnologien eingeführt: selbststeuernde Be- und Entladungssysteme, computergestützte Navigation und das Global Positioning System (GPS). Durch die Automatisierung konnte die erforderliche Mannschaftsstärke deutlich gesenkt werden. Zugleich erhöhten sich die Sicherheitsstandards erheblich.

So ist nach Angaben des Datendienstleisters IHS Fairplay die Zahl der Totalverluste von Schiffen (beispielsweise durch Unfälle oder Untergang) seit Mitte der 1990er Jahre von mehr als 200 pro Jahr auf rund 150 gesunken – vor dem Hintergrund der stark gewachsenen Flotte also eine beachtliche Erhöhung der Sicherheit.

Der Seeverkehr boomte über viele Jahre. Im Jahr 2007 überschritt die über See beförderte Ladung erstmals die 8-Milliarden-Tonnen-Marke. Der Weltseeverkehr hatte sich damit gegenüber 1990 verdoppelt (jährliche durchschnittliche Zunahme gut 4 Prozent). Die Transportleistung in Tonnen-Seemeilen (tsm) verdoppelte sich im gleichen Zeitraum ebenfalls annähernd auf fast 33 Billionen tsm. Die Weltwirtschaftskrise 2008/2009 dämpfte den prosperierenden Welthandel und damit den Weltseeverkehr enorm: Der Welthandel brach – nach einem bescheidenen Anstieg von knapp 3 Prozent im Jahr 2008 – 2009 um rund 14 Prozent ein. Die Frachtraten sanken auf vielen Teilmärkten auf historische Tiefststände. So lagen zu Beginn des Jahres 2009 beispielsweise weltweit rund 9 Prozent der Massengutfrachter beschäftigungslos in Häfen oder Buchten und kehren nun in 2010 nur langsam wieder auf den Transportmarkt zurück.

Was Schiffe laden – Öl, Container und Trockenfracht

Die Seeschifffahrt lässt sich grob in zwei Teilmärkte untergliedern: zum einen den Markt für Flüssigladelungen wie Öl und Ölprodukte, zum anderen den Markt für trockene Ladungen. Die Trockenladungen wiederum setzen sich aus Massenschütt- und Massenstückgütern (englisch: bulks) zusammen, von denen die fünf wichtigsten Eisen-erz, Kohle, Getreide, Phosphat und Bauxit sind. Die sonstige Trockenladung besteht aus weiteren Schüttgütern wie etwa Nichteisen-Metallerzen, Futter- und Düngemitteln, darüber hinaus aber vor allem aus zu kleineren Transporteinheiten gebündelten Gütern aller Art. Letztere werden

8.3 > Die Welthandelsflotte setzt sich zum größten Teil aus fünf Schiffstypen zusammen: den Stückgutschiffen wie etwa Schwerlast- und Mehrzweckschiffen, die Maschinenteile oder sogar Yachten transportieren; Öltankern, Massengutfrachtern (Bulk Carriers), die über Ladeluken beladen werden; Fahrgastschiffen wie etwa Kreuzfahrtschiffen sowie den Containerschiffen. Alle anderen Schiffstypen wie etwa Autotransporter machen insgesamt nur etwa 5 Prozent der Flotte aus.

als Stückgüter bezeichnet und heute meist in Containern und regelmäßig in der Linienschifffahrt befördert, die feste Routen nach angekündigten Fahrplänen bedient. Sie bietet ihre Leistungen meist zu festen Konditionen an, die auf sogenannten Konferenzen zwischen Wettbewerbern vereinbart werden.

Das weltweit bedeutendste einzelne Transportgut ist Rohöl, das allein etwa ein Viertel der Ladungen aller Seetransporte ausmacht. Die wichtigsten Importeure sind die Europäische Union, die Vereinigten Staaten von Amerika und Japan. Alle drei werden aus dem Mittleren Osten, dem wichtigsten Ölfördergebiet, beliefert. Darüber hinaus bezieht Nordamerika noch Öl aus Westafrika und der Karibik. Europa wiederum importiert aus Nord- und Westafrika. Die Haupttransportrouten verlaufen daher vom Ara-

bischen Golf westwärts um das Kap der Guten Hoffnung oder durch den Suezkanal sowie von Afrika nord- und westwärts nach Europa oder Nordamerika. Ferner verlaufen Transportrouten vom Arabischen Golf ostwärts nach Ostasien und von der Karibik zur Golfküste der Vereinigten Staaten.

Freilich wird nicht nur Rohöl per Schiff transportiert. So bringen kleinere, spezialisierte Schiffe (Produktentanker) weiter aufbereitete Ölprodukte wie etwa Benzin von bedeutenden peripheren Raffineriestandorten in die Verbrauchsgebiete Nordamerikas oder Japans. Im Jahr 2007 waren es weltweit etwa 815 Millionen Tonnen.

Unter den trockenen Massengütern haben Eisenerz und Kohle rein mengenmäßig eine besondere Bedeutung. Eisenerz wird in sehr großen Schiffen über längere Strecken hauptsächlich von Brasilien nach Westeuropa und Japan sowie von Australien nach Japan transportiert. Die bedeutendsten Transportwege der Kohle verlaufen von den beiden Hauptexportländern Australien und Südafrika nach Westeuropa und Japan, ferner von Kolumbien und der US-Ostküste nach Westeuropa sowie von Indonesien und der US-Westküste nach Japan.

Der größere Teil der transportierten Kohle wird als Kesselkohle zur Energieerzeugung in Kraftwerken verwendet. Ein Drittel der weltweit verschifften Kohle wird als Koks zur Verhüttung in der Eisen- und Stahlindustrie eingesetzt.

Zu den trockenen Massengütern rechnet man auch die Getreide und Ölsaaten (Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Sorghum oder Sojabohnen). Hier schwanken die Mengen und Richtungen der Transporte allerdings je nach Erntezeiten und -ergebnissen sehr viel stärker als bei den anderen wichtigen Massengütern. Vor allem die USA, Kanada, Argentinien, Australien oder auch Frankreich sind Getreideexporteure. Wichtige Importgebiete sind infolge häufiger lokaler Mangelsituationen vor allem Afrika und Ostasien. Zwar verbrauchen die Hauptgetreideproduzenten (Vereinigte Staaten, Russland, China, Indien) ihre Produktion zum größten Teil oder sogar gänzlich im eigenen Land. Dennoch sind die verbleibenden weltweit gehandelten Getreidemengen so groß, dass Getreide zu den Massenschüttgütern gezählt wird.

Die intensivierte internationale Arbeitsteilung, beispielsweise in der Automobilproduktion, hat dazu geführt, dass

Die Container-Revolution

Die Containerschifffahrt wurde während der 1960er Jahre zuerst in den USA eingeführt und in den späten 1960er und frühen 1970er Jahren dann auf die Schiffsrouten zwischen den USA und Europa bzw. Japan ausgeweitet. Vom Ende der 1970er Jahre an folgten dann die Entwicklungsländer, die die hohen Fixkosten der Einführung anfangs gescheut hatten. Denn um die Vorteile des Containertransports voll nutzen zu können, benötigt man entsprechend ausgerüstete Schiffe und Hafenanlagen mit speziellen Kränen, Lagerflächen und Bahnanlagen. Daher setzte sich der Containerverkehr zunächst auf den am stärksten frequentierten Schiffsrouten durch. Für die Entwicklungsländer gab es letztlich zwei Gründe, nur zögerlich in den Containertransport einzusteigen: den Preis und das geringere Containeraufkommen. In Ländern nämlich, in denen es nur wenig Kapital, aber viele Arbeiter gibt, sind die Kapitalkosten beim Bau eines Containerhafens relativ höher. Die durch die Containerisierung eingesparten Arbeitskosten hingegen sind vergleichsweise gering.

Dessen ungeachtet halten viele Experten den Containertransport für eine der wichtigsten Transport-Revolutionen des 20. Jahrhunderts. Der Einsatz standardisierter Container spart enorme Transportkosten ein, da die Ware nur einmal verpackt wird und dann über lange Distanzen mit verschiedensten Verkehrsträgern – Lastwagen, Eisenbahn, Schiff – transportiert werden kann. Zeitraubendes Aus- und Umpacken entfällt und sowohl die direkten Kosten, wie etwa Hafengebühren fürs Lagern und Verstauen, als auch die nicht unerheblichen indirekten Kosten langer Liegezeiten werden reduziert. Nach Schätzungen verbringen nämlich traditionelle Frachtschiffe, bei denen das Löschen der Ladung deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt, die Hälfte bis zwei Drittel ihrer Betriebszeit im Hafen. Die Containerisierung des Schiffstransports rechnet sich vor allem auf See, denn die großen und schnellen Containerschiffe reduzieren die Kosten pro Tonnen-Seemeile auf Reisen erheblich.



8.4 > In den kommenden Jahren werden weitere riesige Containerschiffe vom Stapel laufen und in Dienst gestellt. Vermutlich wird dadurch die Gesamtkapazität der Handelsflotte die Nachfrage für längere Zeit übersteigen.

auch Stückgüter wie etwa Autos oder Autoteile als Massenstückgüter in so großen Mengen anfallen, dass sie in ganzen Schiffsladungen außerhalb der Linienschifffahrt mit entsprechend spezialisierten Schiffen befördert werden können. Zu diesem auch als Spezialschifffahrt bezeichneten Zweig gehören beispielsweise große Autotransporter oder Spezialtanker für Chemikalien oder Fruchtsaftkonzentrat, die heute auf Kontraktbasis linienartig verkehren.

Die sonstigen Trockenladungen werden heute vor allem mit Containern transportiert. Diese standardisierten Boxen haben eine Flut von technischen Innovationen an der Transporthardware (zum Beispiel Spezialkräne an den Umschlagstellen) und grundlegenden organisatorischen Innovationen mit sich gebracht. Da die Boxen standardisiert sind, können sie mit jedem beliebigen Transportmittel befördert und zügig auf Lastwagen oder Eisenbahnwagons umgeladen werden, die über die entsprechenden Halterungen verfügen. Aus ökonomischer Sicht brachte dies eine dramatische Senkung der Transportkosten mit sich, vor allem durch das beschleunigte Be- und Entladen. Für einen effizienten Einsatz der Container waren Investitionen entlang der ganzen Transportkette erforderlich, die Kapitalintensität nahm dadurch deutlich zu. Die Arbeitsintensität wurde hingegen nachhaltig vermindert, da relativ weniger Schauerleute zum Be- und Entladen gebraucht wurden.

Der weltweite Gütertransport in Containern auf See hat seit 1985 jährlich um rund 10 Prozent auf 1,3 Milliarden

Tonnen (2008) zugenommen. Sein Anteil an der Beförderung aller Trockenladungen stieg dabei von 7,4 Prozent auf 25 Prozent. Im Jahr 2008 wurden 137 Millionen Container, gemessen in TEU, über die Meere befördert. Im Jahr 2009 ging die Zahl dann allerdings um ungefähr 10 Prozent zurück.

Die typischen Kosten für den Transport eines TEU von Asien nach Europa, der mehr als 20 Tonnen Fracht enthält, entsprechen grob gerechnet den Kosten eines einfachen Fluges in der Economy Class auf derselben Route. Heruntergebrochen auf typische Güter des täglichen Bedarfs wie etwa Elektrogeräte, machen die Transportkosten zumeist weniger als 1 Prozent des Verkaufspreises aus.

Die wichtigsten Routen des Weltseeverkehrs

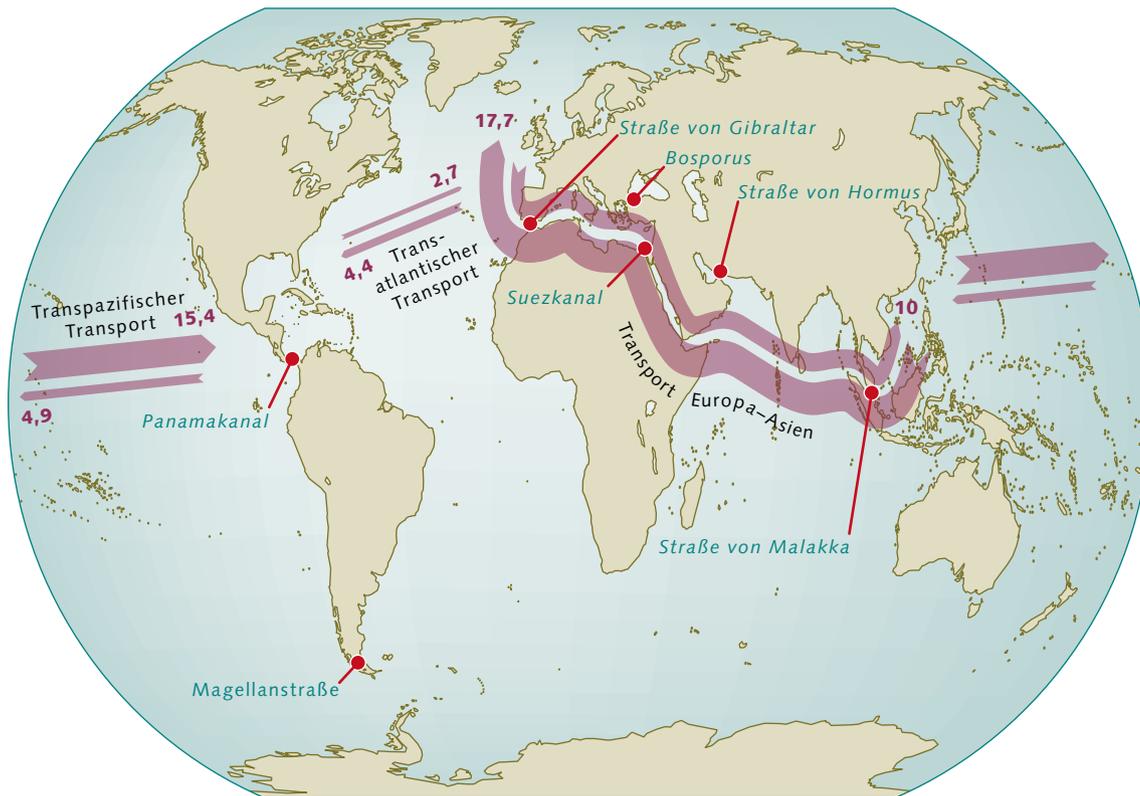
Fasst man alle Handelsgüter zusammen, dann ergeben sich relativ wenige Hauptverkehrsrouten, die sich durch wenige Teilgebiete der Weltmeere ziehen. Am dichtesten befahren sind weltweit die Zufahrten zu den Häfen Europas und Ostasiens, insbesondere zu den japanischen Häfen, nach Shanghai, Singapur und Hongkong, und den Vereinigten Staaten. Vor allem die US-Ostküste ist Hauptempfänger und -versender von Ladungen. Meerengen führen zu einer zusätzlichen Konzentration des Schiffsverkehrs. Neuralgische Punkte sind die Straßen von Dover, Gibraltar, Malakka, Lombok und Hormus, aber auch das Kap der Guten Hoffnung an der Südküste Afrikas. In die

8.5 > Die Containerisierung der Seefahrt hat das Löschen der Ladung enorm beschleunigt.

Die Last mit den Leerfahrten – unausgeglichene Ladungsbilanzen

Mehr noch als im Containerverkehr sind im Massengutsektor die Transportströme aus den verschiedenen Richtungen in der Regel sehr unausgeglichene. Rohstoffvorkommen und Rohstoffverarbeiter sind oftmals geographisch weit voneinander entfernt. Große Erz- und Kohlefrachter oder auch Rohöltanker sind daher auf einer Rundreise jeweils nur während der Fahrt vom Lade- zum Löschhafen beladen. Auf der Rückfahrt sind die Schiffe meistens leer. Das hat zur Folge, dass mit der Frachtrate für die Ladung regelmäßig zugleich die Rückfahrt des leeren Schiffs bezahlt werden muss. Dies erklärt zum Teil die großen richtungsbezogenen Differenzen in den Frachtraten auf den einzelnen Routen.





8.6 > Die Hauptrou-
ten des weltweiten
Containerverkehrs
über die Meere. Die
Zahlen geben die
Menge der 2007
transportierten TEUs
in Millionen Stück an.

sen Meerengen ballt sich der Verkehr, und das macht ihn auch anfällig für Störungen wie zum Beispiel Übergriffe durch Piraten.

Für den Verkehr mit Asien sind – entsprechend den Handelsbilanzen – unausgeglichene Ladungsbilanzen kennzeichnend. Dabei ist das aus Asien stammende Ladungsaufkommen größer als das der Gegenrichtung. Auf der Pazifikroute war das Ungleichgewicht mit fast 10 Millionen TEU (2007) besonders ausgeprägt. Von Asien nach Europa betrug es fast 8 Millionen TEU. Im Nordatlantikverkehr zwischen den hoch entwickelten Volkswirtschaften Nordamerikas und Europas war das Ungleichgewicht mit knapp 2 Millionen TEU deutlich geringer. Grund für diese Verteilung der Transporte ist die Tatsache, dass seit Mitte der 1980er Jahre viele Fertigungsprozesse aus den traditionellen Industrieländern in die aufstrebenden Entwicklungs- und Schwellenländer verlagert wurden, insbesondere nach China und in die südostasiatischen Länder. Bei den herrschenden Wechselkursen hat sich vor allem China zur kostengünstigen Werkbank der Welt ent-

wickelt. Dieser Prozess ist durch die Einführung des Containers und die damit verbundene erhebliche Produktivitätssteigerung im Seetransport gefördert worden. Die Kosten für den Transport zwischen dem Ort der Herstellung und des Verbrauchs der Waren wurden damit entscheidend reduziert. Zum Wachstum des Containerverkehrs hat außerdem beigetragen, dass bislang noch konventionell transportierte Trockenladungen wie zum Beispiel Auto- und Maschinenteile zunehmend containerisiert wurden.

Bis zum Ausbruch der Weltwirtschaftskrise war die Nachfrage nach neuen Schiffen groß gewesen. Mit der Krise aber wendete sich das Blatt, viele Unternehmen stornierten ihre Aufträge zum Bau neuer Schiffe. Dennoch ist davon auszugehen, dass das Angebot an Seetransportkapazität durch die Auslieferung fertiggestellter Schiffe in naher Zukunft weiter zunehmen und die Nachfrage übersteigen wird. Das dürfte eine rasche Erhöhung der Frachtraten von den gegenwärtigen Tiefstständen vermutlich spürbar hemmen.

Piraterie und Terrorismus im globalen Seeverkehr

> Piratenangriffe sind in den vergangenen Jahren zunehmend in das Blickfeld der Öffentlichkeit gerückt. Die wachsende Bedrohung kann durchaus zu höheren Kosten führen – etwa bei den Versicherungsprämien. Letztlich ist das Risiko, Opfer eines Piratenangriffs zu werden, aber relativ gering. Der Schutz vor terroristischen Anschlägen wiederum entpuppt sich als ein Hindernis im internationalen Seeverkehr, weil er spürbare Kostensteigerungen nach sich zieht.

Die Rückkehr der Freibeuter

In den 1990er Jahren hat die Piraterie mit der fortschreitenden Globalisierung wieder an Bedeutung gewonnen, nachdem sie mehr als ein Jahrhundert lang weitgehend verschwunden war. Die Piraterie ist ein uraltes, bis Mitte des 18. Jahrhunderts oft staatlich geduldetes und bisweilen hoch respektiertes Phänomen im Weltseeverkehr. So wurden die Angriffe des englischen Weltumseglers Sir Francis Drake (1540 bis 1596) auf spanische Handelsschiffe von der englischen Krone durchaus begrüßt. In der Deklaration über das Seerecht wurde am 16. April 1856 in Paris die Abschaffung der Kaperei beschlossen.

Nunmehr hat die Piraterie vor allem vor der somalischen Küste und im Golf von Aden zugenommen – also dort, wo

Haupthandelsrouten verlaufen. Piraterie geht oft Hand in Hand mit bitterer Armut, die die Menschen in diesen Erwerbszweig treibt. Begünstigt wird sie oftmals durch den völligen Zusammenbruch staatlicher Ordnung in den betreffenden Nationen.

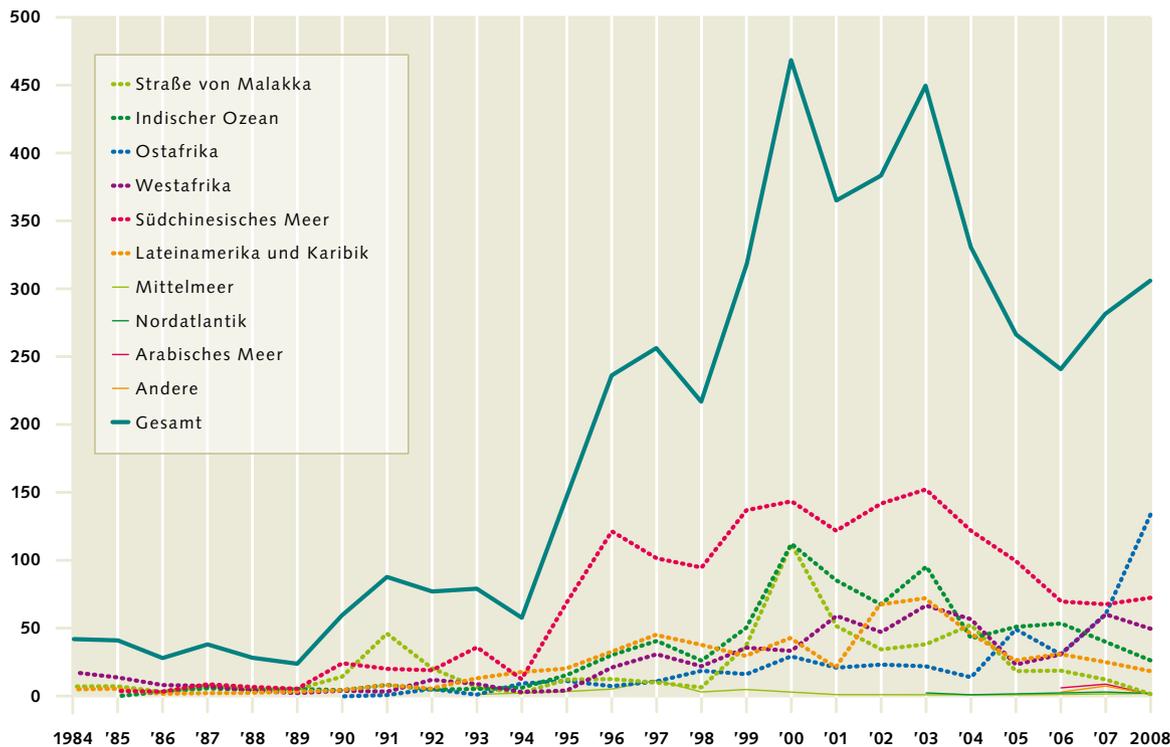
Die Piraterie ist nicht nur eine unmittelbare Gefahr für die Besatzung der Schiffe und die Ladung. Sie verteuert zudem den Weltseeverkehr. Die Verlagerer und Reeder spüren die Kosten der Piraterie ganz erheblich. So sind die Versicherungsprämien für eine Passage durch den Golf von Aden um mehr als das Zehnfache gestiegen. Der Umweg um das Kap der Guten Hoffnung wiederum ist um Wochen länger und verbraucht deutlich mehr Treibstoff. Gleichwohl ist das Risiko, Opfer eines Piratenangriffs zu werden, auch an den Brennpunkten der Piraterie eher gering. Die jährlichen Gesamtverluste durch Piraterie in den Meerengen werden derzeit auf 0,001 bis 0,002 Prozent des gesamten Transportwerts in den betroffenen Straßen geschätzt. Nach Ansicht von Experten ist dieser Wert also keineswegs alarmierend hoch. Das gilt tendenziell auch für den gegenwärtigen Brennpunkt der Piraterie: die somalische Küste und den zwischen Afrika und der Arabischen Halbinsel gelegenen Golf von Aden, den jährlich rund 16 000 Schiffe passieren.

Eine unkalkulierbare Gefahr – der Terrorismus

Mit den Terrorangriffen vom 11. September 2001 hat das Thema Gefährdung des Seeverkehrs erheblich an Bedeutung gewonnen. Von der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation IMO wurde bereits eine Reihe von verbindlichen Sicherheitsmaßnahmepaketen erlassen. Vor allem die USA haben einschneidende Sicherheitsvorkehrungen getroffen. Ein Beispiel ist die Überwachung von Contai-

8.7 > Respektierter Seeräuber:
Sir Francis Drake (1540 bis 1596)
 war ein geachteter englischer Kapitän, der von den Spaniern wegen seiner räuberischen Überfälle aber eher als Pirat betrachtet wurde. 1581 wurde er von der englischen Krone sogar zum Ritter geschlagen.





8.8 > Die moderne Freibeuterei: Nach einer starken Zunahme der Piraterie zu Beginn des 21. Jahrhunderts ist die Zahl der Überfälle weltweit wieder deutlich gesunken. Die Ausnahme sind die Gewässer vor Ostafrika und insbesondere Somalia.

nen beim Verladen und entlang der gesamten Transportkette. Diese Maßnahmen wurden von den wichtigsten Handelspartnern der USA befolgt, um Schwierigkeiten im Containerverkehr zu vermeiden. Zum einen soll verhindert werden, dass Terroristen per Schiff Nachschub an Waffen oder anderem Material anlanden. Zum anderen will man ausschließen, dass Schiffe selbst – analog zu den Flugzeugen des 11. September 2001 – als Waffe missbraucht werden.

Sicherheit ist gerade im Containerverkehr eine besondere Herausforderung: Das maritime System des Containertransports ist charakterisiert durch komplexe Interaktionen zwischen verschiedensten Akteuren, Industrien, Regulierungsbehörden, Verkehrsträgern, Operationssystemen, unterschiedlichen Rechtsrahmen und verschiedenen Haftungsbedingungen. Die Europäische Verkehrsministerkonferenz (European Conference of Ministers of Transport, ECMT) stellt dazu fest, dass für die Sicherheit des Containerhandels alle Akteure verantwortlich sind. Eine einzige Sicherheitslücke in einem Bereich zerstört die Sicherheit der gesamten Logistikkette. Besonders anfällige Punkte des Containerhandels sind Rangierbahnhöfe, Stopps an

der Straße und auf Parkplätzen sowie die Verladeterminale in den Häfen.

Es gibt eine Reihe ausgewählter Studien zu den wirtschaftlichen Folgen des Terrorismus im Seeverkehr, die sich vor allem auf US-amerikanische Häfen beziehen. Damit wird versucht, die Gesamtverluste durch materielle Schäden im Fall eines terroristischen Angriffs und anschließende Hafenschließungen zu bestimmen. In Simulationen wurde zum Beispiel der wirtschaftliche Schaden eines Angriffs auf den Hafen von Los Angeles mit einer „dirty radioactive bomb“ berechnet: In der Folge des Anschlags wird jeder US-Hafen für acht Tage geschlossen; der Abbau des resultierenden Containerstaus dauert 92 Tage. Der Gesamtschaden wird auf 58 Milliarden US-Dollar geschätzt. Die Zahl der Menschen, die bei einem solchen Angriff getötet werden könnten, und auch die Schäden an den Gebäuden wurden in dieser rein wirtschaftlichen Studie nicht berücksichtigt. Die Folgen dürften jedoch katastrophal sein.

Die Effekte wären im Fall der weltweit größten Häfen (zum Vergleich der Containerumschlag 2007: Los Angeles 8,4 Millionen TEU; Hamburg 9,9 Millionen TEU und Sin-

8.9 > Deutsche Marinesoldaten überführen im Golf von Aden ein Piratenboot zur Fregatte „Rheinland-Pfalz“. Wegen der häufigen Überfälle werden die ostafrikanischen Gewässer seit Längerem durch Kriegsschiffe gesichert. Dennoch kommt es in dieser derzeit gefährlichsten Küstenregion immer wieder zu Übergriffen auf Handelsschiffe.



gapur 27,9 Millionen TEU) noch schwerwiegender. Allerdings gibt es bislang keine verlässlichen Schätzungen über die Höhe der Vermeidungskosten und ihr Verhältnis zu den möglichen Schäden durch terroristische Angriffe.

Solche Vermeidungskosten entstehen unter anderem durch den Kauf spezifischer Ausrüstungen zur Kontrolle der Schiffsladungen (beispielsweise Röntgengeräte) und durch den Einsatz von in der Regel hoch qualifiziertem Personal. Zum einen investieren private Akteure wie beispielsweise die Reedereien selbst in derartige Schutzmaßnahmen. Zum anderen schreiben Staaten bestimmte Schutzvorkehrungen vor. Die OECD schätzte die anfängliche Last der Reedereien durch die Implementierung der Schutzvorkehrungen auf 1,3 Milliarden US-Dollar und danach auf jährlich 730 Millionen US-Dollar. Diese erhöhten Kosten schlagen sich zumindest kurzfristig in höheren Preisen beziehungsweise geringeren Gewinnmargen nieder und verringern dadurch tendenziell den Seeverkehr. Andererseits können die ergriffenen Maßnahmen auf ver-

schiedene Weise langfristig zur Kostensenkung beitragen – etwa durch verringerte Verzögerungen und schnellere Durchlaufzeiten. Kostensenkungen sind auch durch verbesserte Kontrolle der Transport- und Verladeanlagen, durch intensiveren IT-Einsatz und daraus folgende geringere Personalkosten, durch geringeren Verlust durch Diebstahl aufgrund höherer Sicherheit und durch niedrigere Versicherungsprämien denkbar.

Trotz dieser möglichen Kostensenkungen gehen Experten davon aus, dass die Transportkosten durch die höheren Sicherheitsstandards in der Summe erheblich gestiegen sind. So zitiert die OECD Schätzungen, dass die Gefahr terroristischer Anschläge in den USA etwa die Hälfte der Produktivitätsgewinne in der Logistik zunichte gemacht hat, die man in den vergangenen zehn Jahren erzielt hatte. Gelegentlich wurde sogar die Befürchtung geäußert, dass die allgegenwärtige internationale terroristische Bedrohung den Globalisierungsprozess der vergangenen drei Jahrzehnte insgesamt infrage stellt. Wenig quantifizierbar

sind gegenwärtig auch die Folgen für die Organisation der Produktion. Wird es auch in Zukunft möglich sein, die Just-in-time-Produktion aufrechtzuerhalten? Erste Hersteller haben auf die durch die permanente terroristische Bedrohung erzeugte Unsicherheit reagiert. Sie verlassen sich nicht mehr nur auf Just-in-time-Lieferungen.

Die Kosten der Angst

Eine umfassende ökonomische Analyse der gesamtwirtschaftlichen Kosten und Erträge der Schutzmaßnahmen

im Weltseeverkehr steht derzeit noch aus. Bislang gibt es dazu keine umfassenden Studien. Die Frage, ab wann die Kur teurer wird als die Krankheit, lässt sich zurzeit also kaum beantworten: Niemand weiß, wann die Kosten des Sicherheitsgewinns die Kosten möglicher Schäden und Zerstörungen durch tatsächliche Terrorangriffe übersteigen. Albraum-Szenarien von gekaperten Schiffen, die in wichtigen Häfen in die Luft gejagt werden und gigantische Explosionen auslösen, lassen sich zwar nicht gänzlich in Abrede stellen, nach Ansicht von Experten sind sie aber ausgesprochen unwahrscheinlich.

CONCLUSIO

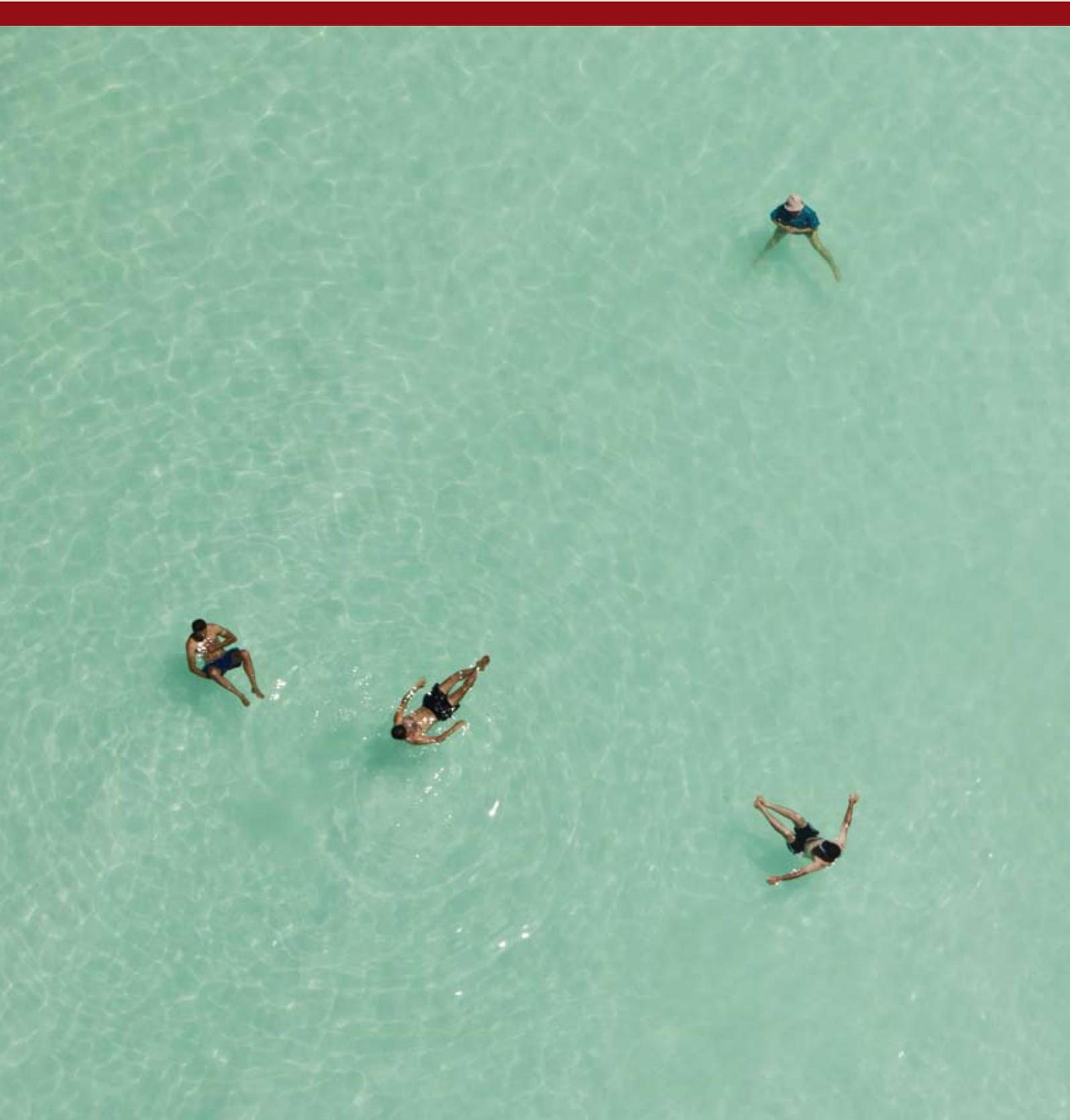
Der Weltseeverkehr – ein Blick in die Zukunft

Die globale Wirtschaftskrise hatte zu einem tiefen Einbruch des Weltseeverkehrs geführt. Aber die Weltwirtschaft hat sich 2010 tiefgreifend erholt. Der Welthandel, der bis ins Frühjahr 2009 hinein rückläufig gewesen war, nahm ab Sommer 2009 wieder deutlich zu. Allerdings wird die Konjunktur wohl noch geraume Zeit weiter belastet bleiben. Alles in allem rechneten die größten deutschen Konjunkturforschungsinstitute in ihrer Herbstprognose 2010 damit, dass dem Rückgang der Weltproduktion um 1 Prozent 2009 im Jahr 2010 ein Anstieg um 3,7 Prozent folgt (2011: 2,8 Prozent), getragen vor allem von der wieder zügigen Erholung in einigen Schwellenländern, China und einigen westeuropäischen Ländern. Der Welthandel hat 2009 mit einer Rate von 11,3 Prozent einen kräftigen Einbruch erlitten und wird 2010 allerdings um ungefähr 12 Prozent zulegen (2011: 6,8 Prozent). Das hat auch die Transportnachfrage wieder verhalten anziehen lassen. Offen bleibt, ob und wie sich die Globalisierung der Märkte fortsetzen oder verändern wird. Die Befürchtungen, dass die Finanzkrise zu einer spürbaren Beeinträchtigung der internationalen Arbeitsteilung und damit des Welthandels und des Seeverkehrs führen könnte, sind noch nicht

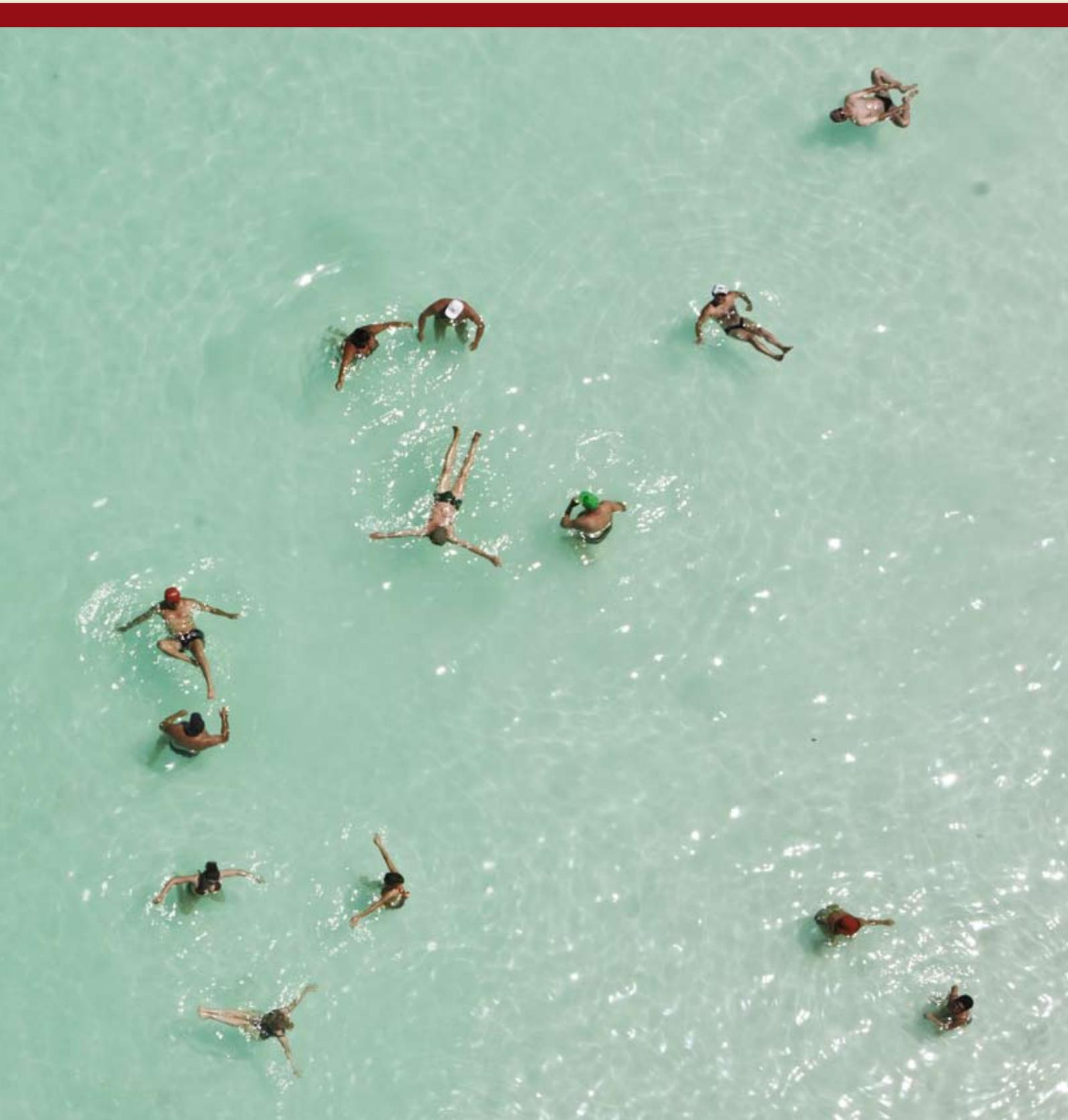
endgültig ausgeräumt. Auch die Container-Erfolgs-story endete mit dem Absturz der Weltwirtschaft im Jahr 2008 abrupt. A. P. Moeller-Maersk A/S, die Eigentümerin der größten Containerflotte der Welt, schätzt, dass der Containerumschlag 2009 um 10 Prozent eingebrochen ist – der erste Rückgang seit dem ersten weltweiten Einsatz von Containern in den 1970ern! Die Containerschifffahrt wird nach ihren erfolgreichsten Jahren auch wegen der bevorstehenden starken Flottenexpansionen in der kommenden Zeit unter Druck geraten. In naher Zukunft wird eine riesige Anzahl extrem großer Containerfrachtschiffe fertiggestellt, was eine zügige Erholung der Frachtraten beeinträchtigen wird. Wie stark sich der Klimawandel auf die Schifffahrt auswirken wird, ist kaum abzusehen. Extreme Wetterereignisse wie etwa Stürme könnten die Transport- und Navigationsbedingungen beeinträchtigen, die Risiken für Schiffe und Ladungen erhöhen oder das Be- und Entladen erschweren. Der Gütertransport über See, das wichtigste weltweite Transportmedium, würde sich durch den Klimawandel möglicherweise verteuern. Andererseits könnte der Wandel neue Schifffahrtsrouten ermöglichen und so zu beträchtlicher Zeit- und Energieersparnis führen. So ist denkbar, dass die Nordwest- und die Nordostpassage bald für mehrere Wochen oder gar Monate im Jahr befahrbar sein wird (Kapitel 1).

9

Medizinisches Wissen
aus dem Meer



> Meeresorganismen wie Bakterien, Korallen oder Schwämme enthalten Tausende von interessanten Substanzen, aus denen man künftig neue Medikamente entwickeln könnte. Einige dieser Wirkstoffe wurden bereits als Arznei zugelassen. Auch lässt sich an den ursprünglichen Organismen sehr gut erforschen, wie Krankheiten entstehen oder bekämpft werden können. Bevor der medizinische Schatz im Meer gehoben werden kann, sind aber noch rechtliche Fragen zu klären.



Meerestiere als Wirkstofflieferanten

> Wirkstoffe aus dem Meer werden heute bereits als Krebsmedikamente oder Schmerzmittel eingesetzt. Andere Präparate befinden sich in der klinischen Erprobung. Doch die Fahndung nach neuen vielversprechenden Substanzen ist aufwendig. Mit genanalytischen Methoden versucht man jetzt, die Suche zu beschleunigen.

Geschätzte Heilquelle seit der Antike

Als Quelle heilender Substanzen fasziniert das Meer die Menschheit seit Jahrtausenden. „Das Meer“, lässt der griechische Dramatiker Euripides in einem seiner Iphigenie-Dramen sagen, „reingt uns von allen Wunden der Welt.“ Schon die Ägypter und Griechen untersuchten, wie Seewasser die Gesundheit beeinflusst. Sie sprachen dem Wasser und den darin gelösten Stoffen Heilkraft zu. Auf allen Kontinenten sind Meeresprodukte seit Jahrhunderten Bestandteil der Volksmedizin. So wird Meersalz traditionell gegen Hautkrankheiten eingesetzt. Algen werden als Wurmmittel verwendet. 1867 führte der französische Arzt La Bonnardière die klassische Thalasso- und Klimatherapie in Europa ein und trug damit dazu bei, dass das Meer dort zunehmend als Hort gesund machender Kräfte wahrgenommen wurde. Die Mystifizierung dieser Heilkraft hat allerdings auch irrationale Blüten getrieben – etwa der Glaube, dass der Verzehr von Meeresschildkröteneiern oder Haifischflossen die männliche Potenz steigert. Dieser Aberglaube wird heute von unseriösen Unternehmen missbraucht und hat zu einer Dezimierung zahlreicher Tierarten beigetragen.



9.1 > Die Werke des griechischen Dramatikers Euripides (zirka 480 bis 406 vor Christus) werden auch heute noch gespielt. Das Meer hat in seinen Dramen eine geradezu schicksalhafte Bedeutung. Es ist Bedrohung, aber auch Quell des Lebens.

Hightechgeräte spüren vielversprechende Moleküle auf

Mithilfe moderner molekularbiologischer und gentechnischer Methoden kann man heute sehr schnell neue zukunftssträchtige Substanzen im Meer identifizieren. Längst hat man realisiert, dass die Ozeane viele unbekannte bioaktive Stoffe beherbergen, die heilend oder pflegend wirken. In vielen Fällen konnten Wissenschaftler klären, welche Rolle bestimmte Substanzen in den

Organismen spielen, beispielsweise in ihrem Immunsystem, und welche biochemischen Prozesse in den Lebewesen ablaufen. Die Forscher gehen davon aus, dass künftig zahlreiche neue bioaktive Substanzen im Meer und in Meeresorganismen entdeckt werden, schließlich ist der Ozean Heimat von Millionen Pflanzen-, Tierarten und Bakterienstämmen. Heute sind bereits rund 10 000 Naturstoffe bekannt, die vor allem in den vergangenen 20 Jahren aus Meeresorganismen isoliert wurden. Erleichtert wurde die Suche durch die Entwicklung neuer technischer Methoden wie etwa der Kernspinresonanzspektroskopie, mit denen sich unbekannte Wirkstoffmoleküle selbst dann identifizieren und analysieren lassen, wenn ein Meeresorganismus nur Spuren davon enthält. Außerdem wird der Meeresboden heutzutage so intensiv erforscht wie nie zuvor. Zum Einsatz kommen unbemannte Tauchroboter, mit denen man sogar in mehrere Tausend Meter Wassertiefe vorstoßen kann, um dort Proben zu nehmen.

Trotz dieser Fortschritte und der enormen Biodiversität (Kapitel 5) des Ozeans sind bisher nur wenige Meereswirkstoffe für den Einsatz in der Klinik zugelassen. Eine neue Substanz muss nämlich nicht nur an Molekülen angreifen, die im Krankheitsprozess eine zentrale Rolle spielen, sie sollte, wenn sie gleichzeitig mit anderen Medikamenten oder der Nahrung eingenommen wird, auch nicht zu riskanten Wechselwirkungen führen. Zudem muss sie großtechnisch herstellbar sein.

Wirkstoffe aus dem Meer – für den Menschen wie geschaffen

Die heute bereits zugelassenen marinen Naturstoffe bestehen in der Regel durch eine besonders gute Wirksamkeit. Sie werden geschätzt, weil sie durch andere Ausgangs-



9.2 > Im Europa der Neuzeit wurde das Meer erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts als Heilquelle wiederentdeckt. Zunehmend reisten Menschen, die weitab der Küsten wohnten, zur Erholung an die See – wie hier auf die ostfriesische Insel Norderney.

stoffe und Zusammensetzungen geprägt sind als die Naturstoffe, die an Land vorkommen: Die spezielle Struktur der Wirkstoffmoleküle und ihre Bestandteile wie etwa die Elemente Brom oder Chlor tragen offensichtlich zur Wirksamkeit bei. Für gewöhnlich kommen die Substanzen nicht in ihrer reinen Form zum Einsatz. Zunächst werden die Moleküle chemisch leicht abgewandelt und auf den menschlichen Stoffwechsel zugeschnitten. Zu den erfolgreichen Meereswirkstoffen, die es bis in die klinische Anwendung geschafft haben oder die vielversprechende Kandidaten sind, gehören folgende Substanzen:

Nukleoside

Zu den bekanntesten marinen Naturstoffen, die bereits seit gut 50 Jahren in der Klinik verwendet werden, gehören die aus dem karibischen Schwamm *Cryptothetya crypta* isolierten ungewöhnlichen Nukleoside Spongouridin

und Spongothymidin. Nukleoside sind Bausteine des Erbguts DNA. Bevor sich eine Zelle teilt, wird das Erbgut vervielfältigt. Die Nukleoside werden dabei passgenau in den neuen Erbgutstrang eingebaut. Sie besitzen unter anderem eine Zuckerkomponente, zumeist die Ribose. Die Nukleoside Spongouridin und Spongothymidin hingegen haben einen anderen Zuckerbaustein, die Arabinose. Werden diese körperfremden Nukleoside in die DNA eingebaut, bricht die Erbgutvermehrung, die Nukleinsäuresynthese, ab.

Dieses Prinzip hat man sich früh für die Behandlung von Krebserkrankungen oder Viren zunutze gemacht, denn Tumorzellen sind besonders teilungsfreudig und auch Viren benötigen eine aktive Erbgutsynthese im Zellkern zur Vermehrung. Verabreicht man dem Patienten Substanzen, die die Nukleinsäuresynthese unterbrechen, wird das Tumorwachstum erheblich gestört. So wurden die Schwammnukleoside zu einer tumorhemmenden Sub-



9.3 > Aus Schwämmen wie dem Elefantenoehrschwamm *Lanthella basta* werden viele medizinisch wirksame Stoffe extrahiert. Dieser Schwamm liefert Substanzen, die das Wachstum von Tumoren hemmen.

stanz, einem Zytostatikum, weiterentwickelt. Bei diesem Wirkstoff handelt es sich um die Substanz Ara-C (Cytarabine®), das als erstes Meeresmedikament von der US-amerikanischen Nahrungs- und Arzneimittelbehörde (Food and Drug Administration, FDA) im Jahr 1969 zugelassen wurde. 1976 folgte die Zulassung des Virostatikums Ara-A (Vidarabin®), das die Vermehrung von Viren hemmt und bis heute bei schweren Herpes-simplex-Virusinfektionen angewendet wird.

Prostaglandine

1969 wurde nachgewiesen, dass die in der Karibik und im Westatlantik weitverbreitete Koralle *Plexaura homomalla* große Mengen an Prostaglandin-Abkömmlingen enthält. Prostaglandine sind bedeutende von Geweben produzierte Hormone, die lebenswichtige Körperfunktionen wie die Blutgerinnung oder die ausgesprochen komplexen Entzündungsreaktionen steuern. Die Korallen-Prostaglandine von *Plexaura homomalla* und anderen Spezies wurden intensiv erforscht und lieferten wichtige Erkenntnisse zum Verständnis des menschlichen Prostaglandin-Stoffwechsels. Bislang ist aus dieser Forschung aber noch kein Medikament hervorgegangen.



9.4 > In der Koralle *Plexaura homomalla* konnten Forscher in den 1960er Jahren erstmals Prostaglandin-Hormone nachweisen. Die Koralle kommt in der Karibik und im Westatlantik bis in einer Tiefe von 60 Metern vor.

Peptide

Erst knapp 30 Jahre nach der Zulassung von Ara-C wurde im Jahre 2005 der nächste Meereswirkstoff für die Anwendung am Menschen freigegeben. Dabei handelt es sich um das Peptid Ziconotid (Prialt®), das aus der Giftdrüse mariner Kegelschnecken (*Conus*-Arten) isoliert wurde. Peptide sind größere Eiweißbestandteile. Entsprechend besteht das Kegelschnecken Gift aus einem hochkomplexen Gemisch verschiedener Eiweißbestandteile, den sogenannten Conotoxinen. Diese Conotoxine greifen den Stoffwechsel von Tieren oder Menschen an unterschiedlichen Punkten an: In der Natur lähmen die Toxine Beutetiere, indem sie die Ionenkanäle an der Zellmembran blockieren, kleine Öffnungen, die entscheidend zur Weiterleitung von Nervenimpulsen beitragen.

In der Klinik wird nicht das reine Schnecken Gift, sondern eine abgewandelte Form des biologischen Giftcocktails zur Behandlung von stärksten chronischen Schmerzen eingesetzt. Das Medikament Ziconotid wirkt, indem es den Einstrom von Ionen in schmerzleitende Nervenzellen blockiert. Dadurch stört es die Übertragung von Schmerzsignalen aus dem Körper über das Rückenmark ins Gehirn. Das Mittel kommt bei Patienten zum Einsatz,



9.5 > Die Kegelschnecken, wie zum Beispiel die Art *Conus textile*, leben vor allem in den tropischen Meeresgebieten. Mit einer Harpune injizieren sie Gift in ihre Beute. Wissenschaftlern ist es gelungen, daraus ein Schmerzmittel herzustellen.

deren Schmerzen so stark sind, dass sie sich nicht mehr mit Morphinum-verbundenen Medikamenten dämpfen lassen. Auch bei einer Morphinum-Unverträglichkeit wird es verabreicht.

Alkaloide

Der Wirkstoff Ecteinascidin-743 oder auch Trabectedin gehört zur Klasse der Alkaloide, stickstoffhaltiger organischer Verbindungen, und wird unter dem Handelsnamen Yondelis® vermarktet. Es ist das bisher jüngste Präparat marinen Ursprungs, das eigentlich aus dem Manteltier *Ecteinascidia turbinata*, einem einfachen, am Meeresboden lebenden Wasserfiltrierer, gewonnen wurde. Erst 2008 hat man den Wirkstoff als Medikament zugelassen. Ecteinascidin-743 ist ein Alkaloid, das einen komplexen Stoffwechselmechanismus unterbricht, mit dem Krebszellen häufig Resistenzen gegen Arzneimittel entwickeln. Ecteinascidin-743 bindet an das Erbgutmolekül DNA. Dadurch verändert sich die Gestalt der DNA leicht, wodurch der Stoffwechsel der Krebszelle gestört wird. Im Detail geschieht dabei Folgendes: Ecteinascidin-743 verbindet sich mit dem DNA-Reparaturprotein TC-ER, koppelt dann an die DNA an und verhindert damit, dass ein für die



9.6 > Moostierchen sind winzige Tiere, die in ast- und blattähnlichen Kolonien leben. Aus dem Moostierchen *Bugula neritina* stammt der Tumorstoff Bryostatin. Vermutlich wird er von Bakterien auf der Oberfläche der Kolonie synthetisiert.

Krebszelle wichtiges Gen ausgelesen wird, das MDR1-Gen (Multi Drug Resistance, MDR). Dieses Gen enthält den Bauplan für das MDR1-Eiweiß, dessen Funktion darin besteht, Gifte oder körperfremde Stoffe aus Zellen auszuschleusen. Damit wirkt es bei einer Krebstherapie kontraproduktiv, denn es schleust auch die Medikamente aus den Tumorzellen aus. Am Ende kann das zur Resistenzbildung und zum Versagen der Therapie führen. Ecteinascidin-743 aber blockiert die Produktion von MDR1 und verhindert damit das Ausschleusen. Die Wissenschaftler hoffen, dass Ecteinascidin-743 die Wirksamkeit anderer Chemotherapeutika durch die Hemmung der Resistenzbildung verstärken kann. Yondelis® ist bisher zur Therapie von Weichteilsarkomen, seltenen bösartigen Bindegewebstumoren, zugelassen.

Andere Krebsmittel aus dem Meer

Weitere marine Anti-Tumor-Wirkstoffe werden derzeit noch in klinischen Studien intensiv geprüft und weiterentwickelt. Dazu zählen das aus dem Moostierchen *Bugula neritina* gewonnene Bryostatin, das aus dem Dornhai *Squalus acanthias* isolierte Squalamin-Lactat und das Sorbicillacton, das aus Bakterien stammt, die in Gemeinschaft

9.7 > Bis heute konnten Wissenschaftler viele Wirkstoffe aus Lebewesen gewinnen, die im Meer oder im Süßwasser leben. Einige Substanzen werden bereits als Medikament eingesetzt.

Isolierter Wirkstoff	Stoffklasse	Primärwirkung	Einsatzgebiet	Ursprungsorganismus/Herkunft
Ara-A	Nukleosid	Virostatikum (hemmt Vermehrung von Viren)	Herpes-simplex-Virusinfektionen	Schwamm
Ara-C	Nukleosid	Zytostatikum (hemmt Tumorstadium)	Leukämie	Schwamm
Ecteinascidin-743	Alkaloid	Blockade eines Tumoresistenz-Gens	Weichteilsarkome (bösartige Bindegewebstumore)	Manteltier
Hydramacin (noch nicht zugelassen)	Peptid	Antimikrobielle Wirkung	Einsatz gegen Penicillin-resistente Keime	Süßwasserpolypt
Ziconotid	Peptid	Blockade von Ionenkanälen	Schmerzmittel	Meeresschnecke

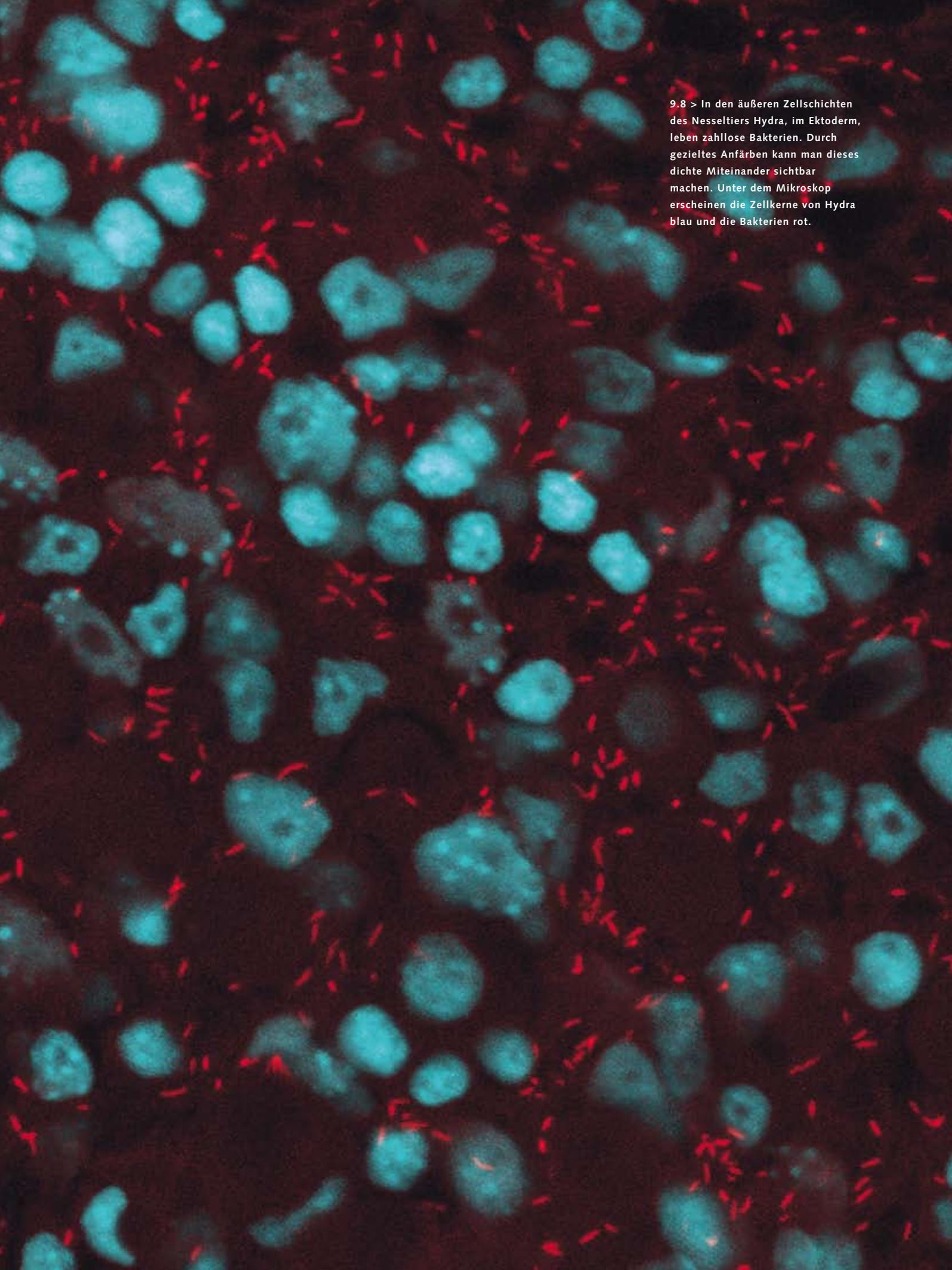
mit Schwämmen leben. Nicht ganz so vielversprechend erscheinen Substanzen wie das aus der Schnecke *Dolabella auricularia* isolierte Dolastatin 10 und Dolastatin 15 und deren Abkömmlinge. Klinische Studien zeigen, dass diese beiden Wirkstoffe allein Krebsarten wie Brust- und Bauchspeicheldrüsenkrebs nicht heilen können. Es ist allerdings denkbar, dass sie in Kombination mit anderen Präparaten Wirkung zeigen.

Wie groß ist das Potenzial der Meereswirkstoffe tatsächlich?

Es gibt heute also bereits eine ganze Reihe von Substanzen aus dem Meer, die als Medikament eingesetzt werden. Andere haben das Potenzial, sich künftig als Wirkstoff zu etablieren. Aus diesen Beispielen lassen sich interessante Thesen und Fragen zur Zukunft der marinen Naturstoffforschung ableiten:

1. Das Meer liefert aussichtsreiche Kandidaten für neue Medikamente. Doch die Suche und die Produktion in größerem Maßstab ist schwierig. Einerseits, weil die Lebewesen in den riesigen Ozeanen schwer zu finden sind und

oftmals nur in geringer Zahl vorkommen. Andererseits, weil man viele dieser Lebewesen nicht über längere Zeit im Labor halten oder züchten kann. In der Pharmaindustrie gibt es seit Langem Verfahren, mit denen man im Labor automatisiert Varianten bekannter Wirkstoffe herstellt und auf ihre Eignung als Medikament testet. Bei diesen Hochdurchsatz-Screenings werden in kürzester Zeit ganze Kataloge verwandter Substanzen getestet. Die Substanzen aus dem Meer aber haben häufig so komplizierte Molekülstrukturen, dass sie sich, nachdem ihre Wirksamkeit erwiesen ist, nicht so einfach nachbauen und variieren lassen. Das erschwert die Suche und die Weiterentwicklung mariner Wirkstoffe erheblich. Diese Suche ist zudem ausgesprochen zeitraubend und bedarf teurer Geräte. Für die Industrie ist der Aufwand in der Regel zu groß. Daher wurden die meisten Substanzen aus dem Meer bisher von Forschern an wissenschaftlichen Einrichtungen entdeckt, isoliert und analysiert. Der Sprung in die Industrie ist dann meist schwierig – auch weil die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule aus patentrechtlichen Gründen erschwert wird: Der Forscher möchte seine Erkenntnisse veröffentlichen. Die Industrie aber



9.8 > In den äußeren Zellschichten des Nesseltiers Hydra, im Ektoderm, leben zahllose Bakterien. Durch gezieltes Anfärben kann man dieses dichte Miteinander sichtbar machen. Unter dem Mikroskop erscheinen die Zellkerne von Hydra blau und die Bakterien rot.

Der Kampf gegen die Antibiotika-Resistenz

In den vergangenen zehn Jahren hat die Zahl Antibiotikaresistenter Bakterien enorm zugenommen. Infiziert sich ein Mensch mit solchen Keimen, kann es gefährlich werden, denn kaum ein Medikament hilft dann noch. Als besonders hartnäckig gelten der methicillinresistente *Staphylococcus aureus* (MRSA), ein sehr verbreiteter Bakterienstamm, der gegen das klassische vor 50 Jahren entwickelte Antibiotikum Methicillin resistent ist. Als problematisch sind außerdem die Stämme von *Enterococcus faecium* und *Enterococcus faecalis* bekannt, die gegen den etablierten Wirkstoff Vancomycin resistent sind. Beide Bakterientypen kommen in der gesunden Darmflora des Menschen vor. Allerdings gibt es auch pathogene – krankmachende – Varianten. Gegen diese Bakterien gibt es praktisch keine wirksamen Antibiotika mehr.

Möglicherweise kann man diesem Problem künftig mit Wirkstoffen aus dem Meer Herr werden: So scheinen Nesseltiere, im Meer oder Süßwasser vorkommende und mit Quallen verwandte Organismen, besonders reich an antimikrobiellen Substanzen zu sein, die sehr gezielt gegen bestimmte Bakterien wirken. Einer dieser Wirkstoffe ist Hydramacin, ein Peptid, das aus dem Polypen Hydra stammt, einem winzigen, mit Fangarmen bewehrten Nesseltier. Hydramacin tötet eine ganze Reihe von Keimen ab, die gegen Penicillin-Varianten resistent sind – darunter bestimmte Stämme von *Escherichia coli*, einem Darmbakterium, sowie *Klebsiella oxytoca* und *Klebsiella pneumoniae*, Bakterien, die den Magendarmtrakt bewohnen und Krankheiten wie Lungenentzündung oder Sepsis (Blutvergiftung) auslösen können. Da Bakterien im Vergleich zu konventionellen Antibiotika gegen Hydramacin kaum resistent werden können, wird es derzeit als vielversprechendes Modellmolekül für die Entwicklung einer neuen Genera-

tion von Antibiotika betrachtet. Die Nesseltiere sind so interessant, dass man ihr Gewebe inzwischen systematisch nach neuen Antibiotika durchsucht hat, die multiresistente Bakterien töten. Dabei wurde ein weiteres antimikrobielles Peptid, Arminin, entdeckt, aus dem bereits ein synthetisches Molekül entwickelt wurde. Dieses wirkt gegen viele der hier aufgezählten Krankheitserreger. Doch Hydra liefert noch mehr: Das Immunsystem von Hydra enthält einen sogenannten Serin-Protease-Inhibitor, der sich als hochwirksam gegen *Staphylococcus aureus* erwiesen hat. Diese Substanz hemmt Serin-Proteasen, Proteine, die lebenswichtige Stoffwechselprozesse wie etwa die Blutgerinnung regulieren. Die Entdeckung dieses antimikrobiellen Serin-Protease-Inhibitors aus dem Polypen Hydra macht klar, dass die Evolution verschiedenste Methoden entwickelt hat, mit denen sich Organismen gegen Bakterien zur Wehr setzen. Die neu entdeckten Serin-Protease-Inhibitoren lassen außerdem vermuten, dass man aus Meerestieren Wirkstoffe gewinnen kann, die sich in ganz neue Klassen von hocheffizienten Anti-*Staphylococcus*-Antibiotika verwandeln lassen.

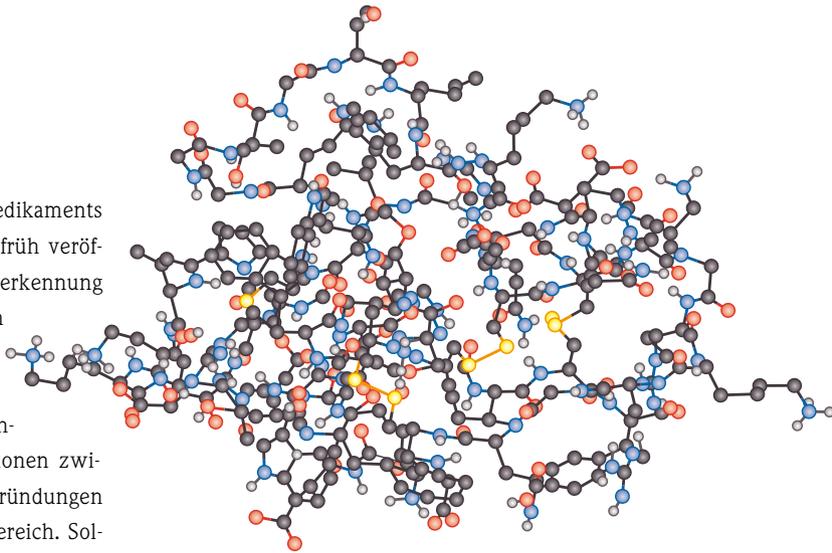


9.9 > Die goldfarbenen schimmernden Bakterien vom Typ *Staphylococcus aureus* haben im Laufe der Zeit eine Resistenz gegen das klassische Antibiotikum Methicillin entwickelt. Infektionen mit diesem Bakterium lassen sich daher in manchen Fällen kaum behandeln.

möchte den Wirkstoff und die Rezeptur des Medikaments aus Angst vor Konkurrenz geheim halten. Zu früh veröffentlichte Fachartikel können außerdem die Anerkennung eines Patents verhindern. Solche Gründe haben die Pharmaindustrie lange davon abgehalten, den Ozean als große und wichtige Ressource für neue Medikamente zu betrachten. Doch inzwischen gibt es vielversprechende Kooperationen zwischen Industrie und Hochschule wie etwa Ausgründungen von Start-up-Firmen aus dem akademischen Bereich. Solche jungen Unternehmen haben in den vergangenen Jahren wichtige neue Impulse gesetzt. Eine entscheidende Frage für diesen Bereich wird sein, wie sich Fördermaßnahmen zur Etablierung solcher Risikovorhaben in den nächsten Jahren gestalten und wie attraktiv solche individuellen Wege aus der akademischen Forschung vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Gesamtsituation sein können.

2. Nicht immer ist klar, aus welchem Organismus die marinen Wirkstoffe eigentlich stammen. In der Vergangenheit hat man viele Substanzen aus Wirbellosen isoliert. In vielen Fällen aber konnte gezeigt werden, dass sie gar nicht von dem Tier selbst, sondern von Bakterien oder Pilzen produziert werden, die in oder auf ihm leben. Mikroorganismen machen mitunter 40 Prozent der Biomasse von Schwämmen aus, die häufig zusätzlich noch von Mikroalgen besiedelt sind. Dass Mikroorganismen die eigentlichen Wirkstoffproduzenten sind, ist von großer Bedeutung, denn es besteht die Hoffnung, diese im Labor leichter nachzüchten zu können als die höheren Meeresbewohner, auf denen sie siedeln. Zunächst hatte man geglaubt, Schwämme und andere Tiere im großen Stil ernten zu können. Doch schnell wurde klar, dass die Arten dadurch leicht ausgerottet werden könnten. Daher setzte man bald vor allem auf die Bakterienzucht im Labor, was bis heute nur selten gelingt. Doch in einigen Fällen hatten die Wissenschaftler bereits Erfolg. So konnten in kurzer Zeit aus Pilzkulturen, die ursprünglich aus Schwämmen isoliert wurden, größere Mengen des oben erwähnten Wirkstoffs Sorbicillacton gewonnen werden. Dennoch bleibt die Schwierigkeit, dass die Anzucht von unbekannten Bakterien ein langwieriges Verfahren sein kann.

3. Die Fahndung nach neuen Wirkstoffen wird heute durch kulturunabhängige, genanalytische Methoden er-



leichtert. Damit entfällt die mühevoll und komplizierte Zucht von Bakterien und anderen Organismen in Labor-kulturen. Viele Jahrzehnte lang versuchte man außerdem, allein mit aufwendigen chemischen und biochemischen Analysen die Substanzen direkt nachzuweisen. Dank der modernen Genanalysetechnik lässt sich das heute schneller und eleganter lösen. Die modernen Verfahren suchen im Erbgut der Meeresorganismen nach auffälligen Genabschnitten, die den Bauplan für vielversprechende Enzyme enthalten. Solche Enzyme sind die Handwerker des Stoffwechsels, die verschiedenste Substanzen aufbauen. Die Entwicklung solcher DNA-Sequenzier-techniken ist in der Wirkstoffforschung die sicherlich größte Veränderung der letzten Jahre. Inzwischen gibt es große Sequenzierprojekte, die innerhalb kurzer Zeit das Erbgut Tausender Meeresorganismen nach interessanten Genabschnitten durchforsten. Ein Beispiel sind die Global-Ocean-Sampling-Expeditionen des US-amerikanischen Craig-Venter-Instituts, das maßgeblich an der Entschlüsselung des menschlichen Genoms zu Beginn dieses Jahrhunderts beteiligt war. Inzwischen fokussiert dieses Institut stärker auf das Meer. Das Ziel ist es, das Erbgut der Meereslebewesen nach ökonomisch interessanten Stoffwechselwegen zu durchsuchen. Ganze Lebensräume können so einer Sequenzanalyse unterzogen werden. Bei derart großen Projekten werden viele Organismen mitsamt ihrem mikrobiologischen Aufwuchs verarbeitet. Die Ergebnisse können also nicht mehr einzelnen Arten zugeordnet werden. Für die Forscher spielt das aber keine Rolle. Ihnen geht es zunächst darum, in kurzer Zeit entscheidende Informationen über die genetische Ausstattung eines kompletten Lebensraums zu erhalten und herauszufinden, ob vor Ort überhaupt interessante Substanzen vorhanden sind.

9.10 > Biomoleküle von Wasserorganismen wie das aus dem Polypen Hydra isolierte Hydramacin sind oft komplex gebaut. Das erschwert die Synthese, den Nachbau, im Labor.

Wie Krankheiten entstehen – Ursachenforschung

> Die Immunsysteme von Mensch und Tier sind erstaunlich ähnlich. Wissenschaftler vergleichen beide miteinander. Sie hoffen Immunerkrankungen des Darms, der Haut oder der Lunge durch die Erforschung ursprünglicher Meeresorganismen besser verstehen zu können. Sicher ist, dass dabei Bakterien eine große Rolle spielen – nicht nur als Krankheitserreger, sondern vor allem als Bestandteil der Körperabwehr.

Wie schützt sich ein Organismus vor Krankheitserregern?

Beim Menschen, bei Wirbeltieren und auch wirbellosen Organismen wie den Schwämmen ist die angeborene Immunität eine erste Verteidigungslinie gegen potenzielle Krankheitserreger. Schon Säuglinge verfügen über diesen Schutz, obwohl ihr Immunsystem noch kaum Krankheitserreger kennengelernt hat. Zu diesem stammesgeschichtlich alten Abwehrmechanismus zählen Fresszellen, die Keime vertilgen (Phagozytose), Stoffwechselprozesse, die fremde Eiweiße angreifen und auflösen, oder die Produktion antimikrobieller Peptide. Diese Peptide, die in Tieren, Pflanzen oder auch Mikroorganismen vorkommen, werden von bestimmten Körpergeweben, zum Beispiel Darm, Haut und Lunge, produziert und bilden einen prophylaktischen Schutz gegen Infektionen. Die Immunabwehr des Menschen ist also zumindest zu einem Teil uralt und mit der niederer Organismen verwandt. Zu diesen Lebewesen gehören Schwämme, aber auch Nesseltiere (Korallen, Quallen, Seeanemonen und Süßwasserpolypen), die seit Hunderten von Millionen Jahren im Meer leben und im ständigen Kontakt mit Bakterien und Viren stehen. Es ist daher durchaus möglich, dass die Forscher von ihnen lernen können, wie ein effizientes Abwehrsystem entsteht oder wie man es im Krankheitsfall repariert.

Nesseltiere (Cnidaria) scheinen besonders geeignet zu sein, um zu klären, wie ein Organismus Bakterien und andere Krankheitserreger in Schach hält, denn sie sind die wohl ursprünglichsten Meeresbewohner. Die Cnidaria sind relativ einfache Organismen, dennoch laufen in und zwischen ihren Körperzellen zahlreiche komplexe Stoffwechselprozesse ab. Auf den ersten Blick scheinen die Nesseltiere leicht verwundbar und wehrlos gegen Krank-

heitserreger zu sein, denn ihnen fehlt es an Immunzellen, die fremde Keime wegfressen, und an einem Lymphsystem, das Abwehrzellen durch den Körper transportiert. Außerdem haben sie keine feste Schutzhülle, sondern nur eine äußere Zellschicht, das Epithel. Trotzdem haben sie Jahrmillionen überlebt. Das macht sie als Untersuchungsobjekt besonders interessant. Wissenschaftler versuchen zu klären, wie das Gewebe der Tiere mit Mikroben interagiert und wie die Stoffwechselprozesse in der Außenhaut Feinde abwehren.

Inzwischen ist es gelungen, genveränderte Nesseltiere zu züchten, in deren Körper man antibakterielle Abwehrmoleküle sichtbar macht. Damit können die Forscher am lebenden Objekt untersuchen, wo die Abwehrstoffe freigesetzt werden und wo sie zum Einsatz kommen. Es erscheint wunderbar, dass solche schwachen Winzlinge trotz eines fehlenden Immunsystems und der Abwesenheit patrouillierender Immunzellen in einer Umgebung überleben, die vor potenziellen Krankheitserregern geradezu strotzt. Wie man weiß, sind die Oberflächen vieler Meereslebewesen wie etwa der Schwämme permanent von Bakterien besiedelt. Mehr noch: Ein Liter Meerwasser kann bis zu zwei Billionen Bakterien und noch mehr Viren enthalten. Unter diesen Mikroben befinden sich viele potenzielle Krankheitserreger. Dennoch überleben die Meerestiere. Ursprüngliche Meeresorganismen sind daher attraktive Modellsysteme, um das Zusammenwirken von Körper und Umwelt zu verstehen und die evolutionären Grundlagen zu erforschen. Dank neuer Analysemöglichkeiten nehmen gerade Cnidaria eine reizvolle Rolle bei dem Versuch ein, Einblick in die Evolution von Immunreaktionen zu bekommen, die beteiligten Gene zu identifizieren und die Mechanismen der Interaktion zwischen Tier und Mikroorganismen aufzuklären.

Marine Modellorganismen

Nesseltiere oder auch Schwämme gehören zu den ältesten Lebensformen. Sie bevölkern die Ozeane seit Hunderten von Millionen Jahren. Trotz ihres einfachen Aufbaus enthält ihr Erbgut erstaunlich viele Gene. Diese steuern Stoffwechselprozesse, die höhere Lebewesen im Laufe der Evolution zum Teil verloren haben. Nesseltiere oder Schwämme sind damit eine Art Urtyp aller Tiere, an dem sich Grundlagen hervorragend erforschen lassen.

Der Körper und seine Bakterien – ein fein abgestimmtes Miteinander

Höhere Lebewesen und Bakterien stehen in ständigem Kontakt miteinander. Zum einen wirken Bakterien als Krankheitserreger, zum anderen fungieren sie als Symbionten, die zum Teil lebenswichtige Funktionen übernehmen. Der Darm beispielsweise wird von einer komplizierten und dynamischen Gemeinschaft von Mikroorganismen besiedelt, die eine ganze Reihe von Stoffwechselfunktionen unterstützt. Er wird von der Geburt an nach und nach von Bakterien besiedelt. Diese Kolonisierung setzt sich bis in die frühen Lebensphasen fort, bis sich schließlich eine Darmflora gebildet hat, die für jedes Individuum spezifisch ist. Wie das Darmepithel, die äußere Zellschicht im Darm, mit den Mikroorganismen interagiert, wie der Körper zwischen nützlichen Bakterien und potenziellen Krankheitserregern unterscheidet und welchen Einfluss die Bakterien auf die Stoffwechselfvorgänge und Leistungsfähigkeit des menschlichen Darmepithels haben, ist weitgehend ungeklärt. Möglicherweise können hier Untersuchungen an Cnidaria weiterhelfen. Auch deren Epithel, die Körperoberfläche, wird von einer komplexen und dynamischen Mikroorganismen-Gemeinschaft kolonisiert. Untersuchungen am Süßwasserpolypen Hydra haben gezeigt, dass sich die Individuen verschiedener Hydra-Spezies beträchtlich in der Zusammensetzung ihrer Mikrofauna unterscheiden.

Andererseits haben Individuen, die für viele Jahre unter kontrollierten Laborbedingungen gehalten werden, und Individuen derselben Spezies, die man frisch aus ihrem natürlichen Lebensraum gefischt hat, sehr ähnliche bakterielle Zusammensetzungen. Das bedeutet, dass die kolonisierenden Bakterien den Hydra-Individuen lange treu sind. Sie sind permanente Bewohner des Epithels. Die Ergebnisse legen nahe, dass starke Selektionszwänge auf das Epithel wirken. Offenbar etablieren sich unter bestimmten Lebensbedingungen bestimmte Bakteriengemeinschaften auf den Epithelien, die für den Lebensraum optimal sind und lange Zeit konstant bleiben. Diese Beobachtungen legen ferner nahe, dass das Epithel aktiv die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft formt.

Entfernt man bei Säugetieren oder Wirbellosen den Bakterienaufwuchs, werden sie in der Regel krank. Der



Stoffwechsel wird gestört und das Immunsystem entwickelt sich nur schlecht. Besonders stark sind die Störungen im Verdauungstrakt. Zudem können sich die Tiere kaum mehr gegen Infektionen durch krank machende Bakterien und Viren wehren. Bekannt ist auch, dass bestimmte genetische Defekte im Immunsystem des Menschen das Zusammenwirken des Epithels mit seinen kolonisierenden Mikroben stören können. Betroffene sind meist anfällig für entzündliche Erkrankungen der Barriereorgane wie der Haut oder der Lunge, die eine Grenzfläche zur Außenwelt sind. Obwohl man keine eindeutigen immunbiologischen Erklärungen für die Wirkung der Mikroben hat, ist klar, dass symbiotische Bakterien aktiv an der Balance zwischen Gesundheit und Krankheit beteiligt sind.

Bakterien sind für viele Organismen also essenziell. Der Tintenfisch *Euprymna scolopes* zum Beispiel entwickelt während seines Wachstums auf der Hautoberfläche Lichtorgane für Biolumineszenz. Wie ein Glühwürmchen ist der Tintenfisch also in der Lage, durch eine biochemische Reaktion Lichtpulse zu erzeugen. Die Lichtorgane können aber nur dann wachsen, wenn das Epithel des Tintenfischs von dem Bakterium *Vibrio fischeri* bewohnt wird, das zur Entwicklung des Lichtorgans einen bestimmten Bestandteil aus seiner Bakterienwand beisteuert. Ganz offensichtlich wird bei Wirbeltieren und Wirbellosen also sowohl die körperliche Entwicklung als auch das Immunsystem erheblich von den kolonisierenden Mikroorganismen beeinflusst. Der Einfluss der Bakterien auf die

9.11 > Seeanemonen gehören zu der artenreichen Gruppe der Nesseltiere, der Cnidaria. Zu ihren Verwandten zählen Korallen und Quallen.

Mehr als die Summe seiner Teile – der Holobiont

Die gesunde Mikrobenfauna des Menschen und der Tiere ist vielfältig. Die genetische Information all dieser Mikroorganismen ist in der Summe deutlich größer als die des Menschen. Daher kann man den menschlichen Körper mit all den auf oder in ihm lebenden Spezies durchaus als artenreiches Ökosystem von Mikroben, Einzellern oder anderen Organismen betrachten, als einen Superorganismus, einen Holobiont. Aktuell vertreten einige Forscher die Hypothese, dass die Mikrobenflora nicht nur für das Leben des Wirts, sondern auch für dessen Evolution von Bedeutung ist. Die Hypothese besagt, dass nicht der Mensch oder das Tier allein als Einheit der Evolution betrachtet werden sollte, sondern der Holobiont mit der Gesamtheit der ihn besiedelnden Mikroben. Noch sind die komplexen Interaktionen innerhalb dieses Superorganismus und ihr Einfluss auf die Gesundheit vollkommen unbekannt. Zunächst muss geklärt werden, wie die im Superorganismus zusammenlebenden Organismen auf molekularer Ebene interagieren. Wie haben sich die entscheidenden Gene der vielen verschiedenen Holobionten-Spezies gemeinsam im Laufe der Evolution entwickelt? Wie beeinflussen die Mikroorganismen letztlich die Biologie ihrer Wirte, und wie beeinflussen die Wirte die kolonisierenden Mikroben?

Wie funktioniert der Holobiont? Das ist eine der gegenwärtig schwierigsten Fragen. Wie sich zeigt, sind Nesseltiere mit ihrem

effizienten epithelialen Abwehrsystem wertvolle Studienobjekte, um diese Frage anzugehen. Der Grund: Diese ursprünglichen Organismen besitzen viele alte Gene, die in höheren, von Genetikern genau untersuchten Versuchstieren wie der Taufliege *Drosophila melanogaster* oder dem Wurm *Caenorhabditis elegans* nicht mehr vorhanden sind. Will man ursprüngliche Stoffwechselprozesse und die Grundlagen von Immunreaktionen verstehen, sind Nesseltiere daher die Studienobjekte der Wahl. Interessant ist außerdem, dass die auf dem Süßwasserpolyphen Hydra siedelnden Mikrobengemeinschaften außerordentlich komplex und zugleich exakt auf Hydra zugeschnitten sind. Sie unterscheiden sich deutlich von den im umgebenden Wasser lebenden Mikroben. Jede Hydra-Art hat ihr eigenes Mikroben-Menü, das sehr stabil ist und sich kaum verändert. Sehr wahrscheinlich übernimmt die Mikrobenfauna eine ganze Reihe von Stoffwechselfunktionen des Wirts. Störungen in der Balance zwischen Hydra und den kolonisierenden Mikroben scheinen das Auftreten von Krankheiten zu ermöglichen. Die Erforschung der Wirt-Mikroben-Interaktionen bei Hydra ist von fundamentalem Interesse, denn sie hilft den Wissenschaftlern, die molekulare Sprache zwischen Wirt und Mikroben im gemeinsamen Vorfahr aller Tiere zu verstehen, und hilft damit, die Ursachen für Krankheiten des Menschen besser klären zu können.

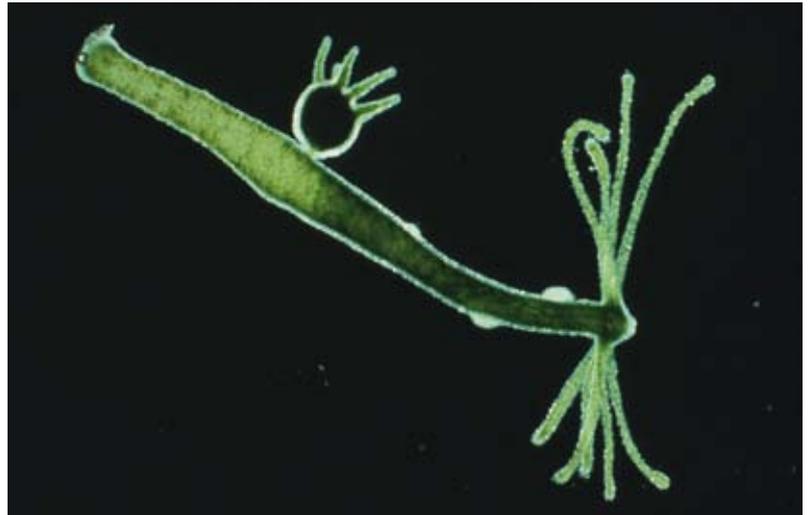


9.12 > Korallen können an der Korallenbleiche erkranken. Dabei sterben symbiotische Einzeller ab, die Photosynthese betreiben und sie mit Nahrung versorgen. Die Koralle bleicht aus. Eine Ursache kann eine krankhafte Veränderung des Bakterienbewuchses sein.

Immunfunktionen und die Mechanismen, die die komplexen Interaktionen zwischen den mikrobiellen Gemeinschaften und den Tieren regulieren, sind bislang aber kaum verstanden. Ungeklärt ist auch, wie der Stoffwechsel im Epithel die Zusammensetzung der symbiontischen Bakteriengemeinschaft beeinflusst. In ersten Experimenten am Polypen Hydra konnte man zeigen, dass Veränderungen an den Zellen die Bakterienflora tatsächlich deutlich verändern. Entfernte man aus dem Gewebe einen bestimmten Zelltyp, änderte sich die bakterielle Zusammensetzung auf der Hydra-Oberfläche deutlich. Die Zahl der normalerweise vorherrschenden Proteobacteria nahm deutlich ab. Die eher selten vorkommenden Bakterien vom Typ Bacteroidetes vermehrten sich hingegen stark. Offensichtlich gibt es tatsächlich eine direkte Interaktion zwischen dem Wirtsepithel und den Mikroben.

Krankheiten des Menschen neu verstehen

Viele moderne Krankheiten des Menschen entstehen durch Störungen der Barriere zwischen Körper und Außenwelt. Hierzu gehören chronisch-entzündliche Erkrankungen der Barriereorgane, also von Organen, die im Kontakt mit der Außenwelt stehen – der Haut, der Lunge oder dem Darm, der mit Speisen von außen gefüttert wird. Beispiele sind das Asthma bronchiale (Lunge), die Schuppenflechte und die Neurodermitis (Haut) sowie die chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen, der Morbus Crohn und Colitis ulcerosa (Darm). Bei Tieren sind diese Krankheiten interessanterweise gänzlich unbekannt. Systematische genetische Untersuchungen haben gezeigt, dass viele solcher Erkrankungen durch sogenannte Risikogene ausgelöst werden, die evolutionär uralt sind. Das ist paradox, da derartige Erkrankungen erst in den vergangenen Jahren vor allem in den westlichen Industrienationen stark angestiegen sind. Allen Krankheiten ist gemein, dass das Immunsystem des Menschen an den Grenzflächen zur Umwelt aus dem Ruder läuft und körpereigene Strukturen angreift. Neuere Technologien haben es ermöglicht, einzelne gestörte Elemente auf der molekularen Landkarte der Erkrankungen aufzuzeichnen. Diese Einzelbausteine müssen jetzt zu einem Gesamtmodell zusammengesetzt werden, um die Mechanismen zu verstehen, die zu einem fehlgesteuerten Immunsystem führen.



Aktuelle Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass an der Fehlsteuerung des Immunsystems viele Gene beteiligt sind, die die entwicklungsgeschichtlich alten Formen der immunologischen Auseinandersetzung mit der Umwelt, wie zum Beispiel mit der umgebenden mikrobiellen Flora, steuern.

Eine Frage ist, wie im Laufe der Evolution genetische Variabilität in jenen Genen entstehen konnte, die die Eigenschaften der Barriere bestimmen. Wie verändern schwankende Nahrungsbedingungen oder eine andere Mikroflora im Wasser die genetische Variabilität der Barriere? Wie beeinflussen solche Veränderungen die evolutionäre Fitness von Organismen, also die Wahrscheinlichkeit, dass sich seine Gene in der Evolution durchsetzen? Versteht man die Vorgänge auf der Oberfläche der Meerestiere, so kann man künftig möglicherweise besser nachvollziehen, wie Erkrankungen der Barriereorgane beim Menschen entstehen. Hat man erst einmal die Evolution und Funktion der Barrieregene enträtselt, lassen sich vielleicht sogar neue Strategien zur Behandlung dieser Krankheiten oder zur Prävention finden. In den vergangenen Jahrzehnten hat man an ausgewählten Modellorganismen wie der Maus oder der Fruchtfliege *Drosophila melanogaster* viel darüber gelernt, wie die Auslöser von Krankheiten erkannt und bekämpft werden. Warum die Außenhaut eines jeden Organismus von Mikroben besiedelt wird und wie diese Mikroben mit dem Wirt interagieren, weiß man bis heute aber nicht.

9.13 > Der Polyp Hydra gehört zu den Nesseltieren und ist ein idealer Modellorganismus. Er ist robust und regeneriert sich schnell. Zudem ist seine Vermehrung unkompliziert. Nachkommen entstehen unter anderem durch Bildung rundlicher Polypen-Knospen am Stamm des alten Tiers.

Rechtliche Fragen der marinen Medizinforschung

> Während das Interesse an den Wirkstoffen im Ozean wächst, versuchen Rechtswissenschaftler zu klären, wem die Substanzen eigentlich gehören. Eine Rolle spielt dabei, wo die Organismen vorkommen, aber auch, inwieweit der Mensch einen Naturstoff oder eine Gensequenz patentieren darf. Problematisch ist unter anderem, dass in verschiedenen Nationen unterschiedliche Patentregelungen gelten.

Was die Wirkstoffe so interessant macht

In den vergangenen Jahren ist das Interesse an den sogenannten genetischen Ressourcen des küstenfernen Tiefseebodens enorm gewachsen. Dabei handelt es sich zum Beispiel um Mikroorganismen, die in gewaltigen Mengen an heißen Quellen, den Schwarzen Rauchern (Kapitel 7), am Grund der Ozeane vorkommen. Sie bauen in völliger Finsternis organische Verbindungen, sogenannte Biomasse, aus Kohlendioxid und Wasser auf. Die für die Umwandlung des Kohlendioxids erforderliche Energie gewinnen die Mikroorganismen aus der Oxidation von Schwefelwasserstoff, der an den Schwarzen Rauchern aus dem Meeresboden austritt. Fachleute nennen diese Art der Biomassegewinnung Chemosynthese. Im Gegensatz dazu bauen Pflanzen Biomasse durch Photosynthese auf, die durch energiereiche Sonnenstrahlung angetrieben wird.

Chemosynthetische Bakterien sind für die Forschung von Bedeutung, da sie über einzigartige genetische Strukturen und besondere biochemische Wirkstoffe verfügen. Bei der Entwicklung wirksamerer Impfstoffe und Antibiotika oder für die Krebsforschung könnten sie eine Schlüsselrolle spielen.

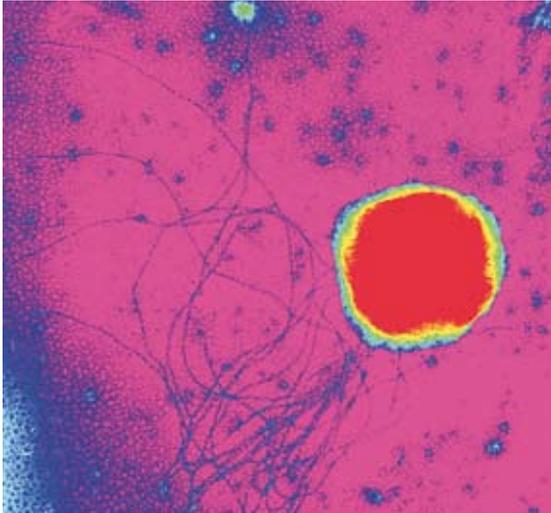
Eine Bewirtschaftung der Organismen erscheint auch aus Sicht der Industrie erstrebenswert. Immerhin sind an den Schwarzen Rauchern Bakterien aktiv, die hohe Wasserdrücke und extreme Temperaturen ertragen. Inzwischen ist es gelungen, aus diesen robusten extremophilen Bakterien hitzestabile Enzyme zu isolieren, die man künftig in der Industrie einsetzen könnte. Viele Fertigungsprozesse in der Nahrungsmittel- oder Kosmetikherstellung etwa laufen bei hohen Temperaturen ab. Hier wären hitzebeständige Enzyme eine echte Erleichterung. Auch die Fähigkeit, hochgiftigen Schwefelwasserstoff in weniger

problematische Schwefelverbindungen umzuwandeln und somit zu entgiften, macht die chemosynthetischen Bakterien interessant.

Wem gehören die Wirkstoffe im Meer?

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wer die genetischen Ressourcen des Tiefseebodens nutzen und erforschen darf. Das Völkerrecht unterscheidet hier zunächst nur nach Staatszugehörigkeit. Beantragt ein Forschungsinstitut, während einer Forschungsreise Proben von Tiefseeorganismen zu sammeln, werden die entsprechenden Aktivitäten – über die Staatsflagge des Forschungsschiffs – einer bestimmten Nation zugerechnet. Alternativ entscheidet die Staatszugehörigkeit des Konsortiums oder Biotechnologieunternehmens.

Von Bedeutung ist auch, wo die Mikrobenproben genommen werden sollen. Finden diese in der Ausschließlichen Wirtschaftszone eines Küstenstaats statt, ist nach dem UN-Seerechtsübereinkommen (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS) (Kapitel 10) die Zustimmung des Küstenstaats zwingend erforderlich. Sofern es sich um reine Grundlagenforschung handelt, sollte der Küstenstaat gemäß UNCLOS dritten Staaten erlauben, in seinen Hoheitsgewässern Proben zu nehmen. Für den Fall, dass die Forschungsergebnisse am Ende auch der kommerziellen Nutzung (Bioprospecting) dienen könnten, hat der Küstenstaat einen Entscheidungsspielraum. Im Zweifelsfall kann er die Aktivitäten in seinen Gewässern verbieten. Dies gilt erst recht für Maßnahmen, die auf eine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung gerichtet sind – etwa für die Exploration von Vorkommen, also die Erforschung des Meeresbodens mit der Absicht, die Vorkommen auszubeuten.



Für Meeresregionen jenseits der Hoheitsgebiete einzelner Staaten ist die Rechtslage bis heute nicht so eindeutig. Seit Langem streitet die Staatengemeinschaft darüber, wer die biologischen Rohstoffe auf der Hohen See ausbeuten darf, und vor allem, welche rechtliche Regelung hier überhaupt greift. Das betrifft unter anderem jene küstenfernen Gebiete, in denen die Schwarzen Raucher vorkommen, die mittelozeanischen Bergrücken etwa. Das Problem dabei ist: In keiner der internationalen Konventionen und Abkommen gibt es bislang klare Vorschriften für den Abbau genetischer Ressourcen am Meeresboden. Ein Teil der Staatengemeinschaft vertritt aus diesem Grund die Auffassung, dass die genetischen Ressourcen gerecht unter den Staaten verteilt werden sollten. Die andere Seite aber ist davon überzeugt, dass sich jeder Einzelstaat nach Gutdünken bedienen kann. Das ist ein fundamentaler Gegensatz.

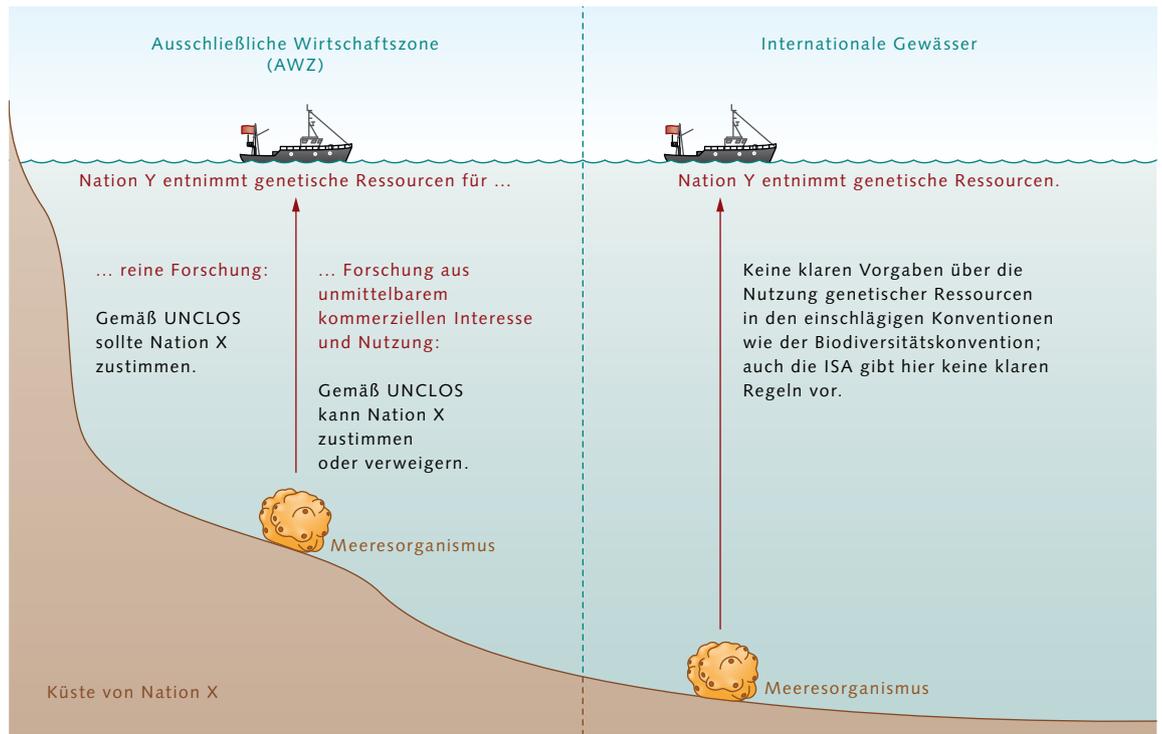
Das bereits erwähnte UN-Seerechtsübereinkommen UNCLOS schreibt für den küstenfernen Tiefseeboden vor, dass „das Gebiet und seine Ressourcen gemeinsames Erbe der Menschheit sind“. Doch diese Regelung gilt nur für mineralische Rohstoffe wie Erze oder Manganknollen. Will ein Staat am Tiefseeboden Manganknollen (Kapitel 10) abbauen, muss er bei der UN-Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) eine Lizenz kaufen und den Entwicklungsländern von diesem Kuchen die Hälfte abgeben. Für genetische Ressourcen am Tiefseeboden gilt diese klare Regelung aber nicht.

Die im Jahr 1992 in Rio de Janeiro angenommene Biodiversitätskonvention (Convention on Biological Diversity, CBD) wiederum fordert zwar eine „ausgewogene und gerechte Aufteilung der sich aus der Nutzung der genetischen Ressourcen ergebenden Vorteile“, also eine gerechte Verteilung der biologischen Schätze der Erde zwischen Industrienationen und Entwicklungsländern. Allerdings bezieht sie sich insoweit nur auf das Hoheitsgebiet einzelner Staaten und nicht auf die küstenfernen Regionen der Ozeane.

Damit ist alles offen. Jede Seite interpretiert die Inhalte von UNCLOS und Biodiversitätskonvention aus ihrer Perspektive. Die Situation wird zusätzlich verkompliziert, weil das UNCLOS noch eine weitere Interpretation zulässt. So betrachtet das UNCLOS die küstenfernen Meeresgebiete als einen Raum, in dem Nutzungs- und Forschungsfreiheit besteht – es propagiert die „Freiheit der Hohen See“. Dazu gehört auch, dass jeder Staat die Freiheit hat, in den internationalen Gewässern Fischfang zu betreiben. Jeder Staat, so besagt das UNCLOS, ist zur „Erhaltung und Bewirtschaftung der lebenden Ressourcen der Hohen See“ berechtigt. Da sich das UNCLOS auch auf den Tiefseeboden bezieht, liegt es nahe, die biologisch-genetischen Ressourcen am Meeresgrund genauso wie die Fische als frei verfügbar zu betrachten. Demzufolge sollte es jedem Staat erlaubt sein, auch die genetischen Ressourcen des Tiefseebodens zu erforschen und zu nutzen. Diese Auffassung vertreten die meisten Mitglieder einer speziellen UN-Ar-

9.14 > Manche Mikroben wie die einzelligen Archaeen (links) leben in der Nähe heißer Quellen. Mitunter enthalten sie spezielle Substanzen, die sich für die industrielle Produktion eignen. Bestimmte Meeresbakterien lassen sich sogar für die Herstellung von Polymeren nutzen, speziellen Kunststoffen, die man künftig möglicherweise sogar in der Krebstherapie einsetzen könnte.

9.15 > Wie die genetischen Ressourcen am Meeresgrund ausgebeutet werden können, ist bisher nur unzureichend geregelt. In seinem Hoheitsgebiet kann ein Staat die Zustimmung verweigern. Für internationale Gewässer gibt es bislang keine klaren Vorgaben, was zu Streitigkeiten zwischen den Staaten führt.



beitsgruppe. Dieses Gremium wurde 2005 von der UN-Generalversammlung eingerichtet. Es befasst sich mit dem Schutz und der nachhaltigen Nutzung der marinen biologischen Vielfalt außerhalb der küstenstaatlichen Hoheitsgebiete.

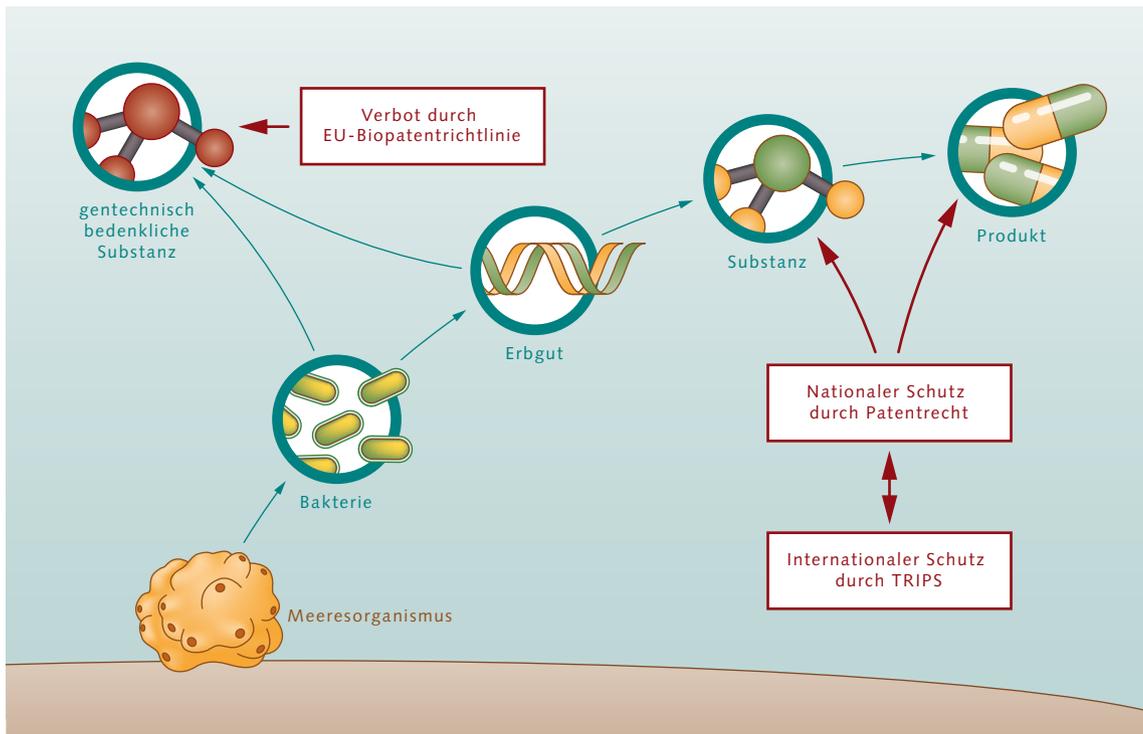
Andere Mitglieder der UN-Arbeitsgruppe lehnen diese Interpretation aber ab. Sie fordern, wie oben erwähnt, die biologischen Schätze – wie mineralische Rohstoffe – paritätisch zwischen den einzelnen Staaten aufzuteilen. So entspinnen sich bislang auf den internationalen Treffen der UN-Arbeitsgruppe kontroverse Debatten, und eine Einigung ist derzeit nicht in Sicht. Dazu wäre vermutlich eine Änderung zumindest eines der beiden Übereinkommen erforderlich, was derzeit allerdings kaum erreichbar erscheint.

Doch es gibt noch einen anderen Weg, denn einige Experten argumentieren, dass für die genetischen Ressourcen weder UNCLOS noch Biodiversitätskonvention gelten. Schließlich geht es hier nicht um die Ernte von Ressourcen wie etwa Fischen oder Erzen am Meeresgrund. Es geht darum, in einigen wenigen Organismen nach Wirkstoffen zu fahnden, daraus neue Medikamente zu entwi-

ckeln und diese später in industriellen Anlagen zu produzieren. Hier dreht es sich also nicht um die Meeresorganismen selbst, sondern lediglich um die in ihnen enthaltene Information. Damit handelt es sich also eher um geistiges Eigentum als um klassisches Ausbeuten natürlicher Ressourcen, und da greift am ehesten das Patentrecht. Damit spricht derzeit manches dafür, nicht das internationale See- und Umweltrecht zu reformieren, sondern auf Lockerungen der Regelungen des internationalen Patentschutzes hinzuwirken.

Die Grenzen des Patentrechts

Berührt die Suche nach Wirkstoffen im Meer rechtliche Aspekte, so muss die Frage geklärt werden, in welcher Form die wissenschaftlichen Erkenntnisse wirtschaftlich genutzt und verwertet werden dürfen. Prinzipiell richtet sich der Schutz von Nutzungs- und Verwertungsrechten bei Patenten nach den gesetzlichen Vorgaben des nationalen Rechts. In Deutschland sind diese im Patentgesetz (PatG) verankert. Das Patentgesetz schützt allgemein Erfindungen, wozu auch Erkenntnisse aus der Genforschung



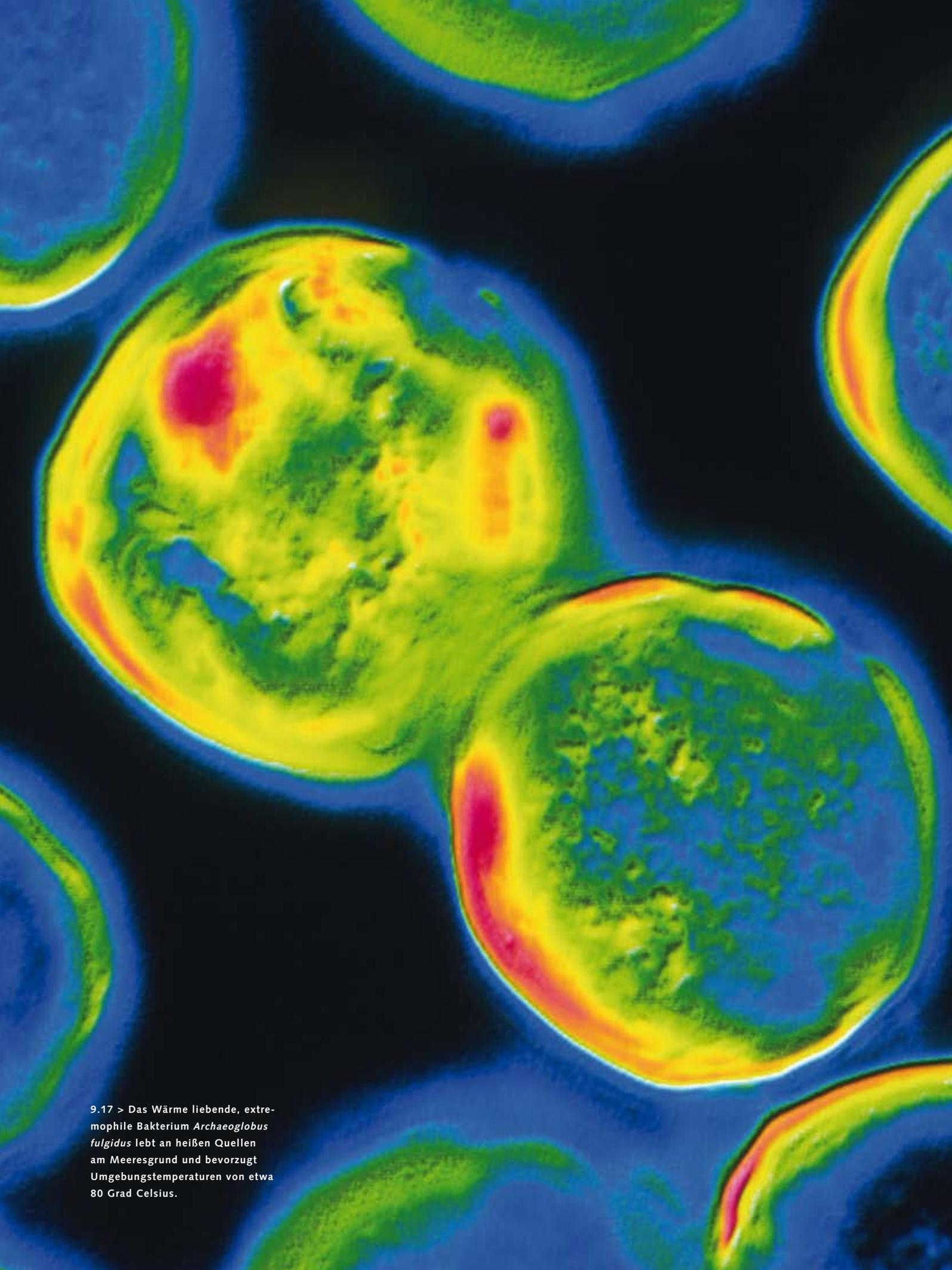
9.16 > Das nationale und internationale Patentrecht regelt grundsätzlich die Verwertung von Naturstoffen oder genetischen Informationen aus Lebewesen. Patentierbar sind Wirkstoffe, die aus Organismen gewonnen werden. Das Gleiche gilt für einzelne isolierte Gensequenzen und genetisch veränderte Organismen. Neu entdeckte Tierarten und deren gesamtes Erbgut hingegen lassen sich nicht patentieren.

gehören. Der Schutz dieses Gesetzes endet an der Staatsgrenze. Einen internationalen Schutz des geistigen Eigentums gewährleistet das „Übereinkommen über handelsbezogene Aspekte der Rechte des geistigen Eigentums“ (Agreement on Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights, TRIPS), das in den Einflussbereich der Welt handelsorganisation (WTO) fällt. Nach diesem völkerrechtlichen Vertrag erkennen die Vertragsstaaten den Schutz des geistigen Eigentums gegenseitig an, sofern es durch nationale Patente geschützt ist. Auf diese Weise ist das geistige Eigentum in allen TRIPS-Vertragsstaaten geschützt.

Zu den patentierbaren Gegenständen zählen grundsätzlich auch im Labor veränderte Mikroorganismen, Tiere und Pflanzen wie zum Beispiel gentechnisch modifizierte Maissorten. Außerdem gehören dazu durch technische Verfahren gewonnene isolierte Bestandteile des menschlichen Körpers, insbesondere lebende Zellen, einschließlich der Sequenz oder Teilsequenz eines Gens. Die bloße Entdeckung einer Spezies gehört aber nicht dazu, denn eine Art lässt sich grundsätzlich nicht patentieren. Ein in der Natur oder im genetischen Code verborgener Stoff hin-

gegen kann im patentrechtlichen Sinn durchaus als neu gelten, wenn er durch technische Isolierung und durch Beschreibung erstmals öffentlich zugänglich gemacht wird.

Jeder Staat hat das Recht, Tiere und Pflanzen sowie biologische Verfahren für die Züchtung von Pflanzen oder Tieren von der Patentierbarkeit auszuschließen – etwa die Züchtung neuer Tierrassen, wie dies in Deutschland mit dem Patentgesetz und in der Europäischen Union (EU) mit der Biopatentrichtlinie geschehen ist. Gleiches gilt für andere Erfindungen oder auch einzelne DNA-Sequenzen, deren wirtschaftliche Verwertung man aus Sicherheitsgründen verhindern will, beispielsweise um das Klonen menschlicher Embryonen zu verhindern. Gemäß TRIPS-Übereinkommen darf man eine kommerzielle Nutzung verhindern, wenn dies nach Ansicht des betreffenden Staats „zum Schutz der öffentlichen Ordnung oder der guten Sitten einschließlich des Schutzes des Lebens oder der Gesundheit von Menschen, Tieren oder Pflanzen oder zur Vermeidung einer ernsten Schädigung der Umwelt notwendig ist.“ Nach der von der EU im Jahr 1998 verabschiedeten Biopatentrichtlinie sind Erfindungen nicht



9.17 > Das Wärme liebende, extremophile Bakterium *Archaeoglobus fulgidus* lebt an heißen Quellen am Meeresgrund und bevorzugt Umgebungstemperaturen von etwa 80 Grad Celsius.

patentierbar, wenn deren gewerbliche Verwertung gegen die öffentliche Ordnung oder die guten Sitten verstößt. Dazu gehören unter anderem Verfahren zum Klonen von menschlichen Lebewesen und die Verwendung von menschlichen Embryonen zu industriellen oder kommerziellen Zwecken.

In der Frage, wie weit der Patentschutz von DNA-Sequenzen reichen soll, sind sich die verschiedenen Institutionen uneins. In der EU ist der Schutz auf die Funktionen der Sequenz oder Teilsequenz eines Gens begrenzt, die im Patentantrag beschrieben werden. In den USA gilt hingegen das Prinzip des absoluten Stoffschutzes ohne Begrenzung auf die vom Erfinder beschriebenen Funktionen. Das heißt, dass in den USA nicht allein die Erfin-

dung, die der Forscher explizit in seinem Antrag beschrieben hat, durch Patentrecht geschützt ist, sondern auch Entwicklungen und Produkte, die sich künftig daraus ergeben. Das US-Patentrecht reicht also deutlich weiter als das europäische. Sowohl der europäische als auch der US-amerikanische Ansatz sind mit den internationalen Vorgaben vereinbar. Die unterschiedlichen Vorstellungen führen aber immer wieder zu Kontroversen. Je nach Region wird daher das Patentrecht auch im Kontext der Medizin aus dem Meer unterschiedlich stark ausgeprägt bleiben. Bis auf Weiteres wird sich daran auch nichts ändern. Letztlich steckt hinter diesem Streit ein historisch gewachsenes und kulturell unterschiedliches Verständnis von individueller Freiheit und staatlicher Schutzpflicht.

CONCLUSIO

Der Beginn einer neuen Ära?

Die Gewinnung von medizinisch oder industriell nutzbaren Wirkstoffen im Meer wird für Wissenschaftler und Unternehmen zunehmend interessant. In den vergangenen Jahren hat man bereits eine ganze Reihe von Substanzen aus Meeresorganismen extrahiert, die in der Krebstherapie oder bei der Behandlung viraler Infektionen eingesetzt werden. Moderne genanalytische Methoden erleichtern die Suche nach Wirkstoffen heute enorm – umgehen sie doch die mühsame klassische Zucht in Laborkulturen. Lange Zeit zögerten Firmen, in die aufwendige Wirkstofffahndung in den Ozeanen einzusteigen. Die Suche blieb den akademischen Einrichtungen vorbehalten. Mit der Gründung junger Start-up-Firmen aber nimmt die Kommerzialisierung der Meeresmedizin an Fahrt auf. Noch allerdings klafft zwischen der Grundlagenforschung und der endgültigen Entwicklung eines Wirkstoffs bis zur Marktreife oft eine Innovationslücke, weil Risikokapitalgeber fehlen. Staatliche Fördergelder könnten hier entscheidende Hilfe leisten, den Sprung in den Markt erleichtern und die lange Phase der klinischen Prüfung überbrücken helfen.

Doch nicht allein die Aussicht auf neue Wirkstoffe macht die Erforschung der Meeresorganismen interessant. Wie sich zeigt, ähneln sich die Stoffwechselwege primitiver mariner Lebewesen und des Menschen oftmals in erstaunlicher Weise. Einfache Lebensformen wie Schwämme oder Nesseltiere sind damit eine ideale Vorlage, um die biochemischen Vorgänge des Menschen und seine Krankheiten zu verstehen. Ein Forschungsschwerpunkt sind die Erkrankungen der Barriereorgane des Menschen, der Haut, der Lunge oder des Darms. Experten gehen davon aus, dass hier das Wechselspiel zwischen dem menschlichen Immunsystem und den auf der Körperoberfläche siedelnden symbiontischen Bakterien aus den Fugen geraten ist. Auch hier können Nesseltiere als relativ einfaches Wirt-Bakterien-System neue Erkenntnisse liefern. Dass Bakterien der Barriereorgane wesentlich an der Balance zwischen Gesundheit und Krankheit beteiligt sind, gilt als sicher. Was im Detail zwischen Mensch und Mikrobe abläuft, ist heute aber noch fast völlig unverstanden. Hier bedarf es noch vieler Jahre Grundlagenforschung. Unklar ist auch, wie man die biologischen Ressourcen im Meer angesichts des aufflammenden Interesses zwischen den Staaten aufteilen sollte.

10

Das Internationale Seerecht – ein potentes Regelwerk



> Völkerrechtliche Verträge regeln heute zuverlässig, welchem Staat die Küstengewässer und der Meeresboden gehören oder wo eine Nation fischen darf. Doch der bevorstehende Abbau von Bodenschätzen am Grund der Ozeane und der Klimawandel stellen das internationale Seerecht vor neue Herausforderungen. Schwierig ist es auch, den Meeresumweltschutz mit der intensiven Nutzung der Ozeane in Einklang zu bringen.



Die Rechtsordnung der Ozeane

> Jahrhundertlang nutzten die Menschen das Meer, und immer wieder entwickelten sich daraus Konflikte. 1982 schuf die Staatengemeinschaft mit dem Internationalen Seerechtsübereinkommen (SRÜ) eine umfassende rechtliche Grundlage. Inzwischen hat sich das SRÜ als potentes Regelwerk erwiesen. Doch nicht auf jedes aktuelle Problem kann es eine Antwort liefern.

Gleiche Regeln für alle Staaten

Das Internationale Seerecht oder Seevölkerrecht (International Law of the Sea) fasst alle auf das Meer bezogenen Rechtsnormen zusammen, die zwischen verschiedenen Staaten gelten. Es beinhaltet nicht nur Regelungen zur Abgrenzung oder Nutzung der Meeresgebiete, sondern auch Vorgaben zum Schutz und zur Erforschung der Ozeane. Andere Bereiche hingegen bleiben ausgeklammert, so etwa das nationale Seerecht, das sich beispielsweise mit der Ordnung der Häfen beschäftigt, oder das Seehandelsrecht (Maritime Law), das in Deutschland vorwiegend im Handelsgesetzbuch verankert ist und etwa die Güterbeförderung regelt.

Das Ende der Rechtsfreiheit

Jahrtausendlang war das Meer fast ausschließlich Nahrungsquelle des Menschen und nur in dieser Hinsicht für ihn interessant. In der Ära der großen Seefahrernationen wie Holland, Portugal oder Spanien aber weiteten die Königreiche ab dem 15. Jahrhundert ihren Herrschaftsraum zunehmend aus. Bodenschätze und andere neue Handelsgüter weckten Begehrlichkeiten. Fortan galt es, das Meer, ferne Inseln und Küsten zu erobern, um die Vormachtstellung in der Welt zu behaupten. Kriege und Seeschlachten waren die Folge.

Schon früh versuchten Gelehrte die Frage zu beantworten, wem das Meer eigentlich gehören soll. Diese Frage kann das Internationale Seerecht bis heute nicht allgemein beantworten. Sie ist seit jeher durch das Spannungsverhältnis zwischen dem auf den niederländischen Philosophen und Rechtsgelehrten Hugo Grotius (1583 bis 1645) zurückgehenden Gedanken von der Freiheit des

Meeres („mare liberum“) und dem Konzept des englischen Universal- und Rechtsgelehrten John Selden (1584 bis 1654) vom „mare clausum“ gekennzeichnet. Im Mittelpunkt stand und steht die Frage, ob das Meer der Staatengemeinschaft insgesamt zur Verfügung stehen soll oder aber von einzelnen Staaten beansprucht werden darf. Keine der beiden Positionen konnte sich letztlich völlig durchsetzen. Gleichwohl spiegelt sich dieser Konflikt in der heutigen Struktur des Internationalen Seerechts wider.

Das gegenwärtige Seevölkerrecht ist primär im Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (SRÜ) geregelt, das 1982 als Ergebnis der Dritten UN-Seerechtskonferenz (Third United Nations Conference on the Law of the Sea, UNCLOS III) angenommen wurde. Darüber hinaus gibt es völkergewohnheitsrechtliche Normen, die das SRÜ ergänzen. Das Seerechtsübereinkommen ist der umfangreichste völkerrechtliche Vertrag, der jemals in der Geschichte der Menschheit geschlossen wurde. Es fußt auf den vier Genfer Seerechtskonventionen von 1958 zum Küstenmeer und zur Anschlusszone, zur Hohen See, zur Fischerei und zum Festlandssockel. Mit diesen Verträgen wurde das bis dahin geltende – ungeschriebene – Gewohnheitsrecht kodifiziert. So waren die Staaten seit Mitte des 17. Jahrhunderts überwiegend davon ausgegangen, dass ein drei Seemeilen breiter Meeresstreifen vor der Küste als sogenanntes Küstenmeer zum Gebiet eines jeden Küstenstaats gehört, was in etwa der Distanz einer abgefeuerten Kanonenkugel entsprach.

Ab der Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die Meere zunehmend als Quelle natürlicher Ressourcen wie Erdgas und Erdöl interessant. Viele Küstenstaaten versuchten deshalb, immer größere Teile des Meeres und des Mee-



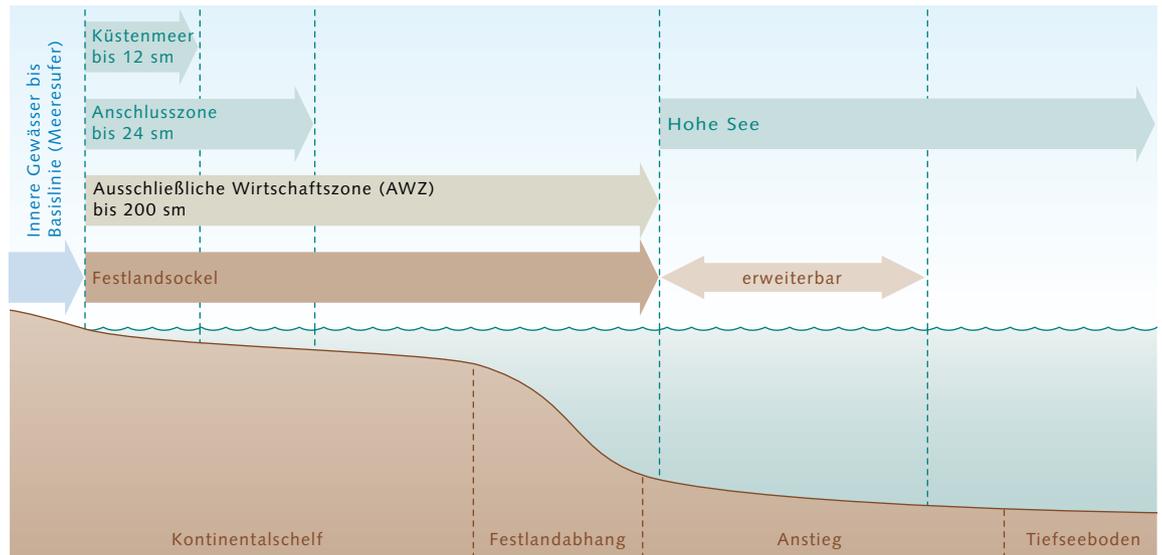
10.1 > Der niederländische Rechtsgelehrte Hugo Grotius (1583 bis 1645) entwickelte die Idee von der Freiheit des Meeres, nach der die Ozeane der ganzen Staatengemeinschaft offenstehen sollen. Seine Auffassung schrieb er 1609 in dem Werk „Mare Liberum“ (oder auch „De mare libero“) nieder.

resbodens unter ihre nationalstaatliche Kontrolle zu bringen. Einige Nationen reklamierten eine 200-Seemeilenzone für sich. Die Idee des „mare liberum“ schien damit völlig verloren zu gehen. Nachdem ein erster Versuch, die zulässige maximale Breite des Küstenmeers in einem völkerrechtlichen Vertrag zu regeln, im Jahr 1930 noch gescheitert war, gelang es 1958 schließlich, unter der Schirmherrschaft der Vereinten Nationen die genannten vier Genfer Seerechtskonventionen zu verabschieden. Mit diesen internationalen Abkommen sollte verhindert werden, dass das Meer endgültig zwischen den verschiedenen Staaten aufgeteilt würde.

Dieses Ziel wurde indes nicht gänzlich erreicht. So weckte beispielsweise die Entdeckung gewaltiger Manganknollenvorkommen auf dem küstenfernen Tiefseeboden im östlichen und zentralen Pazifik in den 1960er Jahren neue Begehrlichkeiten der Industriestaaten (Kapitel 7). Derzeit wird diskutiert, welchen Nationen die zahlreichen arktischen Bodenschätze zufallen, die aufgrund des schrumpfenden Meereises künftig leichter zugänglich sein werden.

Mehr Spielraum für die Küstenstaaten

Das SRÜ fasst die vier Genfer Übereinkommen – das „alte“ Seerecht – heute nicht nur in einem einheitlichen Vertragstext zusammen. Es geht inhaltlich sogar über diese hinaus. So wurden die Rechte der Küstenstaaten im „neuen“ Seerecht sowohl qualitativ als auch quantitativ zum Teil erheblich erweitert. Beispielsweise verfügt jeder Küstenstaat über das ausschließliche Recht, die Fischbestände in der sogenannten Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) zu bewirtschaften, die sich bis zu einer Breite von 200 Seemeilen vor seiner Küste erstreckt. Nach dem damaligen Genfer Recht gab es die AWZ noch nicht. Darüber hinaus ist das SRÜ die Rechtsgrundlage für den Internationalen Seegerichtshof (International Tribunal for the Law of the Sea, ITLOS), der im Jahre 1996 seine Arbeit in Hamburg aufnahm. Der Gerichtshof ist allerdings nicht die einzige gerichtliche Institution, die über die Einhaltung des SRÜ wacht. Vielmehr können die Unterzeichner des SRÜ frei wählen, ob sie Streitigkeiten über die Auslegung und Anwendung



10.2 > Das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen teilt das Meer in verschiedene Rechtszonen auf. Die Souveränität eines Staates nimmt dabei mit zunehmender Entfernung von der Küste ab. An die Inneren Gewässer schließt sich die 12-Seemeilen-Zone an. Hier ist die Souveränität des Küstenstaats bereits eingeschränkt, weil es Schiffen aller Länder erlaubt ist, diese Gewässer zu durchfahren. In der 24 Seemeilen weit reichenden Anschlusszone besitzt ein Staat lediglich

Kontrollrechte. Er darf hier etwa die Einhaltung von Zollvorschriften überprüfen. In der 200 Seemeilen breiten Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) hat ein Küstenstaat das alleinige Recht, lebende und nicht lebende Ressourcen zu explorieren und zu ernten. Im Bereich des Festlandsockels wiederum, der über die AWZ hinausreichen kann, darf er lebende und nicht lebende Ressourcen am und im Meeresgrund explorieren und ernten.

des Übereinkommens dem ITLOS oder doch lieber dem Internationalen Gerichtshof (IGH) im niederländischen Den Haag oder einem anderen internationalen Schiedsgericht unterbreiten wollen.

Bis das SRÜ akzeptiert wurde, vergingen allerdings einige Jahre, denn wegen einiger höchst umstrittener Regelungen zum Tiefseebergbau lehnten die meisten Industriestaaten das SRÜ zunächst ab. So sollten sie verpflichtet werden, Tiefseebergbau-Know-how an die Entwicklungsländer weiterzureichen. Nachdem man die Forderungen abgeschwächt und die Position der Industriestaaten gestärkt hatte, trat das SRÜ 1994 in Kraft, zwölf Monate, nachdem mit Guyana der 60. Staat das Regelwerk unterzeichnet hatte, und zwölf Jahre, nachdem das Abkommen geschlossen worden war. Bis zum Juli 2009 sind dem SRÜ 157 Vertragsstaaten beigetreten. Für die übrigen Staaten sind weiterhin die Genfer Konventionen von 1958 und die Normen des Völkergewohnheitsrechts maßgeblich.

Klare Regeln, klare Grenzen

Das Internationale Seerecht gibt vor allem bezüglich wirtschaftlicher Interessen einen zwingend einzuhaltenden Verhaltensrahmen vor. Es regelt die Fischerei und die Schifffahrt, die Gewinnung von Öl und Gas im Meer sowie die Ausbeutung anderer Rohstoffe des Tiefseebodens und den Meeresumweltschutz.

Das Seerecht teilt die Meere in verschiedene Rechtszonen auf. Es definiert den Rechtsstatus und die Breite dieser Zonen und normiert die in ihnen jeweils geltenden Rechte und Hoheitsbefugnisse der Küsten- und Flaggenstaaten. Dabei nimmt die Hoheitsmacht eines Staates mit wachsender Entfernung von der Küste ab. Sie reicht von voller territorialer Souveränität (Innere Gewässer) über eingeschränkte „aquitoriale“ Souveränität (Küstenmeer) bis zur funktional begrenzten Hoheitsmacht (Ausschließliche Wirtschaftszone, AWZ und Festlandsockel). Bemessungsgrundlage der jeweiligen Meereszonen ist

Hoheitsmacht

Funktional begrenzte Hoheitsmacht bedeutet, dass ein Staat im Bereich der AWZ und des Festlandsockels für einige Nutzungsarten ausschließliche Nutzungshoheit genießt – etwa für die Fischerei.

die sogenannte Basislinie. Diese Linie verläuft normalerweise entlang der Niedrigwasserlinie an der Küste und entspricht damit dem durchschnittlichen Ebbestand des Wassers, wie er in amtlichen Seekarten verzeichnet ist.

Innere Gewässer sind die landwärts der Basislinie gelegenen Gewässer. Sie gehören zum Staatsgebiet des Küstenstaats und unterliegen seiner vollen territorialen Souveränität. In manchen Fällen aber gilt nicht die Niedrigwasserlinie als Begrenzung der Inneren Gewässer; dann nämlich, wenn man gerade Basislinien oder Buchtenabschlusslinien zieht. Das Seerecht gestattet das immer dann, wenn die Küste tiefe Einbuchtungen und Einschnitte aufweist (etwa in Norwegen, Chile und Alaska), wenn sich eine Inselkette entlang der Küste in ihrer unmittelbaren Nähe erstreckt (etwa im Fall der Nordfrie-

sischen Inseln) oder wenn die Küste über eine Bucht verfügt, beispielsweise die Kieler Förde. Daher gehört etwa das Wattenmeer, sofern landwärts von den Außenpunkten der Nordfriesischen Inseln gelegen, ebenso zu den deutschen Inneren Gewässern wie die Häfen von Kiel, Hamburg und Bremen.

Seewärts der Basislinie schließt sich das Küstenmeer an, das sich bis zu 12 Seemeilen von der Basislinie erstreckt. Hier wird die Souveränität des Küstenstaats bereits völkerrechtlich eingeschränkt: Denn es ist Schiffen aller Staaten gestattet, das Küstenmeer friedlich zu durchfahren. Der Küstenstaat darf die Fahrt fremder Schiffe durch das Küstenmeer nicht von einer Genehmigung oder Ähnlichem abhängig machen. Unter bestimmten Umständen jedoch kann ein Küstenstaat den Schiffsverkehr durch die Einrichtung von Schifffahrtswegen



10.3 > Die Nachbarländer Dänemark, Deutschland, Polen und Schweden liegen so dicht beieinander, dass die Ausschließlichen Wirtschaftszone zu einem schmalen Band schrumpfen. In manchen Gebieten, wie etwa östlich von Flensburg, verlaufen die Grenzen sogar innerhalb der 12-Seemeilen-Zone.

Ein komplexes Rechtsthema – der Schutz der Meeressäuger

Der Schutz der Meereslebewesen wird nicht allein durch das Internationale Seerechtsübereinkommen (SRÜ), sondern auch durch das Umweltvölkerrecht sowie nationale und europäische Gesetze geregelt. Das SRÜ enthält im Abschnitt über die AWZ zahlreiche Regelungen über die Bewirtschaftung der Fischbestände, die in mehreren völkerrechtlichen Verträgen jüngerer Datums weiter konkretisiert wurden (Kapitel 6). Ähnliches gilt für den Schutz der Meeressäuger, der bereits 1946 im Internationalen Übereinkommen zur Regelung des Walfangs angesprochen wurde. Das Übereinkommen ist noch heute in Kraft. Ursprünglich stand die Nutzung der Großwalbestände im Vordergrund. Nach dem nahezu vollständigen Zusammenbruch der kommerziell bedeutsamen Walpopulationen in den 1970er und 1980er Jahren haben die Vertragsparteien den Schwerpunkt des Übereinkommens aber durch ein umfassendes Fangmoratorium in Richtung Artenschutz verschoben. Zugleich wurde die **Internationale Walfangkommission** eingerichtet. Seit einigen Jahren kommt es auf den jährlichen Treffen immer wieder zu heftigen Debatten zwischen den Staaten, die für eine Wiederaufnahme des kommerziellen Walfangs plädieren (insbesondere Japan), und den meisten anderen Staaten, die strikt gegen den Walfang sind. Momentan umgeht Japan das Moratorium, indem es sich auf eine Klausel des Übereinkommens bezieht, wonach der Walfang zu wissenschaftlichen Zwecken zulässig ist. Da die erlegten Wale aber kommerziell genutzt werden, sieht die Mehrheit der Völkerrechtler im Verhalten Japans einen Rechtsmissbrauch.

Wie das Patt zwischen den Walfangbefürwortern und -gegnern auf internationaler Ebene gelöst werden kann, ist unklar. Ökonomisch ist die Jagd auf Wale auch in Japan ein Minusgeschäft. Sicher ist, dass die Walfangbefürworter mit der Arbeit der Internationalen Walfangkommission ausgesprochen unzufrieden sind. Das könnte dazu führen, dass sie das Moratorium künftig weiter ignorieren. Ein denkbarer Ausweg aus der Krise wäre eine vorsichtige Lockerung des Moratoriums. So könnte man eine niedrige Fangquote für Zwergwale beschließen, was angesichts der positiven Bestandsentwicklung dieser Spezies ökologisch vertretbar wäre. Voraussetzung dafür wäre eine strenge Kontrolle des Walfangs, unter anderem durch ausländische Kontrolleure an Bord der Fangschiffe. Eine eng begrenzte Wiederaufnahme des kommerziellen Walfangs könnte Japan den Weg aus der Illegalität weisen. Darüber, ob dieser ethisch vertretbar ist, gibt es bislang aber keinen weltweiten Konsens.

In Nord- und Ostsee ist der Schweinswal die einzige heimische Walart. In der deutschen AWZ werden Schweinswale vor allem am



10.4 > Während sich die meisten Nationen auf einen Schutz der Wale verständigt haben, setzt Japan die Jagd fort, wie beispielsweise hier im Südpazifik. Die Japaner beziehen sich dabei auf eine Klausel des Fangmoratoriums, nach der der Walfang zu wissenschaftlichen Zwecken zulässig ist. Letztlich steckt aber bei ihnen ein kommerzielles Interesse dahinter.

10.5 > Vor der deutschen Küste kommen Schweinswale vor allem am nördlichen Rand der AWZ an der Grenze zu Dänemark vor. Das Beispiel zeigt, dass sich die Tiere nur durch grenzübergreifenden Artenschutz erhalten lassen, wie ihn die europäische Initiative „Natura 2000“ vorsieht.

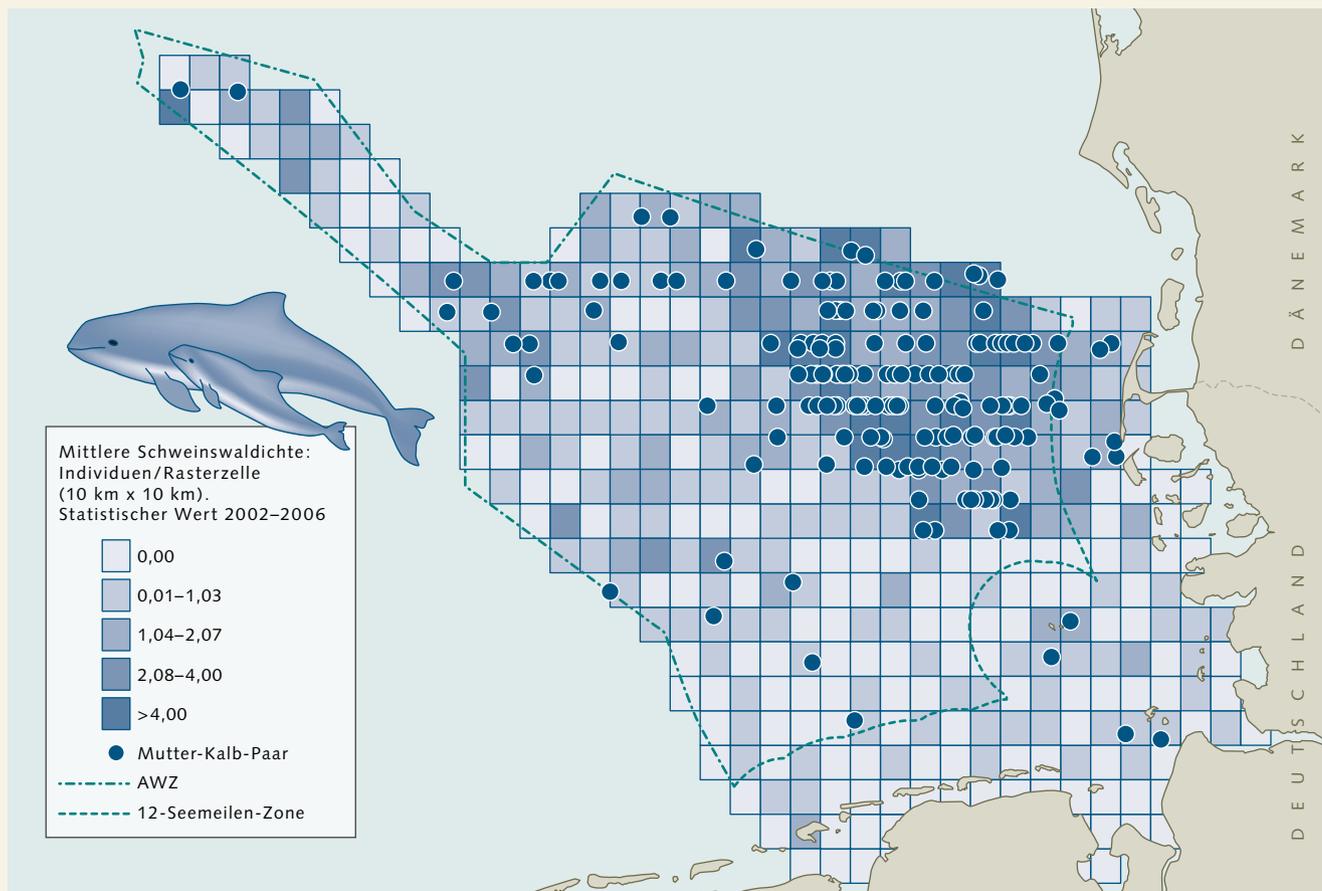
Sylter Außenriff nachgewiesen. Der Anteil an Mutter-Kalb-Paaren ist dort besonders hoch. Das deutet darauf hin, dass dieses Gebiet wichtig für die Vermehrung der Schweinswale ist.

Die intensive Nutzung der deutschen AWZ wirkt sich stark auf die Schweinswalbestände aus. Relevant ist vor allem die Fischerei. Sie reduziert die Nahrungsgrundlage der Tiere. In anderen Fällen werden Schweinswale als Beifang in den Netzen. Der bei der Errichtung von Offshore-Bauwerken, wie etwa Windenergieanlagen, entstehende Unterwasserlärm kann die Schweinswale sowohl aus ihren Revieren vertreiben als auch zu direkten gesundheitlichen Schäden führen. Darüber hinaus hat der Eintrag von Schadstoffen vielfältige Auswirkungen auf den Gesundheitszustand der Tiere. Die aktuellen rechtlichen Regelungen haben deshalb vor allem das Ziel, wirtschaftlich wichtige menschliche Aktivitäten auf See und unter Wasser ökologisch verträglicher zu gestalten, um die Schweinswale zu schützen und zu erhalten.

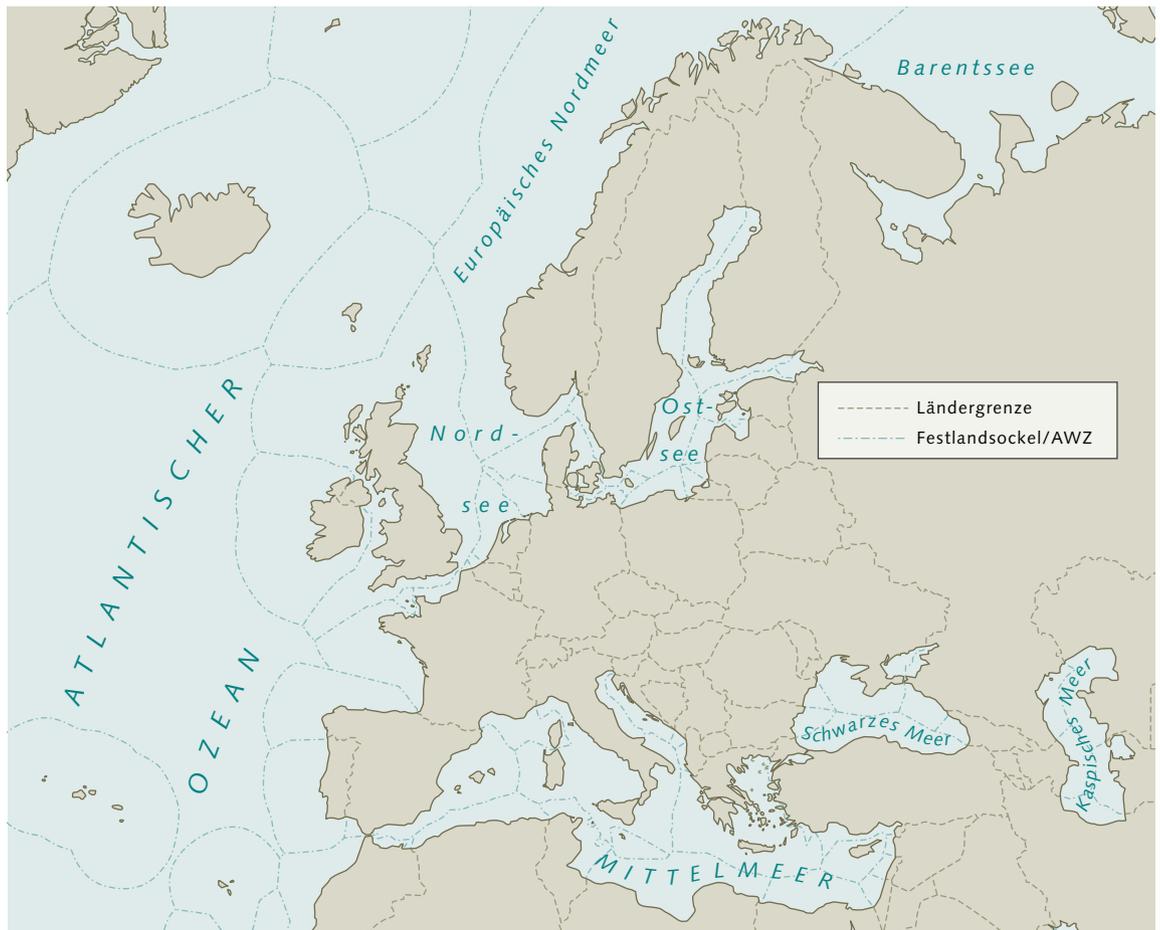
Von Bedeutung ist etwa das Abkommen zur Erhaltung der Kleinwale in der Nord- und Ostsee, des Nordostatlantiks und der Irischen See (Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic, North East Atlantic, Irish and North Seas, ASCOBANS). Im Hinblick auf Innere Gewässer, Küstenmeer und AWZ ist wiederum das nationale Naturschutzrecht relevant. Darüber hinaus spielt in europäischen Gewässern vor allem das von den Organen der Europäischen Union (EU) geschaffene europäische Arten- und Habitatschutzrecht eine bedeutende Rolle. Die europäische Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) zum Beispiel bezieht die Inneren Gewässer und Küstenmeere, AWZ und Festlandsockel der EU-Mitgliedstaaten mit ein. Ihr Ziel ist es, ein zusammenhängendes europäisches Netz von Schutzgebieten („Natura 2000“) zu schaffen.

Dies wäre ein wesentliches Instrument zur Erhaltung der europäischen Artenvielfalt. Nach dieser Richtlinie müssen Schutzgebiete Habitate bestimmter Arten, darunter die des Schweinswals, umfassen.

Innerhalb der ausgewiesenen Schutzgebiete dürfen besonders umweltrelevante menschliche Aktivitäten, wie etwa der Bau von Offshore-Windenergieanlagen, nur nach einer strengen Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt werden. In manchen Fällen ist eine Aktivität aber aus zwingenden Gründen erforderlich, obwohl die Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung dagegensprechen – beispielsweise weil es ein erhebliches öffentliches Interesse gibt. Der Mitgliedstaat ist dann verpflichtet, Ausgleichsmaßnahmen zu ergreifen.



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



kanalisieren, um die Sicherheit der Schifffahrt in diesem Bereich zu gewährleisten.

Dem Küstenmeer folgt die Anschlusszone, die sich 24 Seemeilen seewärts der Basislinie erstreckt. In diesem Areal, das sich mit dem Küstenmeer teilweise überlagert, besitzt ein Staat nur Kontrollrechte. Er darf überprüfen, ob im Küstenmeer geltende nationale Gesetze eingehalten oder gefährdet werden. Dazu gehören unter anderem Gesundheitsrichtlinien, Einreise-, Finanz- und Zollvorschriften. Noch weiter ins Meer reicht die sogenannte Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ), die sich bis zu 200 Seemeilen seewärts der Basislinie erstreckt.

Anders als die Inneren Gewässer und das Küstenmeer gehört die AWZ nicht zum Staatsgebiet. Der Küstenstaat verfügt dort nur über einzelne funktional begrenzte Rechte, die sich nicht auf das Meeresgebiet selbst, son-

dern nur auf die dort vorhandenen Ressourcen beziehen. Wie der Begriff AWZ impliziert, darf dort allein der Küstenstaat Bauten wie etwa Ölplattformen und Windenergieanlagen errichten und nutzen oder Fischfang betreiben. Drittstaaten bleiben davon ausgeschlossen. Wirtschaftlich ist dies von großer Bedeutung, weil beispielsweise etwa 90 Prozent aller kommerziell relevanten Fischarten in den AWZ der Küstenstaaten vorkommen. Diese Zahl ist noch beeindruckender, wenn man bedenkt, dass diese Wirtschaftszonen lediglich 35 Prozent der Gesamtfläche der Meere einnehmen.

Der Küstenstaat hat darüber hinaus Hoheitsbefugnisse in Bezug auf die wissenschaftliche Meeresforschung. Deshalb bedürfen Meeresforschungsaktivitäten fremder Staaten in der AWZ grundsätzlich der Zustimmung des Küstenstaats. Auch wenn es um den Meeresschutz geht,

genießt der Küstenstaat in der AWZ bestimmte Hoheitsrechte. Er allein darf der Internationalen Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime Organisation, IMO) die Ausweisung eines Meeresschutzgebiets in seiner AWZ vorschlagen, um diese vor einer Verschmutzung durch Schiffe zu schützen. Territoriale Ansprüche kann ein Küstenstaat in der AWZ nicht erheben. Dritte Staaten wiederum genießen in der AWZ Schifffahrtsfreiheit. Zudem dürfen sie dort unterseeische Kabel und Rohrleitungen verlegen.

Spezielle Vorgaben enthält das SRÜ auch für den größtenteils unterhalb der AWZ verlaufenden Festlandsockel. Dieser ist wie die AWZ ein Hoheitsraum, in dem nur der Küstenstaat die natürlichen Ressourcen erforschen und ausbeuten darf. Jeder Küstenstaat weltweit besitzt zwangsläufig einen solchen Festlandsockel. Natürlich sind Festlandsockel je nach geologischen Gegebenheiten unterschiedlich breit. Ungeachtet dessen darf jeder Küstenstaat einen Festlandsockel von bis zu 200 Seemeilen Breite für sich proklamieren. Ist der Festlandsockel geologisch breiter, können aber auch noch größere Bereiche ausgewiesen werden. In rechtlicher Hinsicht verläuft die maximale Ausdehnung dann entweder in 350 Seemeilen Entfernung von der Basislinie oder 100 Seemeilen seewärts der 2500-Meter-Wassertiefenlinie. Proklamiert ein Küstenstaat einen mehr als 200 Seemeilen breiten Festlandsockel, ist er in der Beweisspflicht. Der Staat muss gegenüber der UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandsockels (Commission on the Limits of the Continental Shelf, CLCS) belegen, dass es sich bei dem unterseeischen Gebiet tatsächlich um eine natürliche Verlängerung seines Landgebiets handelt. Die Kommission prüft die vorgelegten geologischen und hydrographischen Daten und gibt schließlich eine Empfehlung ab. Die von einem Küstenstaat auf der Grundlage einer solchen Empfehlung festgelegten Außengrenzen des Festlandsockels sind endgültig und verbindlich. Allerdings ist sich die Staatengemeinschaft bis heute nicht einig, welche rechtlichen Konsequenzen die CLCS-Empfehlungen letztlich haben. Denn die Kommission ist kein Organ der Rechtskontrolle. So soll die CLCS-Prüfung lediglich sicherstellen, dass die Grenzziehung wissenschaftlichen Standards entspricht. Dennoch ist die CLCS kein zahloser Tiger. Eine von ihr abgegebene und veröf-

fentliche Empfehlung setzt den Küstenstaat unter erheblichen politischen Druck. Jegliche Abweichung bedarf einer Rechtfertigung. Bislang wurde denn auch in keinem einzigen Fall eine CLCS-Empfehlung missachtet.

Jenseits der Außengrenzen der AWZ beginnt der Staatengemeinschaftsraum Hohe See. Damit ist primär die Wassersäule jenseits der AWZ gemeint, weniger der Meeresboden. Die Hohe See steht allen Staaten offen. Kein Staat darf einen Teil der Hohen See seiner Souveränität unterstellen. Die sogenannte Freiheit der Hohen See erfasst, ganz im Sinne von Hugo Grotius, insbesondere die Freiheit der Schifffahrt, die Freiheit der Fischerei und die Freiheit der wissenschaftlichen Meeresforschung.

Außerdem wurden die nicht lebenden Ressourcen des sich seewärts an den Festlandsockel anschließenden Meeresbodens zum gemeinsamen Erbe der Menschheit erklärt. Die in diesem Gebiet lagernden Manganknollen sollen künftig nach einem Bergbaurecht geerntet werden, das sich am Gemeinwohl orientieren und vor allem den Interessen der Entwicklungsstaaten Rechnung tragen soll. Überwacht und organisiert werden die Bergbauunternehmungen von der Internationalen Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) in Kingston (Jamaika), die extra dafür von den Vertragsparteien des SRÜ eingerichtet wurde. Die ISA wacht insbesondere darüber, dass die Gewinne aus den Aktivitäten des Tiefseebodenbergbaus gerecht verteilt werden. So bleibt die Hälfte der Meeresbodengebiete, für die die Industrienationen künftig Explorations- und Abbaulizenzen erwerben, den Entwicklungsstaaten reserviert. Noch ist der Abbau allerdings unrentabel und es fehlt an der nötigen Technik. Wie gut das Regelwerk in der Praxis funktioniert, wird sich also erst in Zukunft zeigen.

Als Verfassung der Meere liefert das SRÜ nur den normativen Rahmen für die internationale Rechtsordnung der Ozeane. Im Einzelnen lässt es manche Frage unbeantwortet. Das gilt vor allem für Aspekte, die erst nach seiner Annahme im Jahr 1982 durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse als bedeutend erkannt wurden. Längst hat man neue Erzlagerstätten am Meeresboden und neue Fischbestände in der Tiefsee entdeckt. Und auch der Klimawandel führt zu Veränderungen. Für die aktuellen Herausforderungen muss das SRÜ daher gegebenenfalls durch Spezialverträge ergänzt werden.

Festlandsockel
Für den Begriff Festlandsockel gibt es eine rechtliche und eine geologische Definition. Im rechtlichen Sinn ist der Festlandsockel gemeint, der eine Ausdehnung von 200 Seemeilen seewärts der Basislinie hat. Im geologischen Sinn ist der Begriff gleichbedeutend mit dem Schelf. Als Schelf bezeichnet man den küstennahen, flachen Teil des Meeresbodens. Der Schelf fällt sanft bis zu einer durchschnittlichen Tiefe von 130 Metern ab. Daran schließt sich der bis zu 90 Grad steile Kontinentalhang an.

Die Grenzen des Seerechts

> Es sind vor allem die durch den Klimawandel verursachten Veränderungen im Meer, die das heutige Seerecht an seine Grenzen bringen. Die arktischen Eismassen schwinden und geben den Weg frei zu lange verborgenen Rohstoffen im Meeresgrund, die neue Begehrlichkeiten wecken. Brisant ist derzeit auch die Frage, inwieweit der Mensch in das marine Ökosystem eingreifen darf, um die Auswirkungen des Klimawandels abzufedern.

Landnahme unter Wasser

Die Experten sind sich weitestgehend darin einig, dass der Klimawandel zum verstärkten Schmelzen des arktischen Eispanzers führt. Aus ökonomischer Sicht ist das durchaus interessant. Zum einen, weil sich dem internationalen Handel in den Sommermonaten alternative und kürzere Schifffahrtswege wie die Nordwest- und Nordostpassage eröffnen könnten. Zum anderen, weil die Menschheit damit Zugang zu den im arktischen Meeresboden vermuteten Öl- und Gasreserven bekommt. Inzwi-

schon streiten sich die Arktisanrainer um die Bodenschätze. Die Öffentlichkeit bekam davon erstmals einen Eindruck, als Russland am 1. August 2007 mithilfe bemannter Mini-U-Boote eine russische Flagge auf dem Meeresboden unter dem Nordpol hisste und das betreffende Gebiet damit symbolisch als russisches Gebiet proklamierte.

Die anderen arktischen Staaten, zu denen neben Russland Dänemark (Grönland), Kanada, Norwegen und die USA zählen, haben zwischenzeitlich ebenfalls Expeditionen gestartet, die belegen sollen, dass die betreffenden Gebiete Bestandteile der unterseeischen Verlängerungen ihrer Territorien sind. Seither wird in den Medien über den möglichen Ausbruch eines „eiskalten Krieges“ im hohen Norden spekuliert.

Geschacher um Grenzen

Noch ist unklar, inwieweit die arktischen Gebiete zum Festlandsockel der benachbarten Küstenstaaten gehören. Sollte dies der Fall sein, könnten die dort vermuteten Ressourcen gemäß SRÜ exklusiv von dem arktischen Staat ausgebeutet werden, auf dessen Festlandsockel sie sich befinden. Sie fielen damit nicht unter die Regelungen zum gemeinsamen Erbe der Menschheit, die von der Internationalen Meeresbodenbehörde verwaltet werden. Derzeit versuchen die arktischen Staaten zu belegen, dass sich ihr Festlandsockel geologisch über mehr als 200 Seemeilen hinaus in den arktischen Ozean erstreckt. Auch in diesem Fall verlief die maximale Außengrenze – wie oben beschrieben – entweder bei 350 Seemeilen oder 100 Seemeilen seewärts der 2500-Meter-Wassertiefenlinie. Die – zulässige – Kombination beider Methoden böte in der Arktis insbesondere Russland die

10.7 > Medienwirksam platzierten russische Forscher am 1. August 2007 ihre Nationalflagge am Grund des arktischen Ozeans.





10.8 > Ausdehnung der Festlandssockel in der Arktis. Der Gakkelrücken ist als rote Fläche rechts dargestellt. Die linke rote Fläche kann aufgrund der 2500-Meter-Wassertiefenlinie von

keinem Anrainerstaat beansprucht werden. Der Lomonossow-Rücken liegt links des Gakkelrückens zwischen den beiden 2500-Meter-Wassertiefenlinien.

Chance auf die größtmögliche Ausdehnung des Festlandssockels. Nur zwei vergleichsweise kleine Flächen könnten von gar keinem Anrainerstaat beansprucht werden: Der einen fehlt als sogenanntem ozeanischen Bergrücken (oceanic ridge) eine „natürliche“ Verbindung mit den Festlandrändern (Gakkelrücken), die zweite scheidet wegen des Verlaufs der 2500-Meter-Wassertiefenlinie aus.

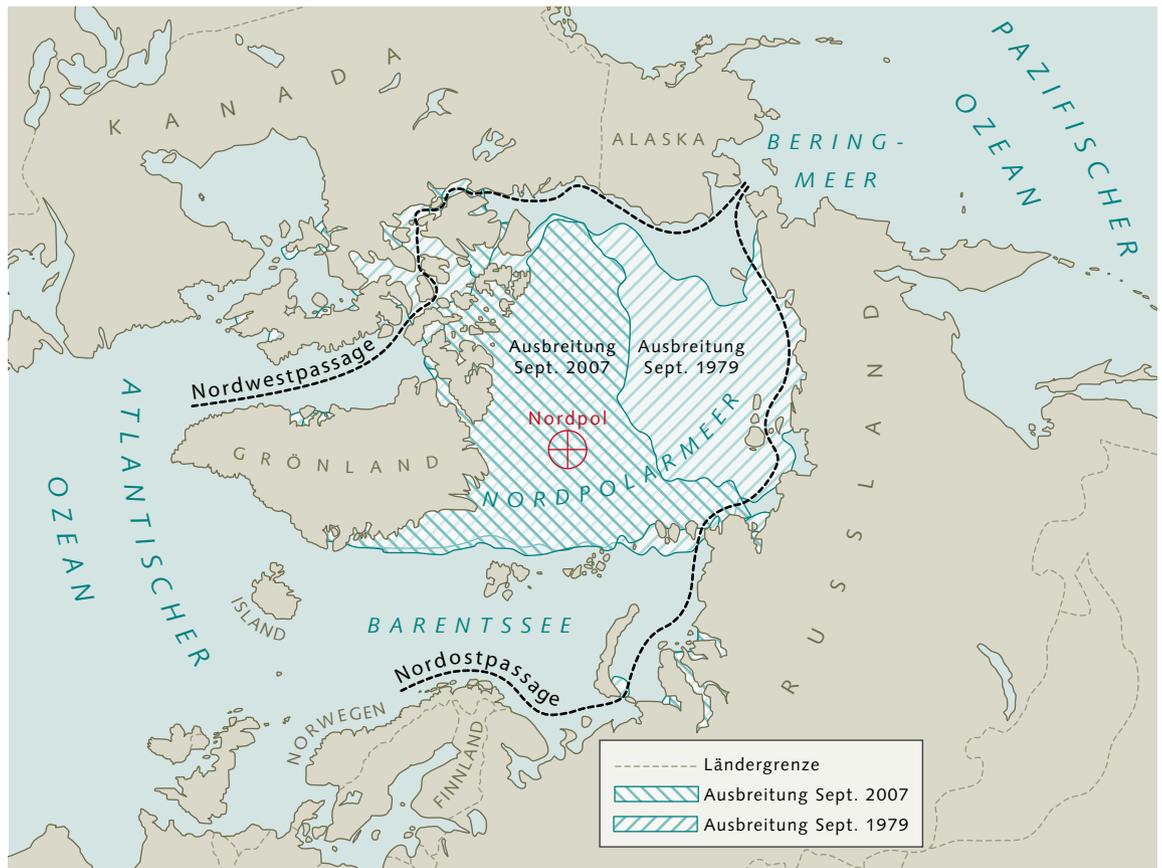
Der Fall Arktis ist vor allem auch deshalb kompliziert, weil hier eine Ausnahmeregelung zum Tragen kommt. Das SRÜ unterscheidet zwischen „ozeanischen Bergrücken“, die nicht unmittelbar mit dem Festlandrand verbunden sind, sowie „unterseeischen Bergrücken“ und „unterseeischen Erhebungen“: Verläuft ein Festlandssockel über Teilen eines unterseeischen Bergrückens (submarine ridge), ist nur die 350-Seemeilen-Regel, nicht aber

die bei unterseeischen Bergrücken naturgemäß vorteilhaftere 2500-Meter-Wassertiefenlinie anwendbar. Handelt es sich aber nur um eine unterseeische Erhebung (submarine elevation), gilt die Einschränkung auf 350 Seemeilen wiederum nicht. Der Grund: Anders als unterseeische Erhebungen bestehen unterseeische Bergrücken in der Regel aus vulkanischem Gestein und damit aus einem anderen Material als der Festlandssockel – obwohl beide miteinander verbunden sind. Beide sind somit unterschiedlichen Ursprungs. Unterseeische Erhebungen hingegen gleichen in ihrer Zusammensetzung der des Festlandrands. Erhebung und Festlandssockel sind damit geologisch identisch.

Ob es sich bei den Strukturen am arktischen Meeresboden um unterseeische Bergrücken oder Erhebungen handelt, muss deshalb zunächst durch geologische Ana-

Ozeanische Rücken
Wo unterseeische Kontinentalplatten auseinanderdriften, entstehen ozeanische Bergrücken. An diesen Bruchstellen steigt Magma aus dem Erdinnern auf, das im Laufe der Zeit zu mehrere Tausend Meter hohen Rücken emporwächst. Diese liegen weitab der Schelfgebiete und Kontinentalabhänge meist in der Mitte der Ozeane.

10.9 > Die Fläche des arktischen Meereises nimmt seit vielen Jahren ab. Damit wird das Eis im Sommer künftig den Zugang zu unerschlossenen Erdgas- und Erdölvorkommen freigeben. Zudem ergeben sich mit der Nordost- und der Nordwestpassage neue Schifffahrtswege, die kürzer als die Strecke durch Panama- und Suezkanal sind.



lysen des Gesteins geklärt werden. Was die Arktis angeht, liegt genau hier das Problem. Dort verlaufen gleich mehrere unterseeische Bergzüge. Mit Ausnahme des Gakkelerückens sind sie nach überwiegender Meinung alle in irgendeiner Form mit den Kontinentalrändern verbunden. Sie könnten also grundsätzlich zum Festlandssockel eines oder mehrerer Anrainerstaaten gehören. Welche Regelung des SRÜ letztlich zum Tragen kommt, hängt also maßgeblich von ihrer geologischen Beschaffenheit ab. Russland etwa vertritt die Ansicht, dass es sich beim Lomonossowrücken um eine unterseeische Erhebung im Sinne des SRÜ handelt, mit der Folge, dass die 2500-Meter-Wassertiefenlinie-Regelung greifen würde. Die bisherigen Untersuchungen deuten aber eher darauf hin, dass die geologische Zusammensetzung des Rückens nicht der des russischen Festlandssockels entspricht.

Welches Land am Ende den Zuschlag bekommt, hängt davon ab, wie die Kommission zur Begrenzung des Fest-

landssockels CLCS die von den Küstenstaaten vorgelegten Daten beurteilt. Dabei drängt die Zeit: Für Staaten wie Russland, die dem SRÜ vor dem 13. Mai 1999 beigetreten sind, ist die Frist, der Festlandssockelkommission Angaben über ihren über 200 Seemeilen hinausgehenden Festlandssockel zu machen, am 13. Mai 2009 abgelaufen. Bis alle Empfehlungen der CLCS vorliegen, werden vermutlich noch Jahre vergehen. Staaten, die dem Übereinkommen nach 1999 beigetreten sind oder noch beitreten wollen, müssen ihre Unterlagen innerhalb von zehn Jahren nach Beitritt vorlegen. So läuft die Frist für Kanada im Jahr 2013 ab, für Dänemark 2014. Nachdem im Jahr 2004 neue Erdöl- und Erdgasvorkommen am arktischen Meeresboden entdeckt worden sind, bleibt abzuwarten, ob sich die Vertragsparteien des SRÜ entschließen, die vom Übereinkommen vorgesehene Frist zu verlängern. Für die Abgrenzung des Festlandssockels zwischen Staaten mit gegenüberliegenden oder aneinander angrenzenden Kü-

ten ist die Kommission zur Begrenzung des Festlandsockels freilich ohnehin nicht zuständig. In solchen Fällen verpflichtet das SRÜ die beteiligten Staaten lediglich zum Abschluss von Abgrenzungsübereinkünften. Immerhin haben sich die fünf arktischen Staaten in der Ilulissat-Erklärung vom 28. Mai 2008 dazu bekannt, das Internationale Seerecht einzuhalten und friedlich über sich potenziell überlagernde Ansprüche zu verhandeln.

Das Seerecht und der Kampf gegen den Klimawandel

Eine der drängendsten klimapolitischen Fragen ist, wie sich der Ausstoß des Klimagases CO₂ verringern lässt. Tatsächlich berührt dieses Thema auch das Seerecht. So setzt man derzeit große Hoffnung auf die Speicherung von atmosphärischem CO₂ im Ozean und in seinem Untergrund (Kapitel 2). Wie komplex diese Aspekte aus Sicht des Seerechts sind, zeigt ein aktuelles Beispiel: die Düngung des Meeres mit Eisenspänen, also Pflanzennährstoffen. Die Idee besteht darin, die Primärproduktion anzuregen und durch das zu Boden sinkende Phytoplankton der Atmosphäre längerfristig CO₂ zu entziehen. Nicht nur mit Blick auf das 2009 durchgeführte deutsch-indische Meeresforschungsexperiment „Lohafex“ stellt

sich die Frage, ob sich solche sogenannten **Geo-Engineering**-Aktivitäten mit dem geltenden Seerecht in Einklang bringen lassen. Das SRÜ geht zwar ausführlich auf den Meeresumweltschutz ein. Aussagen über die Zulässigkeit von Geo-Engineering-Maßnahmen im Allgemeinen oder Eisendüngung im Speziellen werden dort jedoch nicht getroffen. Allerdings ist es grundsätzlich verboten, Abfall und andere Stoffe ins Meer zu kippen. Diese Verpflichtung wird durch zwei weitere völkerrechtliche Verträge konkretisiert, zum einen das Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen von 1972 (London Convention, LC), zum anderen das London Protocol (LP) von 1996, das die Bestimmungen der London Convention verschärft und konkretisiert. Entsprechend haben sich im Oktober 2008 die Vertragsstaaten dafür ausgesprochen, dass legitime wissenschaftliche Forschung nicht den Zielen der Londoner Übereinkommen widersprechen soll. Damit bleibt die kommerzielle Eisendüngung von Meeresgebieten untersagt. Diskutiert wurde, ob Industrieunternehmen den Ozean düngen und das Algenwachstum ankurbeln könnten, um sich diese Maßnahme als Carbon Credit anrechnen zu lassen. Inzwischen aber steht fest, dass eine solche kommerzielle Eisendüngung unzulässig ist.

Carbon Credits
Mit Carbon Credits bezeichnet man sogenannte Emissionsrechte. Diese erlauben Industriebetrieben wie etwa Kraft- oder Zementwerken, eine bestimmte Menge CO₂ auszustoßen. Reduziert ein Unternehmen durch technische Maßnahmen seinen CO₂-Ausstoß, nimmt es weniger dieser Rechte in Anspruch und kann diese an andere Unternehmen veräußern, die wegen eines hohen Ausstoßes mehr Zertifikate benötigen. Damit werden Maßnahmen zur CO₂-Einsparung, die oftmals Zusatzkosten verursachen, wirtschaftlich interessant.

CONCLUSIO

Die Zukunft des Internationalen Seerechts

Unter dem Eindruck von Klimawandel, Artensterben, Überfischung und Seeschifffahrt sieht sich das Internationale Seerecht – die Rechtsordnung der Ozeane – zahlreichen Herausforderungen ausgesetzt. Das Spannungsverhältnis zwischen der Freiheit des Meeres und seiner Territorialisierung, die im Konzept des „mare clausum“ verkörpert ist, hält bis heute an. Punktuelle Anpassungen der geltenden rechtlichen Regelungen an neue Erkenntnisse und Entwicklungen mögen erforderlich sein, bergen jedoch immer die Gefahr einer weiteren Ausdehnung staatlicher Hoheitsmacht auf die See

hinaus. Das UN-Seerechtsübereinkommen (SRÜ) muss dabei stets Ausgangspunkt der rechtlichen Analyse sein. Es hat die Begehrlichkeiten der Staatengemeinschaft in einen Rahmen eingepasst, der nahezu allgemeine Akzeptanz gefunden hat. Bislang hat es sich als flexibler und offener gezeigt als vielfach angenommen. Daher wird das UN-Seerechtsübereinkommen auch im Völkerrecht des 21. Jahrhunderts seine normative Kraft entfalten. Voraussetzung ist freilich die Bereitschaft der Staaten zu Kooperation und friedlicher Beilegung aller auftretenden Streitigkeiten – auch und gerade angesichts der neuen Herausforderungen auf und unter dem Meer.



GESAMT-CONCLUSIO

Mit diesem ersten „World Ocean Review“ veröffentlichen wir einen Statusbericht zum Zustand der Meere, dem künftig in regelmäßigen Abständen eine Aktualisierung folgen wird. Wir wollen damit zeigen, wie stark der Mensch in den Lebensraum Ozean eingreift – auch durch den Klimawandel. Manches davon haben wir verstanden, gleichzeitig sind viele Fragen noch offen. Sicher aber ist, dass der Mensch sein Verhalten dringend ändern muss mit dem Ziel, einen nachhaltigen Umgang mit der Umwelt und besonders den Ozeanen zu erreichen.

Der Winter 2010 war weltweit der wärmste seit 131 Jahren. Der globale Klimawandel bewirkt ein langsames Ansteigen der Durchschnittstemperatur der Erde. In den kommenden Jahren wird sich das Abschmelzen der Gletschermassen wahrscheinlich beschleunigen. Der Meeresspiegel wird schneller steigen. Nach aktuellen Berechnungen dürften es allein in diesem Jahrhundert zwischen 80 und im ungünstigsten Fall 180 Zentimeter Anstieg sein.

Der riesige Wasserkörper des Ozeans wirkt wie ein Puffer, er speichert einen beträchtlichen Teil des Kohlendioxids und der Wärme aus der Atmosphäre. Klimaveränderungen werden daher nur langsam spürbar. Experten gehen davon aus, dass bei einem ungebremsten Ausstoß der Klimagase der Meeresspiegel bis zum Jahr 2300 um bis zu 5 Meter steigen könnte. Rund 75 Prozent der Megastädte mit jeweils mehr als 10 Millionen Einwohnern liegen am Meer oder in Küstennähe. Es wird Unsummen kosten, sie zu schützen – einige wird man vermutlich aufgeben müssen. Der Ozean mag derzeit noch die ärgsten Folgen des Klimawandels dämpfen. Auf lange Sicht werden sich diese aber nur dann vermeiden lassen, wenn wir heute den Ausstoß der Klimagase konsequent drosseln. Fachleute befürchten, dass sich durch

die Erwärmung des Meerwassers Hunderttausende Tonnen von Methanhydraten auflösen könnten – Gasmassen, die, heute noch zu einer festen, kalten Masse erstarrt, am Meeresboden ruhen. Ein Teil des Methans, ein starkes Treibhausgas, könnte dann in die Atmosphäre aufsteigen und den Klimawandel weiter anheizen – ein Teufelskreis.

Die Ozeane schlucken jedes Jahr viele Millionen Tonnen Kohlendioxid. Sie sind die größte „Senke“ für das von uns Menschen produzierte Klimagas. Doch das Zuviel an Kohlendioxid bringt das chemische Gleichgewicht im Meer in Schieflage. Es führt zu einer Versauerung der Ozeane – wiederum mit unabsehbaren Folgen. Saures Wasser stört den Geruchssinn von Fischlarven, die Kalkbildung von Schnecken und das Wachstum von Seesterne. Auch das Phytoplankton, winzige Algen im Meer und wichtigste Nahrungsgrundlage für höhere Lebewesen, wird von der Versauerung betroffen sein.

Nach wie vor wird die Meeresumwelt in Küstennähe durch Abwässer, Gifte und vor allem Nährstoffe geschädigt, die durch die Flüsse in die Ozeane gelangen. Weltweit fließen Tausende Tonnen von Stickstoff- und Phosphorverbindungen ins Meer. Algen vermehren sich dadurch explosionsartig. In vielen Küstenstreifen beginnt die Katastrophe mit dem Sterben der Algen. Bakterien fressen die Pflanzenreste und zehren dabei den Sauerstoff im Wasser auf. In solchen Sauerstoffminimumzonen stirbt jedes höhere Leben ab. In Westeuropa ist es gelungen, die Nährstoffmengen zu reduzieren. Weltweit aber wird der Nährstoffeintrag mehr und mehr zum Problem. Die Menschheit setzt den Ozeanen zweifellos in vielerlei Hinsicht zu, und alles in allem erhöht sich der Stress für die Meeresorganismen. Durch die Überdüngung und die Versauerung des Wassers, durch rapide Veränderungen

der Wassertemperatur oder auch des Salzgehalts könnte die biologische Vielfalt im Meer weltweit mit wachsender Geschwindigkeit verloren gehen. In der Summe sind die Störungen so groß, dass Arten weiter verschwinden werden.

Völlig unklar ist bisher, wie sich die schleichende Vergiftung der Meeresumwelt mit Schadstoffen wie den polyfluorierten Verbindungen auswirken wird, die seit Jahren als Antihafsubstanz in Pfannen oder auch in Outdoorjacken zum Einsatz kommen. Diese Substanzen reichern sich in der Nahrungskette an und sind inzwischen selbst in Eisbären nachweisbar. Es ist offensichtlich, dass die Ozeane auch heute noch Endstation für den Dreck unserer Zivilisation sind – nicht allein, was die langlebigen Chemikalien angeht, sondern auch in Sachen Müll. Weltweit landen in jedem Jahr 6 Millionen Tonnen Müll im Meer. Der Abfall wird zur Falle für Delfine, Schildkröten und Vögel. Vor allem Plastik ist langlebig und sammelt sich, getrieben von den Meeresströmungen, inmitten der Ozeane, in Hunderte Quadratkilometer großen Müllwirbeln. Ein völlig neues Problem sind die mikroskopisch kleinen Zerfallsprodukte von Plastikteilen, die die Meeresorganismen in ihren Körpern anreichern.

Immerhin gibt es in Sachen Ozeanverschmutzung mittelfristig einen erfolgreichen Trend. Die Zahl der Ölauffälle hat abgenommen. Spektakuläre Tankerunfälle tragen heute nur mit etwa 10 Prozent zur Verölung der Meere bei. Die „schleichende Ölpest“ hingegen bleibt ein Problem. Allein 35 Prozent der weltweiten Ölverschmutzung stammen aus dem regulären Schiffsbetrieb. Diesen Quellen ist ungleich schwerer beizukommen. Wie die Explosion der Bohrinsel „Deepwater Horizon“ im Golf von Mexiko gezeigt hat, dämmern mit dem Trend, Öl und Gas aus immer größeren Tiefen zu fördern, möglicherweise ganz neue Probleme herauf.

Die Menschheit zerstört die Meeresumwelt nicht nur durch Verschmutzungen, sondern auch durch ihre Gier. Alljährlich werden 80 Millionen Tonnen Fisch mit einem Marktwert von rund 90 Milliarden US-Dollar gefangen. Die Konsequenz: Viele Fischbestände sind heute überfischt oder sogar ganz zusammengebrochen. Schuld an der Misere ist eine verfehlte Fischereipolitik, die den Fischfang stark subventioniert. Die Sicherung von Arbeitsplätzen hat stets Vorrang vor dem Schutz der

lebenden Ressourcen – eine ausgesprochen kurzsichtige Denkweise. Ein unrühmliches Beispiel ist die EU-Fischereipolitik. Der EU-Ministerrat setzte bisher die Fangquoten regelmäßig zu hoch an und setzt sich damit über die Empfehlungen von Fischereibiologen hinweg, die seit Langem vor dem Raubbau warnen.

Fische sind nicht die einzige lebende Ressource, die der Mensch im Ozean erntet. So wird die Gewinnung von medizinisch oder industriell nutzbaren Wirkstoffen im Meer für Wissenschaftler und Unternehmen zunehmend interessant. In den vergangenen Jahren hat man bereits Substanzen aus Meeresorganismen extrahiert, die in der Krebstherapie oder bei der Bekämpfung von Viren eingesetzt werden. Lange zögerten Firmen, in die aufwendige Wirkstofffahndung in den Ozeanen einzusteigen. Doch mit der Gründung junger Start-up-Firmen nimmt die Kommerzialisierung der Meeresmedizin an Fahrt auf. Allerdings benötigen die meisten Neugründungen derzeit noch staatliche Fördergelder.

Nach Meeresrohstoffen ganz anderer Art suchen die großen Öl- und Bergbaukonzerne. Schon seit Jahrzehnten wird rund um den Globus in den Ozeanen nach Öl gebohrt. Der Anteil der im Meer gewonnenen Gas- und Erdölmengen wächst stetig und liegt heute bei gut einem Drittel des weltweiten Fördervolumens. In den kommenden Jahren dürfte am Meeresboden außerdem der Abbau von Erzen und Manganknollen im großen Stil beginnen. Auch die Methanhydrate locken hinab. Gelänge es, das Methan industriell zu ernten, hätte man ein gigantisches Energiereservoir angezapft. Die Hydrate sollen, so der Plan, am Meeresboden kontrolliert aufgelöst und das Methan abgesaugt werden. Ob das funktioniert, weiß niemand. Kritiker fürchten, dass große Mengen von Methan unkontrolliert aus dem Sediment aufsteigen könnten.

Der Mensch drängt in die Tiefe wie nie zuvor. Denn in dem Maße wie die Ressourcen an Land schrumpfen, wird der Abbau in der Tiefe interessanter und rentabler. Die Vorkrisenjahre 2007 und 2008 waren geprägt durch exorbitant hohe Rohstoffpreise. Trotz der folgenden Wirtschaftskrise wurde damit auch der Meeresbergbau wieder interessant, der nach einer ersten Hochphase in den 1970er Jahren völlig brach lag. Besonders vielversprechend erscheinen derzeit die edelmetallreichen Erze in

der Nähe ehemaliger heißer untermeerischer Quellen und die Manganknollen im Zentralpazifik. Was die Erze betrifft, könnte ein Abbau schon in allernächster Zukunft beginnen. Umweltschützer fürchten allerdings, dass dadurch Tiefseelebensräume zerstört werden. Auch eine Manganknollenernte im großen Stil betrachtet man kritisch. Inzwischen wurden die ersten Claims im Pazifik an verschiedene Staaten, zum Beispiel auch an Deutschland, vergeben.

Weit weniger riskant erscheint da die Förderung einer ganz anderen Ressource: der regenerativen Energie im Meer. Zu den aktuellen Konzepten gehören Windenergie- und Wellenenergieanlagen, Gezeiten- und Strömungskraftwerke sowie Kraftwerke, die Salzgehalts- oder Temperaturunterschiede zur Stromerzeugung nutzen. Alle Technologien zusammen könnten einen beträchtlichen Teil des Weltstrombedarfs decken. Grundsätzlich aber gilt, dass vor der Errichtung der umweltfreundlichen Energiewandler die Auswirkungen auf die Meeresumwelt untersucht werden müssen. Zweifelsohne wird man manche Meeresgebiete aus ökologischen Gründen von der Bebauung ausschließen. Experten empfehlen daher Meeresenergiegebiete auszuweisen, in denen man verschiedene Technologien miteinander kombiniert – Windradmasten und Strömungsanlagen etwa.

Dass Meeresgebiete heute einfach beplant und genutzt werden können, war noch vor wenigen Jahrzehnten keineswegs selbstverständlich. Immer wieder entbrannte Streit um Seegebiete. Erst 1982 gelang es der Staatengemeinschaft mit dem internationalen Seerechtsübereinkommen einen gemeinsamen Nenner zu finden. Dieses Übereinkommen ist der umfangreichste völkerrechtliche Vertrag, der jemals in der Geschichte der Menschheit geschlossen wurde. Es regelt den Einflussbereich der Küstenstaaten, aber auch die Nutzung der Hohen See. Über den Rohstoffabbau am Meeresboden wiederum wacht eine UN-Behörde, die auch die Claims für den Manganknollenabbau gerecht zuteilen soll. Trotz dieser Regelungen ist zwischen den Arktisstaaten längst ein Streit darüber entbrannt, wer die Rohstoffe am Grund der Arktis nutzen darf, wenn das Meereis weiter schmilzt.

Klar geregelt ist heute hingegen der Schiffsverkehr, der sich in den vergangenen Jahrzehnten enorm gewandelt hat. Ein Meilenstein war die Einführung des Containers,

der das Laden und Löschen der Schiffe so beschleunigt hat, dass die Reedereien ihre Frachter heute wie Stadtbusse nach einem eng getakteten Fahrplan fahren lassen. Gut 53 000 Stückgutschiffe, Tanker, Massengutfrachter und Containerschiffe tragen heute Waren um den Globus. Die Tragfähigkeit der Handelsflotte beläuft sich auf über 1000 Millionen Tonnen.

Faszinierend und beunruhigend zugleich ist die Vorstellung, dass durch den Klimawandel der sagenumwobene nördliche Seeweg durch die Arktis frei wird – die Nordostpassage. Weil das Meereis in der Arktis im Sommer mittlerweile stark taut, wird sich künftig der Wasserweg von Europa an der sibirischen Küste entlang bis in den Pazifik für mehrere Wochen im Jahr öffnen. Diese Strecke ist deutlich kürzer als jene durch den Suezkanal oder vorbei am Kap der Guten Hoffnung; die Wirtschaftlichkeit in Anbetracht von Meereisresten und möglichen Passagegebühren ist noch ungeklärt. Allerdings ließe sich damit zumindest im Sommer der derzeit gefährliche Seeweg durch den Golf von Aden, vorbei an der somalischen Küste vermeiden. Hier hat die Zahl der Piratenangriffe in der vergangenen Zeit stark zugenommen. Die Situation in den ostafrikanischen Gewässern sollte aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Piraterie weltweit seit einigen Jahren wieder abnimmt.

Während der mehr als zwei Jahre langen Arbeit an diesem Bericht haben wir uns des Öfteren gefragt, ob es überhaupt möglich ist, das Meer in allen seinen Facetten darzustellen. Darauf gibt es nur eine ehrliche Antwort: nein. Die Ozeane sind zu groß und die Materie zu komplex, als dass man auch nur annähernd einen Anspruch auf Vollständigkeit erheben könnte. Zudem sind viele wissenschaftliche Fragen nach wie vor unbeantwortet. Dennoch haben wir versucht, ein möglichst umfassendes Bild vom Zustand der Meere zu zeichnen. Wir hoffen, dass dieser Bericht zumindest zu einem kleinen Teil dazu beitragen kann, die Situation zum Guten zu wenden.

Glossar

> Das Glossar definiert Begriffe, die für das Verständnis der Texte besonders wichtig sind, aber in den einzelnen Kapiteln aus Platzgründen nicht ausführlich erläutert werden können. Glossarbegriffe sind gefettet und leicht zu erkennen.

anthropogen: Durch den Menschen verursachte Veränderungen in der Natur, wie etwa die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, werden als anthropogen bezeichnet.

Atmosphäre: die gasgefüllte Hülle, die den Globus umspannt. Ihre Hauptbestandteile sind Stickstoff und Sauerstoff. Der Kohlendioxidgehalt liegt bei nur etwa 0,038 Prozent. Dennoch ist das Gas nach dem Wasserdampf die wichtigste Ursache des →Treibhauseffekts.

Auftriebsgebiet: zumeist küstennahe Meeresgebiete, in denen kaltes und nährstoffreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche aufsteigt. Angetrieben wird diese Bewegung durch stetige küstenparallele Winde wie etwa →Passate. Die Winde treiben das Oberflächenwasser von der Küste weg, was zur Folge hat, dass Wasser aus der Tiefe nachströmt und aufsteigt. Auftriebsgebiete sind biologisch besonders produktiv und für den Fischfang bedeutende Regionen, die sich vor allem an den westlichen Rändern der Kontinente beispielsweise vor Chile, Kalifornien und Namibia befinden.

Azorenhoch: ein Hochdruckgebiet, das sich regelmäßig in der Mitte des Nordatlantiks etwa auf Höhe der Azoren bildet. Hier sinkt kalte Luft ab, die durch den →Golfstrom erwärmt und Richtung Osten nach Europa transportiert wird.

Biodiversität: die biologische Vielfalt auf der Erde. Dazu zählen nicht nur die Arten an sich, sondern auch die in den verschiedenen Individuen einer Art vorhandene genetische Vielfalt oder die Vielfalt an Lebensräumen in einer Region.

Biodiversitätskonvention: Die Biodiversitätskonvention (Übereinkommen über die biologische Vielfalt, Convention on Biological Diversity, CBD) wurde 1992 in Rio de Janeiro während der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (United Nations Conference on Environment and Development, UNCED) ausgehandelt. Sie verfolgt vor allem drei Ziele: den Schutz der biologischen Vielfalt; die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen; die Sicherstellung, dass die Verwertung genetischer Ressourcen und Informationen (z. B. für medizinisch wirksame Substanzen) allen Staaten gleichermaßen zugutekommen.

biogen: Substanzen, die von Lebewesen wie Pflanzen, Tieren, Pilzen oder Bakterien erzeugt werden, bezeichnet man als biogen.

biogeochemisch: Die Biogeochemie ist ein interdisziplinäres wissenschaftliches Fachgebiet, das sich umfassend mit den chemischen, biologischen und physikalischen Prozessen und ihren Wechselwirkungen befasst. Viele Vorgänge in der Natur sind nur dann zu verstehen, wenn man bei der Erfor-

schung alle drei Aspekte berücksichtigt. Demgemäß spricht man auch von biogeochemischen Phänomenen oder Prozessen.

Biosphäre: der belebte Teil der Erdkruste. Die Biosphäre schließt den Ozean mit ein.

CO₂-Emissionsrechte/Carbon Credits: Rechte bzw. „Guthaben“, die es Industriebetrieben erlauben, eine bestimmte Menge CO₂ auszustoßen. Reduziert ein Unternehmen durch technische Maßnahmen seinen CO₂-Ausstoß, nimmt es weniger Carbon Credits in Anspruch und kann diese an andere Unternehmen veräußern. Damit werden Maßnahmen zur CO₂-Einsparung, die oftmals Zusatzkosten verursachen, wirtschaftlich interessant.

Corioliskraft: Die durch die Rotation der Erde bewirkte Corioliskraft oder Coriolisbeschleunigung führt dazu, dass Luft- und Wasserströmungen nicht geradlinig verlaufen, sondern abgelenkt werden. Auf der Nordhalbkugel wirkt die Corioliskraft nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links, direkt am Äquator ist sie Null.

Flagellaten: einzellige Lebewesen, die sich mit einem peitschenartigen Fortsatz, dem Flagellum oder der Geißel, durchs Wasser bewegen. Sie kommen im Süß- und Salzwasser vor.

Geo-Engineering: technische Maßnahmen, die in großem Stil die natürlichen Kreisläufe beeinflussen sollen, um den Auswirkungen der Klimaveränderungen entgegenzuwirken. Diese Maßnahmen werden grob in zwei Gruppen unterteilt – das Sonneneinstrahlungsmanagement (Solar Radiation Management, SRM) und den Kohlenstoffdioxidabbau (Carbon Dioxid Removal, CDR). Beim SRM geht es darum, durch Freisetzen bestimmter Substanzen in die Atmosphäre die Sonneneinstrahlung zu beeinflussen; beim CDR geht es allgemein darum, in großem Rahmen CO₂ abzubauen oder zu lagern. Die Maßnahmen sind umstritten, weil sie massiv in natürliche Prozesse eingreifen und weil ihre direkten Folgen und Nebeneffekte sowie mögliche Wechselwirkungen schwer abschätzbar sind.

Gezeitenzone: der Bereich der Küste, in dem sich Ebbe und Flut bemerkbar machen. Hier sinkt und steigt der Wasserpegel im Rhythmus der Gezeiten. Manche Bereiche fallen dadurch regelmäßig trocken. Häufig siedeln sich hier charakteristische Lebensgemeinschaften an.

Golfstrom: eine relativ schnell fließende warme Meeresströmung im Atlantik. Der Golfstrom zieht vom Golf von Mexiko um die Florida-Halbinsel herum nach Nordosten und geht dann in den Nordatlantikstrom über. Er trägt erheblich zum relativ milden Klima in Westeuropa bei, indem er große Mengen Wärme herantransportiert.

Grönlandsee: Die Grönlandsee erstreckt sich zwischen Grönland, Island und Spitzbergen und bildet damit die Grenze zwischen dem Nordatlantik und dem Arktischen Ozean. In der Grönlandsee tauchen große Wassermassen durch die →Konvektion in die Tiefe ab.

Habitat: der für eine bestimmte Art charakteristische Lebensraum.

Interhemisphärischer Dipol: eine etwa alle zehn Jahre auftretende Schwankung der typischen Wassertemperaturen im Atlantik. Experten sprechen dabei auch von einer Temperaturanomale.

Internationale Walfangkommission: Die Internationale Walfangkommission (International Whaling Commission, IWC) berät jährlich über den Status quo der weltweiten Walbestände, über die Errichtung von Schutzgebieten sowie über die Verlängerung des sogenannten Walfangmoratoriums. Sie wurde mit dem Internationalen Übereinkommen zur Regelung des Walfangs (International Convention for the Regulation of Whaling, ICRW) gegründet. Dieses Übereinkommen ist ein 1946 geschlossener, völkerrechtlicher Vertrag, dessen Ziel die Erhaltung und Bewirtschaftung der Walbestände ist. Die IWC besteht aus den Repräsentanten der rund 80 Unterzeichnerstaaten.

Islandtief: ein über dem Nordatlantik fast permanent bestehendes Tiefdruckgebiet. Ein Großteil der Niederschläge in Westeuropa wird durch dieses Tief herantransportiert. Das Wechselspiel zwischen Islandtief und →Azorenhoch bestimmt die Wetterlage in Westeuropa maßgeblich.

Kieselalgen (Diatomeen): einzellige, hartschalige Algen, die einen Panzer aus Kieselsäure tragen. Viele Kieselalgen im Meer zählen zum →Plankton und zu den wichtigsten Sauerstoffproduzenten im Ozean. Zudem sind sie Nahrungsgrundlage für höhere Lebewesen.

Kohlenstoffkreislauf: der Kreislauf des chemischen Elements Kohlenstoff. Er umfasst die Umwandlungen kohlenstoffhaltiger chemischer Verbindungen in den globalen Systemen Lithosphäre, Hydrosphäre, Erdatmosphäre und Biosphäre sowie den Austausch der Kohlenstoffverbindungen zwischen diesen Systemen. Die Kohlenstoffverbindungen können gasförmig vorliegen (in der Atmosphäre) oder in fester Materie gebunden sein – zum Beispiel in wasserlöslichem Karbonat oder in der festen Biomasse von Pflanzen, etwa in Form von Kohlenhydraten.

Konvektion: Im Zusammenhang mit dem Ozean oder der Atmosphäre bezeichnet die Konvektion die vertikale, meist durch Dichteänderungen (zum Beispiel Abkühlung, Erwärmung) hervorgerufene, turbulente Bewegung von Wasser oder Luft. Die Konvektion im Ozean spielt vor allem als Antrieb der →thermohalinen Zirkulation eine Rolle.

Kryosphäre: der mit Eis bedeckte Teil der Erde. Zur Kryosphäre gehören unter anderem die antarktischen Gletscher, die Hochgebirgsgletscher, das Meereis oder das Schelfeis.

Labradorsee: der Teil des Nordatlantiks zwischen Grönland und Kanada. Wie in der →Grönlandsee tauchen hier große Wassermassen durch die →Konvektion in die Tiefe ab.

Lithosphäre: die feste Gesteinshülle der Erde. Sie umfasst die Erdkruste und Teile des Erdmantels.

Mittelozeanische Rücken: Höhen- oder Gebirgszüge am Meeresgrund, die wie die Nähte eines Baseballs annähernd den ganzen Globus umspannen. Sie entstehen dort, wo Kontinentalplatten untermeerisch auseinander driften. An diesen Bruchstellen, die meist inmitten der Ozeane liegen, steigt heißes Magma auf, das im Wasser erkaltet und sich mit der Zeit zu mächtigen Gebirgen auftürmt.

Monsun(-region): eine großräumige, starke und stetige Luftströmung in den Tropen und Subtropen. Der Monsun ändert zweimal im Jahr seine Richtung. Die Ursache ist der Sonnenstand, der sich im Lauf des Jahres ändert. Unter der hoch stehenden Sonne heizen sich Land- und Wassermassen unterschiedlich stark auf, was zu deutlichen Luftdruckdifferenzen und damit Winden führt. Weht der Monsun von Seeseite aus, trägt er feuchte Luftmassen heran, die sich in starken Monsunregen entladen. Mitunter kommt es zu großen Überschwemmungen.

Nordatlantische Oszillation (NAO): Unter der Nordatlantischen Oszillation versteht man die Schwankung der Druckverhältnisse zwischen dem →Azorenhoch und dem →Islandtief. Die NAO ist besonders bestimmend für das Winterklima in Europa, aber auch in Nordafrika, Grönland und dem Osten der USA. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die NAO etwa 30 Prozent des europäischen Winterwetters bestimmt. Die NAO existiert zwar auch im Sommer, ist in dieser Zeit aber offenbar weniger entscheidend für das Klima. In den vergangenen Jahren hat man im Vergleich zu früheren Messungen eine systematische Veränderung dieses Luftdrucksystems beobachtet. Ein Ergebnis ist die Zunahme von warmen und schneearmen Wintern in Europa.

Normalnull (NN): Das Normalnull ist eine Bezugsgröße zur Standardisierung der Höhenmessung in Deutschland, der Schweiz und Österreich. Es entspricht der Höhe des mittleren Meeresspiegels. Das Normalnull ist auch die Referenz bei der Höhenangabe von Gebäuden oder Bergen. Es wurde ursprünglich von dem in den Niederlanden seit dem 19. Jahrhundert gebräuchlichen „Normaal Amsterdams Peil“ (NAP, Normaler Amsterdamer Pegel) abgeleitet, der seinerzeit dem mittleren Wasserstand der Zuidersee, dem heutigen IJsselmeer, entsprach.

Ostpazifischer Rücken: ein im Südpazifik verlaufender →Mittelozeanischer Rücken.

Passate: Winde, die in den Tropen stetig wehen und damit eine treibende Kraft der Meeresströmungen sind. Die Passate treten bis etwa zum 23. Breitengrad nördlich und südlich des Äquators auf. Man unterscheidet zwischen dem Nordostpassat der nördlichen Halbkugel und dem Südostpassat auf der Südhalbkugel. Die Richtung der Passate wird vor allem durch die ablenkende Wirkung der →Corioliskraft bestimmt.

Pedosphäre: der Teil der festen Landmasse, den man auch als Boden bezeichnet. Sie ist der Übergang zwischen →Atmosphäre und →Lithosphäre. Die Pedosphäre besteht aus lockerem, zerkleinertem Gestein, das mit organischem Material angereichert und mit Wasser und Luft durchmischt ist.

Pelagisches System (Pelagial): Unter dem Begriff Pelagisches System fasst man die Gesamtheit des offenen Wassers (Pelagial) mitsamt seinen Bewohnern zusammen. Zu den Organismen des Pelagials gehören das Plankton und das Nekton. Zum Nekton zählen Lebewesen wie Fische oder Wale, die anders als Planktonorganismen aktiv gegen die Strömung schwimmen können.

Permafrostboden: Boden, der ab einer gewissen Tiefe das ganze Jahr über (permanent) gefroren ist. Permafrostböden (auch Dauerfrostböden genannt) gibt es unter anderem in der arktischen Tundra, in nördlichen Nadelwäldern oder im Hochgebirge. In diesen Gebieten reicht die Sonnenwärme im Sommer nicht aus, um den Boden bis in die Tiefe aufzuheizen. Lediglich die oberen Bodenschichten tauen für wenige Wochen auf.

Plankton: die Gesamtheit der im freien Wasser schwebenden Lebewesen. Die Planktonorganismen sind meist mikroskopisch klein. Dazu zählen unter anderem Einzeller, Mikroalgen, Kleinstkrebse oder Larven von Fischen. Man unterscheidet das pflanzliche Plankton (Phytoplankton) und das tierische Plankton (Zooplankton). Die Planktonorganismen bewegen sich zwar selbst, aber mit so geringer Kraft, dass sie von den Wasserströmungen verdriftet werden. Das Gegenteil des Planktons ist das Nekton, eine Sammelbezeichnung für alle Meerestiere, die aktiv und strömungsunabhängig schwimmen.

Population: eine Gruppe von Individuen derselben Art, die sich zur selben Zeit am selben Ort aufhalten. Eine Population bildet eine Fortpflanzungsgemeinschaft. Eine Art kann mehrere Populationen an verschiedenen Orten ausbilden.

Primärproduktion, -produzenten: der Aufbau von Biomasse durch Pflanzen oder Bakterien. Die Primärproduzenten gewinnen ihre Energie beispielsweise aus Sonnenlicht oder bestimmten chemischen Verbindungen und synthetisieren in ihrem Stoffwechsel energiereiche Substanzen – beispielsweise Kohlenhydrate. Diese Substanzen wiederum sind Lebensgrundlage der Tiere oder des Menschen.

Schelf(-bereich): der küstennahe, flache Teil des Meeresbodens. Er ist Bestandteil der Festlandmasse und fällt sanft bis zu einer durchschnittlichen Tiefe von 130 Metern ab. Der Schelf endet mit dem Festlandabhang.

Senke: ein natürliches Reservoir, das eine Substanz wie etwa Kohlendioxid in großen Mengen aufnimmt. Als Kohlenstoffsinken bezeichnet man zum Beispiel Wälder, den tiefen Ozean oder auch Korallen, bei denen das Kohlendioxid im Kalk gebunden ist.

stratosphärisch, Stratosphäre: Die Stratosphäre ist der Bereich der Atmosphäre, der etwa zwischen 15 und 50 Kilometern Höhe liegt. Die Stratosphäre weist zwischen 20 und 45 Kilometern Höhe eine erhöhte Ozonkonzentration auf. Diese Ozonschicht fängt einen großen Teil der für Lebewesen schädlichen ultravioletten Strahlung der Sonne ab.

Substrat: das Material, auf dem ein Organismus lebt, zum Beispiel Steine, auf denen sich Seepocken festsetzen.

Thermodynamik: ein Teilgebiet der Physik, das sich mit den Beziehungen zwischen Wärme und anderen Energieformen sowie deren möglichen Umformungen befasst. Wichtige Größen sind dabei Druck, Temperatur, mechanische Arbeit sowie Volumen-, Dichte- und Zustandsänderungen, die auch bei der Entstehung von Strömungen im Meer und in der Atmosphäre eine Rolle spielen.

Thermohaline Zirkulation: ein globales System oberflächennaher und tiefer Meeresströmungen, das durch Dichteunterschiede zwischen Wassermassen mit ungleichen Salzgehalten und Temperaturen angetrieben wird. Ein wichtiger Motor der thermohalinen Zirkulation ist die →Konvektion.

Treibhauseffekt: Wasserdampf, Kohlendioxid (CO₂) und andere klimarelevante Spurengase in der Atmosphäre wie etwa Methan (CH₄) lassen die kurzwellige Strahlung, die von der Sonne auf die Erde trifft, zunächst passieren. Diese wird an der Erdoberfläche in Wärme umgewandelt und zu einem großen Teil als langwellige Strahlung zurückgeworfen. Wie die Glasscheibe eines Treibhauses aber verhindern die Gase, dass die langwellige Wärmestrahlung in den Weltraum entweicht. Die Erde heizt sich auf. Der Treibhauseffekt ist ein natürliches Phänomen, das die Erde vor Auskühlung schützt. Durch die Zunahme der Konzentration von CO₂ und anderen Spurengasen verstärkt sich der Treibhauseffekt jedoch.

UN-Seerechtskonferenz: Zwischen 1973 und 1982 gab es drei UN-Seerechtskonferenzen (United Nations Convention on the Law of the Seas, UNCLOS), deren Ziel es war, ein international geltendes Seerecht zu etablieren. Das gelang mit der dritten UN-Seerechtskonferenz (UNCLOS III) im Jahr 1982. Ihr Ergebnis war die Schaffung des Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen (SRÜ). Bis heute wurde das SRÜ von 157 Staaten ratifiziert.

Abkürzungen

- AABW** Antarctic Bottom Water; Antarktisches Bodenwasser
- ARGO** Internationales Tiefendrifterprogramm
- ASCOBANS** Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic and North Seas; Internationales Abkommen zur Erhaltung der Kleinwale in der Nord- und Ostsee, des Nordostatlantiks und der Irischen See
- AUV** Autonomous Underwater Vehicle; autonomes Unterwasserfahrzeug
- AWZ** Ausschließliche Wirtschaftszone
- BIP** Bruttoinlandsprodukt
- BLE** Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
- BMELV** Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
- BRT** Bruttoregistertonne
- CBD** Convention on Biological Diversity; Biodiversitätskonvention
- CCS** Carbon Capture and Storage; CO₂-Abscheidung und -Speicherung
- CFCA** Community Fisheries Control Agency; Europäische Fischereiaufsichtsagentur
- CLCS** Commission on the Limits of the Continental Shelf; Kommission zur Begrenzung des Festlandssockels
- DIC** Dissolved anorganic carbon; gelöster anorganischer Kohlenstoff
- dwt** Deadweight Tonnage; Tragfähigkeit eines Schiffs in Tonnen
- EUFA** EU-Fischereiaufsichtsbehörde
- EuGH** Europäischer Gerichtshof
- FAO** Food and Agriculture Organization of the United Nations; Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen
- FDA** Food and Drug Administration; US Nahrungs- und Arzneimittelbehörde
- FFH-Richtlinie** Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie
- FMPs** Groundfish Fishery Management Plans; Managementpläne der Grundfisch-Fischerei
- GATT** General Agreement on Tariffs and Trade; Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen
- GFP** Gemeinsame Fischereipolitik der Europäischen Union
- GLODAP** Global Ocean Data Analysis Project; globales Messprogramm zur Erfassung von Umweltparametern in den Ozeanen
- GPS** Global Positioning System; globales Satellitensystem zur Positionsbestimmung
- HABs** Harmful Algal Blooms; schädliche Algenblüten
- HNLC** High nutrient, low chlorophyll; nährstoffreich und arm an Chlorophyll
- ICC** International Coastal Cleanup; internationale Küstensäuberung
- ICES** International Council for the Exploration of the Sea; Internationaler Rat für Meeresforschung
- IEA** Internationale Energieagentur
- IGH** Internationaler Gerichtshof
- IMO** International Maritime Organisation; Internationale Seeschiffahrts-Organisation
- IPANEMA** Initiative Partenariale Nationale pour l'émergence des Energies Marines; Nationale Initiative zur Förderung der Meeresenergie
- IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change; Weltklimarat
- ISA** International Seabed Authority; Internationale Meeresbodenbehörde
- ISM-Code** International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention; internationale Vereinbarung für den sicheren Schiffsbetrieb
- ITLOS** International Tribunal for the Law of the Seas; Internationaler Seegerichtshof
- ITQs** Individual transferable quotas; individuell transferierbare Quoten
- IUU-fishing** Illegal, unreported and unregulated fishing; illegale Fischerei
- IWC** International Whaling Commission; Internationale Walfangkommission → Glossar
- JIT** Just-in-time-Produktion; bedarfsgerechte Produktion
- LC** London Convention – Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter; London Konvention – Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen
- LNG** Liquefied Natural Gas; verflüssigtes Erdgas
- LOHAFEX** Experiment zur Düngung des Meeres mit Eisen
- LP** London Protocol; Aktualisierung der → LC

MARPOL International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung

MEY Maximum economic yield; maximaler ökonomischer Ertrag

MRSA Multiresistenter Staphylococcus aureus

MSC Marine Stewardship Council; gemeinnützige, von WWF und Unilever gegründete Organisation zur Zertifizierung von Fisch aus nachhaltiger Fischerei

MSY Maximum sustainable yield; maximaler nachhaltiger Ertrag

MThw Mittleres Tidehochwasser

NADW North Atlantic Deep Water; Nordatlantisches Tiefenwasser

NAFTA North American Free Trade Agreement; Nordamerikanisches Freihandelsabkommen

NAO Nordatlantische Oszillation → Glossar

NEAFC North East Atlantic Fisheries Commission; Nordostatlantische Fischereikommission

OECD Organisation for Economic Co-operation and Development; Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

OPA Oil Pollution Act; US-amerikanische Gesetzesvorschrift zur Vermeidung von Ölverschmutzungen

OSPAR Oslo-Paris-Konvention

OTEC Ocean Thermal Energy Conversion; Meereswärme-Energieumwandlung, Meereswärmekraftwerk

PATg Patentgesetz

PCB Polychlorierte Biphenyle

PFCs Polyfluorinated compounds; polyfluorierte Verbindungen

PFOS Perfluorooctansulfonat

POPs Persistent organic pollutants; persistente organische Schadstoffe

ppm Parts per million; Teile von einer Million, Millionstel

ROV Remotely Operated Vehicle; ferngesteuertes Fahrzeug

SRÜ Internationales Seerechtsübereinkommen

STECF Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries; Wissenschafts-, Technik- und Wirtschaftsausschuss für Fischerei

TAC Total allowable catch; Gesamtfangquote

TEU Twenty-foot Equivalent Unit; Standardcontainer

TRIPS Agreement on Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights; Übereinkommen über die handelsbezogenen Aspekte der Rechte des geistigen Eigentums

tsm Tonnen-Seemeile

TURF Territorial use rights in fisheries; territoriale Nutzungsrechte in der Fischerei

UNCED United Nations Conference on Environment and Development; Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung

UNCLOS United Nations Convention on the Law of the Seas; UN-Seerechtskonferenz → Glossar

UNCTAD United Nations Conference on Trade and Development; Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung

UNEP United Nations Environment Programme; Umweltprogramm der Vereinten Nationen

VDS Vessel Detection System; Schiffsortungssystem

VMS Vessel Monitoring System; Schiffsüberwachungssystem

VOS Voluntary Observing Ships Programme; freiwilliges Schiffsprogramm zur Umweltbeobachtung

WSSD World Summit on Sustainable Development, Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung

WTO World Trade Organization; Welthandelsorganisation

Autoren

> Für den ersten „World Ocean Review“ 2010 haben die Autorinnen und Autoren die Erkenntnisse ihrer jeweiligen Fachgebiete zusammengestellt, die von der breiten Mehrheit der Wissenschaftler getragen werden. Die meisten Verfasser forschen gemeinsam im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ zu Fragestellungen der Entwicklung unserer Meere.

Prof. Dr. Thomas Bosch, Biologe an der CAU Kiel. Die Fachgebiete von T. Bosch sind Entwicklungsbiologie, Evolutionsbiologie und Vergleichende Immunologie. Er beschäftigt sich mit Fragen der Musterbildung und der Evolution von Stammzellen sowie mit den Mechanismen der Immunabwehr in einfachen Organismen wie den Cnidaria (Nesseltiere) und den Urochordaten (Manteltiere). Evolution wird dabei als Grundlagenwissenschaft für die Medizin verstanden. In den molekularen Biowissenschaften hat er sich spezialisiert auf die Untersuchung der Evolution und Funktion von Genen, die beim Menschen relevant für die Ausbildung von Krankheiten sind.

www.uni-kiel.de/zoologie/bosch/index.html

Prof. Dr. Franciscus Colijn, Biologe am Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ) der CAU Kiel und Leiter des Instituts für Küstenforschung des GKSS Forschungszentrums in Geesthacht. F. Colijn beschäftigt sich mit der wissenschaftlichen Analyse des aktuellen Zustands und der Entwicklung der Küstenmeere. Seine Fachgebiete sind die Entwicklung von Beobachtungsmethoden der marinen Umwelt, Langzeitänderungen im Wattenmeer und der Nordsee sowie Probleme der Meeresverschmutzung.

www.gkss.de/institute/coastal_research/staff/006937_index_0006937.html

Prof. Dr. Ralf Ebinghaus, Chemiker im Institut für Küstenforschung der GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH. R. Ebinghaus leitet dort die Abteilung für Umweltchemie und lehrt als Professor (h.c.) an der Leuphana Universität in Lüneburg. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen Nachweis, Transport und Gas-/Wasseraustausch von besonders langlebigen chemischen Substanzen in der küstennahen, marinen und polaren Umwelt. Ebinghaus ist Editor der Zeitschrift „Environmental Chemistry“.

<http://coast.gkss.de/aos/staff/ebinghaus/>

Prof. Dr. Arne Körtzinger, Meereschemiker am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. Forschungsschwerpunkte von A. Körtzinger sind der marine Kohlenstoffkreislauf und seine anthropogene Störung, die Rolle von Sauerstoff als biogeochemischer Schalter und sensitiver Indikator für Klimawandel im Ozean sowie die Entwicklung und Erprobung neuer Methoden und Sensoren als auch autonomer Ozeanbeobachtungsansätze wie z. B. profilierenden Tiefendriftern.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=akoertzinger

Prof. Dr. Mojib Latif, Klimaforscher am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. M. Latif beschäftigt sich mit den Mechanismen und der Vorhersagbarkeit natürlicher Klimaschwankungen auf unterschiedlichen Zeitskalen (von Jahreszeiten bis hin zu Dekaden) und dem Einfluss des Menschen auf das Klima. Dazu entwickelt er Klimamodelle und vergleicht deren Ergebnisse mit den Beobachtungen.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=mlatif

Dr. Birte Matthiessen, Meeresbiologin am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. B. Matthiessen untersucht ökologische Regulationsmechanismen für das Zusammenleben von Organismen und die Konsequenzen des Verlusts von biologischer Vielfalt für die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen. Zusätzlich erforscht sie die Effekte der globalen Veränderungen für die biologische Vielfalt und deren Konsequenzen für die Funktionsfähigkeit der Ökosysteme.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=bmatthiessen

Prof. Dr. Frank Melzner, Meeresbiologe am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel und Leiter der Arbeitsgruppe „Ocean Acidification/Ozeanversauerung“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. F. Melzner untersucht die physiologischen Toleranzmechanismen von Meerestieren. Im Fokus seines Interesses steht hierbei die Antwort der Organismen auf die Ozeanversauerung als Folge des CO₂-Anstiegs in der Atmosphäre. Als Modellorganismen dienen ihm Seeigel, Tintenfische, Muscheln und Seesterne.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=fmelzner

Prof. Dr. Andreas Oschlies, Biogeochemiker am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. A. Oschlies entwickelt ökologische und biogeochemische Ozeanmodelle mit denen z. B. der Einfluss von Durchmischungsprozessen auf die biologische Produktion oder Rahmenbedingungen für den Gasaustausch mit der Atmosphäre untersucht werden können. Einen besonderen Interessenschwerpunkt bilden dabei die Kohlenstoffaufnahme des Ozeans und die Klimasensitivität dieses Prozesses.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=aoschlies

Dr. Sven Petersen, Mineraloge am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. S. Petersen erforscht die Genese und zeitliche Entwicklung submariner heißer Quellen und der mit ihnen assoziierten Erzablagerungen. Sein Interesse gilt dabei, neben der Untersuchung einer möglichen Rohstoffgewinnung aus dem Meer, der Erforschung des Untergrunds der Vorkommen durch Bohrungen und der Nutzung autonomer Unterwasserfahrzeuge für die Exploration auf schwarze und weiße Raucher.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=spetersen

Prof. Dr. Alexander Proelß, Rechtswissenschaftler für Öffentliches Recht mit dem Schwerpunkt Seerecht an der CAU Kiel und Leiter der Arbeitsgruppe „Law of the Sea/Seerecht“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. A. Proelß beschäftigt sich vor allem mit dem internationalen Seerecht und dem Umweltvölkerrecht, darüber hinaus mit ausgewählten Bereichen des Europa- und Verfassungsrechts. Zu seinen derzeitigen Aktivitäten zählen mehrere see- und umweltvölkerrechtliche Projekte (u. a. zur gemeinsamen Fischereipolitik, zum europäischen Artenschutz und zum Climate-Engineering).

www.intemat-recht.uni-kiel.de/team/professores/proelss

Prof. Dr. Martin Quaas, Wirtschaftswissenschaftler an der CAU Kiel und Leiter der Arbeitsgruppe „Fisheries and Overfishing/Lebende Ressourcen“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. Die Fachgebiete von M. Quaas sind Umwelt, Ressourcen- und Ökologische Ökonomik. Ein Ziel seiner Forschung ist die Entwicklung neuer Fischereimanagement-Konzepte und neuer, marktbasierter Instrumente der Fischereipolitik, die die Nachhaltigkeit der Fischerei fördern.

www.economics.uni-kiel.de/eree/Quaas_en.html

Prof. Dr. Till Requate, Volkswirtschaftler an der CAU Kiel. T. Requate beschäftigt sich mit Umweltpolitik und Klimaschutz. Dabei untersucht er vor allem Effizienz und Wirkung von Klimapolitiken, beschäftigt sich aber auch mit dem Problem der Überfischung und entwickelt daraus Fischereimanagement-Konzepte.

www.bwl.uni-kiel.de/Ordnung/index.php?link=requatephp&funktion=prof

Prof. Dr. Thorsten Reusch, Meeresbiologe am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. T. Reusch ist Leiter der Forschungseinheit „Evolutionsoökologie Mariner Fische“. Seine Interessen liegen im Bereich der Evolutionsbiologie und Populationsgenetik sowie der marinen Genomik. Auch untersucht er biologische Effekte des Globalen Wandels und beschäftigt sich mit mariner Invasionsbiologie und Wirt-Parasiten-Interaktionen.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=treusch

Prof. Dr. med. Philip Rosenstiel, Arzt und Molekularbiologe an der CAU Kiel und Leiter der Arbeitsgruppe „Marine Medicine/Marine Medizin“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. P. Rosenstiel beschäftigt sich mit der klinischen Umsetzung von molekularbiologischen Forschungsansätzen. Dabei untersucht er einfache marine oder aquatische Organismen hinsichtlich ihrer Abgrenzungsmechanismen gegenüber der Umwelt. Die hier erlangten Erkenntnisse hofft er in die Therapie von Erkrankungen an Grenzflächen beim Menschen einbringen zu können.

<http://www.zmb.uni-kiel.de/institute/ikmb/rosenstielkontakt>

Prof. Dr. Kerstin Schrottke, Geologin an der CAU Kiel und Leiterin der Arbeitsgruppe „Sea-Level Rise/Meeresspiegelanstieg“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. Forschungsschwerpunkt von K. Schrottke sind die Küsten der Erde, insbesondere Flussmündungen und hoch dynamische Watt- und Steilküsten, die sich durch natürliche Kräfte, aber auch durch menschliche Eingriffe schnell und oft folgenreich ändern. Mit ihrer Arbeitsgruppe analysiert sie die Prozesse, die an den Schnittstellen Land-Meer, Süßwasser-Salzwasser und Wassersäule-Sediment ablaufen, um Aussagen über Küstenentwicklung, -gefährdung und -schutz treffen zu können.

www.ifg.uni-kiel.de/396.html

Dipl.-Volkswirt Henning Sichelschmidt, Volkswirtschaftler am Institut für Weltwirtschaft der CAU Kiel. H. Sichelschmidt untersuchte institutionelle Aspekte des Verkehrs, wirtschaftliche Effekte der Verkehrsinfrastruktur und der Seeverkehrswirtschaft.

Kontakt über: ruediger.soltwedel@ifw-kiel.de

PD Dr. Ursula Siebert, Tierärztin am Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ) der CAU Kiel. U. Siebert untersucht die Verbreitung, den Gesundheitszustand und das Verhalten von marinen Säugetieren und Vögeln. Ihre ökologischen Studien beschäftigen sich besonders mit dem Einfluss von Umweltgiften auf die Organismen.

www.uni-kiel.de/ftzwest/ag7/mitarb/usiebert.shtml

Prof. Dr. Rüdiger Soltwedel, Volkswirtschaftler am Institut für Weltwirtschaft der CAU Kiel. Zu den Schwerpunkten von R. Soltwedel gehörten räumliche Aspekte der europäischen Integration, Innovation und Clusterbildung und Liberalisierung im Bereich der Netzinfrastruktur. Er hat sich im Rahmen der Analyse der Verkehrswirtschaft mit der Schifffahrtsbranche beschäftigt.

www.ifw-members.ifw-kiel.de/~ruediger_soltwedel_ifw_kiel_de

Prof. Dr. Ulrich Sommer, Meeresbiologe am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. U. Sommer beschäftigt sich mit dem Einfluss des Klimawandels auf aquatische Ökosysteme und untersucht marine Ökosysteme und Nahrungsnetze. Hier stehen die Wechselbeziehungen der Arten, speziell die Konkurrenz und Ernährung, im Mittelpunkt seiner Arbeit.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=usommer

Prof. Dr. Karl Statteger, Sedimentologe an der CAU Kiel. Änderungen des Meeresspiegels, heute und in vergangenen Zeiten, liegen im Fokus von K. Stattegers Forschungsarbeiten. Weiter gilt sein Interesse der Entwicklung von Küsten und vorgelagerten Schelfen weltweit sowie den Mündungssystemen großer Flüsse. Neben Beobachtungen und Messungen vor Ort arbeitet er auch an Modellen, um die Verlagerung von Sedimenten zu erforschen.

www.ifg.uni-kiel.de/381.html

Prof. Dr. Horst Sterr, Geograph an der CAU Kiel. H. Sterr beschäftigt sich mit der Klimafolgenforschung und Küstengeographie. Dabei versucht er die Folgen von Naturkatastrophen abzuschätzen. Außerdem untersucht er die Auswirkungen des Klimawandels auf Küstenregionen und Meere und beschäftigt sich mit der Analyse und Kostenabschätzung zu erwartender Schäden in potentiell gefährdeten Regionen der Erde.

www.sterr.geographie.uni-kiel.de/pages/lebenslauf.htm

Dr. Renate Sturm, Lebensmittelchemikerin am Institut für Küstenforschung des GKSS Forschungszentrums in Geesthacht, Abteilung Umweltchemie. Untersuchungen zum Vorkommen und Verbleib von organischen Schadstoffen (POPs) in küstennahen und marinen Gebieten stehen im Fokus ihrer Arbeit.

www.gkss.de/institute/coastal_research/structure/system_analysis/KSC/staff/003381/index_0003381.html.de

Prof. Dr. Tina Treude, Meeresbiologin und Biogeochemikerin am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel und Leiterin der Arbeitsgruppe „Seafloor Warming/Meeresbodenerwärmung“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. T. Treude untersucht mögliche Folgen der klimatisch bedingten Meeresbodenerwärmung für die Stabilität von Gashydraten und damit verbundene biogeochemische Prozesse im Meeresboden und im Wasser. Ein Schwerpunkt ihrer Arbeiten sind mikrobielle Prozesse an Kohlenwasserstoffquellen und in Sedimenten in Sauerstoffminimumzonen.

www.ifm-geomar.de/index.php?id=ttreude

Prof. Dr. Athanasios Vafeidis, Geograph an der CAU Kiel und Leiter der Arbeitsgruppe „Coasts at Risks/Küstengefährdung“ im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. A. Vafeidis untersucht die Gefährdung von Küstengebieten durch Meeresspiegelanstieg und leitet die Juniorforscherguppe „Coastal Risks and Sea-Level Rise“. Im Rahmen seiner Forschung beschäftigt er sich insbesondere mit der integrativen Analyse, Bewertung und Modellierung von Risiken in Küstengebieten. Dabei werden sowohl physische als auch sozioökonomische Auswirkungen vor dem Hintergrund eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs betrachtet.

www.crslr.uni-kiel.de/people.php?id=1

Dipl.-Biol. Carlo van Bernem, Meeresökologe am Institut für Küstenforschung des GKSS Forschungszentrums in Geesthacht. Seine Fachgebiete sind die Ökologie im Wattenmeer und das Küstenzonenmanagement. Einer seiner Forschungsschwerpunkte ist die Meeresverschmutzung durch Öleinträge.

Dr. Justus van Beusekom, Meeresbiologe am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in List/Sylt. J. van Beusekoms wissenschaftlicher Schwerpunkt ist die Küstenökologie. Dabei untersucht er die Biogeochemie und die biologische Vielfalt der Küste unter globalen und regionalen Veränderungen, Küstensysteme unter globalem und regionalem Druck und die Integration der Beobachtungen für das Küstenmanagement.
www.awi.de/People/show?beusekom

Prof. Dr. Martin Visbeck, Physikalischer Ozeanograph und Stellvertreter der Direktor am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel, und Sprecher des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“. Forschungsschwerpunkte von M. Visbeck sind die Ozeanzirkulation und die Klimadynamik im Atlantik. Zusätzlich ist er Mitglied in zahlreichen internationalen Arbeitsgruppen ebenso wie in der Senatskommission für Ozeanographie der Deutschen Forschungsgemeinschaft und im Nationalen Komitee für Global Change Forschung.
www.ifm-geomar.de/index.php?id=mvisbeck

Prof. Dr. Martin Wahl, Meeresbiologe am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. M. Wahl untersucht die Lebensgemeinschaften am Meeresboden auf ihre Wechselwirkungen untereinander und mit ihrer Umwelt. Seine Interessenschwerpunkte liegen in den Bereichen Biodiversität und Globaler Wandel, Stressökologie sowie direkten und indirekten Interaktionen in Ökosystemen. Zusätzlich beschäftigt er sich mit den Verteidigungsstrategien mariner Organismen gegen Fraß und Aufwuchs.
www.ifm-geomar.de/index.php?id=mwahl

Prof. Dr. Klaus Wallmann, Geochemiker am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. Interessenschwerpunkte von K. Wallmann sind Gashydrate im Meeresboden, ihre Entstehung und Stabilität sowie kalte Quellen und Schlammvulkane am Meeresboden. Zudem untersucht er den mikrobiellen Abbau organischer Substanzen in Meeressedimenten und die Rückführung von Nährstoffen vom Sediment in das Ozeanwasser.
www.ifm-geomar.de/index.php?id=kwallmann

Dr. Florian Weinberger, Meeresbiologe am Leibniz-Institut für Meereswissenschaften IFM-GEOMAR, Kiel. Im Fokus der Arbeit von F. Weinberger liegen die Verteidigung und erbliche Immunität von Großalgen und die Invasionsökologie der Großalgen. Er untersucht zudem die Wechselwirkungen zwischen eingeschleppten Makroalgen und einheimischen Artengemeinschaften.
www.ifm-geomar.de/index.php?id=2153&L=0

Weitere Mitarbeiter dieses Bandes:

Moritz Bollmann, Institut für Volkswirtschaftslehre der CAU

Dr. Rainer Froese, IFM-GEOMAR

Dr. Setareh Khalilian, Institut für Weltwirtschaft

Johanna Reichenbach, Institut für Volkswirtschaftslehre der CAU

Dr. Jörn O. Schmidt, Institut für Volkswirtschaftslehre der CAU

Dr. Rüdiger Voss, Institut für Volkswirtschaftslehre der CAU

Partner

Ozean der Zukunft: Im Kieler Exzellenzcluster bündeln Meeres-, Geo- und Wirtschaftswissenschaftler sowie Mediziner, Mathematiker, Juristen und Gesellschaftswissenschaftler ihr Fachwissen und untersuchen gemeinsam den Ozean- und Klimawandel. Insgesamt haben sich mehr als 250 Wissenschaftler aus sechs Fakultäten der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, des Leibniz-Instituts für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR), des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) und der Muthesius Kunsthochschule zusammengeschlossen.

IOI: Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nicht-Regierungsorganisation von Professor Elisabeth Mann Borgese gegründet. Es besteht aus einem Netzwerk von verschiedenen Niederlassungen, die über die ganze Welt verteilt sind, und hat seinen Hauptsitz in Malta. Das IOI setzt sich für eine friedliche und nachhaltige Nutzung des Ozeans ein.

mare: Die Zeitschrift der Meere wurde 1997 von Nikolaus Gelpke in Hamburg gegründet und erscheint alle zwei Monate in deutscher Sprache. Mare rückt den Stellenwert, den das Meer als Lebens-, Wirtschafts- und Kulturraum für den Menschen bietet, in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Neben dem Magazin, das vielfach für seine hochwertigen Reportagen und Fotostrecken ausgezeichnet wurde, bringt der mareverlag zweimal im Jahr ein Buchprogramm heraus.

Danksagung

Die Erstellung einer Publikation wie des „World Ocean Review“ ist in erster Linie ein Unterfangen, das mit hohem Aufwand verbunden ist. Daher gilt mein Dank zuerst allen beteiligten Wissenschaftlern des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“, die sich dieser zeitintensiven Aufgabe gestellt haben und mit ihren wissenschaftlichen Texten ein äußerst solides und belastbares Fundament gelegt haben. Ein herzliches Dankeschön auch dem gesamten Organisationsteam des Clusters für die reibungslose Kommunikation und die Arbeit hinter den Kulissen.

Dank gebührt darüber hinaus insbesondere auch dem Wissenschaftsjournalisten Tim Schröder, der den einzelnen Texten die Struktur und die allgemeine Verständlichkeit gegeben hat, die es nun auch den „Nicht-Wissenschaftlern“ ermöglicht, den roten Faden nicht aus den Augen zu verlieren. Im Zusammenwirken mit Simone Hoschack, die für die Gestaltung verantwortlich war, Petra Kossmann, die die Bildredaktion innehatte, und Dimitri Ladischensky, der das Lektorat betreute, möchte ich zuletzt auch Jan Lehmköster herzlich danken, der als Gesamtprojektleiter auf maribus-Seite den „World Ocean Review“ von Beginn an federführend begleitet hat.

Nikolaus Gelpke

Geschäftsführer maribus gGmbH

Quellenverzeichnis

Kapitel 2

Archer, D., 2007. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change. *Biogeosciences Discussion* 4: 993–057.

Buffett, B & D. Archer, 2004. Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth and Planetary Science Letters* 227: 185–199.

Chan, F., J. A. Barth, J. Lubchenco, A. Kirincich, H. Weeks, W. T. Peterson & B. A. Menge, 2008. Emergence of anoxia in the California current large marine ecosystem. *Science* 319: 920–920.

Diaz, R. J. & R. Rosenberg, 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321: 926–929.

Hall-Spencer, J. M., R. Rodolfo-Metalpa, S. Martin, E. Ransome, M. Fine, S. M. Turner, S. J. Rowley, D. Tedesco & M.-C. Buia, 2008. Volcanic carbon dioxide vents reveal ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454: 96–99.

Hester, K. C., & P. G. Brewer, 2009. Clathrate hydrates in nature. *Annual Review of Marine Sciences* 1: 303–327.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller (eds.), Cambridge University Press, 996 pp.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

Joos, F., G. K. Plattner, T. F. Stocker, A. Körtzinger & D. W. R. Wallace, 2003. Trends in marine dissolved oxygen: implications for ocean circulation changes and carbon budget. *Eos, Transactions of the American Geophysical Union* 84: 197.

Karstensen, J., L. Stramma & M. Visbeck, 2008. Oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. *Progress in Oceanography* 77: 331–350.

Keeling, R. F., A. Körtzinger & N. Gruber, 2010. Ocean deoxygenation in a warming world. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 2: 463–493.

Klauda, J. B., & S. I. Sandler, 2005. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment. *Energy & Fuels* 19: 459–470.

Körtzinger, A., J. Schimanski, U. Send & D. W. R. Wallace, 2004. The ocean takes a deep breath. *Science* 306: 1337–1337.

Körtzinger, A., 2010. Der globale Kohlenstoffkreislauf im Anthropozän – Betrachtung aus meereschemischer Perspektive. *Chemie in unserer Zeit* 44: 118–129.

Kvenvolden, K., 1993. A primer on gas hydrates. U.S. Geological Survey 1570: 279–291.

Kvenvolden, K., 1993. Gas hydrates – geological perspective and global change. *Review of Geophysics* 31, 2: 173–187.

Kvenvolden, K. A., 1988. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chemical Geology* 71: 41–51.

Kvenvolden, K. A., 1988. Methane hydrates and global climate. *Global Biogeochemical Cycles* 2, 3: 221–229.

Riebesell, U., A. Körtzinger & A. Oschlies, 2009. Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106: 20602–20609.

Sabine, C. L., R. A. Feely, N. Gruber, R. M. Key, K. Lee, J. L. Bullister, R. Wanninkhof, C. S. Wong, D. W. R. Wallace, B. Tilbrook, F. J. Millero, T.-H. Peng, A. Kozyr, T. Ono & A. F. Rios, 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305: 367–371.

Shakhova, N., I. Semiletov & G. Penteleev, 2005. The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: implications for the marine methane cycle. *Geophysical Research Letters* 32, doi:10.1029/2005GL022751.

Stramma, L., G. C. Johnson, J. Sprintall & V. Mohrholz, 2008. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science* 320: 655–658.

Takahashi, T., S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson & Y. Nojiri, 2002. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep-Sea Research II* 49: 1601–1622.

Takahashi, T., S. C. Sutherland, R. Wanninkhof, C. Sweeney, R. A. Feely, D. W. Chipman, B. Hales, G. Friederich, F. Chavez, C. Sabine, A. Watson, D. C. E. Bakker, U. Schuster, N. Metzl, H. Yoshikawa-Inoue, M. Ishii, T. Midorikawa, Y. Nojiri, A. Körtzinger, T. Steinhoff, M. Hoppema, J. Olafsson, T. S. Arnarson, B. Tilbrook, T. Johannessen, A. Olsen, R. Bellerby, C. S. Wong, B. Delille, N. R. Bates & H. J. W. de Baar, 2009. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep-Sea Research II* 56: 554–577, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009.

Vaquer-Sunyer, R., & C. M. Duarte, 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 15452–15457.

Watson, A. J., U. Schuster, D. C. E. Bakker, N. R. Bates, A. Corbière, M. González-Dávila, T. Friedrich, J. Hauck, C. Heinze, T. Johannessen, A. Körtzinger, N. Metzl, J. Olafsson, A. Olsen, A. Oschlies, X. A. Padin, B. Pfeil, J. M. Santana-Casiano, T. Steinhoff, M. Telszewski, A. F. Rios, D. W. R. Wallace & R. Wanninkhof (2009). Tracking the variable North Atlantic sink for atmospheric CO₂. *Science* 326: 1391–1393.

Westbrook, G. K., K. E. Thatcher, E. J. Rohling, A. M. Piotrowski, H. Pälike, A. H. Osborne, E. G. Nisbet et al., 2009. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin. *Geophysical Research Letters* 36, doi:10.1029/2009GL039191.

Kapitel 3

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri & A. Reisinger (eds.)]. IPCC, 104 pp.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2006. Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer, Sondergutachten.

Kapitel 4

Böhlmann, D., 1991. Ökologie von Umweltbelastungen in Boden und Nahrung. aus der Reihe: Basiswissen Biologie, Band 5. Gustav Fischer Verlag.

Cloern, J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series* 210: 225–253.

Conley, D.J., et al., 2009. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science* 323: 1014–1015.

Diaz, R.J., & R. Rosenberg, 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321: 926–929.

Dietz, R. et al., 2008. Increasing Perfluoroalkyl Contaminants in East Greenland Polar Bears (*Ursus maritimus*): A New Toxic Threat to the Arctic Bears. *Environmental Science & Technology* 42: 2701–2707.

Duarte, C. M., D.J. Conley, J. Carstensen & M. Sanchez-Camacho, 2009. Return to Neverland: Shifting baselines affect eutrophication restoration targets. *Estuaries and Coasts* 32: 29–36.

Greenpeace International, Plastic Debris in the World's Oceans.

Hall, K., 2000. Impacts of Marine Debris and Oil. Economic and Social Costs to Coastal Communities. Kommunenes Internasjonale Miljøorganisasjon (KIMO).

Kärman, A., et al., 2006. Perfluorinated Chemicals in relation to other persistent organic pollutants in human blood. *Chemosphere* 64: 1582–1591.

Liu, D., K.J. Keesing, Q. Xing & P. Shi, 2009. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. *Marine Pollution Bulletin* 58: 888–895.

Ocean Conservancy, Trash Travels, 2010 Report, From Our Hands to the Sea, Around the Globe, and through time.

Pabel, U., et al., 2008. Toxikologie der Perfluorooctansäure (PFOA) und der Perfluorooctansulfonsäure (PFOS). *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* 3: 252–258.

Seitzinger, S.P., J.A. Harrison, E. Dumont, A.H.W. Beusen & A.F. Bouwman, 2005. Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: an overview of global Nutrient Export from WaterSheds (NEWS) models and their application. *Global Biogeochemical Cycles* 19, GB4S01, doi:10.1029/2005GB002606.

Smithwick et al., 2006. Temporal trends of perfluoroalkyl contaminants in polar bears (*Ursus maritimus*) from two locations in the North American Arctic, 1972–2002. *Environmental Science & Technology* 40: 1139–1143.

South Carolina Sea Grant Consortium, South Carolina Department of Health & Environmental Control, Ocean and Coastal Resource Management, Centers for Ocean Sciences Education Excellence Southeast, NOAA, 2008.

Thompson, R. C., Y. Olsen, R. P. Mitchell, A. Davis, S. J. Rowland, A. W. G. John, D. McGonigle & A. E. Russell, 2004. Lost at sea: Where is all the plastic? *Science* 304: pp. 838.

UNEP, 2009. Marine Litter: A global Challenge.

UNEP, 2009. UNEP/IOC Guidelines on Survey and Monitoring of Marine Litter

UNEP Regional Seas Reports and Studies No. 186, IOC Technical Series No. 83.

UNEP/FAO, 2009. UNEP regional seas reports and studies 185: Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear.

<http://marine-litter.gpa.unep.org>

<http://www.pops.int> (Stockholm Konvention 2001)

<http://www.pops.int> (COP4 to the Stockholm Convention on POPs from 4–8 May 2009 in Geneva)

Kapitel 5

Bax, N., A. Williamson, M. Agüero, E. Gonzalez & W. Geeves, 2003. Marine invasive alien species: A threat to global biodiversity. *Marine Policy* 27: 313–323.

Briggs, J.C., 2007. Marine biogeography and ecology: invasions and introductions. *Journal of Biogeography* 34: 193–198.

Kawecki, T.J., 2008. Adaptation to Marginal Habitats. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 39: 321–342.

Molnar, J.L., R.L. Gamboa, C. Revenga & M.D. Spalding, 2008. Assessing the global threat of invasive species to marine biodiversity. *Frontiers in Ecology and Environment* 6: 485–492.

Parnes, C., 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 37: 637–69.

Reise, K., S. Olenin & D.W. Thielges, 2006. Are aliens threatening European aquatic coastal systems? *Helgoland Marine Research* 60: 77–83.

Sommer, U., & K. Lengfellner, 2008. *Global Change Biology* 14: 1199–1208.

Sommer, U., N. Aberle, A. Engel, T. Hansen, K. Lengfellner, M. Sandow, J. Wohlers, E. Zöllner & U. Riebesell, 2007. An indoor mesocosm system to study the effect of climate change on the late winter and spring succession of Baltic Sea phyto- and zooplankton. *Oecologia* 150: 655–667.

Kapitel 6

Commission of the European Communities, 2008. Fishing Opportunities for 2009: Policy Statement from the European Commission, http://ec.europa.eu/fisheries/publications/factsheets/legal_texts/com_08_331_en.pdf

Andersen, J.L., M. Nielsen & E. Lindebo, 2008. Economic gains of liberalizing access to fishing quotas within the European Union. *Marine Policy*, doi:10.1016/j.marpol.2008.11.004.

European Economic and Social Committee (EESC), NAT/373, February 2008. Opinion on EU fisheries management tools, NAT/373 – CESE 273/2008 (ES) JH/CD/ij, <http://www.eesc.europa.eu>

Daw, T., & T. Gray, 2005. Fisheries science and sustainability in international policy: a study of failure in the European Union's Common Fisheries Policy. *Marine Policy* 29: 189–197.

Foss, T., T. Matthiasson & H. Ulrichsen (eds.), 2003. Iceland, Norway and the EC Common Fisheries Policy. Norwegian Institute of International Affairs.

Franchino, F., & A. Rahming, 2002. Biased Ministers, Inefficiency and Control in Distributive Policies: an Application to the EC Fisheries Policy. *Liuc Papers No. 109, Serie Economica e Istituzioni* 7.

Froese, R., 2004. Keep it simple: three indicators to deal with overfishing. *Fish and Fisheries* 5: 86–91.

Froese, R., A. Stern-Pirlot, H. Winker & D. Gascuel, 2008. Size Matters: How Single-Species Management Can Contribute To Ecosystem-based Fisheries Management. *Fisheries Research* 92: 231–241.

Frost, H., P. Andersen, 2006. The Common Fisheries Policy of the European Union and fisheries economics. *Marine Policy* 30: 737–746.

Grieve, C., 2001. Reviewing the Common Fisheries Policy. Institute for European Environmental Policy, London.

Johnson, C., 2008. Fisheries Enforcement in European Community Waters Since 2002 – Developments in Non-Flag Enforcement. *The International Journal of Marine and Coastal Law* 23: 249–270.

Kooiman, J., & M. Bavinck, 2005. Interactive fisheries governance, Centre for Maritime Research (MARE) Amsterdam.

Lindebo, E., 2005. Role of Subsidies in EU Fleet Capacity Management. *Marine Resource Economics*, 20: 445–466.

Lequesne, C., 2000. Quota Hopping: The Common Fisheries Policy Between States and Markets. *Journal of Common Market Studies* 38, 5: 779–793.

Morin, M., 2000. The fisheries resources in the European Union. The distribution of TACs: principle of relative stability and quota-hopping. *Marine Policy* 24: 265–273.

Myers, R.A. & G. Mertz, 1998. The limits of exploitation: a precautionary approach. *Ecological Applications* 8: 165–169.

Owen, D., 2004. Interaction between the EU Common Fisheries Policy and the Habitats and Birds Directives. Institute for European Environmental Policy, IEEP Policy Briefing.

Stenseth, N.C., & E.S. Dunlop, 2009. Unnatural selection. *Nature* 457: 803–804.

Kapitel 7

IEA-OES, 2008. Annual Report, <http://www.iea-oceans.org>

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2006. Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer, Sondergutachten.

http://www.bgr.bund.de/nn_322848/DE/Themen/Energie/Produkte/energierohstoffe__2009.html?__nnn=true

<http://www.iset.uni-kassel.de/oceanenergy/>

Kapitel 8

Boysen-Hogrefe, J., K.-J. Gern, N. Jannsen & J. Scheide, 2009. Weltwirtschaft expandiert wieder. Institut für Weltwirtschaft, Kieler Diskussionsbeiträge: 468–469, Kiel.

http://www.ifw-kiel.de/wirtschaftspolitik/konjunkturprognosen/konjunkt/2009/konjunkturprognosen_welt_09_09.pdf

Boysen-Hogrefe, J., J. Dovern, K.-J. Gern, N. Jannsen, B. van Roye & J. Scheide, 2010. Erholung der Weltkonjunktur ohne große Dynamik, Institut für Weltwirtschaft, Kieler Diskussionsbeiträge 470/471, Kiel.

<http://www.ifw-kiel.de/wirtschaftspolitik/konjunkturprognosen/konjunkt/2009/4-09-int.pdf>

Brooks, M.R., 2009. Liberalization in Maritime Transport, OECD and International Transport Forum 2009, Workshop 1, Intermodal Transport & Supply Chains.

Brooks, M.R., 2006. International Trade in Manufactured Goods. In: *The handbook of maritime economics and business*. London [u.a.]: 90–105.

Fleming, D.K., 2006. Patterns of International Ocean Trade. In: *The handbook of maritime economics and business*. London [u.a.]: 65–89.

Hummels, D., 2007. Transportation Costs and International Trade in the Second Era of Globalization. *Journal of Economic Perspectives* 21, 3: 131–154.

ICC International Maritime Bureau, January 2009. Piracy and Armed Robbery Against Ships Annual Report, 1 January – 31 December 2008, London.

ICC International Maritime Bureau, October 2009. Piracy and Armed Robbery Against Ships for the Period 1 January – 30 September 2009, London.

ICC International Maritime Bureau, 2009. Live Piracy Map.

http://www.icc-ccs.org/index.php?option=com_fabrik&view=visualization&controller=visualization.googlemap&Itemid=219

ICC International Maritime Bureau, 2005. Live Piracy Map.
http://www.icc-ccs.org/index.php?option=com_fabrik&view=visualization&controller=visualization.googlemap&Itemid=104

Leeson, P.T., An-arrgh-chy, 2007. The Law and Economics of Pirate Organization. *Journal of Political Economy* 115, 6: 1049–1094.

Lloyd's Register – Fairplay Ltd., London, verschiedene Jahrgänge.

Møller, B., 2009. Piracy, Maritime Terrorism and Naval Strategy, DIIS Report 2009–2, Copenhagen.

Møller, B., 2009. Piracy off the Coast of Somalia. DIIS Brief.

OECD Maritime Transport Committee, 2003. Security in Maritime Transport: Risk Factors and Economic Impact. Paris.

OECD, ECMT, 2005. Container Transport Security Across Modes. Paris.

Rodrigue, J.-P., B. Slack & T. Notteboom. In: *The Geography of Transport Systems*, Chapter 3, Concept 4, Maritime Transportation,
<http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch3en/conc3en/ch3c4en.html>

UNCTAD, 2008. Maritime transport and the climate change challenge,
http://www.unctad.org/en/docs/cimem1d2_en.pdf, 09. 12. 2008

UNCTAD, 2008. Review of Maritime Transport. New York and Geneva.

UNCTAD, 2009. Review of Maritime Transport. New York and Geneva.

UNCTAD, 2009. Investment Policy Monitor 1, 04.12.2009,
http://www.unctad.org/en/docs/webdiaeia200911_en.pdf

UNCTAD, 2009. Report of the Multi-year Expert Meeting on Transport and Trade Facilitation on its first session, http://www.unctad.org/en/docs/cimem1d3_en.pdf

Widdowson, D., & S. Holloway, 2009. Maritime Transport Security Regulation: Policies, Probabilities and Practicalities. OECD and International Transport Forum 2009, Workshop 4: Ensuring a Secure Global Transport System.

WTO, 2009. Annual Report, http://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/anrep_e/anrep09_e.pdf

WTO, 2009. Overview of Developments in the International Trading Environment. Part A: Trade and Trade-related Developments in 2009, http://www.wto.org/english/news_e/news09_e/wt_tpr_ov_12_a_e.doc

http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D26047/INF-10.pdf

<http://www.marisec.org/shippingfacts/worldtrade/types-of-ship.php>

Kapitel 9

Blunt, J., W., B. R. Copp, W. P. Hu, M. H. Munro, P. T. Northcote & M. R. Prinsep, 2008. Marine natural products. *Natural Product Reports* 25, 1: 35–94.

Blunt, J. W., B. R. Copp, W. P. Hu, M. H. Munro, P. T. Northcote & M. R. Prinsep, 2009. Marine natural products. *Natural Product Reports* 26, 2: 170–244.

Faulkner, D. J., 2001. Marine natural products. *Natural Product Reports* 18, 1: 1–49.

Faulkner, D. J., 2002. Marine natural products. *Natural Product Reports* 19, 1: 1–48.

Lawrence, R. N., 1999. Rediscovering natural product biodiversity. *Drug Discovery Today* 4, 10: 449–451.

Mayer, A. M. & K. R. Gustafson, 2008. Marine pharmacology in 2005–2006: antitumour and cytotoxic compounds. *European Journal of Cancer* 44, 16: 2357–2387.

Mayer, A. M., A. D. Rodriguez, R. G. Berlinck & M. T. Hamann, 2009. Marine pharmacology in 2005–6: Marine compounds with anthelmintic, antibacterial, anticoagulant, antifungal, anti-inflammatory, antimalarial, antiprotozoal, antituberculosis, and antiviral activities; affecting the cardiovascular, immune and nervous systems, and other miscellaneous mechanisms of action. *Biochimica et Biophysica Acta* 1790, 5: 283–308.

Nealson, K. H., & J. C. Venter, 2007. Metagenomics and the global ocean survey: what's in it for us, and why should we care? *ISME Journal* 1, 3: 185–187.

Rusch, D. B., A. L. Halpern, G. Sutton, K. B. Heidelberg, S. Williamson, S. Yooseph, D. Wu, J. A. Eisen, J. M. Hoffman, K. Remington, K. Beeson, B. Tran, H. Smith, H. Baden-Tillson, C. Stewart, J. Thorpe, J. Freeman, C. Andrews-Pfannkoch, J. E. Venter, K. Li, S. Kravitz, J. F. Heidelberg, T. Utterback, Y. H. Rogers, L. I. Falcon, V. Souza, G. Bonilla-Rosso, L. E. Eguarte, D. M. Karl, S. Sathyendranath, T. Platt, E. Bermingham, V. Gallardo, G. Tamayo-Castillo, M. R. Ferrari, R. L. Strausberg, K. Nealson, R. Friedman, M. Frazier & J. C. Venter, 2007. The Sorcerer II Global Ocean Sampling expedition: northwest Atlantic through eastern tropical Pacific. *PLoS Biology* 5, 3: e77.

Yooseph, S., G. Sutton, D. B. Rusch, A. L. Halpern, S. J. Williamson, K. Remington, J. A. Eisen, K. B. Heidelberg, G. Manning, W. Li, L. Jaroszewski, P. Cieplak, C. S. Miller, H. Li, S. T. Mashiyama, M. P. Joachimiak, C. van Belle, J. M. Chandonia, D. A. Soergel, Y. Zhai, K. Natarajan, S. Lee, B. J. Raphael, V. Bafna, R. Friedman, S. E. Brenner, A. Godzik, D. Eisenberg, J. E. Dixon, S. S. Taylor, R. L. Strausberg, M. Frazier & J. C. Venter, 2007. The Sorcerer II Global Ocean Sampling expedition: expanding the universe of protein families. *PLoS Biology* 5, 3: e16.

Kapitel 10

Gilles, A., M. Scheidat & U. Siebert, 2009. Seasonal distribution of harbour porpoises and possible interference of offshore wind farms in the German North Sea. *Marine Ecology Progress Series* 383: 295–307.

Macnab, R., P. Neto & R. van de Pol, 2001. Cooperative Preparations for Determining the Outer Limit of the Juridical Continental Shelf in the Arctic Ocean: A Model for Regional Collaboration in Other Parts of the World?, *IBRU Boundary and Security Bulletin*: 86 ff.

Index

Gefettete Seitenzahlen verweisen auf diejenigen Textstellen, die für das Verständnis besonders wichtig sind.

11. September 2001 174 ff.
200-Seemeilenzone 201 ff.
2500-Meter-Wassertiefenlinie 207 ff.

A

abiotische Bedingungen 103
Abkommen zur Erhaltung der Kleinwale in der Nord- und Ostsee, des Nordostatlantiks und der Irischen See (Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic, North East Atlantic, Irish and North Seas, ASCOBANS) 205
Abwässer 76
Acqua alta 64
aerob 50
Afrika 143, 174
Airgun 142
Akkumulation 61 ff.
Alaska 155
Alaska-Pollack 125
Alaska-Seelachs 126
Albatross 88
Albedo 24, 59
Alexandrium 112
Algen 44, 105 f., 111
Algenblüte 76 ff., 102 ff.
Alkaloide 183
Alpha Ventus 156
anaerob 50
Anomalie des Wassers 17
Anschlusszone 200 ff.
Antarktis 11, 57 f.
Antarktisches Bodenwasser (Antarctic Bottom Water, AABW) 18
anthropogen 107, 217
Antibiotika 186
Aquakultur 76, 110 ff., 120 f.
Aquaristik 110
Ara-A 182 ff.
Ara-C 182 ff.
Arabinose 181
Arabische Halbinsel 174
Arabischer Golf 143 ff.
Arachnoidiscus 40
ARGO 47
Arktis 49 ff., 145, 177, 208 ff.
Ärmelkanal 86
Arminin 186
Arteinschleppung/-verschleppung 89, 110 ff.
Asseln 115 f.
Assuan-Staudamm 63
Asterias amurensis 111
Asthma bronchiale 191
Atlantik 143, 148
Atlantik-Hering 125
Atmosphäre 10, 17, 36 ff., 44 ff., 217
Atmosphäre-Ozean-Flussmethode 33
Auftriebsgebiet 20 f., 76, 217
Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) 124, 201 ff.
Aussüßung 102
Austern 135
Austral-Asien 143 f.
Australien 148
Autonomous Underwater Vehicle (AUV) 150

autotroph 41
Azorenhoch 10, 217

B

Bacteroidetes 191
Bahamas 69
Bakterien 51, 93 ff., 188 ff.
Bakterienstämme 180
Ballastwasser 110 ff.
Bangladesch 68 ff., 143
Barriereorgane 189 ff.
Basislinie 203 ff.
Baumkurre 134
Bauxit 169
Befang 131 f.
Bekämpfungsplan 97
Belgien 69
Bemessungshöhe 66
Benthische Invertebraten 40
Bergbaurecht 207
Beringsee 126
Beroë ovata 112
Bestandsdichte 126
Bikarbonat 37 ff., 51
bioaktive Substanzen 180
biochemisch 180
Biodiversität 111, 180, 217
Biodiversitätskonvention 217
biogen 96, 217
biogeochemisch 13, 47, 106, 217
biologische Vielfalt 114 ff.
Biolumineszenz 189
Biomasse 44, 48, 107, 114, 142
Bioremediation 97
Biosphäre 10 f.
Bioturbation 94
BIP 164 f.
Blasentang (*Fucus vesiculosus*) 102 ff., 116 f.
Bodenschätze 200 ff.
Bodenwasser 152 ff.
Bohrinsel 92 ff.
Bohrplattform 92 ff.
Borkum 157
Bornholmer Becken 137
Brandrodung 29
Brandungszone 66
Brasilien 143 ff.
Bremen 69
brown tides 77
Bruttoregistertonne (BRT) 168
Bulk Carrier 167 ff.
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) 161

C

Caenorhabditis elegans 190
Calanus finmarchicus 106
Calanus helgolandicus 106
Carbon Capture and Storage (CCS) 154
Carl Sprengel 81
Carteret-Inseln 72
Caulerpa taxifolia 111
Cephalopoden 40
Chemotherapeutika 183
Cheyenne-Gasfeld 145
Chile 20, 135

China 69, 125, 142, 146 ff., 154, 158, 166 ff.
Clarion-Clipperton-Zone 147
Clathrate 48 f.
Clownfisch 40 ff.
Cnidaria 188 f.
Co-Limitierung 81
CO₂-Emissionsrechte/Carbon Credits 155, 211, 217
CO₂-Pumpe 107 ff.
Coccolithophoriden 41
cold seeps 52
Colitis ulcerosa 191
Container 170, 174
Containerisierung 164 ff.
Containerschiffe 164 ff.
Containerverkehr 173
Copepoden 106 ff.
Corioliskraft 20, 217
Craig-Venter-Institut 187
Crassostrea gigas 112
Crepidula fornicata 113
Crustaceen 106
Cryptothetya crypta 181
Cyanobakterien 41, 106 ff.
Cytarabine® 182

D

Damm 64
Dänemark 69, 156 f., 208 ff.
Danziger Tief 137
Darm 186, 188 ff.
Deadweight Tonnage (dwt) 166 ff.
Deckschicht 18, 45
Deepwater Horizon 92 ff.
Deich 64, 69 ff.
Deichkrone 66
Delfine 87 f.
Deltaregion 62
Deutsche Atlantische Expedition 47
Deutsche Bucht 81
Deutschland 69, 97, 143
Diatomeen 41
DIC (dissolved inorganic carbon, gelöst anorganischer Kohlenstoff) 38
Dichte 16 ff.
Dichtesprung 18
Dichtesprungschicht 45
Dichteunterschied 108
Dinoflagellat 108 f.
Dipol 17
Dispergatoren 93 ff.
Dispersion 93
Distickstoffoxid (Lachgas) 14
DNA 181 ff.
DNA-Sequenzieretechniken 187
Dolabella auricularia 184
Dolastatin 10 184
Dolastatin 15 184
Donau 69
Doppelhüllentanker 92 ff.
Dornhai (*Squalus acanthias*) 183
Dorsch 124, 136 ff.
Dredge 150
Drei-Schluchten-Staudamm 64 ff.
Dorsch 124, 136 ff.
Dredge 150
Drei-Schluchten-Staudamm 64 ff.
Dritte UN-Seerechtskonferenz (Third United Nations Conference on the Law of the Sea, UNCLOS III) 200
Drosophila melanogaster 190 f.

Düngemittel 79 ff.
Dynamitfischen 135

E

Ebro 69
Echolot 150
Ecteinascidia turbinata 183
Ecteinascidin-743 183 f.
Einspeisevergütung 157
Eisbären 84
Eisen 30, 146
Eisendüngung 30 f., 211
Eisenerz 169
Eiskern 37
Eissturmvogel 88
Eiszeit 36, 56 f.
Elefantenohrschwamm (*Lanthella basta*) 182
Emiliana huxleyi 41
Emulsion 93
Energieverbrauch 142
England 69
Enhanced Oil Recovery 143
Enterococcus faecalis 186
Enterococcus faecium 186
Enzyme 187
Epithel 37, 188 ff.
Erbgut 116, 181 ff.
Erderwärmung 50, 59
Erdgas 142 ff., 152, 208
Erdöl 142 ff., 152, 208
Erdölkohlenwasserstoffe 92 ff.
Erosion 61 ff.
Erzschlamm 151
Escherichia coli 186
EU-Fischereiaufsichtsbehörde (EUFA) 132
EU-Kommission 132
EU-Ministerrat 132
Euprymna scolopes 189
Euripides 180
Europa 164 ff.
Europäische Union 125, 170
Europäische Verkehrsministerkonferenz (European Conference of Ministers of Transport, ECMT) 175
Europäischer Gerichtshof (EuGH) 132
eustatisch 56
Eutrophierung 47, 76 f., 102 ff., 108 ff., 112 f.
Evolution 188 ff.
Explorationslizenz 151
Extremoptimum 103
Extremwetterereignisse 67

F

Fahrgastschiffe 167 ff.
Fahrrinnenvertiefung 64
Fangabgabe 131
Fangaufwand 121, 127 ff., 130 ff.
Fangertrag 127 ff.
Fangmenge 120, 126 f., 130 ff., 136
Fangquote 130 ff.
Fangquotenregelung 136
Fangtage 121, 130 ff.
Fangverbotszone 137
Felderwirtschaft 63
Felsküste 94
Festgesteinsküste 62

- Festlandsockel 200 ff., 208 ff.
 Fisch 87, 96, 120 ff.
 Fischbestand 120 ff., 126 ff., 130 ff., 136 ff.
 Fischbrut 114 ff.
 Fischerei 112 f., 120 ff., 127 f.
 Fischereiaufwand 126 ff.
 Fischereimanagement 124, 130 ff., 136 ff.
 Fischereimethode 134
 Fischereinationen 122
 Fischereipolitik 130 ff.
 Fischmehl 120 ff.
 Fischöl 120 ff.
 Fish and Chips 124
 Fishing for Litter 91
 Flagellat 107 f., 217
 Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) 205
 Flottengröße 121
 Flussdelta 62 f.
 Flüsse 60 ff.
 Food and Agriculture Organization (FAO) 120
 Frachtrate 168 ff.
 Francis Drake 174
 Frankreich 158
 Friend of the Sea 139
Fucus radicans 111
Fucus vesiculosus 102 ff., 116 f.
- G**
 Gakkelrücken 209 f.
 Ganges-Brahmaputra-Delta 72
 Gashydrat 48 ff., 146
 Geisternetze 87 ff.
 Gemeinsame Fischereipolitik der Europäischen Gemeinschaft (GEP) 132 f.
 Gemeinschaftsressource 127 f.
 Genanalysetechnik 187
 General Agreement on Tariffs and Trade (GATT, Allgemeines Zoll- und Handelsabkommen) 165 f.
 General Cargo Ships 167 ff.
 Genfer Seerechtskonventionen 201 ff.
 Genom 187
 Genotyp 116
 genotypische Vielfalt 116
 gentechnisch 180 ff.
 Geo-Engineering 211, 217
 Gesamtfangquote (Total allowable catch, TAC) 130 ff.
 Getreide 169 ff.
 Getreideexporteure 170
 Gewässergüte 81
 Gezeiten 64 ff.
 Gezeitenenergie 156 f.
 Gezeitenkraftwerk 157
 Gezeitenzone 104, 217
 Gletscher 56 ff., 62, 66
 Gletscherschmelze 57
 Global Positioning System (GPS) 169
 globale Erwärmung 59
 Globalisierung 164 ff., 174
 GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project) 34
 Gold 146 ff.
 Goldenes Dreieck 143
- Golf von Aden 174 ff.
 Golf von Mexiko 80, 92 ff., 143 ff.
 Golfstrom 16, 19 ff., 217
 Gotlandbecken 137
Gracilaria vermiculophylla 105, 111 ff.
 Gradient (Temperatur-) 105, 108
 Great Pacific Garbage Patch (Großer Pazifischer Müllfleck) 86 ff.
 Greifswald 69
 Grönland 57 f., 208
 Grönlandsee 16
 Großbritannien 124, 156
 Groundfish Fishery Management Plan (FMP) 126
 Grünalge 111
 Grundschieppnetz 134 ff.
 Grundwasserversalzung 70
 GUS-Staaten 143
- H**
 Habitat 41, 114 ff., 218
 Hamburg 69, 175
 Hammerfest 145
 Hangrutschung 52
 Harmful Algal Blooms (HABs, schädliche Algenblüten) 108 f.
 Haupttransporttrouten 170 ff.
 Haut 188 ff.
 Hawaii 158
 Heilbutt-Fischerei 135
 Hexachlorbenzol 84
 High-Grading 131 f.
 HNLC-Region (high nutrient, low chlorophyll) 30
 Hochdurchsatz-Screening 184
 Hochwasser 67
 Hoheitsmacht 202
 Holobiont 190
 Hongkong 65
 Hormone 182
 Hugo Grotius 200 ff.
 Hummer 96
 Hurrikan 80
 Hydra 186, 189 ff.
 Hydrogenkarbonat (HCO₃) 29 ff., 38 f.
 Hydrophob 142
 hydrothermale Lösung 148
 Hydroxide 146
- I**
 Immunerkrankung 188
 Immunsystem 180 ff., 188 ff.
 Indien 143, 146, 154
 Indischer Ozean 110, 147
 individuell transferierbare Quoten (individual transferable quotas, ITQs) 130
 Indonesien 86, 143
 Innere Gewässer 202
 Interhemisphärischer Dipol 12, 218
 International Coastal Cleanup (ICC) 89
 Internationale Energieagentur (IEA) 142 f.
 Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) 146 ff., 207 f.
- Internationale Seeschiffahrts-Organisation (International Maritime Organization, IMO) 98, 113, 174, 207
 Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung (MARPOL 73/78) 91, 98
 Internationale Walfangkommission (International Whaling Commission, IWC) 204, 218
 Internationaler Gerichtshof (IGH) 202 f.
 Internationaler Rat für Meeresforschung (International Council for the Exploration of the Sea, ICES) 113
 Internationaler Seegerichtshof (International Tribunal for the Law of the Sea, ITLOS) 201
 Invertebraten 39
 IPANEMA 158
 Iran 143
 Ischia 42
 Island 124
 Islandtief 10, 218
 ISM-Code (International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention) 98
 isostatisch 56
 IUU-Fischerei (illegal, unreported and unregulated) 129
- J**
 Jahrhundert-Hochwasser 67
 Jangtse-Delta 64
 Japan 70, 143, 154 f., 157, 204
 Japanische Riesenauster 112
 John Selden 200
 Jungfische 136 f.
 Just-in-time-Produktion (JIT, bedarfsgerechte Produktion) 165, 177
- K**
 Kabeljau 120 ff.
 Kabeljaukriege (cod wars) 124
 Kalifornien 20
 Kalkalgen 41
 Kalkbildung (Kalzifizierung) 38 f., 102
 Kalkpanzer 38 f.
 Kalkskelett 40
 Kaltzeit 56
 Kalzifizierung 102
 Kalziumionen 39, 51
 Kalziumkarbonat (CaCO₃) 28 ff., 39 f., 51
 Kanada 158, 208 ff.
 Kap der Guten Hoffnung 174
 Karbonat (CO₃²⁻) 29 ff.
 Karbonationen 32, 38 f.
Karenia brevis, 108 f.
 Karibik 182 ff.
 Kasachstan 143
 Kaspisches Meer 143
 Kegelschnecke 182 f.
 Kelpwald 115 f.
 Kernspinresonanzspektroskopie 180
 Kieler Institut für Weltwirtschaft 177
 Kieselalgen (Diatomeen) 40 f., 92, 107, 218
Klebsiella oxytoca 186
Klebsiella pneumoniae 186
 Klimaänderungen 10
 Klimamodell 12, 19
 Klimaschwankung 12, 23, 59
 Klimasystem 10 ff.
 Klimatherapie 180
 Klimawandel 28 f., 44 ff., 56 ff., 65 f., 68, 102 ff., 106, 110, 114 ff., 152 f., 211
 Kobalt 147 ff.
 Kobaltkrusten 146 ff.
 Kohle 142 ff., 169 f.
 Kohlendioxid (CO₂) 14, 25, 28 ff., 36 ff., 107, 152 ff., 211
 Kohlensäure 29, 36 ff., 51
 Kohlenstoff (C) 28 ff., 49, 107, 155
 Kohlenstoffkreislauf 13, 28 ff., 218
 Kohlenstoffpumpe 35
 Kohlenstoffreservoir 28 f.
 Kohlenwasserstoffe 92, 142
 Kommission zur Begrenzung des Festlandsockels (CLCS) 210
 Komplementaritätseffekt 115
 Kongo 148
 Kontinentalhang 48, 152 f., 209
 Kontinentalplatte 146 ff.
 Kontinentalrand 152 ff.
 Kontinentalschelf 49
 Kontinentalverschiebung 11, 146
 Konvektion 16 ff., 218
 konventionelles Erdöl 143
 Kopffüßer 40
 Korallen 36, 38 ff., 66, 87, 94, 114 ff., 188
 Korallenbänke 67
 Korallenbleiche 190
 Koralleninseln 72
 Korallenriff 41, 68, 94, 136
 Krebse 87, 112 f.
 Krebserkrankungen 181
 Krebstiere 135
 Kryosphäre 10 f., 218
 Kunstdünger 76
 Kupfer 147 ff.
 Kuroshio 20 f.
 Küstenmanagement 68
 Küstenmeer 200 ff.
 Küstenregionen 68 ff.
 Küstenschutz 70 f.
 Küstenschutzmaßnahmen 68 ff.
 Küstenzonen 60 ff.
 Küstenzonenmanagement 73
- L**
 La Bonnardière 180
 La Rance 157 ff.
 Labradorsee 16, 218
 Ladungsbilanzen 172 f.
 Landeis 23
 Landwirtschaft 76
 Langleine 134
 Leuchtqualle 108
 Liberia 166
 Lichtmangel 102 ff.
 Linienschiffahrt 170 f.
 Liquefied Natural Gas (LNG) 145
 Lithosphäre 10 f., 62, 218
 Lockergesteinsküste 61 f.
 Lohafex 211

- Lomonossowrücken 209 f.
 London 73
 London Convention (LC) 211
 London Protocol (LP) 211
 Los Angeles 175
 Lübeck 69
 Lunge 188 ff.
- M**
 Maasbommel 70
 Magma 146
 Makronährstoffe 30 f.
 Malaysia 143
 Malediven 15, 69
 Mangan 146 f.
 Manganknollen 146 ff., 201 ff.
 Mangroven 67 f., 94
 mare clausum 200
 mare liberum 200 f.
 Marine Stewardship Council (MSC) 139
 MARPOL 73/78 91, 98
 Marsch 67
 Maschenweite 126
 Massengutfahrer 164 ff.
 Massenschüttgüter 169
 Massenstückgüter 169 ff.
 Massivsulfide 146 ff.
 MDR1-Gen (Multi Drug Resistance, MDR) 183
 Medikamente 180 ff.
 Meereis 23, 66, 210
 Meerenge 174
 Meeresbergbau 146 ff.
 Meereserwärmung 92 ff., 105 f.
 Meeresschutzgebiete 92 ff.
 Meeresspiegel 15, 25, 56 ff., 62 ff.
 Meeresspiegelanstieg 14, 50, 56 ff., 62 ff., 68 ff.
 Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie 81
 Meeresströmungen 16 ff., 86 ff.
 Meereswärme-Energieumwandlung (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) 158
 Meereswärmekraftwerk 156 ff.
 Megastädte 60
 Melbourne 111
 Memmert 61
 Metalle 146
 Meteor 47
 Methan (CH₄) 14, 48 ff., 152 ff.
 Methanhydrat 48 ff., 152 ff.
 Methicillin 186
 Mexiko 146
 MEY (Maximum economic yield) 127 ff.
 Miesmuschel 96
 Miesmuschelbank 113
 Migration 70
 Mikroalge 105, 112, 114 f.
 Mikroplastik 87
 Millionenstädte 68
 Mineralische Rohstoffe 146 ff.
 Minimumgesetz 81
 Mississippi 80 f.
 Mittelmeer 69, 110
 Mittelozeanischer Rücken 148
 Mittleres Tidehochwasser (MThw) 66
Mnemiopsis leidyi 112–113
- molekularbiologisch 180
 Monaco 111
 Monsunregion 66
 Morbus Crohn 191
 MSY (Maximum sustainable yield) 126 ff., 132, 137
 Müll 86 ff.
 Muscheln 36 ff., 80, 96, 112 f., 135
- N**
 nachhaltiges Potenzial 157
 Naher Osten 143
 Nährstoffe 76 ff.
 Nahrungskette 77, 87, 96
 Namibia 20
 National Academy of Sciences 86
 Natura 2000 205
 Nauplien 107
 Nauru 148
 Nesseltier (Cnidaria) 186, 188 ff.
 Neufundland 124
 Neurodermitis 191
 Neuseeland 130, 151
 Nickel 147 ff.
 Niederlande 69, 156
 Niger-Delta 62
 Nil 63
 Nitrat 30, 47
 Nizza 65
Nodularia spumigena 109
 Nordamerika 164 ff.
 Nordatlantik 34
 Nordatlantische Oszillation (NAO) 10, 34, 218
 Nordatlantisches Tiefenwasser (North Atlantic Deep Water, NADW) 18
 Nordostatlantik 91
 Nordostatlantische Fischereikommission (North East Atlantic Fisheries Commission, NEAFC) 136
 Nordostpassage 25, 177, 208 ff.
 Nordpazifik 30, 86 ff.
 Nordsee 66 f., 79, 89, 94, 110 f., 143 ff.
 Nordseerainner 97
 Nordseeküste 69
 Nordwestpassage 177, 208 ff.
 Nordwestpazifik 125
 Normalnull (NN) 67, 218
 North American Free Trade Agreement (NAFTA, Nordamerikanisches Freihandelsabkommen) 165 f.
 Norwegen 145, 157, 208
 Nukleinsäuresynthese 181
 Nukleoside 181
- O**
 Oberflächenwasser 18, 107
Oculina patagonia 38
 Oder 69
 Offshore 142 ff.
 Offshore-Windpark 156 ff.
 Offshoring 165
 Ökoregion 110
 Ökosystem 114 ff.
 Ökosystemleistung 114
 Öl 92 ff., 170
 Ölbarriere 97
 Ölförderung 142
- Ölpest 92
 Ölskimmer 97
 Ölteppich 92 ff.
 Ölfälle 92 ff.
 Överschmutzung 92 ff.
 Oregon 47
 Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) 82, 165, 176
 Oscillating Bodies 157
 Oscillating Water Column 157
Ossilinus turbinata 42
 Oslo-Paris-Konvention (OSPAR) 91
 Oslofjord 158
 Osmosekraftwerk 156 ff.
 Ostafrika 175
 Ostpazifik 30
 Ostpazifischer Rücken 147 f., 218
 Ostsee 66 f., 80, 104, 107 ff., 110 f., 137
 Ostseeküste 69
 Otter 87
 Outsourcing 165
 Overtopping 157
 Oxidation 50
 ozeanischer Bergrücken 209
 Ozeanversauerung 31 ff., 36 ff., 51, 102, 153
- P**
 Panama 166
 Pantoffelschnecke 113
 Papua-Neuguinea 151
 Partialdruck 33
 Passat 20 f., 218
 Patent 187
 Pazifik 34, 201
 Peak Oil 143
 Pedosphäre 10 f., 218
Pelagia noctiluca 108
 Pelagisches Schleppnetz 134
 Pelagisches System (Pelagial) 106, 218
 Peptide 182 ff., 188
 Perfluoroctansulfonat (PFOS) 83
 Permafrostboden 49 ff., 66
 Persischer Golf 143
 Peru 125, 147
 pH-Wert 35, 36 ff., 102
 phänotypische Plastizität 103
 Pharmaindustrie 184 ff.
 Philippinen 166
 Phosphat 30, 47, 76 ff., 169
 Phosphor 114
 Photooxidation 93
 Photosynthese 44, 115
 Phytoplankton 41, 76 f., 106 ff., 114
 Phytoplankton, Frühjahresblüte 106 ff.
 Pipeline 145
 Piraterie 174 ff.
 planetare Wellen 22
 Plankton 106 ff., 152, 219
 Planktonblüte 104
 Planktonkreislauf 106 f.
 Plastikmüll 86 ff.
 Plate 94
 Platin 147 f.
- Po-Delta 69
 polychlorierte Biphenyle (PCB) 82
 polyfluorierte Verbindungen (polyfluorinated compounds, PFCs) 83
 POPs (persistent organic pollutants) 82
 Population 103, 106, 110 ff., 120 ff., 219
 Port Philipp Bay 111
 Portugal 125, 157
 Prialt® 182
 Prielsystem 94
 Primärproduktion 41, 63, 81, 114, 211, 219,
 Primärproduzenten 44, 219
 Produktentanker 170
 Prospektion 142
 Prostaglandine 182
 Proteobacteria 191
 Protonenkonzentration 36
- Q**
 Qingdao 77
 Quallen 186, 188
- R**
 Randmeer 152 ff.
 red tides 77
 Regenerationszeit 97
 Regenerative Energien 156 ff.
 Remotely Operated Vehicle (ROV) 150
 Respiration 107 ff.
 Reuse 134
 Rhein 179
 Rhône 69
 Ribose 181
 Riff 114 ff.
 Riffbildung 39
 Ringwade 134
 Rippenqualle 112 f.
 Risikogen 191
 Risikokultur 70
 Robbe 87, 96
 Roll-on/Roll-off-Schiffe (Ro-Ro Ships) 169
 Rømø 61
 Rostock 69
 Rotalgae 105
 Rotbarsch 120
 Rotes Meer 151
 Rotterdam 73
 Ruderfußkrebs 106 ff.
 Russland 142 f., 148, 158, 208 ff.
- S**
 Stockholmer Übereinkommen 84
 Saatauster 112 f.
 Saint Malo 157, 157 ff.
 Salzmarsch 68
 Salzwiese 69, 94
 San Francisco 110 ff.
 Sandküste 94
 Sandstrand 94
 Sardelle 125
Sargassum muticum 111
 Satellit 13, 47
 Satellitenaltimetrie 57
 Sauerstoff (O₂) 44 ff., 51, 77

- Sauerstoffmangel 45 ff., 80, 109, 137
 Sauerstoffminimumzone 31, 46 f.
 Säure-Base-Haushalt 36 ff.
 Säure-Base-Regulation 37 ff.
 Schelf 146, 152 ff., 219
 Schelfeis 59
 Schelfgebiet 209
 Schiffsbohrwurm 110
 Schiffsmaße 168
 Schiffsregister 166 ff.
 Schiffstankreinigung 92
 Schiffsverkehr 64
 Schildkröten 87 f., 94
 Schleppnetzfisherei 114
 Schmelzwasserpuls 56 f.
 Schnecken 42, 96, 112 f., 114 ff.
 Schottland 157
 Schulp 39
 Schuppenflechte 191
 Schutzgebiet 136 ff.
 Schwamm 87, 181 ff., 188
 Schwarzer Raucher 148 f.
 Schwarzes Meer 69, 112
 Schweden 156
 Schwefelwasserstoff (H₂S) 51
 Schweinswal 204
 Schwermetalle 92
 Seafloor 158
 SeaGen 158
Sebastes flavidus 115–116
 Sediment 60 ff., 152 ff.
 Sedimentation 93
 Seeanemone 41, 188
 Seegras 114 f.
 Seegraswiese 42, 68, 77 ff., 114 ff.
 Seehandelsrecht 200
 Seehund 88
 Seehundsterben 82
 Seeigel 36, 87, 135
 Seekuh 88
 Seeotter 117
 Seerecht 200 ff., 208 ff.
 Seerechtsübereinkommen (SRÜ) 200 ff., 208 ff.
 Seestern 111
 Seeverkehr 164 ff.
 Seevögel 88
 Seevölkerrecht 200 ff.
 Selektionseffekt 116
 Senke 14, 29 ff., 219
 Sensitivitätsabstufung 94
Septa officinalis 39
 Sepsis 186
 Sequestrierung 30 f.
 Serin-Protease 186
 Silikate 146
 Singapur 175
 Skalenerträge, zunehmende 165
 Somalia 175
 Sorbicillacton 183 ff.
 South Pars/North Field 143
 Spanien 125, 157 ff.
 Sperrwerk 70
 Speziialschiffahrt 172
 Spitzbergen 153
 Spongothymidin 181
 Spongouridin 181
 Springtide 66
 Sprotte 125
- Sprungschicht 105, 108
 Spurengas 14
 Squalamin-Lactat 183
Staphylococcus aureus 186
 Staudamm 61 ff.
 Steilküste 62
 Stellnetz 134
 Stickstoff (N) 76 ff., 92, 114
 Stoffwechsel 36 ff., 40, 188
 Strandaufspülung 64
 Strandkrabbe (*Carcinus maenas*) 112
 Strangford Narrow 158
 Stratifizierung 80
 Stratosphäre 219
 stratosphärisch 13
 Stress 40, 102 ff., 117
 Stressor 102 ff.
 Strömungsenergie 156 ff.
 Stückgutschiffe 166 ff.
 Sturmflut 61 ff.
 Substrat 104, 110, 219
 Subtropen 18
 Subvention 129, 132
 Südchinesisches Meer 143
 Südkorea 154, 158
 Südostasien 79, 143 ff.
 Südostpazifik 125
 Südozean 30
 Südpazifik 148
 Südpolarmeer 34
 Südwestpazifik 148
 Suezkanal 110
 Sulfat (SO₄²⁻) 51
 Sulfidschlamm 146 ff.
 Superorganismus 190
 Süßwasserbilanz 66
 Süßwasserpolyp 188 ff.
 Sylt 65, 69
- T**
 Taiwan 154
 Tanker 92 ff., 164 ff.
 technisches Potenzial 157
 Tellur 147
 Temperaturanomale 12
Teredo navalis 110
 territoriale Nutzungsrechte (territorial use rights in fisheries, TURF) 135
 Terrorismus 174 ff.
 Tetrapode 69
 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit, Standardcontainer) 168 ff., 175
 Thalassotherapie 180
 Thermodynamik 23, 219
 thermohaline Zirkulation 16 ff., 219
 Tianjin 65
 Tidehochwasser 66
 Tidenhub 64
 Tiefendrifter 47
 Tiefenwasser 16, 34, 45, 109
 Tiefsee 146 f.
 Tiefseebergbau 202
 Tiefseewirbel 20
 Tintenfisch 39, 189
 Titan 146
 Todeszone 46 f.
 Tonga 148
 Tonnen-Seemeilen (tsm) 168 ff.
 Torrey Canyon 92
- Trabectedin 183
 Transportkosten 164
 Treibhauseffekt 15, 17, 19, 50, 56, 219
 Treibhausgas 36, 50, 152
 Trockenladungen 168 ff.
 Tropen 18
 Tsunami 52, 65
 Tundra 52
- U**
 Überdüngung 76 ff.
 Überfischung 109, 120 ff., 126 ff.
 Überflutung 64 ff.
 Überweidung 63
 Umsiedlungsmaßnahmen 68
 Umwelt- und Raumplanung (Marine Spatial Planing) 157
 Umweltflüchtlinge 73
 Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) 89
 Umweltverträglichkeitsprüfung 148, 205
 Umweltverträglichkeitsgutachten 157
 UN-Kommission zur Begrenzung des Festlandssockels (Commission on the Limits of the Continental Shelf, CLCS) 207
 United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD, Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung) 165
 United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS, UN-Seerechtskonferenz) 146 ff., 219
 unterseeische Erhebung 209
 unterseeischer Bergrücken 209
 Unterwasser-Rotoren 158
 US-amerikanische Nahrungs- und Arzneimittelbehörde (Food and Drug Administration, FDA) 182
 USA 97, 142 f., 166 ff., 175 f.
- V**
 Vancomycin 186
 Venedig 64, 69, 73
 Versalzung 102
 Versauerung 31, 36 ff., 51, 102, 153
 Verschmutzung 92 ff.
 Vessel Detection System (VDS, Schiffsortungssystem) 136
 Vessel Monitoring System (VMS, Schiffsüberwachungssystem) 136
Vibrio fischeri 189
 Vidarabin® 182
 Vietnam 69
 Viren 188
 Voluntary Observing Ship 33
 Vulkan 148
- W**
 Waldrodung 63
 Walfang 204
 Warft 70
 Wärmekapazität 17
 Wärmeleitfähigkeit 11
 Wärmetransport 22 f.
 Warmzeit 56
- Waschmittel 79
 Wasser-in-Öl-Emulsion 93
 Wasserbau 64
 Wasserknappheit 66
 Wasserrahmenrichtlinie 81
 Wasserstoffion (H⁺) 38
 Wasservogel 96
 Wattenmeer 81, 94
 Wattfläche 69
 Wattwurm 96
 Weichböden 94
 Weichmacher 87
 Weichsel 69
 Weidegänger 115 f.
 Wellenbrecher 62
 Wellenenergie 156 f.
 Weltbank 129
 Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung (World Summit on Sustainable Development, WSSD) 126
 Welthandel 164 ff.
 Welthandelsflotte 167 ff.
 Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 57 f.
 Wert-Gewicht-Relation 164
 Westafrika 143 ff.
 Westantarktis 59
 Wetter 10
 Windenergie 156
 Windenergieanlage (WEA) 156
 Windenergiepark 60
 Wirkstoff 180 ff.
 Wirt 190
 Wirtschaftskrise 164 ff.
 World Trade Organization (WTO, Welthandelsorganisation) 165 f.
 Würmer 96
 WWF 139
- Y**
 Yonelis® 183
- Z**
 Zaire 148
 Zertifizierung 136 ff.
 Ziconotid 182 ff.
 Zink 148
 Zinn 146
 Zooplankton 45, 76 f., 106 ff., 113
 Zwischenoptimum 103
 Zwischenwasser 34, 45
 Zwölf-Seemeilen-Zone 91
 Zytostatikum 182

Abbildungsverzeichnis

Umschlagabbildung: mauritius images/Bluegreen Pictures, S. 2: plainpicture/Daniela Podeus, S. 6 v.o.n.u.: Nick Cobbing, Steve Gschmeissner/Science Photo Library/Agentur Focus, Seth Resnick/Getty Images, U.S. Coast Guard/digital version by Science Faction/Getty Images, David B. Fleetham/SeaPics.com, S. 7 v.o.n.u.: Arctic-Images/Corbis, Steve Bloom/Getty Images, Justin Guariglia/Corbis, 2009 George Steinmetz/Agentur Focus, US Navy/action press, S. 8–9: Nick Cobbing, Abb. 1.1: nach Meincke und Latif (1995), Abb. 1.2: maribus, Abb. 1.3: NASA Goddard Institute For Space Studies, Abb. 1.4: nach IPCC (2001), Abb. 1.5: action press/Ferrari Press Agency, Abb. 1.6: maribus, Abb. 1.7: maribus, Abb. 1.8: nach Meincke et al. (2003), Abb. 1.9: NASA, Abb. 1.10: maribus, Abb. 1.11: nach Barnier et al. (1994), Abb. 1.12: nach Trenberth und Solomon (1994), Abb. 1.13: [M], Bryan & Cherry Alexander/Arcticphoto/laif, S. 26–27: Steve Gschmeissner/Science Photo Library/Agentur Focus, Abb. 2.1: nach IPCC (2007), Abb. 2.2: dpa Picture-Alliance/DB Philipp Assmy/Awi, Abb. 2.3: Stephan Köhler/Zoonar, Abb. 2.4: nach Sabine et al. (2004), Abb. 2.5: Nicolai, IFM-GEOMAR, Abb. 2.6: oben: Martin Hartley/eyevine/interTOPICS; links: mauritius images; Mitte: Carmen Jaspersen/picture-alliance/dpa; rechts: Cliff Leight/Aurora Photos, Abb. 2.7: Fine und Tchernov (2007); Foto: Avinoam Bristien, Abb. 2.8: nach Gutowska et al. (2008), Abb. 2.9: Steve Gschmeissner/Science Photo Library/Agentur Focus, Abb. 2.10: Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Publishing Group, U. Riebesell et al., Nature 407, 2000, Abb. 2.11: Mike Watson Images Limited/Getty Images, Abb. 2.12: Hall-Spencer et al. (2008), Abb. 2.13: nach Vaquer-Sunyer und Duarte (2008), Abb. 2.14: maribus, Abb. 2.15: nach Keeling et al. (2010), Abb. 2.16: dpa Picture-Alliance/MARUM, Abb. 2.17: nach Kvenvolden und Lorenson (1993), Abb. 2.18: maribus, Abb. 2.19: nach IFM-GEOMAR, Abb. S. 51: nach Treude, IFM-GEOMAR, Abb. 2.20: imago/ITAR-TASS, S. 54–55: Seth Resnick/Getty Images, Abb. 3.1: maribus, Abb. 3.2: Brian Harris/eyevine, Abb. 3.3: imago/Photoshot/Evolve, Abb. 3.4: nach Vermeer und Rahmstorf (2009), IPCC 2007, Church et al. (2008), Abb. 3.5: nach Cohen und Small (1998), Abb. 3.6: Patricia Kreyer/PictureNature/Photoshot, Abb. 3.7: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWK), Abb. 3.8: Keystone France/laif, Abb. 3.9: www.bildagentur-online.com, Abb. 3.10: nach Brooks et al. (2006), Abb. 3.11: Werner Baum/dpa Picture-Alliance, Abb. 3.12: Andrew Biraj, Abb. 3.13: [M], Beate Zoellner/Bildmaschine.de, Abb. 3.14: Swart/Hollandse Hoogte/laif, Abb. 3.15: Schrottke, Stattegger und Vafeidis, Universität Kiel, Abb. 3.16: nach Sterr, S. 74–75: U. S. Coast Guard/digital version by Science Faction/Getty Images, Abb. 4.1: Jochen Tack, Abb. 4.2: AP Photo/Eye Press, Abb. 4.3: Andre Maslennikov/Still Pictures, Abb. 4.4: nach van Bennekom und Wetsteijn (1990), www.waterbase.nl, Abb. 4.5: with courtesy of Nancy Rabalais, Louisiana Universities Marine Consortium, with MODIS true color image from the Earth Scan Lab, Louisiana State University, Abb. 4.6: www.deff.de, Abb. 4.7: nach Böhlmann (1991), Abb. 4.8: nach Dietz et al. (2008), Abb. 4.9: maribus, Abb. 4.10: nach South Carolina Sea Grant Consortium, South Carolina Department of Health & Environmental Control; Ocean and Coastal Resource Management, Centers for Ocean Sciences Education Excellence Southeast; NOAA 2008, Abb. 4.11: Pierre Hugué/Biosphoto, Abb. 4.12: maribus, Abb. 4.13: Frans Lanting/Agentur Focus, Abb. 4.14: maribus, Abb. 4.15: nach GKSS, van Bernem, Abb. 4.16: David Woodfall/Getty Images, Abb. 4.17: Frederic Larson/San Francisco Chronicle/Corbis, Abb. 4.18: ITOPE, Fernresearch, Abb. 4.19: Xinhua/Landov/inter TOPICS, S. 100–101: David B. Fleetham/SeaPics.com, Abb. 5.1: nach Wahl, Abb. 5.2: Laurie Campbell/NHPA/Photoshot/dpa Picture-Alliance, Abb. 5.3: maribus, Abb. 5.4: nach Wahl, Abb. 5.5: nach Sommer, Lengfellner et al. (in prep.), Abb. 5.6: David B. Fleetham/SeaPics.com, Abb. 5.7: www.learner.org/north/tm/manatee/RedTide.html, Abb. 5.8: Arco/NPL Kim Taylor, Abb. 5.9: nach Molnar et al. (2008), Abb. 5.10: nach Molnar et al. (2008), Abb. 5.11: David Wrobel/SeaPics.

com, S. 118–119: Arctic-Images/Corbis, Abb. 6.1: nach Quaaas, FAO Fishstat, Abb. 6.2: imago/Xinhua, Abb. 6.3: nach FAO Fishstat, Abb. 6.4: nach FAO, Abb. 6.5: nach FAO Fishstat, Abb. 6.6: nach FAO Fishstat, Abb. 6.7: links: dpa Picture-Alliance/PA, rechts: dpa Picture-Alliance/UPI, Abb. 6.8: nach Quaaas, FAO Fishstat, Abb. 6.9: nach FAO Fishstat, Abb. 6.10: nach Quaaas, Abb. 6.11: Jean Gaumy/Magnum Photos/Agentur Focus, Abb. S. 129: nach Quaaas, Abb. 6.12: Pierre Tremblay/Masterfile, Abb. 6.13: nach Quaaas, Abb. S. 133: nach Quaaas, Abb. 6.14: maribus, Abb. 6.15: M. Tristao/UNEP/Still Pictures/OKAPIA, Abb. 6.16: nach Rudi Voss/Bastian Huwer, DTU-Aqua, Abb. 6.17: Peter Verhoog/Foto Natura/MINDEN PICTURES/Getty Images, Abb. 6.18: www.msc.org, S. 140–141: Steve Bloom/Getty Images, Abb. 7.1: nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abb. 7.2: nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abb. 7.3: nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abb. 7.4: nach Petersen, S. 147: Manganknolle: Charles D. Winters/NatureSource/Agentur Focus, Abb. 7.5: MARUM, Universität Bremen/MARUM, University of Bremen, Abb. 7.6: maribus, Abb. 7.7: nach Klauda & Sandler (2005), Abb. 7.8: http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Gashydrat_mit_Struktur.jpg [Stand: 05.10.2010], Abb. 7.9: nach IFM-GEOMAR, Abb. 7.10: nach Energy Outlook 2007, Buffett & Archer (2004), Abb. 7.11: Marc Steinmetz/Visum, Abb. 7.12: Karte: maribus, a: EDF/Tierry Dichtenmuller; b: Marine Current Turbines Limited; c: Pelamis Wave Power; d: Statkraft; e: Siemens-Pressebild, Abb. 7.13: Solberg Production/Statoil, S. 162–163: Justin Guariglia/Corbis, Abb. 8.1: nach IMO 2009, Abb. 8.2: nach UNCTAD, Lloyd's Register – Fairplay, Abb. 8.3: v.l.n.r. nach Beluga Shipping GmbH; Schulte Group/www.eiga.de; TUI Cruises GmbH; Rickmers Holding GmbH & Cie. KG; Rickmers Holding GmbH & Cie. KG, Abb. 8.4: Thomas Grimm/plainpicture, Abb. 8.5: Cultura/plainpicture, Abb. 8.6: nach UNCTAD (2008), Abb. 8.7: Sammlung Rauch/INTERFOTO, Abb. 8.8: nach IMO 2010, Abb. 8.9: Bundeswehr/ddp images, S. 178–179: 2009 George Steinmetz/Agentur Focus, Abb. 9.1: Bettmann/Corbis, Abb. 9.2: Haeckel/Ullstein Bild, Abb. 9.3: J.W. Alker/TopicMedia, Abb. 9.4: Humberg/imago, Abb. 9.5: Steve Parish/Steve Parish Publishing/Corbis, Abb. 9.6: Dean Janiak, Abb. 9.7: maribus, Abb. 9.8: Bosch, Foto: Sebastian Fraune, Abb. 9.9: YourPhotoToday/Phanie, Abb. 9.10: nach Bosch, Abb. 9.11: R. Dirscherl/Juniors Bildarchiv, Abb. 9.12: R. Dirscherl/blickwinkel, Abb. 9.13: NAS/M.I. Walker/OKAPIA, Abb. 9.14: links: Derek Lovley/Kazem Kashefi/Science Photo Library/Agentur Focus; rechts: Thierry Berrod, Mona Lisa Production/Science Photo Library/Agentur Focus, Abb. 9.15: maribus, Abb. 9.16: maribus, Abb. 9.17: Pasieka/Science Photo Library/Agentur Focus, S. 198–199: US Navy/action press, Abb. 10.1: links: Private Collection/Ken Welsh/The Bridgeman Art Library; rechts: Peace Palace Library, Abb. 10.2: nach Proelß, Abb. 10.3: nach Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Abb. 10.4: Rex Features LTD/action press, Abb. 10.5: nach Gilles et al. (2009), Abb. 10.6: maribus, Abb. 10.7: ddp images/AP Photo/RTR Russian Channel, Abb. 10.8: nach Macnab et al. (2001), Abb. 10.9: nach Kaleschke, Klimacampus Universität Hamburg, S. 212: Hans Strand

Reproduktion, Übersetzung in fremde Sprachen, Mikroverfilmung und elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung der maribus gGmbH. Sämtliche grafischen Abbildungen im „World Ocean Review“ wurden von Walther-Maria Scheid, Berlin, exklusiv angefertigt. Im Abbildungsverzeichnis sind die ursprünglichen Quellen aufgeführt, die in einigen Fällen als Vorlage gedient haben.

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster

Redaktion: Tim Schröder

Lektorat: Dimitri Ladischensky

Redaktionsteam Exzellenzcluster: Dr. Kirsten Schäfer, Dr. Emanuel Söding, Dr. Martina Zeller

Gestaltung und Satz: Simone Hoschack

Bildredaktion: Petra Kossmann

Grafiken: Walther-Maria Scheid

Druck: Druckhaus Mitte

Papier: Recysatin, FSC Zertifiziert

ISBN 978-3-86648-000-1

Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com



ClimatePartner 
**klimateutral
gedruckt**

Der „World Ocean Review“ ist eine einzigartige Publikation über den Zustand unserer Meere und spiegelt den aktuellen Stand der Wissenschaft wider. Sie ist hervorgegangen aus der Kooperation folgender Partner:



ozean der zukunft
DIE KIELER MEERESWISSENSCHAFTEN

Im Kieler Exzellenzcluster bündeln Meeres-, Geo- und Wirtschaftswissenschaftler sowie Mediziner, Mathematiker, Juristen und Gesellschaftswissenschaftler ihr Fachwissen und untersuchen gemeinsam den Ozean- und Klimawandel. Insgesamt haben sich mehr als 250 Wissenschaftler aus sechs Fakultäten der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, des Leibniz-Instituts für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR), des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) und der Muthesius Kunsthochschule zusammengeschlossen.



Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nicht-Regierungsorganisation von Professor Elisabeth Mann Borgese gegründet. Es besteht aus einem Netzwerk von verschiedenen Niederlassungen, die über die ganze Welt verteilt sind, und hat seinen Hauptsitz in Malta. Das IOI setzt sich für eine friedliche und nachhaltige Nutzung des Ozeans ein.

mare

Die Zeitschrift der Meere wurde 1997 von Nikolaus Gelpke in Hamburg gegründet und erscheint alle zwei Monate in deutscher Sprache. Mare rückt den Stellenwert, den das Meer als Lebens-, Wirtschafts- und Kulturraum für den Menschen bietet, in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Neben dem Magazin, das vielfach für seine hochwertigen Reportagen und Fotostrecken ausgezeichnet wurde, bringt der mareverlag zweimal im Jahr ein Buchprogramm heraus.