Der „World Ocean Review“ ist eine Kooperation der Partner:

ozean der zukunft
DIE KIELER MEERESWISSENSCHAFTEN

Im Kieler Exzellenzcluster bündeln mehr als 200 Forschende aus den Meeres-, Geo- und Wirtschaftswissenschaften, aus der Medizin, Mathematik sowie den Rechts- und Gesellschaftswissenschaften ihr Fachwissen und untersuchen den Ozean- und Klimawandel. Träger sind die Christian-Albrechts-Universität, das GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, das Institut für Weltwirtschaft und die Muthesius Kunsthochschule.

Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nicht-Regierungsorganisation von 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 bringt der mareverlag zweimal im Jahr ein Buchprogramm heraus.

KDM
Konsortium Deutsche Meeresforschung

Das Konsortium Deutsche Meeresforschung bündelt die Expertise der deutschen Meeresforschung. Seine Mitglieder setzen sich aus allen Forschungseinrichtungen zusammen, die in Meeres-, Polar- und Küstenforschung aktiv sind. Ein Hauptanliegen des KDM ist, die Interessen der Meeresforschung gegenüber nationalen Entscheidungsträgern und der EU sowie gegenüber der Öffentlichkeit gemeinsam zu vertreten.

world ocean review
Mit den Meeren leben. 2017

5
Die Küsten – ein wertvoller Lebensraum unter Druck

Herausgegeben von
maribus in Kooperation mit

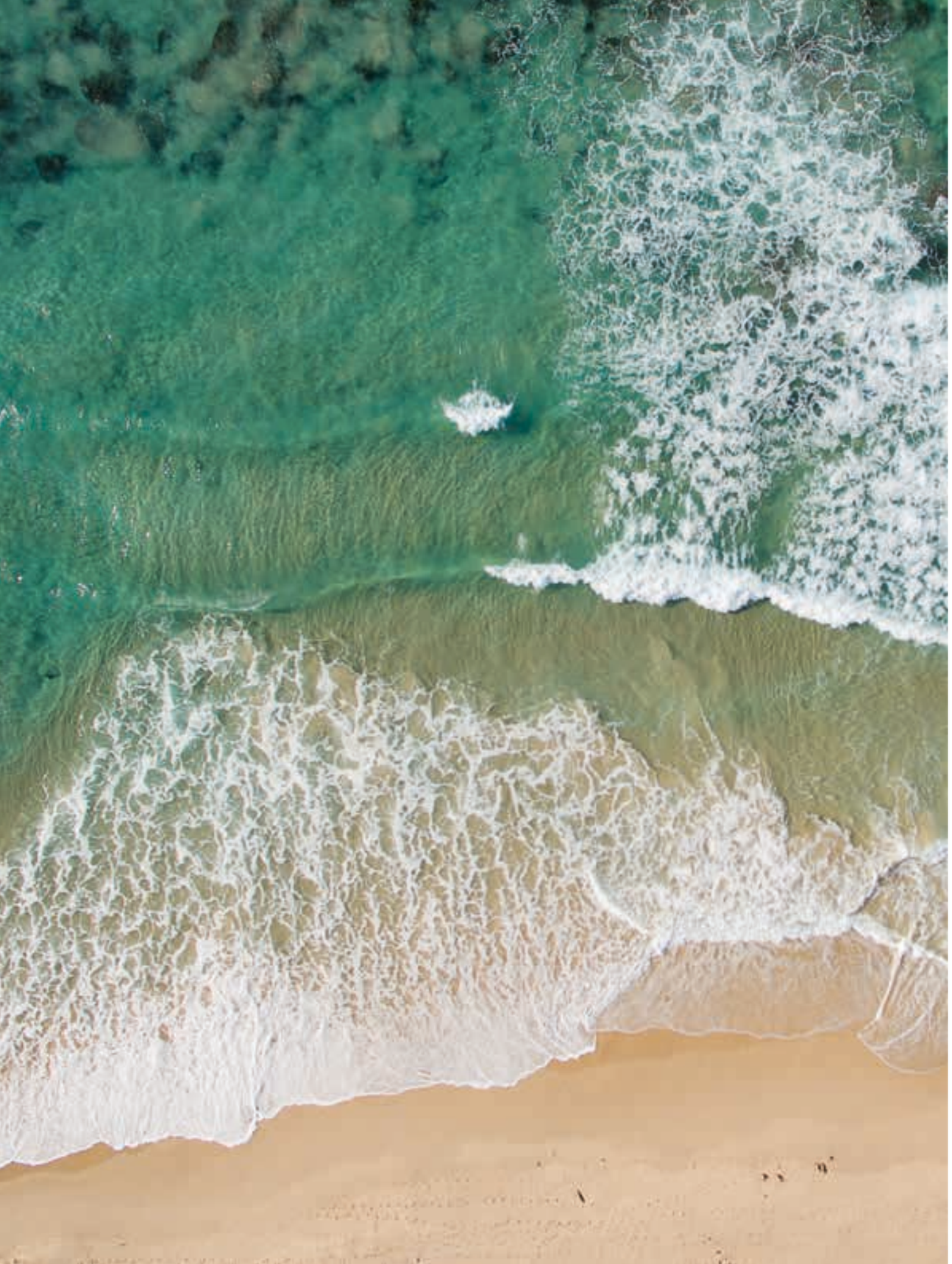
ozean der zukunft
DIE KIELER MEERESWISSENSCHAFTEN

KDM
Konsortium Deutsche Meeresforschung

mare

world ocean review

Mit den Meeren leben. 2017



5

Die Küsten – ein wertvoller Lebensraum unter Druck

Vorwort

Als ich vor zehn Jahren in meiner Funktion als Chefredakteur der Zeitschrift mare und als gelernter Meeresbiologe intensiver über die Idee nachdachte, einen regelmäßig erscheinenden und gut lesbaren Zustandsbericht über die Weltmeere herauszugeben, stand ich vor fast unlösbaren Aufgaben. Er sollte wissenschaftlich fundiert sein, wirtschaftlich und politisch unabhängig und vor allem kostenlos verfügbar. Zudem wünschte ich mir eine ungewöhnlich hohe Verbreitung für einen solchen Wissenschaftsreport.

Dieser vorliegende fünfte „World Ocean Review“ (WOR) ist insofern ein großer Schritt, als hier nicht nur der Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ wissenschaftlich verantwortlich zeichnet, sondern mit dem Konsortium Deutscher Meeresforschung (KDM) gleichsam die wichtigsten Meeresforschungsinstitute Deutschlands. Von einer so umfassenden wissenschaftlichen Kompetenz hätte ich nie zu träumen gewagt.

Darüber hinaus gewährleistet die von Elisabeth Mann Borgese und mir gegründete Ocean Science and Research Foundation die Übernahme sämtlicher Ausgaben – mehr als 300 000 Euro jährlich – der gemeinnützigen maribus GmbH rund um die WORs. Ein Konstrukt, das es ermöglicht, eigenständig zu agieren, wichtige Stellen wie Projektleitung und Redaktion langfristig zu finanzieren und vor allem die WORs allgemein zugänglich und kostenfrei anzubieten – als Onlineversion, aber auch als gedruckte Broschüre, von denen auf Anfrage bereits weit mehr als 120 000 Exemplare gratis in alle Welt verschickt wurden.

Über den enormen Anklang, den der WOR in der Öffentlichkeit findet, aber auch über die Wissensgrundlage, die er für weitere Veröffentlichungen in Print und Fernsehen bildet, freue ich mich daher sehr; und ich bin überzeugt, dass auch die fünfte Ausgabe, die sich dem Thema „Küsten“ widmet, einen großen Beitrag zu einem wichtigen Thema leisten wird. Denn dieser boomende Lebensraum birgt Fluch und Segen zugleich.

Die Küsten werden für uns immer mehr zum Erlebnis- und Erholungsraum. Schon über 20 Prozent der weltweit Reisenden finden Erholung allein im vergleichsweise kleinen Mittelmeerraum, und immer mehr Menschen siedeln sich an den Meeressäumen an. Inzwischen leben über 2,8 Milliarden Menschen nicht mehr als 100 Kilometer vom Meer entfernt. 20 Megastädte mit jeweils mehr als 10 Millionen Einwohnern befinden sich an der Küste. Der Grund sind wirtschaftliche Vorteile wie die stetig wachsende Bedeutung der Schifffahrt: Ohne den Containerverkehr wäre die Globalisierung der Wirtschaft nicht denkbar. Und auch sonst hat die Küste einiges zu bieten: 90 Prozent der Fischerei, der für die Zementwirtschaft unabdingbare Sand, Windenergie, Erdgas und Erdöl. Dieser Segen ist zugleich Fluch. Die boomende Wirtschaft und immer mehr Menschen bringen ihren Müll, ungeklärte Abwässer und Düngemittel in die Ozeane ein. Mangrovenwälder müssen weichen, Fischbestände verringern sich dramatisch. Zusätzlich zeigt an den Küsten der Klimawandel seine drastischsten Auswirkungen: Durch den Anstieg des Meeresspiegels, Stürme und Tsunamis werden eben jene Wirtschaftsleistungen zunehmend bedroht und zerstört.

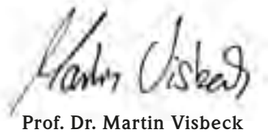
Nikolaus Gelpke
Geschäftsführer maribus gGmbH, Verleger des mareverlags und Präsident des IOI

Wir Menschen leben seit Jahrtausenden mit dem Meer und suchen seine Nähe. In küstennahen Gebieten wird die enge Verflechtung zwischen Mensch und Ozean besonders deutlich: Menschen profitieren vom Ozean; er stabilisiert das Klima, bringt Niederschläge, ist Transportweg, liefert Nahrung, Rohstoffe und Energie. Die Küsten beherbergen 15 der 20 größten Megastädte, und die natürliche Schönheit des Küstenreliefs und der Blick auf das Meer geben uns Inspiration.

Allerdings stehen der Ozean und seine Küsten durch die dort besonders schnell wachsende Weltbevölkerung, die Übernutzung, Verschmutzung und den vom Menschen verursachten Klimawandel unter zunehmendem Druck. Vor allem über Flüsse gelangen Abwässer, Chemikalien, aus Überdüngung stammende Nährstoffe und Müll in die Küstenmeere und später in den offenen Ozean. Schutz und Nutzung scheinen zunehmend aus dem Gleichgewicht zu laufen und bedürfen einer neuen Ausrichtung, wie sie in den Nachhaltigkeitszielen der Agenda 2030 insbesondere im Ozean-Ziel (SDG 14) gefordert werden. Hoffnung macht das zunehmende Interesse am Ozean und an den Küsten in politischen Dialogen und damit verbundenen Schutzforderungen. Viele Faktoren wirken auf die Küste ein wie etwa Industrie, Tourismus oder Urbanisierung. Alle diese neuen Stressoren gilt es zu betrachten, wenn es um die Zukunft des Ökosystems Küste geht. Doch was ist die Küste überhaupt? Und welche Rolle spielt sie für den Menschen?

Der vorliegende „World Ocean Review“ nimmt sich diesem zentralen Lebensraum der Erde an. Er liefert einen profunden Überblick über die Entwicklung der weltweiten Küsten, die vielfältigen und zum Teil einzigartigen Ökosysteme und adressiert wichtige Herausforderungen im Umgang mit den Küsten für Gesellschaft, Politik und Forschung. Der Umgang mit Naturgefahren wie Sturmfluten, starken Winden oder Tsunamis, einem zunehmenden Meeresspiegelanstieg erfordern zunehmend das Zusammenspiel von Forschenden und unterschiedlichen Interessenvertretern. Auch im Kieler Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ arbeiten mehr als 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zusammen mit Kolleginnen und Kollegen aus Deutschland, Europa und der ganzen Welt an Lösungswegen, die auf einem grundlegenden Verständnis des Lebensraums Küste im Wechselspiel mit dem Ozean beruhen. Die gesellschaftlichen, politischen und ethischen Forschungsfragen werden dabei schon früh mit einbezogen.

Nur mit einer globalen und lösungsorientierten Erforschung des Ozeans können wir gemeinsam und über Grenzen hinweg einen gerechteren und nachhaltigeren Umgang mit ihm begleiten und damit seine ökosystemaren Leistungen auch für nachkommende Generationen sichern. Die Zukunft des Ozeans und eines Großteils der Menschheit ist eng verbunden mit unserem Umgang mit dem Küstenraum. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine spannende und erhellende Lektüre.

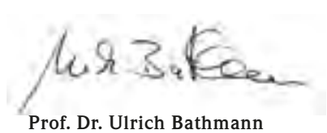


Prof. Dr. Martin Visbeck
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und
Sprecher des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“

An den Küsten begegnen sich Menschen und Meer seit Anbeginn. Soziale Gemeinschaften nutzen das Küstenmeer und versuchen es zu bändigen; Menschen lieben und fürchten das Meer. Dort, wo die Gewalt von Sturm und Wellen einbrechen in Siedlungsräume und Behausungen; dort, wo der Nahrungsschatz der Ozeane direkt greifbar wird; dort, wo Familienschicksale mit Urelementen der Natur eng verknüpft sind; dort, wo Handel und Reisen alte Routen bedienen und neue erschließen; dort, wo Wissenschaft ins Unbekannte aufbricht und zukünftige Entwicklungen abschätzt; und dort, wo Träume, Sehnsüchte und Inspiration neue Nahrung finden, dort erleben Menschen vor ihren Augen unmittelbar und sehr direkt Meere und Ozeane.

Das Wissen um die Küstenmeere und die Vorgänge darin hat eine lange Tradition. Ein breites Spektrum unterschiedlichster Wissenschaftszweige erforscht heute die Küstenmeere weltweit. Im vorliegenden „World Ocean Review“ Band 5: „Die Küsten – ein wertvoller Lebensraum unter Druck“ wird viel von diesen neuen Erkenntnissen zusammengetragen. Küstenmeere weltweit, ihre Ökosysteme und Habitate, die Entstehungsgeschichte, menschliche Nutzung und mögliche Veränderungen werden hier beschrieben. Aus dem bunten Kaleidoskop der Kapitel wird ersichtlich, wie umfassend die deutsche Küstenmeerforschung aufgestellt ist, die wiederum Expertise nicht nur für unsere Hausmeere präsentiert. Die Beiträge, die mit Unterstützung zahlreicher Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Küstenmeerforschung in Deutschland entstanden sind, beleuchten exemplarisch wichtige Aspekte des aktuellen Wissensstands zu den Küstenmeeren. Hilfreich ist dabei, dass sich die Wissenschaft in der Strategiegruppe „Küste“ des Konsortiums Deutsche Meeresforschung (KDM) organisiert. Hierdurch bündeln unsere weltweit geschätzten Ansprechpartner ihren Informationsschatz, um Herausforderungen zukünftiger Veränderungen in Küstenmeeren begegnen zu können.

Die gemeinnützige maribus GmbH hat in ihrer Funktion als Herausgeber diesen Wissensschatz konstruktiv nutzen können, um den WOR 5 zu erstellen. Der Naturraum der Küstenmeere erfordert fachübergreifende Betrachtungsweisen, die neben den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen auch Nutzungsaspekte im Meer und im küstennahen Hinterland, die Einbindung sozioökonomischer Betrachtungsweisen und die Beratung der marinen Raumplanung umfasst. Solch ein holistischer Forschungsansatz wird die Küstenmeerforschung in Zukunft prägen und sich auch in der Ausbildung zukünftiger Generationen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern niederschlagen.



Prof. Dr. Ulrich Bathmann
Direktor des Leibniz-Instituts für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und
Vorsitzender des Konsortiums Deutsche Meeresforschung (KDM)

Vorwort 5

Die Dynamik der Küsten — Kapitel 1

Vom Werden und Vergehen der Küsten 12
Die vielen Gesichter der Küsten 28
Conclusio:
Die Gestalt unserer Küsten – eine lange und wechselvolle Geschichte .. 41

Mit den Küsten leben — Kapitel 2

Die Leistung der Küsten 44
Küsten unter Druck 72
Conclusio:
Immense Leistung, immenser Druck 97

Bedrohung durch Klimawandel und Naturgefahren — Kapitel 3

Der Klimawandel und die Küsten 100
Vom Kampf gegen Naturgefahren 122
Conclusio:
Klimawandel und Naturgefahren bedrohen die Küsten 139

Küsten besser schützen — Kapitel 4

Die Kunst, Küsten zu verwalten 142
Dem Meeresspiegelanstieg begegnen 164
Conclusio:
Gemeinsam für eine schonende Nutzung und einen besseren Schutz ... 181

Gesamt-Conclusio 183

Glossar 189
Abkürzungen 190
Quellenverzeichnis 192
Abbildungsverzeichnis 197
Index 198
Mitwirkende 204
Partner und Danksagung 207
Impressum 208

1 Die Dynamik der Küsten

> Küsten – der Bereich, wo Land und Meer ineinander übergehen – sind für den Menschen ein wichtiger Lebensraum. Sie verändern ihr Gesicht innerhalb von Jahrmillionen oder auch Jahrhunderten auf ganz natürliche Weise. Mancherorts gehen Küstengebiete verloren, andernorts entstehen neue. Je nach Perspektive, aus der man die Küsten betrachtet, lassen sich unterschiedliche Kategorien zur Unterscheidung bilden.

Vom Werden und Vergehen der Küsten

> Küsten sind ein dynamischer Lebensraum. 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. Überhaupt ist die Entwicklungsgeschichte des Menschen eng mit den Küsten verknüpft.

Besondere Anziehungskraft

Küsten sind ein besonderer Lebensraum. Sie sind der Übergangsbereich zwischen Land und Meer und werden von beiden Sphären beeinflusst. Flüsse tragen Nährstoffe vom Land in die Küstengewässer und bilden somit die Grundlage der marinen Nahrungskette. Meere bewegen Sedimente, spülen sie an, lagern sie um oder tragen sie ab, wodurch sich die Gestalt der Küste ändert.

Kein anderer Meereslebensraum ist produktiver. Küsten liefern Nahrung in Form von Fisch und Meeresfrüchten. Sie sind aber auch ein wichtiger Transportweg für die Schifffahrt und werden intensiv für die Gewinnung von Erdgas und Erdöl genutzt. Zugleich sind Küsten für Millionen von Urlaubern ein geschätzter Erholungsraum. Zahlreiche Städte entwickelten sich an den Küsten, und Industrien und Kraftwerke nutzen die dort oft gut entwickelte Infrastruktur.

Insgesamt sind die Küstenzonen der Erde sehr vielgestaltig und für Menschen, Tiere und Planzen, aber auch für die Atmosphäre und das Klima von großer Bedeutung, denn

- 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 fossile Rohstoffe;
- 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.

Die Attraktivität der Küsten für den Menschen ist bis heute ungebrochen. Die Küstenbevölkerung wächst weltweit in rasantem Tempo. Nach Schätzungen der Vereinten Nationen leben heute rund 2,8 Milliarden Menschen in einem Abstand von maximal 100 Kilometern zur Küste. Von den 20 Megastädten der Welt mit jeweils mehr als 10 Millionen Menschen liegen 13 in Küstennähe. Dazu zählen die Städte beziehungsweise die Ballungszentren Mumbai (18,2 Millionen), Dhaka (14,4 Millionen), Istanbul (14,4 Millionen), Kalkutta (14,3 Millionen) und Peking (14,3 Millionen). Nach Meinung vieler Experten wird die Verstädterung der Küstengebiete in den kommenden Jahren weiter zunehmen.

1.1 > Viele Städte entwickelten sich an Küsten. Der Istanbuler Stadtteil Beyoğlu zum Beispiel ist mehrere Tausend Jahre alt. Er liegt am Goldenen Horn, jener fjordartigen Einbuchtung, die den europäischen Teil der Metropole in einen nördlichen und in einen südlichen Bereich trennt.

Die Küste – wo fängt sie an, wo hört sie auf?

Auf Landkarten werden Küsten in der Regel als Linien dargestellt, die das Festland vom Wasser trennen. Die Küste ist aber keine Linie, sondern ein mehr oder weniger breiter Saum zwischen Land und Wasser. Eine eindeutige Definition dieses Übergangsbereichs ist jedoch schwierig. In den 1950er-Jahren schlugen Wissenschaftler vor, die Küste als jenen Raum zu bezeichnen, der von der Brandung beeinflusst ist. Landwärts schließt das den Bereich ein, bis zu dem noch Salzwasserspritzer durch die Luft gelangen können, wodurch beispielsweise die Vegetation beeinflusst wird. Seewärts ist dies der Bereich, in dem sich die Brandung noch bemerkbar macht, beispielsweise indem sie den Meeresboden formt.

Auch wenn in der Theorie versucht wird, den Begriff „Küste“ allgemeingültig zu definieren, spielen in der Praxis unterschiedliche Auslegungen eine Rolle. In der wissenschaftlichen Betrachtung der Küste dominieren je nach Fachrichtung verschiedene Aspekte. Biologen zum Beispiel konzentrieren sich insbesondere auf das Leben im Meer oder in Feuchtgebieten entlang der Küste oder in Flussmündungen. Experten für den Küstenschutz wiederum, die Deiche oder andere Schutzeinrichtungen planen, interessieren sich auch für das Hinterland, das bei Sturmfluten betroffen ist. Wirtschaftswissenschaftler schließlich definieren den Begriff „Küste“ besonders weit. So betrachten sie in der Regel nicht nur Häfen und Industriebetriebe an der Küste, sondern auch die Warenströme über das Meer oder bis ins Binnenland.

Auch Geologen und Ozeanografen haben in den vergangenen Jahrzehnten versucht, die Küsten der Welt systematisch zu erfassen und zu katalogisieren. Je nach Fokus gibt es auch hier verschiedene Ansätze. So werden Küsten danach unterschieden, ob es sich um „energiereiche“ Küstenformationen wie etwa Fels- oder Sandküsten handelt, die direkt von der Brandung umspült werden, oder, wie das Wattenmeer, um vergleichsweise ruhige, „energiearme“, Gebiete, die durch Sandbänke oder vorgelagerte Inseln geschützt sind.

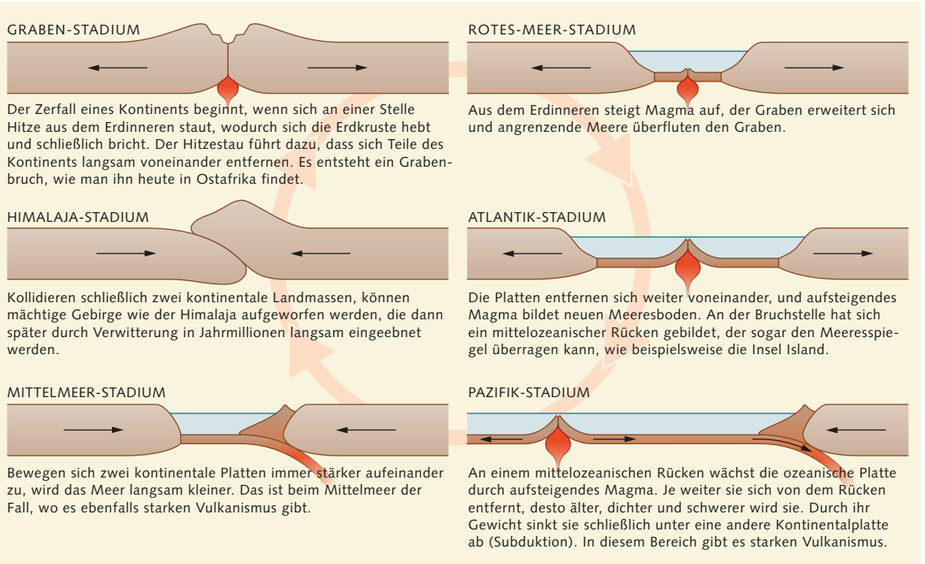
Bei aller Verschiedenheit haben viele Küsten eines gemein: die große Bedeutung für den Menschen. Küsten waren der Ausgangspunkt für Entdeckungsreisen und das Ziel von Eroberern. Archäologen und Völkerkundler gehen davon aus, dass die Küsten schon seit Jahrtausenden bei der Besiedlung neuer Kontinente oder Inseln eine große Rolle spielten. Ehe der Mensch tief in das unbekannte Landesinnere vorstieß, ist er die Küste entlanggefahren, um geeignete Siedlungsgebiete zu suchen. Die ältesten Spuren einer solchen Siedlungsgeschichte findet man heute im Norden Australiens, der vor etwa 50 000 bis 40 000 Jahren von den Vorfahren der Aborigines besiedelt wurde, die vermutlich mit Booten von Inseln herüberkamen, die heute zu Indonesien gehören.

Dynamischer Lebensraum

Oft werden Küstenverläufe als fest und unverrückbar betrachtet. Der Mensch versucht, eine feste Linie zu halten, nicht zuletzt, um Städte und Werte zu schützen, die an den Küsten entstanden und konzentriert sind. Im Grunde aber gibt es kaum einen anderen Bereich, der so dynamisch und ständigen Veränderungen unterworfen ist wie die Küsten. Experten sprechen von einem transienten Lebensraum.

Je nach Größe der betrachteten Zeiträume kann man verschiedene Arten der Veränderung unterscheiden. Die langsamste, zugleich aber gewaltigste Veränderung der Küsten wird durch die Bewegung der Kontinente verursacht. Dass sich die Kontinente bewegen, wurde erstmals

1.2 > Alfred Wegener (1880–1930) war ein deutscher Meteorologe, Polar- und Geoforscher. Ihm gelang es, die Idee von der Kontinentalverschiebung wissenschaftlich zu untermauern. Seine Theorie allerdings hielt man lange für Spinnerei. Erst seit den 1970er-Jahren ist sie allgemein anerkannt.



1.3 > Kontinentale Masse entsteht und vergeht im Laufe von Jahrmillionen. In einem permanenten Zyklus kollidieren, driften und verändern die einzelnen Kontinentalplatten ihre Lage zueinander, wobei man bestimmte Stadien dieses Zyklus unterscheiden kann. Manche Stadien sind nach Regionen benannt, die sich gerade in dieser Phase befinden. Als Erster beschrieb diesen Zyklus der kanadische Geowissenschaftler John Tuzo Wilson.

von dem deutschen Forscher Alfred Wegener postuliert, der im Jahr 1912 seine Theorie von der Kontinentalverschiebung veröffentlichte. Diese Theorie wurde im Laufe der Jahrzehnte immer wieder ergänzt und erweitert. Heute spricht man von Plattentektonik. Demnach besteht die Erde aus mehreren Schichten, von denen die oberste Schicht, die Lithosphäre, langsam wandert. Die Lithosphäre setzt sich aus mehreren großen Platten zusammen, die nebeneinanderliegen und sich pro Jahr um bis zu 10 Zentimeter bewegen. Die Lithosphäre bildet die Kontinente, trägt aber auch die großen Ozeanbecken. Sie ist durchschnittlich etwa hundert Kilometer dick und gleitet auf einer zweiten Erdschicht, der Asthenosphäre, die unter ihr liegt.

An manchen Stellen schieben sich die Platten der Lithosphäre übereinander, wodurch im Laufe von mehreren Millionen Jahren hohe Gebirge wie der Himalaja aufgefaltet wurden. In anderen Fällen reiben die Platten aneinander oder driften auseinander. Von diesen Bewegungen sind insbesondere die Küsten und flachen Meeresbereiche, die Schelfe, betroffen, da sie am Rand der kontinentalen Teile der Platten liegen und somit bei der Kontinentalverschiebung stark verformt werden.

In vielen Gebirgen weltweit, etwa in den Alpen, findet man heute die Überreste ehemaliger Küstenmeere: Versteinerungen von Muscheln, Schnecken und anderen Organismen der flachen Küstengewässer.

Die Kontinentalverschiebung ändert die Gestalt der Küsten zusätzlich durch einen weiteren Mechanismus. Jedes Mal, wenn sich ein Gebirge an Land auffaltet, also sich kontinentale Teile der Platten übereinanderschieben und damit quasi aus dem Wasser entfernen, sinkt zum einen der Meeresspiegel. Allerdings steigt er auch, da Magma an den ozeanischen Rücken emporquillt und dieses durch sein Volumen das Wasser verdrängt.

Der Superkontinent zerfällt

Im Laufe der **Erdgeschichte** wechselten sich mehrere Phasen ab. So gab es Zeiten, in denen die Kontinentalplatten in Form eines einzigen Superkontinents oder einiger weniger Großkontinente miteinander verbunden waren. Dann folgten Phasen, in denen die Riesen- und Großkontinente wieder auseinanderdrifteten. Diese Phasen werden nach dem kanadischen Geowissenschaftler John Tuzo Wilson, der dieses Prinzip erstmals in den 1960er-Jahren in einem Fachartikel beschrieb, als Wilson-Zyklen bezeichnet. Der jüngste dieser Zyklen begann vor etwa 300 Millionen Jahren, als die Kontinentalplatten miteinander kollidierten und den Superkontinent Pangaea formten. Vor etwa 230 Millionen Jahren begann Pangaea wieder zu zerfallen und trennte sich zunächst in einen nördlichen (Laurasia) und in einen südlichen Teil (Gondwana). In einer zweiten Phase spaltete sich dann Gondwana vor 140 Millionen Jahren in die Landmassen auf, aus denen das heutige Afrika, Südamerika, Indien und Australien hervorgingen. Der Zerfall Laurasias begann vor circa 65 Millionen Jahren, als sich die nordamerikanische von der eurasischen Landmasse trennte. Dadurch öffnete sich der Nordatlantik, Indien wanderte mehr als 6000 Kilometer nach Nordosten und kollidierte schließlich vor etwa 40 Millionen Jahren mit der Eurasischen Platte. Im Laufe der Zeit faltete sich dadurch der Himalaja auf. Noch heute wandert Indien langsam Richtung Norden, wodurch der Himalaja jedes Jahr um etwa 1 Zentimeter in die Höhe wächst.

Evolutionsbiologen gehen davon aus, dass die frühe Phase des Auseinanderbrechens von Pangaea – und die damit einhergehende Bildung frischer Küsten – die Entstehung neuer Arten begünstigt hat.

1.4 > Die Kontinentalplatten tragen sowohl die Landmasse als auch die Ozeane. Sie bewegen sich pro Jahr um bis zu mehrere Zentimeter. An manchen Stellen entfernen sich Kontinentalplatten voneinander wie zum Beispiel am Mittelatlantischen Rücken. Anderswo schieben sich Platten übereinander. So taucht die Indische unter die Eurasische Platte, wodurch der Himalaja weiter aufgefaltet wird.

1.5 > Vor Jahrmillionen bildeten die Kontinentalplatten eine weitgehend zusammenhängende Landmasse, den Superkontinent Pangaea. Den Atlantischen Ozean gab es damals noch nicht.

Landgang des Lebens

Durch die Wanderung der Kontinente wurden Küsten nicht nur neu geschaffen oder vernichtet, sondern auch verschoben. Ganze Küstenregionen drifteten in andere Klimazonen, was wiederum eine Anpassung der existenten und die Entstehung neuer Lebensformen bewirkte.

1.6 > Dass sich die Kontinentalplatten bewegen, ist in Island deutlich zu erkennen. Die Insel liegt teils auf der Eurasischen, teils auf der Nordamerikanischen Platte. Beide driften jedes Jahr um wenige Zentimeter auseinander. Der Riss, der sich über die Insel zieht, wird als Silfra-Spalte bezeichnet.

Die Evolution des Aals – eine Sache der Kontinentaldrift

Viele Tierarten sind dadurch entstanden, dass eine Population einer Art aufgespalten wurde. Im Laufe der Evolution entwickelten sich diese getrennten Populationen dann unterschiedlich weiter, sodass neue Arten mit unterschiedlichen Merkmalen aus ihnen hervorgingen. Hauptgründe für solche Aufspaltungen waren eiszeitliche Gletscher, die ganze Regionen voneinander abschnitten, oder die Kontinentaldrift, die Landmassen auseinanderriss. Auch Populationen von Meeresorganismen wurden durch die Kontinentaldrift getrennt. Das zeigt das Beispiel des Aals. Heute gibt es weltweit etwa 15 Aalarten, unter anderem den Amerikanischen Aal *(Anguilla rostrata)*, der an der Ostküste der USA lebt, den Europäischen Aal *(Anguilla anguilla)* oder den Japanischen Aal *(Anguilla japonica)*. Man nimmt an, dass alle Aalarten von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen. Dessen Revier lag wohl östlich des Großkontinents Pangaea, im damaligen Tethysmeer, etwa in der Region des heutigen Indonesiens. Zudem soll der Uraal, wie die modernen Aalarten auch, regelmäßig große Wanderungen zwischen seinem Laichgebiet im Meer und seinem Aufzuchtgebiet in den Flüssen unternommen haben.

Als sich der nördliche Teil Pangaeas (Laurasia) vom südlichen Teil (Gondwana) trennte, öffnete sich erstmals eine Meerenge, die in Ost-West-Richtung verlief und nun das Tethysmeer im Osten mit dem Meer im Westen verband. Damit konnte sich der Uraal bis in das westliche Meer ausbreiten. Doch die Kontinentalwanderung setzte sich fort. Vor etwa 140 Millionen Jahren begann Gondwana sich in die Landmassen aufzuspalten, aus denen das heutige Afrika, Südamerika, Indien und Australien hervorgingen. Afrika und die Landmasse der Arabischen Halbinsel wanderten nordwärts und kollidierten schließlich mit der Eurasischen Platte. Damit schloss sich die Verbindung zwischen dem westlichen und dem östlichen Meer wieder. Die Aalpopulationen wurden getrennt und entwickelten sich separat voneinander weiter. Diese Theorie wird auch als Tethys-Korridor-Hypothese bezeichnet. Zwar werden zur Artentstehung bei den Aalen noch andere Hypothesen diskutiert, diese gilt unter Experten aber als die wahrscheinlichste.

Auch die Aufspaltung in die zwei atlantischen Arten, den Europäischen und den Amerikanischen Aal, wird auf die Kontinentaldrift zurückgeführt. Zwar sind sich die Tiere äußerlich sehr ähnlich, doch unterscheiden sie sich im Detail, sodass man von zwei Arten sprechen kann. Beide leben bis zur Geschlechtsreife in Küstengewässern und Flüssen. Zum Laichen wandern sie aus den Gebieten in Amerika beziehungsweise Europa bis in die Sargassosee im Westatlantik. Hier geben sie Eier und Samenzellen ins Wasser ab. Aus den befruchteten Eiern schlüpfen noch in der Sargassosee die Larven, die dann den Rückweg gen Europa beziehungsweise Amerika antreten. Während der ein- bis dreijährigen Wanderung nach Europa wachsen die Larven von einer ursprünglichen Länge von 3 Millimetern auf bis zu 70 Millimeter heran. Auf dieses erste Larvenstadium folgt ein zweites. Noch im Meer nehmen die Larven die Gestalt eines Weidenblatts an, weshalb man von Weidenblattlarven spricht. Aus diesen entwickeln sich dann durchscheinende Jungtiere, die als Glasaale bezeichnet werden. Diese wandern in die Küstengewässer und Flüsse, wo sie sich zum erwachsenen Tier weiterentwickeln. Da sich die jeweiligen Laichgebiete in der Sargassosee nur zu einem geringen Teil überlappen, kreuzen sich die beiden Arten nur selten. Hybride findet man daher nur vereinzelt.

Vermutlich hat sich der atlantische Aal in zwei Arten aufgespalten, weil sich der Atlantik geweitet hat. Dadurch entwickelten sich zwei Populationen, eine im westlichen und eine im östlichen Teil. Auch heute noch weitet sich der Atlantik jedes Jahr um einige Zentimeter. Das liegt daran, dass sich in der Mitte des Atlantiks zwei Kontinentalplatten langsam voneinander entfernen. Heute beträgt die Distanz, die der Europäische Aal bis zur Sargassosee zurücklegen muss, bereits etwa 5000 bis 6000 Kilometer.

1.7 > Bevor Europa und Afrika über eine Landbrücke verbunden waren, konnten sich die Aale von Osten her bis in den entstehenden Atlantik ausbreiten.

1.8 > Wale haben sich aus landlebenden Säugetieren entwickelt. Ihre terrestrische Herkunft ist daran zu erkennen, dass sie ihre Schwanzflosse vertikal schwingen, also eine Auf-und-ab-Bewegung wie zum Beispiel Raubkatzen vollführen. Fische hingegen bewegen die Schwanzflosse horizontal hin und her.

Ein interessanter Aspekt ist hierbei, wie die Rolle der Küsten beim Übergang des Lebens vom Meer auf das Land einzuschätzen ist. Als gesichert gilt heute, dass sich die ersten Lebensformen im Meer entwickelten und der Landgang des Lebens sich an mehreren Orten, zu unterschiedlichen Zeitpunkten und in unterschiedlichen Zeiträumen abgespielt hat. Dieser vollzog sich bei verschiedenen Organismengruppen völlig unabhängig voneinander. So nimmt man an, dass die Arthropoden, die Gliederfüßer, zu denen Krebstiere, Insekten und Spinnentiere zählen, unabhängig von den Wirbeltieren das Land besiedelt haben. Genetische Analysen haben ergeben, dass die Vorfahren der heutigen Insekten vor etwa 480 Millionen Jahren von der aquatischen zur terrestrischen Lebensweise übergingen.

Ferner wird angenommen, dass der Landgang der Wirbeltiere vor rund 415 Millionen Jahren begann und bis vor 360 Millionen Jahren andauerte. Vermutlich entwickelten sich die ersten Landwirbeltiere aus Knochenfischen. Die ersten **amphibischen** Lebewesen könnten Tiere aus der Gattung der *Kenichthys* gewesen sein. Überreste dieser kleinen Tiere, deren Schädel nur wenige Zentimeter lang sind, wurden unter anderem in China gefunden und auf ein Alter von etwa 395 Millionen Jahren geschätzt. Möglicherweise haben sie anfangs auch Jagd auf Insekten gemacht. Sie könnten auch küstennahe Feuchtgebiete, Flussmündungen, feuchte Flussufer und Brackwasserbereiche besiedelt haben, in denen sich Flusswasser und salziges Meerwasser mischten. Mit den Amphibien gibt es auch heute noch eine Tiergruppe, die sowohl im Wasser als auch an Land lebt. Kröten brauchen Gewässer, um sich fortzupflanzen. Auch die Entwicklung der Larven verläuft im Wasser. Für die ausgewachsenen Tiere wiederum ist das Land der dominierende Lebensraum, in dem sie nach Beute jagen und sich paaren.

Küsten als Brücken zwischen Meer und Land

Auch die Fischfamilie der Störe zeigt eine amphibische Anpassung. Störe leben vorzugsweise im Meer, suchen zum Ablaichen aber Süßgewässer auf. Interessanterweise haben Störe nicht nur die für Fische typischen Kiemen, sondern auch lungenähnliche Organe, kleine Hohlräume im Schädel. Sie können diese durch Schluckbewegungen mit Luft füllen, um daraus Sauerstoff aufzunehmen – vermutlich als eine Anpassung an mögliche Trockenphasen. Dank der Luftatmung kann ein Stör solche Perioden überleben, zum Beispiel wenn ein Bach oder Seeufer für kurze Zeit trockenfällt oder nur wenig Wasser führt.

Die Küsten spielten aber auch in umgekehrter Richtung eine Rolle: beim Gang des Lebens vom Land zurück ins Meer. So findet man im Tierreich heute zahlreiche Organismen, deren Vorfahren auf dem Land lebten und die sich das Meer als Lebensraum neu erschlossen haben. Wale zum Beispiel stammen von landlebenden Vierbeinern ab, haben die beiden hinteren Extremitäten aber zu rudimentären Knochenstummeln zurückgebildet. Ihre Art der Fortbewegung ähnelt dennoch der einiger vierbeiniger Tierarten an Land, deren Hinterleib sich im schnellen Lauf auf und ab bewegt. Die Fluke, die Schwanzflosse der Wale, vollzieht eine ähnliche Bewegung, weil Rückgrat und Skelett nach wie vor denen der landlebenden Säuger gleichen. Fische hingegen bewegen ihre Schwanzflossen horizontal hin und her.

Den Schritt von der Küste zurück ins Wasser haben auch einige Schildkrötenarten vollzogen, obwohl sie sich ursprünglich als vierbeinige Landtiere entwickelt hatten. So sind die Meeresschildkröten zu einer amphibischen Lebensweise zwischen Land und Meer übergegangen. Viele dieser Arten suchen bei Springtide, wenn die Flut besonders hoch steigt, Strände zur Eiablage auf. So können sie die Eier weit oben am Strand im Sand vergraben, wodurch sie vor Überflutung geschützt sind. Die Jungtiere wiederum schlüpfen später ebenfalls zur Springtide, wenn das Wasser erneut hoch steht und der anstrengende und gefährliche Weg über den Strand zurück ins Meer am kürzesten ist.

Auf und Ab im Laufe von Zehntausenden von Jahren

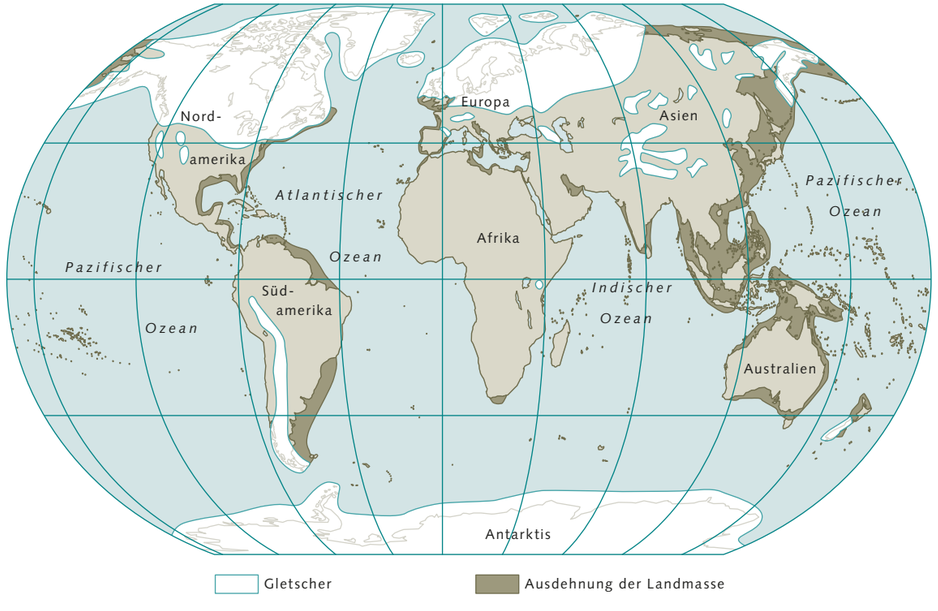
Küsten verändern nicht nur im Laufe von Jahrmillionen ihr Gesicht, wesentliche Veränderungen spielen sich auch schon in kürzeren Zeiträumen ab. Im Rhythmus von mehreren Zehntausend Jahren spielt vor allem der Wechsel von Warm- und Eiszeiten und damit des Meeresspiegels eine Rolle.

Während der Eiszeiten frieren große Teile der Landmasse ein. Niederschläge in Form von Schnee bilden mehrere Tausend Meter dicke Gletscher. Da viel Wasser als Eis an Land gebunden ist und kaum welches über Flüsse ins Meer fließt, sinkt während einer Eiszeit nach und nach der Meeresspiegel. Die letzte Eiszeit dauerte bis vor etwa 12 000 Jahren an. Zum letzten Mal stark vereist war die Erde vor 26 000 bis 20 000 Jahren. Damals lag der Meeresspiegel etwa 125 Meter tiefer als heute. Die Nordhalbkugel der Erde war in weiten Teilen von Gletschern überzogen, Mitteleuropa bis etwa zu den Niederlanden. In wärmeren Regionen der Erde sah die Küstenlinie völlig anders aus als heute.

Vor etwa 15 000 Jahren begannen die Temperaturen auf der Erde wieder stärker anzusteigen. Diese Warmzeit hält bis heute an. Die letzte Warmzeit davor, die in Bezug auf die Temperaturen mit der aktuellen Situation vergleichbar ist, gab es vor 130 000 bis 118 000 Jahren. Damals lag der Meeresspiegel rund 4 bis 6 Meter höher als heute.

Das große Schmelzen

Mit dem Abschmelzen der Gletscher der letzten Eiszeit stieg auch der Meeresspiegel wieder. Dieser Anstieg verlief relativ gleichmäßig, doch gab es hin und wieder Phasen eines beschleunigten Anstiegs, die durch sogenannte Schmelzwasserpulse ausgelöst wurden. Dabei handelte es

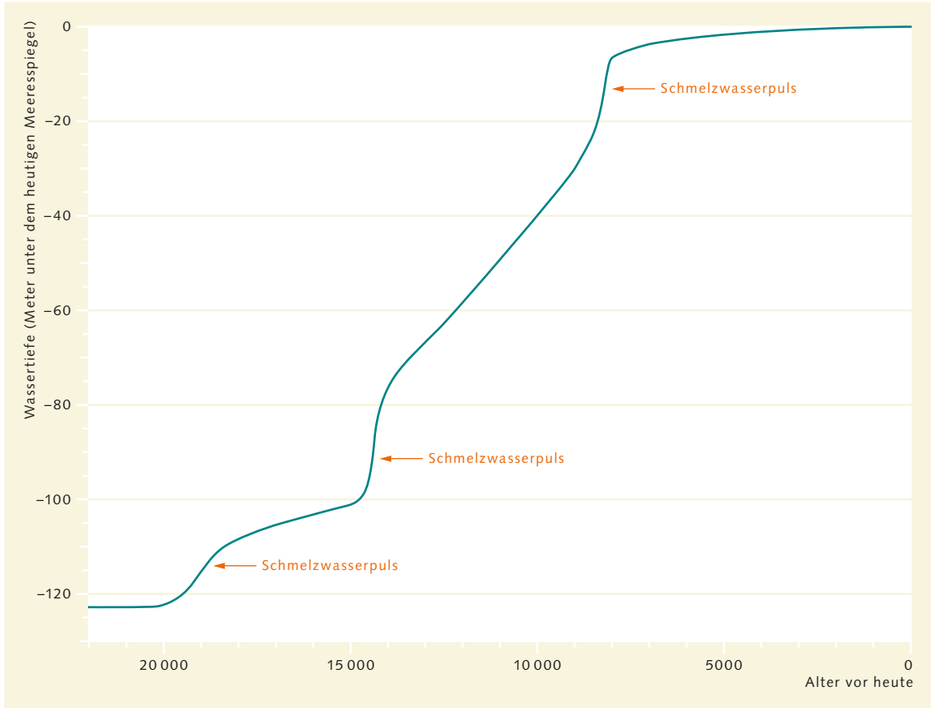


1.9 > Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit lag der Meeresspiegel etwa 125 Meter tiefer als heute. Die aus dem Wasser ragende Landmasse war weltweit um etwa 20 Millionen Quadratkilometer größer.

sich um große Mengen von Schmelzwasser, die innerhalb relativ kurzer Zeit freigesetzt wurden. Ein bedeutendes Ereignis war ein Schmelzwasserpuls, der vor etwa 14 700 Jahren einsetzte und 500 Jahre anhielt. Die Ursache dafür war vermutlich das Kalben großer Gletschermassen in der Antarktis oder in der Arktis zwischen Grönland und Kanada. Mit dem Schmelzen der Gletscher stieg der Meeresspiegel innerhalb dieser Zeit global um etwa 20 Meter. Weitere große Ereignisse waren das Auslaufen gewaltiger Stauseen, die sich beim Abschmelzen vor den zurückweichenden Inlandgletschern gebildet hatten. So hatte der Agassizsee in Nordamerika nach wissenschaftlichen Schätzungen eine maximale Fläche von rund 440 000 Quadratkilometern und war damit sogar gewaltiger als die heutigen Großen Seen in Nordamerika.

Er durchbrach mehrmals die ihn umgebenden Gletscher, wodurch vor allem vor ungefähr 8200 Jahren große Mengen an Süßwasser ins Meer gelangten. Allein dieser Schmelzwasserpuls soll den Meeresspiegel innerhalb weniger Monate weltweit um einige Meter haben ansteigen lassen.

Wie stark sich der Meeresspiegel seit der letzten Eiszeit verändert hat, kann heute anhand verschiedener Indizien nachvollzogen werden, etwa durch die Untersuchung von Korallenriffen oder Sedimenten am Meeresboden. Tropische Korallenbänke sind im Laufe der Jahre und Jahrzehnte an den Hängen der Inseln im Südpazifik mit dem Meeresspiegel langsam in die Höhe gewachsen. Sie können nur in lichtdurchflutetem, flachem Wasser leben. Steigt der Meeresspiegel, verschiebt sich auch die Zone, in der die Korallen gedeihen, langsam nach oben. Bohrt man tief in die Korallenbänke hinein, stößt man auf alte abgestorbene Korallen, deren Alter sich durch spezielle Analyseverfahren bestimmen lässt. Dadurch kann man abschätzen, wie tief oder hoch der Meeresspiegel zu bestimmten Zeiten lag.



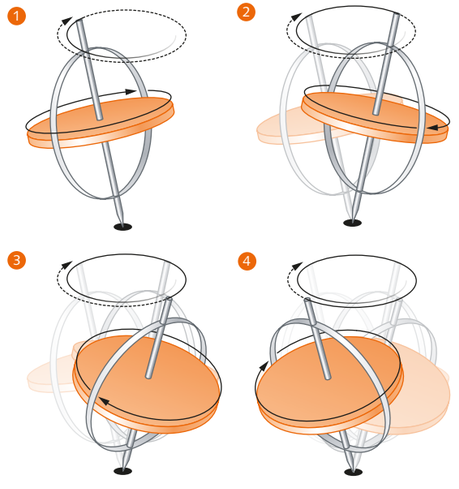
1.10 > Der Meeresspiegel ist über die Jahre nicht kontinuierlich gestiegen. Vielmehr gab es Sprünge, die durch Ereignisse wie die Schmelzwasserpulse ausgelöst wurden.

Die zweite Methode besteht darin, die Sedimente am Meeresboden genauer zu untersuchen. Anhand von Mikrofossilien in den Sedimenten am Meeresboden, wozu Reste von Einzellern oder auch versteinerte Fischknochen oder Zähne gehören, lässt sich ablesen, wann der Boden zum Festland gehörte, ob er von Süßwasser aus den abschmelzenden Gletschern bedeckt war und wann er schließlich durch den steigenden Meeresspiegel von Salzwasser überflutet wurde. Denn je nach Umweltbedingungen kommen in den Gewässern verschiedene Lebewesen vor, deren organische Reste sich dort anreichern. So unterscheidet sich eine Sedimentschicht, die von Landpflanzen stammt, deutlich von einer, in der sich Reste von Meerwasseralgen befinden.

Die Sonne als Klimamotor

Als Ursache für den Wechsel von Warm- und Eiszeiten und das damit einhergehende Sinken und Steigen des Meeresspiegels werden regelmäßige natürliche Klimaschwankungen angesehen. Einen Einfluss auf die Warm- und Eiszeiten könnten die in den 1930er-Jahren von dem Mathematiker Milutin Milanković postulierten Milanković-Zyklen haben. Seine Theorie besagt, dass sich regelmäßig die Position der Erde zur Sonne ändert, wodurch auch die Einstrahlung der Sonne auf die Erde variiert. Diese Variation wirkt sich vor allem auf die Nordhalbkugel aus. Gemäß Milanković hat das drei wesentliche Ursachen:

- Die Veränderung der Präzession der Erdachse, die sich in Zyklen von etwa 23 000 Jahren ändert. Die Präzession lässt sich am besten mit einem rotierenden Kreisel erklären, den man anstößt. Der Kreisel rotiert anschließend weiter, doch vollführt die Achse des Kreisels jetzt größere Drehbewegungen. Die Richtungsänderung, die die Achse dabei ausführt, wird als Präzession bezeichnet.
- Die Änderung des Neigungswinkels der Erdachse alle rund 40 000 Jahre.
- Die Änderung der Exzentrizität bei der Drehung der Erde um die Sonne. Dabei verändert sich die Form der elliptischen Umlaufbahn, auf der die Erde um die Sonne kreist. Eine Veränderung tritt in Zyklen von etwa 100 000 beziehungsweise 400 000 Jahren auf.



1.11 > Die Erde verändert im Laufe von etwa 23 000 Jahren ihre Präzession, ihre Rotationsbewegung. Das lässt sich mit einem Kreisel vergleichen, der langsam ins Trudeln gerät. Zwar dreht er sich weiter, doch vollführt die Achse jetzt größere Kreisbewegungen.

Zwar weiß man heute, dass sich mit den Milanković-Zyklen allein die großen Temperaturdifferenzen zwischen Warm- und Eiszeiten nicht erklären lassen. Doch haben diese höchstwahrscheinlich einen großen Anteil daran. Zur Entstehung von Eiszeiten trägt auch ein sich selbst verstärkender Effekt bei: die Eis-Albedo-Rückkopplung. Eis und Schnee reflektieren Sonnenlicht sehr stark, was man als Albedo bezeichnet. Dadurch wird auch die Wärmestrahlung der Sonne zurückgeworfen, wodurch es zu einer weiteren Abkühlung kommt. Das Wachstum der Gletscher wird dadurch noch verstärkt.

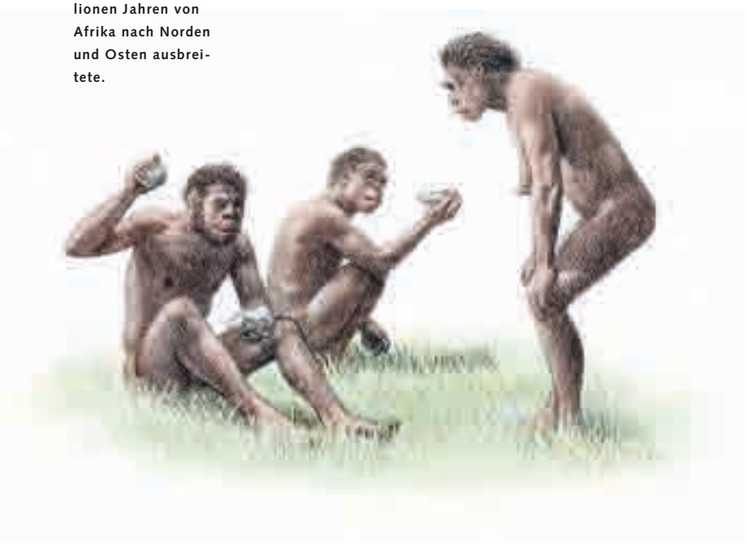
Die Veränderung des Meeresspiegels – ein Taktgeber für die Entwicklung des Menschen

Durch das Heben und Senken des Meeresspiegels veränderte sich die verfügbare Landfläche jeweils deutlich. Viele Gebiete, die heute überspült sind, lagen auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit trocken, weil sich der Meeresspiegel circa 125 Meter niedriger befand. Die Landfläche in Europa war knapp 40 Prozent größer als heute, weltweit war sie etwa 20 Millionen Quadratkilometer größer, was in etwa der Fläche Russlands entspricht. Den Menschen standen somit umfangreichere Areale zur Verfügung, die für Fischerei, als Jagdgebiet und Siedlungsraum genutzt worden sein dürften. Experten gehen davon

aus, dass auch die Schifffahrt damals schon eine Rolle spielte. Zu jener Zeit lagen viele Verbindungen zwischen heutigen Inseln und dem Festland noch über dem Meeresspiegel. Den Menschen standen zur Erschließung neuer Gebiete Wege zur Verfügung, die es heute nicht mehr gibt. Dazu zählt etwa die nördliche Verbindung zwischen Amerika und Asien, die heute durch die Beringstraße getrennt ist. Ein anderes Beispiel ist die etwa 500 Kilometer breite Arafurasee, das Meeresgebiet zwischen Australien und der nördlich gelegenen Insel Neuguinea, das heute ein bedeutendes Fischfanggebiet ist, zum Höhepunkt der letzten Eiszeit aber trocken lag.

Ursprung Afrika

Heute gilt als wahrscheinlich, dass der Ursprung des Menschen in Ostafrika liegt. Dabei werden folgende wichtige Epochen seiner Verbreitung unterschieden. Die erste liegt etwa 2 Millionen Jahre zurück. In dieser Zeit verbreitete sich der Frühmensch *Homo ergaster/Homo ercetus* vermutlich auf dem Landweg bis nach Europa, China und bis ins südliche Afrika. Ob und inwieweit *Homo ergaster* und *Homo erectus* miteinander verwandt sind, ist heute noch Gegenstand der Forschung. Als sicher gilt, dass beide ausstarben und keine Vorfahren des modernen Menschen *Homo sapiens*, unseres direkten Vorfahrens, waren. Die zweite Epoche betrifft *Homo sapiens*, der sich vor knapp 200 000 Jahren verbreitete. Vor rund 50 000 Jahren eroberte er vom heutigen Indonesien aus auch Neuguinea und schließlich den späteren Kontinent Australien. Neuguinea, das je zur Hälfte zu Indonesien und zu Papua-Neuguinea gehört, war damals wie heute durch das Meer vom übrigen Indonesien getrennt. Doch hat der Mensch nach Ansicht von Experten zu jener Zeit bereits einfache Boote und grundlegende nautische Kenntnisse besessen. In dieser Phase hat daher bereits die Schifffahrt über größere Distanzen von Küste zu Küste eine Rolle gespielt. Amerika hingegen wurde über die Landbrücke im Norden von Asien aus vor etwa 15 000 Jahren besiedelt. Viele Zeugnisse dieser frühen Besiedlung durch den Menschen liegen heute unter Wasser, sodass es oft an Fundstücken oder prähistorischen Siedlungshinweisen mangelt. Doch ist zu vermuten, dass sich der Mensch vor allem entlang der Küsten ausgebreitet hat. Auf dem Land machten oftmals Wälder die Wanderungen unmöglich, sodass der Weg entlang der Küste womöglich der einfachere war. Zudem waren Fische und Meeresfrüchte eine verlässliche Nahrungsquelle. Einen weiteren Schub bekam die Eroberung neuer Gebiete durch *Homo sapiens* durch das Ende der letzten Eiszeit. Als die Gletscher tauten, machten sie Platz für den modernen Menschen, der sich nun bis in die arktischen Regionen ausbreiten konnte.



1.12 > Der Frühmensch *Homo ergaster* verfügte bereits über viele Fähigkeiten des modernen Menschen. So konnte er Werkzeuge herstellen. Dies könnte dazu beigetragen haben, dass er sich vor etwa 2 Millionen Jahren von Afrika nach Norden und Osten ausbreitete.

Moderne Technik für alte Spuren

Um die Ausbreitung des Menschen und die besondere Bedeutung der Küsten besser rekonstruieren zu können, arbeiten seit einigen Jahren Spezialisten verschiedener Disziplinen intensiv zusammen. Teams aus Geologen, Archäologen und Klimatologen haben sich zusammengefunden, um in Küstengewässern nach Spuren früher Besiedlung zu suchen und mithilfe moderner Unterwasserroboter und hochauflösender Echolot-Technik die Strukturen am Meeresboden im Detail sichtbar machen zu können. Die Unterwasserarchäologie gilt vor allem deshalb als interessant, weil Gebiete an Land im Laufe von Jahrtausenden immer wieder durch den Menschen überformt wurden, manche – auch steinzeitliche – Spuren aber am Meeresgrund von Sedimentschichten bedeckt und zugleich geschützt worden sind. In Küstennähe gehen Forscher inzwischen systematisch auf die Suche nach Unterwasserhöhlen, die während der Eiszeiten trocken lagen. Solche Höhlen wurden in früherer Zeit als Wohnraum genutzt und könnten interessante Fundstücke bergen.

Aus vielen Gebieten der Welt gibt es mittlerweile interessante neue Erkenntnisse, so zum Beispiel über die Siedlungswege zwischen Afrika und Europa rund um das Mittelmeer. Lange ging man davon aus, dass der moderne Mensch von Afrika auf dem Landweg am östlichen Mittelmeer nach Norden vorgestoßen ist. Neuere Funde zeigen aber, dass eine Besiedlung über das Meer von Küste zu Küste ebenso denkbar ist. Besonders intensiv wird derzeit untersucht, welche Rolle Malta gespielt haben könnte, jener Archipel, der zwischen Tunesien und der italienischen Insel Sizilien liegt. Er könnte eine wichtige Brücke zwischen den Kontinenten gewesen sein. Malta war zum Höhepunkt der letzten Eiszeit wesentlich größer und über eine 90 Kilometer lange Landbrücke, die als Malta-Ragusa-Plattform bezeichnet wird, mit dem heutigen Sizilien verbunden, sodass der Weg nordwärts von Afrika über das Mittelmeer im Vergleich zu heute kürzer war.

In den vergangenen Jahren wurde der Meeresboden um Malta mithilfe moderner Unterwassertechnik genau kartiert. Zudem wurden Bodenproben genommen. Dabei wurden alte Landstrukturen am Meeresboden sichtbar, die sich im Laufe der Jahrtausende kaum verändert hatten: alte Flusstäler, Sandbänke, steinzeitliche Uferlinien und möglicherweise sogar alte Seen. Früher waren die heutigen drei Inseln des Malta-Archipels miteinander verbunden, und es gab dort offenbar große fruchtbare Gebiete, die für frühe Siedler aus Afrika interessant gewesen sein könnten. Eine Überfahrt mit einfachen Booten wäre nach Ansicht der Forscher denkbar. Derzeit versucht man, konkrete Hinweise auf frühe Siedlungen zu finden.

Auch 200 Kilometer nordwestlich wird nach Spuren früher Besiedlung am Meeresgrund gesucht. Dort, auf der kürzesten Strecke zwischen Tunesien und Sizilien, liegt die kleine Insel Pantelleria. Sie ist für ihre Obsidian-Vorkommen bekannt, ein schwarzes, glasähnliches Vulkangestein, das auch von Menschen der Steinzeit benutzt wurde. Forscher haben jetzt ein kleines Gebiet nach behauenen Obsidian-Steinen abgesucht und sind fündig geworden. Offensichtlich kommen die behauenen Steine konzentriert an einer alten Uferlinie vor, die heute in etwa 20 Meter Tiefe liegt. Nähere Untersuchungen sollen zeigen, ob es sich um einen steinzeitlichen Fund handelt. Die Wissenschaftler halten das für wahrscheinlich.

Sundaland – ein Schmelztiegel der Menschheit

Auch in Südostasien wird versucht, untergegangene Küstenlinien ausfindig zu machen, an denen sich prähistorische Siedlungshinweise finden lassen. Die Herausforderung besteht in der schieren Größe des zu untersuchenden Meeresgebiets. Während der letzten Eiszeit war das heutige Seegebiet zwischen dem asiatischen Festland und den Inseln Borneo, Java und Sumatra eine riesige zusammenhängende Landmasse, die als Sundaland bezeichnet wird und damals eine Ausdehnung von der Größe Europas hatte. Experten nehmen an, dass sich das Klima und die Vegetation in verschiedenen Teilen von Sundaland immer wieder änderten. So gab es zu manchen Zeiten dichte Regenwälder, zu anderen Savannenlandschaften. Die Veränderungen führten dazu, dass es immer wieder großräumige Wanderungen gab. Menschen wanderten aus nördlichen Regionen nach Sundaland ein. Zu anderen Zeiten gab es Bewegungen in die Gegenrichtung. Dadurch – so zeigen genetische Modellierungen und einige wenige archäologische Funde – mischten sich die verschiedenen Stämme zu bestimmten Zeiten immer wieder. Die Region war ein genetischer Schmelztiegel, der bei der Entwicklung des heutigen Menschen eine wichtige Rolle gespielt haben dürfte. Weiter nimmt man an, dass die Menschen vor allem zu Zeiten, in denen in Sundaland die Savannen dominierten, auf bestimmten Korridoren oder Ebenen wanderten, möglicherweise auch auf höher gelegenen Ebenen entlang der Küste.

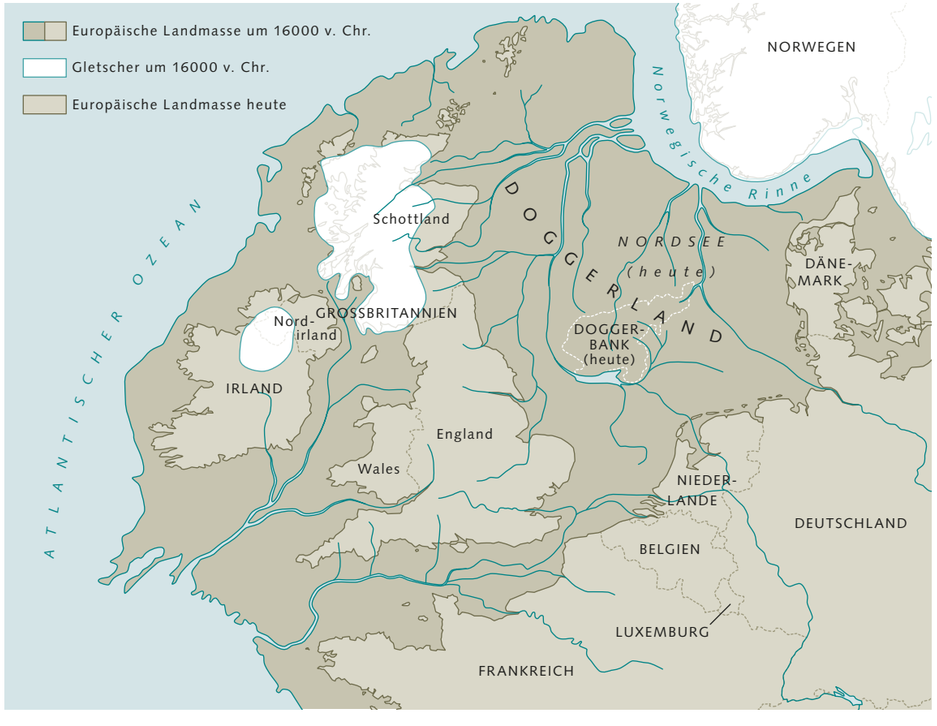
Noch ist über die Siedlungsgeschichte dieser Region zu wenig bekannt, sagen die Experten. Das sei bedauerlich, weil die Region auch ein wichtiger Trittstein für die Besiedlung Neuguineas und Australiens sei, die während der letzten Eiszeit eine zusammenhängende Landmasse bildeten, die als Sahul bezeichnet wird. Mit Sicherheit ausschließen lässt sich aber, dass es eine feste Verbindung zwischen Sundaland und Sahul gegeben hat, weil das Meeresgebiet dazwischen, die Bandasee, schon damals bis zu 5800 Meter tief war.

Die Ostsee – ein junges Küstenmeer

Im Vergleich zur Südhalbkugel spielten bei der Besiedlung der Nordhalbkugel andere Faktoren eine Rolle. Nicht nur die Veränderung des Meeresspiegels, sondern auch die Eismassen der Gletscher hatten einen enormen Einfluss auf die Natur und die menschliche Besiedlungsgeschichte. Wie stark sich die Landschaft dort verändert hat, zeigt das Beispiel der Ostsee. Deren Geschichte lässt sich dank umfangreicher sedimentologischer Untersuchungen ziemlich genau nachvollziehen. Sie begann vor etwa 12 000 Jahren, als sich die Gletscher der letzten Eiszeit bis nach Skandinavien zurückgezogen hatten. Damals lag der Meeresspiegel etwa 80 Meter unter dem heutigen Niveau. Im Bereich der heutigen Zentralen Ostsee bildete sich ein Schmelzwassersee, der zunächst keine Verbindung zum offenen Meer hatte, weil die heutige Meerenge zwischen Dänemark und Schweden, das Kattegat, früher noch als Landmasse über dem Meeresspiegel lag. Man hätte an diesem See entlangwandern und von der Region, wo sich heute die Insel Rügen befindet, bis zum Gebiet, wo heute die dänische Insel Bornholm liegt, trockenen Fußes gelangen können.

Mit dem Ansteigen des Meeresspiegels durch die Schmelzwasserpulse wurde diese Landverbindung vor etwa 10 000 Jahren überflutet. Allerdings wurde diese Verbindung zum offenen Meer vor etwa 9300 Jahren noch einmal gekappt, weil sich die skandinavische Landmasse langsam hob. Hatten während der Eiszeit die schweren Gletscherlasten sie noch absinken lassen, so verringerten sich diese mit dem Abtauen kontinuierlich. Die Hebung Skandinaviens hält übrigens bis heute an und beträgt derzeit etwa 9 Millimeter pro Jahr.

Mit den Schmelzwasserpulsen und der Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs wurde das Kattegat vor etwa 8000 Jahren aber dann endgültig überflutet.



1.13 > Vor etwa 18 000 Jahren war die Nordsee größtenteils Festland. Das damalige Gebiet zwischen dem heutigen Großbritannien, Dänemark, Deutschland und den Niederlanden wird als Doggerland bezeichnet, wobei die exakte Lage von Landmasse, Gletschern und Flüssen ungewiss ist. Mit dem Steigen des Meeresspiegels schrumpfte das Doggerland, bis es vor etwa 7000 Jahren ganz verschwand.

Land verschwindet

Zu jener Zeit entstand auch die Nordsee. Bis vor etwa 10 000 Jahren war das Gebiet zwischen den heutigen Niederlanden, Deutschland, Dänemark und Großbritannien noch eine große zusammenhängende Landmasse. Sie wurde von großen Flüssen durchzogen, die man als die Vorläufer von Rhein, Weser, Themse und Elbe betrachten kann. Sie mündeten damals mehrere Hundert Kilometer weiter nördlich ins Meer als heute. Archäologische Funde deuten darauf hin, dass die Landschaft durch Moore und Birkenwälder geprägt war. Heute bezeichnet man sie in Anlehnung an die Doggerbank, eine Untiefe in der Nordsee, als Doggerland.

Funde von Jagdwaffen belegen, dass hier Menschen der Mittelsteinzeit gewohnt haben. Mit dem steigenden Meeresspiegel wurde auch das Doggerland überflutet, sodass sich die Menschen, die an den Flussmündungen lebten, nach und nach von der Küste zurückziehen mussten. Vor etwa 7000 Jahren dürfte es komplett verschwunden gewesen sein. Damals lag der Meeresspiegel etwa 25 Meter unter dem heutigen Niveau.

Heute sind der Grund der Nordsee und das Wattenmeer an der niederländischen, deutschen und dänischen Nordseeküste zu weiten Teilen von Sand und weichem Sediment bedeckt, das damals die Vorläuferflüsse weit hinaus ins Doggerland getragen haben. Der Helgoländer Felsen dürfte damals als mächtiger Tafelberg aus der weiten Ebene geragt haben. Er ist Teil einer Buntsandsteinschicht, die eigentlich 2000 Meter tief im Untergrund liegt, von einem mächtigen Salzstock aber, der sich vor 100 Millionen Jahren unter dem Gestein gebildet hatte, nach oben gedrückt worden ist.

Schmelzwasser bringt die marine Wärmepumpe ins Stocken

Was das Leben an den Küsten betrifft, waren der Meeresspiegelanstieg und die Überflutung großer Regionen die wohl direktesten Folgen der vor 20 000 Jahren beginnenden Warmzeit. Dass diese Klimaänderungen für den Menschen aber noch deutlich weiter reichende Folgen hatten, macht erneut das Beispiel des Agassizsees in Nordamerika deutlich, aus dem sich mehrfach große

1.14 > Vor 12 000 Jahren nutzten Menschen Beile und Dolche aus Helgoländer Flintstein. Damals ragte Helgoland, Teil einer Buntsandsteinschicht, als mächtiger Tafelberg aus dem Doggerland.

Schmelzwassermengen ins Meer ergossen. Zu jener Zeit hatte sich die Nordhalbkugel im Vergleich zur Eiszeit schon sehr deutlich erwärmt. Der massive Abfluss von Süßwasser stoppte diesen Trend und führte zu einer neuerlichen Abkühlung der Nordhalbkugel um bis zu 5 Grad Celsius. Der Grund: Der Süßwasserschwall brachte die Wärmepumpe im Atlantik ins Stocken, die sogenannte thermohaline Zirkulation, die wie ein gigantisches Förderband den Globus umspannt (*thermo* – angetrieben durch Temperaturunterschiede; *halin* – angetrieben durch Salzgehaltsunterschiede). Bei diesem Phänomen, das in den polaren Meeresgebieten auftritt, sinkt kaltes salziges Wasser, das besonders schwer ist, in die Tiefe ab und gleitet dort in Richtung Äquator. Während dieses Oberflächenwasser absinkt, strömt warmes Wasser aus südlichen Meeresgebieten nach. Auf diesem Prinzip beruht auch der Golfstrom, dessen Ausläufer durch die thermohaline Zirkulation warmes Wasser aus südlichen Breiten nach Nordosten transportiert und damit zum milden Klima in Westeuropa beiträgt.

Auch schon zu Zeiten des Agassizsees bewirkte diese Wärmepumpe auf der Nordhalbkugel ein vergleichsweise mildes Klima. In Fachkreisen wird diskutiert, inwieweit die Schmelzwasserpulse das Wasser so stark ausgesüßt haben, dass die thermohaline Zirkulation stoppte. So wird angenommen, dass mit dem Stoppen der Zirkulation auch der Transport warmen Wassers aus südlichen Meeresgebieten versiegte. In Europa und dem Nahen Osten änderte sich das Klima. Es wurde kühler und trockener. Diese

1.15 > Der Sognefjord gehört zu den beliebtesten Reisezielen Norwegens. Er wurde durch Gletscher der Eiszeit geformt, die hier ins Meer glitten und dabei den Untergrund abschabten. Mit dem Abtauen der Gletscher und dem Anstieg des Meeresspiegels wurde das Gletschertal langsam überflutet.

Änderung könnte auf die **Menschheitsgeschichte** einen entscheidenden Einfluss gehabt haben, insbesondere auf die Neolithische Revolution, die vor etwa 10 000 Jahren begann. Der Mensch wandelte sich vom Jäger und Sammler zum sesshaften Ackerbauern und Viehzüchter. Für diesen Umschwung gibt es verschiedene wissenschaftliche Erklärungen. Eine Erklärung ist die Mangelhypothese. Diese besagt, dass die Jäger und Sammler nicht mehr genug Nahrung fanden, weil vor allem bestimmte Beutetiere seltener wurden, deren Ausbleiben durch den Klimawandel, Schmelzwasserpulse und das Stoppen der thermohalinen Zirkulation ausgelöst worden sein könnte. In der Folge begann der Mensch, Wildgetreidearten zu kultivieren, die in dem nun herrschenden Klima gut wachsen konnten.

Mit dem Abtauen der Gletscher versiegte der Schmelzwasserfluss aus dem Agassizsee langsam, sodass sich im Atlantik wieder ein höherer Salzgehalt einstellte. Damit sprang die thermohaline Zirkulation im Laufe der Zeit wieder an, wodurch die Temperaturen in Europa und im Nahen Osten abermals anstiegen.

Alles in allem begann der vergleichsweise starke Anstieg des Meeresspiegels vor etwa 20 000 Jahren und dauerte bis vor etwa 6000 Jahren an. Seitdem hat sich der Meeresspiegel mit Schwankungen von wenigen Zentimetern pro Jahrhundert nur geringfügig verändert. Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt hat sich der Anstieg in den vergangenen Jahrzehnten offensichtlich wieder beschleunigt.

Gletscher formen Küsten

Der Wechsel von Warm- und Eiszeiten verändert Küsten nicht nur durch das Steigen und Sinken des Meeresspiegels aufgrund des Schmelzens und Anwachsens der Gletscher. Auch sonst prägt er die Gestalt der Küstenlandschaft. Während der Eiszeit lasteten die Gletscher als mehrere Kilometer dicke Eispakete auf weiten Teilen der Nordhalbkugel. Typischerweise bewegen sich Gletscher langsam über den Untergrund hinweg. Zum einen gleiten sie auf einem Film aus Schmelzwasser, das sich am Grund des Gletschers unter hohem Druck aus dem Eis bildet. Zum anderen verformt sich das Eis unter seinem Eigengewicht plastisch und bewegt sich dadurch langsam. Die wandernden Gletscher wirken wie mächtige Hobel, die die Küste unterschiedlich formen. Die Stockholmer Schärenküste etwa besteht aus 500 Millionen Jahre altem festem Granit und Gneis, die selbst ein Gletscher nicht abtragen, aber glatt und rund hobeln kann. Geologen bezeichnen eine solche Region als glaziale Rundhöckerlandschaft. Der steigende Meeresspiegel verwandelte diese Region dann in ein Archipel.

1.16 > Die Stockholmer Schärenküste besteht aus sehr festem Granit und Gneis, die während der Eiszeit von Gletschern zu sanften Hügeln geschliffen wurden.

An der steilen Küste Norwegens hingegen gruben sich die runden Gletscherzungen tief in das Gestein ein und schufen damit typische Täler, die mitunter sehr weit hinabreichen und ein U-förmiges Profil aufweisen. Der Sognefjord zum Beispiel erreicht heutzutage eine Tiefe von 1000 Metern.

Wiederum anders ist die Bodenbeschaffenheit in Norddeutschland. Hier gibt es relativ weiche Böden, und es bildeten sich breite Gletscherzungen, die die Böden der Küsten zugleich quetschten und in der Breite ausschabten. Ein Beispiel dafür sind die großen Öffnungen der Kieler Förde und der Eckernförder Bucht.

Die vielen Gesichter der Küsten

> Das Erscheinungsbild unserer Küsten ist vielgestaltig. Ihr Charakter wird vor allem durch das Material bestimmt, aus dem sie bestehen, und durch die physikalischen Kräfte, die dieses Material formen. Will man die Küsten einteilen, so finden sich diverse Unterscheidungsmerkmale und eine Vielzahl von Kategorisierungen.

Eine Million Kilometer Küste

Die Küsten der Welt sind vielfältig. So ist die Nordküste der französischen Bretagne durch Felsen aus Granit geprägt und von zahlreichen Buchten durchsetzt. In Namibia erstrecken sich die hohen Dünen der Wüste Namib bis direkt an den Atlantik. Die Küste verläuft hier nahezu parallel zu den Dünen. In Sibirien wiederum besteht die flache Küste aus Permafrost, metertief gefrorenem Boden, der an der Oberfläche während des kurzen arktischen Sommers für einige Wochen auftaut. Dieser ist besonders anfällig für Wellenschlag. Bei Sturm kann das aufgeweichte Ufer um mehrere Meter abbrechen, sodass die Küste ständig ihr Gesicht verändert.

All diesen Küsten ist gemein, dass es sich bei ihnen um einen schmalen Streifen handelt, an dem die Kräfte des Meeres auf das Land treffen. Sie können – je nach Kontext – unterschiedlich klassifiziert werden. So lassen sich die Küsten danach unterscheiden, ob sie von der Brandung und den Strömungen eher stark oder eher schwach umspült werden. Auch kann man Küsten nach dem Material einteilen, aus dem sie bestehen, oder danach, wie stark dieses Material vom Meer abgetragen wird. Küsten können auch danach unterschieden werden, wie gut sie in der Lage sind, Sedimente aufzufangen, die mit Flüssen oder Strömungen herangetragen werden. Welche Gestalt eine Küste annimmt, hängt letztlich auch vom Wechselspiel zwischen dem Material ab, aus dem der Untergrund besteht oder das von Flüssen an die Küste transportiert wird, und den physikalischen Kräften, die auf eben dieses Material einwirken: dem Wind und der Wellenbewegung.

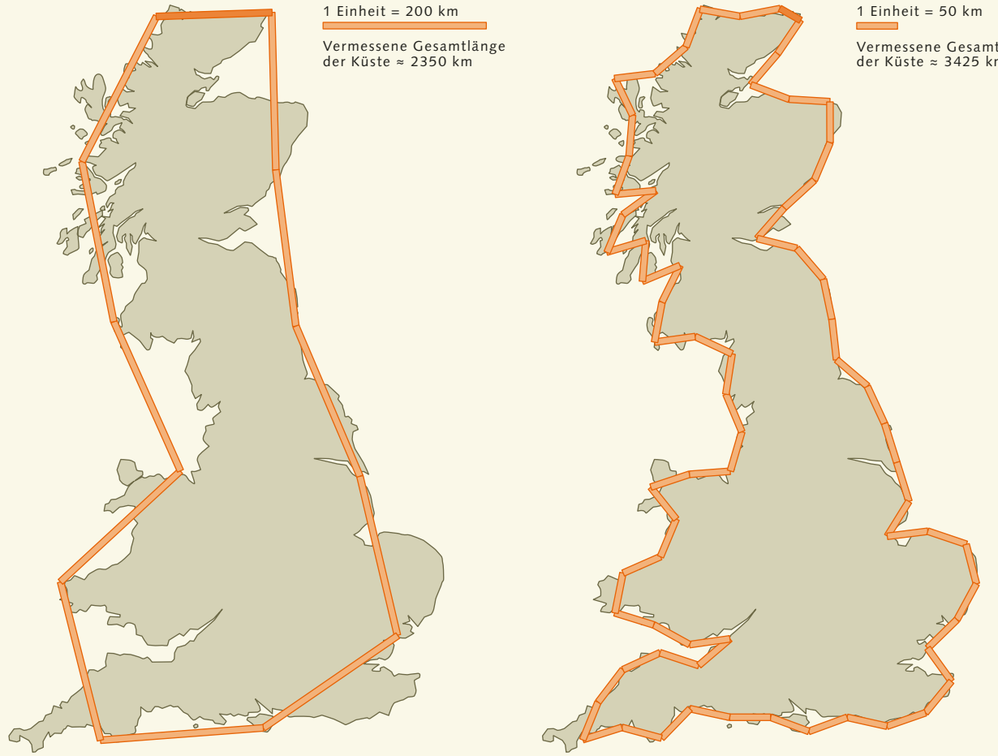
Geologen schätzen die weltweite Länge der Küsten auf etwa 1 Million Kilometer. Wobei die Länge natürlich

1.17 > In Namibia verlaufen die Dünen der Wüste Namib parallel zur Atlantikküste.

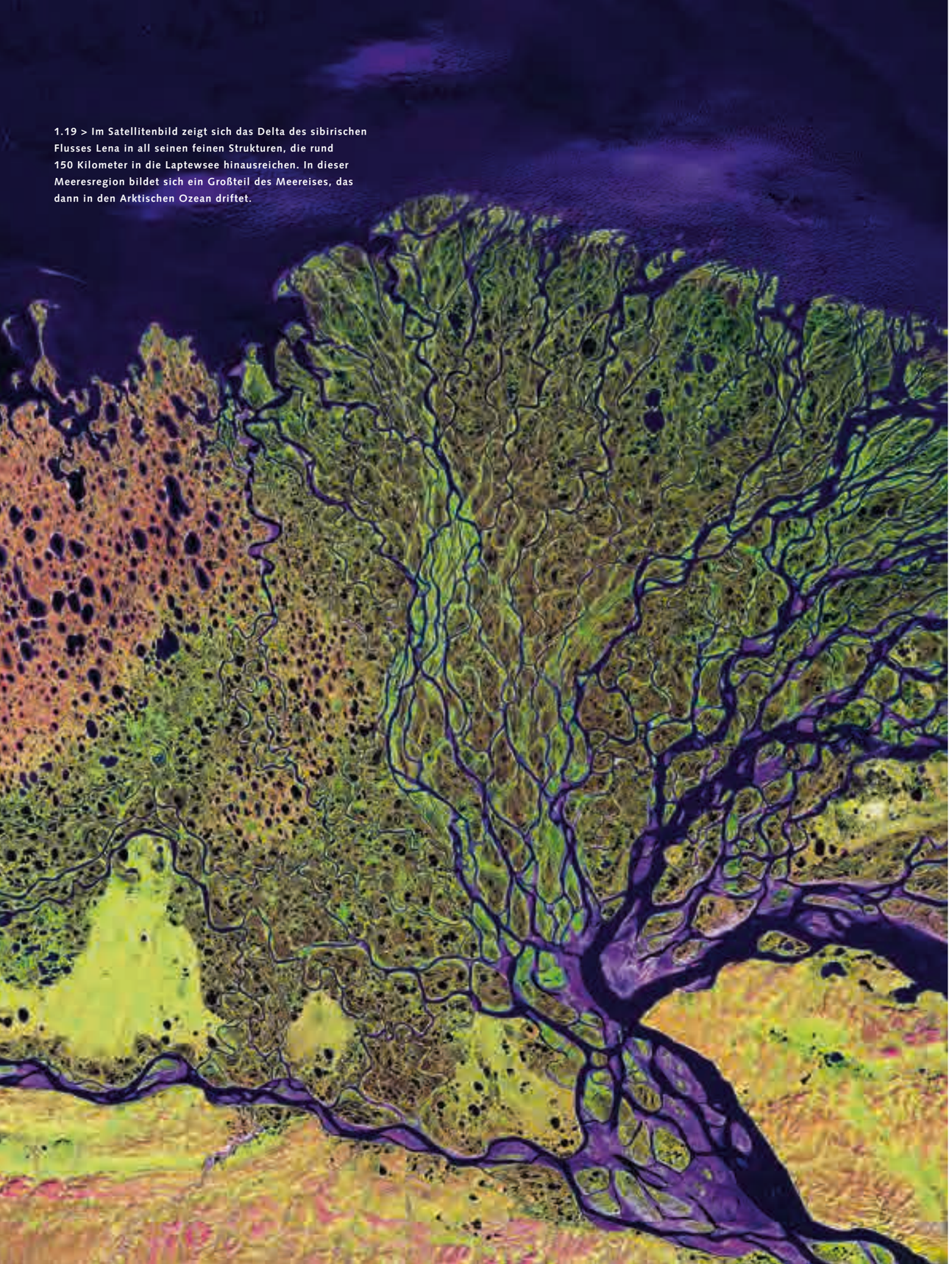
Wie lang sind die Küsten der Welt?

In der Literatur finden sich viele verschiedene Angaben zur Länge der Küsten weltweit. Das ist nicht verwunderlich, denn die Länge einer Küste hängt davon ab, welchen Maßstab man bei ihrer Vermessung anlegt. Auf diese Erkenntnis wird auch in einem Artikel Bezug genommen, den der Mathematiker Benoît Mandelbrot 1967 im Fachmagazin „Science“ veröffentlichte. In dem Beitrag mit dem Titel „How long is the coast of Britain?“ (Wie lang ist die britische Küste?) kam auch er zu dem Schluss, dass es für die Beantwortung dieser Frage darauf ankommt, wie klein oder wie groß man den Maßstab wählt. Vermisst man eine Küste nur grob, ohne beispielsweise die Länge der Buchten zu bestimmen, ist die Gesamtlänge geringer. Legt man einen feineren Maßstab an, mit dem man auch kleinere Einbuchtungen berücksichtigen kann, ist die Küstenlinie länger. Benoît Mandelbrot brachte seinen Aufsatz später mit dem mathematischen, von ihm selbst geprägten Begriff des Fraktals in Verbindung.

Ein Fraktal ist ein mathematisches Objekt, das aus einer sich bis in die kleinste Dimension wiederholenden Struktur aufgebaut ist. In diesem Sinne lässt sich auch eine Küstenlinie unendlich fein auflösen. So ist es theoretisch möglich, bei der Vermessung einer Küste den Umfang jedes Steins oder Sandkörnchens zu berücksichtigen, aus dem die Küste besteht. Der Unterschied zum Fraktal besteht allerdings darin, dass sich hier keine identische Struktur wiederholt.



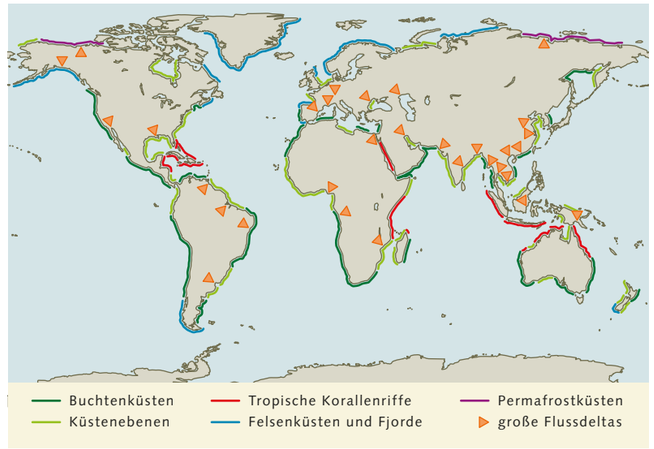
1.18 > Je feiner der Maßstab ist, den man bei der Vermessung einer Küste anlegt, desto größer wird die Länge, die man errechnet.



1.19 > Im Satellitenbild zeigt sich das Delta des sibirischen Flusses Lena in all seinen feinen Strukturen, die rund 150 Kilometer in die Laptewsee hinausreichen. In dieser Meeresregion bildet sich ein Großteil des Meereises, das dann in den Arktischen Ozean driftet.

davon abhängt, wie fein man den Maßstab wählt. Betrachtet man den gesamten Globus, dann bietet es sich an, die Küsten zunächst nach einem eher groben Maßstab zu ordnen. Für diese Kategorisierung kann man den Rändern der Kontinente folgen, die unter anderem durch die Plattentektonik ihre heutige Gestalt erlangt haben. Eine solche Einteilung haben Forscher in den 1970er-Jahren vorgenommen. Demnach unterscheidet man sechs verschiedene Kategorien von Küsten.

- **Küstenebene:** ein Gebiet, in dem sich das Land zum Meer hin sanft abflacht. Ein Beispiel ist die Küste des westafrikanischen Staates Mauretanien, wo das Land in einem breiten Streifen aus Küstensümpfen und flachen Dünen ins Meer übergeht.
- **Großes Flussdelta:** eine große Flussmündung, in der sich Sediment aus den Flüssen ablagert, weil die Meeresströmungen oder Gezeiten nicht stark genug sind, um das Material fortzutragen. Das ist im Delta des russischen Flusses Lena der Fall, der in der Laptewsee in den Arktischen Ozean mündet.
- **Tropisches Korallenriff:** eine Struktur, die von festsitzenden Korallen (Nesseltieren) aus Kalkverbindungen gebildet wird. Sie entsteht als Saum entlang der Küste im lichtdurchfluteten Wasser nahe der Oberfläche. Riffbildende Korallen kommen im Wasser der Tropen und Subtropen vor, das permanent eine Temperatur von mehr als 20 Grad Celsius aufweist. Ein eindrucksvolles tropisches Korallenriff findet man an der mittelamerikanischen Karibikküste zwischen Honduras und Belize. Es hat eine Länge von etwa 250 Kilometern und gehört zu den beliebtesten Tauchrevieren der Welt.
- **Felsenküste und Fjord:** eine Küste aus festen Gesteinen. Fjorde, wie man sie beispielsweise in großer Zahl an der Westküste Norwegens findet, stellen eine bestimmte Form der Felsenküste dar. Sie sind durch eiszeitliche Gletscher entstanden, die durch ihre Wanderbewegung tiefe Täler in das Gestein geschabt haben.
- **Permafrostküste:** ein seit der letzten Eiszeit tiefgefrorener Boden, der weite Teile der arktischen Landmasse in der nördlichen Hemisphäre bedeckt. In Nordamerika, Sibirien und Skandinavien findet man Permafrost über viele Tausend Kilometer entlang der Küste.
- **Buchtenküste:** eine Küste, an der sich Landzungen (Headlands) aus festem Gestein ins Meer schieben. Diese Landzungen wirken wie Barrieren, die die Brandung und Strömung abbremsen. Im Schatten dieser Landzungen bilden sich langsam strömende Wasserwirbel, die das Ufer nach und nach abtragen und dadurch Buchten formen. Ein Beispiel ist die Half Moon Bay an der US-Pazifikküste bei San Francisco. Dort hat sich im Laufe der Jahrtausende hinter einer Landzunge eine halbmondförmige Bucht gebildet.



1.20 > Die Küsten der Erde lassen sich grob in sechs verschiedene Kategorien einteilen.

Wind und Wellen gestalten die Küsten

Die physikalischen Kräfte des Meeres – die Brandung, die Strömungen und der Wind – prägen die Gestalt der Küsten ganz besonders. Je nachdem, wie stark diese Kräfte sind, wird zwischen energiearmen und energiereichen Küsten unterschieden.

Auch das Material, aus dem der Untergrund im Küstengebiet besteht, ist ein wesentlicher Einflussfaktor bei der Formung der Küsten. Wattflächen aus relativ feinem Sediment werden recht schnell umgelagert, weil die Strömung das Material leicht bewegen kann. Auch feine Sande werden leicht transportiert, wie man an den Ostfriesischen Inseln vor der deutschen Nordseeküste

Tiefgefrorene Küste – der Permafrost

Beim Permafrost handelt es sich um Böden, die seit der letzten Eiszeit vor rund 20 000 Jahren permanent bis zu mehrere Meter tief gefroren sind. Die großen Permafrostregionen liegen in den arktischen Gebieten von Alaska, Kanada, Sibirien und Skandinavien. Insgesamt bedeckt der Permafrost fast ein Viertel der Landmasse auf der Nordhalbkugel. Obwohl diese Gebiete sehr abgelegen und nur schwach besiedelt sind, ist der Permafrost von globaler Bedeutung, denn er konserviert wie eine gigantische Tiefkühltruhe riesige Mengen abgestorbener Biomasse, vor allem Pflanzen.

Ein drängendes aktuelles Problem besteht darin, dass der Permafrost mit dem Klimawandel verstärkt taut. Dadurch wird bislang konservierte Biomasse frei, sodass sie von Mikroorganismen zersetzt werden kann. Durch den Stoffwechsel der Mikroorganismen aber entstehen die Klimagase Kohlendioxid und Methan. In welchen Mengen, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen davon, in welcher Form der Kohlenstoff in der Biomasse gebunden ist, und zum anderen, wie günstig die Umweltbedingungen für die Mikroorganismen sind.

Bei in Biomasse gebundenen Kohlenstoffverbindungen kann es sich entweder um stabile oder labile Verbindungen handeln. Im Holzstoff Lignin beispielsweise ist Kohlenstoff sehr stabil gebunden, und Holz kann daher nur langsam mikrobiologisch abgebaut werden. Das wird unter den kalten arktischen Bedingungen auch künftig so bleiben. Denn bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sind die Mikroorganismen gar nicht oder kaum aktiv. Labile Verbindungen wie Pflanzengewebe, das während der Eiszeit eingefroren wurde, können quasi sofort abgebaut werden. Wie stark die Biomasse mit dem Abtauen des Permafrosts in den kommenden Jahren abgebaut wird, ist heute aber noch nicht abschließend geklärt. Viele aufgetaute Permafrostgebiete ähneln heute Moorlandschaften, in denen das Wasser an der Oberfläche steht. Im Moorboden aber wird Biomasse wegen des geringen Sauerstoffgehalts im Wasser kaum abgebaut. Das ist auch der Grund, warum in Mooren historische Gegenstände aus Holz oder Fellen gut erhalten bleiben. Ob oder wie stark der auftauende Permafrost Treibhausgase freisetzen wird, ist daher ebenfalls offen. Deutlich erkennbar ist heute hingegen, dass durch das Auftauen Permafrost an den Küsten verloren geht – und dadurch mehr Biomasse freigesetzt und für die Mikroorganismen verfügbar wird. Zum einen wird der Sommer in der Arktis aufgrund der Klimaerwärmung immer länger. Der Boden taut früher auf und friert später wieder zu. Die Brandung kann also über längere Zeit den Permafrost abtragen. Zum anderen nimmt die Eisbedeckung des Arktischen Ozeans ab, sodass die Brandung heute sehr viel stärker gegen die Küste anrollt. An manchen Stellen bricht der Permafrostboden daher um 20 Meter pro Jahr ab.

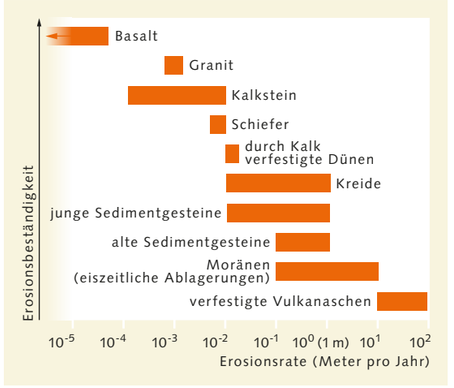
Das Auftauen des Permafrosts ist auch für die Menschen vor Ort ein Problem. In Alaska verlieren heute viele Inuit ihre angestammte Heimat ans Meer. So sind dort nach Angaben des US-amerikanischen Rechnungshofs (U. S. Government Accountability Office, GAO) mehrere Dörfer durch das verstärkte Abschmelzen des Permafrosts und den Verlust der Küste bedroht. Es ist abzusehen, dass diese Dörfer künftig aufgegeben werden müssen. Im August 2016 etwa hat die Gemeinde von Shishmaref in einer Versammlung beschlossen, sich an einem sicheren Ort neu anzusiedeln und komplett aufs Festland umzuziehen – wohin genau, ist noch unklar. Das 600-Einwohner-Dorf liegt auf einer Insel in der Beringstraße vor der Küste von Alaska und wird seit Langem von Inuit bewohnt. Durch das Auftauen des Permafrosts sind in den vergangenen 20 Jahren etwa 30 Meter Küstenlinie verloren gegangen. 13 Häuser mussten abgebaut und neu errichtet werden. Zwar wurden Wellenbrecher konstruiert, die die Insel schützen sollten, doch konnten diese den Landverlust nicht stoppen. Nach Schätzungen von Experten wird die Umsiedlung aufs Festland rund 180 Millionen Dollar kosten. Wer die Kosten tragen wird, ist noch nicht geklärt.

1.21 > Die sibirische Insel Muostach weist eine Permafrostküste auf, die wegen der Klimaerwärmung zunehmend anfällig für Erosion ist.

1.22 > Das Dorf Porthleven in der englischen Grafschaft Cornwall liegt an einer besonders energiereichen Felsküste. Entsprechend stark sind die Uferbefestigungen, zu denen massive Mauern gehören. Bei starkem Wellengang allerdings sind diese kaum noch zu sehen.

beobachten kann. Weil der Wind dort meist aus Richtung Westen weht, wird Sand durch die Wellenbewegung von der Nordwestseite der Inseln abgetragen und an der Ostseite wieder angelagert. Früher wanderten die Inseln dadurch im Laufe der Zeit Richtung Osten. Schon im 19. Jahrhundert begann man deshalb, die Inseln mit Steinkanten und Wellenbrechern, sogenannten Buhnen, zu befestigen. Damit wurde die Wanderbewegung weitgehend unterbunden.

Ist bei Sandküsten die Gestaltänderung oft noch mit dem bloßen Auge nachvollziehbar, ist diese bei anderen Materialien meist schwerer zu erkennen. Doch auch energiereiche Felsenküsten verändern im Laufe der Zeit ihr Gesicht. Wie schnell das geht, hängt wiederum von der Beschaffenheit der Felsen ab. Besonders leicht werden Küsten aus verdichteter, noch nicht versteinerter Asche erodiert, die im Laufe der Zeit durch Ascheregen bei Vulkanausbrüchen entstanden sind. Solche Küsten findet man unter anderem in Neuseeland. In einem Jahr können dort an einigen Stellen bis zu 10 Meter verloren gehen. Auch Kreidefelsen wie die Klippen von Dover im äußersten Südosten von England sind verhältnismäßig weich. Werden sie stark von Wasser umströmt, können sie pro Jahr um mehrere Zentimeter abgetragen werden. Harte Granitfelsen hingegen schrumpfen im selben Zeitraum nur um höchstens wenige Millimeter. Noch härter ist das schwarze Vulkangestein Basalt, das vom Wasser pro Jahr um maximal einige Hundert milliardstel Meter abgetragen wird.

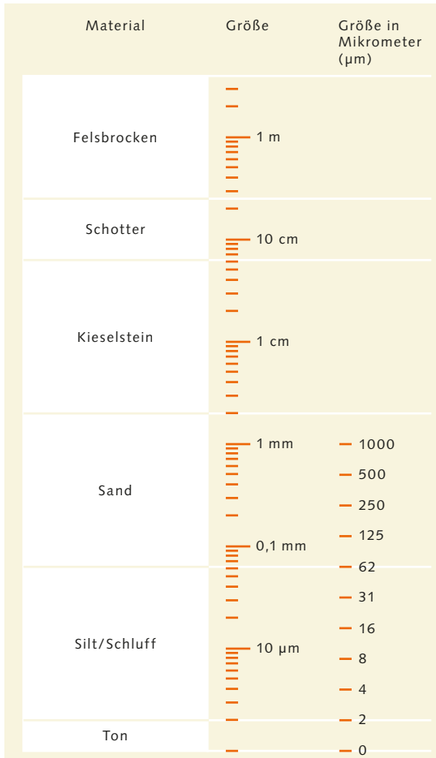


1.23 > Küsten werden, je nach dem Material, aus dem sie bestehen, langsamer oder schneller abgetragen. Manche können in einem Jahr um mehrere Meter schrumpfen.

Das Watt
Als Watt wird jener Teil der Küste bezeichnet, der im Rhythmus der Gezeiten täglich freifällt und wieder überflutet wird. Man unterscheidet Schlick-, Sand- und Felswatt. Die Besonderheit des Felswatts besteht darin, dass es vor Steilküsten vorkommt, während die übrigen Watten an flachen Küsten liegen. Großräumige Wattflächen, zu denen auch die Salzwiesen am Ufer gehören, werden als Wattenmeer bezeichnet.

Eine Frage der Partikelgröße

Das Wissen darum, wie der Untergrund im Bereich der Küste beschaffen ist, ist besonders für den Küstenschutz, das Küstenmanagement, die Planung von Wasserstraßen oder Hafenanlagen wichtig. Vor allem die Größe und Dichte der Partikel, aus denen sich das Material zusammensetzt, spielen hierbei eine wichtige Rolle. Denn davon hängt zum Beispiel ab, ob das Ufer einer bewohnten Insel abzubrechen droht oder ob sich Fahrrinnen verlagern, sodass Schiffe auf Grund laufen können. Im Hinblick auf die Größe der Partikel unterscheidet man zwischen:



1.24 > Das Material, aus dem Küsten bestehen, wird nach der Größe der Partikel unterschieden, aus denen es zusammengesetzt ist. Diese Skala reicht von mikroskopisch kleinen Tonpartikeln bis zum Felsbrocken.

- Schlickküsten,
- Sandküsten,
- Kiesküsten,
- Schotterküsten,
- Fels- oder Felsbrockenküsten.

Zu welcher Kategorie eine Küste gehört, ist durch die Korngröße der vorhandenen Partikel definiert. Die feinsten sind Tonpartikel, die vom Festland über die Flüsse in die Küstengewässer getragen werden. Diese haben eine Größe von maximal 2 Mikrometern (1000 Mikrometer sind 1 Millimeter). Die nächste Größenklasse sind Silt- beziehungsweise Schluffpartikel, die maximal 62 Mikrometer messen. Als nächste Größenklasse schließt sich der Sand an, der in weitere Unterkategorien aufgeteilt wird. Feine Sande können zusammen mit Ton- und Silt- beziehungsweise Schluffpartikeln Schlick bilden, wie man ihn aus dem Wattenmeer kennt. Die nächsten Größenklassen sind Kieselsteine, Schotter und Felsbrocken, die ebenfalls in weitere Unterkategorien aufgeteilt werden können.

Die Filterfunktion der Küsten

Die Gestalt der Küsten wird in vielen Gebieten vor allem durch Flüsse stark geprägt – und zwar durch deren Strömungskräfte und durch das Material, das sie mit sich tragen. Dieses enthält viele Mineral- und Nährstoffe und wird zum Teil ins Sediment eingelagert. Küsten, die reich an solchen Sedimenten sind, sind damit auch besonders produktiv. Ein Beispiel sind die Sundarbans in Bangladesch und in Indien – das mit einer Fläche von rund 10 000 Quadratkilometern größte zusammenhängende Mangrovengebiet der Welt. Die Sundarbans haben sich im Mündungsgebiet der Flüsse Ganges und Brahmaputra gebildet, die Unmengen an Material in den Golf von Bengalen spülen. Die Sundarbans sind ein bedeutender Naturraum. Hier leben viele Vögel, Fische, Krokodile, Pythons, Hirsche und Wildschweine. Zudem finden hier seltene Tiere wie der Axishirsch oder der Königstiger einen Rückzugsraum.

Je nachdem, wie gut die jeweilige Küste das Material, das mit den Flüssen herangetragen wird, herausfiltern und anlagern kann, unterscheidet man zwischen Küsten mit stärkerer und Küsten mit geringerer Filterfunktion.

Eine besondere Küstenform – die Wattgebiete

An vielen energiearmen Küsten weltweit bilden sich Wattflächen, wenn über Flüsse Ton-, Silt- bzw. Schluff- und feine Sandpartikel in großen Mengen herantransportiert werden. Allerdings sehen diese Wattflächen nicht überall gleich aus. So unterscheidet man geschlossene Watten, die mit Pflanzen bewachsen sind, von offenen Watten, bei denen das Sediment frei liegt. Das weltweit größte Wattgebiet erstreckt sich über weite Teile der niederländischen, deutschen und dänischen Nordseeküste und zählt zu den offenen Watten. Es ist seit dem Jahr 2009 Weltnaturerbe der UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur). Zwar gibt es hier den typischen Schlick, der zu 30 Prozent aus Ton, zu 30 Prozent aus feinem Schluff und zu mehr als 30 Prozent aus Sand sowie abgestorbener Biomasse besteht. Insgesamt aber wird das Gebiet nicht als Schlickküste bezeichnet, weil der Sandanteil in den meisten Bereichen doch relativ hoch ist. Folglich zählt man die Wattgebiete zu den Sandküsten.

Eine echte offene Schlickküste hingegen findet man vor dem südamerikanischen Staat Surinam, wo die Strömungen an der Atlantikküste extrem schwach sind. Hier können sich selbst feine Ton- und Schluffpartikel zu dicken Schlickpaketen ablagern. Diese werden vor allem über die rund 600 Kilometer entfernte Mündung des Orinoko in Venezuela in den Atlantik getragen und von dort bis in die ruhigen Gewässer vor Surinam transportiert.

An der Ostküste der USA sieht es dagegen wieder ganz anders aus: An vielen Stellen zwischen Florida und der Halbinsel Cape Cod in Massachusetts haben sich Salzwiesen gebildet, sodass man hier von geschlossenen Wattflächen spricht. Sie entstehen in energiearmen Küstenabschnitten, wenn Flüsse sehr viel Material heranttragen, das sich vor allem in seichten Bereichen nahe dem Küstenufer ablagert. Das Watt wächst im Laufe der Zeit um mehrere Dezimeter in die Höhe und wird dadurch seltener überflutet. Spezielle salzresistente Pflanzen können sich nun gut ansiedeln. Derartige Salzwiesen sind für Vögel bedeutende Rast- und Brutgebiete und stellen damit ein besonderes Habitat im Lebensraum Wattenmeer dar.

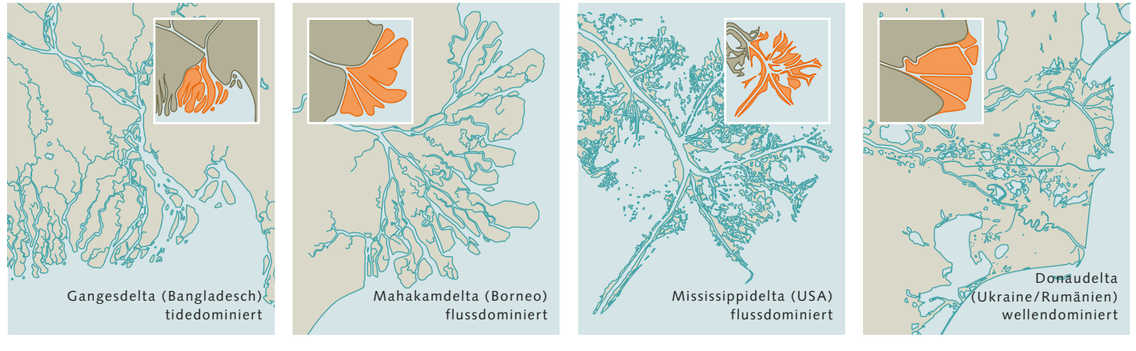
Watten bilden sich vielfach auch zwischen dem Festland und vorgelagerten Inseln. Da das Wasser hier langsamer strömt, können sich feine Partikel auf dem Meeresboden absetzen. Eine Voraussetzung für die Entstehung solcher Insel- oder Rückseitenwatten ist, dass der Wasserstand zwischen Ebbe und Flut, der Tidenhub, deutlich schwankt, sodass die Gebiete wie zum Beispiel im westeuropäischen Wattenmeer regelmäßig überflutet werden und wieder trockenfallen. In der Regel beträgt der Tidenhub hier zwischen 3 und 3,5 Meter. Darüber hinaus gibt es Inselwatten zum Beispiel an der Pazifikküste von Kolumbien. Diese Watten sind aber nicht offen, sondern von Mangroven bewachsen, von salzresistenten Bäumen.

1.25 > Das Wattenmeer der Nordsee ist bei Touristen sehr beliebt. Viele Menschen sind fasziniert, wenn sie zum ersten Mal bei Ebbe über den schlickigen Meeresboden wandern.

Küsten mit stärkerer Filterfunktion

- **Delta:** Eine Flussmündung, die durch die Ablagerung von Sedimenten langsam ins Meer wächst, wird als Delta bezeichnet. Die Meeresströmungen oder Gezeiten sind nicht stark genug, um das Material fortzutragen. Deltas können unterschiedlicher Gestalt sein. Letztlich werden sie durch das Wechselspiel der verschiedenen Kräfte Brandung, Flussströmung und Gezeiten geprägt. Je nachdem, welche Kräfte überwiegen, bilden sich unterschiedliche Deltas aus, die in tidedominierte, flussdominierte und wellendominierte Deltas eingeteilt werden können.
  - Bei der tidedominierten Form wird das Sediment durch den ständigen Wechsel von Flut- und Ebbstrom zu länglichen Sandbänken geformt, die senkrecht zur Küste liegen. Die Brandung ist hier relativ schwach. Die gemeinsame Mündung der Flüsse Ganges und Brahmaputra in Indien ist ein Beispiel für ein derartiges Delta.
  - Bei der flussdominierten Form ist der Einfluss der Wellen eher gering. Zudem beträgt der Tidenhub, also die Differenz zwischen dem Niedrigwasser bei Ebbe und dem Hochwasser bei Flut, höchstens 2 Meter, weshalb der Gezeitenstrom relativ schwach ist. So kann sich viel Sediment in der Flussmündung ablagern. Ein derartiges Flussdelta versandet daher mit der Zeit. Der Fluss sucht sich neue Wege, schafft dadurch neue Betten und verzweigt sich nach und nach zu einem sogenannten Bird's Foot Delta, Vogelfußdelta.
  - Bei der wellendominierten Form schiebt die Brandung das Sediment im Laufe der Zeit zu Mündungsbarren auf, zu Stränden und Sandkörpern, die parallel zur Küste liegen. Weder der Fluss noch die Gezeiten sind hier stark genug, um die Mündungsbarren abzutragen. Ein Beispiel dafür ist das Donaudelta am Schwarzen Meer.
- **Tidedominierte Flussmündung:** Anders als ein Delta handelt es sich bei einer gezeitengeprägten Flussmündung um eine einzige große Flussmündung, die durch die Gezeiten geprägt wird. Diese hat meist die Gestalt eines weit ins Land reichenden Mündungstrichters, der zum Beispiel in Nordeuropa den alten, in der Eiszeit gebildeten Flusstälern folgt. In diesen Trichtern wird das Flusswasser bei Flut aufgestaut. Bei Ebbe fließt das aufgestaute Flusswasser dann mit hoher Geschwindigkeit ins Meer. Dadurch wird viel Material mitgeführt, sodass sich direkt im Mündungstrichter kein Delta bilden kann. Stattdessen können zu beiden Seiten des Trichters weitläufige Wattflächen wie zum Beispiel in der Mündung der Elbe in Deutschland entstehen. Die Elbe kann damit als eine typische tidedominierte Flussmündung bezeichnet werden.
- **Lagune:** Lagunen sind vergleichsweise flache Küstengewässer mit maximal 5 Meter Wassertiefe. Sie sind in der Regel durch Barrieren vom offenen Meer getrennt. Das können Sandbänke, Korallenriffe oder vorgelagerte Inseln sein. Lagunen sind meist lang gestreckt und liegen parallel zur Küste. Das trifft auch auf die Haffe in der Ostsee zu, die durch lang gestreckte Dünen vom Meer abgetrennt sind, wie das Frische Haff. In Lagunen ist die Wechselwirkung zwischen dem Sediment und dem Wasser besonders ausgeprägt. Da es in der Lagune kaum Strömungen oder Wellenbewegungen gibt, steht das Wasser relativ ruhig. Damit bleibt mehr Zeit, in der sich das Material absetzen kann. Oftmals haben Lagunen kleine Öffnungen zum Meer, sodass sich Salz- und Süßwasser zu Brackwasser mischen. In diesem Mischungsbereich kann es zu chemischen Reaktionen kommen. Diese führen dazu, dass Material als feiner Niederschlag im Wasser ausflockt und sich ebenfalls im Sediment absetzt.
- **Fjord:** Bei Fjorden handelt es sich in der Regel um Täler, die durch Gletscher geformt wurden. Mit dem Meeresspiegelanstieg wurden diese oftmals sehr steilen und tiefen Täler überflutet. Viele Fjorde sind zum Meer hin durch Geröll abgeschlossen. Dabei handelt es sich meist um Ablagerungen, sogenannte Moränen, die von den wandernden Gletschern aufgehäuft wurden. Mit den Fjorden sind die Förden verwandt. Auch sie sind durch die Bewegungen von Gletschern entstanden. Allerdings sind sie meist weiter, flacher und verzweigter. Da in der Regel keine großen Flüsse in die Fjorde münden, gibt es dort nur geringe Strömungen, sodass sich auch hier Material ablagern kann.

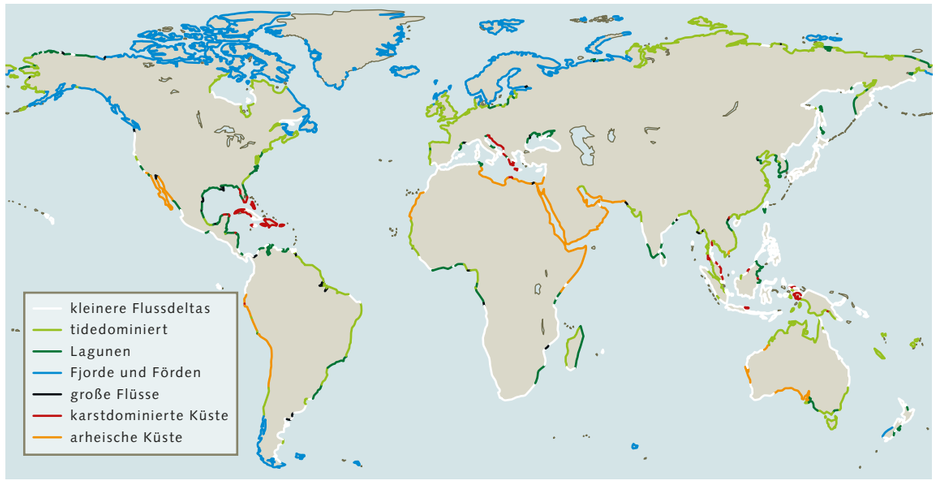
1.26 > Flussdeltas können unterschiedlich geformt sein. Letztlich wird ihre Gestalt durch das Wechselspiel der Kräfte bestimmt – der Gezeiten, der Brandung und der Strömung des Flusses.



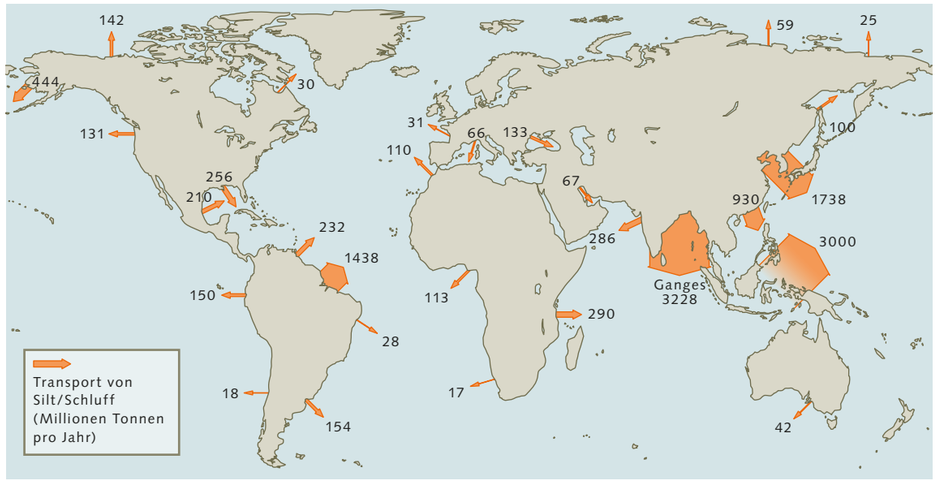
Küsten mit geringerer Filterfunktion

- **Küsten an schnell fließenden Flüssen:** In manchen Fällen tragen große Flüsse zwar viel Material mit sich, doch sind die Fließgeschwindigkeiten so hoch, dass sich das Material nicht in Küstennähe ablagert, sondern in einer Art Wolke ins Meer hinausgetragen wird. Insofern ist die Filterwirkung dieser Flussmündungen beschränkt wie zum Beispiel beim Columbia River in Nordamerika.
- **Karstdominierte Küsten:** Das Gestein bei dieser Küstenart besteht zum großen Teil aus Kalkstein. Dieser entstand im Laufe der Jahrmillionen aus den Kalkgehäusen und Panzern von Meereslebewesen. Durch die Plattentektonik wurden diese Kalkmassen aus dem Meer gehoben. Dort verfestigte sich die Masse nach und nach zu Kalkstein. Typischerweise bilden sich in diesen Kalksteinen durch chemische Verwitterung Höhlen und Gänge, durch die Regen- und Flusswasser unterirdisch ins Meer fließen. Die Landschaft verkarstet und Flüsse graben sich tief ein. An manchen Stellen wurden solche Karstlandschaften durch den Meeresspiegelanstieg seit der letzten Eiszeit überflutet. Ein Beispiel ist die weltweit berühmte Halong-Bucht in Vietnam, die ursprünglich mal eine Fluss- beziehungsweise Karstlandschaft war. Als der Meeresspiegel stieg, wurde sie überflutet, weshalb die ehemaligen Felsen am Flussufer heute als Inseln aufragen. Karstküsten sind dadurch charakterisiert, dass sich hier wegen der schroffen Struktur und der Wellenbewegungen kaum Sedimente ablagern.
- **Arheische Küsten:** Entlang trockener Regionen und Wüsten, in denen die Niederschläge so gering sind, dass vom Land gar kein Wasser ins Meer abfließen

1.27 > Die Karstfelsen in der vietnamesischen Halong-Bucht sind weltberühmt. Touristen werden auf Booten durch das Archipel gefahren.



1.28 > Küsten lassen sich auch danach unterscheiden, wie stark sie Sedimente filtern, die über die Flüsse aus dem Binnenland herantransportiert werden.



1.29 > Die Sedimentfrachten, die Flüsse ins Meer tragen, sind zum Teil gigantisch. Den Weltrekord hält der Ganges in Asien mit einer Fracht von 3,2 Milliarden Tonnen pro Jahr.

kann, findet man sogenannte arheische Küsten. Der Name leitet sich von der geowissenschaftlichen Bezeichnung für Flüsse ab, die in einer Wüste oder einer Salzpfanne versickern und keinen Ozean erreichen. Diese Flüsse werden als arheisch bezeichnet.

Die Menge an Sediment, die die Flüsse pro Jahr in die Küstengewässer tragen, ist riesig. Letztlich stammt das Material aus der Verwitterung von Gesteinen an Land. Es wird mit dem Regenwasser entweder direkt aus Gebirgsregionen abtransportiert oder aus Böden im Flachland gewaschen. Das Land verflacht dadurch im Laufe von Jahrtausenden. Spitzenreiter beim Materialtransport ist der Ganges, der jährlich 3,2 Milliarden Tonnen ins Meer trägt. Er führt vor allem Silt- beziehungsweise Schluffpartikel aus dem zentralasiatischen Hochland mit sich, die durch physikalische Verwitterung aus dem Untergrund gelöst werden. Das Gleiche ist beim Gelben Fluss in China der Fall, dessen Farbe von einem ganz bestimmten Typ von Silt- beziehungsweise Schluffpartikeln herrührt.

Zerstörung und Aufbau

Je nach den Bedingungen vor Ort wachsen oder schrumpfen die Küsten. Während manche Küsten durch sich ablagernde Sedimente zunehmen, werden andere durch Strömungen oder die Brandung nach und nach zerstört, wie das Beispiel der Küste der englischen Grafschaft Norfolk zeigt. Hier liegt der kleine Ort Happisburgh, in dem etwa 1400 Menschen in circa 600 Häusern leben und der es mittlerweile zu trauriger Berühmtheit gebracht hat. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts war Happisburgh noch viele Hundert Meter von der Küste entfernt. Weil die Küste aber immer weiter abgebrochen ist, liegt der Ort heute direkt an der bis zu 10 Meter hohen Steilküste. Diese nimmt kontinuierlich ab, weil sie aus einer weichen Mischung aus Ton, Schluff und Sand besteht. Schlagen bei starkem Ostwind die Wellen gegen die Küste, fallen große Teile hinab. Inzwischen sind mehrere Häuser in die Tiefe gestürzt. In der nächsten Dekade könnte Happisburgh seine normannische Kirche, seinen Leuchtturm und ein Herrenhaus aus dem 14. Jahrhundert ans Meer verlieren. Zwar hat man versucht, die Erosionskräfte der Brandung durch den Bau von Wellenbrechern zu bändigen, doch erwiesen sich diese als wirkungslos. So ist es nur eine Frage der Zeit, bis Happisburgh komplett in die Nordsee gestürzt sein wird.

Ob eine Küste wächst oder schrumpft, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im Detail unterscheidet man folgende Kategorien des Aufbaus und der Zerstörung, wobei verschiedene Zeithorizonte betrachtet werden:

Zerstörungsvorgänge

- **Endogene Zerstörung:** Zerstörung, die durch die Küste selbst hervorgerufen wird. Dazu zählen Felsstürze und Risse (Verwerfungen), die durch Erdbeben entstehen, oder der Kollaps vulkanischer Inseln, bei dem zum Beispiel alte Krater zusammenstürzen.
- **Mechanische Zerstörung:** durch Brandung und Treibeis hervorgerufene **Abrasion**. Diese kann viele verschiedene Küstenformen erzeugen. Ein Beispiel sind Kliffe, steile Felswände, die keineswegs unveränderlich sind, denn auch festes Gestein wird mit der Zeit abgetragen. Sie entstehen, indem die Brandung zunächst das Gestein am Fuße der Steilwand aushöhlt. Die Wand wird dadurch instabil und bricht ab, sodass sich die typischen hohen Kliffe bilden. Eine andere durch Abrasion hervorgerufene Küstenform ist die Schorre. Dabei handelt es sich um eine breite, zum Meer hin flach abfallende Fläche in der Uferzone. Je nach Material unterscheidet man zwischen Sand-, Geröll- und Felsschorre. An Sandstränden ist die Schorre der flach abfallende, feuchte Teil des Strandes, der durch das Wasser geformt wird. Vor Felsenkliffen treten die Schorren eher als flache Brandungsplattformen auf. Sie sind daran zu erkennen, dass im Gestein parallel zueinander tiefe Rippen verlaufen. Diese entstehen, weil der Untergrund aus einzelnen Gesteinsschichten aufgebaut ist. Da die verschiedenen Materialien von der Brandung unterschiedlich stark ausgewaschen werden, bilden sich tiefere und flachere Bereiche, die nach und nach als Rippen der Schichtgrenzen erkennbar werden. Die Abrasion kann Küsten noch auf andere Art abtragen. Ein Beispiel sind sogenannte Hohlkehlen. Dabei handelt es sich um Einkerbungen in Felsenküsten auf Höhe der Wasserlinie, die durch Wellenschlag entstehen.
- **Zurückschneiden der Küstenlinie:** eine Zerstörung, die an gefrorenen Küsten wie etwa Permafrost und Gletschern stattfindet. In den Permafrostgebieten auf der Nordhalbkugel führt das Auftauen während der Sommermonate dazu, dass der im Winter gefrorene Boden aufweicht und somit leicht von den Wellen abgetragen werden kann. Durch diese Art der Zerstörung, die als Thermoabrasion bezeichnet wird, ändert sich die Küstenlinie. In der Arktis und Antarktis ändert sich die Küstenlinie vor allem durch das Abbrechen großer Gletscherflächen. Festlandgletscher gleiten aufgrund ihres hohen Gewichts langsam vom Land ins Meer, wo sie als **Schelfeis** zum Teil viele Kilometer aufs Wasser hinausragen. Da Eis eine gerin-

1.30 > An der Südküste von Wales, in der Nähe der Stadt Cardiff, hat sich durch Abrasion eine Schorre im Kalkstein gebildet.

gere Dichte als Wasser hat, schwimmen die Gletscher trotz ihres hohen Gewichts auf. Immer wieder brechen große Brocken ab, weil von Land neue Gletschermasse nachgeschoben wird. Die Gletscher kalben.

- **Bioerosion:** Zerstörung von Gestein durch den Bewuchs mit Mikroorganismen, die das Gestein durch ihren Stoffwechsel langsam zersetzen. Das ist beispielsweise an Hohlkehlen der Fall.

Aufbauvorgänge

- **Endogener Aufbau:** die Entstehung neuer Küsten durch plattentektonische Prozesse, bei denen Landmasse emporgehoben wird. Dazu zählen auch Vulkanausbrüche, bei denen sich Magma aus dem Erdinneren nach und nach zu Inseln aufbaut. In anderen Fällen entstehen neue Küstenabschnitte, wenn sich Lava bei einem Vulkanausbruch in großen Mengen ins Meer ergießt.
- **Potamogener Aufbau:** Aufbau von Deltas, Watten oder Schwemmland durch Material, das von Flüssen herantransportiert wird.
- **Aufbau durch Eis:** Aufbau, bei dem Material durch Küsteneis oder Treibeis an der Küste zusammengeschoben wird. Die treibende Kraft sind hier Wellen oder Gezeiten, die das Eis in Richtung Küste drücken.
- **Aufbau durch Wind:** Aufbau von Küstendünen aus lockerem Sand. Aufgehäuft wird er vom Wind.
- **Thalassogener Aufbau:** Aufbau von Material, das durch Wellen, den Gezeitenstrom oder Meeresströmungen an einer Küste abgelagert wird.
- **Biogener Aufbau:** Aufbau von Küsten durch die Einwirkung von Organismen. Dazu zählen Korallen, die feste und haltbare Strukturen bilden, oder Mangroven, in denen der Wellengang und die Strömungen so stark gebremst werden, dass sich feine Partikel ablagern und Watten entstehen können. Organismen tragen aber nicht nur zum Aufbau, sondern auch zum Schutz der Küsten bei. Korallen und Mangroven sind ein natürlicher Wellenbrecher. Auch Tangwälder oder Algenrasen können viel Brandungsenergie schlucken. Zudem verfestigen diese Pflanzen das Sediment, sodass es bei starkem Wellengang nicht mehr fortgetragen wird. Ebenso tragen Salzwiesen als natürliche Strömungsbarriere zum Schutz des Hinterlandes bei.

Welche Dimension diese natürlichen Aufbauvorgänge erreichen, zeigen die Deltas der großen Flüsse. Der Mississippi hat im Laufe der Zeit so viel Material angespült, dass das Delta auf eine Breite von rund 200 Kilometern anwachsen konnte. Das Gewicht der Sedimentpakete ist so groß, dass das Delta ständig absinkt. Zudem wird Wasser aus dem Sediment gepresst, was eine Form von Kompaktion darstellt. Kompaktion bezeichnet in der Geologie die Verdichtung und Volumenabnahme von Sedimenten, unter anderem durch den Druck, der durch darüberliegende Sedimentschichten entsteht. Das Absinken wurde früher durch frisches Material kompensiert, das neu herangetragen wurde. Der Mensch aber hat diesen Kompensationsvorgang gestört. So wurden entlang des Flusses Staudämme gebaut, die große Mengen des Materials abfangen, ehe sie das Delta erreichen. Damit geht der Küste Sedimentnachschub verloren. Da das Delta unter den alten Sedimentpaketen aber weiter absinkt, stehen die Menschen dort heute vor großen Problemen: So kommt es immer öfter zu Überflutungen.

Conclusio

Die Gestalt unserer Küsten – eine lange und wechselvolle Geschichte

Küsten sind für den Menschen von besonderer Bedeutung. In ihren Gewässern finden 90 Prozent der globalen Fischerei statt. Sie sind ein wichtiger Transportweg und bedeutender Standort für Industriebetriebe oder Kraftwerke. Sie sind bevorzugtes Reiseziel des globalen Tourismus und Quelle für Mineralien und fossile Rohstoffe. Insofern üben sie eine enorme Anziehungskraft als Arbeits- und Lebensraum aus, was sich auch darin zeigt, dass sich 75 Prozent aller Megastädte mit mehr als 10 Millionen Einwohnern im Küstenbereich befinden.

Allgemein betrachtet sind Küsten ein schmaler Saum, in dem Land und Meer aufeinandertreffen. Sie sind ein Übergangsraum und ständigem Wandel unterworfen, der unterschiedlich schnell vonstattengehen kann: im Laufe von Jahrmillionen durch die Kontinentaldrift, im Rhythmus von mehreren Zehntausend Jahren durch den Wechsel von Warm- und Eiszeiten und in den vergangenen Jahrhunderten insbesondere auch durch die Besiedlung durch den Menschen.

In geologisch relativ kurzen Zeiträumen verändert vor allem die Schwankung des Meeresspiegels die Gestalt der Küsten stark. Da während einer Eiszeit viel Wasser in Form von Eis und Schnee an Land gebunden ist und nur wenig Wasser vom Land ins Meer abfließt, sinkt der Meeresspiegel. Während der letzten Eiszeit vor rund 20 000 Jahren lag der Meeresspiegel um etwa 120 Meter tiefer als heute. Viele Gebiete, die heute überflutet sind, lagen damals trocken, und die aus dem Wasser ragende Landmasse war insgesamt etwa 20 Millionen Quadratkilometer größer als heute. Australien und die Insel Neuguinea waren damals über eine Landbrücke verbunden, und Amerika wurde vermutlich über eine Landbrücke im Bereich der heutigen Beringstraße von Asien her besiedelt.

Die Gestalt der Küsten auf der Nordhalbkugel wurde aber auch durch die eiszeitlichen Gletscher stark geprägt. Die norwegischen Fjorde zum Beispiel sind entstanden, nachdem sich von Land aus riesige Eismassen ins Meer geschoben und dabei den Untergrund abgehobelt hatten. Mit dem Abtauen der Gletscher und dem Anstieg des Meeresspiegels füllten sich diese Einkerbungen.

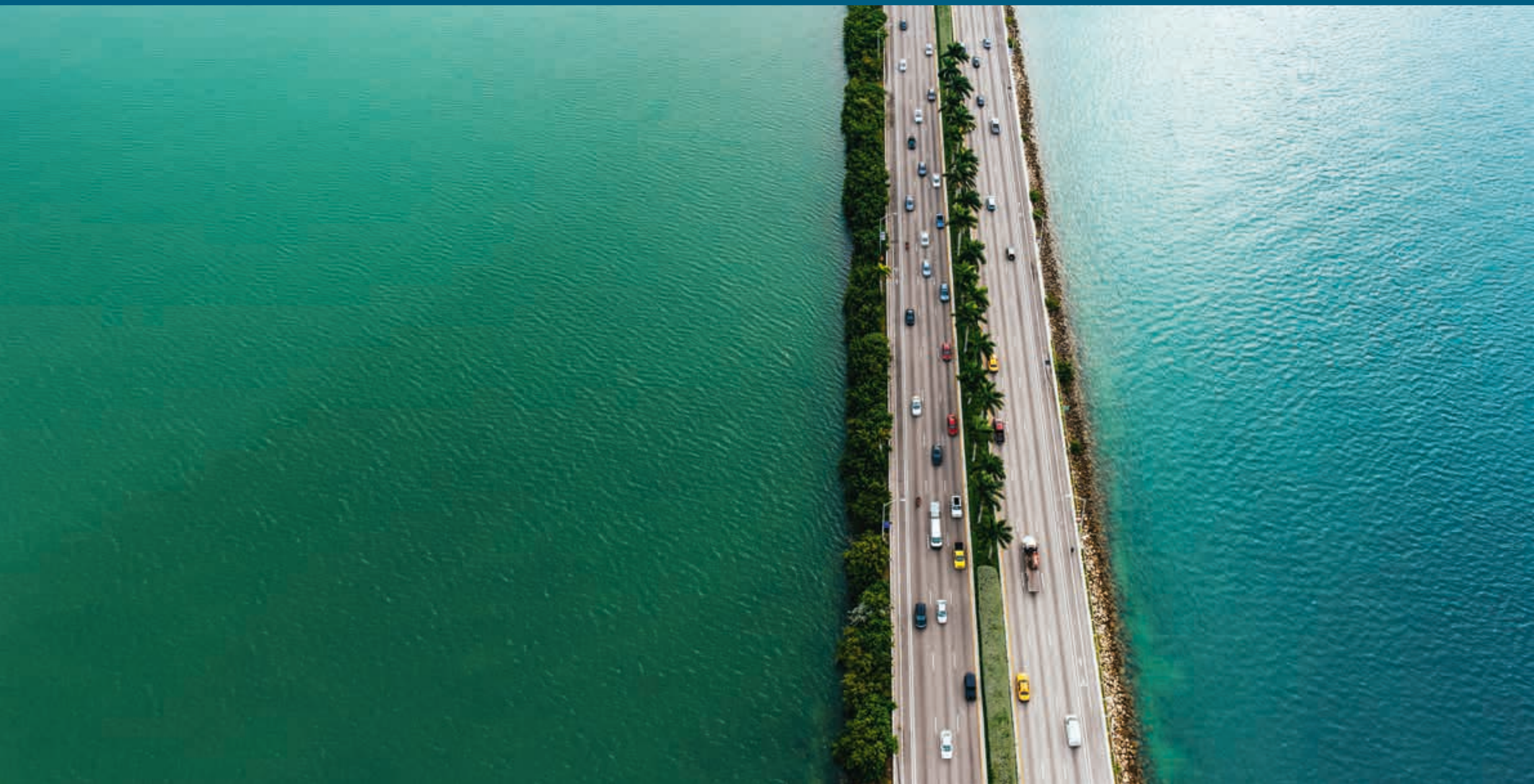
Die Gletscher und zahlreiche weitere Einflussgrößen haben im Laufe von Jahrtausenden sehr viele Arten von Küsten entstehen lassen – kahle Granitküsten wie etwa in Skandinavien, metertief gefrorene Permafrostküsten in arktischen Regionen oder dichte Mangrovenwälder in tropischen Gebieten. Wissenschaftler ordnen diese Vielfalt nach unterschiedlichen Kategorien. So werden Küsten danach unterschieden, ob ihre Gestalt durch die Brandung und die Strömungen eher stark oder eher schwach geprägt werden.

Auch kann man Küsten nach dem Material einteilen, aus dem sie bestehen, oder danach, wie stark dieses Material vom Meer abgetragen wird. Sie können darüber hinaus auch danach klassifiziert werden, wie gut sie Sedimente auffangen, die mit Flüssen oder Strömungen herangetragen werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Filterfunktion der Küsten. Es gibt Regionen, in denen sich große Mengen von Sediment an den Küsten ablagern wie etwa im Mississippidelta im Golf von Mexiko. Solche Küstengebiete sind oft besonders produktiv und reich an Fischen, weil mit den Sedimenten auch viele Nährstoffe ins Wasser gelangen.

Die Mengen, die einzelne Flüsse ins Meer spülen, sind teilweise gigantisch. So trägt zum Beispiel der Ganges extrem viel Material aus dem Himalaja in den Golf von Bengalen – jährlich rund 3,2 Milliarden Tonnen. In vielen Fällen hat der Mensch durch Baumaßnahmen in die natürlichen Sedimentationsprozesse eingegriffen. Dadurch kommt es vielerorts zu Problemen.

2 Mit den Küsten leben

> Schon seit Jahrtausenden nutzt der Mensch die Küstengebiete der Welt. Sie sind Handelsstraße, Rohstoffquelle und liefern Fisch in großen Mengen. Kein Wunder, dass der Mensch immer schon um die Vormachtstellung am Meer kämpfte. Inzwischen beutet er die Küstenregionen so stark aus, dass sie einige ihrer geschätzten Ökosystemleistungen nicht mehr erbringen können. Zerstört werden Küstengebiete insbesondere durch Baumaßnahmen und Verschmutzungen.



Die Leistung der Küsten

> So vielfältig wie die Küstenlebensräume sind auch die Leistungen, die sie für die Menschen erbringen. Manche dieser Leistungen, wie die Produktion von Fisch, stehen vielerorts zur Verfügung, andere nur in einigen wenigen Gebieten – etwa die Bereitstellung von Bodenschätzen wie Diamanten in den Gewässern vor Namibia. Und schon seit jeher sind Küsten für den Menschen interessante Siedlungs- und Handelsplätze.

Das enge Band zwischen Küsten und Menschen

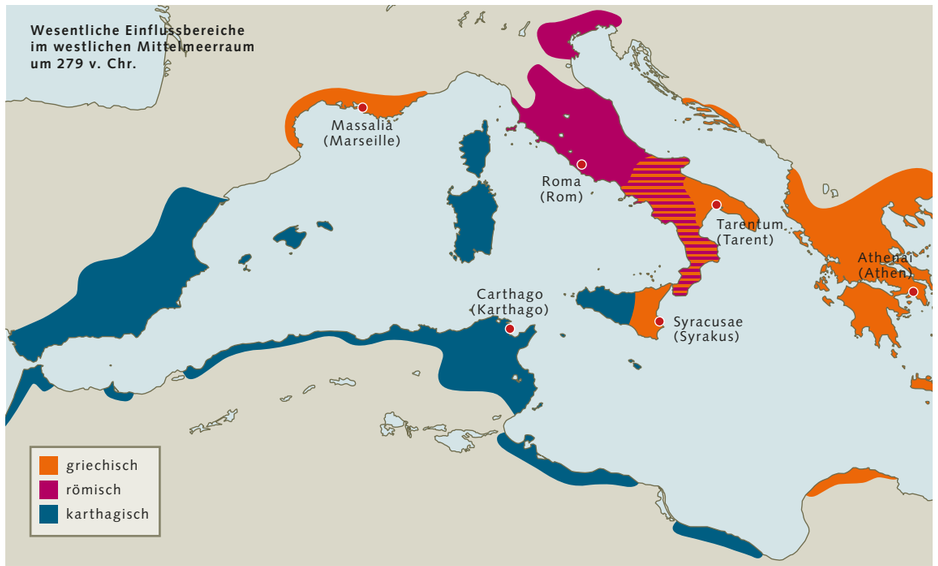
Für die Menschen sind die Küsten seit Jahrtausenden ein bedeutender Lebensraum. Zunächst stellte der Übergang vom Land zum Meer nur eine natürliche Barriere dar. Mit der Zeit aber lernten die Menschen die Vorzüge der Küstenregion zu schätzen. Schon früh lieferten die Küstengewässer Fisch, Algen oder auch Salz. Mit der Entwicklung einfacher Fischerboote wurden die Küstenbewohner zunehmend mobiler. Es waren vor allem die mit dem Meer vertrauten Fischer, die sich weiter hinauswagten und nach und nach die Inseln entlang der heimischen Küste entdeckten.

Frühe Hinweise auf diese Erkundung gibt es zum Beispiel in China. Archäologische Funde im Gebiet der südchinesischen Stadt Guangzhou deuten darauf hin, dass die Menschen dort bereits um 6500 vor Christus Einbäume nutzten, um das weitläufige Delta des Perlflusses, aber auch offene Gewässer in Küstennähe zu befahren. Von den neu entdeckten Gebieten wagten sich die nautisch erfahreneren Menschen immer weiter in noch unerschlossene Meeresregionen vor. Mit der Zeit entdeckten sie andere Kulturen, die über andere Nahrungsmittel oder Werkzeuge verfügten. Güter wurden zwischen den verschiedenen Küstenvölkern getauscht. Daraus entwickelten sich Handelsrouten, die nicht mehr nur die Siedlungen an der Küste miteinander verbanden, sondern über Händler bis weit ins Binnenland reichten.

2.1 > In den 1960er-Jahren wurde bei Ausgrabungen am Isthmus von Korinth ein 2600 Jahre alter Schiffskarrenweg freigelegt.

Gehandelt wurden vor allem Güter und Rohstoffe, die für den Alltag wichtig waren. Auf Zypern zum Beispiel hat man Reste von Messern gefunden, die aus dem glasartigen Vulkangestein Obsidian bestehen und aus der Zeit um 6000 vor Christus stammen. Da das Gestein nicht auf Zypern vorkommt, muss es zu jener Zeit auf dem Seeweg dorthin gelangt sein. Archäologen vermuten, dass es über eine jungsteinzeitliche Siedlung auf der anatolischen Hochebene gekommen ist, die damals mehrere Tausend Einwohner hatte und 150 Kilometer vom Mittelmeer entfernt lag. Heute gehört die Ausgrabungsstätte unter dem Namen Çatalhöyük zum Weltkulturerbe der UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur). Der Obsidian selbst dürfte vom Vulkan Göllü Dağ stammen, der noch einmal 200 Kilometer östlich von Çatalhöyük liegt.

Andere frühe Hinweise auf maritime Handelswege von Küste zu Küste finden sich in Vorderasien. Inschriften aus Mesopotamien, einem Gebiet, das sich über Teile des heutigen Iraks und Syriens erstreckte, deuten darauf hin, dass indische Seefahrer bereits um 2300 vor Christus Kupfer, Holz, Elfenbein und Perlen aus dem hoch entwickelten Industal ins westliche Asien transportierten. Hier entwickelte sich demnach schon früh eine Art Fernhandel über das Meer.



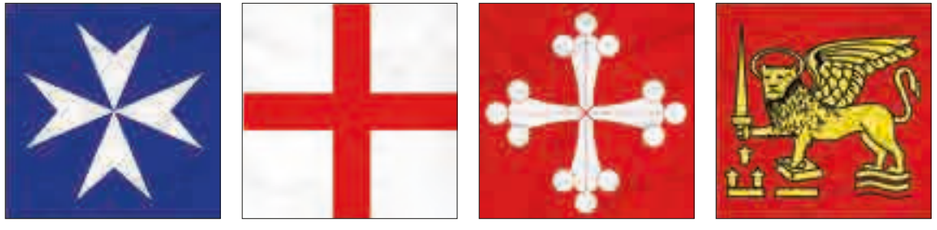
2.2 > Im 3. Jahrhundert vor Christus waren die wichtigsten Mächte im westlichen Mittelmeer Karthago, Rom und Griechenland. In den folgenden Jahrhunderten weitete vor allem Rom seinen Machtbereich aus.

Küsten verbinden

In den folgenden Jahrhunderten gewann der Seehandel in Europa und Asien weiter an Bedeutung. Zunächst entstanden starke regionale Handelszonen – beispielsweise rund um das Ostchinesische und das Südchinesische Meer sowie um das Mittelmeer. Im östlichen Mittelmeer suchten die Händler an den stark frequentierten Schiffsrouten schon früh nach Möglichkeiten, die Wege abzukürzen. So wurde um 600 vor Christus am Isthmus von Korinth der sogenannte Diolkos angelegt – ein gepflasterter Pfad, auf dem Schiffe vom Golf von Korinth zum Saronischen Golf über Land gezogen wurden. Die Abkürzung an der schmalsten Stelle der Landbrücke ermöglichte es, die 400 Kilometer lange Umschiffung der Halbinsel Peloponnes zu vermeiden. Der Schiffskarrenweg war bis in das 1. Jahrhundert nach Christus in Betrieb, bis größere und schnellere Schiffe ihn überflüssig machten.

Vormachtstellung im Mittelmeer

Beim Handel entlang der Küsten ging es aber nicht nur um den reinen Austausch von Waren, sondern oft auch um die wirtschaftliche Vormachtstellung in einer Region. Immer wieder gerieten die Anrainer über strategisch wichtige Handelspunkte oder Rohstoffquellen in Streit, der nicht selten zu kriegerischen Auseinandersetzungen führte. Beispielhaft dafür steht der mehr als 300 Jahre lange Konflikt zwischen den beiden großen aufstrebenden Mächten am Mittelmeer – den Römern und den Karthagern. Im 6. Jahrhundert vor Christus betrieben beide Mächte bereits rege Geschäfte. Karthago beherrschte das Gebiet im Norden des heutigen Tunesiens und trieb vor allem im westlichen Mittelmeer Handel. Rom begann damals, seinen Machtbereich über die Apenninen-Halbinsel hinaus auszuweiten. Um Konkurrenz zu vermeiden, schlossen die beiden Reiche im Laufe der Zeit mehrere Verträge. Der allererste wurde um 500 vor Christus ausgehandelt und definierte klar den jeweiligen Einflussbereich. Die Römer durften an der nordafrikanischen Küste nicht über einen bestimmten Punkt im Norden der Stadt Karthago hinaus nach Westen fahren. Wollten römische Kaufleute im karthagischen Einflussbereich in Nordafrika und auf Sardinien Geschäfte abschließen, so konnte dies nur im Beisein eines karthagischen Beamten geschehen. Im von Karthago beherrschten westlichen Teil Siziliens hingegen wurden



Amalfi | Genua | Pisa | Venedig

2.3 > Bis heute zieren die Wappen von Amalfi, Genua, Pisa und Venedig die Flagge der italienischen Marine. Die einstigen Stadtstaaten, groß geworden durch die Verknüpfung von Meer, Stadt und Land, hatten ihre Blütezeit im Mittelalter.

die römischen Kaufleute den karthagischen gleichgestellt. Die Karthager wiederum verpflichteten sich, römisch beherrschte Städte in Latium, der Region um die Stadt Rom, nicht anzugreifen.

Da beide Reiche weiter expandierten, folgten 348 und 306 vor Christus weitere Verträge. Sie legten fest, dass sowohl Rom als auch Karthago den erweiterten Einflussbereich der jeweils anderen Macht respektieren sollten. So wurde Karthago unter anderem die Souveränität über Libyen und Sardinien zugesichert.

Vor allem Rom expandierte in den folgenden Jahren und herrschte schließlich über die gesamte Apenninen-Halbinsel. Die alte Rivalität blieb aber weiter bestehen und mündete schließlich in die Punischen Kriege, einer Serie von Kriegen. Daraus ging 146 vor Christus das Römische Reich als Sieger hervor. Die Stadt Karthago wurde vollständig zerstört. Von da an blieb Rom im Mittelmeer für lange Zeit die herrschende Großmacht.

Ab dem 5. Jahrhundert nach Christus zerfiel das Römische Reich. In der Folge gewannen vor allem islamische Volksgruppen am Mittelmeer und im Nahen Osten an Bedeutung. Zu wichtigen Handelsposten wurden zu jener Zeit die syrische Stadt Damaskus, die Vorläufersiedlungen der Stadt Kairo, Isfahan im heutigen Iran und Bagdad, die spätere Hauptstadt Iraks – Binnenstädte, über die ein Großteil des Handels zwischen den Küsten des Mittelmeers und China und Indien abgewickelt wurde. Über mehrere Jahrhunderte kontrollierten Muslime die Handelsrouten entlang der nordafrikanischen Küste, des Mittelmeers und des Roten Meeres, das den Zugang zum Indischen Ozean eröffnete. Nach Ansicht von Historikern ist es deren großes Verdienst, die Handelsrouten Zentral- und Westasiens und des Mittelmeerraums zu einem großen System verbunden zu haben.

Im frühen 9. Jahrhundert wurde das westliche Mittelmeer vor allem von muslimischen Piraten dominiert, die die Küsten plünderten und Sardinien und Sizilien in ihre Gewalt brachten. Diese wurden von den Christen verallgemeinernd als Sarazenen bezeichnet, obwohl sie verschiedenen islamischen Volksgruppen entstammten. Die Stadt Amalfi an der heutigen italienischen Riviera wiederum war wegen ihrer besonderen Lage vor den Angriffen sicher. Am Golf von Salerno auf der Sorrentinischen Halbinsel an einer Steilküste gelegen, war sie bestens geschützt. Den Kaufleuten dort gelang es, mit den Sarazenen ins Geschäft zu kommen – und so einen Zugang zu den wichtigen islamischen Märkten in Nordafrika zu erhalten. Die Sarazenen verfügten zu der Zeit über wichtige Handelskontakte nach Nordafrika. Amalfi konnte sich daher zu einem bedeutenden Handelsplatz entwickeln und eine größere Flotte aufbauen. Die Stadt wurde so mächtig, dass sie schließlich die Sarazenen im Hafen Ostia bei Rom schlagen und deren Einfluss auf den Handel in dieser Region erheblich schwächen konnte. Amalfi wird mit Genua, Pisa und Venedig zu den sogenannten italienischen Seerepubliken gezählt – Stadtstaaten, die durch kluges Handeln und Taktieren zu großen Wirtschaftsmächten aufsteigen konnten und deren Handelsbeziehungen bis nach Byzanz reichten, jenem Reich im östlichen Mittelmeer mit der Hauptstadt Konstantinopel, dem heutigen Istanbul.

Eindrucksvoll ist die Geschichte der Seerepublik Venedig, die sich etwa ab dem 7. Jahrhundert zur wichtigen Wirtschaftsmetropole entwickelte. Im Hinblick auf den Warenaustausch hatte die Stadt große Vorteile. Sie verfügte über ein gut ausgebautes Textilgewerbe, besaß einen Flusshafen mit großer Wassertiefe und kontrollierte über ein funktionierendes Netz von Flüssen auch das Hinterland. Venedigs Entwicklung verlief auch deshalb so dynamisch, weil die Stadt nach außen aggressiv agierte. Venedig unterwarf benachbarte Konkurrenten und kontrollierte Dalmatien, jene Region, die heute zu Kroatien und Montenegro gehört. Diplomatisches Geschick, militärische Brutalität und Boykott von Handelskonkurrenten: Das war die Mischung, mit der Venedig seinen Einflussbereich schließlich bis auf die Krim und nach Zypern ausdehnen konnte. Erst im Laufe des 18. Jahrhunderts verlor die Seerepublik an Bedeutung, weil der Handel im Mittelmeer keine große Rolle mehr spielte. Wirtschaftlich wichtiger war fortan der Überseehandel nach Amerika und Asien, der von anderen Mächten wie England oder den Niederlanden dominiert wurde.

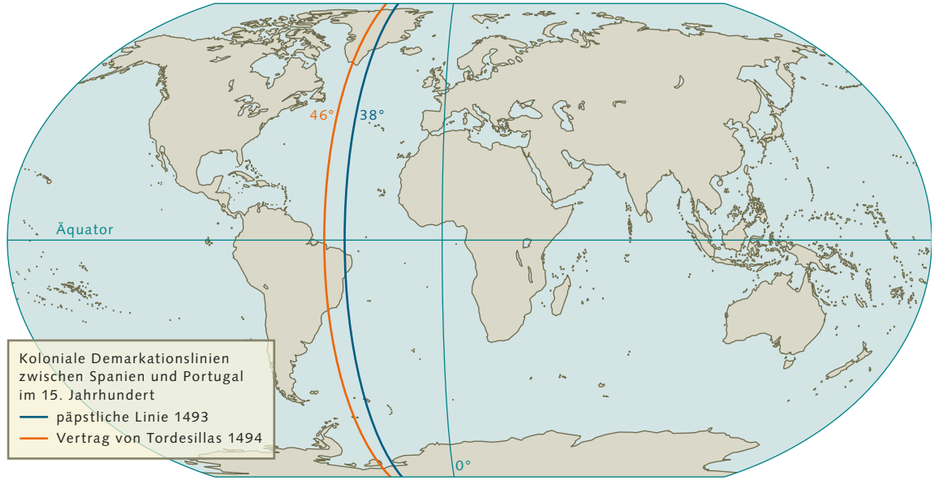
Die Hanse – ein starkes Bündnis für 500 Jahre

Im Ost- und Nordseeraum bildete sich seit der Mitte des 12. Jahrhunderts mit der Hanse ein großes Handelsbündnis heraus, das sich von Brügge im heutigen Belgien bis nach Reval in Estland erstreckte. Handelte es sich zunächst um eine Vereinigung von Kaufleuten, deren wichtigstes Ziel die sichere Fahrt durch die Küstengewässer der Nord- und Ostsee war und die sich zum Schutz vor Piraten zusammenschlossen, gehörten ihr schließlich fast 300 Städte in Nordeuropa an.

Diese lagen nicht alle an der Küste, sondern teils weit im Binnenland – wie beispielsweise Köln. Der Erfolg der Hanse beruht insbesondere darauf, dass man Waren transportierte, die nur in bestimmten Regionen hergestellt wurden und an anderen Orten wiederum sehr gefragt waren. Tuche, Pelze, Wachs, Salz, Trocken- oder Salzfische, Getreide, Holz und Bier machten den größten Teil des Warenvolumens aus. Wobei Textilien lange Zeit das bedeutendste Gut waren. Erst Mitte des 17. Jahrhunderts löste sich die Hanse auf.

Reichtum und Missgunst entlang der Küsten

Wie stark die Handelsschifffahrt von Machtinteressen geprägt war, verdeutlicht der Überseehandel, der sich nach der Entdeckung der Neuen Welt 1492 durch Christoph Kolumbus zu Beginn des 16. Jahrhunderts zwischen den Häfen des neu entdeckten Kontinents und Europa entwickelte. Die mächtigsten Seemächte waren damals Portugal und Spanien. Spanien hatte die Neue Welt in Besitz genommen, Portugal wollte insbesondere die neu erschlossenen Handelswege nach Indien entlang der afrikanischen Küste absichern. Zudem hatten die Portugiesen bereits Anfang des 15. Jahrhunderts Madeira und die Azoren erobert. Papst Alexander VI. verfügte daher 1493, dass die Welt außerhalb Europas zwischen Spanien und Portugal



2.4 > Ende des 15. Jahrhunderts war der Einfluss der beiden Seemächte Portugal und Spanien so groß, dass Papst Alexander VI. die Welt unter diesen aufteilte. Die Gebiete westlich der blauen Linie im Atlantik wurde Spanien zugeschlagen, die Gebiete östlich Portugal. Im Vertrag von Tordesillas wurde die Demarkationslinie korrigiert.

Taktik kleiner Nadelstiche – die Kaperei

Konflikte um die Vormachtstellung auf dem Meer wurden nicht immer in offenen Schlachten ausgetragen. Im Streit zwischen der englischen und der spanischen Krone beispielsweise entschied sich Königin Elisabeth I. Mitte des 16. Jahrhunderts für eine besondere Taktik. Sie wollte den Spaniern durch Kaperei wirtschaftlichen Schaden zufügen. Statt eine Flotte von Kriegsschiffen zu schicken, wurde der Kampf gegen Spanien privatisiert. Mit Erlaubnis des englischen Königshauses wurden erfahrene Kapitäne angeheuert, die als Kaperer Jagd auf die Handelsschiffe der spanischen Krone machen sollten. Das englische Königshaus stellte ihnen dazu Kaperbriefe aus – eine offizielle Erlaubnis zu internationaler Piraterie. Zudem wurde vertraglich geregelt, welchen Anteil an der Beute die Kapitäne behalten durften beziehungsweise am Hof abzuliefern hatten.

Einer der berühmtesten Kaperer seiner Zeit war Francis Drake, der 1577 zu seiner Weltumsegelung aufbrach. Drake sollte nicht nur Handelsschiffe ausrauben. Er bekam zusätzlich den riskanten Auftrag, die Südspitze Amerikas bei Feuerland zu umsegeln und auf der pazifischen Seite die spanischen Kolonien quasi durch die Hintertür anzugreifen. Er hatte Erfolg. Er segelte die Pazifikküste Südamerikas gen Norden und überrumpelte die spanischen Kolonialherren in den pazifischen Städten. Er überfiel sogar Lima, den Hafen des spanischen Vizekönigs. Drake erbeutete Gold, Silber, Edelsteine und teure Gewürze. Man schätzte den damaligen Wert der Beute auf sagenhafte 500 000 Pfund, die heute rund 100 Millionen Euro entsprechen würden. Drake wurde für seine Taten zum Ritter geschlagen, was einem Affront gegenüber dem spanischen Königshaus gleichkam.

Noch mehrere Jahrhunderte lang war die Kaperei Alltag auf den Weltmeeren – insbesondere auf den Routen von Europa nach Asien im Indischen Ozean und im Pazifik. Erst mit der Pariser Seerechtsdeklaration von 1856 wurde das Ausstellen von Kaperbriefen international geächtet.

2.5 > In England ein Held, in Spanien ein Schuft: der Kaperer Sir Francis Drake (1540–1596).

aufgeteilt werden solle. Spanien erhielt als Besitz die bis dahin bekannte westliche Welt und alle westlichen Ländereien, die noch entdeckt werden sollten. Portugal wurde die östliche Welt zugesprochen. Die Grenze zwischen West und Ost sollte in der Mitte des Atlantiks auf Höhe des 38. Längengrads verlaufen. Die Portugiesen aber protestierten und verlangten, die Grenze noch etwa 1000 Kilometer weiter nach Westen zu verschieben – bis etwa zum 46. Grad westlicher Länge. Ihr Protest hatte schließlich Erfolg, und 1494 wurde die Grenze im Vertrag von Tordesillas dementsprechend festgelegt. Heute wird vermutet, dass den Portugiesen damals bereits der Küstenverlauf Südamerikas bekannt war, denn durch die Westverschiebung der Linie fiel ein großer Teil des heutigen Brasiliens den Portugiesen zu. Schon wenige Jahre nach dem Vertrag begann die Ausbeutung Südamerikas. Die eroberten Gebiete wurden zu Kolonien. Große Mengen an Gold und Silber wurden aus der Neuen Welt nach Europa gebracht. Wichtige Häfen für diesen frühen interkontinentalen Frachtverkehr zwischen Europa und Amerika waren Sevilla und Lissabon. Die spanische Flotte war die größte und mächtigste ihrer Zeit.

Doch in den folgenden Jahrzehnten begann sich eine weitere Seemacht zu etablieren: England. In den ersten Jahrzehnten des 16. Jahrhunderts gewann das englische Bürgertum, das weniger den Papst, sondern den eigenen König als Oberhaupt seiner Kirche betrachtete, an Einfluss. Zwischen Spanien und dem aufstrebenden Neuling kam es immer wieder zu Konflikten, die sich im Laufe der Zeit aufschaukelten. Mitte des 16. Jahrhunderts entdeckten die Engländer die Gewässer vor Neufundland als reiche Fischgründe, weil dort große Bestände an Kabeljau zu finden waren. Die Spanier aber betrachteten die Fischerei als Wilderei in den ihnen vom Papst zugesprochenen Gewässern der westlichen Hemisphäre. Die Spannungen stiegen, als die Spanier englische Schiffe im Golf von Mexiko angriffen, die für Werftarbeiten in einem Hafen lagen. Zu offenen kriegerischen Auseinandersetzungen kam es damals zwar nicht, doch schickte Königin Elisabeth I. englische Kapitäne auf Kaperfahrt. Lange Zeit blieb der Konflikt daher eher ein Handelskrieg.

Erst 1588 kam es zur großen Seeschlacht zwischen den Mächten. Der spanische König Philipp II. schickte die große spanische Flotte, die Armada, gegen England, um

2.6 > Im Jahr 1607 kämpfte Spanien vor Gibraltar gegen die Niederlande. Dabei verloren die Spanier einen maßgeblichen Teil ihrer Flotte und in der Folge ihre Vormachtstellung zur See.

Elisabeth I. zu stürzen. Die Invasion Englands misslang jedoch. Die Engländer konnten die Armada im Ärmelkanal zurückschlagen. Anders als vielfach überliefert, wurde die spanische Flotte damit aber nicht gänzlich vernichtet. Spanien blieb weiter eine starke Seemacht. Erst ein Überraschungsangriff der Niederlande im Jahr 1607 in der Bucht von Gibraltar war so durchschlagend, dass Spanien einen maßgeblichen Teil seiner Flotte und seine Rolle als stärkste Seemacht verlor.

Historische Verkehrsdrehkreuze

Der Handel zwischen den weit entfernten Küsten machte es erforderlich, auf bestimmten Strecken Häfen einzurichten, in denen sich die Mannschaften mit Nahrung und Frischwasser versorgen konnten. Viele dieser Häfen entwickelten sich zu Verkehrsdrehkreuzen. Ein Beispiel ist Mauritius. Bereits seit dem 10. Jahrhundert war die Insel auf Karten arabischer Seefahrer verzeichnet. Von Portugiesen wurde sie Anfang des 16. Jahrhunderts entdeckt, und zwar als Zwischenstopp für ihre Schiffe auf dem Weg nach Asien und zurück nach Portugal. Die Portugiesen nutzten Mauritius aber nur als Stützpunkt und machten die Insel nicht zur Kolonie. Mitte des 17. Jahrhunderts schließlich siedelten sich hier die Niederländer als Kolonialherren an, nun wurde Zuckerrohr eingeführt und die Produktion von Rum aufgenommen. 1715 dann besetzten Franzosen die Insel. Sie verkauften nicht nur Lebensmittel, Wasser und vor allem Zucker sowie Rum an die Handelsschiffe, die auf ihren langen Reisen Mauritius ansteuerten, sondern nutzten darüber hinaus die strategisch gute Lage, um Schiffe der Engländer zu überfallen, die auf dem Weg zwischen Europa und Asien die Gewässer um Mauritius passierten. Dieser Piraterie machten die Briten 1810 ein Ende, indem sie ihrerseits die Franzosen angriffen und die Insel übernahmen. Genutzt wurde Mauritius fortan vor allem von europäischen Kaufleuten, die einen regen Seehandel zwischen Europa, Südamerika, Indien und Südostasien unterhielten. Umgeschlagen wurden auf Mauritius Textilien und Gewürze aus Indien sowie Porzellan aus China,

aber auch Elfenbein aus Afrika. Erst mit den modernen, motorisierten Schiffen, die große Strecken nonstop zurücklegen konnten, und schließlich mit dem Bau des Sueskanals sank die Bedeutung der Insel. Andere Häfen hingegen konnten ihren Status als wichtiges Drehkreuz über die Jahrhunderte halten. Der niederländische Hafen Rotterdam etwa war bereits zu Beginn des 17. Jahrhunderts ein wichtiger Sitz der Niederländischen Ostindien-Kompanie, die im Gewürzhandel aktiv war. Es wurden und werden noch immer Waren aus aller Welt nach Rotterdam gebracht und dann weiter ins europäische Binnenland transportiert: seinerzeit mit dem Schiff über den Rhein, heute auch per Güterzug und Lastwagen. Gemessen am Warenumschlag steht Rotterdam in der Rangliste der größten Häfen der Welt heute auf Platz 6. Vor allem Container, Erdgas und Erdöl werden hier angelandet.

Küsten entwickeln sich zum Urlaubsziel

Die Küsten weltweit sind nicht nur Handelsplatz, militärische Grenzzone oder Lieferant von Nahrung. Schon früh erkannten die Menschen auch die Bedeutung der Küsten als Ort der Erholung, Gesundheit und als Kraftquelle für die Seele. 414 vor Christus schrieb der griechische Philosoph Euripides: „Das Meer wäscht und säubert von jeglichem Schmutze." Er bezog sich dabei vor allem auf das Küstengebiet, in dem sich die Elemente Erde, Wasser und Wind berühren. Die Römer übernahmen die Vorstellung von der Heilkraft des Meeres. Spaziergänge und Festessen am Strand gehörten zum kultivierten Müßiggang des Adels. Für das süße Nichtstun verwendeten die Römer den Begriff „otium". Sie badeten jedoch nicht im Meer. Vielmehr errichteten sie zahlreiche Thermalbäder an warmen vulkanischen Quellen – etwa auf der italienischen Insel Ischia, wo sie noch heute in Betrieb sind.

Im Mittelalter entfremdeten sich die Menschen wieder vom Meer. Obgleich sich der Handel zwischen den teilweise weit entfernt voneinander liegenden Küsten ausbreitete, galten die Meere allgemein als bedrohlich und von Monstern bevölkert. Die Strände des Mittelmeers galten als abschreckender, von Piraten verseuchter Raum. Erst ab dem 17. Jahrhundert begann die Rückbesinnung auf das Meer als Sehnsuchtsort. Dazu trug unter anderem der englische Gelehrte Robert Burton bei, der 1621 das Buch „The Anatomy of Melancholy" (Die Anatomie der Melancholie) veröffentlichte – eine Sammlung historischer und philosophischer Betrachtungen aus 2000 Jahren zum Thema Melancholie. Darin lobte er die Sommerfrische an der See und riet Melancholikern, das bewegte Meer zu betrachten.

2.7 > Die Promenade des englischen Seebads Brighton war bereits im Jahr 1907 gut besucht. Bis heute hat die Stadt nichts von ihrer Attraktivität für Touristen eingebüßt.

Die Gentry, der englische Landadel, begann zudem die Bedeutung der körperlichen Ertüchtigung an der frischen Luft zu schätzen. 1626 wurden in der Stadt Scarborough an der englischen Ostküste säurehaltige Mineralquellen entdeckt. Die Bevölkerung sprach dem Wasser heilende Wirkung zu, was die Quellen schnell überregional bekannt machte. Bis zum Anfang des 18. Jahrhunderts entwickelte sich die Stadt zu einem etablierten Seeheilbad, zunächst in der Regel allerdings nur für Adlige, die sich den Aufenthalt leisten konnten.

Einen Boom löste der englische Arzt Richard Russell mit seinen Studien über die heilende Wirkung von Meerwasser aus. 1747 ließ er sich im südenglischen Seebad Brighton nieder. Er schrieb, dass Menschen mit Erkrankungen des Drüsensystems dank heilender Bäder im kühlen Wasser schneller genesen würden und sich auch Frauen, die an Kraftlosigkeit litten, schnell erholten. Vor allem aus London reisten nun etliche Menschen zur Erholung nach Brighton, das sich zu einem der beliebtesten Seebäder im Land entwickelte – nicht mehr nur für Adlige, sondern auch für wohlhabende Bürgerliche.

1793 wurde schließlich mit Heiligendamm an der deutschen Ostseeküste das erste deutsche Seebad gegründet. In den folgenden Jahrzehnten entwickelten sich viele weitere Küstenorte in Europa zu Seebädern.

Eine gänzlich andere Art von Küstentourismus forcierte der Hamburger Reeder Albert Ballin in den 1890er-Jahren: die Kreuzfahrt, bei der Passagiere gleich mehrere Reiseziele an den Küsten besuchten. Ballin betrieb seit längerer Zeit Passagierschiffe auf der Route zwischen Nordamerika und Europa. Auch viele Auswanderer reisten mit Ballins Schiffen. Da die Schiffe in der Winterzeit aber nicht stark genug genutzt wurden, kam Ballin auf die Idee, Vergnügungsreisen in wärmere Regionen anzubieten, um die Schiffe besser auszulasten. So stach am 22. Januar 1891 in Cuxhaven das Passagierschiff „Augusta Victoria" zur weltweit ersten Kreuzfahrt in See. 57 Tage, 22 Stunden und 3 Minuten war das Schiff unterwegs und lief Gegenden an, die damals für die meisten Menschen in Nordeuropa noch sehr exotisch klangen: Ägypten, die Insel Malta oder die Hafenstadt Lissabon.

2.8 > Der Hamburger Reeder Albert Ballin gilt als Erfinder der Kreuzfahrt. Um seine Passagierschiffe im Winter besser auszulasten, bot er ab 1891 Schiffsreisen zu Städten rund um das Mittelmeer an.

Was Küsten zu leisten vermögen

Der Lebensraum Küste erfüllt aus Sicht des Menschen allerdings noch viele weitere Funktionen, er erbringt sogenannte Ökosystemleistungen, die sich wie folgt einteilen lassen:

- unterstützende Ökosystemleistungen, die als unabdingbare Basis für die übrigen Dienstleistungen angesehen werden können und beispielsweise die Primärproduktion oder Nährstoffkreisläufe umfassen;
- regulierende Ökosystemleistungen, die Vorteile und Nutzen beinhalten, die der Mensch aus der regulierenden Wirkung der Küstengewässer und ihrer Ökosysteme bezieht;

- bereitstellende Ökosystemleistungen, zu denen einerseits Produkte und Güter für die Versorgung des Menschen gehören, andererseits Räume, die das Meer zur Verfügung stellt;
- kulturelle Ökosystemleistungen, die vielfältige Leistungen und Nutzen beinhalten, die dem immateriellen Wohlbefinden des Menschen dienen.

Das Konzept der Ökosystemleistungen bietet sich an, um die Vielzahl von Leistungen, die beispielsweise in Küstenregionen erbracht werden und aus denen der Mensch materiellen wie immateriellen Nutzen zieht, systematisch zu ordnen und zu analysieren. Allerdings bleiben gesellschaftliche Fragen wie etwa die Verteilungsgerechtigkeit oder eine Betrachtung, welche Bevölkerungsgruppen von diesen Leistungen profitieren, bei derartigen Analysen in vielen Fällen offen. Insofern wird etwa eine einseitige, rein ökonomische Beurteilung von Ökosystemleistungen ohne Einbeziehung von soziokulturellen oder ethischen Zusammenhängen kritisch gesehen.

Bei der Betrachtung von Lebensräumen nur hinsichtlich ihrer Leistungen wird häufig nicht berücksichtigt, dass jeder Lebensraum, auch ohne dass er genutzt wird, einen Wert haben kann. Umweltethiker sprechen vom sogenannten Nicht-Nutzungswert. Zu diesem zählt zum einen der Existenzwert, den Menschen Lebewesen wie Korallen oder Lebensräumen wie Mangrovenwäldern beimessen, ohne davon ausgehen zu können, die Lebensräume selbst einmal zu nutzen oder zu erleben. Der Existenzwert ergibt sich aus der bloßen Freude darüber, dass die Lebewesen oder Lebensräume überhaupt existieren.

Zum Nicht-Nutzungswert zählt zum anderen der Vermächtniswert, der darauf beruht, dass Menschen den Wunsch verspüren, Naturgüter so unversehrt wie möglich an die nachfolgenden Generationen weiterzugeben. Die Bemessung der Nicht-Nutzungswerte, die zu den kulturellen Ökosystemleistungen zählen, ist nicht einfach. Für die Bewertung muss beispielsweise auch das Wissen der einheimischen Bevölkerung oder anderer Interessengruppen eingeholt werden – etwa das Wissen darüber, ob ein Lebensraum für die Bevölkerung eine besondere religiöse oder spirituelle Bedeutung hat. Erst wenn man dieses Wissen berücksichtigt, lässt sich der Wert des Lebensraums ermessen.

UNTERSTÜTZENDE ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN – DIE GRUNDLAGE DER NAHRUNGSNETZE

Klein, aber produktiv

Die Basis allen Lebens im Meer und zugleich die bedeutendste Ökosystemleistung ist die Primärproduktion: der Aufbau von Biomasse durch Pflanzen und Mikroorganismen. Diese gewinnen ihre Energie meist durch **Photosynthese** oder durch bestimmte chemische Verbindungen und stellen energiereiche Substanzen wie zum Beispiel Glukose (Zucker) her. Zu den wichtigsten Primärproduzenten im Ozean zählen die mikroskopisch kleinen Vertreter des marinen Phytoplanktons wie die Diatomeen (Kieselalgen), die Coccolithophoriden (Kalkflagellaten) oder auch die Cyanobakterien (früher Blaualgen genannt). Da das Phytoplankton auf Sonnenlicht angewiesen ist, kommt es ausschließlich in den oberflächennahen Wasserschichten der Weltmeere vor. Wie die Pflanzen an Land benötigt es zusätzlich zum Sonnenlicht Nährstoffe wie Phosphor- und Stickstoffverbindungen. Diese gelangen vor allem durch die Flüsse ins Meer. Da in den Küstengewässern sowohl ausreichend Sonnenlicht als auch Nährstoffe vorhanden sind, zählen diese zu den besonders produktiven Regionen der Meere. Diese Produktivität führt auch zu besonderem Fischreichtum. Denn vom Phytoplankton ernähren sich Kleinstkrebse und Fisch- und Muschellarven, die wiederum Nahrung für Fische sind.

Jedoch nicht immer stammen die Nährstoffe aus den Flüssen. Zum Beispiel in sogenannten Auftriebsgebieten steigt nährstoffreiches, kaltes Wasser aus der Tiefe des Ozeans auf. Das ist unter anderem an den Küsten von Chile, Kalifornien, Mauretanien und Namibia der Fall. Die Primärproduktion ist hier entsprechend hoch. Wie schon die produktiven Küstengewässer sind auch die Auftriebsgebiete besonders fischreich.

Wie stark die Primärproduktion in den Küstengewässern ist, hängt aber nicht nur von der Menge an Nährstoffen ab, die Strömungen und Flüsse herantragen, sondern auch von der Intensität, mit der die Wassermassen durchmischt werden. Durch diese Durchmischung kann die Nährstoffkonzentration in verschiedenen Küstenabschnitten oder Wassertiefen stark variieren. Im Golf von Bengalen, wo Ganges und Brahmaputra ein großes Fluss-

2.9 > Produktive Preziosen: Kieselalgen gehören zu den wichtigsten Primärproduzenten. Erst bei starker Vergrößerung wird die Schönheit ihrer Schalen sichtbar. Mikroskopische Präparate wie dieses waren vor etwa 100 Jahren vor allem unter Diplomaten ein beliebtes Mitbringsel.

delta bilden und viele Nährstoffe aus dem Himalaja-Hochland herantransportieren, verändert sich die Primärproduktion beispielsweise in Abhängigkeit vom Monsun. Weil dort im Sommer, wenn die feuchten Monsunwinde wehen, sehr viel Niederschlag fällt, wird das Wasser entlang der Küste stark verdünnt. Damit sinkt auch die Konzentration an Nährstoffen.

Zu den besonders produktiven Küstenregionen der Welt zählt auch das Südchinesische Meer, weil hier westlich von Hongkong der Perlfluss mündet. Er wird aus mehreren Flüssen gespeist und bildet das größte Flusssystem in Südchina. Sein Einzugsgebiet ist rund 452 000 Quadratkilometer groß, was in etwa der Fläche von Schweden entspricht. Entsprechend gewaltig sind die Nährstoffmengen, die sich ins Südchinesische Meer ergießen.

Seegraswiesen
Seegraswiesen sind spezielle Lebensräume, die auf Sandböden in flachem Wasser und im Wattenmeer vorkommen. Anders als Algen, die sich meist mit Haftorganen auf Steinen festsetzen, schlägt das Seegras Wurzeln, mit denen es in sandigen Meeresgebieten eine feste Struktur bildet. Zahlreiche Organismen finden hier Halt, etwa kleinere Algen oder Schnecken, was Seegraswiesen oftmals zu besonders artenreichen Lebensräumen macht. Darüber hinaus ist Seegras für viele Meerestiere und Wasservögel eine wichtige Nahrungsquelle.

REGULIERENDE ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN – SCHUTZ VOR SCHADSTOFFEN UND STÜRMEN

Klärwerk Küste

Küstengewässer spielen eine wichtige Funktion bei der Reinigung von Abwässern und Schadstoffen, die über die Flüsse, aus der Kanalisation oder über die Atmosphäre ins Meer eingetragen werden. Sie haben somit eine regulierende Funktion und sind unter anderem für den Abbau von Nährstoffen von Bedeutung – insbesondere von Stickstoffverbindungen. Pflanzen benötigen Nährstoffe, vor allem Stickstoff und Phosphat, für ihr Wachstum. Um die Produktivität von Ackerflächen zu erhöhen und höhere Erträge erwirtschaften zu können, werden diese als Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht, entweder in Form von Gülle und Fäkalien oder auch als Kunstdünger.

In Regionen, in denen intensiv Landwirtschaft betrieben wird, gelangen sehr viele Nährstoffe in den Boden, die dort meist nicht vollständig von den angebauten Kulturpflanzen aufgenommen werden. Mit dem Regen werden diese überschüssigen Nährstoffe dann in das Grundwasser und die Bäche und Flüsse gespült, über die sie bis ins Meer gelangen. Die Phosphor- und Stickstoffverbindungen regen auch das Wachstum der Algen an. Bei einem Überangebot an Nährstoffen entwickeln sich die Algen aber so stark, dass es zu ausgeprägten Algenblüten kommt. Je mehr Algen vorhanden sind, desto intensiver ist dann in tieferen Wasserschichten der Abbau durch Mikroorganismen, die Sauerstoff zehren. Dieses Phänomen wird als Überdüngung beziehungsweise Eutrophierung bezeichnet. Im Extremfall entstehen sauerstofffreie Zonen, in denen Fische, Krebse oder Muscheln nicht mehr überleben können.

Mit der Intensivierung der Landwirtschaft hat die Zahl der sauerstoffarmen beziehungsweise -freien Zonen in den Küstengewässern seit den 1960er-Jahren vor allem auf der Nordhalbkugel massiv zugenommen. Weltweit gibt es etwa 400 Küstengebiete, in denen regelmäßig ein Sauerstoffmangel auftritt, insgesamt auf einer Fläche von 245 000 Quadratkilometern, was in etwa der Fläche Rumäniens entspricht. Besonders betroffen sind die Küstengewässer in Europa, an der US-amerikanischen Ostküste, im Golf von Mexiko und zunehmend auch in China. Da vor allem große Mengen an Stickstoff ins Wasser gelangen, ist gerade dessen Abbau von zentraler Bedeutung. Stickstoff liegt in Dünger, Gülle und Exkrementen meist als Ammonium-Ion (NH_4^+) vor. Kommt Sauerstoff hinzu, wandelt sich das Ammonium in Nitrat. In Gewässern wird das Nitrat dann von Mikroorganismen (denitrifizierenden Bakterien) über die sogenannte Denitrifikation zu reinem Stickstoff (N_2) abgebaut, der von den Algen nicht mehr als Pflanzennährstoff genutzt werden kann. Die Küstengewässer fungieren dank der Denitrifikation bis zu einem gewissen Grade als Kläranlage des Meeres.

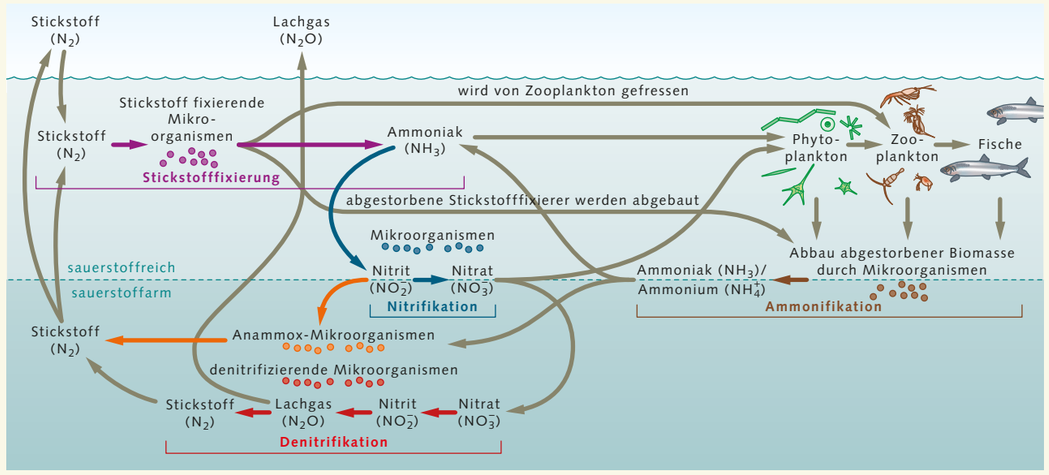
Gelangen aber zu viele Nährstoffe ins Meer, können diese nicht mehr vollständig abgebaut werden, sodass es zur Überdüngung kommt.

In den Küstengewässern tragen auch die verschiedenen Pflanzengemeinschaften erheblich zum Abbau der Nährstoffe bei. Dazu gehören insbesondere die Mangroven und die Seegraswiesen, die wie die Pflanzen an Land über ihre Wurzeln große Mengen an Nährstoffen aufnehmen. Verstärkt wird der Nährstoffabbau ferner durch die zahlreichen im Meeresboden lebenden Organismen wie zum Beispiel Muscheln und Würmer. Abermillionen von ihnen leben in Böden vergraben, und ihre mehrere Zentimeter tiefen Gänge lassen die Sedimente vielerorts durchlöchert wie Schwämme erscheinen. Im Vergleich zu dem ansonsten festen und dichten Sediment, wo das Wasser

Die Wandlung eines wichtigen Nährstoffs – der Stickstoffzyklus

Stickstoff ist ein bedeutender Pflanzennährstoff, der in der Umwelt durch biologische Prozesse auf verschiedenen Wegen in einem natürlichen Kreislauf mehrfach umgewandelt wird. Im Wesentlichen wird reiner Stickstoff aus der Atmosphäre von Mikroorganismen in Stickstoffverbindungen umgewandelt, die von großen Algen, dem Phytoplankton und den Landpflanzen verwertet werden können. Der Kreislauf schließt sich damit, dass die biologisch erzeugten Stickstoffverbindungen wieder in reinen Stickstoff umgewandelt werden.

Die Atmosphäre unserer Erde besteht zu 78 Prozent aus elementarem (also reinem) Stickstoff (N_2), doch können Pflanzen diesen nicht direkt verwerten. Verschiedene Mikroorganismen sind aber dazu in der Lage, wie im Meer die Cyanobakterien (ehemals als Blaualgen bezeichnet), die zum Phytoplankton gehören, und an Land die Knöllchenbakterien, die in Gesellschaft mit Hülsenfrüchtlern wie etwa Bohnen vorkommen. Sie nehmen den reinen Stickstoff auf und wandeln ihn in Ammoniak (NH_3) beziehungsweise Ammonium-Ionen (NH_4^+) um. Dieser Prozess wird als Stickstofffixierung bezeichnet. Das Ammoniak beziehungsweise Ammonium wird dann von anderen Gruppen von Mikroorganismen, insbesondere dem Bakterium *Nitrosomonas*, in mehreren Schritten in Nitrit-Ionen (NO_2^-) und schließlich Nitrat-Ionen (NO_3^-) umgewandelt. Diese Umwandlung wird als Nitrifikation bezeichnet. Diese Ionen können die großen Algen, das Phytoplankton und die Landpflanzen dann direkt verwerten. So bauen sie daraus unter anderem Aminosäuren auf. Sterben sie, wird die tote Biomasse von einer Vielzahl anderer Mikroorganismen abgebaut. Auch die in großen Algen, im Phytoplankton und in den Landpflanzen enthaltenen Stickstoffverbindungen werden von Mikroorganismen vor allem über die sogenannte Ammonifikation abgebaut. Dabei werden die Stickstoffverbindungen in der abgestorbenen Biomasse, wie zum Beispiel die Aminosäuren, von einer großen Zahl verschiedener Mikroorganismen wieder in Ammoniak und Ammonium umgewandelt. Dieses Ammoniak und Ammonium steht den Mikroorganismen, insbesondere *Nitrosomonas*, dann wieder für die Nitrifikation zur Verfügung. Der Stickstoffkreislauf schließt sich mit einem Abbauprozess, der letztlich auch für die Reinhaltung von Gewässern besonders wichtig ist – der Denitrifikation. Im Wasser enthaltene Nitrat-Ionen (NO_3^-) werden dabei von Mikroorganismen (denitrifizierenden Bakterien) direkt in elementaren Stickstoff (N_2) und Stickoxide (NO und N_2O) umgewandelt. Diese können vom größten Teil des Phytoplanktons und den Landpflanzen nicht mehr als Nährstoffe genutzt werden.



2.10 > Stickstoff ist das häufigste Element in der Erdatmosphäre und ein wichtiger Pflanzennährstoff. Stickstoff wird in der Natur in einer Art Kreislauf durch Bakterien und Pflanzen immer wieder chemisch umgewandelt.

2.11 > Das Mündungsgebiet des Flusses Salak auf der Insel Borneo wird von Mangroven dominiert. Sie schützen die Küste vor Orkanen und Sturmfluten.

nur durch die Poren zwischen den Sedimentkörnern eindringt, vergrößert sich durch die vielen Gänge die Fläche, an der die Mikroorganismen Denitrifikation betreiben können. Die Klärwerksfunktion der Küstengewässer wird dadurch deutlich gesteigert.

Eine regulierende Funktion haben die Küstengewässer auch beim Abbau und bei der Neutralisierung von Schadstoffen wie zum Beispiel langlebigen chemischen Verbindungen und Schwermetallen, die über die Flüsse und die Atmosphäre ins Küstenmeer eingetragen werden. Zum einen werden Schadstoffe verdünnt, zum anderen werden sie durch die Aktivität der Bodenbewohner ins Sediment eingelagert, etwa indem sie mit der Nahrung aus dem Wasser gefiltert und mit dem Kot ins Sediment abgegeben werden. Die Schadstoffe werden somit zwar nicht aus der Umwelt entfernt, doch die Einbindung ins Sediment verhindert, dass andere Meeresorganismen die Schadstoffe aufnehmen. So wird letztlich auch verhindert, dass die Schadstoffe über die Nahrungskette vom Menschen aufgenommen werden.

Die Gewalt des Meeres dämpfen

Küstenlebensräume wie Dünen, Korallenriffe und Mangroven übernehmen für den Menschen eine wichtige Schutzfunktion, denn sie sind in der Lage, Wind und Brandung zu dämpfen – in diesem Sinne regulieren sie die physikalischen Kräfte des Meeres. So wird Abidjan, die Stadt in Elfenbeinküste, genauso durch vorgelagerte Dünen geschützt wie die niederländische Stadt Amsterdam, die nigerianische Stadt Lagos oder die südafrikanische Stadt Durban.

Besonders deutlich wurde in den vergangenen Jahren auch die Bedeutung der Mangrovenwälder für den Küstenschutz. Tropische Stürme können Brandungswellen mit einer Höhe von bis zu 7 Metern erzeugen. Wie eine Studie englischer Forscher belegt, bieten Mangroven einen erstklassigen Schutz gegen solche Sturmfluten und Orkane. Anhand von Modellrechnungen konnten sie zeigen, dass bereits ein Mangrovenstreifen von 1 Kilometer Tiefe die Windenergie um 75 Prozent und die Wellenhöhe um bis zu einem halben Meter verringern kann. Bedenkt man, dass natürliche Mangrovenwälder viele Quadratkilometer groß sein können, so bedeutet dies eine erhebliche Schutzwirkung – wie etwa an der Südküste Floridas, wo sie eine Ausdehnung von rund 2000 Quadratkilometern haben. Über viele Jahre wurden Mangrovenwälder an zahlreichen tropischen Küsten allerdings in großem Stil zerstört. In Indonesien beispielsweise wurden sie entfernt, um Platz für Aquakulturanlagen zu schaffen. In Kolumbien wiederum, wo knapp 20 Prozent aller Mangrovenbestände zerstört sind, fielen sie der Holzgewinnung zum Opfer. Studien zeigen, dass die Schäden, die der Tsunami 2004 im Indischen Ozean vor allem an der Küste Indonesiens angerichtet hat, viel geringer ausgefallen wären, wenn man die Mangroven dort nicht über Jahre abgeholzt hätte.

BEREITSTELLENDE ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN – FISCH, DIAMANTEN UND NOCH VIEL MEHR

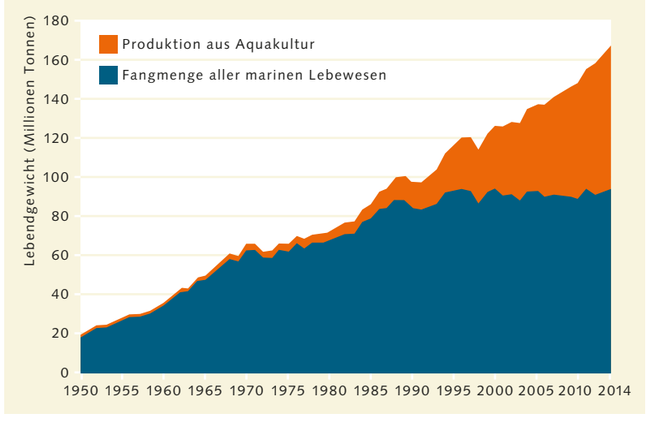
Eiweiß für eine wachsende Weltbevölkerung

Seit jeher versorgen sich die Menschen mit Fisch und Meeresfrüchten aus dem Meer. Über Jahrtausende wurde Meeresfisch nur in Küstennähe verzehrt, weil es keine Möglichkeit gab, den Fisch über weite Strecken ins Binnenland zu transportieren. Mit der Zeit entwickelten sich aber Verfahren, um Fisch haltbar zu machen. Zunächst wurde er mit Salz konserviert, später in Konserven verpackt und dadurch über große Distanzen transportierbar. Allerdings erst mit der Erfindung der Tiefkühltechnik und der damit verbundenen Möglichkeit, Lebensmittel beinahe unbegrenzt haltbar zu machen, entwickelte sich Fisch auch fernab der Küsten zu einem Grundnahrungsmittel. Heute wird Fisch weltweit in großen Mengen verzehrt und spielt für die Eiweißversorgung des Menschen eine tragende Rolle. Das gilt in besonderem Maße für westafrikanische Staaten wie den Senegal oder auch die kleinen Inselstaaten im Südpazifik, wo Fisch eines der wichtigsten Grundnahrungsmittel ist.

Mit dem Wachstum der Weltbevölkerung ist der Konsum von Fisch und Meeresfrüchten seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts enorm gestiegen. Lag der Pro-Kopf-Verbrauch in den 1960er-Jahren noch bei 9,9 Kilogramm, so überstieg er 2014 nach Angaben der Welternährungsorganisation (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) erstmals die Marke von 20 Kilogramm. Das entspricht einer Verdoppelung des Verbrauchs an Fisch und Meeresfrüchten in nur einem halben Jahrhundert. Nach Angaben der Vereinten Nationen wird die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 von heute etwa 7 Milliarden auf etwa 9,5 Milliarden Menschen anwachsen. Mehr als 2 Milliarden Menschen zusätzlich werden dann mit Nahrung und insbesondere auch Eiweiß versorgt werden müssen. Einen guten Teil wird dazu Fisch beitragen, doch liegt auf der Hand, dass die zusätzliche Eiweißmenge nicht aus wild gefangenem Fisch bereitgestellt werden kann, wenn die Fischbestände künftig nicht mehr überfischt werden sollen.

Wie groß der Anteil der Küstengewässer beim Fang von Wildfisch und Meeresfrüchten ist, lässt sich nur schwer beziffern. Weil die FAO in ihren globalen Statistiken nicht zwischen Küsten- und übrigen Gewässern unterscheidet, gibt es nur grobe Schätzungen, die von etwa 90 Prozent ausgehen. In Europa unterscheiden Fischereiexperten beispielsweise zwischen der Küstenfischerei, der Kleinen Hochseefischerei und der Großen Hochseefischerei, wobei nach Größe und Motorisierung der Fahrzeuge differenziert wird. Zur Küstenfischerei zählt jene Fischerei, die mit Booten, die zwischen 18 und 24 Meter lang sind, und mit Motoren von maximal 300 PS ausgeführt wird. Sie überschneidet sich mit der Kleinen

Aquakultur
Unter dem Begriff „Aquakultur“ werden mehrere Zuchtformen zusammengefasst. Im klassischen Sinne bezieht sich die Aquakultur auf Zucht im Süßwasser, beispielsweise von Karpfen. Zur Aquakultur zählt aber auch die sogenannte Marikultur, die Zucht im Meer. Inzwischen gibt es auch Mischformen, bei denen Meerestiere an Land in speziellen Salzwasserbecken gezüchtet werden.



2.12 > Die produzierte Menge an Fisch und Meeresfrüchten ist heute um ein Vielfaches größer als noch 1950. Spielte die Aquakultur anfangs kaum eine Rolle, so liefert sie inzwischen bereits fast die Hälfte der weltweiten Produktion.

Hochseefischerei, bei der Boote mit einer Länge von 18 bis 32 Metern und maximal 600 PS eingesetzt werden. Bei der Großen Hochseefischerei kommen noch einmal deutlich größere Fahrzeuge bis hin zu industriellen Fangschiffen zum Einsatz, auf denen der Fisch gleich zubereitet und tiefgefroren wird.

Nach einer anderen Definition kann als Küstenfischerei diejenige bezeichnet werden, die im Bereich der Schelfe stattfindet. Damit wird der küstennahe flache Teil des Meeresbodens bezeichnet. Der Schelf fällt sanft bis zu einer durchschnittlichen Tiefe von 130 Metern ab und endet am Kontinentalabhang, der mehr oder weniger steil in die Tiefe übergeht. Nach dieser Definition wäre die Fischerei in vielen flachen Nebenmeeren wie dem Ostchinesischen Meer oder der Nordsee gänzlich als Küstenfischerei zu betrachten, obwohl das Küstenmeer eines Staates, rein rechtlich betrachtet, mit der 12-Seemeilen-Zone endet.

2.13 > China trägt 60 Prozent zur weltweiten Aquakulturproduktion bei. Entsprechend findet man in vielen chinesischen Küstenregionen Aquakulturanlagen wie diese im Hafen von Tolo nahe bei Hongkong.

Fisch für die Ernährung der Welt

Um die Versorgung mit Fisch in der Zukunft sicherzustellen, kann die Aquakultur – die Zucht von Fisch und anderen Organismen in speziellen Anlagen – eine wichtige Rolle spielen. Bereits in den vergangenen Jahren ist sie deutlich gewachsen, während sich die Menge der wild gefangenen Fische und Meeresfrüchte kaum verändert hat. Insgesamt wurden im Jahr 2014 weltweit 167,2 Millionen Tonnen Fisch und Meeresfrüchte verbraucht. 93,4 Millionen Tonnen stammten aus Wildfang, 73,8 Millionen Tonnen aus Aquakultur, von denen wiederum 26,7 Millionen Tonnen aus dem Meer stammen, ausschließlich aus den Küstengewässern. Die weitaus größere Menge allerdings, 47,1 Millionen Tonnen, stammt mittlerweile aus Gewässern an Land. Mit 60 Prozent hat China den größten Anteil an der weltweiten Aquakulturproduktion.

Will sie ein Hoffnungsträger für die Zukunft sein, muss Aquakultur allerdings nachhaltig betrieben werden. Denn in den vergangenen Jahrzehnten wurden große Fehler gemacht. Für Shrimpsanlagen etwa wurden in den 1990er-Jahren an den Küsten Indonesiens Hunderte Kilometer Mangrovenwälder gerodet. An ihrer Stelle wurden Aquakulturen als Monokulturen angelegt. Vielerorts werden bis heute Shrimps oder auch Fische in Massentierhaltung und auf maximalen Ertrag gezüchtet. Sie sind dadurch krankheitsanfälliger als ihre wild lebenden Artgenossen, weshalb Antibiotika und andere Medikamente vorbeugend eingesetzt werden – mit unabsehbaren Folgen für die Meeresumwelt und auch die Endverbraucher. Problematisch ist auch, dass der Kot der Zuchttiere regional zu einer Überdüngung des Meeres führt, wodurch sich die Wasserqualität deutlich verschlechtert.

Inzwischen hat teilweise ein Umdenken hin zu einer umweltschonenden Aquakultur eingesetzt. Als eine vielversprechende Alternative werden gemischte Aquakulturen angesehen, in denen verschiedene Organismen gemeinsam gehalten werden und in denen die Ausscheidungen einer Art den anderen Organismen als Nahrung dienen. Integrierte Multitrophische Aquakultur (Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA) werden solche Anlagen genannt. Darin lassen sich beispielsweise Fische, Algen, Muscheln und Seegurken gemeinsam züchten. Die Fische werden gefüttert, die Seegurken ernähren sich vom überschüssigen Futter und dem Kot der Fische, die Algen wiederum von anorganischen Substanzen, die die Fische ausscheiden. Die Muscheln schließlich filtrieren Partikel aus dem Wasser und halten so die Zuchtanlage sauber. Das Futter wird somit optimal ausgenutzt. Zudem lassen sich mehrere Produkte in einer Anlage ernten.

Die Förderung von Erdgas und Erdöl

Eine aus wirtschaftlicher Sicht bedeutende bereitstellende Dienstleistung sind die Erdgas- und Erdöllagerstätten im Meer. Obwohl heute noch beide Rohstoffe vor allem an Land gefördert werden, ist der Anteil aus dem Meer (Offshore-Gas und -Öl) beachtlich. So trägt Offshore-Öl mit etwa 40 Prozent und Offshore-Gas zu etwa 30 Prozent zur jeweiligen globalen Förderung bei, doch ist nicht immer eindeutig abgrenzbar, ob sich die Förderanlagen noch der Küste oder schon dem Meer zuordnen lassen. Sicher ist, dass die Offshore-Förderung zunächst unmittelbar an der Küste begann und dann immer weiter ins Meer hinausgewandert ist. Gründe dafür sind die zunehmende Ausbeutung der küstennahen Lagerstätten, aber auch der technische Fortschritt, mit dem es möglich wurde, Gas und Öl aus immer größeren Tiefen zu fördern.

Die Förderung von Erdöl im Meer begann schon früh. Bereits 1896 wurden im Summerland-Feld bei Santa Barbara in Kalifornien erste Ölfördertürme im Meer errichtet. 1937 wurde zum ersten Mal 2 Kilometer vor der US-amerikanischen Golfküste von einer Plattform aus nach Öl gebohrt. In den 1970er-Jahren ist die relativ flache Nordsee mit einer durchschnittlichen Wassertiefe von 90 Metern als Erdgas- und Erdölrevier erschlossen worden. Die erste Förderplattform wurde 1971 im Ekofisk-Ölfeld auf dem norwegischen Kontinentalschelf installiert. Das Ekofisk-Feld liegt 270 Kilometer von der norwegischen Küste entfernt – mitten in der Nordsee und damit weit von der Küste entfernt. Genau wie bei der Fischerei ist unklar, inwieweit man dieses Meeresgebiet noch der Küste zuordnen kann.

In Ghana beispielsweise, wo der Schelf mit einer Ausdehnung von 60 Kilometern relativ schmal ist und schon in geringer Entfernung von der Küste steil in die Tiefsee abfällt, liegt das große Jubilee-Ölfeld deutlich näher am Land. Da es sich am steilen Rand des Kontinentalschelfs befindet, liegt es bereits in rund 1100 Meter Wassertiefe. Ähnlich ist die Situation in dem erst im Jahr 2008 entdeckten Iara-Ölfeld vor der brasilianischen Küste. Es liegt etwa 230 Kilometer vor Rio de Janeiro am Fuß des Kontinentalabhangs in einer Tiefe von etwa 2200 Metern.

Absolut küstennah, sozusagen in Sichtweite vom Land, wird heute kaum mehr nach Öl gebohrt. Bis auf wenige Ausnahmen liegen die meisten Erdgas- und Erdölfelder heute in Wassertiefen von mehreren Hundert Metern. Zu den Ausnahmen gehören kleinere und ältere Erdgas- oder Ölförderanlagen an der niederländischen und der deutschen Nordseeküste, die nur wenige Kilometer vor der Küste stehen.

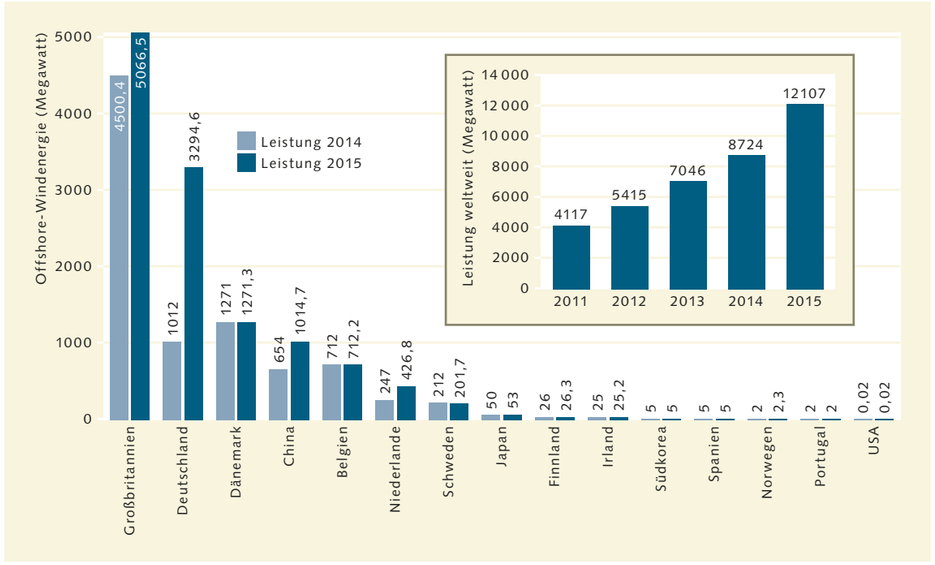
Energie ernten, die im Meer steckt

Die Küstengewässer sind in den vergangenen Jahren verstärkt auch für die Erzeugung von Strom aus Windenergie interessant geworden. Die Zahl der Offshore-Windräder hat sich in den vergangenen Jahren deutlich erhöht, und die weltweit installierte Leistung hat sich allein zwischen 2011 und 2015 verdreifacht. Der Wind über dem Meer weht stetiger und stärker als im Landesinneren, und die Stromausbeute auf hoher See ist deutlich höher als auf dem Festland, wo zudem die verfügbaren Flächen deutlich kleiner sind, weil dort Mindestabstände zu Häusern oder Naturschutzgebieten eingehalten werden müssen. Windräder lassen sich heute mithilfe von Spezialschiffen und Verwendung neuer Techniken weitaus billiger, schneller und in größerer Zahl auf dem Meer installieren als noch vor wenigen Jahren.

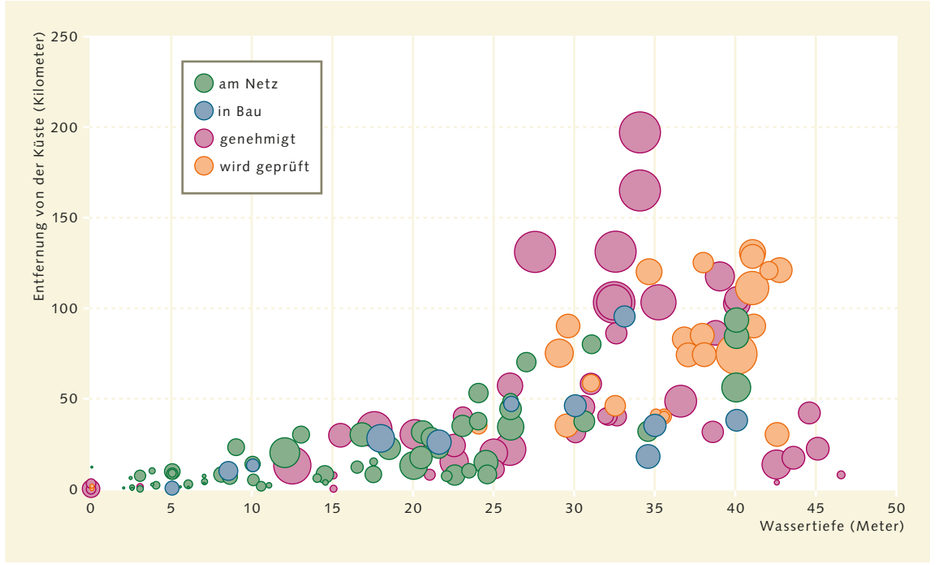
Hersteller von Windenergieanlagen fertigen die Rotorblätter inzwischen sogar direkt an der Küste in der Nähe großer Offshore-Windparks, um den teuren und aufwendigen Transport mit Speziallastwagen zu umgehen. Dadurch sind vor allem in Großbritannien neue Arbeitsplätze in strukturschwachen Küstengebieten entstanden. Wegen des höheren Aufwands beim Bau der Fundamente oder auch der kostspieligen Einsätze von Spezialschiffen ist die Errichtung von Offshore-Anlagen heute aber noch immer teurer als von Windenergieanlagen an Land. So liegen die Kosten für 1 Kilowattstunde Offshore-Strom, die sogenannten Stromgestehungskosten, heute je nach Standort zwischen 12,8 und 14,2 Cent. Bei Anlagen an Land liegen die Stromgestehungskosten hingegen zwischen 5,3 und 9,6 Cent.

Weltweit waren Ende 2015 Offshore-Windräder mit einer **Nennleistung** von gut 12 000 Megawatt in Betrieb, was in etwa der Leistung von 24 Atomreaktoren entspricht. Davon entfielen gut 5000 Megawatt allein auf die Küstenregionen von Großbritannien. In der Rangliste der

Stromgestehungskosten
Um festzustellen, welche Kosten eine bestimmte Technologie zur Erzeugung von Strom verursacht, werden in der Regel die Stromgestehungskosten berechnet. In die Stromgestehungskosten fließen alle Investitions- und Betriebskosten und die Kosten der Finanzierung der technischen Anlage ein. Diese werden durch die Stromerträge geteilt, die die Anlage im Laufe ihrer Lebenszeit erzielt. Entsprechend werden Stromgestehungskosten üblicherweise in Euro pro Megawattstunde oder Cent pro Kilowattstunde angegeben.



2.14 > Großbritannien ist beim Ausbau der Offshore-Windenergie führend. In Deutschland gingen im Jahr 2015 mehrere große Windparks ans Netz, wodurch das Land jetzt im weltweiten Vergleich vor Dänemark auf Platz 2 liegt.



2.15 > Weltweit wurden die meisten Offshore-Windparks bisher in einer Entfernung von bis zu 40 Kilometern vor der Küste und bei Wassertiefen von bis zu 20 Metern errichtet. Inzwischen ist die Offshore-Technik so ausgereift, dass Anlagen auch in deutlich größerer Entfernung geplant und gebaut werden. Im Extremfall liegen die Planungsgebiete 120 Kilometer von der Küste entfernt.

Nationen, die bereits Offshore-Windanlagen installiert haben, folgen Deutschland, Dänemark und China.

Wie auch bei der Förderung von Erdgas und Erdöl werden Offshore-Windräder heute nicht mehr unmittelbar an der Küste, sondern weiter auf See installiert. Wurde der erste Offshore-Windpark der Welt mit seinen elf Windrädern 1991 nur 2 Kilometer vor der dänischen Insel Lolland in 2 bis 4 Meter tiefem Wasser in Betrieb genommen, errichtet man heute Offshore-Windparks durchschnittlich in Wassertiefen von 27,1 Metern und einer Entfernung von durchschnittlich 43,3 Kilometern zur Küste. Vor allem in Deutschland und den Niederlanden achtet man auf einen großen Abstand, weil das Wattenmeer entlang der Küste ein wichtiges Rastgebiet für Zugvögel ist und in größerer Entfernung zum Land höhere Windgeschwindigkeiten herrschen. Deutsche Anlagen sind im Mittel 52,6 Kilometer vom Festland entfernt; in Großbritannien durchschnittlich 9,4 Kilometer. Der größte Windpark der Welt ist mit einer Fläche von 100 Quadratkilometern und 175 Windrädern der Windpark London Array in der äußeren Themsemündung an der Ostküste Englands.

Die Windenergie ist nicht die einzige erneuerbare Energieform, die man in Küstengewässern nutzen kann. Hinzu kommen:

- die Wellenenergie,
- die Gezeitenenergie,
- die Strömungsenergie,
- die durch Salzgehaltsunterschiede gewonnene Energie (Osmose-Kraftwerk),
- die aus Temperaturunterschieden in verschiedenen Meerestiefen gewonnene Energie.

Im Vergleich zur Windenergie spielen diese Energieformen bis heute aber eine eher untergeordnete Rolle. In den vergangenen Jahren wurden zwar Kraftwerke in Betrieb genommen, mit denen Wellenenergie geerntet wird. Wirtschaftlich sind diese Anlagen aber bisher nicht. In der Regel handelt es sich um Forschungs- und Entwicklungsvorhaben.

In den Kinderschuhen steckt auch die Technologie zur Erzeugung von Energie aus Salzgehaltsunterschieden. 2009 ging als weltweit erste Anlage ein kleines Kraftwerk in Norwegen in Betrieb, das seinen Strom ins öffentliche Netz einspeist. Vom Entwicklungsstand her gilt es aber als Prototyp. Im Prototypenstatus befindet sich auch die Technologie zur Gewinnung von Energie aus den Temperaturunterschieden in verschiedenen Meerestiefen. Im Jahr 2015 wurde eine Pilotanlage an der Küste von Hawaii mit einer Leistung von 105 Kilowatt in Betrieb genommen, die 120 Haushalte mit Strom versorgt.

Im Vergleich dazu ist die Gewinnung von Energie durch Gezeiten- und Strömungskraftwerke technisch ausgereift. Ein Beispiel ist das La-Rance-Gezeitenkraftwerk in der Nähe der französischen Stadt Saint-Malo, das schon seit 1966 in Betrieb ist. Insgesamt gibt es weltweit aber nur wenige größere Anlagen, weil der Bau sehr aufwendig ist. Denn um Gezeiten und Strömungen nutzen zu können, müssen Dämme und Sperrwerke mit großen Turbinen errichtet werden.

Wertvolle Mineralien

Eine weitere Ressource, die die Küsten liefern, sind die mineralischen Rohstoffe, zu denen vor allem Sand und Kies zählen. Sie werden für die Betonherstellung, als Füllsand auf Baustellen oder zum Aufspülen neuer Hafen- und Wirtschaftsflächen an der Küste genutzt. Bekannte Beispiele sind die Aufspülungen für die Erweiterung des Flughafens von Hongkong, für die Insellandschaften The Palm vor Dubai oder für die neuen Containerterminals in Rotterdam, dem größten europäischen Hafen. Sand und Kies werden entweder mithilfe von Saugbaggern vom Meeresboden entnommen oder an Land gewonnen – insbesondere durch den Abbau von Dünen. Wie viel genau, lässt sich nur schwer schätzen, weil die Daten nicht zentral erfasst werden, doch gilt der Sand- und Kiesabbau und der Export beider Ressourcen als lukratives Geschäft.

Der auf einer Insel gelegene Stadtstaat Singapur zum Beispiel verbraucht permanent große Mengen von Sand, um das Stadtgebiet durch Aufspülungen zu erweitern. Durch solche Maßnahmen hat sich die Fläche der ehemaligen britischen Kolonie seit den 1950er-Jahren bereits um gut 20 Prozent vergrößert. Singapur lässt den Sand zum Teil aus großer Entfernung per Schiff anliefern. Auch viele andere Länder importieren Sand. Besonders gefragt ist Sand aus Australien, weil Körner dort sehr hart, widerstandsfähig und eckig sind. Zum einen eignet sich dieser Sand gut für die Betonherstellung, weil die Körner beim Abbinden des Betons gut aneinanderhaften. Zum anderen wird der Sand gern in der Industrie als Strahlmittel verwendet, mit dem Werkstoffe geschliffen oder geglättet werden. Australien exportiert nach Angaben der Austra-

2.16 > Vor allem an der Westküste Afrikas wie hier in der Westsahara oder auch in Marokko wird Sand in Küstennähe im großen Stil abgebaut. Dieser wird weltweit exportiert und unter anderem als Bausand verwendet.

lischen Statistikbehörde (Australian Bureau of Statistics, ABS) monatlich Sand, Kies und Steine im Wert von 5,5 bis 8,5 Millionen Euro. Er wird sowohl an der Küste als auch im Binnenland abgebaut.

Natürlicher Goldwäschereffekt

Eine eher ungewöhnliche mineralische Ressource sind die Mineralseifen. Dabei handelt es sich um flache Lagerstätten von Metall- oder Phosphorverbindungen, die sich an den Küsten in der Nähe von Flussmündungen bilden. Sie entstehen durch eine Art natürlichen Goldwäschereffekt: Flüsse transportieren aus dem Hinterland leichte und schwere Partikel mit sich. Im Bereich der Flussmündung lagern sich diese im seichten Wasser vor der Küste ab. Ist die Meeresbrandung stark genug, werden die leichten Partikel weggetragen, während die schwereren tiefer im Boden versinken. So entstehen im Laufe von Jahrtausenden mehrere Meter dicke Pakete, die im Tagebau abgetragen werden können. Mineralseifen können Metalle wie Eisen, Gold, Platin, Zinn oder auch **Seltenerdmetalle** enthalten. Abgebaut werden heute meist nur die besonders wertvollen Mineralseifen, die Gold, Platin oder Diamanten enthalten. Letztere findet man an der Küste von Namibia. Hier befindet sich ein nur wenige Kilometer breiter Streifen, in dem das Meer mit bis zu 150 Meter Tiefe relativ flach ist. Seit man Ende der 1950er-Jahre feststellte, dass in diesem Bereich des Meeres große Mengen an Diamanten vorkommen, wird hier intensiv Offshore-Bergbau betrieben. Zunächst wurden die Sedimente nur von Tauchern mit großen Saugrohren abgeerntet. Aktuell wird der Abbau mit Spezialschiffen in einer Wassertiefe von 90 bis 150 Metern im industriellen Stil betrieben. Das Areal wurde in mehrere Konzessionsgebiete eingeteilt, in denen verschiedene Firmenkonsortien tätig sind. Heute werden etwa zwei Drittel aller namibischen Diamanten im Meer gewonnen.

Dass der Meeresboden vor Namibia überhaupt so reich an Diamanten ist, liegt am Oranje. Der Grenzfluss zwischen Namibia und Südafrika transportierte die Edelsteine aus ihrer Herkunftsregion, den südafrikanischen Vulkangebieten, bis ins Meer hinaus. Meeresströmungen verfrachteten das Sediment mit den Diamanten dann im Laufe der Zeit in Richtung Norden vor die namibische Küste, wo sie sich durch den Goldwäschereffekt im Boden konzentrierten.

Derzeit wird diskutiert, ob hier künftig auch Mineralseifen gewonnen werden sollen, die Phosphatverbindungen enthalten. Diese sollen als Dünger verkauft werden. Weil der Meeresspiegel seit der letzten Eiszeit um rund 130 Meter gestiegen ist, liegen diese Phosphatvorkommen heute tief unter der Wasserlinie.

Rohstoffe aus heißen Quellen

Zu den wertvollen Mineralien, die künftig aus dem Meer gewonnen werden sollen, gehören auch die Massivsulfide. Man findet sie an heißen Quellen am Meeresgrund, die an aktiven Vulkanen im Meer und an Plattengrenzen liegen, an denen sich zwei Kontinentalplatten voneinander entfernen.

Massivsulfide entstehen, wenn kaltes Meerwasser durch Spalten bis zu mehrere Kilometer tief in den Meeresboden eindringt. An Magmakammern in der Tiefe heizt sich das Wasser auf Temperaturen von mehr als 400 Grad Celsius auf und löst neben den Sulfiden, das sind Schwefelverbindungen, metallhaltige Mineralien aus dem Gestein. Durch die Erwärmung steigt das mineralisierte Wasser dann sehr schnell auf und schießt zurück ins Meer. Sobald es sich mit dem kalten Meerwasser vermischt, bilden die Mineralien einen Niederschlag, der sich an der Quelle in Form von massiven Erzvorkommen ablagert.

Für gewöhnlich liegen die vulkanisch aktiven Stellen mitten in den Ozeanen und weit weg vom Land. Eine Ausnahme ist die Bismarcksee vor Neuguinea. Hier befindet sich eine solche Plattengrenze in nur 30 Kilometer Entfernung von der Küste. Die leicht per Schiff erreichbaren Lagerstätten im sogenannten Solwara-1-Feld enthalten Kupfer, Zink, Blei, Gold und Silber sowie zahlreiche wichtige Spurenmetalle wie Indium, Germanium, Tellur oder Selen. Doch trotz der Küstennähe beträgt die Wassertiefe etwa 1600 Meter, weil der Meeresboden an dieser Stelle steil abfällt. Das kanadische Bergbauunternehmen Nautilus Minerals plant schon seit Längerem den Abbau der wertvollen Erzvorkommen und hat bereits schwere Unterwasserabbaugeräte bauen lassen. Zudem befindet sich ein Produktionsschiff im Rohbau. Bislang wurde der Beginn der Bergbauaktivitäten aber immer wieder verschoben,

The Palm – künstliche Inseln verändern eine ganze Küste

Ein ganz eigenes Beispiel für die Erschließung neuer Flächen entlang der Küsten ist das Bauprojekt The Palm Islands an der Küste vor Dubai in den Vereinigten Arabischen Emiraten. Dabei handelt es sich um Gruppen künstlich aufgespülter Inseln, die, aus großer Höhe betrachtet, jeweils die Form einer Palme mit Stamm und Palmwedeln haben. In der Regel werden an Küsten neue Flächen für die Erweiterung bestehender Häfen, für Industrieanlagen oder für neuen Wohnraum in Wassernähe gewonnen. Dubai geht aber deutlich über das Maß einer gewöhnlichen Erweiterung hinaus. Mit The Palm sollen komplett neue Inselwelten für ein besonders betuchtes Publikum geschaffen werden.

Eine Inselgruppe, The Palm Jumeirah, wurde bereits fertiggestellt und mit Hotels und Villen bebaut. Insgesamt haben die Inseln dort eine Fläche von 560 Hektar, was etwa 780 Fußballfeldern entspricht. Die Bebauung der nächsten Inselgruppe, The Palm Jebel Ali, wurde bislang nicht realisiert, weil das Bauunternehmen während der Wirtschaftskrise 2009 in finanzielle Schwierigkeiten geraten ist. Wann die Bebauung abgeschlossen sein wird, ist noch offen. Der für The Palm Jumeirah und The Palm Jebel Ali benötigte Sand wurde seit 2001 aus dem Persischen Golf mit sogenannten Hopperbaggern gewonnen. Dabei handelt es sich um Spezialschiffe, die Sand vom Grund eines Gewässers saugen und in großen Schiffsladeräumen, den Hoppertanks, lagern. Über Rohre lässt sich der Sand dann wieder außenbords pumpen. Auf diese Weise wurden die Inseln künstlich aufgespült.

2.17 > Luxus, auf Sand gebaut: The Palm Jumeirah vor Dubai.

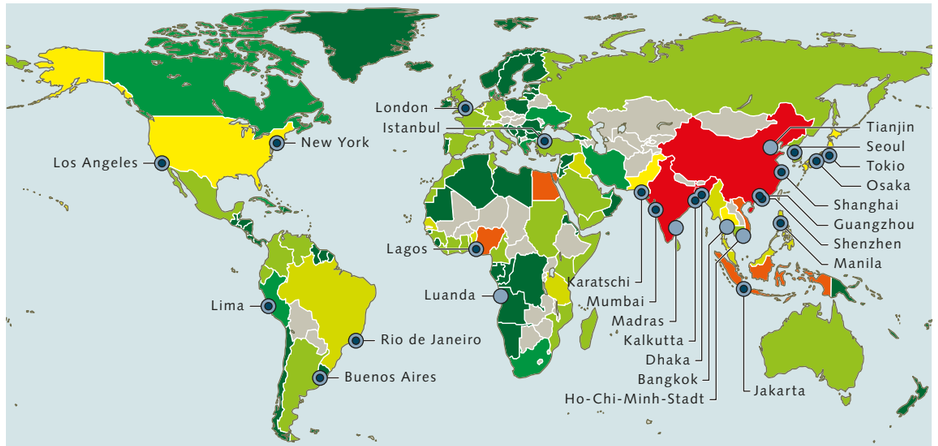
weil die Finanzierung des Projekts nicht ausreichend gesichert war oder keine Handelseinigkeit zwischen Nautilus Minerals und den Behörden von Papua-Neuguinea erzielt werden konnte. Wann der Abbau von Massivsulfiden beginnen wird, ist daher weiter offen.

Flächen für wachsende Küstenmetropolen

Auch die Bereitstellung von Flächen für bestimmte Nutzungen kann im weiteren Sinne als Ökosystemleistung der Küstengewässer verstanden werden. Dazu zählen militärisch genutzte Gebiete oder Flächen für Pipelines, für Wohnanlagen, Hafen- und Industrieanlagen, Hotels oder auch Windparks. Da die Bevölkerung in den Küstengebieten wächst, wird auch die Flächennutzung an den Küsten zunehmen, wie neue Hochrechnungen eines deutsch-englischen Forscherteams zeigen. Auf Grundlage von verschiedenen Szenarien zum globalen Bevölkerungswachstum haben die Wissenschaftler abgeschätzt, wie groß die Küstenbevölkerung in den Jahren 2030 beziehungsweise 2060 sein wird. Dabei wurde jener Küstenstreifen betrachtet, der maximal 10 Meter über dem Meeresspiegel liegt, die sogenannte Low Elevation Coastal Zone (LECZ, niedrig gelegene Küstenzone). Diese ist durch den Meeresspiegelanstieg besonders gefährdet und deshalb von großem Interesse. Im extremsten Szenario, das die Forscher zugrunde legen, wird die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2060 auf 11,3 Milliarden Menschen angewachsen sein. Demnach werden bis zu 12 Prozent der Weltbevölkerung in der LECZ leben: rund 1,4 Milliarden Menschen. Zum Vergleich: Im Jahr 2000 lebten dort etwa 625 Millionen Menschen. Die Megastädte in Küstennähe werden nach dieser Studie entsprechend wachsen.

Nach dieser Untersuchung wird die Bevölkerung am stärksten an den Küsten von Bangladesch, China, Indien, Indonesien und Nigeria zunehmen. Auch wird erwartet, dass sich zum Beispiel die angolanische Hauptstadt Luanda, die indische Stadt Madras und die chinesische Stadt Tianjin zu Megacitys mit weit mehr als 8 Millionen Einwohnern entwickeln werden.

Einen erhöhten Flächenverbrauch an den Küsten wird es nicht nur aufgrund des zukünftigen Bevölkerungswachstums geben. Neuer Flächenbedarf besteht



2.18 > Mit dem Wachstum der Weltbevölkerung werden niedrig liegende Küstengebiete vor allem in Afrika und Asien künftig immer dichter besiedelt.

schon heute für den wachsenden Überseehandel – insbesondere für den Ausbau von Containerhäfen wie beispielsweise in Rotterdam. Im Jahr 2008 begann man dort damit, ein Gebiet von rund 2000 Hektar aufzuspülen, auf dem sich heute das Containerterminal Maasvlakte 2 befindet. Es ist von einem 12 Kilometer langen Schutzdeich umgeben und reicht wie eine Nase in die Nordsee und damit ins tiefe Wasser hinaus. Anders als in vielen flacheren Bereichen des Hafens können dort auch die derzeit größten Containerschiffe mit einem Fassungsvermögen von 19 000 Containern und einem Tiefgang von bis zu 20 Metern anlegen.

Auch der massive Ausbau der Offshore-Windkraft in Großbritannien und Deutschland führt dazu, dass sich der Charakter der ursprünglichen Meeresflächen verändert. Normalerweise besteht der Meeresboden der Nordsee an den Baustellen aus sandigen Sedimenten. Feste Strukturen wie etwa Felsen gibt es kaum. Mit den Hunderten von Windrädern aber werden jetzt solche festen Strukturen, sogenannte Hartsubstrate, zunehmend geschaffen. Hier können sich vermehrt Arten ansiedeln, die festen Untergrund benötigen – beispielsweise Seeanemonen, verschiedene Schneckenarten oder Kalkröhrenwürmer. Wie sich die Artzusammensetzung in der Nordsee dadurch ändert, das ist aktueller Gegenstand der Forschung.

Da in den Windparkarealen aus Sicherheitsgründen der Schiffsverkehr und auch der Betrieb von Fischereifahrzeugen verboten sind, tragen diese Gebiete möglicherweise auch dazu bei, dass sich Lebensgemeinschaften am Meeresboden erholen, die durch jahrelange Fischerei beeinträchtigt worden sind.

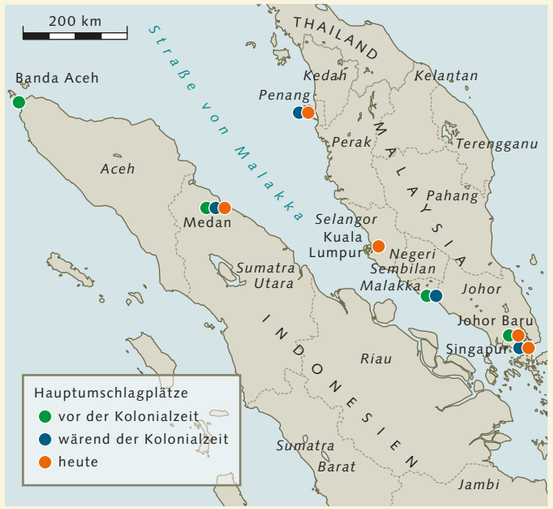
Die Highways des Welthandels

Eine bereitstellende Ökosystemleistung der Küstengewässer, die ganz selbstverständlich erscheint, sind die Transportwege, die sie bieten. An Land muss Infrastruktur in Form von Kanälen, Schienen oder Straßen erst für viel Geld errichtet werden. Die Küstengewässer hingegen stellen Wasserstraßen grundsätzlich fast völlig kostenlos bereit. Heutzutage werden etwa 90 Prozent aller Waren weltweit per Schiff transportiert. Nach aktuellen Angaben der Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung (United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD) sind das pro Jahr insgesamt

Die Straße von Malakka – eine historische Metropolregion des Seeverkehrs

Hafenstädte entlang der Küsten sind seit Jahrhunderten nicht nur Umschlagplätze für Waren, sondern auch Orte, an denen sich Menschen fremder Kulturen austauschen. Wie der Seetransport im Laufe der Geschichte die Entwicklung einer Küstenregion beeinflusst hat, lässt sich an der wechselhaften Geschichte der Straße von Malakka und des Stadtstaats Singapur veranschaulichen. Die Straße von Malakka ist die kürzeste Seeverbindung zwischen dem Fernen Osten und dem Indischen Ozean. Schon seit Jahrhunderten verkehren hier Schiffe, und früh entwickelten sich Handelsstationen, die zugleich Zentren von Bildung, Wissenschaft und Kunst waren. Hier trafen sich Menschen mit unterschiedlichen Religionen aus vielen Regionen der Erde – hinduistische Mönche, christliche Priester, muslimische Gelehrte. Es gab einen regen Austausch über Navigationstechniken und die Kunst des Schiffbaus.

Ein wichtiges Handels- und Wissenszentrum war vom 7. bis ins 13. Jahrhundert die buddhistische Seefahrer- und Handelsmacht Srivijaya, zu der Teile der Insel Sumatra und der Malaiischen Halbinsel sowie der westliche Teil der Insel Java gehörten. Srivijaya beherrschte zu dieser Zeit den Handelsverkehr durch die Straße von Malakka. In Kriegen zerfiel der Staat ab Ende des 13. Jahrhunderts. Im 15. Jahrhundert stieg zunächst Malakka, später zu Beginn des 16. Jahrhunderts Aceh im Norden Sumatras und Johor, das im heutigen Malaysia liegt, zu wichtigen Machtzentren auf. Während Aceh vor allem ein wichtiges muslimisches Handelszentrum war, gewann Johor an Bedeutung, weil im Hinterland Zinnminen lagen und wertvoller Pfeffer angebaut wurde. Die Hafenstadt Malakka wurde vor allem als Hauptumschlagplatz auf der Route zwischen Indien und China von muslimischen Händlern genutzt. 1511 wurde sie durch die Portugiesen erobert, nicht zuletzt, um die von Muslimen dominierte Seefahrt in der Region zu schwächen. Doch trotz der Eroberung blieben die muslimischen Händler in der Region einflussreich. Denn letztlich gaben sie dem weiter muslimisch dominierten Aceh Auftrieb. Die Hafenstadt Malakka hingegen entwickelte sich fortan vor allem für die europäischen Seefahrer zu einem wichtigen Zentrum. Durch Blockaden und Überfälle versuchten verschiedene europäische Nationen, Malakka unter ihren jeweiligen Herrschaftsbereich zu bringen. So blockierten die Niederländer 1640 zunächst den Hafen von Malakka, um die Stadt von den Warenströmen abzuschneiden und den Einfluss der Portugiesen zu schwächen. 1641 nahmen sie die Stadt schließlich ein und bauten von dort ihren Machtbereich aus. In den folgenden Jahren unterwarfen sie weitere Hafenstädte in der Region – unter anderem auch Aceh, womit der Einfluss der muslimischen Händler zeitweise geschwächt wurde.



2.19 > Im Laufe der Jahrhunderte gab es mehrere verschiedene Hauptumschlagplätze an der Straße von Malakka. Spielt die Stadt, der die Meerenge ihren Namen verdankt, heute kaum noch eine Rolle, war sie vor und während der Kolonialzeit ein bedeutendes Machtzentrum.

2.20 > Heute werden Güter aus Südostasien und China über den Sueskanal nach Europa geliefert. Mit dem verstärkten Abschmelzen der Eismassen in der Arktis könnte künftig während der Sommermonate die kürzere Route über die Nordostpassage interessant werden.

Zum neuen großen Konkurrenten wurden jetzt die britischen Händler. Sie etablierten sich 1786 in Penang an der Nordwestküste der Malaiischen Halbinsel und gründeten den Hafen George Town, der zu einem Hauptumschlagplatz der Britischen Ostindien-Kompanie ausgebaut wurde. Um Konflikte zu vermeiden, einigten sich beide Mächte 1824 darauf, die südostasiatische Region untereinander aufzuteilen. Die Niederlande traten alle Eigentumsrechte nördlich der Straße von Malakka an Großbritannien ab und erhielten dafür im Gegenzug unter anderem britische Gebiete südlich der Straße von Malakka.

Großbritannien entwickelte sich an der Straße von Malakka zur bestimmenden Macht. Seine wichtigsten Handelsstationen waren Malakka, Penang (George Town) und Singapur. Anders als Malakka war Singapur – am südlichen Zipfel der Straße von Malakka gelegen – Anfang des 19. Jahrhunderts noch eine wirtschaftlich eher unbedeutende Insel, die vorwiegend von malaiischen Fischerfamilien bewohnt wurde. Denn erst wenige Jahre vor dem Britisch-Niederländischen Vertrag von 1824 hatte die Britische Ostindien-Kompanie dort 1819 eine erste Niederlassung gegründet. Der massive Ausbau zu einem großen Handelshafen begann schließlich 1867, als Singapur zur britischen Kronkolonie erklärt wurde.

Heute ist Singapur der wichtigste Standort an der Straße von Malakka. Gemessen am Containerumschlag ist Singapur der zweitgrößte Hafen der Welt. Zudem hat Singapur seit den 1980er-Jahren stark in die Forschung investiert, um sich als moderner Hightech- und Wissenschaftsstandort zu etablieren. Gab es 1987 erst ein einziges Forschungsinstitut, so sind es heute mehr als 20. Mit dem Biopolis-Programm hat der Stadtstaat zwischen 2003 und 2006 gar einen ganzen Campus für biotechnologische Forschung aufgebaut.

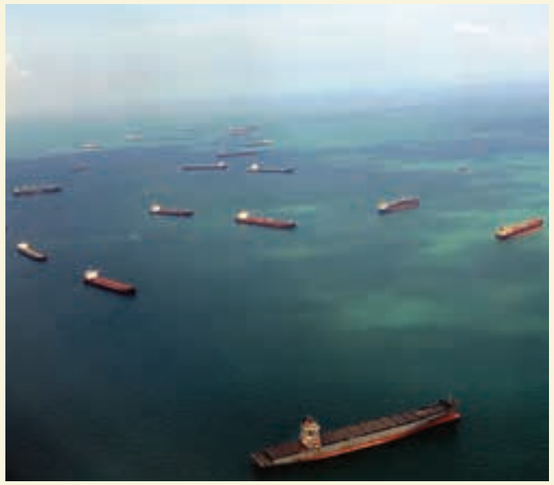
Weitere wichtige Gebiete an der Straße von Malakka sind heute der Ballungsraum Medan auf Sumatra und die Sonderwirtschaftszone im malaiischen Bundesstaat Penang am nördlichen Ende der Straße. Malakka selbst ist heute ein eher unbedeutender Hafen, nicht zuletzt weil die Küstengewässer für moderne Überseeschiffe zu flach sind.

Inzwischen zeichnet sich jedoch ab, dass sich die Situation des Seehandels in der Region künftig erneut ändern könnte. Denn mit dem Klimawandel und dem starken Abschmelzen des Meereises in der Arktis dürfte in den kommenden Jahrzehnten während der Sommermonate die Wasserstraße nördlich von Sibirien frei werden: die Nordostpassage. Für den Frachtverkehr zwischen Europa und Ostasien wäre diese Strecke kürzer und schneller als die Route über den Sueskanal und die Straße von Malakka.

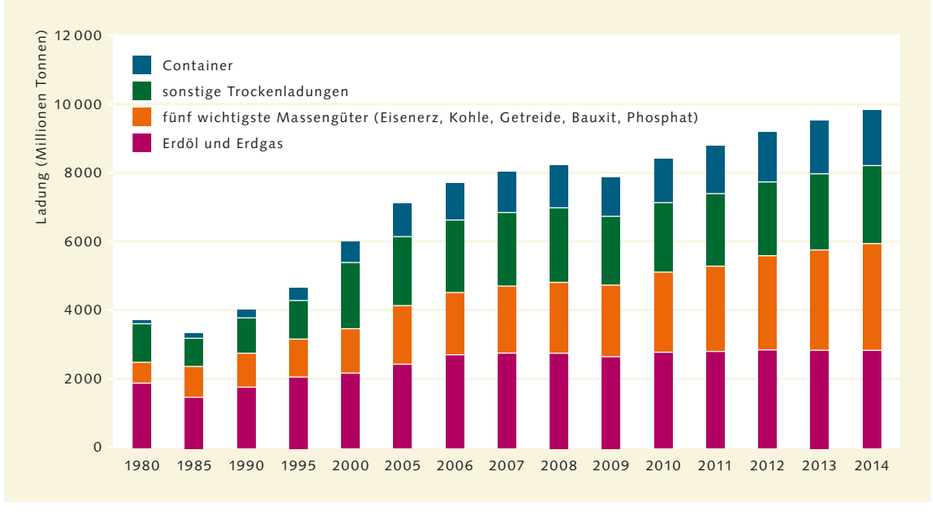
In China nehmen die Planungen für eine künftige Nordroute bereits Formen an. Die 250 000-Einwohner-Stadt Hunchun, die im Nordosten an der Grenze zu Russland und Nordkorea liegt, wird in China bereits als zukünftiger Hub gehandelt. Nach Vorstellung der Chinesen könnte die Stadt, die am Fluß Tumen liegt, so bedeutend wie Singapur werden und China von Nordosten her mit Waren versorgen. Im Juli 2016 schickte die große chinesische Reederei Cosco vom ostchinesischen Hafen Tianjin über die Nordroute fünf Handelsschiffe mit Komponenten für Windenergieanlagen nach Europa. August und Anfang September 2016 erreichten die Schiffe ihre Zielhäfen in Belgien, Deutschland und England. Noch dienen diese Fahrten dazu, die Machbarkeit einer regelmäßigen Schiffsverbindung weiter zu testen. Doch plant Cosco schon jetzt, künftig weit mehr Schiffe über den Norden zu schicken.

Ein Hinweis darauf, dass sich die Nordostpassage in naher Zukunft als Seeweg etablieren könnte, ist auch, dass sich ein großer chinesischer Rohstoffkonzern mit 12,5 Prozent an dem Bergbaukonzern Greenland Minerals and Energy im September 2016 beteiligt hat, der in Grönland unter anderem Seltenerdmetalle, Uran und Zink abbaut. Fachleute gehen davon aus, dass die Rohstoffe künftig verstärkt über die Nordostpassage nach China transportiert werden.

Welche Auswirkungen die Entwicklung dieser nördlichen Seeroute in den nächsten Jahrzehnten auf den Handel in Singapur haben wird, ist derzeit noch nicht abzusehen. In jedem Falle bemüht sich Singapur, sich mit Maßnahmen wie der Forschungsförderung breiter aufzustellen, um künftig vom Handel nicht zu stark abhängig zu sein.



2.21 > Starker Verkehr in der Straße von Malakka, der Hauptschlagader des weltumspannenden Seeverkehrs. Beinahe ein Viertel der internationalen Seehandelsströme wird durch diese ungefähr 800 Kilometer lange und an der schmalsten Stelle 50 Kilometer breite Meerenge abgewickelt.

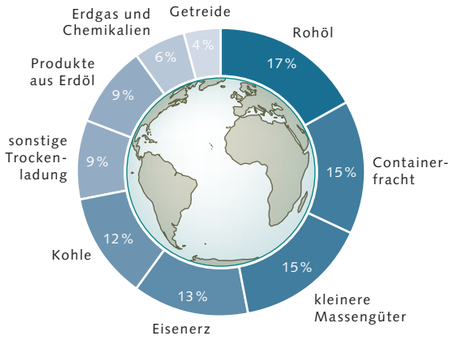


2.22 > Schiffe sind das wichtigste Transportmittel. Sie tragen jährlich knapp 10 Milliarden Tonnen Güter um die Welt.

knapp 10 Milliarden Tonnen an Gütern. Den größten Anteil haben Rohöl, Waren in Containern und sogenannte „Minor Bulk"-Ladungen (kleinere Massengüter) wie Stahl, Zement oder Zucker.

Am bedeutendsten sind heute die Schiffsverbindungen zwischen Südostasien und Europa sowie zwischen Südostasien und Amerika. Insbesondere die Containerfrachter verkehren heute nach einem regelmäßigen Fahrplan zwischen den Kontinenten. Die Schiffe legen ohne Fahrtunterbrechung zum Teil sehr lange Strecken zurück und löschen die Ladung meist in großen zentralen Häfen, den Hubs, von wo aus sie weiter verteilt werden. Ein Teil der Container wird über die Hinterlandanbindung per Lastwagen oder Eisenbahn ins Landesinnere transportiert. Ein anderer Teil der Container wird von kleineren Schiffen, sogenannten Feederschiffen, zu kleineren Häfen gebracht.

Von den Containerterminals im Hamburger Hafen werden etwa 40 Prozent der Container mit dem Lastwagen weiter befördert. 30 Prozent werden auf Feederschiffe umgeladen und 30 Prozent von Eisenbahnwaggons ins Binnenland transportiert. Bemerkenswert ist, dass auch der Transport ins Binnenland in vielen Fällen in der Hand der Terminalbetreiber an der Küste liegt, der Einfluss der



2.23 > Die wichtigsten Güter, die per Schiff transportiert werden, sind Rohöl, Waren in Containern und kleinere Massengüter wie Stahl, Zement oder Zucker.

Küstenstandorte also bis weit ins Hinterland reicht. Die Verbindung von der Hafenstadt Hamburg zum Beispiel reicht bis nach Ost- und Südosteuropa. So unterhält ein großer Hamburger Terminalbetreiber sogar eine Eisenbahngesellschaft, die die Container zu eigenen Terminals zum Beispiel in der Slowakei transportiert, um die Märkte dort und in benachbarten Ländern mit Waren zu versorgen.

KULTURELLE ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN – KÜSTEN SPENDEN ERHOLUNG UND STIFTEN IDENTITÄT

Der Wert der Schönheit der Küsten

Die Küsten der Welt spielen auch in ästhetischer und kultureller Hinsicht eine besondere Rolle. Zudem haben sie für viele Menschen auch einen religiösen und spirituellen Wert.

Die Bedeutung dieser Ökosystemleistung zeigt sich zum Beispiel in der Tradition der Bewohner der Inseln in der Torres Strait, der rund 185 Kilometer breiten und relativ flachen Meerenge zwischen Australien und der Insel Neuguinea. Hier liegen etwa 270 Inseln, die von ausgedehnten Korallenriffen umgeben sind, welche zum Teil im Rhythmus der Gezeiten trockenfallen. Das Land geht somit nicht abrupt, sondern über viele Quadratkilometer relativ sanft ins offene Meer über. In der Sprache der dort lebenden Ureinwohner gibt es deshalb keine unterschiedlichen Begriffe für „Land" und „Meer". Sie bezeichnen ihre Umwelt in englischer Übersetzung als „sea country", Meerland, oder auch „saltwater country", Salzwasserland. Inseln, Korallenriffe und offenes Meer bilden in ihrer traditionellen Vorstellung eine Art Kontinuum ohne scharfe Grenzen. Für sie ist der Lebensraum Küste in seiner Gesamtheit identitätsstiftend.

In den vergangenen Jahrhunderten ist das Meer darüber hinaus immer mehr zum Sehnsuchtsort der Menschen geworden und zum Ziel von Küstentouristen. Reiseveranstalter locken mit Bildern von Palmenstränden und blauem Wasser. Zwar gibt es keine vollständigen Daten über den Küstentourismus weltweit, doch ist dessen große ökonomische Bedeutung nach Ansicht des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) unbestritten. Demnach basiert der Küstentourismus auf einer einzigartigen Kombination von Faktoren, die sich durch das Aufeinandertreffen von Land und Meer ergeben. Dazu zählen die häufig herrschende intensive Sonnenstrahlung, das Wasser, das Erholung spendet und zahlreiche Möglichkeiten für sportliche Aktivitäten bietet, Panoramablicke oder auch eine große biologische Artenvielfalt an Vögeln, Fischen oder Korallen.

Nach Angaben der Weltorganisation für Tourismus (World Tourism Organization, UNWTO) ist die weltweite Wertschöpfung des Tourismus mit einem Anteil von 7 Prozent an den weltweiten Exporten von Gütern und

2.24 > Die von einem Korallenriff eingefasste Wyer Island liegt in der Meerenge zwischen Australien und der Insel Neuguinea, der Torres Strait. Dieses Meeresgebiet wird von den Ureinwohnern als „Salzwasserland" bezeichnet. Mit diesem Begriff ist sowohl die Landfläche der Inseln als auch das Meer mit seinen Korallenriffen gemeint.

2.25 > Der Ort Positano an der italienischen Amalfiküste steht beispielhaft für die Anziehungskraft, die Küsten auf den Menschen haben können. Sie sind ästhetische Gebiete, die kulturell und spirituell bereichern und Erholung bieten.

Internationale touristische Ankünfte					
Rang		**2014 (Millionen)**	**2015 (Millionen)**	**Änderung '14/'13 (Prozent)**	**Änderung '15/'14 (Prozent)**
1	Frankreich	83,7	84,5	0,1	0,9
2	Vereinigte Staaten von Amerika	75,0	77,5	7,2	3,3
3	Spanien	64,9	68,2	7,0	5,0
4	China	55,6	56,9	–0,1	2,3
5	Italien	48,6	50,7	1,8	4,4
6	Türkei	39,8	39,5	5,3	–0,8
7	Deutschland	33,0	35,0	4,6	6,0
8	Vereinigtes Königreich	32,6	34,4	5,0	5,6
9	Mexiko	29,3	32,1	21,5	9,4
10	Russland	29,8	31,3	5,3	5,0

2.26 > Wie wichtig die Küstenregionen für den Tourismus sind, zeigt die Liste der zehn beliebtesten Reiseländer. Darunter sind allein vier Nationen mit gut entwickelter Tourismusindustrie am Mittelmeer.

Dienstleistungen immens groß. Allein 2015 wurden mit ihm Einkünfte in Höhe von 1,26 Billionen US-Dollar erzielt. Zählte man 1950 nur 25 Millionen international reisende Touristen, so waren es 2015 weltweit knapp 1,2 Milliarden.

Gemessen an der Zahl einreisender Touristen, liegen in der Weltrangliste der beliebtesten Urlaubsländer jene Nationen vorn, die einen stark entwickelten Küstentourismus haben. So gehören zu den Top-Ten-Reisedestinationen allein vier Mittelmeeranrainer, angeführt von Frankreich mit 84,5 Millionen ausländischen Besuchern, wobei zu berücksichtigen ist, dass zu den französischen Urlaubsdestinationen auch Ziele im Binnenland wie Paris oder die Schlösser der Loire zählen. Die USA folgen auf Platz 2 mit 77,5 Millionen Besuchern. Spanien liegt auf Platz 3 mit 68,2 und China auf Platz 4 mit 56,9 Millionen Urlaubern aus dem Ausland. Betrachtet man allein die Auslandsreisen innerhalb von Europa, erreicht Spanien sogar Platz 1: So haben gut 20 Prozent aller Auslandsreisen, die Europäer innerhalb von Europa unternehmen, Spanien als Ziel.

Die starke Entwicklung des Küstentourismus hat aber auch ihre Schattenseiten. Vielerorts sind Naturgebiete durch den Bau von Hotelanlagen verloren gegangen, Küstengewässer durch Abwässer und Abfälle aus den touristischen Zentren verschmutzt oder Korallenriffe durch starke touristische Nutzung stark beeinträchtigt worden. Ursprüngliche und unberührte Küstenlandschaften sind immer seltener anzutreffen. Ein Umstand, den viele kritisieren. Schließlich ist die Einzigartigkeit, Schönheit und besondere Ästhetik der Küsten eine Ökosystemleistung für sich.

Noch viel mehr des Guten

In ihrer Gesamtheit bieten die Küstengebiete noch eine Vielzahl weiterer Ökosystemleistungen, wobei nicht immer scharf zwischen Küstengewässern und dem offenen Meer unterschieden werden kann. So nimmt das Meer große Mengen an Kohlendioxid auf, wirkt damit klimaregulierend und hat insgesamt eine große Bedeutung für das globale Klimasystem. Auch wenn nicht klar zu beziffern ist, welchen Anteil daran allein die Küstengewässer haben, zeigt sich, dass sie in besonderem Maße bedroht sind, da sie den negativen Einflüssen des Menschen weitaus stärker ausgesetzt sind als entfernter liegende Meeresregionen.

Küsten unter Druck

> Die größte Gefahr für die Küsten besteht heute in der Übernutzung durch den Menschen. Küstengebiete werden immer enger bebaut, Gewässer durch Schadstoffe oder übermäßige Nährstoffeinträge verschmutzt. Aufgrund von anhaltendem Bevölkerungswachstum und Migration wird der Druck auf die Küsten wohl auch in Zukunft nicht abnehmen.

Übernutzung schädigt Lebensräume

Die Attraktivität der Küsten liegt nicht zuletzt in der großen Zahl an Ökosystemleistungen begründet, die sie erbringen. Diese Zugkraft hat dazu geführt, dass viele Küstenregionen in den vergangenen Jahrzehnten immer stärker besiedelt und über ihre Belastungsgrenzen hinaus beansprucht wurden – sei es durch übermäßige Fischerei oder die Entsorgung von Abwässern. Durch eine nicht nachhaltige Nutzung schadet sich der Mensch letztlich aber selbst, da die Küsten bestimmte Ökosystemleistungen dann nicht mehr erbringen können.

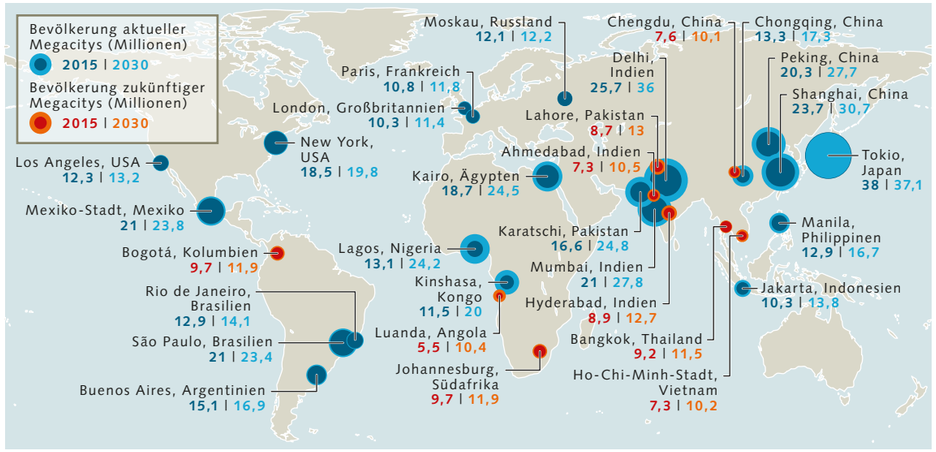
Ein Beispiel ist die Entwicklung des Massentourismus vielerorts. Küstenregionen wollen Urlauber mit attraktiven Landschaften und sauberem Wasser an ihre Strände locken, doch wird durch den Bau von Hotels das ursprüngliche Landschaftsbild gravierend zerstört. Immense Abwassermengen aus den Hotelanlagen verschmutzen die Gewässer. Die Übernutzung beeinträchtigt also den Erholungswert einer Landschaft und damit deren kulturelle Ökosystemleistung.

2.27 > Wie hier im mexikanischen Cancún haben viele Küstenregionen durch den Massentourismus ihre ursprüngliche Gestalt verloren. Eine solche Form der Übernutzung kann den Erholungswert dieser Gebiete einschränken.

Schwer fassbare Bedrohungen

Formen der Übernutzung zu identifizieren und zu messen ist nicht immer einfach. Mensch und Umwelt sind eng miteinander in sozioökologischen Systemen verwoben, und die Küstenregionen erstrecken sich über weite Bereiche zwischen Land und Meer und sind räumlich nur schwer fassbar. Auch kann es sein, dass Ursache und Wirkung zeitlich weit auseinanderliegen.

Ein Beispiel ist der industrielle Einsatz von polychlorierten Biphenylen (PCB), von Chlorverbindungen, die bis Ende des vergangenen Jahrhunderts in Transformatoren, in Hydraulikflüssigkeiten sowie als Weichmacher in Dichtungsmassen und Kunststoffen verwendet wurden. Aufgrund der vielfältigen Einsatzgebiete gelangten relevante Mengen in die Umwelt. Erst Anfang der 1970er-Jahre erkannte man, dass die Substanzen giftig sind und krebsauslösende Wirkung haben. Zudem stellte man fest, dass sie bei Meeressäugern wie etwa Seehunden zu krankhaften Veränderungen der Gebärmutter führen, was zur Folge hatte, dass die Zahl erfolgreicher Seehundgeburten in der Nord- und Ostsee insbesondere seit den 1970er-Jahren stark abnahm. Im Jahr 2001 schließlich wurde der Einsatz von PCB durch das sogenannte Stockholmer Übereinkommen, eine internationale Vereinbarung zum Schutz vor besonders gefährlichen Chemikalien, verboten. Zwischen der eigentlichen Ursache, dem Auftreten des Umweltproblems, dem Erkennen und dem konsequenten Verbot der Substanzen lagen also mehrere Jahrzehnte.



2.28 > Viele der künftigen Megacitys mit mehr als 10 Millionen Einwohnern liegen in Asien und Afrika.

Megacitys dehnen sich immer weiter aus

Besonders komplex und teils schwer erkennbar sind die Verflechtungen innerhalb sozioökologischer Systeme dort, wo viele Menschen leben beziehungsweise der Druck mannigfaltig ist. Das betrifft heute insbesondere die küstennahen Megacitys mit mehr als 10 Millionen Einwohnern. Solche Regionen sind durch eine hohe Bevölkerungs- und Bebauungsdichte charakterisiert. Viele Menschen müssen mit Frischwasser, Nahrungsmitteln und Strom versorgt werden, was hohe Anforderungen an Infrastruktur, Logistik und Abfallentsorgung stellt. Weil permanent Menschen aus armen, ländlichen Regionen im Binnenland in die Küstenmetropolen ziehen, um dort Arbeit oder eine Ausbildung zu finden, werden diese Gebiete auch in Zukunft weiter wachsen – vor allem in Afrika, Südamerika und Südostasien.

Eines der größten Probleme, das diese kontinuierliche Verstädterung mit sich gebracht hat, sind immer häufigere Überschwemmungen ganzer Stadtgebiete, die in Küstenstädten sowohl durch starke Regenfälle als auch durch Stürme mit hohen Wasserständen des Meeres ausgelöst werden können. Neben dem immensen wirtschaftlichen Schaden, den Überschwemmungen anrichten, stellen sie eine ganz konkrete Gefahr für Leib und Leben dar. Interessanterweise sind bislang weniger der globale Klimawandel und der Meeresspiegelanstieg dafür verantwortlich, sondern vielmehr städtebauliche Fehlplanungen. Folgende Ursachen konnten identifiziert werden:

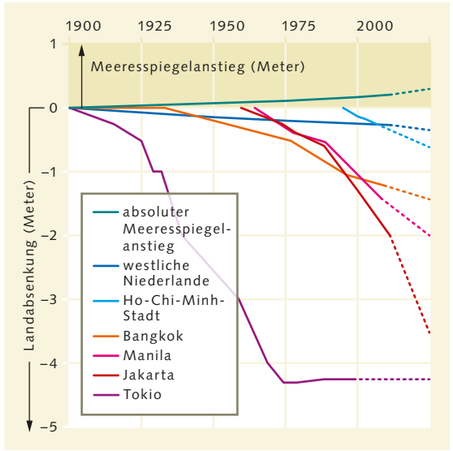
- Absinken aufgrund dichter Bebauung: Durch den Bau von Hochhäusern und anderen großen Gebäuden hat sich die Last auf den Boden deutlich erhöht. Das hohe Gewicht führt dazu, dass die eng bebauten Areale langsam absinken.
- Absinken aufgrund der Entnahme von Grundwasser: Weil Teiche, Seen und Flüsse an der Erdoberfläche in vielen Küstenmetropolen durch ungeklärte Abwässer und Unrat stark verschmutzt sind, können sie nicht für die Trinkwassergewinnung genutzt werden. Trinkwasser für viele Millionen Einwohner muss daher aus dem Grundwasser in der tiefer gelegenen Gesteinsschicht, dem Aquifer, gewonnen werden. Da das Grundwasser normalerweise wie ein natürliches Widerlager gegen die aufliegende Last der Gebäude wirkt, verstärkt sich das Absinken der dicht bebauten Gebiete, wenn es in großen Mengen abgepumpt wird. Auch Baumaßnahmen selbst führen zu einem Sinken des Grundwasserspiegels. So werden für große Gebäude tiefe Baugruben ausgehoben und eindringendes Wasser wird abgepumpt, was dazu führt, dass sich der Boden in den Baugruben setzt und der Porenraum, der vorher von Grundwasser gefüllt war, schrumpft. Die Landoberfläche senkt sich.

Aquifer

Als „Aquifer“ werden im Untergrund liegende Gesteinskörper mit Hohlräumen bezeichnet, in denen Grundwasser fließt. Der Begriff war zunächst im Englischen gebräuchlich, wird inzwischen aber auch in Deutschland regelmäßig verwendet. Er löst damit langsam den traditionellen Fachausdruck „Grundwasserleiter“ ab.

- Bebauung tief liegender Fluss- und Marschgebiete: Viele der aus ärmeren, ländlichen Regionen zugezogenen Menschen siedeln an der wachsenden Peripherie der Städte in sogenannten informellen Siedlungen. Diese liegen oftmals in tief liegenden Gebieten, die für eine Bebauung nicht geeignet sind. Häufig handelt es sich dabei um die Uferbereiche von Flüssen, aber auch um Marschen und Wiesen, die besonders durch Überflutungen gefährdet sind.
- Schlechte Kanalisierung: In vielen Städten wurden natürliche Wasserläufe oder Überschwemmungsgebiete wie etwa Flussauen bebaut. Dadurch sind vielerorts natürliche Abflüsse für Regenwasser verschwunden. Zudem wurden durch die Bebauung Flächen versiegelt, sodass Regenwasser kaum noch versickern kann, sondern schwallartig abfließt.
- Natürliches Absinken: In manchen Küstenregionen sinkt das Land auf natürliche Weise langsam ab. Das kann mehrere Ursachen haben. So kann die Landmasse in manchen Gebieten durch die Bewegung einer Kontinentalplatte allmählich absinken. In anderen Küstengebieten, insbesondere in Flussdeltas, sinkt der Boden, weil sich Sedimentschichten mit der Zeit verdichten und unter ihrem eigenen Gewicht absacken.

Neben dem generell deutlich erhöhten Risiko einer Überschwemmung resultieren aus dem Absinken des Landes aber auch ganz konkrete städtebauliche Probleme und Schäden. Dazu zählen Risse in Straßen und Gebäuden, gebrochene Gas- und Wasserleitungen und Leckagen in der Kanalisation.



2.30 > In Tokio konnte die Landabsenkung ab Mitte der 1970er-Jahre gestoppt werden, in anderen Städten nicht.

2.29 > Viele Metropolen der Welt sinken heute vor allem wegen der Entnahme von Grundwasser und der starken Bebauung. Dieses Absinken wird sich auch in Zukunft in vielen Städten fortsetzen.

Landabsenkung in sinkenden Städten

	Durchschnittliche kumulierte Absenkung von 1900 bis 2013 (Millimeter)	Durchschnittliche jährliche Absenkung (Millimeter)	Maximale jährliche Absenkung (Millimeter)	Geschätzte zusätzliche Absenkung bis 2025 (Millimeter)
Bangkok	1250	20–30	120	190
Ho-Chi-Minh-Stadt	300	bis zu 80	80	200
Jakarta	2000	75–100	179	1800
Manila	1500	bis zu 45	45	400
New Orleans	1130	6	26	> 200
Tokio	4250	ungefähr 0	239	0
westliche Niederlande	275	2–10	> 17	70

2.31 > Im November 2011 steht ein ganzes Gewerbegebiet in der Provinz Ayutthaya, nördlich der thailändischen Hauptstadt Bangkok, unter Wasser. Auch ein dort ansässiger japanischer Automobilhersteller ist von der Flutkatastrophe betroffen.

2.32 > Jakarta ist die derzeit am schnellsten versinkende Metropole weltweit. Da die Stadt in großem Stil Grundwasser für die Trinkwassergewinnung abpumpt, sackt das moderne Stadtzentrum stark ab.

Eine Metropole versinkt

Ein extremes Beispiel für eine absinkende Stadt ist Jakarta, die Hauptstadt Indonesiens, die derzeit am schnellsten versinkende Metropole weltweit. Sie ist insbesondere seit den 1980er-Jahren stark gewachsen, sowohl im Hinblick auf die Bevölkerung als auch auf den Bau von Straßen und Häusern – vor allem Hochhäusern. Im Jahr 2015 hatte Jakarta bereits gut 10 Millionen Einwohner. Für das Jahr 2030 sind 13,8 Millionen Einwohner prognostiziert.

Jakarta liegt in einer sehr flachen Region mit teils torfhaltigen Böden. Vor allem der dicht bebaute Nordteil mit seinen vielen Hochhäusern und dem Wirtschaftszentrum sinkt in dem weichen Untergrund ab – derzeit um bis zu 10 Zentimeter jährlich. Zu diesem Effekt trägt auch die Entnahme von Grundwasser für die Trinkwassergewinnung bei, und es wird befürchtet, dass sich das Absinken noch verstärkt. Wenn nicht gegengesteuert und die Entnahme reduziert wird, könnten Teile Jakartas bis zum Jahr 2025 um weitere 180 Zentimeter abgesunken sein.

Immer häufiger kommt es zu Überschwemmungen, die sowohl bei starken Regenfällen als auch bei hohen Wasserständen im Meer die Hauptstraßen und das Wirtschaftszentrum der Stadt gut einen halben Meter unter Wasser setzen. Natürliche Wassereinzugs- und Überschwemmungsgebiete sind in der Vergangenheit immer weiter überbaut worden, sodass Regenwasser kaum mehr versickern kann. Alarmierend ist, dass heute mehr und mehr Menschen von den Überschwemmungen betroffen sind. Die, die neu hinzuziehen, siedeln überwiegend in der Nähe des wirtschaftlich attraktiven Stadtnordens. Das erhöht ihre Chance, Arbeit zu finden, beziehungsweise reduziert die Fahrtzeit zu den Arbeitsstellen.

Auch die finanziellen Folgen einer Überschwemmung sind gravierend, wie zum Beispiel im Jahr 2007, als nach heftigen Regenfällen gut ein Drittel der Stadtfläche von Jakarta unter Wasser stand. Rund 300 000 Menschen verloren ihre Häuser. Die Schäden an Infrastruktur und Gebäuden beliefen sich auf umgerechnet etwa 860 Millionen US-Dollar.

Von den Überschwemmungen ist nicht allein das Stadtgebiet betroffen, sondern indirekt auch die Umgebung. So ist die Stadt Jakarta Teil eines urbanen Großraums, zu dem zusätzlich die angrenzenden Städte Bogor, Depok, Tangerang und Bekasi gehören. Dieses Gebiet ist eine der weltgrößten Agglomerationen, was auch in der heute gebräuchlichen Bezeichnung deutlich wird: „Jabodetabek“, ein Akronym. Jedes Jahr ziehen rund 250 000 Menschen in diesen Ballungsraum, sodass dort im Jahr 2020 rund 35 Millionen Menschen leben werden.

Überschwemmungen in Jakarta führen jedes Mal auch zu Verkehrszusammenbrüchen in den angrenzenden Gebieten. Und noch ein weiterer Umstand betrifft die ganze Region: Wenn in den überschwemmten Bereichen wegen des stehenden schmutzigen Wassers Krankheiten oder Epidemien ausbrechen, können sich diese in kurzer Zeit in ganz Jabodetabek ausbreiten.

Ein riesiger Vogel zum Schutz Jakartas

Um die Stadt Jakarta in Zukunft vor größeren Fluten zu bewahren, planen die indonesischen Behörden derzeit, Inseln aufzuspülen, die wie ein Schutzwall die etwa 35 Kilometer breite Bucht von Jakarta abriegeln und mit Wohn-, Büro- und Hotelkomplexen bebaut werden sollen. Allein die größte Insel ist 10 Kilometer lang und soll die Form eines Garudas bekommen, des Wappenvogels Indonesiens, der seine Schwingen weit ausbreitet. Doch regt sich in der Bevölkerung Widerstand. Abwässer könnten sich in der künstlichen Lagunenwelt sammeln, weil diese kaum mehr ins offene Meer abfließen können, Krankheiten könnten sich ausbreiten, so die Befürchtungen. Die Kleinfischer sind besorgt, dass sie ihre Lebensgrundlage verlieren, weil sie zukünftig viele Kilometer weiter hinausfahren müssen, um Fischgründe zu erreichen. Das wiederum sei nicht möglich, argumentieren die Fischer, da sie nur über einfache Boote verfügten, die häufig in einem schlechten Zustand und nicht für längere Ausfahrten geeignet seien.

2.33 > Zum Schutz vor Überschwemmungen soll vor Jakarta eine künstliche Inselwelt aufgespült werden. Die größte Insel soll 10 Kilometer lang sein und die Form des indonesischen Wappenvogels erhalten. Doch das Projekt ist umstritten. Es wird befürchtet, dass sich Abwässer in der künstlichen Lagune sammeln könnten und Fischer ihre Lebensgrundlage verlieren.

Erhebliches Konfliktpotential bergen auch Baumaßnahmen an Land, die im Zuge der Aufspülungen geplant sind. Denn auch am Ufer sollen neue Büro-, Geschäfts- und Wohnviertel entstehen. Inzwischen werden die Bewohner, die in diesem Gebiet bislang in einfachen Hütten und Häusern gelebt haben, umgesiedelt. Zwar erhalten sie in anderen Vierteln Jakartas günstigen Wohnraum in Hochhäusern, doch wie will man sie für den drohenden Kultur- und Identitätsverlust entschädigen? Wenn die Fischer ins Landesinnere umgesiedelt werden, in die Nähe von Industrieanlagen und Fabriken, können sie kaum noch ihrem angestammten Beruf nachgehen. Aus Fischern werden Fabrikarbeiter.

Doppelt bedroht – durch Regen und Sturmflut

Ein anderes Beispiel für eine sinkende, von Überschwemmungen geplagte Küstenmetropole ist die philippinische Hauptstadt Manila. Sie ist gleichermaßen durch starke Regenfälle und sturmbedingte hohe Wasserstände des Meeres bedroht. Zwischen 1900 und 2013 sind Teile Manilas um 1,5 Meter abgesunken. Bis zum Jahr 2025 rechnet man mit einem weiteren Absinken um etwa 40 Zentimeter. Das ist beängstigend, weil Manila in einem Gebiet liegt, das oft von Taifunen, großen Wirbelstürmen, heimgesucht wird. Sie bringen große Mengen an Regen mit sich und wühlen das Meer so stark auf, dass große Brandungswellen entstehen. Ein Wirbelsturm katastrophalen Ausmaßes war 2009 der Taifun Ketsana. Durch den Regen und die Sturmflut stand das Wasser in manchen Vierteln Manilas 2 Meter hoch.

Dass von Überschwemmungen zunehmend auch Küstenmetropolen betroffen sind, die nicht nennenswert absinken, zeigt das Beispiel Mumbai. Eine Überschwem-

mung von großem Ausmaß traf die indische Megacity am 26. Juli 2005. Innerhalb von 24 Stunden fielen beinahe 950 Millimeter Regen. Das entspricht in etwa der Gesamtmenge, die in Mumbai normalerweise während des ganzen Monats Juli fällt. Allein in der Stunde von 15.30 bis 16.30 Uhr waren es 190 Millimeter. Da zur selben Zeit die Flut im Meer einen relativ hohen Wasserstand erreichte, konnte das Regenwasser kaum abfließen und staute sich in den Zuflüssen und insbesondere im Fluss Mithi, der durch die Stadt fließt. Waren bei bisherigen Überschwemmungen meist nur die Siedlungen am Stadtrand betroffen, so traf es diesmal auch die Innenstadt. Innerhalb kürzester Zeit stieg das Wasser dort um mehr als 1 Meter an. Straßen, Läden, Bürogebäude wurden überschwemmt, und der Verkehr kam völlig zum Erliegen. Am Ende waren 22 Prozent der Fläche Mumbais überflutet. Die traurige Bilanz der Überschwemmung an diesem Tag: über 400 Tote und rund 100 000 stark beschädigte Wohn- und Geschäftsgebäude. 30 000 Kraftfahrzeuge waren schrottreif.

Die Analyse der Ereignisse machte deutlich, dass die Überschwemmung in Mumbai deswegen ein solches Ausmaß erreichen konnte, weil große Flächen der natürlichen Überschwemmungsflächen entlang der Flüsse nach und nach versiegelt worden waren, teils durch den Bau informeller Siedlungen, teils durch offizielle Projekte wie den Ausbau des Flughafens. Auch waren viele Wasserläufe mit Abfällen und Bauschutt verstopft, sodass der Abfluss des Regenwassers behindert wurde. Andernorts waren Regenwasserkanäle schlecht gewartet, die Ufer abgerutscht und Betonwände eingestürzt.

Hausgemachte Probleme auch in den USA

Im weltweiten Vergleich von Küstenmetropolen wird deutlich, dass heute vor allem Megacitys in Schwellenländern von Überschwemmungen betroffen sind. Experten führen das darauf zurück, dass bei der Planung von Bauten erforderliche Standards nicht immer berücksichtigt werden – insbesondere im Hinblick auf eine vorausschauende Bebauungsplanung, Katastrophenvorsorge und funktionierende Infrastruktur, zu der unter anderem Flutrinnen, eine funktionierende Kanalisation, Deiche und Schutzwände zählen. Andererseits haben durchaus auch Großstädte in den Industrienationen mit dem Absinken zu kämpfen. Das zeigt sich zum Beispiel im Großraum New Orleans, in dem etwa 1 Million Menschen leben. New Orleans liegt im US-Bundesstaat Louisiana direkt im Mississippidelta. Die Stadt ist zwischen 1900 und 2013 bereits um gut 1 Meter abgesunken und sackt jedes Jahr um weitere 6 bis 26 Millimeter ab.

Gründe dafür gibt es gleich mehrere. Wie in anderen betroffenen Küstenmetropolen auch trägt die Entnahme von Grundwasser zum Absinken bei. In welchem Maß, ist allerdings sehr schwer abzuschätzen, denn aufgrund der besonderen Bodenbeschaffenheit in New Orleans tritt noch ein weiteres Phänomen zutage. Sinkt nämlich das Grundwasser ab, gelangt Luftsauerstoff in tiefere Schichten, wodurch dort ansässige Bodenbakterien aktiv werden. Diese bauen das im Boden enthaltene organische Material ab. Da der Boden große Mengen an organischem Material enthält, das im Laufe der Jahrhunderte durch den Mississippi ins Delta getragen wurde, werden durch die Bakterien entsprechend große Mengen abgebaut. Dieser Verlust an organischer Substanz trägt erheblich zum Absinken bei.

Zusätzlich hat in der Region um New Orleans die Förderung von Erdöl und Erdgas und das damit einhergehende Leeren der Lagerstätten den Boden absacken lassen. Nicht zu unterschätzen ist auch der Verlust von Sediment, das früher durch den Mississippi ins Delta transportiert wurde. Weil der Mississippi durch zahlreiche Staustufen gebremst wird, trägt er heute deutlich weniger Sediment ins Meer. Die im Delta lagernden alten Sedimentpakete sind so schwer, dass das Delta auf natürliche Weise langsam absinkt. Wurde dieses Absinken früher durch frisches Sediment aus dem Mississippi ausgeglichen, so reicht die heute deutlich verringerte Sedimentfracht bei Weitem nicht mehr aus, dieses Absinken zu kompensieren.

Diese Probleme waren seit Jahrzehnten bekannt, ebenso wie die Tatsache, dass New Orleans schon bei mäßig starken Stürmen für Überschwemmungen anfällig ist. Zuletzt hatten Experten 2003 in einer Fachzeitschrift vor den Folgen schwerer Hurrikans gewarnt, die am Golf von Mexiko in den Sommermonaten häufig die Küste bedrohen. Die bestehenden Hochwasserschutzanlagen seien zu niedrig, andere schlecht konstruiert, gewartet oder gebaut, hieß es darin. Tatsächlich hatten die Behörden ein Hurrikan-Schutzsystem geplant, das allerdings aus Geldmangel nicht gebaut worden ist. Nach Ansicht von Experten hätte aber selbst dieses Schutzsystem versagt, weil es nach veralteten und zu niedrigen Bemessungskriterien errichtet worden wäre.

Damit war New Orleans relativ schlecht geschützt, als der besonders starke Hurrikan Katrina Ende August 2005 auf die Stadt traf. Er ließ das Wasser an der Küste um 7 Meter ansteigen. In der Folge brachen die Deiche an etwa 50 Stellen. Die Stadt, die in einer Senke liegt, lief voll. Erst danach hat man reagiert und den Bau eines modernen und leistungsfähigen Hochwasserschutzsystems beschlossen, das Hurricane and Storm Damage Risk Reduction System (HSDRRS, System zur Verringerung des Hurrikan- und Sturmschadenrisikos). Dieses wurde im Jahr 2011 fertiggestellt. Dazu gehören höhere und widerstandsfähigere Deiche und Hochwasserschutzwände sowie Sperren und Notfallpumpen an den Enden der Ablaufkanäle, die New Orleans entwässern. Mit diesen Maßnahmen konnte das Risiko großer Überschwemmungen deutlich reduziert werden.

Des Weiteren haben die US-Behörden 2012 einen Masterplan zum Schutz des Deltas verabschiedet, mit dem nicht nur die Stadt New Orleans, sondern die ganze Deltaregion künftig vor Hurrikans und insbesondere Überflutungen geschützt werden soll. Durch ein ganzes Bündel von Maßnahmen, etwa durch Baggerarbeiten oder das Umpumpen von Sediment, soll das Delta im Laufe der nächsten 50 Jahre wieder wachsen. Gut 700 Quadratkilometer Delta sollen so neu geschaffen werden. Hinzu sollen 500 Quadratkilometer an Salzwassermarschen kommen, die bei Stürmen und Hurrikans die Gewalt der Brandung dämpfen sollen.

Das Versinken stoppen

Dass sich das Absinken einer Stadt durch entsprechende Maßnahmen stoppen lässt, zeigen die Beispiele Tokio und Shanghai. Nachdem Teile der japanischen Stadt seit 1900 um rund 4 Meter abgesunken waren, entschied man bereits Ende der 1960er-Jahre, die Entnahme von Grundwasser stark einzuschränken. Daraufhin füllten sich die Grundwasser führenden Bodenschichten langsam wieder auf, sodass das Absinken bereits gegen Mitte der 1970er-Jahre gestoppt werden konnte.

Vor ähnlichen Problemen stand die chinesische Metropole Shanghai. Dort wurde nicht nur die Entnahme von Grundwasser stark reglementiert, sondern darüber hinaus eine Pumpentechnologie eingesetzt, mit der die Grundwasserspeicher schneller wieder mit Wasser aufgefüllt werden konnten.

2.34 > Hurrikan Katrina traf Ende August 2005 den Südosten der USA. Spuren der Verwüstung waren auch Monate danach noch zu sehen.

2.35 > In den vergangenen 40 Jahren hat sich das Perlflussdelta in China von einer landwirtschaftlichen zu einer hoch industriellen und bevölkerungsreichen Region entwickelt. Der linke Teil der Fotomontage ist eine Satellitenaufnahme aus dem Jahr 1979, der rechte stammt aus dem Jahr 2003. Rote Bereiche umfassen die Vegetation, graue die Bebauung. Blau erkennbar sind Wasserverläufe.

Der größte Ballungsraum der Erde

Die Bebauung und Besiedlung der Küstengebiete ist die wohl augenfälligste Veränderung dieser Lebensräume. In vielen Fällen wurden und werden durch Baumaßnahmen artenreiche Feuchtbiotope wie Wattflächen und Salzwiesen, Marschen und Torfböden entwässert und unwiederbringlich zerstört. Ein extremes Beispiel für diese Verstädterung in küstennahen Feuchtgebieten ist das Perlflussdelta in der Mitte der Küstenprovinz Guangdong im Süden Chinas. Hier liegt ein riesiger Ballungsraum, der aus elf Städten gebildet wird, zu denen auch Hongkong und Macau gehören. Die gesamte Region ist mit einer Fläche von knapp 40 000 Quadratkilometern fast so groß wie die Niederlande.

Die Region umfasst mehrere Sonderwirtschaftszonen und hat seit den 1970er-Jahren einen rasanten wirtschaftlichen Aufstieg erfahren. Damals noch durch kleinere Dörfer und ausgedehnte Feuchtgebiete geprägt, nahm der zunehmend urbane Raum im Delta im Jahr 2000 durch das Zusammenwachsen der Städte bereits 3500 Quadratkilometer ein, was in etwa der vierfachen Fläche Berlins entspricht. Heute beträgt die trockengelegte Fläche sogar circa 4500 Quadratkilometer, und die Bevölkerungsdichte ist enorm. So leben im Perflussdelta derzeit mehr als 60 Millionen Menschen – etwa 3,5-mal mehr als in den für europäische Verhältnisse dicht besiedelten Niederlanden. Damit hat es sich innerhalb weniger Jahrzehnte zum bevölkerungsreichsten Ballungsraum der Erde entwickelt. Experten gehen davon aus, dass das Wachstum in dieser Region weiter anhält und das Perlflussdelta bis 2030 Heimat von etwa 100 Millionen Menschen sein wird.

Mit der Trockenlegung und Bebauung der Feuchtgebiete ist auch der Lebensraum vieler Amphibien und Vögel verschwunden. Ferner hat die Verschmutzung der Gewässer dazu geführt, dass heute rund 90 Fischarten in dem Gebiet bedroht sind. Außerdem führen viele Flussarme in der Region vor allem während der trockenen Monate weniger Wasser, da für die Gewinnung von Trinkwasser und für die Stromerzeugung viele Staudämme und Kraftwerke errichtet wurden. Insgesamt gelangt so deutlich weniger Süßwasser ins Delta, und Meerwasser kann bei hohen Wasserständen wie etwa Springtiden oder Sturmfluten tiefer in das Delta eindringen. Pflanzen und

2.36 > Der Chinesische Stör *Acipenser sinensis* gilt als akut vom Aussterben bedroht.

Tiere, die nicht an Brackwasser beziehungsweise höhere Salzgehalte angepasst sind, ziehen sich aus den betroffenen Bereichen zurück. Der Lebensraum verändert sich massiv.

Der Bau von Dämmen hat auch dazu geführt, dass die Wanderrouten mancher Fischarten zwischen Meer und Laichgebieten flussaufwärts unterbrochen worden sind, und er hat – nach Meinung der Experten – maßgeblich zum Zusammenbruch der Bestände des bedrohten Chinesischen Störs *Acipenser sinensis* beigetragen.

Die Gewinnung von Sand und Steinen für Baumaßnahmen stellen einen weiteren extremen Eingriff in die Natur dar. Mit Baggern und Spezialschiffen wird das Baumaterial aus den Flussbetten geholt. Dadurch verändern sich die dortigen Strömungsverhältnisse, was wiederum zu Veränderungen in der Zusammensetzung der Arten führt. Auch verlieren viele Wasserorganismen durch die Baggerarbeiten ihre Brut- und Laichplätze.

Große Geschäfte, auf Sand gebaut

Sand und Mineralien werden nicht nur in China gewonnen, sondern in vielen Regionen der Erde. Nach Schätzungen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) werden jährlich weltweit zwischen 47 und 59 Milliarden Tonnen Mineralien abgebaut, wovon Sand, Kies und Schotter zwischen 68 und 85 Prozent ausmachen. Da die Zahlen nicht einheitlich erfasst werden, können die Mengen nur relativ grob geschätzt werden. Allein für die Zementindustrie werden zwischen 25 und 30 Milliarden Tonnen Sand benötigt. Dieser gigantische Bedarf geht aber vielerorts mit bedeutenden Eingriffen in die Landschaft einher. Daher wird der Abbau in vielen Regionen auch sehr kritisch gesehen. In Südafrika etwa wird Dünensand für die Bauindustrie gewonnen. Kritiker fürchten, dass die Küsten

Verbau einer Lebensader

Nicht nur im Perflussdelta werden durch Baumaßnahmen großflächig Flüsse und Feuchtgebiete zerstört. Bedroht ist auch der Mekong in Südostasien, ein bedeutendes Flusssystem und eine Lebensader für Millionen von Menschen. Der Mekong ist mit einer Länge von 4350 Kilometern einer der längsten Flüsse der Welt. Er durchfließt China, Myanmar, Laos, Thailand, Kambodscha und Vietnam und mündet in einem großen Delta ins Südchinesische Meer. Der Mekong ist enorm artenreich. Er ist Heimat von etwa 1500 verschiedenen Arten. Wie groß diese Zahl ist, zeigt der Vergleich mit dem Mississippi, in dem nur knapp 250 Arten vorkommen. Etwa 120 Arten im Mekong werden befischt. Da der Fluss auf seinem Weg aus dem tibetischen Hochland große Mengen an Mineral- und Nährstoffen mit sich trägt, ist er sehr produktiv und liefert Fisch in großen Mengen. Vor allem im tiefer gelegenen Mekongbecken in Laos, Thailand und Kambodscha und im Mekongdelta in Vietnam gibt es eine ausgeprägte Fischerei, die jährlich rund 2,6 Millionen Tonnen Fisch liefert. Ihr Marktwert wird auf 2 bis 3 Milliarden US-Dollar geschätzt.

Der Fisch ist aber nicht nur Handelsgut, sondern für die etwa 60 Millionen Menschen im Mekongbecken und -delta vor allem eine wichtige Eiweißquelle. Je nach Region trägt der Fisch zwischen 49 und 82 Prozent zur Versorgung der Bevölkerung mit tierischem Eiweiß bei. Durch mehrere Staudammprojekte aber ist der Fischreichtum des Mekongs bedroht. So bauen und planen Laos, Thailand, Kambodscha und Vietnam neue Staudämme für die Stromgewinnung. Besonders ehrgeizige Ziele hat sich Laos gesetzt, das in den kommenden Jahren mehrere Staudämme in Betrieb nehmen und sich als „Batterie Südostasiens“ etablieren will – als wichtiger Stromexporteur. Durch den Bau werden die Wanderwege vieler Fischarten zwischen dem Meer und den flussaufwärts gelegenen Laichgebieten unterbrochen – insbesondere auch von kommerziell wichtigen Arten. Insofern haben die Entscheidungen, die weit im Binnenland getroffen werden, Konsequenzen, die bis zu den Küstengebieten reichen.

Die Staudammprojekte sind gigantisch. Als Erstes soll in Laos im Jahr 2019 der Xayaburi-Staudamm in Betrieb gehen, ein Bauwerk von 50 Meter Höhe und 800 Meter Breite, das den Fluss zu einem etwa 50 Quadratkilometer großen See aufstauen wird – was in etwa der Fläche der italienischen Insel Ischia entspricht. Zwar ist vorgesehen, Fischtreppen in den Staudamm zu bauen, um den Fischen Wanderungen zu ermöglichen, Umweltschützer aber mahnen, dass nur wenige Fischarten diese künstlichen Steighilfen nutzen können. Insgesamt, so wird befürchtet, könnte der Fischreichtum des Mekongs erheblich abnehmen. Viele Menschen würden damit eine sehr lebenswichtige Einkommens- oder Eiweißquelle verlieren.

2.37 > Vor dem Verwaltungsgericht in Bangkok wird gegen den Bau des Xayaburi-Staudamms in Laos protestiert.

dadurch weniger gut geschützt sind, weil Dünen ein natürliches Bollwerk gegen die Meeresbrandung darstellen. In Indien protestieren Fischer gegen den Sandabbau an Stränden. Sie kritisieren, dass durch die aufgewirbelten Schwebstoffe Fische vertrieben werden. Für die Kleinfischer könnte das den Verlust ihrer Arbeit bedeuten.

Auch in Indonesien und Kambodscha hat die Entnahme großer Sandmengen – vor allem für den Export nach Singapur – zu starken Zerstörungen der Küste geführt, sodass die Regierung von Indonesien die Ausfuhr von Sand 2008 ganz verboten und die Regierung von Kambodscha 2009 den Export offiziell deutlich eingeschränkt hat. In Kambodscha geht der Sandabbau trotzdem im großen Stil weiter. Kambodschanische Naturschutzverbände weisen darauf hin, dass Sand zum Teil von mafiösen Gruppen gehandelt wird. Eine Kontrolle durch kambodschanische Behörden finde nicht statt, so die Kritik. Inwieweit die Regierung unter der Hand Lizenzen für diesen Abbau vergeben hat oder Korruption von Beamten im Spiel ist, bleibt offen. Der Sand wird unter anderem in einem Küstenschutzgebiet in der Region Koh Kong westlich der Hauptstadt Phnom Penh mit Saugbaggern abgebaut. Dadurch werden Mangroven und Seegraswiesen zerstört – wichtige Lebensräume für die Dugongs, eine Seekuhart.

Der südostasiatische Stadtstaat Singapur wiederum ist ein Extrembeispiel für Sandimport. Singapur ist eine Insel und benötigt permanent Sand für die Erweiterung des Stadtgebiets. Zwischen 1995 und 2014 wurden rund 500 Millionen Tonnen Sand importiert – zu einem großen Teil aus den Ländern Indonesien und Kambodscha. Seit den dort erlassenen Exportbeschränkungen sei Sand illegal nach Singapur eingeführt worden, sagen die kambodschanischen Naturschutzverbände.

Übernutzte Fischreviere

Besonders deutlich wird die Übernutzung der Küsten bei der Fischerei. Den Meeren wird nicht nur zu viel Fisch entnommen, sondern es werden auch Meereslebensräume zerstört wie beispielsweise Korallenriffe. Der Mensch entnimmt dem Meer mehr Fisch als nachwachsen kann, sodass die **Bestände** mit der Zeit abnehmen. Zwar lässt sich nicht exakt beziffern, wie stark Küstengebiete überfischt sind, da die Welternährungsorganisation (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) nicht im Detail zwischen Küstenfischerei und Fischerei auf hoher See unterscheidet. Doch da die Küstengewässer weltweit die produktivsten Meeresregionen sind, liefern sie zweifellos die größte Menge an Fisch und werden nach Einschätzung von Fischereiexperten auch am intensivsten befischt. Nach aktuellen Angaben der FAO sind weltweit gut 30 Prozent aller kommerziell genutzten Bestände überfischt. Angesichts der 38 Millionen Fischer weltweit ist dieser Umstand mehr als bedenklich, da viele ihre Arbeit oder Nahrungsquellen verlieren könnten. Insbesondere die Kleinfischerei, von der etwa 20 Millionen Fischer allein in Entwicklungsländern leben, wo sie einen wesentlichen Beitrag zur Ernährung und zum Lebensunterhalt der Küstenbevölkerung leistet, ist gefährdet. In den Tropen wird die Kleinfischerei vor allem in Korallenriffen betrieben. Man schätzt die Zahl der Korallenrifffischer auf etwa 6 Millionen, wovon allein auf Indonesien 1,7 Millionen, auf Indien rund 950 000 und auf die Philippinen rund 910 000 Fischer entfallen. Etwa die Hälfte der 6 Millionen Fischer taucht vor allem nach Seegurken. Diese wurstförmigen Stachelhäuter sind mit den Seesternen verwandt und werden insbesondere nach Hongkong exportiert, wo die getrockneten Tiere als Arznei geschätzt und gehandelt werden.

In vielen Gebieten wird die Korallenrifffischerei heute nicht nachhaltig betrieben. Zum einen werden die Bestände überfischt, zum anderen die Riffe auf verschiedene Art geschädigt. Das ist tragisch, weil die Menschen sich damit langfristig ihre Lebensgrundlage zerstören.

Geschätzte Zahl der Rifffischer in Korallenriffgebieten weltweit

Region	Zahl der Rifffischer (Millionen)	Anteil der Rifffischer an der ländlichen Küstenbevölkerung (Prozent)
Südostasien	3,35	5
Indischer Ozean	1,50	13
Ostpazifik/Atlantik	0,50	18
Westpazifik	0,45	68
Mittlerer Osten	0,34	24
Gesamt	6,14	

2.38 > Besonders viele Rifffischer gibt es in Südostasien, vor allem in Indonesien. Den größten Anteil an der ländlichen Küstenbevölkerung stellen sie hingegen auf den Inseln im Westpazifik, da es dort kaum alternative Arbeitsmöglichkeiten gibt.

Lebensraum Seegraswiese

Seegraswiesen sind charakteristische pflanzliche Lebensgemeinschaften auf Sandböden in küstennahen Gewässern und in Wattenmeeren. Seegrasgewächse wachsen länglich und krautartig und ähneln damit den Gräsern an Land, sind mit diesen aber nicht näher verwandt. Seegraswiesen sind bedeutende Lebensräume, weil in ihnen Jungfische Schutz vor Feinden und Nahrung finden. Verschiedene Fischarten legen ihre Eier direkt an Seegraspflanzen ab, weshalb Seegraswiesen auch als Kinderstube der Fische bezeichnet werden. Darüber hinaus sind Seegräser als Nahrung für Zugvögel von Bedeutung – beispielsweise für die Ringelgänse während ihres Herbstzuges durch das westeuropäische Wattenmeer.

Rifffischerei am Limit – der Spermonde-Archipel

Wie die Fischerei nach und nach zur Zerstörung küstennaher Ökosysteme beiträgt, lässt sich exemplarisch am Spermonde-Archipel zeigen, der unmittelbar vor der großen indonesischen Insel Sulawesi liegt. Er besteht aus etwa 70 Koralleninseln und war schon den europäischen Seefahrern während der Kolonialzeit als besonders artenreiches und produktives Meeresgebiet bekannt. Hier leben unter anderem Krebse, große Zackenbarsche, zahlreiche kleinere Rifffischarten, Tintenfische und viele Arten von Korallen. Chinesische Händler kauften in der Region bereits im 17. Jahrhundert Seegurken auf. Diese wurstförmigen Tiere sind mit den Seesternen verwandt. Bis heute sind sie in China und Hongkong als medizinisches Präparat gefragt.

Die Korallenriffe des Archipels schienen lange Zeit als unerschöpflich. Der Fischreichtum galt für die Bewohner als Geschenk Gottes, dessen Nachschub nie versiegen würde. Seit den 1960er-Jahren aber gelten einige Bestände hier als überfischt. Um die Ursachen zu erforschen, wurden mehrere wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, bei denen auch die Inselbewohner selbst interviewt wurden. Da die Inseln kaum fruchtbare Böden besitzen und Landwirtschaft somit nicht in größerem Stil möglich ist, zeigte sich, dass 80 Prozent der Haushalte ihr Auskommen direkt oder indirekt mit dem Fang von Fischen und anderen Meeresorganismen erzielen beziehungsweise erzielen müssen. In Abhängigkeit von der Nachfrage, der zur Verfügung stehenden Ausrüstung und der Ergiebigkeit der jeweiligen Bestände standen daher immer wieder verschiedene Meeresorganismen unter besonderem Druck. Lohnte sich der Fang der einen Art nicht mehr, etwa weil sie niemand kaufen wollte, oder die Bestände vor Ort schrumpften, so gingen die Fischer einfach dazu über, eine andere Art zu befischen.

Wurden in der Vergangenheit eher klassische Fischereiwerkzeuge wie Langleinen oder Reusen verwendet, so gingen die Fischer seit den 1980er-Jahren zusätzlich mit spezieller Ausrüstung auf Jagd – zum Beispiel mit Tauchgeräten nach den in China so beliebten Seegurken. Die Atemluft wird von einem Kompressor an Bord eines Bootes über lange Gummischläuche zu den Tauchern gepumpt. Dank der Versorgung mit Frischluft können die Taucher länger unter Wasser bleiben und weit mehr Exemplare als früher sammeln. Das führte beispielsweise dazu, dass Seegurken der Art *Holothuria nobilis* aus vielen Riffen im Archipel komplett verschwunden sind.

Einige Fischereimethoden, die heute eingesetzt werden, sind aber nicht nur nicht nachhaltig, sondern illegal. Bereits seit dem Zweiten Weltkrieg wird im Spermonde-Archipel Dynamitfischerei betrieben, um Speisefisch für den Verzehr vor Ort zu fangen. Durch die Explosionen verenden allerdings auch zahlreiche andere Tiere, die nicht gegessen werden. Man schätzt, dass je nach Insel 10 bis 40 Prozent des lokal konsumierten Speisefischs aus der Dynamitfischerei stammt. Seit den 1960er-Jahren wird zudem die Zyanidfischerei praktiziert. Bei dieser Methode wird giftiges Natriumcyanid ins Wasser gegeben, um die Fische zu betäuben. Sie können dann einfach eingesammelt und als Lebendfisch exportiert werden: kleinere für den Aquaristikmarkt und große für die Gastronomie. Für diese Lebendfische erhalten die Fischer viel mehr Geld als für Speisefische, die auf lokalen Märkten verkauft werden.

Zu den Fischen, die hier mit Zyanid gefangen werden, zählen die Zackenbarsche. Nach dem Fang werden sie mehrere Tage in Becken gehalten, damit sie das Gift vor dem Verkauf wieder ausscheiden. Dennoch sterben viele Tiere, bevor sie überhaupt in den Empfängerländern ankommen – sei es wegen der schlechten Transportbedingungen, sei es durch die Nachwirkungen des Giftes.

Ein Hauptproblem der Zyanidfischerei besteht auch darin, dass das im Wasser treibende Zyanid überdies viele andere Lebewesen vergiftet. Es tötet sowohl die winzigen Algen, die mit den Korallen in Symbiose leben, als auch viele Jungfische, die in den Riffen aufwachsen. Wann oder ob sich ein einmal vergiftetes Riff erholt, ist fraglich.

Um die Gründe für eine nicht nachhaltige Fischerei besser zu verstehen, muss man den Blick auch auf grundlegende Zusammenhänge im sozialen System richten. Soziologisch betrachtet gibt es im Spermonde-Archipel ein System aus Paten und Klienten (Fischer) – eine Art Zweiklassengesellschaft. Die Paten sind das Bindeglied zwischen den lokalen Klienten und den externen Händlern und Aufkäufern. Sie haben die nötigen Informationen über die Produkte, die auf den Märkten gerade nachgefragt sind. Zudem liefern die Paten die für die verschiedenen Fischereien benötigte Ausstattung und vergeben Kredite an Fischer und deren Familien. Sie verfügen über gute Kontakte zu zivilen und militärischen Stellen, die eigentlich den Schutz der Korallenriffe überwachen sollen, und wenden auch beträchtliche Schmiergeldzahlungen an, damit Aufsichtsbeamte illegale und von der zuständigen Behörde verbotene Fänge nicht sanktionieren.

Um die einmal aufgenommenen Kredite abzubezahlen, verkaufen die Fischer ihren Fang meist direkt an die Paten. Sie erhalten dafür einen Betrag, der zwar deutlich unter dem Verkaufspreis der Paten liegt, doch haben sie ein relativ sicheres Auskommen und ihre Familien können auf diese Weise auch in wirtschaftlich angespannten Perioden auf ein relativ stabiles soziales Sicherheitsnetz zurückgreifen.

So vorteilhaft das Paten-Klienten-System den Beteiligten erscheint, birgt es doch langfristige Gefahren für die Korallenökosysteme und damit für die einzige Einkommensquelle der wachsenden Bevölkerung. Da auf den Märkten die Fischereierzeugnisse aller diesem System angeschlossenen Fischer verkauft werden, gibt es immer genug Fisch, um den Bedarf zu decken. Verringern sich die Erträge in dem Fanggebiet eines Fischers, tritt dieser Verlust am Markt kaum zutage. Wenn einige Riffgebiete überfischt sind, kompensieren die Fänge in anderen Gebieten den Ausfall. Die Information über die Überfischung in dem betreffenden Gebiet erreicht daher selten die Paten. Ökologische Warnsignale werden so leicht übersehen, ein Bewusstsein über die Notwendigkeit einer nachhaltigen Fischerei kann sich daher erst gar nicht entwickeln. Sollten in Zukunft auch noch die Folgen der Klimaerwärmung hinzukommen, wird den Riffen noch weniger Zeit bleiben, sich von den lokalen Übernutzungen zu erholen.

2.39 > Der Spermonde-Archipel liegt inmitten des Inselstaats Indonesien, unmittelbar vor der Südwestspitze von Sulawesi. Der Archipel besteht aus etwa 70 Koralleninseln.

2.40 > Weil sie in Asien vielerorts als Delikatesse gilt und hochpreisig gehandelt wird, wurde die Seegurkenart *Holothuria scabra* im Spermonde-Archipel besonders stark befischt. Sie ist dort kaum noch zu finden.

2.41 > Bei der Zyanidfischerei wird Gift ins Wasser gegeben, das die Fische bewegungsunfähig macht. Einmal eingesammelt, kann der Fisch später lebend verkauft werden.

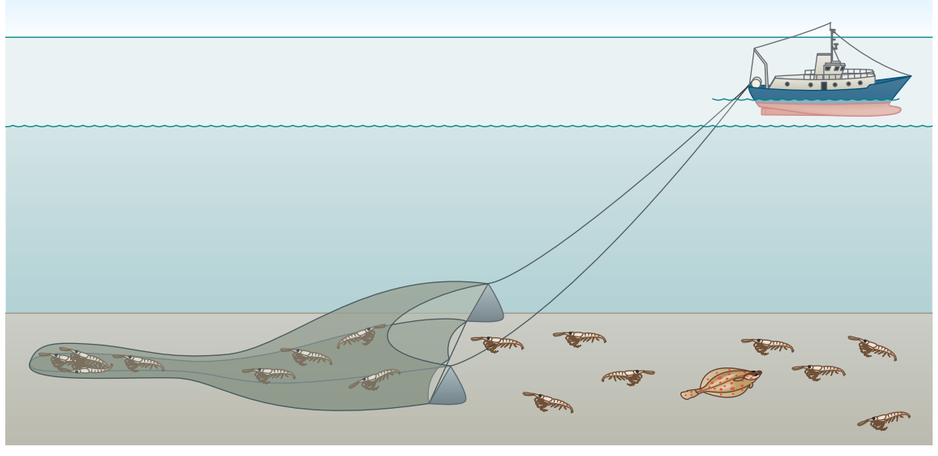
Stärkere Motoren, stärkere Zerstörung

Wie stark die intensive Fischerei küstennahe Meeresgebiete beeinflusst, lässt sich auch am Beispiel der belgischen, deutschen und niederländischen Nordseeküste verdeutlichen. Dort hat die Fischerei im Laufe des vergangenen Jahrhunderts die Lebensräume am Meeresboden sehr stark verändert. Plattfische wie die Kliesche, Scholle und Seezunge, die zur Tarnung flach vergraben im weichen Meeresboden liegen, werden hier mit beutelartigen Grundschleppnetzen, die an einem schweren Metallgestänge über den Meeresboden geschleift werden, gefangen. Diese mit zusätzlichen Ketten ausgestatteten sogenannten Baumkurren dringen während des Schleppens mehrere Zentimeter tief in den weichen Meeresboden ein und durchpflügen diesen gewissermaßen.

Im 19. und frühen 20. Jahrhundert wurde der Plattfischfang vielerorts noch mit kleinen Ruder- oder Segelbooten und entsprechend kleinen Baumkurren betrieben. Mit der Einführung größerer motorbetriebener Kutter kamen in der Nordsee aber immer mächtigere Baumkurren zum Einsatz. Wegen ihres hohen Gewichts und der Ketten durchpflügen sie den Meeresboden und zerquetschen viele zumeist größere Bodenlebewesen. Untersuchungen in Belgien, Deutschland und den Niederlanden zeigen, dass aus diesem Grund seit Mitte des letzten Jahrhunderts die Zahl großer, langlebiger oder empfindlicher Bodenlebewesen deutlich abgenommen hat. Zu letzteren zählen beispielsweise winzig kleine Moostierchen. Diese Organismen leben in filigranen Kolonien am Meeresboden, deren Gestalt zum Teil der von Korallen ähnelt.

Beeinträchtigt werden auch die Bestände der Islandmuschel. Diese Muschelart lebt nur wenige Zentimeter tief im Meeresboden vergraben, sodass ihre Schalen leicht durch die Baumkurren zertrümmert werden. Normalerweise werden Islandmuscheln mehr als 10 Zentimeter groß und bis zu 120 Jahre alt. Wegen der starken Baumkurrenfischerei aber wurden sie in den küstennahen Gebieten der Nordsee dezimiert, da die Bestände angesichts mehrerer Fänge mit Baumkurren pro Jahr und Gebiet kaum eine Chance haben, sich wieder zu regenerieren.

2.42 > Die englische Hafenstadt North Shields im Jahr 1904. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde der Fischfang in der Nordsee meist noch mit Segelbooten betrieben.



2.43 > Baumkurren sind Grundschleppnetze, die an einem schweren Metallgestänge über den Meeresboden geschleift werden. Viele auf und im Boden lebende Tiere werden dadurch getötet.

Heute werden die stark befischten Gebiete von schnell nachwachsenden Borstenwürmern und kleinen Muscheln dominiert wie der nur 1 bis 2 Zentimeter großen Tellmuschel. Zudem hat die Zahl von Seesternen und Einsiedlerkrebsen zugenommen. Beide ernähren sich auch von den Resten der von den Baumkurren getöteten Organismen. Da Einsiedlerkrebse in dickwandigen Schneckenhäusern leben, sind sie vor den Baumkurren geschützt. Die Seesterne überleben, weil sie relativ robust sind. Werden ihnen durch die Baumkurren Arme abgetrennt, können sie neue bilden und überleben.

Das Ende eines Muschelparadieses

Wie die Fischerei einen geradezu paradiesischen Lebensraum zerstören kann, konnten Meeresbiologen anhand einzigartiger historischer Datensätze für die Doggerbank dokumentieren, ein vergleichsweise flaches Gebiet in der Nordsee. Die Doggerbank wird erst seit Mitte des vorigen Jahrhunderts durch die Fischerei genutzt, vor allen Dingen zum Fang von Sandaalen, die zu Fischmehl verarbeitet werden. Dank einer ausführlichen Studie britischer Forscher aus den 1920er-Jahren ist der damalige unberührte Zustand dieser Region bekannt. Damals fanden die Forscher am Meeresboden der Doggerbank ausgedehnte Muschelbänke vor, in denen eine Vielzahl von großen Muschelarten lebte: die dickschalige Gedrungene Trogmuschel oder die bis zu 6 Zentimeter lange Bunte Trogmuschel. Auch die Glänzende Mondschnecke, die sich als Räuber von den beiden Muschelarten ernährt, kam häufig vor. Auf den Muschelbänken siedelten in großer Zahl Moostierchen und bunt schimmernde Seeanemonen. Hinzu kamen verschiedene Krebs- und Fischarten, die in diesem Lebensraum auf Jagd gingen. Durch die intensive Sandaalfischerei sind die Muschelbänke verschwunden, stattdessen herrschen monotone sandige Gebiete vor. Vergleichende Untersuchungen aus den vergangenen Jahren zeigen, dass beide Trogmuschelarten heute höchstens noch als Jungtiere vorkommen. Diese entwickeln sich aus Larven, die mit der Strömung aus anderen Gebieten der Nordsee zur Doggerbank getragen werden. Ausgewachsene Individuen findet man so gut wie gar nicht mehr. Stattdessen werden die Lebensgemeinschaften heute von kleinen unempfindlichen Arten dominiert, kleinen Flohkrebsen, der kleinen Tellmuschel oder von Schlangensternen, einer besonderen Form von Seesternen mit langen dünnen Armen.

Funktionseinheit Lebensgemeinschaft

Inwieweit solche Veränderungen als intolerabel oder als vertretbar zu betrachten sind, ist eine Frage der Perspektive. Einerseits kann man den Verlust ursprünglicher Lebensgemeinschaften durchaus bedauern. Andererseits,

sagen Ökologen, sei es in erster Linie wichtig, dass ein Lebensraum in seiner Gesamtheit weiter funktioniert. Experten sprechen in diesem Zusammenhang von Biodiversity and Ecosystem Functioning (BEF) – dem Funktionieren eines Lebensraums samt seinem sich möglicherweise verändernden Arteninventar. Ein Beispiel für eine solche Funktion ist die Reinigungsleistung, die Muscheln erbringen, indem sie das Meerwasser einsaugen und filtern. Diese Reinigungsleistung können sowohl kleine als auch große Muscheln erbringen. Für die Doggerbank bedeutet das, dass heute viele kleine Tellmuscheln die Reinigungsleistung der deutlich größeren Trogmuscheln von damals übernehmen. Die Funktion „Reinigung" bleibt erhalten, obwohl sich der Lebensraum stark verändert hat.

Wie die aktuellen Untersuchungen auf der Doggerbank zeigen, werden die Lebensgemeinschaften dort inzwischen aber nicht mehr nur durch die Fischerei, sondern auch durch den Klimawandel verändert. Arten aus südlichen Breiten wandern langsam in kühlere nördliche Meeresgebiete wie die Nordsee ein. Inwieweit so eine Einwanderung das BEF des Gebiets beeinflusst, bleibt abzuwarten.

Nährstoffe bringen das Ökosystem aus dem Gleichgewicht

Lebensräume verlieren ihre Funktion, wenn durch Veränderungen Belastungsgrenzen überschritten werden. Eine starke Belastung stellt heute in vielen Gebieten die Eutrophierung dar – die Überdüngung der Gewässer mit Nährstoffen. Diese stammen aus Abwässern, die mit Fäkalien belastetet sind, oder gelangen in Form von Pflanzendüngern von Feldern über die Flüsse ins Meer. Da sich beim Überangebot an Nährstoffen Algen stark entwickeln, kommt es zu Algenblüten. Je mehr Algen vorhanden sind, desto mehr sterben später ab und desto intensiver ist der Abbau durch Mikroorganismen, die Sauerstoff zehren, mithin der Sauerstoffverbrauch. Dadurch können in den Küstengewässern sauerstoffarme oder gar -freie Zonen entstehen, in denen Fische, Krebse oder Muscheln nicht mehr leben können.

Solche Zonen treten seit einigen Jahrzehnten an vielen Stellen weltweit auf – an der Westküste Indiens, in der Chesapeake Bay an der Ostküste der USA oder im Golf von Bohai an der Ostküste Chinas. Oftmals bilden sich die sauerstofffreien Zonen in größerer Wassertiefe, weil dort Wind und Wellen das Wasser nicht durchmischen und mit Sauerstoff aus der Atmosphäre anreichern können. An der deutschen Ostseeküste findet man diese Zonen seit einigen Jahren im Sommer aber auch in nur wenigen Meter Wassertiefe in Küstennähe. Woran das liegt, ist noch nicht geklärt. Die Sauerstoffarmut in den flachen Küstenbereichen aber ist besonders problematisch, weil auch Lebewesen im Meeresboden absterben, die durch ihre Aktivität normalerweise zum Abbau von Nährstoffen im Meer beitragen und damit der Eutrophierung entgegenwirken. Dazu gehören Muscheln und Würmer, die im Boden vergraben in Gängen leben und frisches Wasser einstrudeln. Durch die vielen Gänge vergrößert sich die Fläche, an der Mikroorganismen im Boden die Stickstoffverbindungen abbauen. Sterben die Würmer und Muscheln nun aber ab, versagt auch diese Filterfunktion. Dadurch ergibt sich für die sauerstoffarmen Gebiete an der Küste eine negative Rückkopplung: Die Sauerstoffarmut führt zum Absterben der Bodenorganismen, wodurch die Reinigungsleistung des Bodens beeinträchtigt wird und sich die Wasserqualität weiter verschlechtert.

2.44 > Muschelgrab in der finnischen Ostsee: Nachdem der Sauerstoffgehalt des Wassers unter einen kritischen Wert gesunken war, haben sich Sandklaffmuscheln aus dem Boden gegraben, um an frisches Wasser zu gelangen. Wegen der niedrigen Sauerstoffwerte aber sind die Tiere trotzdem verendet.

Nährstofffrachten aus der Aquakultur

Während es in den meisten Ländern vor allem Nährstoffe aus der Landwirtschaft sind, die in die Küstengewässer gelangen, trägt in vielen Regionen zusätzlich eine intensive Aquakultur zur Überdüngung bei. Dies ist vor allem in den Küstengebieten Chinas der Fall, wo sich eine Aquakulturanlage an die andere reiht – beispielsweise auf der Insel Hainan, einer Sonderwirtschaftszone, die im tropischen Süden Chinas liegt und das Ziel vieler inländischer Touristen ist.

Hainan ist mit einer Fläche von rund 34 000 Quadratkilometern größer als Sizilien und die größte Insel der Volksrepublik. Natürlicherweise befindet sich an der Küste ein breiter Mangrovengürtel, an den sich zum Meer hin flache sandige Bereiche mit Seegraswiesen anschließen. Davor liegen ausgedehnte Korallenriffe. Diese natürliche Zonierung von Mangroven, Seegras und Korallen wurde in den vergangenen Jahren durch den Ausbau der Aquakultur teils massiv verändert. Dadurch, dass die Mangroven gerodet wurden, ging nicht nur ein ganzer artenreicher Lebensraum verloren, auch die Nährstoffe aus den Aquakulturanlagen, vor allem Kot und Futterreste, können jetzt direkt ins Meer fließen. Wo normalerweise Mangroven sehr viele Nährstoffe über ihre Wurzeln aufnehmen, strömt die Nährstofffracht jetzt unmittelbar in die Areale der Seegraswiesen.

Bekannt ist, dass sich bei starker Nährstoffzufuhr kleine Algen vermehren, die das Seegras überwuchern und absterben lassen. Zudem führt der durch Eutrophierung verursachte Sauerstoffmangel dazu, dass nicht nur in der Wassersäule, sondern auch im Meeresboden der Sauerstoffgehalt sinkt. Unter diesen Bedingungen bilden sich dann im Sediment giftige Schwefelverbindungen, die das Seegras zugrunde gehen lassen können. Welches Ausmaß das Sterben der Seegraswiesen im Raum Hainan bereits erreicht hat oder künftig erreichen könnte, wird aktuell untersucht.

Eine offene Frage ist auch, wie viel von der Nährstofffracht die Seegraswiesen überhaupt aufnehmen können. Denn diese Aufnahmekapazität ist für die Korallenriffe überlebenswichtig, weil die Seegraswiesen wie ein Puffer zwischen ihnen und dem Land wirken. Korallen könnten durch ein Zuviel an Nährstoffen und vor allem durch ein daraus resultierendes Übermaß an Algenwachstum geschädigt werden und absterben. Da die Korallenriffe von Hainan, ähnlich wie im Spermonde-Archipel, ohnehin von Überfischung, Zynanid- und Dynamitfischerei betroffen sind, sind sie dadurch zusätzlich gefährdet.

Küstengewässer als Klärbecken

Die Küstengewässer werden nicht nur durch ein Zuviel an Nährstoffen belastet, sondern auch durch ungeklärte Abwässer und Schadstoffe aus der Industrie. Während die Klärtechnik in den Industrieländern heute meist hoch entwickelt ist und einen großen Teil der Verschmutzungen aus dem Abwasser entfernt, ehe es in die Flüsse oder ins Meer gelangt, gibt es in den Entwicklungsländern viele Regionen, in denen die Abwasserreinigung unzureichend ist.

So werden in Afrika nach Angaben der Weltbank nur etwa 10 Prozent der Abwässer in Klärwerken aufbereitet. Für die ghanaische Hauptstadt Accra zeigen Studien, dass durch ungeklärte Abwässer vor allem Flüsse und Gewässer, aus denen die Bevölkerung ihr Trinkwasser bezieht,

mit Bakterien und Viren belastet sind. Häufige Durchfallerkrankungen sind die Folge. Etwa ein Viertel aller Sterbefälle von Kindern unter fünf Jahren im Großraum Accra wird darauf zurückgeführt. Zudem gibt es immer wieder Fälle von Cholera.

Zur Bedrohung durch Krankheitserreger kommt in vielen Regionen eine Belastung durch Schadstoffe hinzu, die über die Flüsse oder über Abwasserleitungen direkt ins Meer gelangen. Dazu zählen Schwermetalle, beispielsweise aus Minen oder aus der Metallproduktion, und zahlreiche Verbindungen aus der chemischen Industrie. Mehrere Umweltkatastrophen haben deutlich gemacht, wie gefährlich diese Substanzen sein können. Das zeigt das Beispiel von Minamata, einer Hafenstadt im Westen Japans. In den 1950er-Jahren wurden quecksilberhaltige Abwässer aus einer Fabrik vor Ort ins Meer geleitet. Zunächst nahmen Algen das Gift auf. Die Algen wiederum wurden von Fischen gefressen, die bei den einheimischen Menschen als Speisefische besonders geschätzt waren. Die Quecksilberkonzentration in den Fischen war so hoch, dass mehr als 10 000 Menschen eine Quecksilbervergiftung erlitten. Tausende Menschen starben daran. Diese Art der Quecksilbervergiftung wird heute als Minamata-Krankheit bezeichnet.

Weit mehr als ein Dreckiges Dutzend

Nach Angaben der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) werden weltweit etwa 100 000 unterschiedliche chemische Substanzen produziert, allein in Europa circa 10 000 in einer Größenordnung von jeweils mehr als 10 Tonnen pro Jahr. Schätzungsweise bis zu 3 Prozent der weltweiten Produktion sind problematisch. Zu diesen umweltrelevanten Schadstoffen zählen beispielsweise Verbindungen mit Blei, Quecksilber und anderen Schwermetallen, die im Bergbau, in industriellen Herstellungsprozessen oder bei der Verbrennung von Heizöl anfallen.

Besonders kritisch sind auch die persistenten, organischen Schadstoffe, die sogenannten POPs (persistent organic pollutants). Sie sind dadurch definiert, dass sie folgende problematische Eigenschaften haben: Sie sind langlebig (persistent), giftig, reichern sich in Organismen an und können sich außerdem über die Luft und über weite Strecken verbreiten. Da POPs in der Natur kaum abgebaut werden, können sie über viele Jahre aus der Umwelt in die Nahrungskette gelangen.

Zwölf besonders gefährliche Verbindungen dieser Art, die als Dreckiges Dutzend (englisch: Dirty Dozen) bezeichnet werden, waren die ersten, die nach dem Stockholmer Übereinkommen weltweit verboten wurden. Zu ihnen zählen auch die polychlorierten Biphenyle (PCB). Insgesamt sind heute nach dem Übereinkommen 24 Substanzen verboten.

Den Teufel mit dem Beelzebub austreiben?

Um die Menschen und die Umwelt künftig besser vor der Verschmutzung durch chemische Stoffe zu schützen, trat in der Europäischen Union (EU) 2007 die Chemikalienverordnung REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals; Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) in Kraft, nach der Industrieunternehmen chemische Substanzen, die sie produzieren oder einsetzen möchten, registrieren lassen und deren Unbedenklichkeit nachweisen müssen. Substanzen, die bereits seit Längerem auf dem Markt sind, dürfen Firmen hingegen ohne weitere Nachweise für neue Einsatzgebiete verwenden.

Stoffe, die heute wegen ihrer Giftigkeit verboten werden, können somit durch etablierte Substanzen ersetzt werden, die ähnliche Eigenschaften aufweisen. Doch auch die Ersatzstoffe können problematisch sein. Das zeigt das Beispiel der polybromierten Diphenylether (PBDE), Verbindungen, die lange als Flammschutzmittel verwendet wurden und das Element Brom enthalten. Experten hatten festgestellt, dass PBDE langlebig sind und Krebs auslösen können. Daher wurden sie vor einiger Zeit verboten. Als Alternative für die Industrie griff man dann auf die etablierte Substanz Dechloran Plus zurück, die ursprünglich in den 1970er-Jahren als Insektenvernichtungsmittel verwendet, dann aber in der EU für den Einsatz im Freien verboten worden war. Dechloran Plus ist ebenfalls langlebig, bindet sich im Wasser an Schwebstoffe und lagert sich mit diesen vor allem in den Sedimenten der Küstengewässer ab. Forscher konnten nachweisen, dass Aale in europäischen Küstengewässern mit Dechloran Plus belastet sind.

2.45 > Jahrzehntelang wurden quecksilberhaltige Abwässer In die Bucht vor dem japanischen Fischerort Minamata geleitet. Über die Nahrungskette gelangte das Gift bis in menschliche Körper.

Das Beispiel zeigt die Schwäche der herkömmlichen Praxis, bei der verbotene Stoffe durch etablierte Substanzen ersetzt werden können, die ebenfalls problematisch sind. Als Konsequenz wird derzeit diskutiert, ob Dechloran Plus nicht auch nach dem Stockholmer Übereinkommen international verboten werden sollte. Dänemark hat eine entsprechende Initiative gestartet.

In der Regel gehen einem Verbot umweltgefährdender Chemikalien Diskussionen voraus, die sich über viele Jahre hinziehen. So sperren sich oftmals jene Länder gegen ein Verbot, in denen die entsprechenden Substanzen produziert oder verarbeitet werden. Allerdings gibt es im Rahmen des Stockholmer Übereinkommens eine Regelung, nach der besonders gefährliche POPs auch schon innerhalb kürzerer Zeit verboten werden können, wenn sie sich extrem stark in Lebewesen anreichern und extrem persistent sind. Diese Stoffe werden als very P/very B (very persistent/very bioaccumulative; sehr persistent/sehr bioakkumulierend) bezeichnet.

Ein Beispiel für solche Substanzen ist die chemische Verbindung PFOS (Perfluoroctansulfonat). Sie wurde vor allem in der Textilindustrie verwendet, beispielsweise in der Herstellung atmungsaktiver Membranen für Outdoorjacken. Aber auch in der Papierindustrie wird sie zur Produktion von schmutz-, fett- und wasserabweisenden Papieren wie Fast-Food-Verpackungen benutzt. Darüber hinaus kam sie bei der Imprägnierung von Möbeln, Teppichen und Bekleidung zum Einsatz. Wegen seiner Langlebigkeit hat sich PFOS stark in der Natur angereichert. Es lässt sich in Wasser, Boden, Luft und Lebewesen auf der ganzen Welt nachweisen. In vergleichsweise hohen Konzentrationen kommt es in den Endgliedern der Nahrungskette vor, beispielsweise in Fischen, Robben, Seevögeln oder Eisbären und natürlich auch im Menschen.

Nachdem Ende des vergangenen Jahrhunderts deutlich wurde, dass PFOS zu den „very P/very B“-Verbindungen zählt, wurde die Substanz verboten. Auch die chemisch eng verwandte Verbindung PFOA (Perfluoroctansäure) wurde vom Markt genommen. Zwischen dem Nachweis der potenziellen Gefährlichkeit, den verschiedene Forschergruppen erbracht hatten, und dem Verbot lagen nur fünf Jahre. Für andere POPs, die nicht zu den „very P/very B“-Verbindungen zählen, kann dieser Prozess bis zu 20 Jahre dauern.

Verlagerung von Problemen

PFOS und PFOA lagern sich vor allem im Blut und in der Leber ab. Sie wurden deshalb nach ihrem Verbot durch chemisch nahe verwandte Verbindungen aus der Gruppe der Perfluorcarbone (PFCs) ersetzt, Fluor-Kohlenstoffverbindungen, zu denen auch PFOS und PFOA zählen. In der Industrie werden jetzt PFCs verwendet, die sich weniger in Blut und Leber ablagern und damit weniger bioakkumulierend sind. Das aber bringt ein neues Problem mit sich: Diese PFCs lösen sich recht gut im Wasser. Studien zeigen, dass die Konzentration dieser wasserlöslichen PFCs inzwischen vor allem in den Flüssen und Küstengewässern in China stark zugenommen hat. Mit der Einführung der neuen PFCs hat sich das Umweltproblem also verlagert, von der Anreichung in den Lebewesen hin zu einer stärkeren Konzentration im Wasser.

Unabhängig von der Art der Schadstoffe kann man für viele problematische Substanzen feststellen, dass deren Konzentrationen in den Flüssen und Küstengewässern Europas und der USA in den vergangenen Jahren abgenommen haben. Das ist einerseits auf eine bessere Klärtechnik und Aufbereitung industrieller Abwässer zurückzuführen, andererseits darauf, dass die Produktion und Verarbeitung vieler Chemikalien aus den westlichen Industrienationen in Länder wie China und Indien ausgelagert worden ist. Insofern überrascht es nicht, dass sich dort die Situation verschlechtert hat – und das, obwohl dabei durchaus teils moderne Klärtechnik zum Einsatz kommt.

Doch selbst moderne Technik kann nicht alle Schadstoffe restlos aus den Abwässern entfernen. Da besonders große Mengen an Chemikalien produziert werden, gelangen in China in der Summe dennoch relevante Schadstoffmengen in die Umwelt, so auch PFCs. Viele Küstengebiete, in die Flüsse einmünden, sind mit PFCs belastet, etwa das Delta des Flusses Jangtse im Osten Chinas. Dort werden die PFCs produziert und von mehreren Textilfirmen verarbeitet. Auch andere Flüsse an der chinesischen Ostküste sind stark belastet. So ist etwa die PFC-Konzentration im Delta des Xiaoqing-Flusses heute etwa 2000-mal höher als in der Elbmündung, was insbesondere auf die Verlagerung der Produktion nach China zurückgeführt wird. Welche Umweltauswirkungen die hohen Konzentrationen im Wasser haben und wie gravierend diese Anreicherung ist, ist noch nicht genau untersucht.

Der Tagebau vergiftet ganze Regionen

Zur Verschmutzung von Flüssen und Küstengewässern tragen in erheblichem Maße auch große Minen bei. Meist werden dort wirtschaftlich interessante chemische Elemente gewonnen, etwa Eisen, Kupfer oder auch Gold. Da diese Elemente nicht in reiner Form, sondern gebunden an andere chemische Elemente vorliegen, müssen sie abgetrennt und konzentriert werden. Die Reste der Produktion werden in trockener Form auf Abraumhalden oder mit teils giftigen Abwässern und Schlämmen in Becken oder Sickergruben deponiert. Immer wieder kommt es vor, dass diese Becken und Gruben leckschlagen und die Substanzen in die Umwelt gelangen.

Mitunter werden die Abwässer auch direkt in Flüsse abgegeben wie in Papua-Neuguinea, wo die Ok-Tedi-Mine seit den 1980er-Jahren direkt in die Flüsse Ok Tedi und Fly entwässert, die zusammen mit ihren Nebenflüssen eines der größten tropischen Flusssysteme weltweit bilden. Zeitweise wurden aus der im Binnenland gelegenen Mine so große Mengen an Schlamm in die Flüsse geleitet, dass dieser sich an den Ufern abgelagert hat. Dadurch wurde nicht nur das Flusswasser, sondern auch die Umgebung belastet, vor allem mit Kupferrückständen. Man geht davon aus, dass der Rückgang der Fischpopulationen im Fluss auf diese Belastungen zurückzuführen ist.

Eine ähnliche Umweltbelastung ist auch in der südwestindischen Küstenregion um die Gemeinde Panmana im Bundesstaat Kerala zu beobachten. Dort werden seit 1922 schwermetallhaltige Mineralseifen abgebaut, mineralienreiche Sedimente, die sich über Jahrmillionen abgelagert haben. Anfangs baute man die Mineralseifen ab, um Metalle zu gewinnen. Seit den 1980er-Jahren ist vor allem die Substanz Ilmenit von Interesse, eine Verbindung aus Eisen, Titan und Sauerstoff. Aus ihr wird das weiße Pigment Titandioxid gewonnen, ein verbreiteter Weißmacher, der Wandanstrichen, Autolacken oder auch Zahncremes beigemischt wird. Das Ilmenit wird seit 1984 direkt vor Ort in einer Fabrik verarbeitet. Die dabei anfallenden Schwermetalle werden heute nicht mehr genutzt.

Schlammfluten verschmutzen die Küste – der Fall Rio Doce

Selbst weit im Hinterland gelegene Minen können Küstengebiete verschmutzen. Das zeigt der Fall des Eisenerztagebaus nahe der brasilianischen Stadt Mariana, die etwa 250 Kilometer nördlich von Rio de Janeiro liegt. Am 5. November 2015 brachen dort die Dämme eines Absetzbeckens für Erzschlamm, der bei der Produktion im Tagebau anfällt. Daraufhin ergoss sich eine riesige Schlammlawine in den Rio Doce, einen Fluss, der in den Atlantik mündet. Insgesamt stürzten nach Angaben des UN-Menschenrechtsrats (United Nations Human Rights Council, UNHCR) rund 50 Millionen Tonnen Eisenerzschlamm ins Tal, was in etwa dem Rauminhalt von 20 000 Wettkampfschwimmbecken entspricht. Die Schlammlawine verschüttete das 5 Kilometer von der Mine entfernte Dorf Bento Rodrigues und große Landflächen. Schließlich ergoss sich die rote Masse 600 Kilometer flussabwärts in den Atlantik. 16 Menschen kamen bei der Katastrophe ums Leben.

Da der Schlamm Schwermetalle und andere giftige Substanzen in hohen Konzentrationen enthielt, sind die betroffenen Gebiete um Bento Rodrigues bis heute unbewohnbar und eine Landwirtschaft nicht möglich. Unklar ist derzeit noch, wie sich die Schadstofffracht auf das betroffene Mündungsgebiet im Atlantik auswirkt. Man fürchtet, dass sich große Mengen der Schadstoffe am Meeresboden abgelagert haben. Sofern Meerestiere diese mit ihrer Nahrung aufnehmen, könnte auch die Fischerei betroffen sein, weil Fische und Meeresfrüchte dann nicht mehr verkauft werden können.

2.46 > Umweltkatastrophe im brasilianischen Bundesstaat Espírito Santo: Giftiger Eisenerzschlamm aus dem Rio Doce ergießt sich ins offene Meer.

Sie werden zusammen mit anderen chemischen Elementen mit dem Abwasser in Speicherbecken geleitet, die aber seit mehr als einem Jahrzehnt undicht sind. In dieser Zeit hat das versickernde Abwasser nach und nach die Brunnen und Böden in einem 16 Quadratkilometer großen Gebiet um die Fabrik verseucht. Die Konzentration an Schwermetallen übersteigt hier internationale Grenzwerte um ein Vielfaches. Die Vergiftung von Boden und Wasser führt nicht nur dazu, dass an vielen Stellen die Pflanzen absterben, sondern mehr und mehr Menschen in der Region Ekzeme aufweisen und an Krebs erkranken. Viele Bewohner haben ihre Heimat deshalb verlassen.

Das Rätsel um den Müll im Meer

Besonders viel Beachtung haben Forscher und Medien in den vergangenen Jahren der Verschmutzung der Meere durch Plastikmüll geschenkt. Das liegt nicht zuletzt daran, dass diese Bedrohung oftmals direkt sichtbar ist und der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung leicht nachvollziehbar ist. Diskutiert wird aktuell, welche Gefahr von den Plastikteilen ausgeht und wie viel Müll eigentlich im Meer treibt. Mehrere Gruppen von Plastikmüll werden dabei unterschieden:

2.47 > In der Gemeinde Panmana im indischen Bundesstaat Kerala sind die Böden vielerorts durch Schwermetalle verseucht. Pflanzen wachsen hier kaum noch.

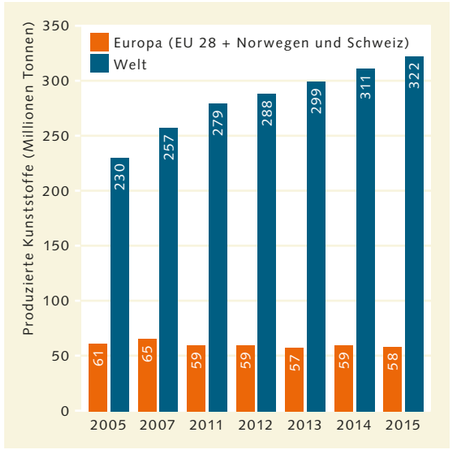
- Makroplastik mit einer Größe von mindestens 25 Millimetern,
- Mesoplastik mit einer Größe von 5 bis 25 Millimetern,
- großes Mikroplastik mit einer Größe von 1 bis 5 Millimetern,
- kleines Mikroplastik mit einer Größe von wenigen Mikrometern bis 1 Millimeter.

Je nach Größe und Art der Abfälle wirken sich diese unterschiedlich auf Lebewesen aus. Makroplastik kann für Meereslebewesen zu einer tödlichen Falle werden. In alten Fischernetzen etwa können sich Meeresschildkröten verheddern und ersticken. Derzeit wird diskutiert, ob das Makro- und Mesoplastik im Meer nicht mehr nur einzelne Individuen tötet, sondern möglicherweise ganze Populationen von Meerestieren gefährden könnte. Eine aktuelle Studie zeigt, dass schon heute 90 Prozent aller Seevögel Plastikteile verschlucken. Je nach Fressverhalten sind verschiedene Seevogelarten unterschiedlich stark gefährdet.

Untersucht wird seit einiger Zeit auch, wie sich Mikroplastik auf Meeresorganismen auswirkt. In einem Laborexperiment hat man Muscheln Mikropartikelkonzentrationen ausgesetzt, die sehr hoch waren. Die Partikel gelangten aus dem Verdauungstrakt bis ins Gewebe, wo sie Entzündungsreaktionen auslösten. Bemängelt wird an diesen Untersuchungen, dass die verwendeten Partikelkonzentrationen extrem hoch waren – deutlich höher als die Konzentration in den Meeren. Zum Vergleich wurden ähnliche Experimente durchgeführt, die Muscheln dabei aber in Wasser gehalten, das deutlich geringere Partikelkonzentrationen aufwies – Konzentrationen, die denen in der Nordsee entsprachen. Bei diesen Experimenten konnten keine Schäden festgestellt werden.

Unmessbare Müllmassen

Grundsätzlich gilt, dass sich die Menge des Mülls, der sich in den Meeren befindet, nicht genau messen und bestimmen lässt. Dennoch haben US-amerikanische Forscher 2015 im Rahmen einer Studie versucht, dies zu überschlagen. Dafür haben sie die Produktionsseite beleuchtet und ausgerechnet, dass bei einer jährlichen weltweiten Kunststoffproduktion von rund 300 Millionen Tonnen etwa 275 Millionen Tonnen Abfall anfallen – gut 90 Prozent. Für ihre Studie hatten die Forscher analysiert, wie gut die Infrastruktur für die Müllbeseitigung und das Recycling in verschiedenen Ländern entwickelt sind – und daraus abgeleitet, dass ungefähr 4,8 bis 12,7 Millionen Tonnen ins Meer gelangten. Inzwischen wurden diese Zahlen oft zitiert, doch wurde an der Studie kritisiert, dass man von den Produktionsdaten und Informationen zur Müllverwertung nicht darauf schließen kann, wie viel Müll letztlich ins Meer gelangt. Denn Müll kann auf ganz verschiedene Arten seinen Weg ins Meer finden: über Flüsse, durch direkte Entsorgung ins Meer, oder er wird von Müllkippen an Land ins Wasser geweht. Es ist nicht möglich, all diese Wege quantitativ zu erfassen. Auch ist es unmöglich zu ermitteln, wie viel Müll bis heute bereits in die Meere gelangt ist. Vor allem, weil ein großer Teil des Plastikabfalls in tiefere Meeresschichten gesunken ist und dort nicht mehr entdeckt werden kann.



2.48 > Seit Jahren wächst die Menge der weltweit produzierten Kunststoffe. Es ist anzunehmen, dass dadurch auch die Menge der Plastikabfälle zunimmt, die in die Meere gelangt. Verlässliche Zahlen gibt es aber nicht.

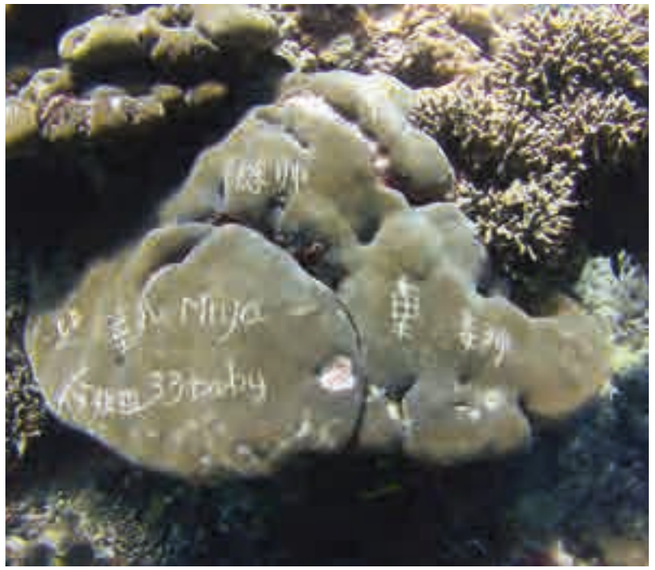
Überzogene Schätzungen?

Mikroplastik gelangt aus vielen verschiedenen Quellen in die Meeresumwelt: aus dem Zerfall großer Plastikteile im Meer, die durch das Salzwasser und die UV-Strahlung der Sonne langsam zerbröseln, aus Schiffsanstrichen, aus dem Abrieb von Plastikgegenständen oder Autoreifen, aber auch aus Peelings, in denen die Partikel als Putzkörnchen dienen. Dass die Bestimmung der Gesamtmenge so schwierig ist, liegt vor allem daran, dass die verschiedenen Forschergruppen das Mikroplastik bislang mit unterschiedlichen Methoden und Geräten erfasst und untersucht haben. Manche rechneten die Partikelkonzentration im Wasser auf Kubikmeter hoch, andere auf Quadratkilometer. Manche gaben die absolute Zahl gemessener Partikel an, andere das Gewicht in Milligramm pro Kilogramm. So gibt es heute kaum eine Vergleichbarkeit der Zahlen.

Um dies künftig zu erreichen, werden aktuell in einem EU-Projekt erstmals einheitliche Messstandards für Mikroplastik entwickelt. Dabei geht es nicht nur um das Zählen von Partikeln im Wasser, sondern vor allem um ihre richtige Bestimmung. Lange hat man versucht, unter dem Mikroskop die genaue Zahl der Partikel zu erfassen. Mit dieser optischen Methode wurde die Menge um bis zu 70 Prozent überschätzt, weil sehr häufig auch Quarzsand als Plastik interpretiert worden ist. Mit neuen Messgeräten, die mit Infrarotlicht arbeiten und Kunststoffe genau bestimmen können, will man derartige Fehler in der Zukunft vermeiden.

Erholung auf Kosten der Küstenlebensräume – der Tourismus

Während heute noch weitgehend unklar ist, welche Bedrohung der Plastikabfall für die Lebensräume der Küsten darstellt, sind die negativen Folgen des Tourismus seit Jahren bekannt. Besonders in den touristisch stark frequentierten Feriengebieten hat der Bau von Hotels und Straßen die Küstenlandschaft zum Teil massiv verändert. Feuchtgebiete wurden trockengelegt und bebaut, Strände intensiv genutzt. Stark betroffen sind davon jene Organismen, die direkt auf den Küstenstreifen angewiesen sind, also den unmittelbaren Übergangsbereich zwischen Wasser und Land. So sind viele Vogelarten für ihre Brut oder Rast auf Feuchtgebiete entlang der Küste angewiesen, etwa Lagunen oder Flussmündungen. Auch Robben nutzen die Küstenstreifen für die Jagd oder als Ruhezone. Meeresschildkröten wiederum benötigen unberührte Strände, um im Sand ihre Eier zu vergraben. Solche Plätze sind heute in manchen Gebieten aber sehr rar geworden.



2.49 > Intensiver Tourismus kann Korallenriffe stark beschädigen – beispielweise wenn Urlauber Meeresorganismen ritzen.

Gab es zu Beginn des 19. Jahrhunderts in vielen Regionen des Mittelmeers noch große Bestände an Suppenschildkröten, Unechten Karettschildkröten und Lederschildkröten, so sind sie heute wegen der Transformation natürlicher, sandiger Küstengebiete in touristische Resorts fast restlos verschwunden. Suppenschildkröten sind im Mittelmeer nur noch vor Zypern, die Unechte Karettschildkröte in wenigen Gebieten in Griechenland und der Türkei und Lederschildkröten nur noch in Ausnahmefällen vor Syrien und Israel anzutreffen.

Die Wandlung natürlicher Küstensäume in touristische Gebiete mit teils städtischem Charakter wirkt sich auf die Küstenumwelt noch auf andere Weise aus. So sind an vielen Stellen Wände und Hafenanlagen aus Beton entstanden, die dem Schutz der Küste dienen oder als Promenaden und Marinas genutzt werden. Damit hat sich der Lebensraum für viele Wasserorganismen völlig verändert. Höhlen und Verstecke sind ebenso verloren gegangen wie Nahrungsgründe. Selbst dort, wo das Ufer aus Felsen besteht, verändert die Verbauung mit Betonstrukturen die Artengemeinschaften. Betonoberflächen haben eine andere chemische Zusammensetzung als Natursteine. Viele Meeresorganismen, die auf festen Untergründen siedeln, meiden daher Betonstrukturen, sodass diese insgesamt meist deutlich artenärmer sind.

Hoher Druck auf die Korallenriffe

Nicht nur die Verbauung, auch die intensive Nutzung durch Touristen führt zur langsamen Zerstörung von Küstenlebensräumen. Zu diesen stark frequentierten Lebensräumen gehören auch die Korallenriffe. Für das Great Barrier Reef an der Ostküste Australiens wurde genauer untersucht, welche Folgen die intensive Nutzung durch Tauchtouristen hat. Verschiedene Arten der Zerstörung konnten festgestellt werden:

- In Bereichen, in denen Boote ablegen, werden Korallen durch Urlauber zerstört, die zwischen Land und Boot hin und her waten. In stark frequentierten Bereichen werden die Korallen komplett zerstört.
- Durch vertäute Pontons, schwimmende Restaurants und dergleichen werden Bereiche der Riffe permanent verschattet. In diesen Bereichen sterben Korallen ab.
- Zu Wasser gelassene Anker von Ausflugs- und Tauchbooten können Korallen zerstören.
- Durch das Anfüttern von Fischen zum Zweck der Beobachtung können sich in den Riffen Krankheiten aufgrund von falschem oder verdorbenem Futter ausbreiten. Zudem können große räuberische Fische angelockt werden, die gewöhnlich nicht in eben diesen Riffen vorkommen. Das kann dazu führen, dass manche Arten dezimiert werden.
- Insbesondere ungeübte Taucher berühren bei ihren Tauchgängen die Riffe und brechen vor allem fein verästelte Korallen ab.

Während die australischen Forscher betonen, dass sich all diese Schäden durch ein optimiertes Management vor Ort vermeiden lassen, gehen andere Experten davon aus, dass Tauchtourismus in Korallenriffen grundsätzlich Schäden verursacht, ganz gleich, wie gut die Touristen informiert oder geführt werden. Betont wird auch, dass leichte Schädigungen durch Tauchtouristen zusammen mit anderen Stressfaktoren, wie etwa einer Erwärmung des Wassers im Zuge des Klimawandels, zu noch größeren Schäden führen können.

Conclusio

Immense Leistung, immenser Druck

Der Mensch ist mit dem Lebensraum Küste seit Jahrtausenden eng verbunden und nutzt ihn sowohl als Nahrungslieferant als auch als Handelsraum. Archäologische Funde deuten darauf hin, dass Menschen die Küstengewässer bereits 6000 Jahre vor Christus mit einfachen Booten befuhren, etwa im Südchinesischen Meer oder im östlichen Mittelmeer. Küsten waren stets auch Schauplatz zahlreicher Konflikte um politische und wirtschaftliche Vormachtstellungen in einer bestimmten Region.

Heute erbringen die Küsten der Welt zahlreiche Leistungen, die man als Ökosystemleistungen bezeichnet. Dazu zählen die sogenannten bereitstellenden Dienstleistungen – Güter, die das Meer zur Verfügung stellt wie Fisch oder fossile Ressourcen. Von zentraler Bedeutung sind die unterstützenden Ökosystemleistungen, zu denen die Primärproduktion gehört – der Aufbau von Biomasse durch Algen mithilfe der Photosynthese. Die Primärproduktion ist die Voraussetzung für das Leben im Meer. Des Weiteren existieren kulturelle Ökosystemleistungen, die die spirituelle Bedeutung der Küsten, aber auch den Tourismus umfassen. Im Hinblick auf die Umweltverschmutzung durch den Menschen kommt den regulierenden Ökosystemleistungen eine besondere Bedeutung zu. Zu diesen zählen vor allem die Klärwerksfunktionen der Küstengewässer, da diese wesentlich zum Abbau von Nährstoffen beitragen, die von intensiv genutzten Äckern und aus ungeklärten Abwässern ins Meer gelangen.

In vielen Fällen übernutzt der Mensch heute die Küstengewässer. Dadurch können sie ihre Ökosystemleistungen nicht mehr erbringen. Gelangen zu viele Nährstoffe aus der Landwirtschaft oder der Aquakultur ins Meer, können diese nicht mehr abgebaut werden. Die Gewässer werden überdüngt, sodass sich sauerstofffreie Zonen ausbreiten können. Auch Schadstoffe, die aus industriellen Prozessen in die Küstengewässer gelangen, stellen eine Bedrohung dar. Dazu zählen schwermetallhaltige Verbindungen oder langlebige chemische Substanzen, die sich in der Nahrungskette anreichern und Krankheiten wie Krebs auslösen können. Ein Beispiel sind die polyfluorierten Verbindungen, die seit Jahren für alltägliche Produkte wie Outdoorbekleidung oder Pfannenbeschichtungen verwendet werden.

Eine andere Art der Verschmutzung ist der Plastikabfall, der auf vielen verschiedenen Wegen ins Meer gelangt. Meerestiere oder Seevögel verschlucken die Plastikteile und sterben daran. Darüber hinaus zerfällt das Plastik in mikroskopisch kleine Plastikbruchstücke. Dieses Mikroplastik lässt sich weltweit in den Meeren nachweisen. Inwieweit es die Tiere aufnehmen und wie gefährlich es ist, wird derzeit wissenschaftlich untersucht.

Zu den größten Problemen in den Küstengewässern zählt aktuell die Überfischung. Da diese Gewässer besonders produktiv sind, wird hier zu intensiv Fisch gefangen. Darüber hinaus werden durch die Fischerei vielerorts Lebensräume am Meeresboden zerstört, beispielsweise Korallenriffe.

Besonders stark werden Küsten heute durch die Zersiedelung der Landschaft und durch wachsende Megacitys in Küstennähe verändert, wodurch bedeutende Lebensräume wie Auen, Feuchtgebiete oder Mangroven verloren gegangen sind. Auch werden durch den Abbau von Sand für Bauprojekte Küstengebiete weiträumig zerstört. Für den Menschen ergibt sich eine besondere Bedrohung dadurch, dass viele der in den vergangenen Jahrzehnten stark gewachsenen Küstenmetropolen langsam versinken. Das liegt insbesondere an der Entnahme von Grundwasser zur Trinkwassergewinnung, das normalerweise wie ein Widerlager der schweren Bebauung entgegenwirkt. Durch das Versinken kommt es immer häufiger zu Überflutungen. Der durch den Klimawandel steigende Meeresspiegel könnte diese Situation in der Zukunft noch verschärfen.

3 Bedrohung durch Klimawandel und Naturgefahren

> Der Klimawandel wird die Küstenlebensräume gleich doppelt unter Druck setzen, nämlich durch die Erwärmung und Versauerung des Wassers. Die größte direkte Bedrohung für den Menschen aber ist der Meeresspiegelanstieg – viele Regionen dürften künftig häufiger überflutet werden. Weil die Küsten immer dichter besiedelt werden, könnten Naturgefahren in Zukunft zu Katastrophen führen. Es sein denn, moderne Warnsysteme begrenzen die Schäden.

Der Klimawandel und die Küsten

> Der durch den Menschen verursachte Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid und die damit verbundene Klimaerwärmung bewirken, dass der Meeresspiegel langsam steigt. Küstengebiete sind davon besonders betroffen. Auch die Versauerung und die Erwärmung des Meerwassers werden weitreichende Konsequenzen für die dortigen Lebensgemeinschaften haben.

Ungehemmter Kohlendioxidausstoß

Küsten werden nicht nur durch Baumaßnahmen oder Verschmutzungen vor Ort beeinträchtigt. Hinzu kommen die durch den Klimawandel verursachten globalen Bedrohungen – der Meeresspiegelanstieg, die Versauerung und die Erwärmung der Ozeane –, die ursächlich in erster Linie mit der bis heute ungehemmten Verbrennung der fossilen Rohstoffe Erdgas, Erdöl und Kohle verbunden sind. Große Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2) werden dadurch zusätzlich freigesetzt, sodass nach dem Beginn der industriellen Revolution die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre um 1800 von zunächst 280 **parts per million (ppm)** auf heute gut 400 ppm gestiegen ist. Diese Zunahme hat zu einer schleichenden Veränderung des Klimas geführt.

Anthropogener Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt ist zunächst ein natürliches Phänomen, das die Erde vor Auskühlung schützt. Wasserdampf, Kohlendioxid (CO_2) und andere klimarelevante Spurengase in der Atmosphäre wie etwa Methan (CH_4) 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 Mensch verstärkt heute durch den Ausstoß zusätzlicher Treibhausgase in großen Mengen diesen natürlichen Effekt. Den größten Anteil hat CO_2, das durch die Verbrennung von Erdgas, Erdöl und Kohle frei wird. Methan wiederum entsteht unter anderem durch die intensive Zucht von Rindern, die das Gas bei der Verdauung ausstoßen. Auch durch die Trockenlegung von Feuchtgebieten und die sich daran anschließenden Faulprozesse wird Methan frei.

Die Trägheit des Klimas

Aufgrund der Trägheit unseres Klimasystems werden viele Auswirkungen des anthropogenen Treibhauseffekts nur allmählich sichtbar. Selbst wenn man es heute schaffen sollte, die Kohlendioxidemissionen gänzlich zu stoppen, würde sich die oberflächennahe Lufttemperatur noch über mindestens hundert Jahre erhöhen. Der Meeresspiegel würde sogar noch über mehrere Jahrhunderte weiter ansteigen. Woran liegt das? Zum einen dehnt sich das Meerwasser durch die langsame Erwärmung der Tiefsee erst allmählich aus. Zum anderen reagieren die kontinentalen Eisschilde in Grönland und in der Antarktis wahrscheinlich sehr langsam auf die Erwärmung der Atmosphäre. Dadurch wird sich das Abschmelzen der Gletscher über einen sehr langen Zeitraum von vielen Jahrtausenden hinziehen.

Durch die zunehmende Meereserwärmung werden sich die Lebensbedingungen künftig für viele Meeresorganismen ändern, was zu einer neuen Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften und Nahrungsnetze führen dürfte. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch die Ozeanversauerung, die zu chemischen Veränderungen im Meerwasser führt. Zu dieser Versauerung kommt es, weil sich immer mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre im Meerwasser löst. Dabei bildet sich, vereinfacht ausgedrückt, Säure.

In den vergangenen Jahren ist die Zahl der Forschungsprojekte, die sich mit den Folgen des Klimawandels für das Meer befassen, sprunghaft angestiegen. Viele dieser Arbeiten beschäftigen sich vor allem mit den Folgen für die Küsten und die Küstengewässer. Und befassen sich dabei auch mit der Frage, ob und inwieweit sich die Meereserwärmung und die Meeresversauerung auf die Küstengewässer ähnlich oder anders auswirken als auf das offene Meer.

3.1 > Im Meer bildet sich zwischen dem warmen Oberflächenwasser und dem kühlen Wasser in der Tiefe häufig eine Temperatursprungschicht. Diese kann man wie hier vor der thailändischen Insel Ko Phangan mit bloßem Auge erkennen, weil sich mit der Temperatur die Dichte des Wassers ändert und bestimmte Partikel an der Sprungschicht schweben.

DIE MEERESERWÄRMUNG

Wärmeres Wasser, stärkere Schichtung

Während man heute bereits recht genau abschätzen kann, welche Küstengebiete betroffen sein werden, wenn der Meeresspiegel um ein bestimmtes Maß steigen sollte, sind die Folgen der Meereserwärmung sehr viel schwerer abzuschätzen. Als sicher gilt, dass sich dadurch die Schichtung von Wassermassen künftig verstärken wird. Sauerstoffreiche Schichten an der Wasseroberfläche werden sich schlechter mit kalten, tieferen Wasserschichten mischen, was zu einem Sauerstoffmangel in der Tiefe führen kann. Dieser Fall ist bereits in verschiedenen Meeresgebieten der Welt eingetreten.

Die Schichtung von Wassermassen ist zunächst ein natürlicher Vorgang: In den Sommermonaten erwärmt sich das Wasser an der Meeresoberfläche, und es bildet sich eine oberflächennahe Wasserschicht, die wie ein Deckel auf dem schweren, kälteren Wasser in der Tiefe sitzt. Der Übergang von der warmen Oberflächenschicht zum kalten Wasser darunter ist relativ abrupt, weshalb die Trennlinie zwischen warm und kalt auch als Temperatursprungschicht (Thermokline) bezeichnet wird. Je nach Meeresgebiet ist eine solche Sprungschicht einige Dezimeter bis viele Meter mächtig. Wobei die Sprungschichten im offenen Ozean bei großen Wassertiefen deutlich dicker als in Küstengebieten sind.

An der Sprungschicht lagert also eine warme Wasserschicht mit geringer Dichte auf einem kalten Wasserkörper höherer Dichte. Damit wirkt die Sprungschicht wie eine Barriere. Je stärker der Temperaturunterschied ist, desto größer ist die Dichtedifferenz und desto stabiler ist die Sprungschicht. So kann schließlich kaum mehr sauerstoffreiches Wasser von der Oberfläche durch Wellenbewegungen in die tieferen Schichten eingemischt werden, in denen aufgrund des Lichtmangels auch kein Sauerstoff durch Photosynthese entstehen kann. Weil in den tieferen Wasserschichten ständig Sauerstoff wegen des Abbaus von organischem Material durch Mikroorganismen aufgezehrt wird, ist dies sehr problematisch und führt in den tieferen Wasserschichten vieler Küstenmeere zu Sauerstoffarmut.

Die Szenarien des Weltklimarats

Niemand kann heute mit Gewissheit sagen, wie stark sich das Klima in Zukunft ändern wird, zumal unbekannt ist, wie viel Kohlendioxid (CO_2) künftig durch die Verbrennung der fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle ausgestoßen wird. Der Bedarf an fossilen Energieträgern wiederum hängt vom Bevölkerungswachstum, dem künftigen Energiebedarf und dem Einsatz erneuerbarer Energien ab. Auch die Landnutzung, etwa die Zerstörung von Regenwäldern und deren Umwandlung in Ackerland, beeinflusst die CO_2-Bilanz der Atmosphäre erheblich.

Da die Entwicklung nicht genau vorhersehbar ist, geht der Weltklimarat (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) von vier verschiedenen Szenarien aus, die sich in der Annahme unterscheiden, wie hoch die CO_2-Konzentration in der Erdatmosphäre im Jahr 2100 sein könnte. Diese beispielhaften Szenarien werden als Repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCPs) bezeichnet. Im Detail unterscheidet man die Szenarien RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5. Der Zahlenwert verdeutlicht jeweils, wie stark sich bei vier verschiedenen CO_2-Konzentrationen im Jahr 2100 die Energiebilanz der Erde verändert haben wird. Als Maß für die Veränderung verwendet der IPCC den sogenannten Strahlungsantrieb. Dieser beschreibt konkret, wie stark im Laufe der Zeit die Energie zunimmt, die auf den Erdboden trifft. Als Messgröße dafür dient die sogenannte Strahlungsleistung, die in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) gemessen wird. Sie beschreibt allgemein, wie viel Energie pro Sekunde auf 1 Quadratmeter Erdoberfläche trifft – beispielsweise durch die natürliche Sonnenstrahlung. Während die Strahlungsleistung also einen momentanen Wert liefert, beschreibt der Strahlungsantrieb, um das Wievielfache sich die Strahlungsleistung über die Zeit verändert. Für die RCP-Szenarien vergleicht der Weltklimarat die für das Jahr 2100 angenommenen Strahlungsleistungswerte mit der Strahlungsleistung im Jahr 1860, dem Beginn der systematischen Wetteraufzeichnungen. Aus der Differenz ergibt sich dann der Strahlungsantrieb als ein Vielfaches des Wertes von 1860.

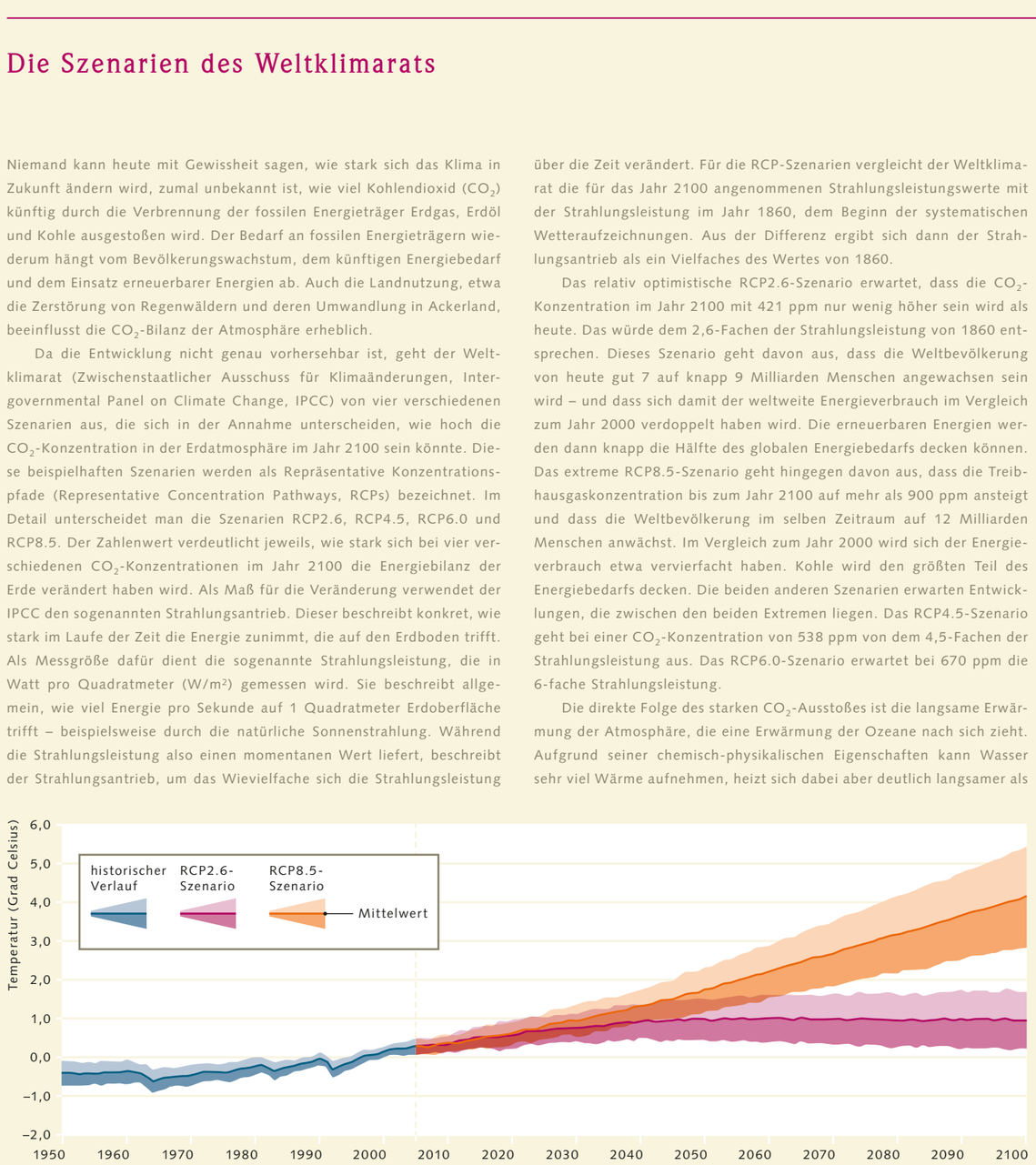
Das relativ optimistische RCP2.6-Szenario erwartet, dass die CO_2-Konzentration im Jahr 2100 mit 421 ppm nur wenig höher sein wird als heute. Das würde dem 2,6-Fachen der Strahlungsleistung von 1860 entsprechen. Dieses Szenario geht davon aus, dass die Weltbevölkerung von heute gut 7 auf knapp 9 Milliarden Menschen angewachsen sein wird – und dass sich damit der weltweite Energieverbrauch im Vergleich zum Jahr 2000 verdoppelt haben wird. Die erneuerbaren Energien werden dann knapp die Hälfte des globalen Energiebedarfs decken können. Das extreme RCP8.5-Szenario geht hingegen davon aus, dass die Treibhausgaskonzentration bis zum Jahr 2100 auf mehr als 900 ppm ansteigt und dass die Weltbevölkerung im selben Zeitraum auf 12 Milliarden Menschen anwächst. Im Vergleich zum Jahr 2000 wird sich der Energieverbrauch etwa vervierfacht haben. Kohle wird den größten Teil des Energiebedarfs decken. Die beiden anderen Szenarien erwarten Entwicklungen, die zwischen den beiden Extremen liegen. Das RCP4.5-Szenario geht bei einer CO_2-Konzentration von 538 ppm von dem 4,5-Fachen der Strahlungsleistung aus. Das RCP6.0-Szenario erwartet bei 670 ppm die 6-fache Strahlungsleistung.

Die direkte Folge des starken CO_2-Ausstoßes ist die langsame Erwärmung der Atmosphäre, die eine Erwärmung der Ozeane nach sich zieht. Aufgrund seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften kann Wasser sehr viel Wärme aufnehmen, heizt sich dabei aber deutlich langsamer als die Atmosphäre auf. Dank dieser großen Energieaufnahme fungieren die Ozeane als wichtiger Wärmepuffer, da sie das Aufheizen der Atmosphäre mildern.

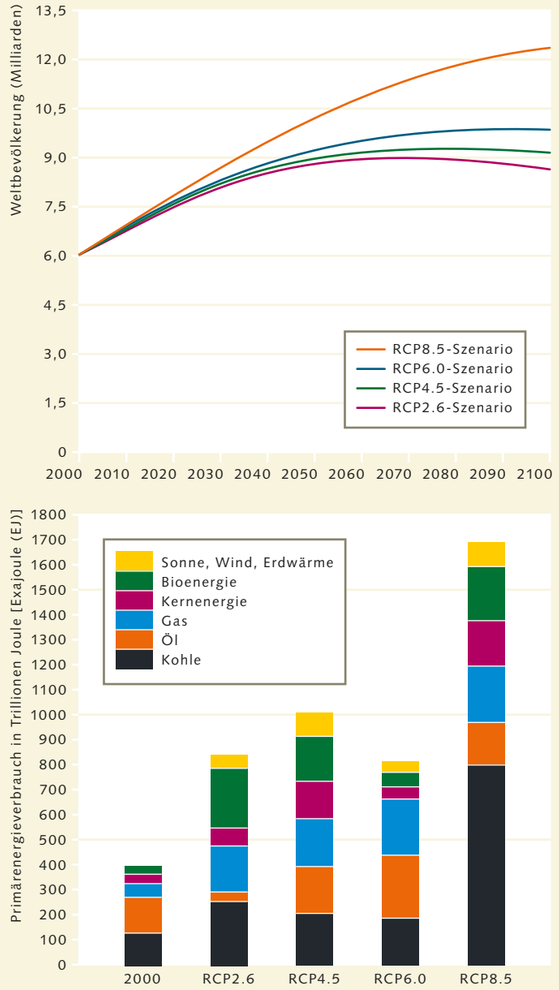
Nach Angaben des Weltklimarats haben die Meere zwischen 1971 und 2010 den Großteil derjenigen Wärmemenge aufgenommen, die durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt generiert wurde. Insgesamt hat der sogenannte obere Ozean (0 bis 700 Meter Tiefe) 64 Prozent und der tiefere (700 bis 2000 Meter) 29 Prozent aufgenommen. 3 Prozent sind in das Schmelzen von Eis eingegangen, und weitere 3 Prozent haben zur Erwärmung der Landoberfläche der Kontinente beigetragen. Nur etwa 1 Prozent trug zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Steigen die CO_2-Emissionen weiterhin, werden höchstwahrscheinlich nach und nach auch die tieferen Wasserschichten der Ozeane einen Teil dieser Mengen aufnehmen. In welchem Maße, ist bislang aber noch unsicher. Für die obere Schicht der Ozeane (bis in eine Tiefe von 700 Metern) geht das moderate RCP2.6-Szenario aber davon aus, dass die Temperatur weltweit bis 2100 um durchschnittlich 0,5 Grad Celsius zunehmen wird. Dabei ist zu bedenken, dass sich verschiedene Meeresregionen je nach Bedingungen vor Ort unterschiedlich stark erwärmen werden. Das pessimistische RCP8.5-Szenario hingegen erwartet, dass die Temperatur in den oberen 700 Metern des Meeres bis 2100 gar um mehr als 3 Grad Celsius steigt. Für manche Gebiete in der Arktis wird RCP8.5 zufolge gar mit einer Erhöhung der Wassertemperatur um bis zu 5 Grad Celsius gerechnet.

Auch was den Meeresspiegelanstieg betrifft, gibt es einen deutlichen Unterschied zwischen den Szenarien. Dem RCP2.6-Szenario entsprechend ist mit einem Anstieg des Meeresspiegels von 26 bis 60 Zentimetern zu rechnen. Nach dem RCP8.5-Szenario könnte der Anstieg sogar bis knapp 100 Zentimeter betragen. Insgesamt zeigen die aktuellen IPCC-Szenarien sehr deutlich, welche konkreten Folgen der Klimawandel für die Ozeane nach sich ziehen wird. Mit welcher Wahrscheinlichkeit verschiedene Folgen wie etwa extreme Stürme oder Überflutungen eintreten, lässt sich heute allerdings noch nicht genau abschätzen. Zudem sind manche Folgen besser vorhersehbar als andere. Wie stark das Meer versauert, lässt sich beispielsweise durch relativ einfache chemische Gleichungen abschätzen. Wie stark Wirbelstürme zunehmen, hängt hingegen von vielen physikalischen Größen ab. Der Weltklimarat ordnet seine Zukunftsaussagen deshalb danach, wie wahrscheinlich bestimmte Phänomene auftreten werden. Dabei wird zwischen folgenden Kategorien unterschieden:

- sehr hohe Wahrscheinlichkeit,
- hohe Wahrscheinlichkeit,
- mittlere Wahrscheinlichkeit,
- geringe Wahrscheinlichkeit,
- sehr geringe Wahrscheinlichkeit.



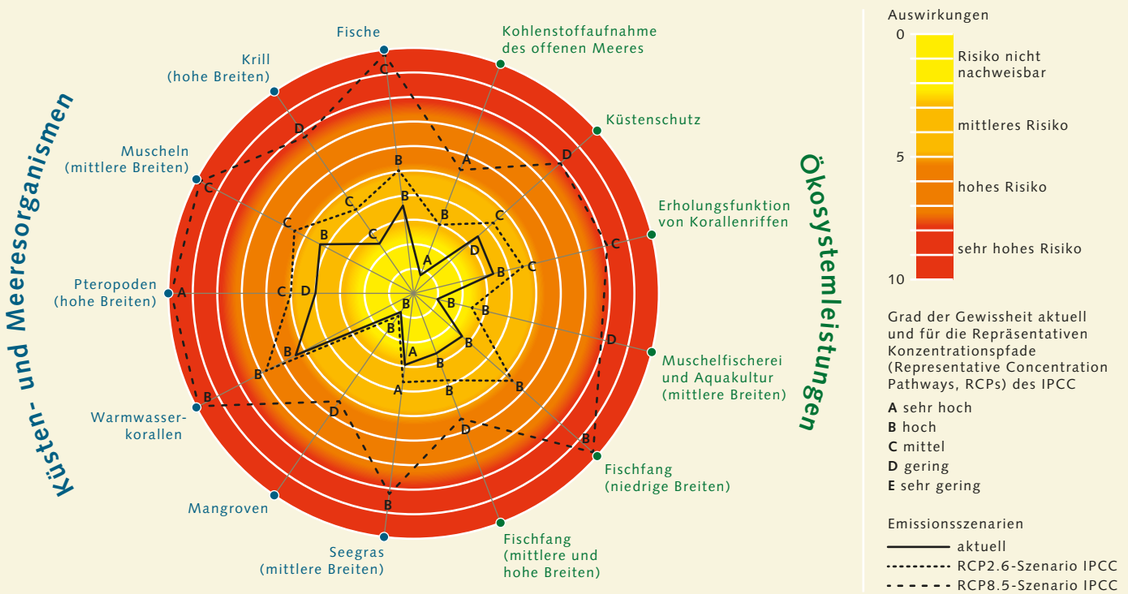
3.2 > Die mittlere globale Erdoberflächentemperatur wird auf alle Fälle steigen – beim RCP8.5-Szenario um mehr als 4 Grad Celsius gegenüber 1986–2005. Nur beim RCP2.6-Szenario lässt sich das Ziel, die Erderwärmung auf 2 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, noch einhalten.



3.3 > Aus einer Reihe von Berechnungen hat der Weltklimarat Szenarien entworfen, die mögliche Entwicklungen des Klimawandels darstellen. Für diese Szenarien wurden Ursachen und Auswirkungen genauer betrachtet. Einen besonderen Einfluss auf den Verlauf des Klimawandels und die Zunahme der globalen durchschnittlichen Lufttemperatur haben demnach die Bevölkerungsentwicklung und die damit verbundene Zunahme des Verbrauchs fossiler Rohstoffe. Das RCP2.6-Szenario ist am optimistischsten, das RCP8.5-Szenario am pessimistischsten.

Emissions-szenario	Repräsentative Konzentra-tionspfade (RCPs)	2100 CO_2-Konzentration (ppm)	mittlerer Meeresspiegelanstieg (m)		Emissions-szenario	mittlerer Meeresspiegelanstieg (m)		
			2046–2065	2100		2200	2300	2500
niedrig	2.6	421	0,24 (0,17–0,32)	0,44 (0,28–0,61)	niedrig	0,35–0,72	0,41–0,85	0,50–1,02
mittel	4.5	538	0,26 (0,19–0,33)	0,53 (0,36–0,71)	mittel	0,26–1,09	0,27–1,51	0,18–2,32
hoch	6.0	670	0,25 (0,18–0,32)	0,55 (0,38–0,73)	(sehr) hoch	0,58–2,03	0,92–3,59	1,51–6,63
sehr hoch	8.5	936	0,29 (0,22–0,38)	0,74 (0,52–0,98)				

3.4 > Für den Zeitraum bis zum Jahr 2100 entwirft der Weltklimarat verschiedene Szenarien, die sich anhand der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre unterscheiden. Diese hängt unter anderem vom Wachstum der Weltbevölkerung und deren Energieverbrauch ab. Für das RCP8.5-Szenario mit der höchsten atmosphärischen CO_2-Konzentration wird der stärkste Meeresspiegelanstieg erwartet. Wie sich die Weltbevölkerung, der Energieverbrauch und andere Einflussfaktoren in der Zeit nach 2100 entwickeln werden, ist heute noch kaum abzuschätzen. Der Weltklimarat verwendet deshalb für die Zeit nach 2100 nicht die vier differenzierten RCP-Szenarien, sondern drei Emissionsszenarien. Das hohe Emissionsszenario ist dennoch mit dem RCP8.5-Szenario vergleichbar, weil es ebenfalls weiter von einer starken Nutzung fossiler Rohstoffe ausgeht. Es erwartet für das Jahr 2500 einen Meeresspiegelanstieg von bis zu 6,63 Metern.



3.5 > Durch den Klimawandel sind viele Organismen und Ökosystemleistungen des Meeres und insbesondere auch der Küstengewässer stark bedroht. Der Weltklimarat gibt unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten an, mit denen bestimmte Folgen eintreten können. Die hier dargestellten Veränderungen müssen nicht zwangsläufig bedeuten, dass Arten aussterben, sondern können vielmehr auch zur Konsequenz haben, dass sich die Lebensräume verändern, weil die jeweiligen Organismen in andere Gebiete abwandern, die für sie noch optimale Bedingungen bieten.

Durch die Meereserwärmung wird der Sauerstoffmangel in der Tiefe heute noch verstärkt. Das liegt daran, dass biochemische Prozesse bei höheren Temperaturen grundsätzlich schneller ablaufen, weil die daran beteiligten biochemischen Substanzen reaktiver sind. Das gilt auch für den Stoffwechsel von Bakterien. Die Bakterien bauen die Reste des in die tieferen Wasserschichten abgesunkenen toten Planktons ab, wobei Sauerstoff verbraucht wird. Je höher die Temperaturen sind, desto reger ist der Bakterienstoffwechsel und desto mehr Sauerstoff wird auch verbraucht.

Einzigartige Messwerte aus 60 Jahren

Wie sich die Meereserwärmung heute konkret auswirkt, haben Wissenschaftler für die deutsche Ostsee mithilfe einer einzigartigen Zeitreihe herausgefunden, deren Daten bis zum Jahr 1957 zurückreichen. Regelmäßig messen die Forscher an derselben Position in der Eckernförder Bucht die Temperatur, den Nährstoff- und den Sauerstoffgehalt des Wassers sowie weitere Parameter. Die Daten zeigen, dass im Laufe der vergangenen Jahre der Nährstoffgehalt im Wasser abgenommen hat, was höchstwahrscheinlich auf einen geringeren Eintrag von Land zurückzuführen ist. Erstaunlicherweise kommt es heute in den Frühjahrs- und Sommermonaten trotzdem in den tieferen Wasserschichten zu einem Sauerstoffmangel. In 25 Meter Tiefe hat der Sauerstoffgehalt in der Eckernförder Bucht deutlich abgenommen, wobei die niedrigsten Werte zwischen Mai und September auftreten. Zeitweise ist das Wasser in der Tiefe gänzlich sauerstofffrei.

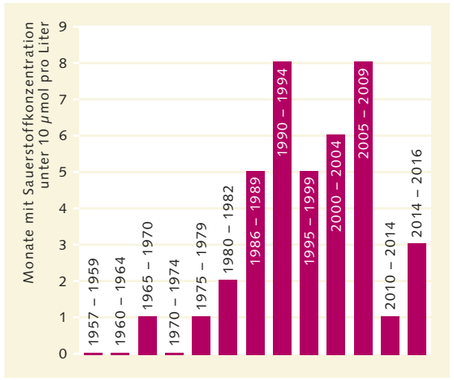
Der Grund dafür ist höchstwahrscheinlich die Meereserwärmung, die an der Ostseeküste zu zweierlei Phänomenen führt, die miteinander gekoppelt sind. Zum einen bewirkt die Erwärmung der oberen Wasserschichten eine stärkere Ausprägung der Sprungschicht, was in den Sommermonaten den Sauerstofftransport in die Tiefe erschwert. Hinzu kommt ein biologisches Phänomen. Im wärmeren Wasser gedeihen besonders gut kleine fädige Algen, die sich auf Großalgen wie dem Blasentang absetzen. Die fädigen Algen werden normalerweise von kleinen Krebsen abgeweidet. Steigt aber die Wassertemperatur, werden die Krebse träger und fressen kaum noch. Die fädigen Algen können sich stärker vermehren und

3.6 > Seit 1957 untersuchen Forscher regelmäßig das Wasser an einem bestimmten Punkt der Eckernförder Bucht an der Ostseeküste. Heute werden dazu moderne Wasserschöpfer verwendet, die in verschiedenen Tiefen Wasserproben nehmen.

wuchern schließlich den Blasentang und andere Großalgen zu. Der Blasentang, der auf Sonnenlicht für die Photosynthese angewiesen ist, stirbt ab. Dadurch steht eine unnatürlich große Menge an abgestorbener Biomasse zur Verfügung, die in die tieferen Wasserschichten absinkt und von Bakterien abgebaut wird. Damit wird verstärkt Sauerstoff verbraucht, der wegen der ausgeprägten Sprungschicht ohnehin nur noch in geringen Mengen vorhanden ist. Vor allem in den Monaten Juli und August können sich dann in der Tiefe sauerstofffreie Zonen bilden.

Seit mehreren Jahren beobachten die Forscher deshalb im Hochsommer einen Zusammenbruch der Lebensgemeinschaft in den bodennahen Wasserschichten der Eckernförder Bucht.

Die Beobachtungen aus der Eckernförder Bucht decken sich mit Messwerten, die man für die ganze Ost-



3.7 > In der Eckernförder Bucht hat seit Ende der 1950er-Jahre die Zahl der Monate zugenommen, in denen in 25 Meter Wassertiefe wenig Sauerstoff vorhanden ist. Dies wird auf die Erwärmung des Ostseewassers zurückgeführt.

see analysiert hat. Seit 1990 wird die Oberflächentemperatur der Ostsee mehrmals täglich von US-amerikanischen Wettersatelliten gemessen, sodass man heute über einen sehr guten Temperaturdatensatz verfügt. Die Daten zeigen, dass die Oberfläche der Ostsee seit 1990 pro Jahrzehnt um 0,6 Grad Celsius wärmer geworden ist. Dieser Zahl liegen Durchschnittswerte für jedes Jahr zugrunde, weil es in der Ostsee starke jahreszeitliche Schwankungen und auch klare regionale Unterschiede gibt. Über den Untersuchungszeitraum von 27 Jahren bedeutet das eine Zunahme von 1,62 Grad Celsius. Durch die steigenden Temperaturen wird insbesondere das Wachstum von Cyanobakterien begünstigt. Bei ruhigem Sommerwetter, bei dem sich das Wasser besonders schnell aufheizt, schwimmen diese Algen auf und sammeln sich in regelrechten Teppichen an der Meeresoberfläche. Dies passiert hauptsächlich in der Zentralen Ostsee. Durch den Wind können sie aber an den Strand gespült werden. Aus Sicht des Menschen besteht ein Problem darin, dass viele Arten von Cyanobakterien giftige Substanzen produzieren. Vermehren sie sich zu stark, können sich giftige Teppiche entwickeln, sogenannte Harmful Algal Blooms (HABs, schädliche Algenblüten). In betroffenen Küstengebieten ist das Baden verboten. Zudem können HABs Meerestiere vergiften, etwa Fische. Für die Küstenfischerei kann das erhebliche Einbußen bedeuten.

Cyanobakterien
Cyanobakterien sind eine Gruppe von Bakterien, die sich dadurch auszeichnen, dass sie Photosynthese betreiben können. Aus diesem Grund wurden sie ursprünglich für Pflanzen gehalten und als Blaualgen bezeichnet. Die Bezeichnung „blau“ rührt daher, dass einige Typen von Cyanobakterien statt des grünen Pflanzenfarbstoffs Chlorophyll den blaugrün schimmernden Farbstoff Phycocyanin besitzen.

Korallen im Wärmestress

Ein Küstenlebensraum, der durch die Meereserwärmung in besonderem Maße gefährdet ist, sind die tropischen Korallenriffe. Sie reagieren zum einen empfindlich auf eine Erhöhung der Wassertemperaturen, zum anderen stehen sie vielerorts insbesondere durch die Verschmutzung der Küstengewässer durch Gift-, Nähr- oder Schwebstoffe zusätzlich unter Druck. Weltweit sind zwar nur etwa 1,2 Prozent der Kontinentalschelfe von Korallen bedeckt, doch sind sie ungeheuer artenreich. Man schätzt, dass sie mehr als 1 Million Arten von Fischen, Muscheln, Korallen und Bakterien beheimaten.

Die Korallenbleiche – eine Symbiose versagt

Korallen sind Nesseltiere, die in Symbiose mit pflanzlichen Einzellern leben. Diese Einzeller, die Zooxanthellen, sitzen im Gewebe der Korallen. Sie sind grün-bräunlich gefärbt und können Photosynthese betreiben. Sie sind es, die den Korallen einen Großteil ihrer Farbe geben und sie mit Zucker versorgen, wofür sie im Gegenzug diverse Nährstoffe erhalten. Zur Korallenbleiche kommt es, wenn diese Symbiose versagt und die Zooxanthellen die Korallen verlassen. Dadurch verlieren die Korallen einen Großteil ihrer Farbe. In aktuellen Forschungsarbeiten konnte man klären, welche verschiedenen Faktoren zum Versagen der Symbiose führen. Eine zentrale Rolle spielt offensichtlich die Meereserwärmung.

Viele tropische Korallenarten haben ihren optimalen Temperaturbereich bei 25 bis 29 Grad Celsius Wassertemperatur. Bereits eine Erhöhung um 1 bis 3 Grad kann bei vielen Arten eine Bleiche auslösen. Die Ursache sind offensichtlich Veränderungen im Stoffwechsel der Zooxanthellen. Bei höheren Temperaturen laufen viele Stoffwechselprozesse – wie zum Beispiel die Photosynthese – schneller ab. Es entstehen vermehrt zellschädigende Radikale, aggressive Moleküle, die aus den Zooxanthellen zum Teil in die Korallen gelangen. Sobald die Korallen eine vermehrte Produktion von Radikalen wahrnehmen, reagieren sie mit einer Schutzreaktion: Sie schleusen die Zooxanthellen aus ihrem Gewebe ins freie Wasser aus. Die Bleiche ist also ein Schutz gegen Zellschädigung.

3.8 > In Japans größtem Korallenriff, dem 400 Quadratkilometer großen Sekiseishoko-Riff, sind nach Messungen mehr als 70 Prozent der Korallen von der Bleiche betroffen.

Die Korallenbleiche ist ein natürliches und umkehrbares Phänomen. Lässt der Umweltstress nach, beispielsweise durch sinkende Wassertemperaturen, schleusen die Korallen wieder Zooxanthellen aus dem sie umgebenden Wasser in ihr Gewebe ein – und sie erholen sich. Heute aber tritt die Bleiche wegen der Erwärmung des Meerwassers in Kombination mit anderen Stressoren in vielen Korallenriffen wesentlich häufiger auf. Gab es früher in einem Riff nur etwa alle 20 Jahre eine Bleiche, so wiederholt sich das Phänomen heute vielerorts im Abstand von nur wenigen Jahren. Den Korallen bleibt damit kaum Zeit, sich zu erholen. Da die Zooxanthellen fehlen, werden die Korallen nicht mehr mit Zucker versorgt. Sie sind unterernährt und geschwächt und können leichter von Krankheitserregern wie etwa Bakterien befallen werden.

Die Erwärmung und andere Stressfaktoren haben dazu geführt, dass heute etwa 20 Prozent der Korallen unwiederbringlich zerstört und mindestens weitere 30 Prozent stark geschädigt sind. Darüber hinaus sind heute insgesamt 60 Prozent aller tropischen Korallenriffe vor Ort durch mindestens einen der folgenden lokal bedingten Aspekte bedroht:

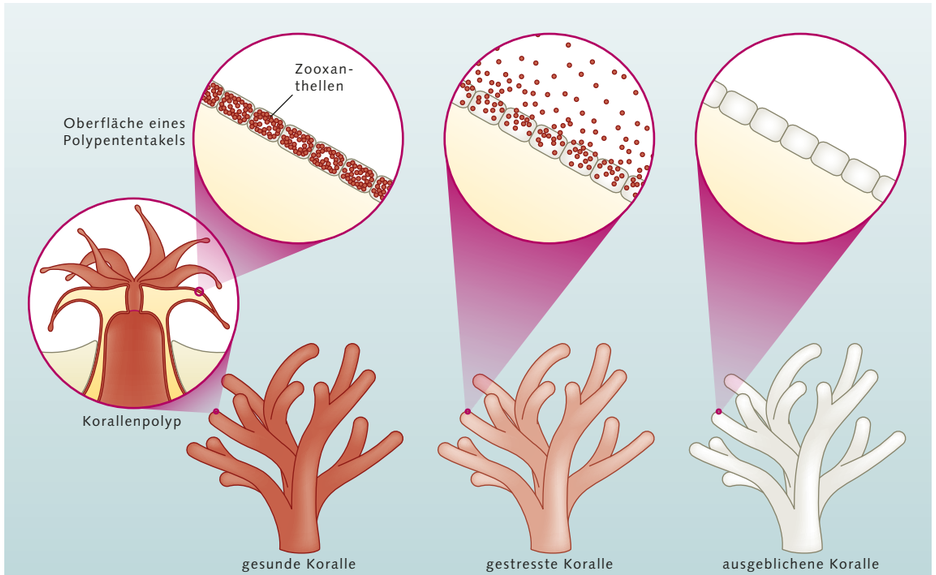
- Überfischung;
- zerstörerische Fischereipraktiken, die das Riff verwüsten, beispielsweise durch ankernde Boote oder durch Netze;
- Küstenentwicklung (Baumaßnahmen);
- Verschmutzung des Meerwassers durch Eintrag von Schadstoffen oder Trübstoffen aus den Flüssen;
- Verschmutzung des Meerwassers vor Ort durch direkte Einleitung von Abwässern an der Küste und von Handels- und Kreuzfahrtschiffen;
- Zerstörung durch Grundberührung von Fähren oder touristischen Booten.

3.9 > Korallen bleichen aus, wenn sie unter Stress geraten – etwa diese Steinkoralle im indonesischen Raja-Ampat-Archipel. Die Korallen stoßen dabei Zooxanthellen ab, farbige Einzeller, mit denen sie in Symbiose leben.

Anpassung an die Erwärmung

Erfreulicherweise können sich Korallen bis zu einem gewissen Grad an die steigenden Meerestemperaturen anpassen. Aktuelle Studien zeigen, dass manche Korallenarten nach einer Bleiche selektiv andere Arten von Zooxanthellen aufnehmen als zuvor. Diese Form der Anpassung wird als adaptive bleaching (adaptive Bleiche) bezeichnet. Die Korallen scheinen solche Zooxanthellenspezies zu bevorzugen, die ihren Stoffwechsel bei zunehmenden Wassertemperaturen nur mäßig steigern und damit weniger Radikale bilden. Diese Zooxanthellen haben allerdings allgemein einen geringeren Stoffumsatz, weshalb sie auch weniger Zucker produzieren. Wenn die Temperaturen im Laufe eines Jahres wieder fallen, kann das für die Korallen den Nachteil haben, dass diese Zooxanthellen dann weniger produktiv sind und ihnen aufgrund des geringeren Stoffumsatzes weniger Zucker liefern. Welche Konsequenzen das letztlich haben könnte, wird aktuell untersucht. Möglicherweise verlangsamt sich durch die mangelnde Versorgung mit Zucker das Wachstum der Korallen. Zudem hat die adaptive Bleiche ihre Grenzen. Sind die Wassertemperaturen dauerhaft zu hoch, kann die Symbiose dennoch versagen und die Bleiche von Neuem beginnen. Das kann an der Radikalbildung in den Zooxanthellen liegen oder an anderen Stoffwechselprozessen, die noch nicht ganz verstanden sind.

Auch die Überdüngung der Küstengewässer mit Nährstoffen aus der Landwirtschaft oder der Aquakultur kann zusätzlich zum Versagen der Symbiose beitragen. Eine wichtige Rolle in diesem Zusammenhang spielt der Stickstoff, ein bedeutender Nährstoff der Zooxanthellen. Steht viel davon zur Verfügung, steigern die Zooxanthellen ihren Stoffwechsel und wachsen stark. Wenn bei diesem Wachstum allerdings ein anderer wichtiger Pflanzennährstoff fehlt, der Phosphor, kann es zu Problemen kommen.



3.10 > Korallen sind im Grunde farblos. Was sie dennoch farbig erscheinen lässt, rührt von Einzellern (Zooxanthellen) her, die im Gewebe der Korallen sitzen. Die Zooxanthellen betreiben Photosynthese und sind grünlich oder rötlich gefärbt. Steht nun die Koralle unter Stress, etwa aufgrund von hohen Wassertemperaturen oder Wasserverschmutzung, stößt sie die Zooxanthellen ab und bleicht deshalb aus. Außerdem fehlen ihr jetzt lebenswichtige Zuckerverbindungen, die normalerweise von den Zooxanthellen bereitgestellt werden. Die Koralle wird dadurch geschwächt.

Phosphor ist ein essenzieller Baustein von Zellmembranen. Fehlt er während des Wachstums, werden die Membranen durchlässiger, und es können vermehrt freie Radikale aus den Zooxanthellen in das Korallengewebe übergehen, was dann wiederum zum Abstoßen und zur Bleiche führt.

Inzwischen gibt es Bestrebungen, abgestorbene Korallenriffe zu restaurieren. Hierzu setzt man Bruchstücke lebender Korallen auf die abgestorbenen in der Hoffnung, dass diese wachsen und sich vermehren. Seit einiger Zeit sind Experten auf der Suche nach besonders stressresistenten Korallenarten, die sich dafür eignen. Besonders robuste scheint es im Roten Meer zu geben. Aufgrund der saisonalen Schwankungen der Wassertemperaturen – mit knapp über 20 Grad Celsius im Winter und oftmals mehr als 30 Grad im Sommer – sind viele Korallen in dieser Region an schwankende Wassertemperaturen angepasst und kämen damit für eine Restaurierung geschädigter Riffe infrage. Zu beachten ist aber, dass weltweit heute mehrere Hundert verschiedene Korallenarten existieren. Für eine Riffrestaurierung aber, schätzen Fachleute, werden sich vermutlich nur einige wenige Arten eignen, die robust genug sind, um in anderen Meeresgebieten mit anderen Umweltbedingungen existieren zu können. Selbst wenn es gelingen sollte, Riffe für den Küstenschutz zu restaurieren, wird dennoch die Artenvielfalt nach der Zerstörung eines Riffes unwiederbringlich verloren sein.

Die Bleiche ist nicht die einzige Folge der Meereserwärmung. Es gibt eine ganze Reihe von Krankheiten, die zum Absterben der Korallen führen. Vor allem bakterielle Infektionen haben zugenommen – zum Beispiel das Weiße Syndrom (Acropora White Syndrome, AWS) oder die Black-Band-Krankheit, (Black Band Disease, BBD). In beiden Fällen sterben die Nesseltiere schon kurze Zeit nach der Infektion ab. Damit sind diese Erkrankungen deutlich gefährlicher als die Bleiche, denn jene ist reversibel. Die Infektionen aber enden in der Regel tödlich. Betroffen von diesen Infektionskrankheiten sind vor allem Riffe in der Karibik, in denen sich die Erkrankungen in einem Korallenriff in nur wenigen Tagen über viele Meter ausbreiten können. Man nimmt an, dass die Korallen in solchen Fällen durch die Erwärmung geschwächt sind und nicht ausreichend Abwehrstoffe produzieren können, mit denen sie Krankheitserreger normalerweise in Schach halten.

Zu warm für den Fischnachwuchs

Meeresorganismen sind an bestimmte Wassertemperaturen angepasst. Ändert sich die Temperatur, kann es zu massiven Artverschiebungen in den marinen Nahrungsnetzen kommen. So kann man bereits seit einigen Jahren beobachten, dass Meeresorganismen aus südlichen, wärmeren Meeresgebieten in kühlere Regionen im Norden vordringen. Bei vielen Arten sind die verschiedenen Lebensstadien unterschiedlich empfindlich gegenüber der Erwärmung. Der Toleranzbereich junger Entwicklungsstadien, insbesondere der Eier und Larven, ist oftmals extrem eng und daher entscheidend für den Einfluss des Klimawandels auf die jeweilige Art. Dies gilt auch für den im Nordostatlantik beheimateten Kabeljau, einen der weltweit wichtigsten Speisefische. Der Kabeljau laicht im Frühling bis zu 5 Millionen Eier pro Fisch bei Wassertemperaturen zwischen 3 und 7 Grad Celsius ab, weil sich die Embryonen in den Fischeiern in diesem Temperaturbereich am besten entwickeln können. Die wichtigsten Laichgebiete im nordöstlichen Atlantik befinden sich in Küstennähe vor Norwegen rund um die Inselgruppe der Lofoten sowie im Skagerrak und im Kattegat zwischen Dänemark, Norwegen und Schweden.

Frühere Experimente haben gezeigt, dass Kabeljauembryonen empfindlich auf versauerndes Wasser reagieren. Jetzt wurde erstmals untersucht, wie sich eine zusätzliche Meereserwärmung auf die Entwicklung des Kabeljaus auswirkt. So wurden befruchtete Kabeljaueier bis zum Schlüpfen der Fischlarven bei verschiedenen Wassertemperaturen und Säuregraden in Aquarien gehalten. Auf diese Weise lassen sich Bedingungen simulieren, wie sie im Laufe dieses Jahrhunderts im Meer auftreten könnten. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits eine Erhöhung der Temperatur um 3 Grad zum Absterben der Eier oder zu mehr Missbildungen der Larven führt. Die Embryonen in den Fischeiern reagieren offenbar vor allem in einer frühen Phase der Entwicklung empfindlich auf zu warmes Wasser. Wie die Experimente verdeutlichen, verschlimmert sich die Situation, wenn zusätzlich das Wasser versauert. Die Zahl der geschädigten oder sterbenden Embryonen erhöht sich um weitere 20 bis 30 Prozent.

Darüber hinaus wird versucht, anhand von Klimamodellen zu ermitteln, inwieweit sich das Verbreitungsgebiet des Kabeljaus durch die künftige Meereserwärmung und -versauerung verändern wird. Hierbei wird insbesondere untersucht, ob in den bekannten Laichgebieten kritische Temperaturen und Säuregrade auftreten werden. Die Resultate der Studie sind alarmierend. Entlang der norwegischen Küste werden demnach bis zu 40 Prozent weniger Kabeljaularven aus den Eiern schlüpfen. Dies hätte höchstwahrscheinlich gravierende Folgen für das gesamte Ökosystem und für die Kabeljaufischerei in der Barentssee nördlich von Norwegen. Seit Jahrhunderten sichert dieser **Bestand** das Auskommen norwegischer und russischer Fischer, die mit dieser Fischerei jedes Jahr etwa 2 Milliarden Euro verdienen. Ein Zusammenbruch der Population wäre daher katastrophal und existenzbedrohend für den Großteil der Bevölkerung in dieser Region.

Das ganze Ausmaß der durch den Klimawandel bedingten Folgen für den Kabeljaunachwuchs lässt sich allerdings nur schwer abschätzen. Der Kabeljau legt seine Eier im offenen Wasser ab. Die Eier und die später daraus schlüpfenden Larven werden dann mit der Meeresströmung in Gebiete transportiert, die optimale Bedingungen für das Heranwachsen der Jungfische bieten. Sollte der Kabeljau künftig im Zuge der Meereserwärmung weiter nach Norden wandern, wird er möglicherweise in anderen Meeresgebieten mit anderen Strömungsbedingungen laichen. Ob diese ideale Bedingungen für die Entwicklung des Nachwuchses bieten werden, ist ungewiss.

Nicht nur der Kabeljau, sondern auch andere Meereslebewesen werden aktuellen Studien zufolge künftig weiter nach Norden wandern beziehungsweise im Süden seltener werden. So wird für die Küstengewässer Großbritanniens mit großen Verlusten bei der Fischerei gerechnet. Hier wurde untersucht, wie sich die Fischerei nach Kabeljau und Wolfsbarsch sowie nach Herzmuscheln, Jakobsmuscheln und Miesmuscheln entwickeln wird. Insgesamt machen diese fünf Arten momentan etwa die Hälfte des gesamten Fischfangs in Großbritannien aus. Grundlage der Analysen waren wiederum die vier RCP-Szenarien des Weltklimarats. Nach dem RCP2.6-Szenario wird für Muschelarten bis zum Ende dieses Jahrhunderts ein Rückgang der Fangmengen um bis zu 30 Prozent, nach dem RCP8.5-Szenario um bis zu 60 Prozent erwartet. Wobei sich die Situation regional in England, Nordirland, Schottland und Wales etwas unterschiedlich darstellt. Für Kabeljau und Wolfsbarsch werden im RCP2.6-Szenario kaum Veränderungen beziehungsweise leichte Einbußen erwartet. Sollte sich aber das RCP8.5-Szenario bewahrheiten, dürfte die Menge an gefangenem Kabeljau und Wolfsbarsch bis zum Jahr 2100 um bis zu 20 Prozent abnehmen. Besonders stark betroffen wäre in diesem Fall England, das am weitesten südlich liegt. In England wird man daher vermutlich auf andere Arten umsteigen müssen, um die Verluste zu kompensieren, beispielsweise Arten aus dem Mittelmeer, die sich im Zuge der Meereserwärmung weiter nach Norden ausbreiten werden.

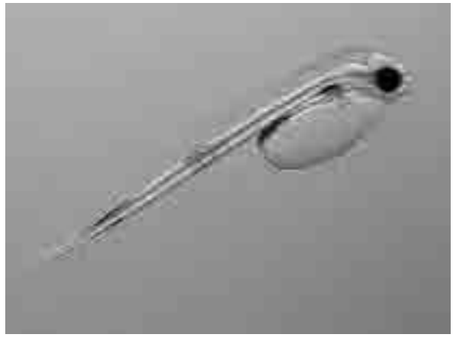
3.11 > Der Kabeljau ist einer der wirtschaftlich bedeutendsten Fische im Nordostatlantik. Durch die Meereserwärmung könnten sich die Wachstumsbedingungen für Kabeljaueier und -larven verschlechtern. Dadurch könnte der große Kabeljaubestand nördlich von Norwegen erheblich schrumpfen.

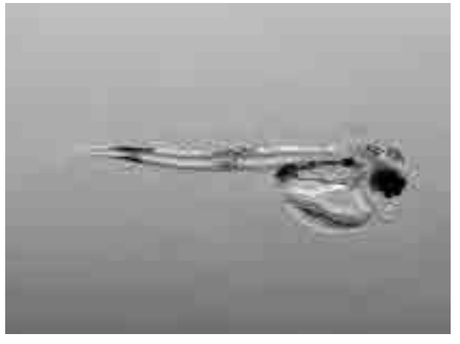
Versalzende Flussdeltas

Die durch den anthropogenen Treibhauseffekt verursachte Erderwärmung kann sich auch indirekt auf Fischgemeinschaften in Küstengewässern auswirken. Das verdeutlicht die Situation im Sine-Saloum-Delta an der Küste des westafrikanischen Staates Senegal. Der Senegal liegt im Übergangsbereich zwischen der trockenen Sahelzone im Norden und der feuchten Zone des Tropenwaldgürtels weiter südlich. Da die Regenmenge in der Sahelzone seit den 1960er-Jahren deutlich abgenommen hat, fließt heute von Landseite aus nur noch sehr wenig Süßwasser in das Delta ab. Das hat dazu geführt, dass das Salzwasser aus dem Atlantik sehr tief in das Delta eingedrungen ist. Im Oberlauf der Zuflüsse kann der Salzgehalt des Wassers durch Verdunstung sogar bis auf das 3-Fache der Meerwasserkonzentration steigen. Dadurch sind jene Fischarten aus dem Delta verschwunden, die nur bei relativ niedrigem Salzgehalt leben können. Dazu zählen unter anderem die als Speisefische sehr beliebten Tilapien. Stattdessen dominieren heute in weiten Teilen des Deltas kleinere heringsartige Fische wie der Bonga, der einen deutlich geringeren Marktwert als der Tilapia erzielt. Insgesamt nehmen die Fischereierträge daher ab. Allgemein findet man im Sine-Saloum-Delta weniger Fischarten als in vergleichbaren westafrikanischen Deltas, die weiter südlich im feuchten Tropengürtel liegen und noch starke Flusswassereinträge aufweisen.

Plötzliche Massenvermehrung nach einem halben Jahrhundert

Die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften in Küstenmeeren kann sich im Zuge der Meereserwärmung nicht allein durch Verschiebungen verändern, sondern auch durch Einschleppung – wenn Organismen oder Larven im **Ballastwasser** von Schiffen oder als Bewuchs auf Schiffsrümpfen unbeabsichtigt von einem Meeresgebiet in ein anderes transportiert werden. Auch durch Aqua-





3.12 > Links ist eine intakte Kabeljaularve zu sehen, rechts eine geschädigte. Daran wird deutlich, wie zerstörerisch sich Wärme und Versauerung auf junge Lebensstadien auswirken können.

3.13 > Die Australische Seepocke *Austrominius modestus* findet heute dank des zunehmend milden Klimas in der Nordsee ideale Lebensbedingungen. Auf der Insel Sylt hat sie die einheimische Art *Semibalanus balanoides* fast verdrängt.

risten, die Organismen aussetzen, können ortsfremde Arten in neue Gebiete gelangen. Diese Einschleppung neuer Tierarten (Neozoen) und Pflanzenarten (Neophyten) wird auch als Bioinvasion bezeichnet.

Manche eingeschleppte Organismen können sich in der neuen Heimat etablieren und vermehren. Finden sie sehr günstige Bedingungen vor, können sie sogar einheimische Arten verdrängen und den Lebensraum dadurch verändern. Inzwischen gibt es Belege dafür, dass auch die Meereserwärmung zu einer solchen Veränderung beiträgt, wie das Beispiel der *Austrominius modestus* zeigt. Diese australische Seepockenart wurde in den 1940er-Jahren vermutlich mit Kriegsschiffen oder Flugbooten aus Australien in die britischen Gewässer eingeschleppt und verbreitete sich von dort in der ganzen Nordsee. Auf der deutschen Insel Sylt wurde sie erstmals 1955 nachgewiesen. Sie konnte sich dort vermehren, kam aber über viele Jahrzehnte nur in sehr geringer Zahl vor. Die auf Sylt heimischen Seepockenarten *Semibalanus balanoides* und *Balanus crenatus* dominierten. Dieses Verhältnis kehrte sich 2007 um, als es erstmals zu einer Massenvermehrung der Australischen Seepocke kam.

Seepocken besiedeln im Gebiet um Sylt vorzugsweise Muschelbänke. 2007 waren die Muscheln erstmals überwiegend von jungen Australischen Seepocken überwachsen. Die Bewuchsdichte betrug 70 000 Individuen pro Quadratmeter. Im Vergleich dazu waren es 1997 gerade einmal 70 Individuen pro Quadratmeter gewesen. Grund für die plötzliche Massenvermehrung ist vermutlich das sich ändernde Klima in den vergangenen Jahren. Seit geraumer Zeit gibt es generell einen Trend zu wärmeren Sommern und milderen Wintern. So ist beispielsweise die durchschnittliche Lufttemperatur zwischen April und August auf Sylt heute gut 2 Grad höher als 1950. Die Australische Seepocke findet Jahrzehnte nach ihrer Einschleppung jetzt offenbar ideale Bedingungen, um sich massiv zu vermehren.

Für die Muscheln ist der starke Bewuchs ihrer Schalen mit der Australischen Seepocke unproblematisch. Das Beispiel zeigt aber, wie schnell eine Massenvermehrung invasiver Arten sich vollziehen kann. Sofern die invasiven Arten einheimische Arten verdrängen oder sich sogar räuberisch ernähren, kann ein Ökosystem schnell stark geschädigt werden.

DIE OZEANVERSAUERUNG

Kohlendioxid verändert den pH-Wert des Wassers

Während die durch den Menschen verursachte Erderwärmung schon seit mehreren Jahrzehnten in der Wissenschaft und Öffentlichkeit diskutiert wurde, blieb die Ozeanversauerung lange unbeachtet. Erst vor einem Jahrzehnt wiesen erste Forscher darauf hin, dass sich mit der Zunahme an CO_2 in der Atmosphäre die Chemie des Meerwassers massiv verändern wird.

Chemiker bestimmen den Säuregrad einer Flüssigkeit anhand des pH-Wertes. Je kleiner der Wert ist, desto saurer ist die Flüssigkeit. Der pH-Wert reicht von 0 (sehr sauer) bis 14 (sehr alkalisch). Der Wert 7 wird als neutral bezeichnet und markiert den Übergang von sauer zu alkalisch. Seit der industriellen Revolution Mitte des 18. Jahrhunderts ist der pH-Wert der Ozeane von durchschnittlich 8,2 auf 8,1 gesunken. Mit Werten um 8 ist das Meerwasser streng genommen eine schwache Lauge und keine Säure. Da sich der pH-Wert durch die Aufnahme von CO_2 in die Ozeane aber in Richtung Säure verschiebt, spricht man dennoch von einer Versauerung des Wassers. Bis zum Jahr 2100 könnte der pH-Wert von derzeit 8,1 um weitere 0,3 bis 0,4 Einheiten abnehmen. Das klingt vernachlässigbar klein, doch ist die pH-Wert-Skala logarithmisch. Sie ist sozusagen mathematisch gestaucht. Tatsächlich würde das Meer dann 2- bis 2,5-mal so sauer sein wie im Jahr 1860. Besonders von der Versauerung betroffen sind die kalten arktischen und antarktischen Gewässer. Weil sich CO_2 besonders in kaltem Wasser löst, versauern diese Meeresregionen stärker als wärmere Regionen.

Für die Hochsee und küstenferne Gebiete lässt sich recht gut vorhersagen, wie sich die bereits heute nachweisbare Versauerung künftig fortsetzen wird, da dort im Hinblick auf die Chemie des Wassers recht konstante Bedingungen herrschen. Wie sich das CO_2 auf die Küstengewässer auswirken wird, ist hingegen schwieriger zu bestimmen. Die Chemie des Wassers in Küstennähe wird stark durch Substanzen bestimmt, die von Landseite aus in das Küstenmeer eingetragen werden, vor allem Karbonat-Anionen und Hydrogenkarbonat-Ionen, die die Grundsubstanz vieler Mineralien sind. Durch Verwitterung von Gesteinen werden sie mit dem Regen über die Flüsse in die Küstengewässer gespült. Sie sind auch Hauptbestandteil von Kalk, den man zum Beispiel für die Entsäuerung von Böden einsetzt. Gelangen viele Karbonat-Anionen und Hydrogenkarbonat-Ionen in die Küstengewässer, kann die Versauerung damit abgepuffert werden. Als Maß für dieses Puffervermögen benutzt man den Begriff der Alkalinität.

Komplexe Wechselwirkungen zwischen Land und Küstenmeer

Diese Wechselwirkung zwischen Land und Küstenmeer wurde intensiv für die Ostsee untersucht, einem Binnenmeer, das von Land umgeben ist und nur einen schmalen Zugang zur Nordsee und damit zum Nordostatlantik besitzt. Eine Analyse für die vergangenen 20 Jahre ergab, dass der Eintrag von Karbonaten von Landseite aus je nach Jahreszeit und Ostseegebiet die Zunahme an CO_2 und die Versauerung zu einem Teil oder ganz kompensiert – je nach Alkalinität im Wasser.

Die Alkalinität des Wassers wiederum ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig, beispielsweise den Niederschlägen an Land. Regnet es heftiger, verwittern die Gesteine stärker, sodass mehr Alkalinität ausgewaschen wird und in die Flüsse gelangt. Auch aufgrund der Kalkung von Ackerböden in den landwirtschaftlich genutzten Gebieten rund um die Ostsee gelangt Alkalinität mit dem Regenwasser in die Flüsse und somit ins Meer.

Für Nordwesteuropa gehen die meisten Klimastudien davon aus, dass mit dem Klimawandel die Stärke der Niederschläge zunehmen wird, da mit der Erwärmung der Atmosphäre die Verdunstung über dem Meer zunimmt. Die in Nordwesteuropa vorherrschenden Winde werden damit mehr Feuchtigkeit vom Nordatlantik herantragen. Verstärken sich die Niederschläge, wird auch mehr Wasser von Land ins Meer abfließen und entsprechend mehr Alkalinität ins Meer gelangen. So könnte die Versauerung im Bereich der Ostsee aufgrund der geografischen Lage und der starken Zuflüsse von Land auch künftig zu einem Teil oder ganz abgepuffert werden. Natürlich wird mit der Zunahme der Niederschläge auch mehr Alkalinität in den Nordostatlantik gelangen. Im kleinen Binnenmeer Ostsee aber wird der Einfluss viel schneller deutlich als im offenen Meer mit seinen beträchtlich größeren Wassermengen.

Alkalinität
Der Säuregrad (pH-Wert) einer Flüssigkeit wie zum Beispiel Meerwasser lässt sich verändern, indem man ihr Alkalinität zuführt, etwa durch Flüssigkeiten mit hoher Alkalinität. Diese puffert die Säure ab. Man spricht daher vom Säurebindungsvermögen. Der Grad der Alkalinität und damit das Säurebindungsvermögen wird durch den Gehalt an Karbonat-Anionen und Hydrogenkarbonat-Ionen bestimmt, die alkalisch wirken und damit Gegenspieler der Säure sind. Karbonat-Anionen und Hydrogenkarbonat-Ionen haben eine hohe Affinität zu Wasserstoff-Ionen, die Flüssigkeiten sauer machen. Indem sie einen Teil der Wasserstoff-Ionen gewissermaßen wegfangen, puffern sie die Säure ab.

Wie stark versauern die Küstengewässer?

Das in der Atmosphäre enthaltene Gas Kohlendioxid (eigentlich Kohlenstoffdioxid, CO_2) löst sich leicht in Wasser. Das kennt man vom Mineralwasser, das man mit Kohlendioxid versetzt. Bei diesem Lösungsprozess reagiert das CO_2 mit den Wassermolekülen (H_2O). Kohlendioxid wird also bei der Aufnahme aus der Atmosphäre teilweise umgewandelt – zu Kohlensäure (H_2CO_3), Hydrogenkarbonat-Ionen (HCO_3^-) und Karbonat-Anionen (CO_3^{2-}). Diese Umwandlung wird in 3 Gleichungen dargestellt.

$$CO_2 + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3$$

$$H_2CO_3 \longleftrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

$$HCO_3^- \longleftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$$

Die Gesamtheit aller sich vom CO_2 ableitenden chemischen Spezies im Wasser, also Kohlendioxid, Kohlensäure, Hydrogenkarbonat-Ionen und Karbona-Anionen, bezeichnet man als gelösten anorganischen Kohlenstoff (DIC = dissolved inorganic carbon).

Die verschiedenen Formen des DIC können sich über die in den Formeln dargestellten chemischen Reaktionen ineinander umwandeln.

Dieses sogenannte CO_2-Gleichgewichtssystem bestimmt den Gehalt freier Wasserstoff-Ionen (H^+) im Meerwasser und damit den pH-Wert, der ein Maß für die Menge freier Wasserstoff-Ionen in einer Flüssigkeit ist. Das „p" steht hierbei für Potenz und das „H" für die Abkürzung des lateinischen Wortes Hydrogenium (Wasserstoff). Die Reaktion des Kohlendioxids im Meerwasser läuft summarisch folgendermaßen ab: Zunächst reagiert das Kohlendioxid mit dem Wasser zu Kohlensäure. Die Kohlensäure spaltet dann ein H^+-Ion ab, wobei sich ein Hydrogenkarbonat-Ion bildet. Dieses Hydrogenkarbonat-Ion kann dann in einem weiteren Schritt ein H^+-Ion abspalten und dabei Karbonat bilden.

Betrachtet man Gleichung 1 und 2, die im Wasser miteinander gekoppelt sind, wird deutlich, dass, je mehr CO_2 ins Wasser gelangt, umso mehr H^+-Ionen entstehen, womit das Wasser langsam saurer wird. Fügt man dem System hingegen Alkalinität in Form von Hydrogenkarbonat-Ionen und Karbonat-Anionen hinzu, werden Wasserstoff-Ionen abgefangen, sodass der pH-Wert steigt und das Wasser alkalischer wird.

Grundsätzlich hat die Alkalinität im Wasser eine doppelte Funktion. Zum einen beeinflusst sie den pH-Wert über die Reaktionen mit den H^+-Ionen. Zum anderen ist sie fundamental wichtig, damit kalkbildende Meeresorganismen wie Korallen, Muscheln, Schnecken und viele Planktonorganismen ihre Panzer und Schalen bilden können. Die Lebewesen nehmen dazu Karbonat-Anionen und Kalzium-Ionen (Ca^{2+}) aus dem Wasser auf und produzieren daraus das sogenannte Kalziumkarbonat ($CaCO_3$), jenen Baustoff, aus dem auch die Knochen des Menschen bestehen.

Je mehr Karbonat-Anionen im Wasser enthalten sind, desto besser können die Tiere Kalziumkarbonat produzieren. Da die Ozeanversauerung langfristig zu einer Abnahme der Konzentration an Karbonat-Anionen im Meerwasser führt, nimmt die Fähigkeit der Meeresorganismen ab, Schalen und Skelette zu bilden. Ist im Wasser sehr wenig Karbonat vorhanden, kann die Versauerung des Wassers im Extremfall sogar zur Auflösung von Kalkschalen und Skeletten führen.

3.14 > Die mikroskopisch kleinen Coccolithophoriden (Kalkalgen) bilden Panzerplatten aus Kalziumkarbonat (Kalk). In Jahrmillionen haben sich die Panzer abgestorbener Coccolithophoriden am Meeresboden zu mächtigen Kalkschichten angesammelt. Auch die Kreidefelsen von Dover bestehen aus solchen Panzern.

Der Versauerung widerstehen?

In den vergangenen Jahren wurde vielfach untersucht, wie Meeresorganismen auf die Versauerung reagieren. Bekannt wurden beispielsweise Bilder von Kalkalgen, sogenannten Coccolithophoriden, bei denen sich die Kalkpanzer mit sinkendem pH-Wert langsam auflösten. Grundlage waren Laborexperimente, die übereinstimmend den Schluss nahelegten, dass viele Organismen mit der zunehmenden Versauerung zugrunde gehen und Arten aussterben könnten. Inzwischen liegen allerdings differenziertere Ergebnisse vor, die zeigen, dass das nicht zwangsläufig der Fall sein muss. So zeigt sich beispielsweise, dass sich bestimmte Gruppen von Organismen offenbar an die Versauerung anpassen können. So haben Experimente für die Coccolithophoriden-Art *Emiliania huxleyi* ergeben, dass nach etwa 500 Generationen eine gewisse Resistenz entsteht und die Kalkbildung auch in saurerem Meerwasser wieder besser funktioniert. Da sich *Emiliania* schnell reproduziert, ist die 500. Generation nach etwa einem halben Jahr erreicht. Welche Stoffwechselveränderungen dieser Anpassung an die Versauerung zugrunde liegen, versucht man derzeit herauszufinden.

In diesem Zusammenhang sind auch Freilandexperimente vor der schwedischen Ostseeküste interessant, in denen untersucht wurde, wie pflanzliches Plankton – Grundlage der Nahrungsnetze im Meer – auf eine Versauerung reagiert. Über sechs Monate wurde dort Ostseewasser mit CO_2 begast, sodass sich im Wasser ein CO_2-Gehalt einstellte, der etwa dem Wert entsprach, der sich bei einer Verdoppelung des heutigen CO_2-Gehalts der Atmosphäre ergeben würde. Erstaunlicherweise konnten im Vergleich zu unbegastem Meerwasser nur geringe Veränderungen der Planktongemeinschaft zu bestimmten Zeitpunkten ihrer Entwicklung festgestellt werden. Auf einige Organismengruppen der Planktongemeinschaft wirkte sich die CO_2-Erhöhung leicht negativ, auf andere leicht förderlich aus. Die Forscher nehmen an, dass viele der Organismen wegen der natürlichen Schwankungen des pH-Wertes in der Ostsee je nach Alkalinität geringere pH-Werte tolerieren können.

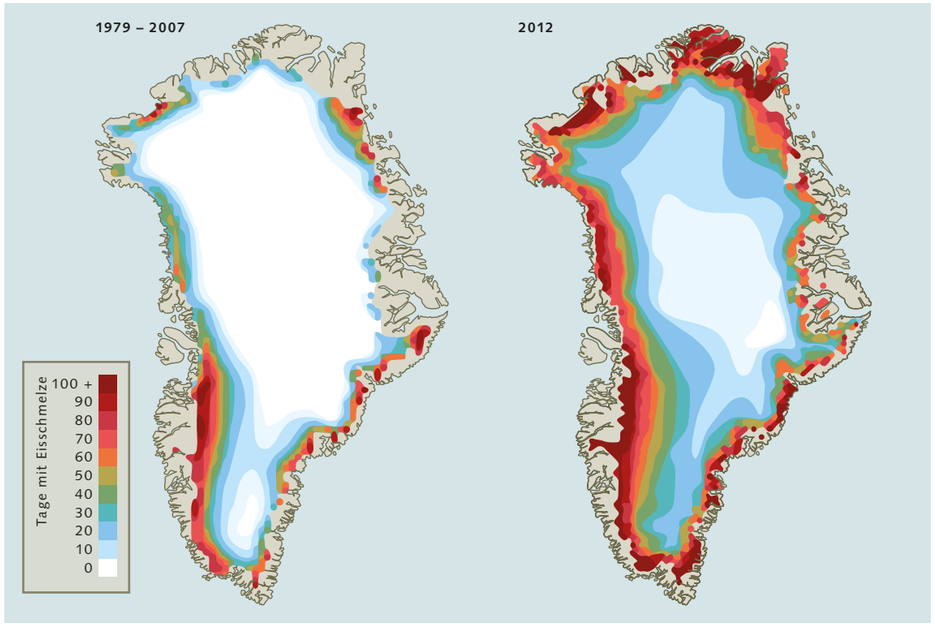
Metastudien, in denen die Ergebnisse von mehreren Hundert Publikationen zur Ozeanversauerung analysiert und zusammengefasst wurden, zeigen, dass es aber nach wie vor Organismen in anderen Küstengebieten gibt, die durchaus auf die Versauerung reagieren – insbesondere in Meeresgebieten, in denen die chemischen Bedingungen im Wasser nahezu konstant sind. Neben vielen Gebieten der Hochsee sind dies vor allem Küstengewässer in heißen und trockenen Regionen, in denen keine Flüsse ins Meer münden. Betroffen sind vor allem jene Meeresorganismen, die Kalkschalen oder Skelette bilden. Es zeigt sich, dass die Kalkbildung in versauertem Wasser bei Korallen, Muscheln und Schnecken je nach untersuchter Tiergruppe um 22 bis 39 Prozent abnimmt. Auch beim Wachstum ergeben sich Veränderungen. Nimmt man alle kalkbildenden Meeresorganismen zusammen, dann zeigt sich, dass sie durchschnittlich um bis zu 17 Prozent kleiner als ihre Artgenossen sind, die in Wasser mit üblichem pH-Wert leben.

Geringere Artenvielfalt im Korallenriff

Wie sich eine zunehmende Versauerung in Korallenriffen im Osten Papua-Neuguineas auswirkt, zeigen Studien australischer Forscher. In diesen Gebieten steigt CO_2 aus vulkanischen Schloten aus dem Meeresboden auf, sodass es zu einer Art natürlicher Versauerung des Meerwassers kommt. Hier haben sich Korallengemeinschaften entwickelt, die mit dem erhöhten CO_2-Gehalt des Wassers und einem relativ niedrigen pH-Wert zurechtkommen. Das Gebiet ist damit gewissermaßen ein Freilandlabor, das die weltweite Ozeanversauerung exemplarisch vorwegnimmt. Je näher die Korallen den CO_2-Quellen sind, desto saurer ist das Wasser, sodass man hier je nach Entfernung von den Quellen Bedingungen findet, wie sie in 20, 50 oder 100 Jahren weltweit im Meer herrschen könnten. Statt fein verästelter Steinkorallen, die besonders empfindlich auf die Versauerung reagieren, findet man hier vor allem die robusten und dicklichen *Porites*-Korallen, die äußerlich einem Blumenkohl ähneln. Insgesamt ist die Artenvielfalt in diesen Riffbereichen deutlich geringer als in Gebieten mit normalem pH-Wert. Bei einem pH-Wert von 7,7, der im Jahr 2100 tatsächlich erreicht sein könnte, sind die Lebensbedingungen so ungünstig, dass selbst die *Porites*-Korallen nicht mehr wachsen können.

Gewinner und Verlierer der Ozeanversauerung

Während vor allem die kalkbildenden Lebewesen benachteiligt sind, zählen die Cyanobakterien, ehemals als Blaualgen bezeichnet, möglicherweise zu den Gewinnern. Cyanobakterien benötigen genau wie Pflanzen CO_2, um daraus mithilfe der Photosynthese Zucker aufzubauen. Sie verfügen deshalb über Stoffwechselprozesse, die CO_2 in ihrem Körper konzentrieren und der Photosynthese zur Verfügung stellen. Doch diese Kohlenstoff-Konzentrationsmechanismen (Carbon Concentrating Mechanisms, CCMs) verbrauchen Energie. Steht in der Umgebung viel CO_2 zur Verfügung, werden die CCMs entlastet, wodurch Cyanobakterien und Pflanzen Energie sparen können. Diese Energie können sie stattdessen für stärkeres Wachstum nutzen. Die Vorfahren der heutigen Cyanobakterien existierten bereits vor etwa 2 Milliarden Jahren, zu einer Zeit, als die Erdatmosphäre viel Kohlendioxid und kaum Sauerstoff enthielt. Deshalb sind auch die heute lebenden Cyanobakterien noch gut an hohe CO_2-Konzentrationen beziehungsweise niedrige pH-Werte im Wasser angepasst.



3.15 > Experten erwarten, dass die grönländische Eismasse mit der Erderwärmung künftig stärker tauen wird. Ein besonders starkes Schmelzen war bereits im Jahr 2012 zu beobachten. Wegen außergewöhnlich milder Lufttemperaturen hielt das Tauen an der Oberfläche der Gletscher in weiten Teilen der Insel für sehr viel längere Zeit an als im Durchschnitt der Jahre 1979 bis 2007.

DER MEERESSPIEGELANSTIEG

Eine unmittelbare Gefahr für Küstenbewohner

Die Auswirkungen des Klimawandels dürften die Bewohner vieler Küstenregionen vor allem durch den Meeresspiegelanstieg zu spüren bekommen, weil dadurch Wohngebiete, Industrie- und Wirtschaftszentren und Ackerland verloren gehen. Zudem laufen durch den steigenden Meeresspiegel heute Sturmfluten höher auf. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass nicht allein der menschengemachte Treibhauseffekt, sondern auch natürliche Prozesse die Höhe des Wasserstands beeinflussen. Allgemein kann man unterscheiden zwischen:

- eustatischen, klimatisch bedingten, global wirksamen Ursachen, die zu einer Zunahme des Wasservolumens in den Ozeanen führen – etwa wenn nach Eiszeiten das Eis schmilzt und der Meeresspiegel steigt –;
- isostatischen, meist tektonisch bedingten Ursachen, die sich vor allem regional auswirken. Dazu gehört das Absinken oder Heben von Landmassen, das sich

3.16 > Das Schmelzen der grönländischen Gletscher während der Sommermonate wie hier in der Nähe des Ortes Qaanaaq ist ein natürlicher Vorgang. Seit einigen Jahren aber scheint sich das Auftauen der Eismassen zu verstärken.

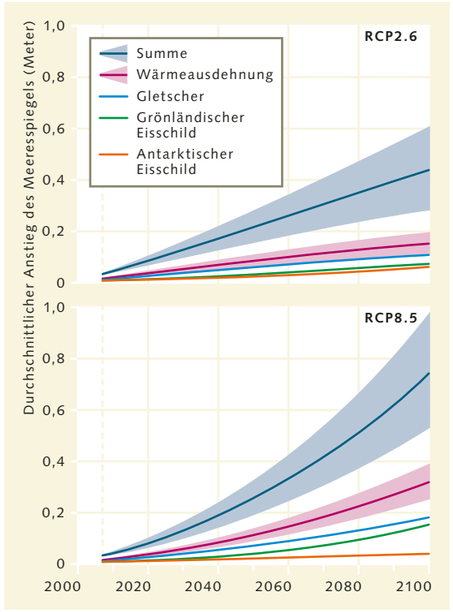
durch den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten ergibt. Eispanzer, die sich während der Eiszeiten bilden, senken durch ihr hohes Gewicht die Erdkruste in bestimmten Regionen ab, wodurch der Meeresspiegel relativ zum Land ansteigt. Taut das Eis, hebt sich die Landmasse wieder – ein Phänomen, das noch heute an der skandinavischen Landmasse zu beobachten ist.

Die Höhe des Meeresspiegels kann über Jahrmillionen um mehr als 200 Meter schwanken. Doch kann sich die Höhe auch innerhalb relativ kurzer Zeit recht stark verändern. So sind innerhalb weniger Jahrhunderte Höhenänderungen um die 10 Meter möglich. Begannen nach der letzten Eiszeit die Temperaturen auf der Erde vor etwa 15 000 Jahren wieder stärker anzusteigen, ist der Meeresspiegel seitdem um etwa 125 Meter gestiegen. Zunächst kam es zu einem relativ starken Anstieg. Diese Phase dauerte bis vor etwa 6000 Jahren an. Seitdem hat sich der Meeresspiegel mit Schwankungen von wenigen Zentimetern pro Jahrhundert lange Zeit nur geringfügig verändert. Gemessen an den geringen Veränderungen während der letzten 6000 Jahre, hat sich der Anstieg zuletzt aber wieder beschleunigt. So ist der Meeresspiegel zwischen 1880 und 2009 um 21 Zentimeter gestiegen, wobei der Anstieg in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts relativ schwach, in den vergangenen Jahrzehnten aber zunehmend steiler verlief. So ist der Meeresspiegel seit 1990 im Mittel jährlich um etwa 3 Millimeter gestiegen. Dabei tragen heute folgende Faktoren zum Meeresspiegelanstieg bei:

- 15 bis 50 Prozent 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.

Eine Frage des Standorts

Der Meeresspiegelanstieg, für die Küsten die wohl schwerwiegendste Folge des Klimawandels, wird in diesem Jahrhundert aber nicht dazu führen, dass wie bei einer überlaufenden Badewanne Küstengebiete permanent überflutet werden. Auch betrifft der Meeresspiegelanstieg



3.17 > Derzeit steigt der Meeresspiegel jährlich im Mittel um etwa 3 Millimeter. Je nachdem, wie sich der Treibhauseffekt künftig verstärkt, wird der weitere Anstieg schwächer oder stärker ausfallen.

nicht alle Küsten gleichermaßen. Zwar ist in den Klimaszenarien des Weltklimarats meist von einem durchschnittlichen globalen Meeresspiegelanstieg die Rede. Tatsächlich aber wird der Meeresspiegel in Relation zum Land regional unterschiedlich stark steigen. So differenziert man heutzutage zwischen dem sogenannten globalen Meeresspiegel, dem regionalen Meeresspiegel und dem lokalen Meeresspiegel.

Andere Regionen, anderer Meeresspiegel

Der regionale Meeresspiegel wird vor allem durch regionale Einflussgrößen bestimmt – etwa durch das Heben oder Senken von Landmassen oder durch Änderungen von regionalen Wind- und Meeresströmungen. Das Klimaphänomen El Niño zum Beispiel führt an der Pazifikküste Südamerikas dazu, dass der Meeresspiegel um bis zu 40 Zentimeter von dem dort sonst üblichen mittleren Wasserstand abweicht. El

Niño tritt unregelmäßig etwa alle 3 bis 10 Jahre im Pazifik zwischen Indonesien und Peru auf, wo sich aufgrund einer Abschwächung der vorherrschenden **Passatwinde** die Meeresströmungen umkehren. Normalerweise treiben die kräftigen Passatwinde das Oberflächenwasser von der Pazifikküste Südamerikas aufs offene Meer. Während El Niño aber ist der Passatwind schwach und das gestaute Wasser im Westpazifik schwappt in Richtung Amerika zurück. Die Umkehr der Strömungsrichtung macht sich dann auch im Wasserstand an der Küste bemerkbar.

Ferner besitzen die mächtigen Festlandgletscher in Grönland oder der Antarktis großen regionalen Einfluss. Die Masse dieser Gletscher ist so groß, dass die Erdanziehung in diesem Bereich größer als in anderen Meeresgebieten ist. So gilt der physikalische Grundsatz, dass Körper mit größerer Masse eine stärkere Anziehungskraft besitzen. Im Bereich der Gletscher wird das Meerwasser deshalb stärker angezogen, sodass der Meeresspiegel um Grönland und die Antarktis relativ zum globalen Durchschnitt um einige Dezimeter höher ist. Mit dem Abschmelzen der Gletscher aufgrund des Klimawandels wird sich die Masse der Gletscher allerdings verringern, sodass die Antarktis und Grönland in den kommenden Jahrhunderten einen regional sinkenden Meeresspiegel erfahren dürften, während der Meeresspiegel global jedes Jahr durchschnittlich steigt.

Der regionale Meeresspiegel wird noch durch andere Phänomene beeinflusst. Dazu zählt beispielsweise die Hebung von Skandinavien oder anderen Gebieten, die mit Eis bedeckt waren. Hier lasteten während der letzten Eiszeit vor mehreren Tausend Jahren große Gletscher und drückten die Erdkruste in den Erdmantel. Mit dem Abtauen hob beziehungsweise hebt sich die Landmasse wieder relativ zum Meer, was sich an den Küsten in einem Sinken des Meeresspiegels äußert. Heute beträgt die Hebung einige Millimeter pro Jahr.

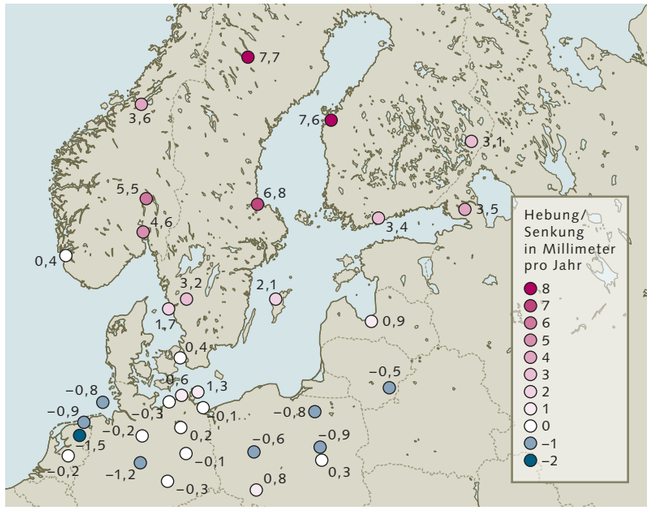
Hausgemachter Meeresspiegelanstieg

Zu lokalen Veränderungen des Meeresspiegels kommt es häufig auch durch die Bebauung mit Hochhäusern oder die Entnahme von Grundwasser für die Trinkwassergewinnung (siehe Kapitel 2). Flussdeltas wiederum sinken unter ihrem Eigengewicht ab. Dieses Absinken kann vielerorts heute nicht mehr kompensiert werden, weil durch den Bau von Staudämmen nur noch wenig frisches Sediment über die Flüsse herantransportiert wird. Mit dem steigenden Meeresspiegel dürften viele Deltagebiete künftig häufiger überflutet werden.

Derzeit geht man für die 33 großen Deltaregionen der Welt davon aus, dass die Fläche, die von Überschwemmungen bedroht ist, aufgrund des Meeresspiegelanstiegs bis zum Jahr 2100 um 50 Prozent zunehmen wird.

Mehr als 6 Meter in 500 Jahren?

Ganz gleich, wie sich der Meeresspiegelanstieg heute regional oder lokal darstellt: Wenn es nicht gelingt, den Ausstoß an Treibhausgasen massiv zu drosseln, wird der durchschnittliche globale Meeresspiegel in diesem Jahrhundert und darüber hinaus massiv steigen. Für den Fall, dass die Erdbevölkerung und mit ihr der Energieverbrauch, wie im RCP8.5-Szenario beschrieben, stark zunimmt, könnte der Meeresspiegel bis zum Jahr 2500 durchschnittlich um mehr als 6 Meter steigen. Hinzu kommen weitere Bedrohungen für die Küsten, die der Weltklimarat in seinem letzten Bericht zusammengefasst hat. Demnach ist schon in diesem Jahrhundert sehr wahrscheinlich mit folgenden Konsequenzen zu rechnen:



3.18 > Seit die eiszeitlichen Gletscher abgeschmolzen sind, hebt sich die skandinavische Landmasse. Diese Bewegung dauert bis heute an. Norddeutschland hingegen senkt sich. Die Grenze verläuft in etwa auf einer Linie zwischen dem südlichen Dänemark und der Insel Rügen.

- Zunahme der Windgeschwindigkeiten und Niederschläge bei tropischen Wirbelstürmen, was zu größeren Schäden und stärkeren Überflutungen führen dürfte, wobei die starken Regenabflüsse von Land und die durch den starken Wind bewirkten hohen Wasserstände des Meeres gemeinsam auftreten;
- höheres Auflaufen von Sturmfluten. Bereits heute laufen Sturmfluten im Mittel höher auf als noch vor 100 Jahren;
- höhere extreme Wasserstände als Folge höherer Windgeschwindigkeiten. Besonders betroffen sind Küstenregionen, die absinken;
- stärkere Erosion von Küsten durch häufigere Überflutungen und überlaufende Brandungswellen.

Strände und Feuchtgebiete versinken

Viele natürliche Küstenlebensräume werden durch permanente Überflutung und Erosion unwiederbringlich zerstört oder werden sich zumindest landeinwärts verschieben. Dieser Landverlust findet bereits heute statt. An den Küsten Nordalaskas und Sibiriens etwa bricht der Permafrostboden an vielen Stellen jährlich um mehrere Meter ab. Grund dafür sind mildere und längere Sommer. Zudem schmilzt das Meereis weiträumiger ab, sodass der Wind verstärkt Wellen erzeugen kann, die dann den auftauenden Boden am Ufer leicht abtragen können. Auch Strände und Dünen sind an vielen Küsten in den vergangenen Jahren stärker erodiert wie an der Ostküste der USA. Die Forscher führen das auf stärkere Winde und höher auflaufende Sturmfluten zurück.

Viele Küsten der Welt sind durch Feuchtgebiete, Salzwiesen oder Seegrasbestände im Flachwasser geprägt – wichtige Habitate für viele Organismen, etwa für spezialisierte Pflanzen und Insekten, für Vögel, die dort rasten und brüten, oder für Fische. Viele dieser Gebiete wurden in der Vergangenheit bereits durch Baumaßnahmen oder Verschmutzung der Küstengewässer zerstört. Mit dem Meeresspiegelanstieg in Kombination mit höher auflaufenden Fluten und stärkeren Winden sind diese Gebiete besonders durch Erosion gefährdet. Salzwiesen etwa werden zur Wasserseite hin stärker abgetragen. Läuft das Wasser künftig höher auf, könnten sich möglicherweise landeinwärts neue Salzwiesenbereiche bilden. Das wird allerdings nur dort möglich sein, wo das Hinterland nicht durch Deiche geschützt und von den vorgelagerten Salzwiesen abgetrennt ist. Sofern die Salzwiesen keinen Rückzugsraum haben, werden sie als wertvoller Lebensraum verloren gehen, wenn sich die Erosion verstärkt. Das Gleiche gilt in vielen Regionen für Feuchtgebiete oder auch für das im Flachwasser wachsende Seegras. Weil Seegras nur in relativ geschützten und brandungsarmen Flachwasserbereichen wurzeln kann, werden viele Bestände durch stärkere Strömungen oder eine stärkere Brandung in Mitleidenschaft gezogen.

Können Korallen Schritt halten?

Im Hinblick auf die Folgen des Meeresspiegelanstiegs für die Küstenlebensräume scheint das Schicksal der Korallenriffe noch nicht besiegelt zu sein. Aktuelle Studien, beispielsweise über indonesische Korallenriffe, zeigen, dass diese offensichtlich relativ flexibel auf einen steigenden oder auch sinkenden Meeresspiegel reagieren können. Tropische Steinkorallen leben in den lichtdurchfluteten Bereichen der Küstengewässer, da ihre Symbionten, die Zooxanthellen, ausreichend Licht für die Photosynthese benötigen, das ab einer bestimmten Tiefe nicht ausreichend vorhanden ist. Steigt das Wasser, wird es in den tieferen Wasserschichten dunkler. Wie die Studien zeigen, gelingt es den Korallen aber mit dem Wasser Schritt zu halten: In dem Maße, wie das Wasser steigt, wächst das Korallenriff in die Höhe. Neue Korallen siedeln sich oben an, während in der Tiefe die Korallen absterben.

Untersuchungen an alten Korallenriffen beweisen, dass Korallen offensichtlich auch mit dem zeitweilig sehr schnellen Meeresspiegelanstieg nach der letzten Eiszeit zurechtkamen. So gab es Phasen, in denen der Meeresspiegel um bis zu 40 Millimeter pro Jahr zunahm – 13-mal schneller als heute. Für den Fall, dass mit dem Wachstum der Weltbevölkerung und zunehmendem Energieverbrauch künftig noch mehr CO_2 emittiert wird als heute, könnte der Meeresspiegel gegen Ende dieses Jahrhunderts jährlich um bis zu 15 Millimeter steigen. Es ist denkbar, dass die Korallen damit Schritt halten können. Allerdings muss man ergänzen: Durch die Versauerung und Erwärmung der Küstengewässer stehen die Korallen heute vielerorts bereits unter Stress, wodurch die Kalkbildung und das Wachstum behindert werden. Ob die Korallen auch unter diesen Bedingungen mit dem steigenden Meeresspiegel mithalten können, ist noch nicht geklärt.

Aktuelle Studien aus den USA zeigen, dass Korallenriffe, die durch Stressoren wie zerstörerische Fischerei, Krankheiten oder Wasserverschmutzung unter Druck stehen, zum Teil nicht mehr schnell genug wachsen, sondern im Gegenteil sogar durch die Brandung abgetragen werden. In den Feldstudien wurde auf Hawaii, vor Florida und auf den in der Karibik gelegenen Amerikanischen Jungferninseln der heutige Zustand der Riffe mit dem Zustand in den 1930er-, 1960er- und 1980er-Jahren verglichen. Demnach wurden die Riffe seit den 1930er-Jahren nach und nach um 9 bis 80 Zentimeter abgetragen. Wachsende Riffe konnten die Experten nur in geschützten Gebieten oder besonders abgeschiedenen Abschnitten der Küste finden.

Dicht besiedelte Küsten, große Schäden

In seinem kürzlich erschienenen Bericht hat der Weltklimarat Ergebnisse aus vielen wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu den Folgen des Klimawandels für besiedelte Küstengebiete zusammengetragen. Die Ergebnisse zeigen, in welchem Maß Menschen durch den Verlust ihrer Heimat betroffen sein werden. Zudem vermitteln sie einen Eindruck, mit welchen ökonomischen Schäden zu rechnen sein wird beziehungsweise wie viel der Küstenschutz künftig kosten wird. Eindeutig ist, dass mit dem anhaltenden Zuzug in die Küstenregionen immer mehr Menschen durch besonders starke Hochwasserereignisse bedroht sind. Die wirtschaftlichen Schäden werden enorm sein. Viele könnten künftig ihr Zuhause und ihren Besitz verlieren – oder gar ihr Leben, sei es durch Ertrinken oder durch verschmutztes Trinkwasser oder Seuchen.

Inzwischen hat man abgeschätzt, wie viele Betroffene es künftig bei sogenannten Jahrhundertfluten, die statistisch nur alle 100 Jahre eintreten dürften, geben wird. Waren dadurch im Jahr 2010 etwa 270 Millionen Küstenbewohner weltweit bedroht, werden es im Jahr 2050 350 Millionen und im Jahr 2100 zwischen 500 und 550 Millionen sein – bei einer Weltbevölkerung von dann 9,7 beziehungsweise 11 bis 12 Milliarden Menschen. Die Überflutungen, so die Schätzungen, dürften im Jahr 2100 Schäden von bis zu 9,3 Prozent des globalen Bruttoinlandsprodukts verursachen. Um diese zu verhindern, müssten bis zu 71 Milliarden US-Dollar aufgewendet werden. Solche Küstenschutzmaßnahmen werden zwingend nötig sein, da schon einzelne Ereignisse immense Schäden verursachen können.

Welches Ausmaß die Schäden annehmen können, zeigen die Zerstörungen, die 2005 durch den Hurrikan Katrina am Golf von Mexiko und 2012 durch den Hurrikan Sandy an der Ostküste der USA angerichtet wurden. Nach Schätzungen von US-Forschern führte Hurrikan Katrina in den besonders stark betroffenen US-Staaten Louisiana und Mississippi zu Schäden in Höhe von etwa 150 Milliarden US-Dollar. Enorm waren auch die Zerstörungen, die Sandy 2012 an der wirtschaftlich stark entwickelten Ostküste anrichtete. Sandy traf auf Höhe der Stadt New York aufs Festland und verursachte innerhalb weniger Stunden Schäden in Höhe von 50 Milliarden US-Dollar.

Mit der Stärke zukünftiger Wirbelstürme und höher auflaufendem Wasser könnten die Zerstörungen künftig noch deutlich größer ausfallen, sollten bis dahin nicht dafür ausgelegte Küstenschutzanlagen errichtet werden. Für die US-Küste am Golf von Mexiko wurde errechnet, dass bei einem durchschnittlichen Anstieg des globalen Meeresspiegels von 1 Meter auf der 750 Kilometer langen Strecke zwischen den Küstenorten Mobile und Houston etwa ein Drittel aller Straßen permanent überflutet und 70 Prozent aller Häfen kaum mehr nutzbar wären.

Ähnlich werden weltweit viele andere Küstenregionen und Orte von Überflutungen bedroht sein, wenn nicht massiv in den Küstenschutz investiert wird. Dem Weltklimarat zufolge findet der größte Zuzug von Menschen in die Küstenregionen heute in Entwicklungsländern oder Schwellenländern statt, in denen der Küstenschutz eher unterentwickelt ist. Dies sind vor allem: Indien, China, aber auch Vietnam, Bangladesch und Indonesien, wo mit besonders gravierenden Hochwasserschäden zu rechnen sein dürfte. Da es kaum Schutz durch Deiche oder Dämme gibt, ist zu befürchten, dass künftig noch mehr Menschen bei Sturmfluten in den Küstenregionen ertrinken werden. Darüber hinaus wird es wegen des mangelnden Küstenschutzes zu großen wirtschaftlichen Schäden kommen, welche die schwachen Volkswirtschaften kaum kompensieren können.

Vom Kampf gegen Naturgefahren

> Küsten sind durch Naturereignisse wie Tsunamis oder Hangrutschungen bedroht. Diese können für die dortigen Lebensräume und Bewohner verheerende Folgen haben. Heute versucht man, durch verschiedene Frühwarnsysteme der Gefahr Herr zu werden. Doch die Natur bleibt unberechenbar.

Aus Schaden klug werden

Ist der Mensch für Meeresspiegelanstieg, Ozeanerwärmung und -versauerung aufgrund des Ausstoßes von Treibhausgasen mitverantwortlich, so gibt es auch eine Reihe natürlicher Gefahren, denen die Küsten ausgeliefert sind. Dazu zählen Erdbeben, Hangrutschungen, Tsunamis und Vulkanausbrüche sowie natürliche Klimaphänomene, insbesondere die im Pazifik auftretende Klimaanomalie El Niño. Auf das Eintreten solcher Ereignisse hat der Mensch zwar keinen direkten Einfluss, doch wurden diverse technische Lösungen entwickelt, um die Küstenbevölkerung so gut wie möglich zu schützen und Sachschäden zu minimieren. Vielfach hat man dabei aus vergangenen Unglücken Lehren ziehen können, wie das Beispiel der Katastrophenvorsorge bei Tsunamis zeigt.

Tsunamis sind besonders lange Wasserwellen, die Tausende Kilometer durch das Meer wandern können. Nähern sie sich der Küste, werden sie im flachen Wasser gebremst, wodurch sie sich um viele Meter auftürmen. Gut 70 Prozent aller Tsunamis werden durch Erdbeben, zumeist im Meer, ausgelöst. Andere Ursachen sind Vulkanausbrüche oder Hangrutschungen, bei denen große Mengen an Sand, Gestein oder Sediment wie bei einer Lawine herabstürzen. Je mehr Material sich dabei bewegt oder je schneller es rutscht, desto mehr Energie hat der dadurch ausgelöste Tsunami.

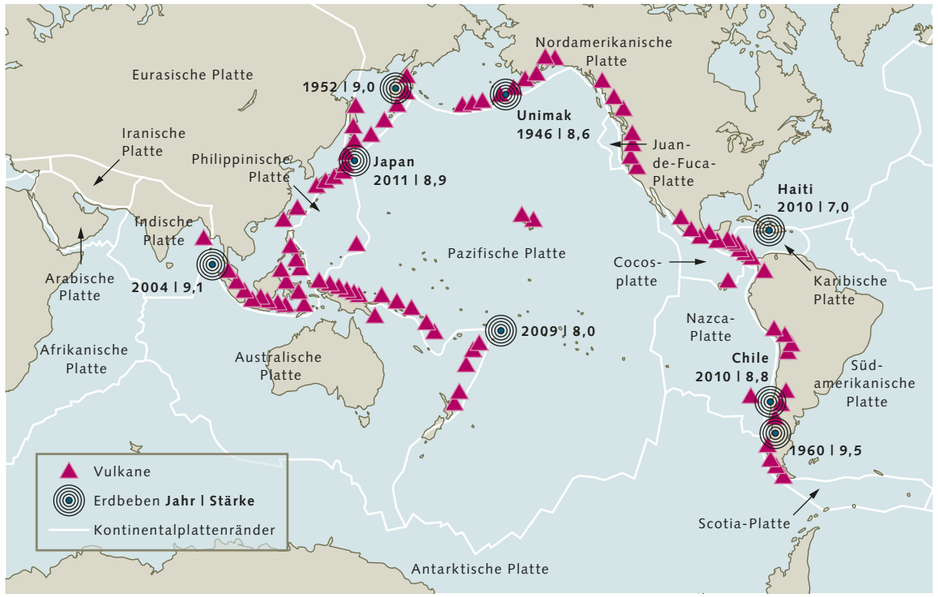
3.19 > Es war eine der verheerendsten Naturkatastrophen in der europäischen Geschichte. Als am 1. November 1755 in Lissabon die Erde bebte, starben mehrere Zehntausend Menschen unter den Trümmern von Gebäuden, in einem Großbrand und in den Fluten eines Tsunamis.

Katastrophen aus heiterem Himmel

Lange Zeit waren die Menschen an den Küsten den Tsunamis hilflos ausgeliefert, weil es keinerlei Vorwarnungen gab. Auch der Tsunami vom 1. November 1755 traf die Menschen völlig unvorbereitet. Damals ereignete sich etwa 200 Kilometer westlich der Meerenge von Gibraltar ein besonders schweres unterseeisches Erdbeben, das so stark war, dass es große Teile von Lissabon zerstörte. Zudem löste es einen schweren Tsunami aus, der etwa 40 Minuten nach dem Erdbeben große Teile der Stadt überspülte. Nach unterschiedlichen Schätzungen kamen damals durch das Erdbeben und den Tsunami allein in der portugiesischen Hauptstadt zwischen 30 000 und 100 000 Menschen ums Leben. Auch andere Städte und Dörfer an der portugiesischen und der marokkanischen Küste wurden zerstört. Selbst auf der anderen Seite des Atlantiks, auf den Inseln der Karibik, richtete der Tsunami noch Schäden an Hafenanlagen und Schiffen an.

Besonders gefährdete Regionen

Stark durch Tsunamis bedroht sind die Regionen im Pazifik, weil parallel zu den Küsten Plattengrenzen verlaufen, die sich vielerorts durch starke seismische und vulkanische Aktivität auszeichnen. Daher spricht man hier auch vom Ring of Fire (Feuerring). Im westlichen Pazifik gehören dazu die Küsten der Philippinen, Indonesiens, Japans und Russlands sowie im Osten weite Teile der Küsten von Nord- und Südamerika. An vielen Orten des



3.20 > Der sogenannte Ring of Fire (Feuerring) rings um den Pazifik. Hier verlaufen parallel zu den Küsten Plattengrenzen, wo vielerorts Erdbeben entstehen können. Diese ziehen möglicherweise Tsunamis nach sich.

Ring of Fire haben sich im Laufe der Geschichte immer wieder schwere Erdbeben ereignet, die starke Tsunamis auslösten.

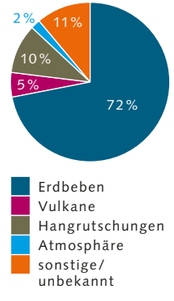
Auch Japan liegt am Ring of Fire und ist besonders häufig von starken Erdbeben erschüttert, weil hier gleich mehrere Plattengrenzen zusammenstoßen. Entsprechend zahlreich sind dort in der Vergangenheit Riesenwellen aufgetreten, sodass man dem Phänomen schon sehr früh einen Namen gab. Der Begriff Tsunami ist japanischen Ursprungs und leitet sich aus den Wörtern „tsu“ (Hafen) und „nami“ (Welle) ab. Schon an der Wortherkunft ist abzulesen, dass die Wellen insbesondere in Hafenstädten große Schäden anrichteten.

Die Entwicklung des Tsunamiwarnsystems in Japan

Es dauerte lange, bis man verstand, erste Warnzeichen zu deuten. Am 15. Juni 1896 traf ein Tsunami mit einer Wellenhöhe von 38 Metern auf die Nordostküste Japans. Etwa 20 000 Menschen verloren ihr Leben. Ungewöhnlich war, dass das vorausgegangene Erdbeben an der japanischen Küste nur schwach zu spüren gewesen war, sich aber trotzdem ein so starker Tsunami bilden konnte. In Japan begann daraufhin eine Debatte um die Entstehung dieser Riesenwelle. So führten einige Experten den Tsunami auf Hangrutschungen zurück. Auch wenn die Ursachen unklar blieben, führte die Diskussion dazu, dass in Japan der Sinn für Tsunamis geschärft wurde.

In der japanischen Öffentlichkeit setzte sich die Erkenntnis durch, dass Erdbeben ein wichtiges Warnsignal für mögliche Tsunamis sind. Als neue Grundregel galt: „Wenn der Erdboden zittert, muss man evakuieren.“ 1933 traf nach einem Erdbeben erneut ein Tsunami auf die japanische Nordostküste. Diesmal war die Bevölkerung vorbereitet und rettete sich in höher gelegene Gebiete. Dennoch kamen etwa 3000 Menschen um.

1941 installierte Japan als erste Nation weltweit ein Tsunamiwarnsystem in der meteorologischen Station von Sendai, einer Großstadt an der Ostküste. Dort kam fortan ein Seismometer zum Einsatz, mit dem sich die Stärke und die ungefähre Entfernung von Erdbeben abschätzen ließen. Tsunamiwarnungen wurden nun über das Radio gesendet; zudem wurden in den betroffenen Regionen



3.21 > Tsunamis können verschiedene Ursachen haben, wobei Erdbeben der wichtigste Auslöser sind.

Wie Tsunamis entstehen

Tsunamiwellen entstehen, wenn sich im Meer starke vertikale Bewegungen ereignen, durch die die Wassersäule abgesenkt oder angehoben wird – vergleichbar mit einer Welle, die entsteht, wenn eine Hand schlagartig ins Wasser eintaucht. Wichtigster Auslöser für einen Tsunami sind Erdbeben, die durch die Verschiebung von Kontinentalplatten entstehen. Reiben die Kontinentalplatten jedoch nur aneinander, ohne dass die eine über die andere ruscht, erhält die Wassersäule darüber keinen Impuls, sodass keine Welle entsteht. Heben und senken sich die Kontinentalplatten aber relativ zueinander, wird die Wasseroberfläche angehoben beziehungsweise abgesenkt: Ein Tsunami entsteht. Solche Bewegungen treten insbesondere in der Nähe von Subduktionszonen auf, an denen eine Kontinentalplatte unter die andere abtaucht.

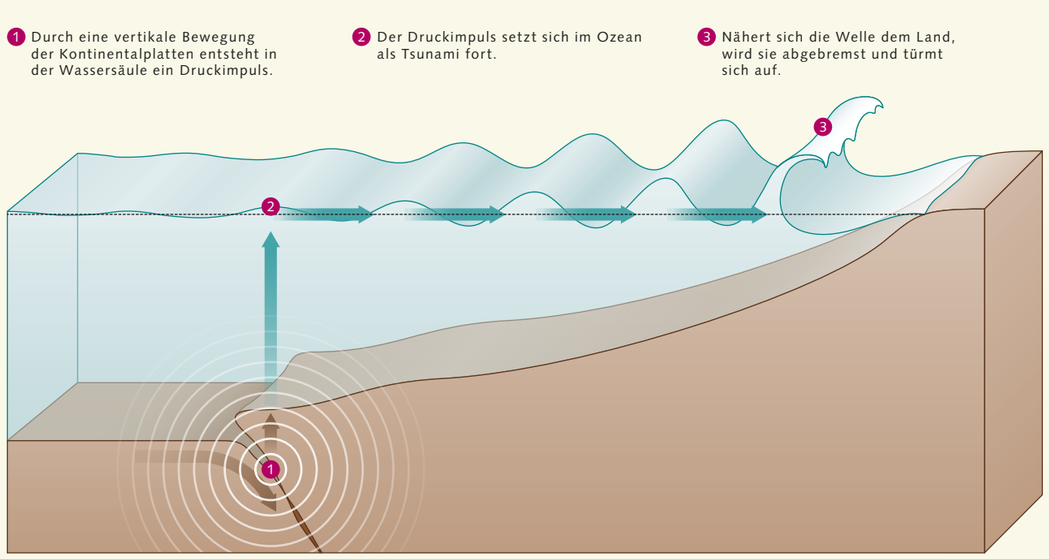
Ob ein Tsunami entsteht, hängt also nicht zwangsläufig von der Stärke eines Erdbebens ab. So wurden schon Erdbeben mit einer Stärke von 8 oder 9 gemessen, die keine Tsunamis ausgelöst haben. Andererseits sind schwache Erdbeben bekannt, die starke Tsunamis zur Folge hatten.

Mithilfe von ausgeklügelten Computermodellen versucht man heute noch besser zu verstehen, welche speziellen Charakteristika bei einem Erdbeben für die Entwicklung eines Tsunami von besonderer Relevanz sind.

Im Gegensatz zur Welle an der Wasseroberfläche, die durch Wind erzeugt wird, setzt sich eine Tsunamiwelle vom Ort ihrer Entstehung in der gesamten Wassersäule fort. Bei großen Meerestiefen kann sie sich ungestört ausbreiten und bei einer Tiefe von 5000 Metern eine Geschwindigkeit von bis zu 800 Kilometern pro Stunde erreichen. Dieses Ausbreitungsverhalten lässt sich mit mathematisch-physikalischen Wellenmodellen sehr gut beschreiben.

Trifft die Welle aber auf einen Kontinentalabhang oder das Ufer, wird sie abgebremst, wodurch sie sich auftürmt. Jetzt hängt es sehr von der Gestalt der Küste ab, wie sich der Tsunami weiter entwickelt, was mathematisch sehr viel schwieriger zu beschreiben ist. Eine genaue Vorhersage der Wellenhöhe an Land ist daher kaum möglich.

Bevor ein Tsunami auf die Küste trifft, zieht sich das Wasser dort zunächst zurück. Diesen Wechsel aus Zurückziehen und Anbranden kann man auch bei gewöhnlichen Wellen an einem Strand beobachten, wobei die Wellenbewegungen hier deutlich kleiner sind.



3.22 > Tsunamis entstehen oftmals, wenn sich bei Erdbeben Kontinentalplatten im Meer nach oben oder unten bewegen.

3.23 > Am 1. April 1946 traf ein Tsunami auf die hawaiianische Küste. Auslöser war ein Erdben, das sich 4000 Kilometer entfernt bei den Aleuten ereignet hatte. Der Tsunami brauchte 4,5 Stunden, um von seinem Usprungsort nach Hawaii zu gelangen, wo er 159 Menschen den Tod brachte.

Polizeistationen informiert. In der Regel dauerte es 20 Minuten von der Auswertung der Erdbebendaten bis zur Tsunamiwarnung.

In den folgenden Jahren wurden in verschiedenen Regionen weitere Seismometer installiert, und im Jahr 1952 schließlich startete die Japan Meteorological Agency (JMA, Meteorologische Behörde Japans) ein landesweites Tsunamiwarnsystem. Bis 1999 wurden technisch immer ausgereiftere Seismometer installiert, mit denen die Stärke und der Ort eines Erbebens immer besser und schneller zu bestimmen waren. Tsunamiwarnungen konnten schließlich bereits 3 Minuten nach einem Erdbeben ausgegeben werden, doch war es trotz der Nutzung von mathematischen Simulationsmodellen nicht möglich, allein aus den Erdbebendaten zuverlässig auf die Höhe der Tsunamis zu schließen. Erst nach der Tragödie vom 11. März 2011 wurde das Tsunamiwarnsystem in Japan deutlich verbessert. An diesem Tag kam es vor der Küste der nordostjapanischen Tōhoku-Region zu einem schweren Seebeben. Durch das Beben und die ausgelöste Flutwelle kamen etwa 16 000 Menschen ums Leben.

In der Folge wurden am Meeresboden vor der japanischen Küste Sensoren installiert, die eine vorübergleitende Tsunamiwelle an auffälligen Druckänderungen erkennen. Dank des Einsatzes dieser zusätzlichen Sensorik kann man daher heute die Ausbreitung eines Tsunamis sehr viel besser bestimmen beziehungsweise die an Land zu erwartende Wellenhöhe abschätzen.

Die Entwicklung des Tsunamiwarnsystems in den USA

Nicht nur in Japan, sondern auch in den USA begann man relativ früh mit dem Aufbau eines Warnsystems. 1946 gab es bei der Inselgruppe der Aleuten, die sich an der Küste vor Alaska weit in den Pazifik hineinziehen, ein schweres Erdbeben, bei dem sich ein starker Tsunami bildete. Die Welle war so gewaltig, dass sie auf der Aleuteninsel Unimak einen Leuchtturm aus massivem Stahlbeton, der auf einer 12 Meter hohen Klippe stand, restlos zerstörte.

4,5 Stunden später erreichte der Tsunami die 4000 Kilometer entfernte Inselgruppe Hawaii. Er traf die Einwohner ohne jede Vorwarnung, denn das Erdbeben war hier nicht zu spüren gewesen. Die Wellen waren bis zu 16 Meter hoch, und das Wasser drang an manchen Stellen tausend Meter ins Land vor. 159 Menschen starben. Der Tsunami war auch an der Nordwestküste der USA zu spüren. Zwar erreichten die Wellen dort nur noch eine Höhe

von knapp 2 Metern, dennoch kam es in einigen Häfen zu Beschädigungen an Booten.

Nach dieser Erfahrung richteten die US-Behörden 1949 in der Nähe von Honolulu auf Hawaii ein Tsunamiwarnzentrum ein. Ähnlich wie in Japan arbeitete dieses Zentrum fortan auf Grundlage von Erdbebendaten, wobei zusätzlich die Laufzeiten eines potenziellen Tsunamis berechnet wurden. Wurde von einem Partnerstaat ein Erdbeben gemeldet, errechnete das Zentrum die Laufzeit einer möglichen Tsunamiwelle bis zum Eintreffen an den Küsten der USA.

Erste internationale Kooperationen

Während Japan lange Zeit nur für die eigene Küste Warnmeldungen generierte, entwickelte sich das US-amerikanische System recht schnell zu einem internationalen Warnzentrum für den gesamten pazifischen Raum. Anlass für diese Internationalisierung war das Erdbeben, das sich am 22. Mai 1960 in der Nähe der chilenischen Großstadt Valdivia ereignete. Dabei brach die Erdkruste am chilenischen Festland von Nord nach Süd auf einer Länge von 1000 Kilometern. Im Zuge dessen wurde ein 200 Kilometer breiter Block zwischen dem Kontinentalrand und den Anden ruckartig um 20 Meter nach Westen bewegt. Das löste eine mächtige Tsunamiwelle aus, die vor allem an der chilenischen Küste für starke Schäden sorgte und sich nach Westen durch den gesamten Pazifik ausbreitete.

Hawaii wurde von etwa 10, die noch weiter entfernte japanische Ostküste von 5 Meter hohen Wellen getroffen. Da noch andere Nationen im Pazifik und insbesondere auch Inselstaaten betroffen waren, trieb vor allem die UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur) ab 1960 den Aufbau eines gesamtpazifischen Warnsystems voran. Zuständig für die internationale Abstimmung war die von der UNESCO nach dem Erdbeben in Chile ins Leben gerufene Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC, Zwischenstaatliche Ozeanographische Kommission). Die IOC-Mitgliedsstaaten entschieden, das System in das schon bestehende Warnzentrum auf Hawaii zu integrieren. 1965 nahm es als Pacific Tsunami Warning Center (PTWC, Pazifisches Tsunamiwarnzentrum) seine Arbeit auf. Bis heute koordiniert das PTWC im Auftrag der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA) die Tsunamiwarnungen und Vorhersagen für den gesamten pazifischen Raum.

Ähnlich wie in Japan war die Genauigkeit der Tsunamivorhersagen anfangs begrenzt. In erster Linie bestand das Warnsystem darin, dass sich die Mitgliedsstaaten gegenseitig per Telefon informierten, sobald ein Erdbeben registriert wurde. Mithilfe der seismografischen Information und der Laufzeitkarten wurde dann berechnet, ob oder wann ein möglicher Tsunami auf Land treffen könnte. Ergänzt wurden diese Informationen durch Pegelmessungen in verschiedenen Küstengebieten. Dennoch blieben die Vorhersagen ungenau.

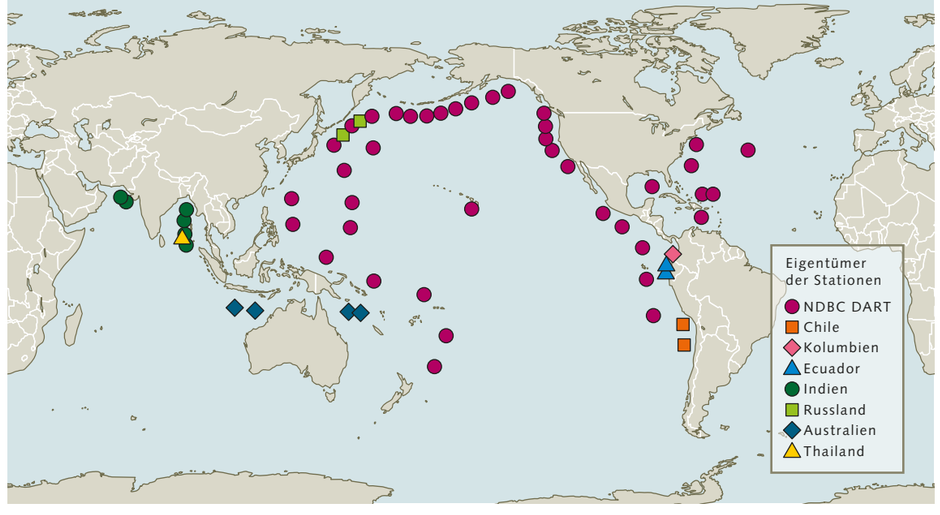
75 Prozent aller Tsunamiwarnungen waren Fehlalarme, die zu oft zu teuren Evakuierungen führten. 1986 führte eine Warnmeldung zur Evakuierung von Waikiki, einem Stadtteil von Honolulu. Mehrere Behördengebäude im Stadtgebiet mussten geräumt werden. Zwar liefen zum angegebenen Zeitpunkt Wellen am Strand auf, doch waren diese nur wenig größer als die übliche Brandung. Die Behörden von Hawaii schätzten, dass die Unterbrechung des Geschäftslebens durch diesen Fehlalarm Kosten in Höhe von 41 Millionen US-Dollar verursachte. Entsprechend groß war die Kritik an der Arbeit des Tsunamiwarnzentrums PTWC.

1987 entschied die NOAA daher, ein völlig neues Warnsystem zu installieren, das Tsunamidaten in Echtzeit liefert. Dieses besteht aus Drucksensoren am Meeresboden, die ihre Daten über ein akustisches Signal zu Bojen an der Meeresoberfläche senden. Die Bojen wiederum schicken die Daten dann per Satellitenverbindung an das PTWC. Der Vorteil: Das System misst die Stärke der Tsunamiwellen direkt, was eine recht sichere Aussage über deren Ausmaß und Verhalten an Land zulässt. Damit ergänzt es die klassischen seismografischen Erdbebenmessungen sehr gut.

Dieses Bojensystem wird in den USA als DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis, Tiefseeaufzeichnung und Meldung von Tsunamis) bezeichnet, vom National Data Buoy Center (NDBC, Nationales Zentrum für Bojendaten) der NOAA betrieben und wurde bis heute immer weiter ausgebaut. Inzwischen nutzen auch Australien, Chile, Ecuador, Indien, Kolumbien, Russland und

Erdbebenstärke
Die Stärke eines Erdbebens wird anhand der sogenannten Momenten-Magnituden-Skala bestimmt. Das Skalenende liegt bei dem Wert 10,6. Wenn dieser Maximalwert erreicht wird, bricht die Erdkruste im Bereich des Erdbebens komplett auseinander. Mehr Energie kann in einem Erdbeben theoretisch nicht freigesetzt werden. Die Skala ist logarithmisch aufgebaut. Das bedeutet, dass die Erdbebenstärke exponentiell mit dem Skalenwert wächst. Ein Skalenpunkt entspricht dabei einer Zunahme der Erdbebenstärke um etwa das 30-Fache. Zur Veranschaulichung wird die seismische Energie eines Erdbebens mit der Sprengkraft von TNT verglichen. Die Energie eines Erdbebens der Stärke 5 entspricht rund 475 Tonnen TNT; die eines Bebens der Stärke 6 rund 15 000 Tonnen TNT.

3.24 > Das Erdbeben vor Japans Ostküste am 11. März 2011 dauerte ungefähr 5 Minuten. Es löste einen Tsunami aus, der weite Teile im Nordosten Japans verwüstete und auch die Schutzmauer des Kernkraftwerks Fukushima I überspülte.



3.25 > Seit den 1980er-Jahren wurde rund um den Pazifik ein Tsunamiwarnsystem aus Funkbojen errichtet, die Signale von Drucksensoren am Meeresboden wahrnehmen. Diese Sensoren registrieren Tsunamiwellen.

Thailand derartige Bojen. Japan hat ein eigenes Bojensystem entwickelt, das aber mehr und mehr zugunsten der kabelgebundenen Drucksensoren aufgegeben wird. Insgesamt sind heute im Pazifik und in angrenzenden Meeresgebieten mehr als 50 Bojen installiert, die vom PTWC genutzt werden können.

Ein Tsunami ändert das Bewusstsein der Welt

Dass heute weltweit viele Nationen im Bereich der Tsunamiwarnung kooperieren, ist nicht zuletzt eine Folge der großen Tsunamikatastrophe, die sich am Morgen des 26. Dezember 2004 im Indischen Ozean ereignete. Um 7.58 Uhr gab es ein unterseeisches Erdbeben der Stärke 9,1. Es lag nur etwa 85 Kilometer vor der Nordwestküste der indonesischen Insel Sumatra am sogenannten Sundabogen und löste mehrere Erdstöße und schwere Tsunamis aus, die die Küsten von 16 Ländern rund um den Indischen Ozean erreichten.

Der Sundabogen ist eine entlang der Küste von Sumatra verlaufende insgesamt 6000 Kilometer lange Subduktionszone, die sich von Myanmar im Norden bis über die indonesische Insel Java hinaus nach Süden erstreckt. Am Sundabogen taucht die Indisch-Australische Platte unter die Sunda- und Burma-Platten ab, weshalb es in dieser Region immer wieder Erdbeben und starke vulkanische Aktivität gibt. Besonders stark betroffen waren wegen der Nähe zum Sundabogen die Küste der Insel Sumatra sowie die westlich des Epizentrums gelegene Insel Sri Lanka und die indische Küste. Komplett zerstört wurden die nördlichen, an der Küste gelegenen Stadtteile der indonesischen Großstadt Banda Aceh auf Sumatra. Insgesamt kamen 235 000 Menschen ums Leben – allein in Indonesien etwa 170 000. 1,7 Millionen Menschen verloren ihre Häuser und Wohnungen.

Fatal war, dass anders als im Bereich des PTWC in kaum einem der betroffenen Länder Tsunamikatastrophenschutzprogramme etabliert waren. Da unter den Todesopfern auch viele Touristen waren, war das Thema mit einem Schlag international von Interesse. So war für Schweden – gemessen an der Zahl der Opfer – der Tsunami die größte Naturkatastrophe überhaupt, für Deutschland die größte nach dem Zweiten Weltkrieg. So kamen mehr Deutsche bei dieser Katastrophe ums Leben als bei der Sturmflut in Hamburg 1962. Die große Betroffenheit führte dazu, dass aus aller Welt insgesamt 13,5 Milliarden US-Dollar an Hilfsgeldern für den Wiederaufbau bereitgestellt wurden.

Der Tsunami von 2004 änderte die öffentliche Wahrnehmung. Seit der Zäsur setzt sich die Welt stärker mit

dieser Naturgefahr auseinander. So forderten die Mitgliedsstaaten der IOC auf ihrer Jahresversammlung im Juni 2005, neue internationale Warnnetzwerke für den Indischen Ozean nach dem Vorbild des PTWC zu etablieren. In der Folge wurden unter dem Schirm der IOC entsprechende Warnzentren eingerichtet:

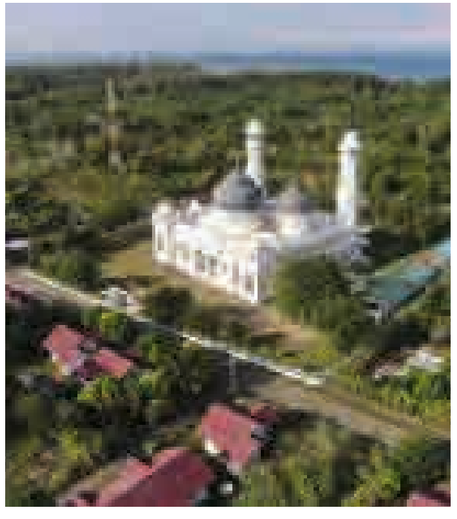
- das Caribbean and Adjacent Regions Early Warning System (CARIBE EWS), ein Frühwarnsystem für die Karibik und benachbarte Regionen;
- das Indian Ocean Tsunami Warning System (IOTWS), ein Warnsystem für den Indischen Ozean;
- das North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning and Mitigation System (NEAMTWS), ein Warn- und Schadensreduzierungssystem für den Nordostatlantik, das Mittelmeer und angrenzende Meere.

Das indonesische Warnsystem – Aufbau aus dem Nichts

Nach dem Tsunami von 2004 waren die internationalen Anstrengungen groß, ein zuverlässiges Warnsystem im Indischen Ozean zu installieren. Im besonders betroffenen Indonesien wurde vor allem mit deutscher Hilfe ein dichtes Netz an Messstationen aufgebaut: das Indonesian Tsunami Early Warning System (InaTEWS, indonesisches Tsunamifrühwarnsystem), das Teil des IOTWS-Systems für den ganzen Indischen Ozean ist.

Bei der Installation stieß man zunächst auf unerwartete Probleme. Ähnlich wie im Pazifik sollte auch das InaTEWS zum Teil mit DART-Bojen ausgestattet werden. Allerdings wurden diese immer wieder durch Vandalismus und aus Unachtsamkeit beschädigt – so wurden Batterien demontiert oder die Technik zerstört, weil Fischer die DART-Bojen wiederholt als Ankerplatz nutzten. Man entschied sich deshalb, auf eine Kombination aus anderen Sensoren zu setzen, die allesamt am indonesischen Festland installiert wurden. Das hatte den zusätzlichen Vorteil, auf die kostenintensive Wartung von Anlagen auf See verzichten zu können.

Zu dem System gehört ein Netzwerk aus derzeit 160 Breitbandseismometern, die entlang der Küste installiert wurden und die Wellen eines Erdbebens in Echtzeit sehr genau aufnehmen. Außerdem werden etwa 50 Messstationen genutzt, die die Höhe des Wasserstands und damit auch verdächtige Meeresspiegeländerungen registrieren. Ferner wurden etwa 30 GPS-Stationen an Land errichtet. Die Idee besteht darin, dass sich bei Erdbeben Kontinentalplatten verschieben. Diese Verschiebung können die



3.26 > 2004 zerstörte der Tsunami weite Teile der indonesischen Provinz Aceh, ließ aber die Moschee Masjid Rahmatullah in der Stadt Lampuuk fast unbeschädigt (Foto ganz links). Auf dem Bild daneben ist der wiederhergestellte Küstenstreifen mit dem Mast (links) eines neuen Tsunamiwarnsystems zu sehen.

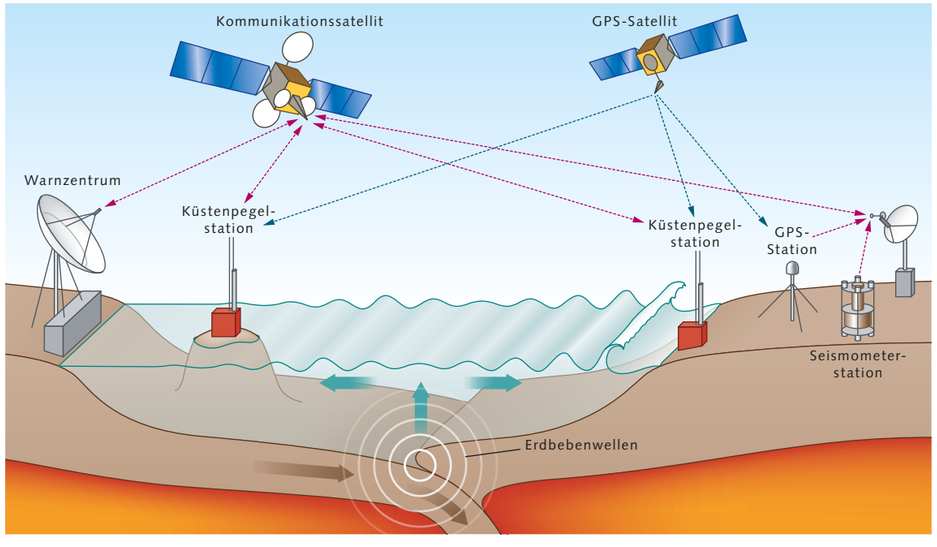
GPS-Sensoren wahrnehmen. Durch die Kombination dieser drei Sensortypen erhöht sich die Zuverlässigkeit der Vorhersage deutlich, denn aus der Information eines Sensortyps allein kann man nicht sicher auf einen Tsunami schließen.

Zur Auswertung der Sensordaten wurden mathematische Modelle entwickelt, die die Daten in wenigen Sekunden statistisch auswerten und anhand von Simulationen ermitteln, ob ein Tsunami ausgelöst wurde und wie er sich an Land auswirken wird. Im Detail werden die Sensordaten von zwei Modellen verarbeitet. Das eine modelliert dabei die Tsunamientstehung, im anderen sind die Phasen der Ausbreitung im Meer und der Überflutung an Land integriert. Die Sensordaten werden in Sekundenschnelle mit einer Vielzahl vorab berechneter möglicher Tsunamiszenarien abgeglichen. Damit muss im Katastrophenfall nicht mehr zeitraubend die wahrscheinliche Ausbreitung berechnet werden. Erst dieser Abgleich mit vielen Szenarien erlaubt es, eine schnelle und – mit einer statistischen Bewertung der Unsicherheit versehene – recht zuverlässige Vorhersage zu treffen. Alles in allem kann mit dem InaTEWS-System jetzt innerhalb von 5 Minuten eine Warnmeldung für die gesamte Sundabogenregion ausgegeben werden.

Gegen die nächste Welle wappnen

Nicht nur die Warnsysteme müssen ständig verbessert werden, auch muss in von Tsunamis bedrohten Gebieten zusätzlich in Schutzmaßnahmen investiert werden. Die IOC koordiniert diesen Tsunamischutz weltweit. Sie setzt insbesondere auf Bildungsarbeit, um die Bevölkerung zu schulen, die Vorzeichen von Tsunamis zu deuten und das richtige Verhalten im Katastrophenfall zu üben. Daher werden in vielen Ländern unter der Regie der IOC regelmäßig Notfallübungen durchgeführt, mit denen die Warnsysteme getestet, aber auch Evakuierungen trainiert werden.

Des Weiteren fördert die IOC den Bau von Tsunamischutzeinrichtungen. Diese wurden in den vergangenen Jahren vor allem in Indonesien angelegt. Dazu zählen Warnsirenen, Hochwasserschutzbauten auf stabilen Stelzen, auf die sich die Menschen retten können, oder auch Fluchtwege, über die Menschen schnell auf Hügel oder in höher gelegene Ortsteile fliehen können. Erste Evakuierungsübungen haben jedoch gezeigt, dass sich schnell Staus bilden, die die Menschen an der Flucht in sichere Stadtgebiete hindern. Insofern empfiehlt die IOC für Indonesien den Bau weiterer Hochwasserschutzgebäude direkt in den von Tsunamis bedrohten Gebieten.



3.27 > Das von deutschen Forschern maßgeblich mitentwickelte Tsunamiwarnsystem für den Indischen Ozean besteht ausschließlich aus Messstationen an Land. Dazu gehören 30 GPS-Stationen, 160 Breitbandseismometer und 50 Pegelstationen, die die Höhe des Wasserstands registrieren.

Die IOC bemüht sich außerdem darum, ein generelles Bewusstsein für die Gefahr zu entwickeln. So hat der Tsunami von 2004 gezeigt, dass einem Großteil der Bevölkerung in den betroffenen Ländern das Phänomen Tsunami vor der Katastrophe völlig unbekannt gewesen war. Nur auf einigen wenigen Inseln im Indischen Ozean ist das Wissen um die Gefahr eines Tsunamis schon seit vielen Jahrzehnten präsent.

Die Erinnerung wachhalten

Ein Beispiel ist die Insel Simeuluë, die 150 Kilometer westlich von Sumatra liegt. Die Insel wurde von dem Tsunami schwer getroffen, dennoch starben nur sieben Menschen. Die übrige Bevölkerung, immerhin etwa 70 000 Einwohner, rettete sich in höher gelegene Gebiete. Das war nur möglich, weil in der Bevölkerung die Erinnerung an einen Tsunami im Jahr 1907 wachgehalten worden war. Die Älteren bezeichneten dieses Ereignis in ihrer Sprache als „Smong“ und beschrieben in ihren Erzählungen die drei Phasen eines Tsunamis sehr genau: die Erschütterung durch ein Erdbeben, das Zurückziehen des Wassers und die nahende Flutwelle. Die Inselbewohner waren daher vorbereitet, als der Tsunami kam. Sie reagierten richtig und überlebten.

Tsunamigefahr im Mittelmeer

Wie vor Indonesien verlaufen auch durch das Mittelmeer Ränder kontinentaler Platten, an denen sich häufig Erdbeben ereignen und die vulkanisch sehr aktiv sind. Zudem ist das Mittelmeer vergleichsweise klein, sodass ein Tsunami, ähnlich wie am Sundabogen, innerhalb weniger Minuten auf das Land treffen kann. Insgesamt gilt das Mittelmeer nach der Pazifikregion als das durch Tsunamis am meisten gefährdete Gebiet der Welt. Die Folgen eines Tsunamis wiederum können dort besonders verheerend sein, weil das Mittelmeer eine sehr beliebte Urlaubsregion ist, in der Hunderttausende von Menschen Badeurlaub machen.

Ein Beispiel für eine tektonisch sehr aktive Region ist Italien. Dort schiebt sich ein Ausläufer der Afrikanischen Platte, der Apulische Sporn, in einer Subduktionszone unter die Eurasische Platte im Norden. Diese Subduktionszone verläuft von Norden nach Süden längs durch Italien, biegt im Süden in Richtung Westen ab und verläuft weiter durch Algerien und Tunesien. Aufgrund dieser geologischen Konstellation kommt es in Italien immer wieder zu großen Erschütterungen. Bekannt ist das schwere Erdbeben von Messina vom 28. Dezember 1908. Es zerstörte sowohl die sizilianische Stadt als auch die kalabrischen Städte Reggio Calabria und Palmi fast vollständig. Zudem löste es einen Tsunami aus, der zu weiteren Schäden führte. Insgesamt starben in der Region nach Schätzungen zwischen 72 000 und 110 000 Einwohner.

Die Schwierigkeit, Tsunamis im Mittelmeer zu berechnen

Zwar gibt es seit 2005 mit dem North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning and Mitigation System (NEAMTWS) ein Tsunamiwarnsystem, dennoch kann man heute für die Mittelmeerregion noch nicht genau bestimmen, wie groß das Risiko für Tsunamis in den verschiedenen Meeresgebieten eigentlich ist. In einem europäischen Kooperationsprojekt wurde in den vergangenen Jahren mithilfe mathematischer Modellrechnungen ermittelt, wie Tsunamis mit dem Meeresboden im Mittelmeer interagieren oder wie die komplexe Gestalt der Mittelmeerküsten mit ihren vielen vorgelagerten Inseln, tief eingeschnittenen Buchten sowie unterschiedlichen Wassertiefen die Ausbreitung beeinflusst. Die Ergebnisse werden momentan ausgewertet und sollen dazu dienen, besonders gefährdete Gebiete zu identifizieren, um dort Schutzeinrichtungen wie etwa Fluchtwege oder Hochwasserwände zu installieren. Kritisiert wird, dass die Kooperation zwischen den Mittelmeeranrainern noch nicht ausreichend ist, obwohl es das NEAMTWS gibt. Zwar informieren sich die Nationen bei Gefahr gegenseitig und führen gemeinsame Notfallübungen und Kommunikationstests durch. Doch erstellen Portugal, Frankreich, Griechenland, die Türkei und Italien jeweils eigene Szenarien und Modellierungen.

Auf UNESCO-Ebene wird derzeit daran gearbeitet, dass die Staaten ihre Informationen künftig noch besser austauschen können. Denn werden mehrere Modellierungen miteinander verglichen, lässt sich eine noch

bessere Vorhersage erreichen. Wenn die verschiedenen Aussagen alle ähnlich sind, dann weiß man, dass der Tsunami mit großer Sicherheit genau so eintreten wird. Sind die Aussagen hingegen widersprüchlich oder weichen stark voneinander ab, so ist die Unsicherheit noch groß, und es lohnt sich, weitere Informationen einzuholen.

Erdbeben – die doppelte Gefahr für die Küsten

Erdbeben lösen an den Küsten nicht nur Tsunamis aus, sondern führen selbst zu enormen Zerstörungen. Das zeigte das Erdbeben, das sich 2003 wenige Kilometer vor der Küste Algeriens ereignete. Dabei starben mehr als 2000 Menschen, die meist in einstürzenden Gebäuden ums Leben kamen. Das Erdbeben führte zu einem schwächeren Tsunami, der sich in Richtung Norden bewegte. Er erreichte eine knappe Stunde später die Balearen und beschädigte dort Boote und Autos. Menschen wurden nicht verletzt. Problematisch ist, dass die Gebäude in Algerien nicht für Erdbeben ausgelegt waren und deshalb zusammenstürzten. Auch in anderen erdbebengefährdeten Küstenregionen am Mittelmeer sind viele Gebäude nicht so gebaut, dass sie einem Erdbeben standhalten.

Im Fokus der Geoforschung steht insbesondere die Küstenstadt Istanbul. Die Stadt liegt im Westen einer kontinentalen Bruchzone, der Nordanatolischen Verwerfung, und gilt als besonders gefährdet. Seit Langem wird aufgrund seismografischer Messungen an der Verwerfung ein Erdbeben erwartet, das eine Stärke von 7,5 erreichen könnte. Ein solches Erdbeben dürfte katastrophale Folgen haben, weil etliche Gebäude in Ballungsraum Istanbul nicht erdbebensicher errichtet wurden. Laut einer Studie der Vereinten Nationen ist mit bis zu 50 000 Todesopfern zu rechnen. Dass erdbebensicheres Bauen möglich ist, zeigt Japan, wo hohe Bürogebäude sogar Beben jenseits der Stärke 8 überstehen. Die Konstruktionen sind so ausgelegt, dass sie relativ elastisch sind und die Erdstöße gewissermaßen abfedern können.

Hangrutschungen – räumlich begrenzt und unberechenbar

Gefahr für die Küsten kann auch von Hangrutschungen ausgehen. Sie entstehen, wenn sich an steilen Flanken größere Mengen von Geröll oder Sediment lösen und in die Tiefe stürzen. Hangrutschungen können sich an Land oder an Hängen unter Wasser ereignen, wobei das Material weit in die Tiefe transportiert werden kann. Für die Bevölkerung ergeben sich daraus verschiedene Gefährdungen. Zum einen können durch Hangrutschungen an Land Menschen verschüttet und Siedlungen zerstört werden; zum anderen werden durch den Bewegungsimpuls, den das Material auf das Wasser ausübt, wenn es ins Meer stürzt, möglicherweise Tsunamis ausgelöst.

Anders als Erdbeben, die durch moderne Seismometer heute im Detail registriert und analysiert werden können, ereignen sich viele Hangrutschungen völlig unbemerkt, weil sie räumlich begrenzt sind. Während Erdbeben an tektonischen Verwerfungen von bis zu 1000 Kilometer Länge entstehen und weiträumig wahrnehmbar sind, kollabieren Hänge in der Regel meist nur auf einer Breite von einigen Dutzend Kilometern. Dadurch verursachen sie nur vergleichsweise geringe Erschütterungen.

Zwar werden Hangrutschungen seit einigen Jahren intensiv erforscht, dennoch sind noch viele Fragen offen. Wo oder wann sie sich ereignen, ist nicht vorhersehbar, sodass Beobachtungen oder direkte Messungen kaum möglich sind. Auch wenn man nicht im Detail sagen kann, warum ein Hang zu einem bestimmten Zeitpunkt abrutscht, hat man die Faktoren, die zu Hangrutschungen führen können, allerdings im Grundsatz verstanden. Dazu zählen:

- Erdbeben, durch die Material mobilisiert wird;
- Gasaustritte aus dem Meeresboden, die das Material destabilisieren;
- Stürme, die starken Wellenschlag verursachen und damit das Material lösen;
- Aushöhlen von Steilhängen durch Erosion, beispielsweise durch Strömungen über einen längeren Zeitraum;
- Veränderung des **Porendrucks** im Sediment;
- vulkanische Aktivität, in deren Folge ganze Flanken von Vulkaninseln kollabieren und ins Meer stürzen.

Die weltweite Erforschung von Hangrutschungen hat sich nach dem Jahrhundertwechsel intensiviert. Ein Grund dafür war der Tsunami, der sich am 17. Juli 1998 im Norden von Papua-Neuguinea ereignet hatte. Damals gab es an der Küste ein Erdbeben, dem 20 Minuten später die Flutwelle folgte. Sie zerstörte drei Küstendörfer und tötete 2200 Menschen. Wegen der Schwere des Tsunamis wurde die Küstenregion kurze Zeit später intensiv untersucht, wobei festgestellt wurde, dass am Hang vor der Küste auf einem Gebiet von 4 Kilometern Breite Sediment etwa 1000 Meter in die Tiefe abgerutscht war. Dieses Herabstürzen führte wahrscheinlich zu einer vertikalen Bewegung der Wassersäule. Wie sich zeigte, waren die dadurch ausgelösten Wellen stark genug, um auf einem gut 30 Kilometer breiten Streifen Zerstörungen anzurichten.

In der Folge dieses Ereignisses wurde verstärkt darüber diskutiert, wie häufig derartige Hangrutschungen auftreten und welche Gefahren von ihnen ausgehen. Viele Küstengebiete wurden mit Forschungsschiffen untersucht und mit geophysikalischen Geräten sondiert – unter anderem mit Fächerecholoten, die den Boden mit Schallwellen abtasten. Die Schallwellen werden dabei fächerförmig vom Schiff abgegeben, sodass ein breiter Streifen des Meeresbodens erfasst wird. Je nachdem, wie tief der Meeresboden liegt, dauert es unterschiedlich lange, bis die vom Meeresboden reflektierten Schallwellen am Schiff empfangen werden. Aus den unterschiedlichen Laufzeiten ergibt sich dann ein Höhenprofil des Meeresbodens, auf dem auch deutlich die Spuren von Hangrutschungen zu sehen sind, weil diese ähnlich einer Lawine tiefe Spuren im Sediment hinterlassen. Das Mittelmeer zum Beispiel, das an vielen Stellen steile Hänge aufweist, ist inzwischen fast flächendeckend kartiert. Die Tiefenprofile wurden in großen Datenbanken hinterlegt. Darin sind auch zahlreiche Hangrutschungen dokumentiert, deren Spuren man mithilfe der Geräte entdecken konnte.

Gut erforscht ist inzwischen auch ein Gebiet im Europäischen Nordmeer. Dort, am Kontinentalabhang vor der norwegischen Küste am südlichen Vøring-Plateau – im Norwegischen „Storegga“ (große Kante) genannt –, ereignete sich vor 8200 Jahren eine der größten heute bekannten Rutschungen, die sogenannte Storegga-Rutschung. Damals glitt ein 5600 Kubikkilometer großer Teil der norwegischen Schelfkante ab. Dieser Impuls verursachte einen Tsunami in der Nordsee, der an der Küste der Shetlandinseln eine Höhe von 20 Metern erreichte. Das konnten Forscher aufgrund von Ablagerungen in entsprechender Höhe nachweisen.

3.28 > Vor 8200 Jahren ereignete sich vor Westnorwegen eine der größten heute bekannten Hangrutschungen. Damals glitt ein großer Teil der norwegischen Schelfkante ab und schob sich mehrere Hundert Kilometer weit in den Atlantik.

Wiederholte Massenstürze

Inzwischen ist bekannt, dass es Küsten gibt, an denen sich im Laufe der Zeit immer wieder Rutschungen ereignet haben. Vor der Küste des westafrikanischen Staates Mauretanien etwa gibt es Abschnitte, an denen sich mehrere alte und junge Rutschungen überlagern. Diese Region wird als Mauritania Slide Complex (englisch „slide“ = Rutschung) bezeichnet. Durch Bohrungen und Analysen der verschiedenen Bodenschichten hat man herausgefunden, dass die ältesten Ablagerungen etwa 20 000 Jahre alt sind, wobei die einzelnen Rutschungen offenbar im Abstand von wenigen Tausend Jahren erfolgt sind. Im Vergleich zur Milliarden Jahre alten Erdgeschichte sind das kurze Zeiträume. Vor der US-Küste am Golf von Mexiko wurde im sogenannten Ursa-Becken eine Flanke entdeckt, an der sich in der Vergangenheit etwa alle 5000 Jahre eine Rutschung ereignet hat. Um abzuschätzen, wie oft Hangrutschungen weltweit im Durchschnitt auftreten, ist aber noch weitere Forschungsarbeit nötig.

Seit einigen Jahren versucht man auch zu klären, welche Wellenhöhen derart ausgelöste Tsunamis erreichen können und wie groß ihr Zerstörungspotenzial sein kann. Wertvolle Hinweise darauf liefern Ablagerungen an Küsten, die in der Vergangenheit von Tsunamis getroffen wurden. Bemerkenswert ist in diesem Fall das Beispiel der Kapverdeninsel Fogo, ein etwa 30 Kilometer breiter Vul-

3.29 > Hangrutschungen können Megatsunamis von mehr als hundert Meter Höhe auslösen. Als die Flanke der Kapverdeninsel Fogo vor 73 000 Jahren ins Meer stürzte, entstand eine Tsunamiwelle, bei der sich das Wasser an der Küste der Nachbarinsel Santiago 270 Meter hoch auftürmte.

kankegel, der aus dem Wasser aufragt. Wie man anhand von Ablagerungen am Meeresboden herausgefunden hat, stürzte etwa ein Drittel dieses Vulkankegels vor 73 000 Jahren ins Meer. Dabei bewegte sich Material mit einem Volumen von etwa 500 Kubikkilometern, was umgerechnet einem Klotz von 5 Kilometern Höhe auf der Fläche der Stadt Osnabrück entspricht. Diese Masse bewirkte einen gewaltigen Impuls, der das Wasser am Ufer der etwa 40 Kilometer entfernten Nachbarinsel Santiago 270 Meter weit empor drückte. Solche Tsunamis, die Wellen mit einer Höhe von mehr als 100 Metern erreichen, werden als Megatsunamis bezeichnet.

Die Fernwirkung verstehen

Wie weit solche durch Hangrutschungen ausgelösten Wellen wandern können, wird aktuell erforscht. Da sie im Vergleich zu unterseeischen Erdbebenwellen relativ kleine Ereignisse sind, wirken Hangrutschungen eher lokal. Durch sie ausgelöste Wellen können aber sehr große Höhen erreichen. Ob beispielsweise die Hangrutschung von Fogo an den Küsten von Afrika oder Amerika Schäden angerichtet hat, ist unbekannt, weil es sehr schwierig ist, dort mögliche Spuren eines Tsunamis von vor 73 000 Jahren zu finden. Grundsätzlich aber wird angenommen, dass durch Hangrutschungen ausgelöste Tsunamis keine derart zerstörerische Fernwirkung haben wie etwa das Erdbeben von 2004. Doch selbst wenn Hangrutschungen keine Tsunamis auslösen, können sie zerstörerisch wirken. In mehreren Fällen wurden durch Hangrutschungen bereits Unterseekabel für die Telekommunikation gekappt, was teure Reparaturarbeiten nach sich zog. Diskutiert wird auch die Gefahr für Ölpipelines und Bohrinseln, die vor vielen Küsten an Hängen installiert wurden.

Bekannt geworden sind inzwischen auch Hangrutschungen, die der Mensch selbst ausgelöst hat, etwa die Rutschung von Nizza am 16. Oktober 1979. Vor Nizza fällt der Meeresboden in circa 2 Kilometer Entfernung vom Ufer parallel zur Küstenlinie steil ab. 1979 hatte man eine Hafenmole fingerförmig ins Meer hinausgebaut. Die Baumaßnahmen und vor allem das hohe Gewicht der Molenkonstruktion führten schließlich dazu, dass der Hang nachgab und mitsamt dem neuen Hafen abrutschte. Kurz darauf folgte ein Tsunami, der im Bereich von Nizza eine Höhe von 3 Metern erreichte, dann aber relativ schnell abflachte. Dennoch starben mehrere Personen.

El Niño – folgenschwere Klimaschwankung

Ein anderes natürliches Phänomen, das Küstenlebensräume beeinträchtigen kann, ist das Klimaereignis El Niño, das unregelmäßig alle 3 bis 10 Jahre im tropischen Pazifik auftritt. Dabei kehren sich die Luftdruckverhältnisse zwischen dem Westpazifik und dem zentralen Pazifik um, was zu großräumigen Veränderungen der vorherrschenden Winde und Meeresströmungen führt. In der Folge verändern sich die räumliche Verteilung und Stärke der Niederschläge über dem Land und damit die Bedingungen für die Bevölkerung an den Küsten und Meeresorganismen gleichermaßen massiv. Auch in anderen Meeresregionen der Erde gibt es natürliche Klimaschwankungen, die in einem bestimmten Rhythmus auftreten. El Niño aber gilt als die weltweit größte und folgenschwerste.

Insbesondere bei den Fischern an den Küsten von Chile, Ecuador und Peru ist das Phänomen geradezu gefürchtet, weil El Niño zu einem Einbruch der Fangmengen führen kann. Die Pazifikküste Südamerikas ist wegen des Auftriebs von nährstoffreichem Tiefenwasser normalerweise sehr produktiv. Hier entwickelt sich Plankton in großen Mengen, das wiederum Fischen als Nahrung dient. So gibt es hier besonders große Bestände von Anchovis, einer Sardellenart, und anderen Fischarten.

Kehrt sich nun die Meeresströmung im Zuge von El Niño um, wird warmes und nährstoffarmes Wasser aus der Äquatorialregion an die Küste Südamerikas gedrückt. Der Auftriebsprozess kommt zum Erliegen, die Nährstoffzufuhr bleibt aus, das Planktonwachstum verringert sich und damit auch die Produktion von Anchovis. Stattdessen sind jetzt vor der Küste Südamerikas tropische Fischarten zu finden, die mit dem Warmwassereinstrom mitwandern. Da das einströmende warme Wasser recht sauerstoffgesättigt ist, kommt dies der Bodenfauna zugute, und einige für die Fischerei wichtige Arten wirbelloser Tiere können sich unter diesen Bedingungen prächtig entwickeln. So explodierten während der beiden stärksten El-Niño-Ereignisse im letzten Jahrhundert in den Jahren 1983/84 und 1997/98 die Populationen von Pilgermuscheln und Kraken. In beiden Fällen hielten die El-Niño-

Wie El Niño entsteht

Die Entstehung des Klimaphänomens El Niño war lange Zeit rätselhaft und ist bis heute nicht ganz geklärt. Heute weiß man, dass ein El-Niño-Ereignis mit zwei wichtigen Strömungssystemen in der Atmosphäre zu tun hat – der Hadley-Zirkulation und der Walker-Zirkulation. Die Hadley-Zirkulation ist eine Art Luftströmungswalze, die weltweit in den Tropen wirkt. Aufgrund der in den Tropen ganzjährig hochstehenden Sonne erwärmen sich Luftmassen, die dann aufsteigen und in Richtung der Pole nord- beziehungsweise südwärts strömen. Der Kreis schließt sich, indem in den unteren Schichten der Atmosphäre Luftmassen in Richtung Äquator nachströmen, die dann ihrerseits aufsteigen. Die Kreisbewegung kommt dadurch zustande, dass sich die vom Äquator polwärts strömende Luft nach und nach abkühlt, bis sie im Bereich des nördlichen und südlichen Wendekreises, etwa auf Höhe des 23. Breitengrads, wieder absinkt. Dieser Kreislauf wurde nach seinem Entdecker benannt, dem englischen Physiker George Hadley. Da sich die Erde dreht, werden die absinkenden Luftmassen auf dem Weg von den Wendekreisen zurück zum Äquator in Richtung Westen abgelenkt, sodass der Wind auf der Nordhalbkugel aus Richtung Nordost (Nordostpassat) und auf der Südhalbkugel aus Richtung Südost (Südostpassat) weht. Diese stetigen Winde führen dazu, dass das oberflächennahe Wasser des tropischen Pazifiks in westlicher Richtung von der Küste Südamerikas weggeschoben wird. Dieser stete Druck in Richtung Westen führt dazu, dass der Meeresspiegel im Westpazifik vor Südostasien bis zu 60 Zentimeter höher als vor der Westküste Südamerikas ist.

In dem Maße, wie die Westdrift das Oberflächenwasser vor Südamerika von der Küste fortdrückt, strömt kaltes und nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe an die Meeresoberfläche nach. Dieses Phänomen wird als Auftrieb bezeichnet. Dieses kalte Wasser schiebt sich zunächst wie eine Kaltwasserzunge in den Pazifik und wird dann auf seinem weiteren Weg nach Westen stetig erwärmt, bis die Wassermassen vor Südostasien schließlich eine Temperatur von etwa 30 Grad Celsius erreichen. Aufgrund der Wärme verdunstet das Wasser vor Südostasien in großen Mengen, sodass sich dort verstärkt Wolken bilden und sich ein tropisch-warmes und regenreiches Regenwaldklima entwickeln konnte.

Das andere Strömungssystem, die Walker-Zirkulation, tritt hingegen nur im Pazifik auf. Sie verläuft quer zur Hadley-Zirkulation in West-Ost-Richtung. Die nach ihrem Entdecker, dem englischen Physiker Gilbert Walker, benannte Zirkulation wird durch Luftdruckunterschiede im Westpazifik und im zentralen Pazifik angetrieben.

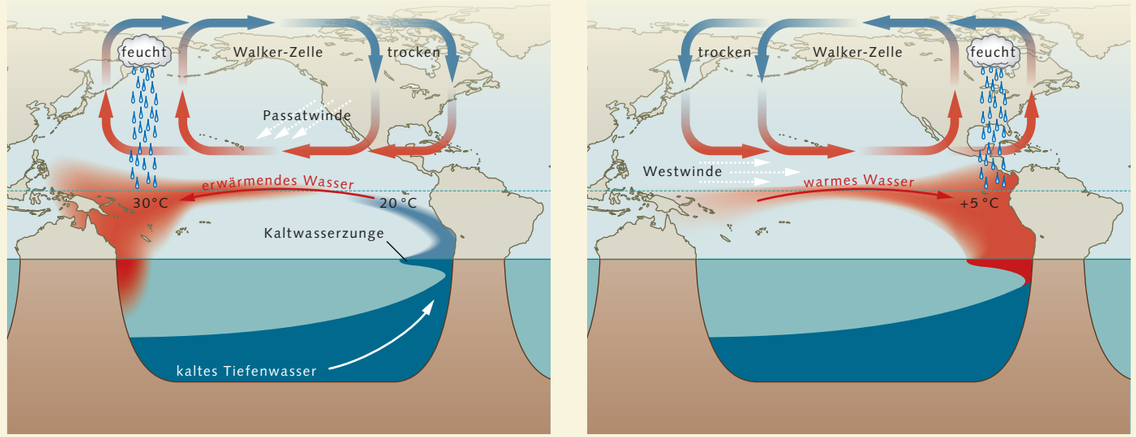
In der Regel liegt über dem westlichen Pazifik im Bereich Südostasiens ein stabiles Tiefdruckgebiet und über dem zentralen Pazifik ein Hochdruckgebiet. Das führt dazu, dass permanent Luftmassen aus dem Bereich des hohen Drucks nach Westen in den Bereich des niedrigen Drucks strömen. Hier steigt warme und feuchte Luft auf, die über Südostasien zur Wolkenbildung und zu Regenfällen führt. Diese Luft strömt dann in der Höhe direkt nach Osten und damit schräg zur Hadley-Zirkulation. Über dem südamerikanischen Kontinent sinkt die Luft dann wieder ab und strömt zurück gen Westen. Da sich die Luftfeuchtigkeit bereits über Südostasien in starken Regenfällen entlädt, ist die Luft, die an der Westseite Südamerikas absinkt, sehr trocken. In der Summe resultiert aus der Walker-Zirkulation und der Hadley-Zirkulation eine stark nach Westen gerichtete Winddrift in den tieferen Schichten der Atmosphäre, wodurch ein stabiles Auftriebssystem aufrechterhalten wird.

Bei einem El-Niño-Ereignis kommt es zu einer Veränderung der Luftdruckverhältnisse: Über Südostasien erhöht sich der Luftdruck, im zentralen Pazifik sinkt er. Dadurch schwächen sich die Winddrift und damit auch der Wassertransport von Ost nach West immer weiter ab. Diese Luftdruckveränderung geht schließlich so weit, dass sich das Luftdruckverhältnis umkehrt. Über Südostasien bildet sich ein Hochdruck-, über dem zentralen Pazifik ein Tiefdruckgebiet. Die westwärts wehenden Winde schwächen sich deutlich ab, und es kann sogar passieren, dass es zu einer Umkehr der Windrichtung kommt. In der Folge strömt das warme Oberflächenwasser aus Richtung Südostasien nach Südamerika. An der trockenen südamerikanischen Westküste entstehen nun oftmals für die Region ungewöhnlich starke Niederschläge. Warum es zu dieser Umkehr des Luftdrucks kommt, ist trotz intensiver Forschung noch immer nicht geklärt.

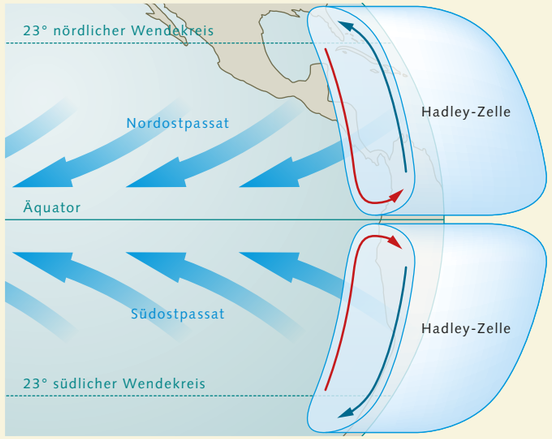
Der Name „El Niño“ stammt aus dem Spanischen und heißt auf Deutsch übersetzt: „das Kind“ beziehungsweise „das Christkind“. Er geht auf südamerikanische Fischer zurück, die seit Langem wissen, dass ein El-Niño-Ereignis um die Weihnachtszeit herum seinen Höhepunkt erreicht. Wissenschaftler bezeichnen das Phänomen heute als ENSO. Diese Abkürzung steht für El Niño/Südliche Oszillation. Damit wird betont, dass dieses Phänomen im Süden auftritt und durch das Schwanken (Oszillation) des Luftdrucks zwischen Ost und West angetrieben wird. Ein El-Niño-Ereignis kann mehr als zwölf Monate andauern.

Neben El Niño gibt es eine weitere Abweichung von dem üblichen Luftdruckregime im Pazifik, das als La Niña, das Mädchen, bezeichnet wird. Bei einem La-Niña-Ereignis verstärkt sich der übliche Luftdruckunterschied. Dabei nimmt der Luftdruck im westpazifischen Tiefdruckgebiet weiter ab, während er im Hochdruckgebiet über dem zentralen Pazifik weiter zunimmt. Dadurch nehmen die Winde, die in westlicher Richtung wehen, an Stärke zu und damit auch der Wassertransport von Südamerika nach Südostasien.

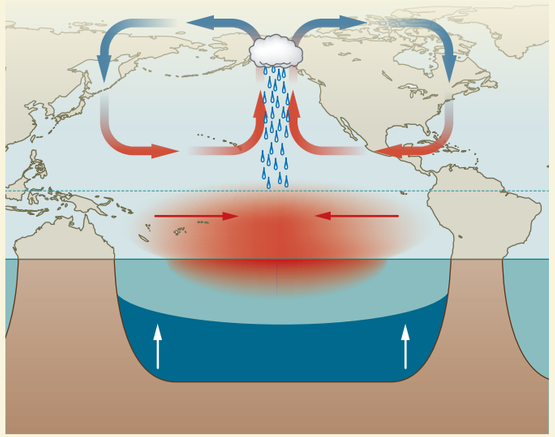
Heute weiß man, dass es neben El Niño und La Niña noch andere Varianten dieses Phänomens gibt. So sind El-Niño-Ereignisse bekannt, die nicht den ganzen Pazifik überspannen. Zwar ändert sich das Luftdruckverhältnis zwischen dem Westpazifik und dem zentralen Pazifik, doch breitet sich das warme Wasser nicht bis nach Südamerika aus. 2004 veröffentlichten japanische Forscher einen Fachartikel, in dem sie diese ungewöhnliche El-Niño-Variante beschrieben. Demnach ändern sich die Luftdrücke über dem Pazifik folgendermaßen: Zum einen bildet sich im zentralen Pazifik ein Tiefdruckgebiet aus. Gleichzeitig entstehen sowohl im Westen als auch im Osten des Pazifiks Hochdruckgebiete, sodass der Wind aus beiden Richtungen, nämlich aus West und Ost, zum Tiefdruckgebiet im zentralen Pazifik strömt, wo die warme Luft dann aufsteigt und Wolken bildet. Diese regnen im zentralen Pazifik ab. Die japanischen Forscher bezeichneten diese Form mit dem Ausdruck „modoki“, einer Wendung in der japanischen Sprache, die auf Substantive folgt und diese relativiert. Sie bedeutet „ähnlich, aber verschieden“. Seitdem wird diese Variante in der Fachwelt als El Niño Modoki tituliert.



3.30 > Für gewöhnlich treiben stetige Passatwinde das Wasser von der Küste Südamerikas auf den Pazifik hinaus. Dadurch steigt vor Südamerika kaltes und nährstoffreiches Tiefenwasser auf. Während eines El-Niño-Ereignisses schwächen sich die Winde ab, sodass jetzt warmes Wasser Richtung Amerika strömt.



3.31 > Die Hadley-Zirkulation ist eine Luftströmungswalze, die in den Tropen wirkt und Luft zwischen dem Äquator und den Wendekreisen bewegt.



3.32 > Beim seltenen Phänomen El Niño Modoki strömt der Wind aus West und Ost zum Tiefdruckgebiet im zentralen Pazifik.

3.33 > Peru ist ein Hauptlieferant von Anchovis, die zu den Sardellen gehört. Durch El Niño können die Fangmengen erheblich sinken.

Phasen über viele Monate an und führten zu starkem Regen und hohen Wassertemperaturen vor Südamerika. Die Anchovisbestände allerdings brachen ein, viele Tiere verhungerten, andere schafften es, sich in verbliebenen Kaltwasserzellen zu konzentrieren, wodurch sie umso leichter von der Industriefischerei gefangen werden konnten. In der Folge des El Niño von 1983/84 brach die Anchovisfischerei vor Peru schließlich völlig zusammen. 1997/98 hatte man aus den Fehlern gelernt und den Fischereidruck während des El Niño drastisch verringert. So gingen zwar die Erträge von zuvor 12 Millionen Tonnen jährlich auf lediglich 2 Millionen zurück, aber schon im nächsten Jahr nahmen die Fangmengen wieder zu.

Schwere Regenfälle über Südamerika

El-Niño-Ereignisse sind auch dafür bekannt, dass sie an der Westküste Südamerikas zu lang anhaltenden schweren Regenfällen führen können. Das jüngste Beispiel ist ein El-Niño-Ereignis, das im Februar und März 2017 vor allem in Peru zu Überflutungen und Erdrutschen führte, sodass für mehr als 800 der rund 1800 peruanischen Bezirke der Notstand ausgerufen wurde. Landesweit verloren mehr als 70 000 Menschen ihre Unterkunft und ihren Besitz. Hundert Personen starben. Zudem führten die Regenmassen zu einer Aussüßung der Küstengewässer. Der Salzgehalt des Meerwassers sank mancherorts auf ein Viertel des üblichen Wertes. Betroffen waren vor allem Muschelzüchter, deren Muscheln im versüßten Meerwasser eingingen.

Wie weit der Einfluss eines starken El-Niño-Ereignisses reicht, weiß man bis heute noch nicht genau. Man nimmt aber an, dass El Niño das Klima auch außerhalb des Pazifiks für mehrere Monate verändern kann. Folgende Konsequenzen lassen sich El Niño mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit zuschreiben:

- eine Zunahme tropischer Sturmaktivitäten im östlichen Nordpazifik;
- eine Abnahme der Hurrikanaktivitäten im Atlantischen Ozean und eine damit korrespondierende Trockenheit in der Karibik und in Mittelamerika, höhere Niederschläge in den südlichen USA und im östlichen Afrika, aber auch Dürren im nordöstlichen Brasilien.

Wie diese Fernwirkungen zu erklären sind, wird aktuell erforscht.

Auch El-Niño-Modoki-Ereignisse können ernste Folgen für Küstenlebensräume haben, obwohl sie nicht den ganzen Pazifik überspannen. 2015 etwa erfolgte eines, dem massive Klimaänderungen in verschiedenen Regionen zugeschrieben wurden – negative Folgen wie Überschwemmungen in Südostindien und Paraguay sowie Dürren in Äthiopien und im südlichen Afrika, aber auch positive Folgen wie milde Wintertemperaturen in den USA und weniger Hurrikans über dem Atlantik. Ob tatsächlich alle Aspekte auf dieses El-Niño-Modoki-Ereignis zurückzuführen sind, ist noch unklar. Als relativ sicher gilt, dass jener von 2015 im Great Barrier Reef an der australischen Nordostküste zu einer besonders ausgeprägten Korallenbleiche geführt hat. In dem Riff hatte es bereits seit Anfang des Jahrtausends mehrere Korallenbleichen gegeben, sodass manche Riffabschnitte bereits geschwächt waren. El Niño Modoki führte zu einer weiteren Erwärmung des Wassers, sodass die Korallen zusätzlich unter Stress gerieten und in großräumigen Riffbereichen ausblichen. Nicht alle Gebiete konnten sich bis heute von dieser Bleiche erholen.

Conclusio

Klimawandel und Naturgefahren bedrohen die Küsten

Wie stark die Folgen des Klimawandels für die Küstenlebensräume ausfallen werden, hängt in hohem Maße vom Kohlendioxidgehalt (CO_2) in der Erdatmosphäre ab. Die direkte Folge des starken CO_2-Ausstoßes ist die langsame Erwärmung der Atmosphäre, die eine Erwärmung insbesondere des Oberflächenwassers nach sich zieht, welches sich dann schlechter mit dem darunterliegenden kühleren und schwereren Wasser mischen kann. Dadurch gelangt weniger sauerstoffreiches Wasser in die Tiefe, was dort einen Sauerstoffmangel bewirken kann. Tiere wie Krebse, Muscheln oder Fische können in solchen Gebieten kaum mehr leben. Von der Erwärmung sind auch tropische Korallenarten betroffen. Derzeit geht man davon aus, dass etwa 20 Prozent durch die Erwärmung und andere Stressfaktoren wie etwa die Meeresverschmutzung unwiederbringlich zerstört und mindestens weitere 30 Prozent stark geschädigt sind. Bei anderen Meeresorganismen reagieren vor allem Eier und Larven empfindlich auf die Meereserwärmung. Beim nordostatlantischen Kabeljau etwa führt sie zum frühen Absterben. Künftig könnten die Erträge der wirtschaftlich bedeutenden Kabeljaufischerei in der Barentssee stark zurückgehen.

Eine weitere Folge des Klimawandels ist die Versauerung der Meere. Dazu kommt es, weil sich zunehmend CO_2 im Meerwasser löst und sich dadurch Säure bildet. Betroffen sind vor allem jene Meeresorganismen, die Kalkschalen oder -skelette bilden. Bei Korallen, Muscheln und Schnecken nimmt die Kalkbildung in versauertem Wasser je nach untersuchter Tiergruppe um 22 bis 39 Prozent ab. Andererseits weisen inzwischen Studien darauf hin, dass einige Meeresorganismen im Laufe von mehreren Generationen besser mit der Versauerung zurechtkommen können.

Eine Gefahr für den Menschen stellt der durch den Klimawandel verursachte Anstieg des Meeresspiegels dar. Seit 1990 steigt er im Mittel jährlich um etwa 3 Millimeter, wobei sich diese Zunahme bei anhaltendem CO_2-Ausstoß noch verstärken dürfte. Für das Jahr 2100 wird erwartet, dass der globale Meeresspiegel durchschnittlich um bis zu 1 Meter gestiegen sein wird.

Neben den Folgen des Klimawandels gibt es auch eine Reihe natürlicher Gefahren, denen die Küsten ausgeliefert sind. Dazu zählen Erdbeben, Hangrutschungen oder Tsunamis sowie natürliche Klimaphänomene. Auf das Eintreten solcher Ereignisse hat der Mensch zwar keinen Einfluss, doch wurden eine Reihe technischer Lösungen entwickelt, um die Küstenbevölkerung so gut wie möglich zu schützen. Vielfach hat man dabei direkt aus vergangenen Unglücken Lehren ziehen können, wie etwa bei Tsunamis, die vor allem durch Erdbeben ausgelöst werden. Während Japan und die USA bereits seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts Warnsysteme aufgebaut haben, wurde im Indischen Ozean erst nach dem Tsunami von 2004 ein Warnsystem etabliert.

Tsunamis können auch durch Hangrutschungen ausgelöst werden. Diese entstehen, wenn sich an Flanken größere Mengen von Sand oder Sediment lösen und in die Tiefe stürzen. In der Regel haben solche lokalen Ereignisse nicht die Fernwirkung einer erdbebenbedingten Tsunamiwelle. Allerdings sind Höhen von mehr als hundert Metern möglich.

Küstenlebensräume können auch durch das Klimaereignis El Niño beeinträchtigt werden, das alle 3 bis 10 Jahre im tropischen Pazifik auftritt. Dieses kann zu starker Trockenheit in Südostasien und sintflutartigen Regenfällen in Südamerika führen. Zudem ändert sich die Wassertemperatur im Pazifik, wodurch die großen Fischbestände vor Südamerika einbrechen. Die Einbußen in der Fischerei sind beträchtlich.

4 Küsten besser schützen

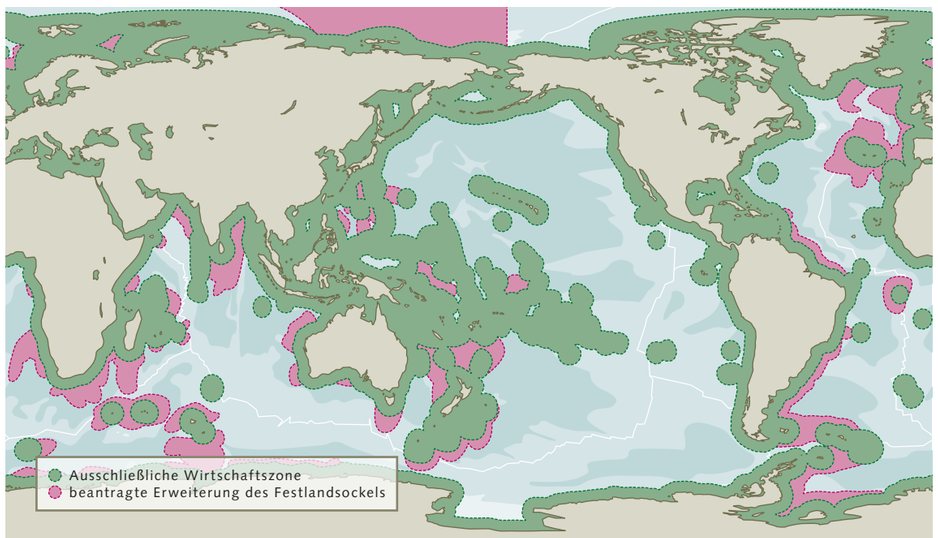
> Um den Lebensraum Küste zu erhalten, muss er geschützt werden. Dazu gehört ein schonendes Management der Küstengebiete, das alle Interessengruppen berücksichtigt, aber auch ein Katalog wirkungsvoller Küstenschutzmaßnahmen, der sich an den steigenden Meeresspiegel anpassen lässt. Weltweit gibt es Beispiele, die Hoffnung machen. Eine Herausforderung bleibt es, Küstenbewohnern, die durch den Klimawandel ihr Zuhause verlieren, eine neue Heimat zu geben.

Die Kunst, Küsten zu verwalten

> Unterschiedliche Interessen führen immer wieder zu Konflikten beim umfassenden Schutz der Küsten. Wenn sich aber die einzelnen Interessengruppen auf einen nachhaltigen Managementplan einigen können, bringt dieser oft allen Beteiligten beträchtliche Vorteile.

Die Bedeutung der Küsten – eine Frage der Perspektive

Die Küsten der Welt sind vielfältig. Einige sind als Urlaubsdestination beliebt und fast unberührt geblieben. Andere wiederum, die an wichtigen Wasserstraßen liegen, sind industriell stark entwickelt. Und es gibt Küstengebiete, die für die handwerkliche Fischerei von Bedeutung sind. Sie liefern große Mengen an Fisch, mit dem Millionen Menschen ihren Lebensunterhalt bestreiten, werden andererseits oft als natürliches Klärwerk für die Hinterlassenschaften einer zunehmenden Küstenbevölkerung benutzt. Welche Bedeutung die Küsten in traditioneller oder auch religiöser Hinsicht haben, ist von Kultur zu Kultur sehr unterschiedlich. Und ob eine Region oder ein Staat die Küsten überhaupt als bedeutsam erachtet, hängt von vielerlei Faktoren ab und spiegelt sich nicht zuletzt in aktiven politischen Maßnahmen zu deren Schutz wider.



4.1 > Küstenstaaten haben in ihrer Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) das exklusive Recht, Meeresressourcen wie etwa Fische auszubeuten. Unter bestimmten Voraussetzungen können sie ihre AWZ sogar noch um einen Teil des Festlandsockels erweitern.

Internationale Spielregeln für die Küstengebiete der Welt

Wer ein Küstengebiet auf welche Weise nutzen darf, ist heute international klar durch das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (SRÜ) geregelt, das von der UN-Seerechtskonferenz 1982 verabschiedet wurde und nach langwierigen Verhandlungen 1994 in Kraft trat. Es legt die Spielregeln für alle Meeresnutzungen wie Schifffahrt, Fischfang, Erdgas- und Erdölförderung und Umweltschutz fest. Die Vorschriften des SRÜ gelten für alle Staaten und grundsätzlich in allen Meereszonen. Allerdings ist zu beachten, dass für die Umsetzung des Rechts in verschiedenen Meereszonen jeweils andere Zuständigkeiten gelten. Folgende Küsten- und Meeresgebiete werden unterschieden:

4.2 > Der Nationalpark Banc d'Arguin ist ein Watt- und Lagunengebiet an der Küste des westafrikanischen Staates Mauretanien. Der Nationalpark ist ein wichtiges Überwinterungsbiet für Zugvögel, die sich dort ihre Fettreserven für den langen Flug anfressen.

KÜSTENMEER: Das Küstenmeer ist die 12-Seemeilen-Zone. Es gehört zum Hoheitsgebiet eines Staates. Aktivitäten in dieser Zone unterliegen der Gesetzgebung der einzelnen Staaten. Die Gesetzgebung muss aber den international vereinbarten Regeln entsprechen, sofern der Staat das SRÜ ratifiziert hat.

AUSSCHLIESSLICHE WIRTSCHAFTSZONE (AWZ): Diese erstreckt sich vom äußeren Rand des Küstenmeers bis 200 Seemeilen (circa 370 Kilometer) vor der Küste. Die AWZ wird daher auch als 200-Seemeilen-Zone bezeichnet (200-sm-Zone). Zur AWZ zählen der Meeresboden und die Wassersäule. Anders als das Küstenmeer gehört die AWZ nicht zum Hoheitsgebiet eines Staates. Gleichwohl darf allein der Küstenstaat in seiner AWZ Ressourcen wie etwa Erdöl und Erdgas, mineralische Rohstoffe oder auch die Fischbestände ausbeuten. Andere Nationen dürfen die Rohstoffe nur dann nutzen, wenn der jeweilige Küstenstaat zustimmt. Die Ressourcengewinnung in der AWZ unterliegt der Gesetzgebung des Küstenstaats, welche wiederum den internationalen Regeln des SRÜ entsprechen muss. Für andere Meeresnutzungen, insbesondere die Schifffahrt, gilt die Freiheit der Hohen See auch in der AWZ.

FESTLANDSOCKEL: Als Festlandsockel wird der flach oder steil abfallende Meeresboden vor der Küste bezeichnet, der eine natürliche geologische Verlängerung des Festlands ist. Für den Begriff gibt es eine rechtliche und eine geologische Definition. Im rechtlichen Sinn ist damit jener Bereich gemeint, der bis 200 Seemeilen vor der Küste reicht. Im geologischen Sinn wiederum 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. Der Festlandsockel ist wirtschaftlich besonders interessant, weil hier unter anderem große Mengen an Erdgas und Erdöl zu finden sind. In vielen Teilen der Welt gibt es Regionen, wo sich geologisch ein äußerer Festlandsockel nachweisen lässt, der innerhalb der Ausschließlichen Wirtschaftszone beginnt, sich jenseits der 200-Seemeilen-Grenze fortsetzt und somit den Einflussbereich des Küstenstaats erweitert.

Solch ein Nachweis muss gegenüber der Festlandsockelkommission (Commission on the Limits of the Continental Shelf, CLCS) in New York wissenschaftlich erbracht und von dieser akzeptiert werden. Dieser äußere Festlandsockel, der über die AWZ hinausgeht, kann dann bis auf eine Linie von maximal 350 Seemeilen vor der Küste ausgedehnt werden. Alternativ kann ein Staat ein Meeresgebiet bis zu 100 Seemeilen jenseits der 2500-Meter-Tiefenlinie als Erweiterung des Festlandsockels über die Grenzen der AWZ hinaus beanspruchen und in manchen Fällen sogar noch darüber hinaus.

HOHE SEE: An die AWZ schließt sich die Hohe See an, die kein Nationalstaat für sich beanspruchen darf. Sie steht allen Staaten für eine Nutzung offen. Gleichwohl wird die Nutzung der Ressourcen in der Hohen See reguliert. Die Fischerei etwa wird durch Regionale Organisationen für das Fischereimanagement (Regional Fisheries Management Organisations, RFMOs) geregelt, die beispielsweise Höchstfangmengen für Fischarten vorgeben. Über die Nutzung und Verteilung der Rohstoffe am Meeresboden hingegen wacht allein die Internationale Meeresbodenbehörde der Vereinten Nationen (International Seabed Authority, ISA). Sie ist für alle mineralischen Ressourcen am Meeresboden zuständig. Diese sind im Seerechtsübereinkommen als gemeinsames Erbe der Menschheit definiert.

Nationalstaatliche Reglements

Während das SRÜ die Nutzung der verschiedenen Meeresgebiete international klar regelt und damit definiert, wem das Meer beziehungsweise die Küstengewässer gehören, obliegt das Management der 12-Seemeilen-Zone allein dem betreffenden Staat, was dazu führt, dass die administrative Ausgestaltung von Nation zu Nation (und in föderalen Staaten mitunter gar von Land zu Land) unterschiedlich geregelt ist. Für das Management der Küstengewässer bedeutet das einen erheblichen Abstimmungsbedarf zwischen verschiedenen Behörden.

Wie viele Behörden in die Verwaltung der Küsten einbezogen sein können, lässt sich exemplarisch an der Verwaltung der deutschen Nordseeküste zeigen, an die die Bundesländer Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Hamburg grenzen. Allein in Niedersachsen teilt sich die Verantwortung für das Küstenmeer auf folgende Behörden beziehungsweise Körperschaften auf:

- Wasser- und Schifffahrtsämter: Sie unterstehen dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur und sind für die Sicherheit der Schifffahrt im Küstenmeer und auf den Bundeswasserstraßen Elbe, Weser und Ems zuständig, die dem Bund unterstehen. Zu ihren Aufgaben gehört das Setzen und Warten von Seezeichen und die Unterhaltung von Uferbefestigungen sowie von Schleusen und Wehren entlang der Bundeswasserstraßen. Für den Naturschutz an den Ufern der Bundeswasserstraßen sind wiederum die unteren Naturschutzbehörden der Landkreise zuständig, sofern diese Gebiete nicht zu einem Nationalpark oder Biosphärenreservat zählen.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz: Es ist für jene Naturgebiete an der Küste zuständig, die den Status eines Biosphärenreservats haben. Biosphärenreservate sind von der UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur) initiierte Modellregionen, in denen eine nachhaltige Entwicklung in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht erreicht werden soll.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN): Er ist dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz unterstellt und für den Küstenschutz auf den niedersächsischen Inseln zuständig; die Behörde arbeitet eng mit den Deichverbänden zusammen. Zudem ist der NLWKN für den Naturschutz in einem Teil der Deichvorländer zuständig – beispielsweise in den Salzwiesen.
- Nationalparkverwaltung: Sie ist dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz unterstellt und für den Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer zuständig, darüber hinaus für jene Deichvorländer, die im Bereich des Nationalparks liegen.
- Hauptdeichverbände: Sie sind Körperschaften des öffentlichen Rechts, die für die Sicherheit der Deiche, die die Festlandküste auf voller Länge schützen, zuständig sind. Die Deichverbände haben eine lange, teils mehrere Hundert Jahre alte Tradition. Sie wurden von den Bewohnern der verschiedenen Küstengemeinden gegründet und bestehen bis heute zu einem großen Teil aus ehrenamtlichen Mitarbeitern. Der Vorsteher eines Deichverbands ist der Deichgraf. In den 1960er-Jahren wurden mehrere Deichverbände zusammengelegt, sodass es heute an der niedersächsischen Küste insgesamt 22 Hauptdeichverbände gibt, die die Deiche kontrollieren und ausbessern.
- Untere Naturschutzbehörden: Sie sind den jeweiligen Landkreisen unterstellt und für jene Naturgebiete an der Küste zuständig, die nicht zu den Nationalparks zählen.

Schon das Beispiel Niedersachsen zeigt, welche Fülle an Zuständigkeiten es in einem Bundesland gibt. In Hamburg und Schleswig-Holstein gibt es im Detail wiederum andere Reglements und auch Behördenstrukturen. Diese Vielfalt ist zu einem großen Teil auf das föderale System der Bundesrepublik Deutschland zurückzuführen, doch ist es auch ein Beispiel dafür, dass das Management eines gesamten Küstengebiets nur bei klarer Abstimmung und Arbeitsteilung zwischen den verschiedenen Behörden funktionieren kann. So ist es beispielsweise über die Jahre gelungen, das deutsche Wattenmeer trotz verschiedener Zuständigkeiten über die Grenzen der Bundesländer hinweg in Gänze als Nationalpark unter Schutz zu stellen. Darüber hinaus liegt die Verantwortung für Infrastrukturen von überregionaler Bedeutung wie etwa den Bundeswasserstraßen in einer Hand – beim Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Allerdings betonen Experten auch, dass die Aufteilung in verschiedene Behörden Vorteile haben kann. So gebe es in den verschiedenen Behörden eine große Zahl an Fachleuten, die über wichtiges Detail- und Spezialwissen verfügten, sei es im Küsten- oder Naturschutz oder im Hinblick auf die Sicherheit von Wasserstraßen.

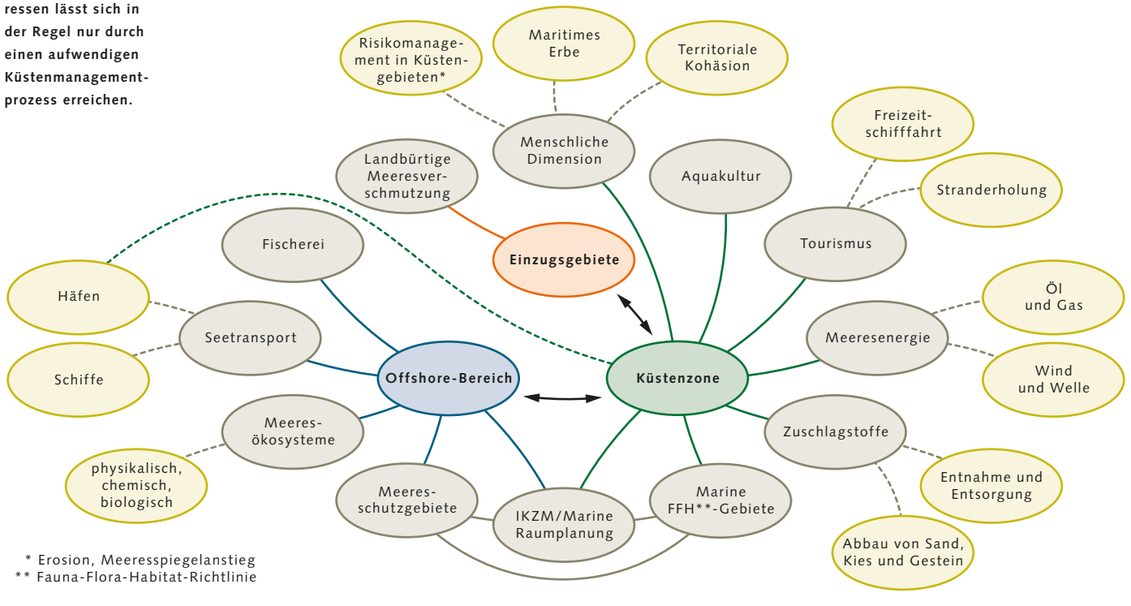
Viele Ansprüche – viele Konflikte

Küsten haben viele Funktionen und erbringen viele Ökosystemleistungen – etwa die Bereitstellung von Fisch, Schifffahrtsstraßen, Tourismus und Erholung oder Raum

4.3 > Für die Unterhaltung und die Sicherheit der Bundeswasserstraßen wie hier der Elbe ist das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur zuständig. Die Deiche, die das Hinterland schützen, werden hingegen von Deichverbänden gepflegt.

für Landwirtschaft und Bauvorhaben. Damit konzentrieren sich auf dem relativ schmalen Streifen zwischen Land und Meer in dicht besiedelten oder stark genutzten Küstenregionen zahlreiche Aktivitäten – und damit automatisch viele verschiedene Zuständigkeiten. Diese Vielzahl kann leicht zu Konflikten führen, wenn es keine ausreichende Abstimmung zwischen den jeweils zuständigen Behörden oder allgemein den verschiedenen Interessengruppen gibt. Beispielsweise steht die Nutzung durch den Menschen oftmals Naturschutzaspekten entgegen. So führte in China der Wunsch nach wirtschaftlicher Entwicklung zu einer erheblichen Belastung der Küstengebiete. Um möglichst schnell zu den hohen ökonomischen Standards des Westens aufzuschließen, wurde Umweltaspekten oftmals nur wenig Beachtung geschenkt. Gegen eine so einseitige Fokussierung regt sich heute in der chinesischen Bevölkerung zunehmend Widerstand und man erkennt, dass sich Zielkonflikte ergeben haben, die sich nur lösen lassen, wenn nicht nur Partikularinteressen bedient werden. Nicht nur in China, sondern auch in vielen anderen Regionen weltweit verhindert eine solche sektorielle Sichtweise einen effizienten Schutz der Küstenlebensräume oder eine nachhaltige Nutzung. Noch schwieriger ist die Situation, wenn sich Küstenlebensräume über Staatsgrenzen erstrecken, wie es zum Beispiel beim Wattenmeer in Deutschland, den Niederlanden und Dänemark der Fall ist. Hier ist ein wirkungsvolles Küstenmanagement nur in internationaler Zusammenarbeit möglich.

4.4 > In vielen Küstengebieten gibt es eine große Zahl an Nutzungsinteressen, die das Land und das Küstenmeer betreffen. Die Abstimmung aller dieser Interessen lässt sich in der Regel nur durch einen aufwendigen Küstenmanagementprozess erreichen.



* Erosion, Meeresspiegelanstieg
** Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie

Alle Parteien an einem Tisch

Ein entsprechendes Konzept für das nachhaltige und umfassende Management von Küsten wurde erstmals im Jahr 1992 während der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro vorgestellt: das Integrated Coastal Zone Management (ICZM), das Integrierte Küstenzonenmanagement (IKZM), das die nachhaltige Entwicklung der Küstenzonen zum Ziel hat und dabei versucht, alle Aspekte der Küstenentwicklung miteinander in Einklang zu bringen. Bis heute haben viele Staaten und Staatengemeinschaften das ICZM zur Leitlinie für die Planung der zukünftigen Küstenentwicklung gemacht – beispielsweise die Europäische Union, die ICZM wie folgt definiert: „Das Integrierte Küstenzonenmanagement versucht langfristig, ein Gleichgewicht herzustellen zwischen den Vorteilen der wirtschaftlichen Entwicklung und der Nutzung der Küstengebiete durch die Menschen, den Vorteilen des Schutzes, des Erhalts und der Wiederherstellung der Küstengebiete, den Vorteilen der Minimierung der Verluste an menschlichem Leben und Eigentum sowie den Vorteilen des Zugangs der Öffentlichkeit zu und der Freude an den Küstenzonen, und zwar stets innerhalb der durch die natürliche Dynamik und die Belastbarkeit gesetzten Grenzen.“ Obwohl das ICZM heute als Werkzeug für das künftige Küstenzonenmanagement anerkannt ist, bleibt die Abstimmung der Partikularinteressen der verschiedenen Interessengruppen die größte Herausforderung.

Nach Aussage der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Welternährungsorganisation) gibt es heute eine Reihe von Gründen, die dazu führen, dass Küstenlebensräume nicht nachhaltig genutzt, sondern ausgebeutet und zerstört werden. Dazu zählen:

- große, auf schnellen Profit ausgerichtete Wirtschaftsunternehmen, die Ressourcen ausbeuten oder zerstören und mit den Interessen der Küstenbevölkerung in Konflikt stehen;
- Mangel an ernsthaften staatlichen Folgemaßnahmen bei der Unterstützung und Durchsetzung von Naturschutzprogrammen;
- mangelndes Bewusstsein bei Einheimischen und politischen Entscheidungsträgern für ein Management, das auf nachhaltige Ressourcennutzung setzt;
- Armut, die durch die Verknappung von Ressourcen, die Schädigung der Habitate und Aufzuchtgebiete von Fischen sowie einen Mangel an alternativen Existenzgrundlagen verschärft wird;
- starkes Bevölkerungswachstum.

Gutes Management lohnt sich

Dieses Konfliktpotenzial lässt sich, so die FAO, entschärfen, wenn alle diese Aspekte im Rahmen eines Integrierten Küstenzonenmanagements berücksichtigt und einmal aufgesetzte ICZM-Programme auch vollständig umgesetzt werden. Gemäß FAO können ICZM-Programme Staaten beziehungsweise einzelnen Küstenregionen auf folgende Weise nützen:

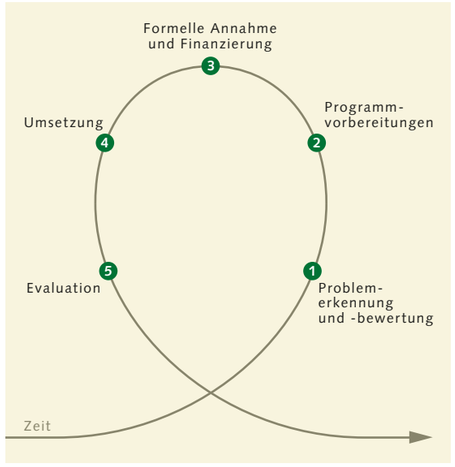
- Erleichterung eines nachhaltigen Wirtschaftswachstums auf der Grundlage natürlicher Ressourcen;
- Erhaltung der natürlichen Lebensräume und Artenvielfalt;
- Kontrolle der Verschmutzung und der Veränderung von Küsten und Strandfronten;
- Kontrolle möglicher Verschmutzungen in Wassereinzugsgebieten, die in die Küstenregion entwässern;
- Kontrolle von Meeresbergbau oder sonstigen baulichen Veränderungen in Korallenriffen und allgemein am küstennahen Meeresboden;
- nachhaltige Verwendung übernutzter Ressourcen, sodass sich diese erholen können, etwa die Bestände von Fischen und anderen Meeresorganismen;
- Bereitstellung von Mechanismen und Werkzeugen für eine gerechte und nachhaltige Zuteilung von Ressourcen unter den verschiedenen Interessengruppen;
- schnellere und zielgerichtete Umsetzung von Projekten durch Einbeziehung aller Interessengruppen, weil nachträgliche Differenzen vermieden werden, die ein Projekt verzögern könnten;
- Vermeidung von Schäden an der Meeresumwelt oder an marinen Ressourcen.

Darüber hinaus soll ein umfassendes ICZM heute nicht nur den unmittelbaren Küstenstreifen und das Küstenmeer betrachten, sondern auch die vielfältigen Beziehungen zwischen der Küste und dem Hinterland – sei es im Hinblick auf die Schaffung von Absatzmärkten für neue nachhaltig gewonnene Produkte oder im Hinblick darauf, Verschmutzungen der Küstengewässer, die ihren Ursprung an Land haben, zu verhindern. Die FAO betont, dass diese Auflistung die ideale Form eines ICZM darstellt und dass heute nicht in jedem Falle bei ICZM-Projekten alle Ziele erreicht werden. Doch immerhin hat sich die ICZM-Idee vielerorts durchgesetzt.

Je nach Zahl der Nutzungsinteressen kann ein ICZM-Prozess unterschiedlich komplex sein. Sind nur einzelne oder wenige Nutzergruppen beteiligt, ist der Gesamtprozess meist schlanker. Das kann beispielsweise in Küstengebieten von Entwicklungsländern der Fall sein, wo die Küste durch handwerkliche Fischerei geprägt ist und wenige andere Nutzungsarten existieren. Inzwischen gibt es erfolgreiche Beispiele, die Schule machen können.

Optimierung durch Qualitätskontrolle

Für einen erfolgreichen ICZM-Prozess ist die regelmäßige Kontrolle, ob mit bestimmten Maßnahmen ein gesetztes Ziel erreicht werden konnte, von entscheidender Bedeutung. Das bedeutet auch, dass ein ICZM kein einmaliges Projekt ist, sondern einen zyklischen Prozess darstellt, in dem Ergebnisse immer wieder überprüft und bewertet werden. So ist es auch möglich, den ICZM-Prozess nach und nach an neue Bedingungen anzupassen und zu optimieren. Ein ICZM-Zyklus beginnt mit einer Analyse der Situation und Bewertung der Probleme. Es folgt die Ausgestaltung eines Aktionsplans, der alle Probleme berücksichtigt. Anschließend wird der Aktionsplan formal von allen Beteiligten verabschiedet. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Finanzierung sämtlicher Maßnahmen aus dem Aktionsplan geklärt wird. Es folgt die Phase der Implementierung. Wurden die im Aktionsplan festgelegten Maßnahmen umgesetzt, erfolgt eine Evaluation, die die Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung bewertet. Treten weiterhin Probleme oder neue Schwierigkeiten auf, muss der Aktionsplan nachgebessert werden. Damit schließt sich der Kreis.



4.5 > Im Idealfall verläuft ein ICZM-Prozess in Zyklen. Dabei werden Maßnahmen geplant, umgesetzt und dann bewertet. Gibt es Optimierungsbedarf, startet der nächste Zyklus mit der Planung neuer Maßnahmen.

Je nachdem, welche Dimension ein ICZM-Prozess hat, dauert ein Zyklus unterschiedlich lange. Best-Practice-Beispiele zeigen, dass bei einem ICZM-Projekt von nationaler Dimension ein Zyklus von der Analyse der Situation bis zur Evaluation etwa acht bis zwölf Jahre dauert. Umfasst der Prozess nur eine bestimmte Küstenregion oder eine einzige Küstenstadt, dauert ein Zyklus im Schnitt rund drei bis vier Jahre.

Die Menschen vor Ort mitnehmen

Je nach Situation vor Ort müssen verschiedene Interessengruppen in den ICZM-Prozess eingebunden werden. Das verdeutlichen die folgenden erfolgreichen Beispiele.

Im Jahr 2000 gründete sich im indopazifischen Raum, jener Meeresregion, die den Indischen Ozean und den westlichen Pazifik umfasst, das Locally-Managed Marine Area Network (LMMA, Netzwerk lokal verwalteter Meeresgebiete). Dieses Netzwerk wurde zunächst durch die Arbeit von Nichtregierungsorganisationen und einzelnen gut vernetzten Wissenschaftlern angeregt und konnte sich schließlich in der Region etablieren. Es hat das Ziel, Küstengewässer zu schützen, indem sie nachhaltig und schonend genutzt werden – beispielsweise, indem Fischer von der zerstörerischen Dynamitfischerei auf sanftere Fangmethoden umsteigen. Die LMMA-Idee ist aus der Einsicht geboren, dass Meeresschutzgebiete, die auf hoher politischer Ebene festgelegt werden, von der Bevölkerung oftmals nicht akzeptiert werden, weil sie deren Rechte mitunter massiv beschneiden. In konkreten Fällen wurde der Bevölkerung die Fischerei in Meeresschutzgebieten (Marine Protected Areas, MPAs) komplett untersagt, was nicht mit dem traditionellen Verständnis der Einheimischen in Einklang zu bringen war. Die Einheimischen widersetzten sich dem Nutzungsverbot, womit der Meeresschutz in den betreffenden Gebieten von Anfang an unterhöhlt wurde. Dem LMMA-Netzwerk gehören inzwischen viele Dorfgemeinschaften in verschiedenen Ländern an, die sich immer wieder in regionalen, nationalen und internationalen Workshops austauschen. Das oberste Ziel des LMMA ist der Meeresschutz.

Der Unterschied zu der Idee von MPAs besteht darin, dass die Basis bei der Planung Gehör findet und das nachhaltige Management vor Ort selbst regelt. So sind bei der

4.6 > Ein selbst gemaltes Schild für ein selbst verwaltetes Schutzgebiet. Das Meer um die Insel Vanua Levu, die zu Fidschi gehört, wurde in einem umfassenden Managementprozess zu einem lokal verwalteten Meeresgebiet erklärt. Hier sorgen die einheimischen Fischer selbst für eine nachhaltige Nutzung der Fische und Meeresfrüchte.

Planung alle Interessengruppen beteiligt: die Dorfgemeinschaften, die Gemeinschaften von Landbesitzern, Naturschützer, Vertreter der regionalen oder nationalen Behörden, die vor Ort wohnen, sowie Wissenschaftler, die beratend zur Seite stehen.

Die Probleme sind in vielen Küstengebieten des indopazifischen Raumes ähnlich. So werden die Meereslebensgemeinschaften und natürlichen Ressourcen vielerorts durch Überfischung, zerstörerische Fischerei wie etwa Dynamit- und Zyanidfischerei, durch Verschmutzung oder industrielle Aktivitäten an Land geschädigt. Die Korallenriffe in der Region werden zusätzlich durch das Betreten durch Touristen, durch Anker oder durch Entnahme von Korallen für den Verkauf als Souvenirs zerstört. Wichtig ist, dass die einheimische Bevölkerung durch den LMMA-Prozess ihre Souveränität behalten kann, indem sie in Abstimmung mit anderen Interessengruppen darüber mitentscheiden kann, welche Fischereimethoden sie künftig anwenden sollte. Zum Planungsprozess gehört auch, alternative Aktivitäten zu entwickeln, mit denen die Einheimischen künftig ihr Einkommen sichern können.

Über die Einhaltung der vereinbarten Regeln wachen entweder lokale Chiefs, traditionell organisierte Dorfgemeinschaften oder auch die örtlichen Küstenfischereibehörden. In der Regel wird während des LMMA-Planungsprozesses auch ein Gebiet festgelegt, für das ein völliges Nutzungsverbot gilt, wodurch garantiert wird, dass sich die Bestände der genutzten Meeresorganismen erholen können. Damit kommt die LMMA-Idee dem Prinzip der MPAs durchaus nahe. Zusammengefasst verfolgt der LMMA-Ansatz folgende Ziele:

- verbesserter Zustand des Meereslebensraums (Bedeckung mit Korallen, Seegras, Mangroven);
- größere Fischbestände und damit verstärkte Reproduktion der Fische und höhere Fischbiomasse;
- daraus resultierend höhere Einkommen aus der Nutzung mariner Ressourcen;
- bessere Fähigkeit der lokalen Bevölkerung, ihre Ressourcen zu managen;
- Gefühl der stärkeren Umweltverantwortung und des gemeinschaftlichen Zusammenhalts.

Der lange Weg zum Weltnaturerbe Wattenmeer

Wie kompliziert und langwierig es sein kann, eine nachhaltige Nutzung eines Küstengebiets trotz gegensätzlicher Positionen zu erreichen, zeigt das Beispiel des nordwesteuropäischen Wattenmeeres, das seit dem Jahr 2009 Weltnaturerbe der UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur) ist. Dieses weltweit größte Wattgebiet ist etwa 500 Kilometer lang und erstreckt sich über weite Teile der niederländischen, deutschen und dänischen Nordseeküste. Mit dem Status als Weltnaturerbe ist es heute international als wichtiger und besonders ästhetischer Naturraum anerkannt, der insbesondere als Aufzuchtgebiet für die Fische der Nordsee und Millionen von Brut- und Rastvögeln von Bedeutung ist. Jedes Jahr besuchen heute mehrere Millionen Urlauber diese Region.

Es dauerte fast 50 Jahre, bis der Schutzstatus erreicht wurde. Interessanterweise ist dies gelungen, obwohl die Anrainerstaaten den Schutz dieses grenzüberschreitenden Naturraums jeweils durch eigene nationale Gesetzgebungen verfolgt haben und weniger durch trilaterale Abkommen. Zudem zeigt dieses Beispiel, dass sich vor allem durch das beharrliche und jahrelange Engagement einzelner Protagonisten und Naturschutzverbände anfängliche Widerstände überwinden lassen.

1953 ereignete sich in den Niederlanden und 1962 in Deutschland jeweils eine schwere Sturmflut. In beiden Fällen brachen entlang der Nordseeküste an vielen Stellen die Deiche. In den Niederlanden starben 1953 etwa 1800 Menschen, in Deutschland 1962 mehr als 300. In den folgenden Jahren wurden vielerorts Deiche verstärkt und die Küstenlinien durch die Abdeichung von Buchten begradigt. Diskutiert wurden zudem in den Niederlanden und in Deutschland die großen Lösungen – die Eindeichung großer Teile des Wattenmeeres. Damit sollte nicht nur das Land vor weiteren Fluten geschützt werden, sondern man plante zudem, die so neu gewonnenen Flächen industriell und agrarwirtschaftlich zu nutzen. In den 1960er-Jahren galt das Wattenmeer in allen drei Nationen als rückständiger Raum, der wirtschaftlich entwickelt werden müsse. Zu diesem Zweck sollte in den eingedeichten Gebieten zunächst eine Reihe von Atomkraftwerken errichtet werden, die dann weitere Industrieansiedelungen nach sich ziehen sollten. Auch der Bau eines Flughafens wurde vorgeschlagen.

4.7 > 1972 protestierten Fischer in den Niederlanden gegen die Eindeichung der Oosterschelde.

Erste Kritik an diesen Plänen kam 1965 in den Niederlanden auf, wo Aktivisten Protestbriefe in Tageszeitungen veröffentlichten. Aus diesem einzelnen Akt des Widerstands entstand die erste Naturschutzorganisation, die sich ganz dem Schutz des Wattenmeeres widmete, die Landelijke Vereniging tot Behoud van de Waddenzee (Verein zum Schutz des Wattenmeeres). Zur gleichen Zeit hatte die Königlich Niederländische Akademie der Wissenschaften eine Gruppe junger Wissenschaftler mit einer ersten systematischen Datenerhebung zur Ökologie des Wattenmeeres beauftragt. Zwar war die Bedeutung des Lebensraums für die Aufzucht von Fischen und die Vogelwelt bekannt. Darüber hinaus aber war das Ökosystem kaum verstanden. Den Naturschützern standen damit starke Befürworter aus dem wissenschaftlichen Bereich zur Seite. Die Wissenschaftler betonten schon damals die Bedeutung des Wattenmeeres als grenzüberschreitendem Lebensraum, der durch internationale Vereinbarungen zu schützen sei. Auch in Deutschland entstanden in den 1960er-Jahren erste Gruppen, die mit den niederländischen Partnern kooperierten und zudem recht früh die Etablierung eines Nationalparks Wattenmeer forderten. Allerdings wurden sie kaum beachtet. In Dänemark hingegen gab es zunächst keine nennenswerte Lobby, was unter anderem daran lag, dass das Wattenmeer dort an der Gesamtlänge der Küste von rund 7000 Kilometern nur einen relativ kleinen Anteil hat, und damit in seiner Bedeutung kaum wahrgenommen wurde.

Dass in den folgenden Jahren das Wattenmeer als ein Naturraum von transnationaler Bedeutung trotzdem wahrgenommen wurde, lag auch daran, dass 1971 die internationale Ramsar-Konvention zum Schutz von Feuchtgebieten wie Mooren, Marschen, Salzwiesen, Sümpfen und Watten verabschiedet wurde. Sie war auf Betreiben der UNESCO und der nicht staatlichen Weltnaturschutzunion (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN; Internationale Union zur Bewahrung der Natur und natürlicher Ressourcen) ausgearbeitet worden und wurde am 2. Februar 1971 in der iranischen Stadt Ramsar beschlossen. Zwar war die Konvention nicht völkerrechtlich bindend, dennoch ging von ihr eine Signalwirkung aus. Galten Feuchtgebiete bis dahin vielerorts als Flächenreserve für eine künftige wirtschaftliche Nutzung, so wurde mit der Konvention erstmals auf politischer Ebene die internationale Bedeutung von Feuchtgebieten vor allem für Wasser- und Zugvögel offiziell unterstrichen.

1974 verabschiedete sich in den Niederlanden die neue linksliberale Regierung von den meisten in den Jahren zuvor geplanten Bau- und Wirtschaftsprojekten im Wattenmeer, und die Naturschutzverbände wurden nicht müde, die Bedeutung des Wattenmeeres als Naturraum vor allem auch in der Bevölkerung bekannt zu machen. In Deutschland hingegen wurden an der Nordseeküste von Naturschutzverbänden zwar Informationszentren errichtet, in denen Touristen die Ökologie des Wattenmeeres durch Wattführungen und Vorträge nahegebracht wurde. Aber politisch blieb man weiterhin bei der Idee, das Wattenmeer industriell und landwirtschaftlich zu nutzen und den Küstenschutz durch Deichbau zu verstärken. In Dänemark fingen zu dieser Zeit erstmals auch dänische Forscher an, sich für den Schutz des Lebensraums in ihrem Land starkzumachen.

Anfang der 1980er-Jahre schließlich begann sich die umweltpolitische Gesamtsituation in Europa deutlich zu ändern. Angesichts der Verschmutzung durch die Verklappung von Industrieabfällen und die starken Schmutzfrachten in den Flüssen Rhein, Elbe, Humber und Themse wurde die Nordsee und mit ihr das Wattenmeer immer stärker als bedrohter Lebensraum wahrgenommen. Dies spiegelte sich auch in der intensiven Medienberichterstattung zu dem Thema wider.

In Deutschland gelangte das Thema Nordseeverschmutzung endgültig auf die politische Agenda, nachdem der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen 1980 ein alarmierendes Gutachten über den besorgniserregenden Zustand der Nordsee und allgemeine Meeresbelastungen veröffentlicht hatte. In den Niederlanden wurde als Ziel der Regierungspolitik jetzt die Erhaltung des Naturraums Wattenmeer in ein raumplanerisches Gesamtkonzept eingeordnet. Die niederländische Regierung strebte damit eine verstärkte trilaterale Kooperation an. So betonte sie die Bedeutung der „Unteilbarkeit des internationalen Wattengebietes“. Sie strebte ein Statut für das Wattgebiet an, das über nationale Grenzen hinausgehen und gemeinsame Verwaltungsziele sowie die Zusammenarbeit mit Dänemark und Deutschland regeln sollte.

Eine engere Zusammenarbeit mit den Nachbarstaaten Deutschland und Dänemark kam aber zunächst nicht zustande, weil diese Staaten das Wattenmeer weiter nach eigenen Regeln verwalten wollten. Zudem kollidierte die Vorstellung vom Wattenmeer als einem einheitlichen Naturraum mit der in Dänemark und Deutschland vorherrschenden Auffassung von einer uneingeschränkten nationalen Souveränität in den eigenen Hoheitsgewässern. Die drei Staaten unterzeichneten zwar 1982 eine gemeinsame trilaterale Absichtserklärung (Joint Declaration), die aber nicht bindend war. Dänemark beispielsweise behielt sich das Recht vor, weiter im dänischen Wattenmeer Seehunde zu jagen, während sich die Niederlande zu deren Schutz entschlossen.

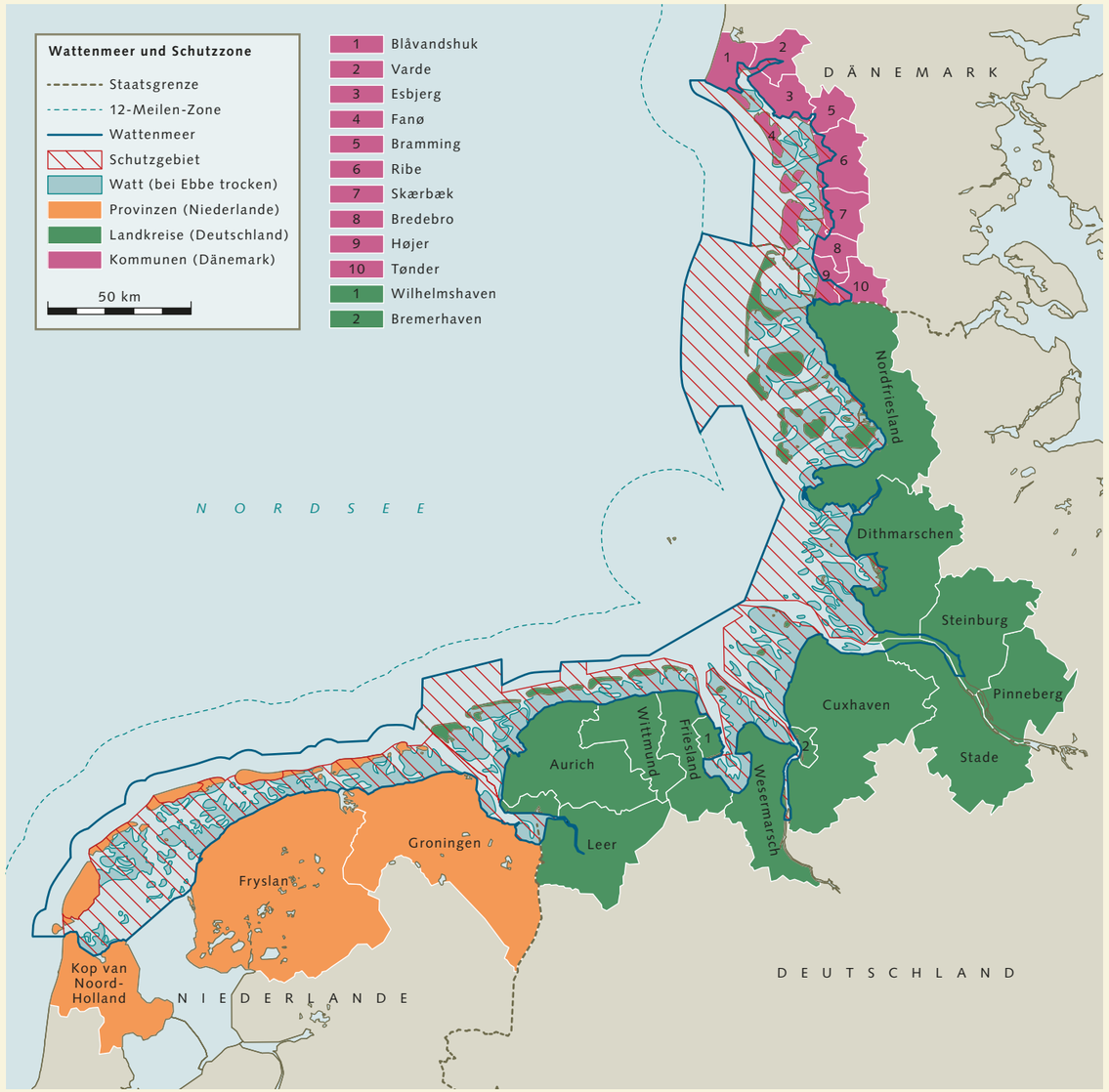
Dennoch bewegte sich ab Mitte der 1980er-Jahre etwas. Die Niederlande entschieden, Bereiche ihres Wattenmeeres zu schützen, indem diese für landwirtschaftliche, industrielle oder touristische Nutzungen gesperrt oder als Naturschutzgebiete ausgewiesen wurden. In Deutschland setzte sich hingegen die schon seit den 1970er-Jahren immer wieder diskutierte Idee von Nationalparks durch, die den höchsten Schutzstatus besitzen, den ein Naturraum in Deutschland erhalten kann. Da die Entscheidung zur Einrichtung eines Nationalparks Ländersache ist, wurden in Deutschland nacheinander drei verschiedene Nationalparks ausgewiesen – 1985 im Bundesland Schleswig-Holstein, 1986 in Niedersach-

sen und 1990 ein kleiner Teil, der zur Stadt Hamburg gehört und in der Mündung der Elbe liegt. Damit waren allerdings nicht alle Probleme gelöst. Vor allem in Schleswig-Holstein gab es Kritik. Die Naturschutzorganisationen bemängelten, dass in unmittelbarer Nähe der Nationalparkgrenze Ölbohrungen genehmigt wurden. Zudem war in begrenztem Maße weiterhin eine Jagd auf Vögel und außerdem Muschelfischerei erlaubt. In Dänemark wiederum erachtete man es zunächst nicht als nötig, das Wattenmeer in seiner Gesamtheit zu schützen. Die Einrichtung eines großflächigen Schutzgebiets hätte beispielsweise ein Verbot der Jagd auf Wasservögel oder Seehunde nach sich gezogen.

Eine stärkere, auch internationale Kooperation wurde erst auf erneute Initiative von Naturschutzverbänden aus den drei Anrainerstaaten durchgesetzt. Auf ihr Drängen wurde schließlich 1987 das trilaterale Wattenmeersekretariat in Wilhelmshaven gegründet. Im Laufe der Jahre konnte es sich als Koordinierungsstelle etablieren, die politisch beratend tätig ist. Heute wird es von allen drei Ländern gemeinsam finanziert. Es koordiniert die Forschung, die Öffentlichkeitsarbeit sowie Umweltbeobachtungsprogramme – beispielswiese die Kontrolle invasiver Arten. Ebenso organisiert es trilaterale Wattenmeerkonferenzen, die alle drei bis fünf Jahre stattfinden.

Nach Einschätzung von Experten kann heute in Bezug auf das Wattenmeer aufgrund der verschiedenen nationalen Regelungen nicht von einem idealen Integrierten Küstenzonenmanagement gesprochen werden. Dieses gilt bislang noch als Zukunftsziel. Zwar gibt es mit dem Wattenmeersekretariat eine staatlich unterstützte Organisation, und die Anerkennung als Weltnaturerbe durch die UNESCO hat die Wahrnehmung des Wattenmeeres als länderübergreifende Einheit weiter befördert. Doch sind mit diesem Status in keiner Weise rechtlich bindende Vorgaben verknüpft. Allerdings hat der Weltnaturerbestatus internationale Strahlkraft und letztlich dazu geführt, dass auch Dänemark sein Wattgebiet, das zunächst nicht zum Weltnaturerbe zählte, 2010 schließlich zum Nationalpark erklärte, womit derselbe Schutzstatus wie in Deutschland erreicht wurde. 2014 wurde der dänische Teil des Wattenmeeres dann ebenfalls als Weltnaturerbe anerkannt.

4.8 > 1985 wurde das Wattenmeer in Schleswig-Holstein zum Nationalpark erklärt. Trotzdem gab es anfangs heftige Kritik, weil noch umstrittene Küstenschutzmaßnahmen durchgeführt wurden wie beispielsweise die Eindeichung der Nordstrander Bucht, deren Deich mit Sand aufgespült wurde.



4.9 > Obwohl das Wattenmeer in seiner Gesamtheit Weltnaturerbe ist, sind die Zuständigkeiten für diesen Lebensraum auf mehrere Länder verteilt. Das Gebiet erstreckt sich über drei Nationen und wird in den Staaten durch verschiedene regionale Behörden verwaltet.

Da die verschiedenen Dorfgemeinschaften und Küstenregionen heute über das Netzwerk miteinander verbunden sind, können Best-Practice-Lösungen leicht weitergegeben werden. Seit dem Jahr 2000 wurde eine Reihe von LMMA-Projekten erfolgreich durchgeführt – darunter in Indonesien, Papua-Neuguinea, den Philippinen, auf der Inselgruppe der Salomonen sowie auf den Inseln Fidschi, Pohnpei und Palau. Da die einzelnen Regionen oftmals klein sind, sind manche Nationalstaaten allerdings wenig motiviert, sich von ministerieller oder behördlicher Seite in diesen Gebieten zu engagieren. Da die Küstenbereiche für die Nahrungsversorgung der Menschen vor Ort bedeutend sind, sind es in manchen Fällen vor allem die Nichtregierungsorganisationen, die Projekte vor Ort initiieren.

Nachhaltiges Management in China: zugleich schützen und nutzen

Weltweit gibt es eine Reihe vergleichbarer Projekte, die zwar ihrerseits nicht als LMMA bezeichnet werden oder im Detail anders konzipiert sind; alle diese Projekte haben aber dasselbe Ziel, dass den Menschen vor Ort eine Art Eigentümerschaft über die Meeresressourcen zugestanden wird und dass diese Ressourcen gemeinschaftlich bewirtschaftet werden. So versucht man auch in China seit einigen Jahren die Nutzung und den Schutz von Meeresgebieten in Einklang zu bringen. Auch hier hatte man die Erfahrung gemacht, dass starr festgelegte Meeresschutzgebiete nicht akzeptiert und damit ignoriert werden. Seit 2005 werden dort deshalb sogenannte Special Marine Protected Areas (SMPAs) ausgewiesen, in denen Zonen für unterschiedliche Nutzungen wie etwa Fischerei oder Tourismus zeitweise geöffnet werden. Andere Zonen wiederum sind für jegliche Nutzung gesperrt.

In einer Studie wurde jetzt untersucht, wie wirkungsvoll dieses System ist. Dazu wurden Interviews mit Befürwortern und Kritikern der SMPAs-Politik durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass SMPAs als eine Ergänzung zu den üblichen Meeresschutzgebieten zu betrachten sind, aber diese nicht ersetzen. Je nach Situation sei ein völliger Schutz eines Meeresgebiets oder eher die SMPAs-Lösung angebracht. Deutlich wird, dass durch Abstimmung der verschiedenen Interessen während der Planung Konflikte deutlich reduziert werden und die Akzeptanz der Schutzzonen innerhalb der SMPAs erhöht wird. Kritisch angemerkt wird allerdings, dass es bislang an wissenschaftlicher Begleitforschung fehlt, mit der untersucht wird, ob die Schutzziele erreicht werden. Ein Grund dafür ist die mangelnde Finanzierung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Eine fundierte Evaluation, wie zum Beispiel für ICZM-Prozesse vorgesehen, muss im chinesischen SMPAs-Konzept also erst noch fest verankert werden. Insgesamt wird das SMPAs-Konzept aber in der aktuellen Studie als sinnvolles Werkzeug für den Meeresschutz in China bewertet, dessen Bedeutung in Zukunft weiter stark zunehmen dürfte.

Naturschutz und Tourismus – (k)ein Streitpunkt

Für den Schutz von Küstenlebensräumen ist es unerlässlich, bestimmte Nutzungen zu beschränken. So besteht beispielsweise das Problem beim Tourismus darin, dass oftmals gerade die besonders wertvollen und naturnahen Lebensräume wegen ihrer Ursprünglichkeit auf Urlauber eine besondere Anziehungskraft haben, etwa weitläufige Dünen und Strände oder Feuchtgebiete, die zum Baden einladen oder wegen ihrer Artenvielfalt beispielsweise für Vogelbeobachter besonders interessant sind. Hier die Grenzen zwischen touristisch genutzten Zonen und Schutzgebieten zu ziehen, ist schwierig. Daher führten in vielen europäischen Küstenregionen zwei Umweltschutzrichtlinien in den vergangenen Jahren zu besonders vielen Konflikten zwischen Behörden, Naturschutzverbänden und anderen Interessengruppen: die Vogelschutzrichtlinie von 1979, deren Ziel die Erhaltung wild lebender Vogelarten ist, und die Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie von 1992, deren Ziel die Erhaltung verschiedener natürlicher Lebensräume mitsamt den darin wild lebenden Tieren und Pflanzen ist. Mit Verabschiedung dieser Richtlinien war jeder EU-Mitgliedsstaat verpflichtet, die Regelungen in nationales Recht umzusetzen und im eigenen Land entsprechende Schutzgebiete auszuweisen.

Ergebnisse einer Studie zu den Konflikten zwischen Tourismus und Naturschutz in touristisch besonders beliebten Küstengebieten Deutschlands legen folgende Schlüsse nahe: Konflikte treten vor allem dann auf, wenn die Konfliktparteien vor der Ausweisung von Schutzgebieten nicht im Dialog standen. Wurden die Schutzgebiete von den zuständigen Behörden schlicht durchgesetzt und die Bevölkerung vor vollendete Tatsachen gestellt, führte das nicht nur bei den Touristen, sondern auch bei Gewerbetreibenden, dem Einzelhandel und Landwirten zu großem Widerstand.

Kritisiert wurde von Gewerbetreibenden oder auch Fremdenverkehrsverbänden unter anderem, dass die Ausweisung von Schutzgebieten dazu führt, dass Touristenströme gelenkt werden müssen, was vor allem in großräumigen Schutzgebieten einen hohen Aufwand bedeutet. So müssen Wege durch die Schutzgebiete mit Zäunen versehen und Parkplätze am Rand der Schutzgebiete errichtet werden.

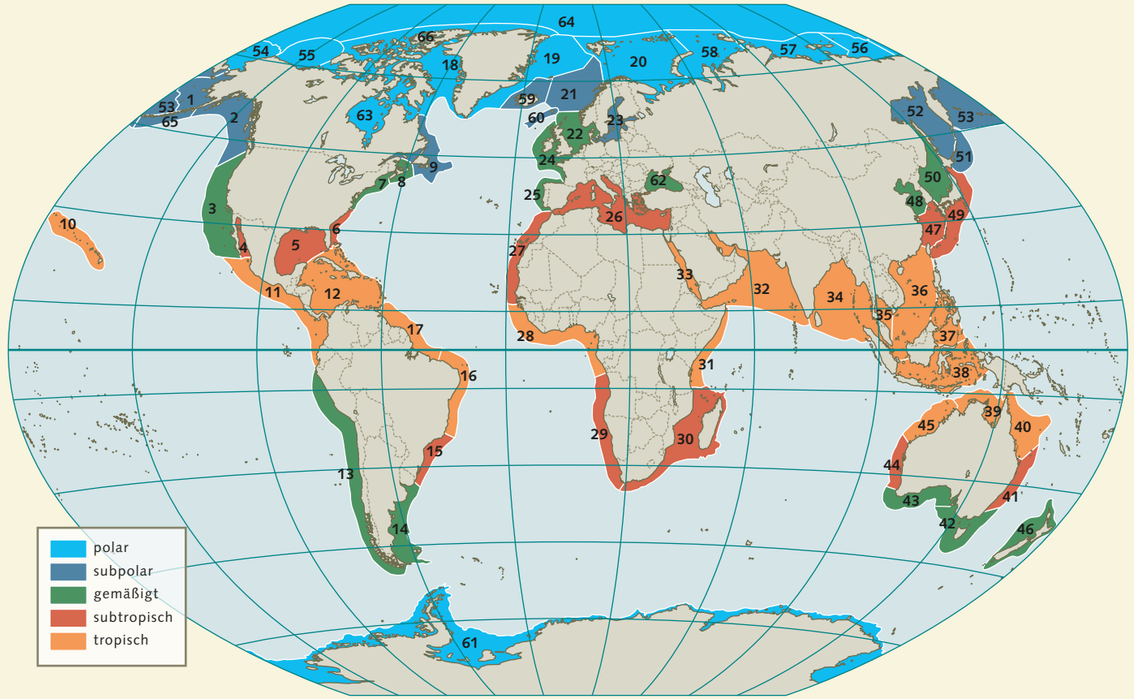
Kritisiert wird auch, dass die Öffentlichkeit vielerorts in der ersten Phase der Gebietsausweisung nicht ausreichend informiert, aufgeklärt und damit ernst genommen worden sei. Als Fehler wurde insbesondere das Vorgehen vieler Verwaltungen gesehen, nicht die Vorteile und Chancen kommuniziert zu haben, sondern schlicht die EU-Richtlinien in den Vordergrund gestellt zu haben. Dadurch sei in der Öffentlichkeit die weitverbreitete Auffassung entstanden, Maßnahmen von oberster Stelle übergestülpt zu bekommen und keinen Einfluss zu haben. Für die Zukunft schlägt die Studie deshalb folgende Maßnahmen vor:

- Verhandlungen und Absprachen mit den jeweils zuständigen Organisationen (Tourenanbieter, Gemeinden, Sportverbände), um gemeinsame Lösungen zu erarbeiten, beispielsweise eine zeitliche Koordinierung von geführten Wanderungen, eine Ausweisung von Parkplätzen oder Anlegestellen für Boote und Kanus;
- gute durchdachte Konzepte für eine Besucherinformation und -aufklärung, insbesondere durch ein gut ausgebautes Netzwerk von Rangern und Informationszentren und durch Informationstafeln;
- Kommunikation der Qualität eines Gebiets aufgrund der vorhandenen Naturschätze und des Schutzbedarfs mit der Perspektive, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln, beispielsweise Ökotourismus.

Das Erfolgsrezept: Bürgerbeteiligung von Anfang an

Ein erfolgreiches Beispiel für einen ICZM-Prozess im Bereich des Tourismus sind die Küstenschutzmaßnahmen, die in den beiden deutschen Ostseegemeinden Scharbeutz und Timmendorfer Strand zwischen 1999 und 2011 durchgeführt wurden, nachdem eine Untersuchung gezeigt hatte, dass diese stark durch Hochwasser gefährdet sind. Beide Gemeinden sind dicht besiedelt und als Urlaubsdestination touristisch intensiv genutzt. Merkmal der Orte ist eine lange Uferpromenade, die einen offenen Zugang zur Ostsee bietet und zwischen einer Ladenzeile aus Geschäften, Gewerbebetrieben und dem Strand verläuft. Beide Orte liegen in einer Bucht, in der bei starkem Ostwind der Wasserstand lokal deutlich steigen kann. Eine Wertermittlungsanalyse ergab, dass es bei Wasserständen von mehr als 3 Metern über Normalnull zu starken Überflutungen kommen kann. Konkret wären dadurch bis zu 6000 Menschen und Sachwerte von mehr als 3,4 Milliarden Euro bedroht. Die Gemeinden entschlossen sich daher, mit finanzieller Unterstützung durch den Landkreis und das Land Schleswig-Holstein einen Landesschutzdeich zu errichten. Dagegen regte sich in der Bürgerschaft von Anfang an Widerstand, weil befürchtet wurde, dass ein solcher Wall die Ästhetik der Promenade zerstört, was letztlich zu Einbußen im Tourismus führen kann. Aus diesem Grund wurde die Bevölkerung in die weitere Planung eingebunden – zum einen über Informationsmaterial, das umfassend die Problematik erklärte, zum anderen durch Teilnahme an Gesprächsrunden, bei denen mehr als 50 Personen aus der Bevölkerung und der Verwaltung über verschiedene Lösungswege diskutierten, die von einem völligen Verzicht auf Schutzmaßnahmen bis zum Bau des Deiches als Maximallösung reichten.

Als gemeinsames Ergebnis kristallisierte sich eine Kombination heraus: eine Hochwasserschutzanlage, die geschmackvoll an die örtlichen Gegebenheiten angepasst wird. Durch den Verzicht auf den Deich konnte der Promenadencharakter komplett erhalten bleiben. Während der Baumaßnahmen wurden alle zwei Wochen samstags öffentliche Führungen über die Baustelle veranstaltet, um über den aktuellen Stand der Arbeiten zu informieren und offene Fragen zu klären.



1. Östliche Beringsee
2. Golf von Alaska
3. Kalifornienstrom
4. Golf von Kalifornien
5. Golf von Mexiko
6. Südöstlicher US-Kontinentalschelf
7. Nordöstlicher US-Kontinentalschelf
8. Scotian-Schelf
9. Neufundland-Labradorschelf
10. Hawaii
11. Zentralamerikanischer Pazifik
12. Karibik
13. Humboldtstrom
14. Patagonischer Schelf
15. Südbrasilienschelf
16. Ostbrasilienschelf
17. Nordbrasilienschelf
18. Westgrönlandschelf
19. Ostgrönlandschelf
20. Barentssee
21. Norwegische See
22. Nordsee
23. Ostsee
24. Keltischer Schelf und Biskayaschelf
25. Iberische Küste
26. Mittelmeer
27. Kanarenstrom
28. Guineastrom
29. Benguelastrom
30. Agulhasstrom
31. Somalischer Küstenstrom
32. Arabisches Meer
33. Rotes Meer
34. Golf von Bengalen
35. Golf von Thailand
36. Südchinesisches Meer
37. Sulusee und Celebessee
38. Indonesisches Meer
39. Nordaustralien
40. Nordostaustralien
41. Ostzentralaustralien
42. Südostaustralien
43. Südwestaustralien
44. Westzentralaustralien
45. Nordwestaustralien
46. Neuseelandschelf
47. Ostchinesisches Meer
48. Gelbes Meer
49. Kuroshiostrom
50. Japanisches Meer
51. Oyashiostrom
52. Ochotskisches Meer
53. Westliche Beringsee
54. Tschuktschensee
55. Beaufortsee
56. Ostsibirische See
57. Laptewsee
58. Karasee
59. Islandschelf
60. Färöer-Plateau
61. Antarktis
62. Schwarzes Meer
63. Hudson Bay
64. Arktischer Ozean
65. Aleuten
66. Kanadische hohe Arktis und Nordgrönland

4.10 > Die küstennahen Meeresgebiete der Welt wurden in 66 große, länderübergreifende Meeresökosysteme eingeteilt, die sogenannten Large Marine Ecosystems (LMEs). Von diesem Konzept erhofft man sich eine bessere Zusammenarbeit der Nationen beim internationalen Meeresschutz.

Konkret konnte mit den Maßnahmen ein insgesamt ästhetischer Küstenschutz erreicht werden. In einem Bereich wurde zum Beispiel auf das Fällen von Bäumen verzichtet, stattdessen wurde ein steiler Strandwall angelegt, der zusätzlich durch eine unauffällige, nur etwa einen halben Meter hohe Mauer vor Überspülung geschützt ist. Zwischen der kleinen Mauer und der Baumreihe verläuft jetzt ein Spazierweg. Insgesamt konnte somit eine hohe Akzeptanz der Küstenschutzmaßnahmen erreicht werden, die die Promenade dank der hochwertigen Bauausführung jetzt sogar optisch bereichert.

Das Konzept der Large Marine Ecosystems

Zu einer besonderen Herausforderung wird das ICZM immer dann, wenn Küstengebiete und -lebensräume so groß sind, dass sie sich über mehrere Länder erstrecken. Ein umfassender Schutz dieser Gebiete ist dann nur möglich, wenn die Staaten kooperieren, etwa was die Verschmutzung des Meeres oder das Management von Fischbeständen angeht. Forscher der Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) haben deshalb in den 1990er-Jahren das Konzept der großen Meeresökosysteme, der Large Marine Ecosystems (LMEs), entwickelt. Demnach werden die küstennahen Meeresgebiete der Erde heute in 66 LMEs aufgeteilt, wobei jedes LME sich durch eine typische Flora und Fauna auszeichnet. Die LMEs erstrecken sich entlang der Küsten bis zum Kontinentalabhang, jenem Bereich des Meeresbodens, wo der Festlandsockel in die Tiefsee abfällt. Die Schwierigkeit besteht darin, dass man für ein erfolgreiches Küstenmanagement eine grenzüberschreitende Kooperation auf verschiedenen Ebenen verwirklichen muss. Zum einen müssen die einzelnen Staaten zunächst der Kooperation auf hoher nationalstaatlicher Ebene zustimmen. Zudem müssen die zuständigen Fachbehörden und die Verwaltung vor Ort eingebunden werden, damit die ansässige Küstenbevölkerung überhaupt in die grenzüberschreitende Zusammenarbeit einbezogen werden kann. Größere Fischbestände zum Beispiel können nur dann erhalten werden, wenn die neuen Regeln für eine nachhaltige Fischerei im gesamten Meeresgebiet von allen Fischern und Behörden umgesetzt werden.

Mit Unterstützung der Weltbank, der Globalen Umweltfazilität (Global Environment Facility, GEF, einer internationalen Einrichtung zur Finanzierung von Umweltschutzprojekten) und des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) versucht man, vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländern die zwischenstaatliche Zusammenarbeit beim Schutz der LMEs zu verbessern. Forscher, Politiker, aber auch Laien benachbarter Nationen treffen sich in Workshops und Konferenzen. Da oftmals wirtschaftliche Aspekte wie etwa die Ölförderung im Meer Vorrang vor dem Schutz der Umwelt haben, soll das Konzept der LMEs hier ein Gegengewicht liefern und in den Ländern ein Bewusstsein für den Lebensraum Meer schaffen.

Ein junges Netzwerk für den Schutz des Golfs von Bengalen

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Kooperation ist das Bay of Bengal Large Marine Ecosystem (BOBLME), in dem die Anrainerstaaten des östlich von Indien gelegenen Golfs von Bengalen zusammenarbeiten: Bangladesch, Indien, Indonesien, Malaysia, die Malediven, Myanmar, Sri Lanka und Thailand. In diesem Gebiet wurde 2010 das auf fünf Jahre angelegte BOBLME-Projekt gestartet mit den Zielen, die Fischbestände besser zu managen, um die Überfischung zu bekämpfen, und zudem die Meeresverschmutzung zu bekämpfen. Zunächst stand eine umfangreiche Analyse der Situation vor Ort an. Zum einen mussten die vielen verschiedenen lokalen, regionalen und nationalen Zuständigkeiten geklärt und gemeinsame Arbeitsschwerpunkte festgelegt werden. Diese wiederum hingen davon ab, welche Nöte oder Bedürfnisse die Menschen vor Ort jeweils hatten. Da die Fischerei in jeder Nation von verschiedenen Behörden verwaltet wird, etwa von Fischerei- oder Wirtschaftsbehörden, mussten zunächst zuständige Ansprechpartner gefunden werden, die dann in internationalen Tagungen und Workshops miteinander in Kontakt kamen. Darüber hinaus hatte das Projekt das Ziel, den Zustand der verschiedenen Fischbestände zu erfassen. Hier bestand eine große Wissenslücke, weil in vielen Ländern lange Zeit keine regelmäßigen Ausfahrten zur Bestandsschätzung durchgeführt worden waren. In Myanmar beispielsweise hatte es seit 30 Jahren keine

derartige Erhebung mehr gegeben. Mit Unterstützung durch ein norwegisches Forschungsschiff wurden die Bestandsschätzungen für den gesamten Golf durchgeführt. Dank dieser Schätzungen konnte erstmals für die Region eine Managementempfehlung für den nachhaltigen Fang der wirtschaftlich wichtigen Indischen Makrele und den Hilsa-Hering gegeben werden. Um die Fischbestände und den Zustand der Meeresumwelt künftig überwachen zu können, wurden zudem wissenschaftliche Arbeitsgruppen mit Forschern aus allen Anrainerstaaten gebildet, die künftig in Sachen Fischbestandsstatistik, bei der Überwachung der Meeresverschmutzung und bei ökologischen Untersuchungen im Golf von Bengalen zusammenarbeiten sollen. Die Arbeitsgruppen haben zudem vorbildliche Lösungen für einen nachhaltigen Fischfang in der Region zusammengetragen und stellen diese Methoden in Workshops vor Ort anderen Fischern vor, die diese übernehmen werden. 2015 ging das BOBLME-Projekt zu Ende. Seitdem werden die während der Projektlaufzeit entwickelten Fischereipraktiken und Managementempfehlungen in jedem Land nach und nach weiter eingeführt und umgesetzt.

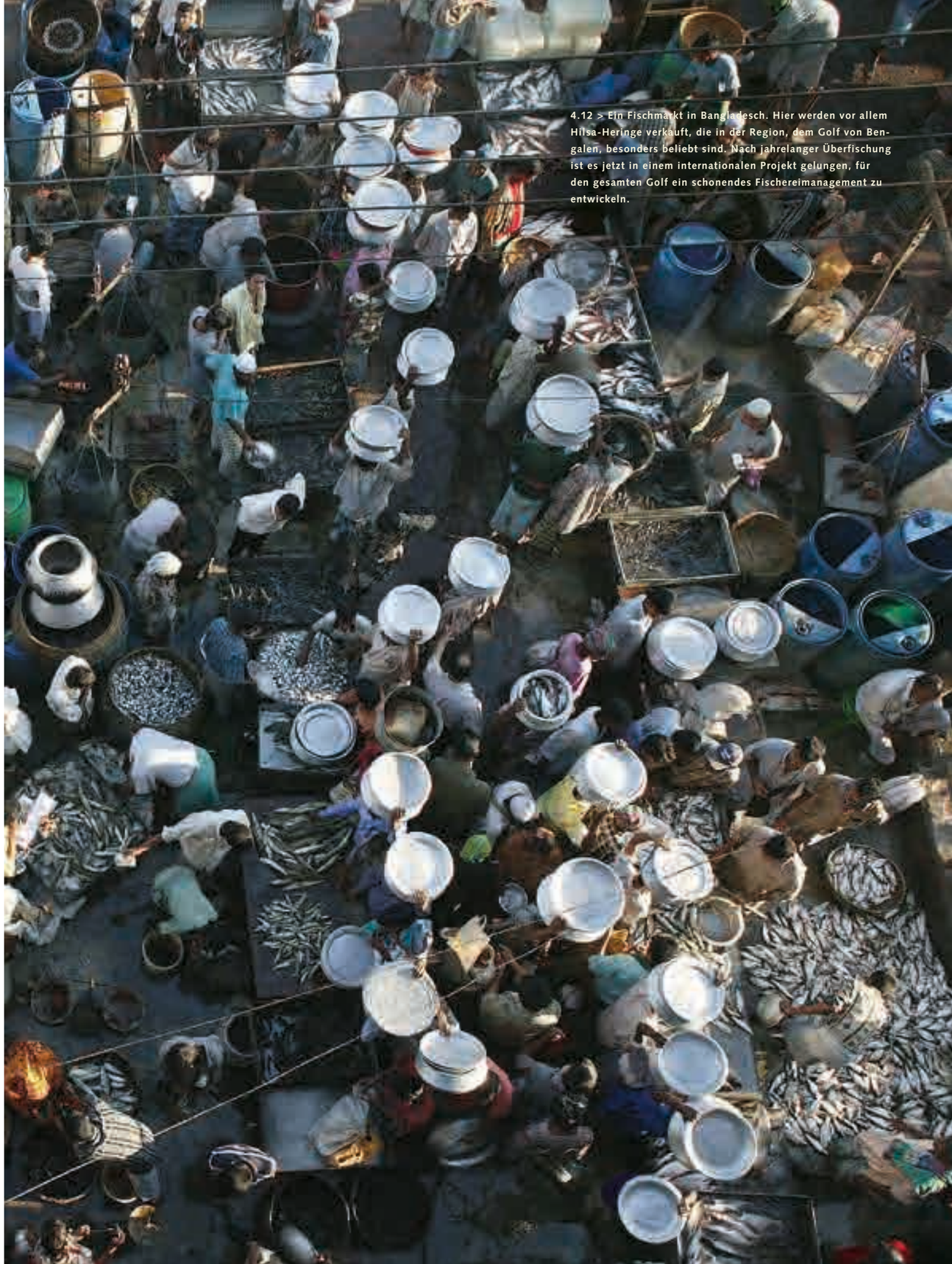
Schutz durch regionale Selbstverwaltung

Um Küstengebiete nachhaltig zu nutzen, kann es reichen, dass eine einzige betroffene Nutzergruppe ihr Verhalten ändert. Das gilt etwa für die handwerkliche Fischerei in verschiedenen Küstenregionen, die sich durch neue Managementmethoden so gestalten lässt, dass die Bestände schonend genutzt werden. Ein Beispiel ist die chilenische Locos-Fischerei. Locos sind Schnecken der Art *Concholepas concholepas*, der sehr beliebten sogenannten Chilenischen Seeohren, die an der Küste von Tauchern vom Meeresboden aufgelesen werden. Fischereien wie diese werden von Fischereibiologen als „S-Fischerei“ bezeichnet, ein Begriff der sich von den englischen Bezeichnungen „small-scale fisheries“ (kleinskalige, handwerkliche Fischerei), „sedentary stock“ (ortsfester Bestand) und „spatially structured“ (räumlich strukturiert) ableitet. Räumlich strukturiert bedeutet, dass es in einer Region an diversen Stellen verschiedene, räumlich voneinander getrennte Populationen gibt. Bei der S-Fischerei besteht die Gefahr darin, dass diese Populationen lokal überfischt werden.

4.11 > Die Schnecke *Concholepas concholepas* ist in Chile eine beliebte Meeresfrucht. Für ihren Fang wurden räumlich begrenzte und von einzelnen lokalen Kooperativen verwaltete Fischereiterritorien entlang der chilenischen Küste eingerichtet.

Genau das passierte in Chile in der Vergangenheit. War eine Population komplett abgeerntet, fuhren die Tauchfischer in das nächste Gebiet. Das führte zu Konflikten mit den jeweils ortsansässigen Tauchfischern, weil sich dadurch der Druck auf die dortige Population erhöhte. Ende der 1980er-Jahre waren die Locos-Bestände so weit geschrumpft, dass es entlang der ganzen Küste zur Krise in der Locos-Fischerei kam. Viele Fischer verloren ihre Arbeit. Die chilenische Regierung setzte deshalb 1991 ein neues Managementsystem durch, mit dem räumlich begrenzte Fischereiterritorien entlang der Küste und entsprechende lokal verortete Tauchfischerkooperativen eingerichtet wurden. Den in dem Gebiet ansässigen Kooperativen wurden damit exklusive Nutzungsrechte und eine Selbstverwaltung zugestanden. Im Spanischen werden diese Gebiete mit territorialem Nutzungsrecht als Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB, Management- und Nutzungsgebiete **benthischer** Ressourcen) bezeichnet. Man spricht auch vom AMERB-Management. International wird diese Art von lokalem Management als territoriale Nutzungsrechte in der Fischerei (Territorial Use Rights in Fisheries, TURFs) bezeichnet.

Dieses territoriale Fischereinutzungsrecht wurde nur dann gewährt, wenn sich die Tauchfischer zu Kooperativen zusammenschlossen, um dann mit Expertenunterstützung einen Managementplan für eine künftige schonende Nutzung der Locos-Population in einem bestimmten Gebiet auszuarbeiten – etwa bezüglich der Höchstmengen, die dem Meeresgebiet täglich entnommen werden dürfen. Diese Höchstmengen wurden dann auf jedes einzelne Mitglied der Kooperative umgelegt. Tauchfischer aus anderen Küstengebieten und Kooperativen waren vom



4.12 > Ein Fischmarkt in Bangladesch. Hier werden vor allem Hilsa-Heringe verkauft, die in der Region, dem Golf von Bengalen, besonders beliebt sind. Nach jahrelanger Überfischung ist es jetzt in einem internationalen Projekt gelungen, für den gesamten Golf ein schonendes Fischereimanagement zu entwickeln.

4.13 > Die Zucht von Algen könnte sich künftig in vielen Regionen am Indischen Ozean und im Pazifik als Alternative zum Fischfang etablieren. Der Vorteil der Algenzucht ist, dass diese kostengünstig ist, weil nur wenige Geräte und Materialien benötigt werden.

Fang in diesem Gebiet ausgeschlossen. Durch den Zusammenschluss zu Kooperativen ergab sich für die Fischer zudem eine bessere Verhandlungsposition gegenüber Zwischenhändlern. Während die Tauchfischer früher meist allein nach Locos gefischt und ihren Fang weiterverkauft hatten, konnten sie nun einen gemeinsamen Preis für die Muscheln vereinbaren.

Tatsächlich erholten sich die Locos-Bestände, sodass das AMERB-Management zu einem Erfolg wurde. In der Folge wurde das Prinzip in Chile auch für andere Fischereien übernommen. Heute werden etwa 45 bodenbewohnende Organismen wie etwa Muscheln, Schnecken, aber auch Algen nach AMERB-Managementplänen befischt.

Doch nicht in jedem Fall war diese Art des Managements ein Erfolg. Zwischenzeitlich brachen verschiedene Bestände zusammen und das sorgfältig ausgearbeitete AMERB-Konzept wurde hinfällig. Ein maßgeblicher Grund dafür war, dass die Populationsdynamik bestimmter Organismen nicht ausreichend erforscht war und es aufgrund von Fehleinschätzungen zu einer Überfischung kommen konnte.

Alternativen zur Fischerei

Eine Strategie heutiger ICZM-Projekte in Entwicklungs- und Schwellenländern besteht darin, mit der Küstenbevölkerung vor Ort alternative Einkommensmöglichkeiten zu entwickeln. So lässt sich in Regionen, die durch Fischerei dominiert werden, Druck von den überfischten Beständen oder überbeanspruchten Meereslebensräumen nehmen. Ein Beispiel sind Projekte in den Philippinen und in Indonesien, in denen die Zucht von Meeresalgen an langen Leinen als Alternative zum zerstörerischen Fischen mit Dynamit und Zyanid etabliert wurde. Der Vorteil der Algenzucht ist, dass diese kostengünstig ist, weil nur wenige Geräte und Materialien benötigt werden. Zudem gibt es weltweit eine wachsende Nachfrage nach Algen, die zu einem großen Teil für die Produktion von Carrageen verwendet werden, einem Algeninhaltsstoff, der in der Lebensmittelindustrie als Gelier- und Verdickungsmittel verwendet wird. Die Projekte zeigen, dass die Algenproduktion den Fischfang zwar nicht ersetzen kann, in einigen Orten aber zu einer Reduzierung der Fangmengen führte, sodass hier tatsächlich der Druck auf das Ökosystem abnahm. Anderenorts wurde trotz Algenzucht mit derselben Intensität weiter gefischt. Nicht in jedem Fall konnte die lokale Bevölkerung hinreichend von der Bedeutung des Ressourcenschutzes überzeugt werden. Experten betonen daher, dass eine einzige alternative Einnahmequelle nicht immer ausreicht. Idealerweise sollte in derartigen ICZM-Projekten eine gewisse Vielfalt an Alternativen aufgezeigt werden können.

Viele Köche erschweren die Entwicklungshilfe

Für ein erfolgreiches Integriertes Küstenzonenmanagement in Entwicklungs- und Schwellenländern ist es nicht nur essenziell, alle nationalen und lokalen Interessengruppen in den Managementprozess einzubinden. Darüber hinaus ist auch eine Abstimmung zwischen den verschiedenen internationalen und regionalen Entwicklungshilfeorganisationen nötig. Das ist keineswegs immer der Fall. So gibt es Regionen, in denen in benachbarten Orten verschiedene Organisationen mit teils sogar gleichen Schwerpunkten tätig sind, ohne sich abzustimmen oder voneinander zu wissen. Das hat mehrere Nachteile: Zum einen ist es nicht möglich, Ressourcen wie etwa Infrastruktur, Büros oder Fahrzeuge gemeinsam zu nutzen. Zudem ist kein umfassendes integriertes Management möglich, bei dem man beispielsweise gleichzeitig die Trinkwasserversorgung, die Landwirtschaft und den Küstenschutz im Blick hat, wenn verschiedene Entwicklungshilfeorganisationen ihre Projekte isoliert voneinander verfolgen oder nicht mit den Entwicklungsprioritäten vor Ort abstimmen. Im ungünstigen Fall werden Ergebnisse erzielt, die nicht nachhaltig oder sogar kontraproduktiv sind. Um diesen Aspekten entgegenzuwirken und die Wirksamkeit der Entwicklungshilfe im Ganzen zu erhöhen, verabschiedete die OECD deshalb im Jahr 2005 die Paris-Deklaration über die Wirksamkeit der Entwicklungszusammenarbeit (Paris Declaration on Aid Effectiveness). Diese Paris-Deklaration verfolgt insgesamt fünf wesentliche Ziele:

- Ownership (Eigentümerschaft): Die Partnerländer und nicht die Geberländer haben die Federführung und Verantwortung bei jedem Entwicklungsprozess.
- Alignment (Anpassung/Angleichung): Die Geber passen ihre Strategien und Prozesse an die der Partnerländer an und nutzen vorhandene Institutionen der Kooperationsländer oder der Partnerorganisationen.
- Harmonisation (Harmonisierung): Die Geber sollen ihre Programme und Verfahren untereinander abstimmen und harmonisieren.
- Managing for Results (Ergebnisorientierung): Die Geber lassen sich an den Wirkungen ihres entwicklungspolitischen Handelns messen, etwa der Verringerung der Analphabetenquote, und nicht am finanziellen Einsatz, etwa 10 Millionen Euro für neue Schulen.
- Mutual Accountability (gegenseitige Rechenschaftspflicht): Geber- und Kooperationsländer sollen gemeinsam über ihr entwicklungspolitisches Handeln und über ihre Fortschritte gegenüber der Öffentlichkeit und den Parlamenten Rechenschaft ablegen.

Seit 2012 werden diese Ziele zum Teil leicht abgewandelt über die Globale Partnerschaft für effektive Entwicklungszusammenarbeit (Global Partnership for Effective Development Cooperation) gesteuert und weiterverfolgt.

Kiribati geht mit gutem Beispiel voran

Heute werden die Prinzipien der Paris-Deklaration auch im Integrierten Küstenzonenmanagement berücksichtigt. Ein Beispiel ist der pazifische Inselstaat Kiribati, zu dem mehr als 30 Inseln gehören. Die Ausdehnung des Inselstaats ist enorm. In west-östlicher Richtung erstreckt sich die Nation über rund 4500 Kilometer, was in etwa der Entfernung von der Westküste zur Ostküste der USA entspricht. Die Einwohner Kiribatis verstehen sich damit keineswegs als Bewohner eines kleinen Inselstaats, sondern als Bewohner eines großen Ozeanstaats, die auf eine jahrtausendealte Tradition als Seereisende im Pazifik zurückblicken. Im Laufe der Jahre wurden viele Entwicklungshilfeprojekte umgesetzt, zwischen denen teilweise kaum Abstimmungen stattfanden oder die sich kaum an nationalen Entwicklungszielen orientierten. Die Regierung entschied sich daher gemäß Paris-Deklaration, eine stärkere Kooperation der einzelnen Entwicklungshilfeprojekte einzufordern, die sich zudem an nationalen und lokalen Prioritäten ausrich-

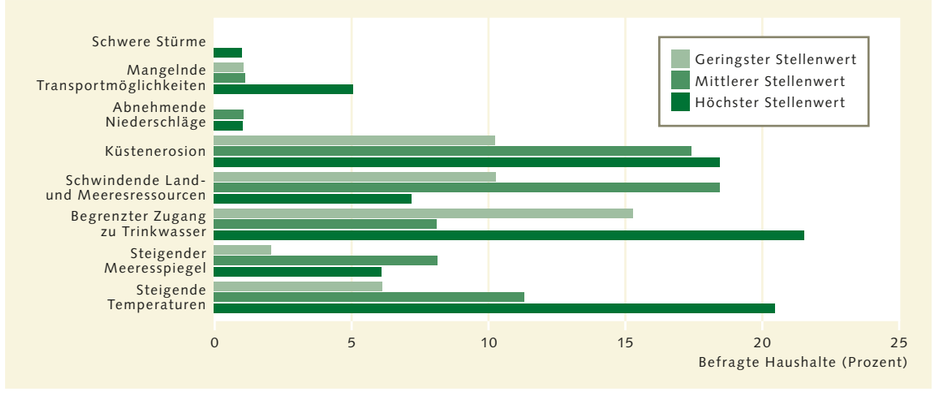
ten sollten. Dazu wurde auf Kiribati vor einigen Jahren der sogenannte Whole of Island Approach (Ganze-Insel-Ansatz) ins Leben gerufen. Damit haben sich jetzt der Staat und mehrere internationale Entwicklungshilfeorganisationen darauf verständigt, Projekte gemeinsam durchzuführen und nicht nur Teilaspekte im Blick zu haben, sondern jeweils eine ganze Insel mit all ihren Problemen und Herausforderungen. Das heißt, dass nicht einzelne Aspekte isoliert voneinander betrachtet werden – etwa Küstenschutz oder Landwirtschaft –, sondern für alle Lebensbereiche zugleich Lösungen entwickelt und in einem Entwicklungsplan für die jeweilige Insel formuliert werden. Darin enthalten sind im Detail Maßnahmen, die nachhaltig Bildung, Fischerei, Infrastruktur, Küstenschutz, Landwirtschaft, Energie, Wasserversorgung und Gesundheit fördern. Dabei wird zugleich berücksichtigt, wie sich die Bevölkerung an den Klimawandel anpassen kann.

Kiribati will in den nächsten Jahren zusammen mit den Entwicklungshilfeorganisationen nach und nach auf allen Inseln Analysen durchführen, mit denen Bedürfnisse der Bevölkerung erfragt und die Auswirkungen des Klimawandels untersucht werden – sogenannte Integrated Vulnerability Assessments (Integrierte Vulnerabilitätsanalysen). Wie für einen ICZM-Prozess typisch, spielt auch beim Whole of Island Approach die Zusammenarbeit mit den Menschen vor Ort eine entscheidende Rolle, weil sich nur dadurch gewährleisten lässt, dass Maßnahmen durchgeführt werden, die die Menschen tatsächlich benötigen und akzeptieren.

4.14 > Der Inselstaat Kiribati bemüht sich, seine flachen Atolle teils durch massive Mauern vor dem Meer zu schützen. In vielen Fällen aber zerstören Sturmfluten die Bauwerke, wie hier vor der Hauptstadt South Tarawa.

Startschuss auf der Insel Abaiang

Auf jeder Insel Kiribatis gibt es einen Ältestenrat, in den aus jedem Dorf Mitglieder entsandt werden. Der Ältestenrat ist die erste Adresse für die Kooperation. In einem ersten Schritt besuchen die Mitarbeiter der Entwicklungshilfeorganisationen zusammen mit Vertretern der verschiedenen zuständigen Ministerien aus der Hauptstadt Kiribatis, South Tarawa, die Inseln, um dort Interviews durchzuführen. Dabei wird auch darauf geachtet, dass nicht nur der ausschließlich aus Männern bestehende Ältestenrat zu Wort kommt. In Einzelinterviews werden



4.15 > Für die Insel Abaiang ist der Klimawandel bereits spürbar. Die deutlichsten Zeichen sind für die Bewohner laut einer Umfrage der Süßwassermangel, die Zunahme der Temperaturen und die Erosion der Ufer.

auch die Bedürfnisse und Meinungen aller anderen Bevölkerungsgruppen abgefragt – insbesondere der Frauen und Jugendlichen. Insgesamt wird ein repräsentatives Meinungsbild darüber erstellt, wie sich die Bewohner ihre Zukunft in zehn oder 20 Jahren vorstellen. Zudem werden Gespräche mit Vertretern der verschiedenen Institutionen vor Ort geführt, etwa der Kirche oder der Polizei. Die erste Insel, auf der der Whole of Island Approach derzeit umgesetzt wird, ist die Insel Abaiang. Sie hat 5500 Einwohner und ist damit relativ bevölkerungsreich. Inzwischen wurde eine Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt. Drängend ist unter anderem die Frage der zuverlässigen Wasserversorgung, denn die Inseln Kiribatis besitzen nur kleine Wasserreserven, die als Süßwasserlinsen im Untergrund liegen und ausschließlich durch Regenwasser gespeist werden. Wenn zu viel Wasser entnommen wird oder Regenfälle ausbleiben, aber auch wenn der Meeresspiegel steigt, sickert aus dem Meer Salzwasser nach, sodass die Wasserlinsen versalzen. Zudem werden die Süßwasserlinsen durch Nutztiere oder durch Dünger und Pflanzenschutzmittel aus nahe gelegenem Ackerbau verschmutzt. In Abaiang wird daher aktuell das Wassermanagement verbessert. Zudem wird Ackerbau jetzt in ausreichender Entfernung von den Süßwasserlinsen betrieben.

Ein anderes Thema ist die Vermeidung beziehungsweise Beseitigung von Abfällen. Traditionell wurden die früher ausschließlich organischen Abfälle ins Meer entsorgt und mit der Flut abtransportiert. Angesichts wachsender anorganischer und giftiger Abfallmengen führt diese Praxis zu erheblicher Verschmutzung von Meer und Umwelt und kann besonders die Süßwasserlinsen erheblich belasten. Da die Bewohner ihr Trinkwasser aus Brunnen gewinnen, die zum großen Teil stark mit Keimen belastet sind, kommt es oft zu Durchfallerkrankungen, durch die vor allem Kinder gefährdet sind. Daher soll jetzt, dem Wunsch der Einwohner Abaiangs entsprechend, eine bessere sanitäre Versorgung aufgebaut werden. Derzeit wird eine solche Analyse für eine zweite Insel durchgeführt.

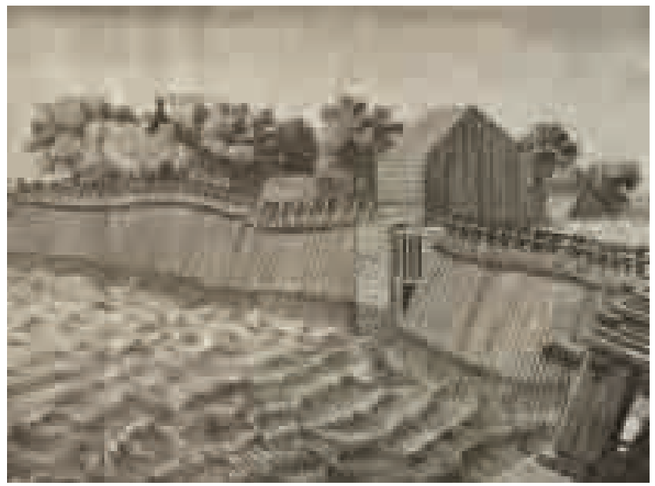
Darüber hinaus gibt es Herausforderungen, die für alle Inseln Kiribatis gleich sind. Das sind neben der Wasser- und Sanitärversorgung vor allem der Küstenschutz, Überfischung und nachlassende Erträge in der Landwirtschaft. Hinzu kommt der Klimawandel, der alle diese Aspekte stark beeinflusst und erheblich verstärkt. So treten heute auf einigen Inseln Kiribatis gehäuft Dürren auf, die zu Wassermangel führen und die Landwirtschaft erschweren. Da die Landwirtschaft auf den Inseln wegen der relativ unfruchtbaren Böden ohnehin nicht stark ausgeprägt ist, kann das zu Engpässen bei der Versorgung mit Lebensmitteln führen. Daher sollen auf den Inseln künftig alternative landwirtschaftliche Methoden und der Anbau anderer Früchte erprobt werden. Während des Prozesses wird von vornherein darauf geachtet, dass sich die Bevölkerung vor Ort realistische Ziele setzt. So machen die Vertreter der Ministerien klar, dass der Managementprozess nicht beliebige Forderungen nach deutlich höherem Wohlstand erfüllen kann. So soll verhindert werden, dass zu hohe Erwartungen geweckt werden.

Dem Meeresspiegelanstieg begegnen

> Deiche, Mauern und Sperrwerke schützen Küsten vor Überflutungen. Doch der Meeresspiegelanstieg erfordert zusätzlich noch andere Lösungen, die die Auswirkungen der Natur einbeziehen und sich nach und nach an das steigende Wasser anpassen lassen. Manche Küsten aber werden trotzdem künftig unbewohnbar sein. Für die Betroffenen sollte schon heute eine neue Heimat gesucht werden, denn sie werden Klimaflüchtlinge sein.

Die Entwicklung des modernen Seedeichs

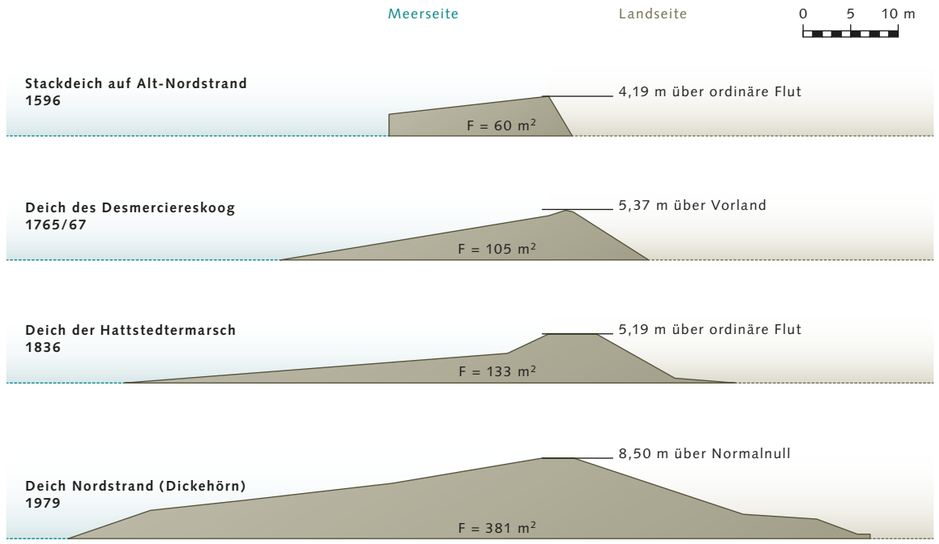
Die Bewohner der Küsten waren schon immer durch Überflutungen bedroht. Waren sie diesen anfangs schutzlos ausgeliefert, so lernten sie im Laufe der Zeit, Schutzwerke gegen Sturmfluten zu bauen. In manchen Ländern wurden Gebäude auf Stelzen errichtet, unter denen das Wasser hindurchströmen konnte, anderenorts wurden Häuser auf künstlich aufgeworfenen Erdhügeln gebaut. In Nordwesteuropa begann man bereits im 12. Jahrhundert mit dem Bau von Ringdeichen, um einzelne Siedlungen zu schützen. Die Gestalt der Deiche änderte sich im Laufe der Zeit. Anfang des 16. Jahrhunderts bestanden die Deiche vielerorts aus einer gut 2 Meter hohen Wand aus Holzpfählen, die durch einen dahinter aufgeschütteten Erdwall stabilisiert wurde. Weil diese sogenannten Stackdeiche bei schweren Sturmfluten aber von der Brandung zerschlagen wurden, ging man dazu über, Deiche nicht mehr steil aufzubauen, sondern mit lang gestrecktem und flachem Profil zu errichten, wo die Wellen bei Sturmfluten auslaufen konnten. Mitte des 18. Jahrhunderts hatten diese Deiche eine Höhe von etwa 5 Metern. Zwar erwies sich das flache Profil als sinnvoll, bei hoch auflaufenden Fluten aber wurden sie überspült. Durch das überlaufende Wasser wurden sie an der Rückseite ausgehöhlt, bis sie brachen. Deshalb ging man dazu über, immer höhere und flachere Deiche zu bauen. Heute haben die großen Seedeiche in Nordwesteuropa eine Höhe von etwa 9 Metern. Sie weisen flache Böschungsneigungen von mindestens 1:6 auf und sind an ihrem Fuß etwa 100 Meter breit. Damit halten sie auch bei hoch auflaufenden Sturmfluten Stand. Durch den Klimawandel und den damit verbundenen Anstieg des Meeresspiegels aber stehen die Küstenbewohner vor neuen Herausforderungen.



4.16 > Über mehrere Jahrhunderte setzte man in den Niederlanden beim Schutz der Region um Amsterdam auf Stackdeiche – wie hier im Jahr 1702 an der Zuiderzee. Bei schweren Sturmfluten aber brachen diese immer wieder.

Der Klimawandel als neue Herausforderung für den Küstenschutz

Sollte der Meeresspiegel bis zum Ende dieses Jahrhunderts um 1 Meter und später gar um mehrere Meter steigen, werden die heute bewährten Küstenschutzanlagen nicht mehr ausreichen. Es muss also vielerorts aufgerüstet werden. Allerdings weiß niemand, wie stark oder schnell sich der Klimawandel und der Meeresspiegelanstieg vollziehen werden. Anders als in den Jahrhunderten zuvor, in denen die Ingenieure in der Lage waren, die Bauwerke so zu entwickeln, dass sie sich bei gegebenen Bedingungen als tauglich erwiesen, stellt sich mit dem Klimawandel genau das als Frage: Welche Bedingungen sind denn in Zukunft gegeben? Der Küstenschutz muss mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten rechnen und die verschiedenen Szenarien des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat) bei der Planung und Auslegung von Schutzsystemen berücksichtigen.



4.17 > Im Laufe der Zeit änderte sich das Profil der Deiche an der Nordseeküste Schleswig-Holsteins. Man ging dazu über, Deiche nicht mehr steil aufzubauen, sondern mit lang gestrecktem und flachem Profil zu errichten, sodass die Wellen bei Sturmfluten auslaufen konnten.

Dem Meeresspiegelanstieg stets einen Schritt voraus

Für Küsteningenieure stellt sich insbesondere die Frage, wie hoch oder stark Küstenschutzbauwerke heute schon ausgelegt werden sollten. Weil die künftige globale Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs unsicher ist und man für einzelne Regionen sogar einen schnelleren Anstieg als im weltweiten Durchschnitt erwartet, wird angeregt, den Küstenschutz künftig flexibler zu gestalten. Gefordert wird für den Küstenschutz ein sogenanntes Adaptive Pathways Design (angepasste Entwicklungs- und Auslegungsplanung). Damit bezeichnet man eine Planung von Küstenschutzmaßnahmen, welche den Veränderungen folgend kurzfristig angepasst und eben nicht auf ein unsicheres Bemessungsszenario für das Ende des Jahrhunderts angelegt werden. Damit kann man quasi mit dem steigenden Wasser Schritt halten. Ein großes Sperrwerk, das bei Sturmfluten eine Flussmündung abriegelt, müsste komplett neu gebaut werden, wenn es aufgrund des steigenden Meeresspiegels keinen ausreichenden Schutz mehr böte. Damit wäre die anfängliche Investition verloren. Sinnvoller ist es, kleinere Maßnahmen vorzusehen, die aufeinander aufbauen. Der Küstenschutz steht damit vor einem Paradigmenwechsel. Galt bislang die Devise, eine Küstenlinie allein durch große, starre Bauwerke zu halten, so sieht das Adaptive Pathways Design auch ein Bündel verschiedener Konzepte und Maßnahmen vor, zu denen die gezielte Öffnung von Deichen und die Schaffung von Überflutungsflächen, von Poldern, zählen. Im Hinblick auf den Küstenschutz unterscheiden Experten heute folgende konventionelle und adaptive Küstenschutzprinzipien:

Konventioneller Küstenschutz

- Resistance (Widerstand): Planung und Bau von Küstenschutzmaßnahmen mit großen Investitionen, die auf heutige Extremereignisse wie zum Beispiel Jahrhundertfluten ausgelegt sind. Dieser Ansatz entspricht der klassischen Methodik der Auslegung von Küstenschutzbauwerken. Der Nachteil besteht darin, dass es zu großen Schäden kommt, wenn diese Systeme doch einmal versagen, etwa bei einem Deichbruch.
- Static Robustness (Statische Robustheit): Planung und Umsetzung von Küstenschutzmaßnahmen, die schon heute auf das Worst-Case-Klimaszenario ausgelegt sind. Dieses Prinzip hat Nachteile. Zum einen müssten heute enorme Investitionen getätigt werden. Zum

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

anderen werden die Baumaßnahmen nach dem heutigen Wissen über den Klimawandel ausgelegt. Das birgt die Gefahr, dass die Schutzmaßnahmen nicht ausreichend sind, wenn sich der Klimawandel noch stärker ausprägen sollte als heute erwartet.

Adaptiver Küstenschutz

- Resilience (Belastbarkeit): Planung und Bau von Küstenschutzmaßnahmen, die so ausgelegt sind, dass ein Versagen nicht zu Verlusten und großen Schäden an Infrastruktur, Bauten oder Ökosystemen führt, sondern eine schnelle Erholung oder Wiederherstellung möglich ist. Das kann etwa durch den Bau schwimmender Häuser erreicht werden. Auch lassen sich beispielsweise Straßen und Schienen höher legen und auf Dämmen errichten. In einem solchen Fall bleiben die Schäden begrenzt. Im Idealfall lassen sich Schäden gänzlich vermeiden.
- Dynamic Robustness (dynamische Robustheit): Küstenschutzmaßnahmen werden nacheinander umgesetzt, in dem Maße, wie es neue Erkenntnisse über die Entwicklung des Klimawandels gibt. Dieses Prinzip folgt dem Konzept der No-Regret-Strategie (englisch „no regret“ = ohne Bedauern). Damit werden Maßnahmen bezeichnet, die auch dann noch einen gesellschaftlichen Nutzen haben, wenn der Klimawandel stärker oder schwächer ausfällt als erwartet, und mit denen im Fall von Fehlannahmen in den Szenarien kein irreparabler Schaden entsteht. Ein Beispiel für eine No-Regret-Maßnahme ist die Schaffung eines Polders, der nicht nur dem Küstenschutz dient, sondern zugleich als Naherholungs- oder Naturschutzgebiet fungiert – und daher einen gesellschaftlichen oder ökologischen Mehrwert hat. Der Nachteil besteht darin, dass anders als beim Konzept der statischen Robustheit der Küstenschutz nicht mit einer Maßnahme in kurzer Zeit hergestellt, sondern über längere Zeit durch ergänzende und aufeinander aufbauende Maßnahmen immer wieder erweitert werden muss. Dafür bedarf es einer langfristigen und sich stetig anpassenden Planung, aber auch eines Managements, das sich auf einen Zeitraum von vielen Jahrzehnten bezieht oder sogar mehr als ein ganzes Jahrhundert im Blick hat.

London geht mit gutem Beispiel voran

Das Gros der Küstenschutzmaßnahmen weltweit folgt auch heute noch dem klassischen Resistance-Prinzip, doch gibt es in mehreren Ländern erste Konzepte, die der Idee des Adaptive Pathways Design folgen. Ein aktuelles Beispiel ist der Schutz der Themsemündung in England. Um London vor Überschwemmungen bei Sturmfluten zu schützen, wurde 1984 ein großes Flutsperrwerk, die Thames Barrier, fertiggestellt. Es ist mit großen beweglichen Fluttoren ausgestattet, die bei Sturmfluten geschlossen werden und verhindern sollen, dass die Hochwasserwelle London von der Seeseite her erreicht. Anfang dieses Jahrhunderts begann eine Diskussion darüber, ob dieses Sperrwerk durch ein neues und noch größeres, weiter flussabwärts in der Themsemündung gelegenes Sperrwerk ersetzt werden sollte, weil man befürchtete, dass das alte den höher auflaufenden Sturmfluten in der Zukunft keinen ausreichenden Widerstand bieten wird. Die Konsequenzen für die Bewohner Londons und die zu erwartenden Schäden wären immens. Die infolge des Klimawandels und Meeresspiegelanstiegs angenommenen Sturmfluten könnten die Kapazitäten von Thames Barrier übersteigen. Sie würden 1,25 Millionen Menschen akut bedrohen, die in den überflutungsgefährdeten Gebieten leben und arbeiten; ferner etwa 500 000 Wohnungen, 40 000 gewerbliche und industrielle Objekte, wichtige Regierungsgebäude, 400 Schulen und 16 Hospitäler.

Küstenschutzfahrplan für die Zukunft

Der Neubau des bis zu 5 Milliarden Pfund teuren neuen Sperrwerks in der Themse wurde als alleinige Lösung abgelehnt. Stattdessen erstellten die Behörden in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern eine Art Fahrplan eines zukünftigen Küstenschutzes, der entsprechend dem Adaptive Pathways Design verschiedene Maßnahmen vorsieht, die mit fortschreitendem und beschleunigtem Meeresspiegelanstieg verwirklicht werden sollen. Mit dem Thames-Estuary-2100-Plan ist ein Maßnahmenkatalog entstanden, der trotz großer Unsicherheiten über die Entwicklung des Klimawandels klare Handlungsoptionen für den adäquaten Umgang mit der dann anstehenden Gefährdungslage gibt. Zudem werden die finanziellen Belastungen, die sich

durch die Investitionen für einen Neubau des Sperrwerks ergäben, damit so lange wie möglich vermieden. Im Detail wurden in diesem Entwicklungsplan kritische Zeitpunkte ausgewiesen, zu denen künftig über geplante Maßnahmen entschieden werden soll – beziehungsweise zu denen die Maßnahmen durchgeführt sein müssen. Zudem wurde in Abstimmung mit den umliegenden Grafschaften festgelegt, welche Maßnahmen an den verschiedenen Flussabschnitten zwischen London und der Nordsee durchgeführt werden sollen. Zu den Maßnahmen zählen in chronologischer Reihenfolge:

Option 1: Klassische Schutzanlagen
- Erhöhung bestehender Schutzanlagen (Schutzwände, Deiche etc.);
- alte Schutzanlagen, die ersetzt werden müssen, durch höhere ersetzen;
- neue Schutzanlagen so konstruieren, dass sie sich leicht reparieren, ersetzen oder erhöhen lassen.

Option 2: Überflutungsflächen schaffen
- Errichtung von Poldern, wofür bereits im Mündungsgebiet der Themse vier große Gebiete festgelegt worden sind.

Option 3: Neues Sperrwerk
- Bau eines neuen Sperrwerks, für das schon mögliche Bauplätze festgelegt und die rechtlichen Rahmenbedingungen geschaffen worden sind, sodass bei Bedarf ohne aufwendige Abstimmung schnell mit dem Bau begonnen werden kann.

Option 4: Massives Sperrwerk
- Bau eines Sperrwerks, das im Gegensatz zu dem heutigen ständig geschlossen ist, um bei erhöhtem Meeresspiegel das Wasser permanent abzuhalten. Dieses Sperrwerk wird mit Schleusen für den Schiffsverkehr ausgestattet.

Polder
Der Begriff „Polder" stammt aus dem Niederländischen und bezeichnete ursprünglich ein Stück Land, das durch Deiche vor Hochwasser geschützt wird. Im Kontext des Küstenschutzes werden mit „Polder" Flächen bezeichnet, die bei Hochwasser gezielt überflutet werden, um die Spitze einer Flutwelle zu verringern.

Die Niederlande unter Druck

Weil weite Teile des Landes unter dem Meeresspiegel liegen, sind künftig die Niederlande und das niederländisch-belgische Grenzgebiet, das im flachen Mündungsbereich des Flusses Schelde liegt, bedroht. Der Meeresspiegelanstieg und die damit ausgelösten Prozesse stellen für diese Regionen eine doppelte Gefahr dar. Zum einen wird befürchtet, dass Deiche und Schutzbauwerke bei steigendem Meeresspiegel und entsprechend höher auflaufenden Sturmfluten überspült oder beschädigt werden. Zum anderen wird für Westeuropa erwartet, dass mit dem Klimawandel künftig die Niederschläge zunehmen, sodass Flüsse im Binnenland häufiger über die Ufer treten könnten. Wenn beides zusammenkommt – hohe Wasserstände vor der Küste und starke Regenfälle im Binnenland –, kann das Flusswasser nicht ins Meer ablaufen, sodass es sich im Binnenland staut.

Insgesamt leben in den tief liegenden Gebieten der Niederlande etwa 9 Millionen Menschen. Zudem konzentrieren sich hier hohe ökonomische Werte wie Infrastrukturen und Gewerbe- und Industrieunternehmen. Die Stadt Rotterdam zum Beispiel liegt mitsamt ihrem Hafen, dem größten Europas, schon heute durchschnittlich 2 Meter unter **Normalnull**. Die tief liegenden Gebiete werden seit vielen Jahren durch massive Strukturen wie Deiche, Dämme oder Hochwasserschutzwände gesichert. Zudem wurden seit den 1950er-Jahren Hochwasserschutzsysteme mit großen Sperrwerken errichtet, die viele ehemalige Meeresbuchten und auch die Flüsse permanent oder bei Sturmflut zur Nordsee hin abriegeln. Um dieses System für den Meeresspiegelanstieg aufzurüsten, rechnet man in den Niederlanden bis zum Jahr 2050 mit Ausgaben von bis zu 1,6 Milliarden Euro jährlich. Sollten die massiven Küstenschutzeinrichtungen trotz dieser Investitionen versagen und die Region überflutet werden, könnten die Schäden nach derzeitigen Schätzungen eine Höhe von bis zu 3700 Milliarden Euro erreichen.

Dem Wasser Raum geben

Angesichts der enormen Kosten für den Unterhalt der Küstenschutzbauten und des enormen Risikos, das ein Versagen der Küstenschutzeinrichtungen bedeutet, geht man in den Niederlanden seit 2012 mit dem „Ruimte voor de Rivier"-Projekt (Raum für den Fluss) einen zusätzlichen Weg. Sind bis heute viele Flüsse durch Deiche und Schutzwände geradezu kanalisiert worden, so werden jetzt bis zum Projektende im Jahr 2019 mehr als 30 einzelne Maß-

4.19 > Stahlkoloss gegen Sturmfluten: Nach den verheerenden Überschwemmungen von 1953, der sogenannten Hollandsturmflut, begann man in den Niederlanden große Teile der Flussmündungen mit Deichen und Sperrwerken zu schützen. Hier zu sehen ist das Maeslant-Sperrwerk, das einen Teil der Rheinmündung und den Hafen bei Rotterdam schützt.

nahmen an den niederländischen Flüssen Maas, Rhein und Waal durchgeführt, um die Hochwassergefahr zu verringern. Dazu zählen:

- Verbreiterung von Flussbetten, damit diese mehr Wasser aufnehmen können;
- Vertiefung von Flüssen;
- Neubau separater Kanäle, die den Hauptstrom entlasten und ein wesentliches landschaftsgestalterisches Element für neue Wohngebiete sein sollen, die zeitgleich realisiert werden;
- Rückverlegung von Deichen und Schaffung breiter Polder, um dem Hochwasser mehr Raum zu geben.

Mit diesen Maßnahmen folgt das „Ruimte voor de Rivier"-Projekt teils auch der Initiative „Building with Nature" (Bauen mit der Natur), die in den vergangenen Jahren von niederländischen Küstenschutzexperten, Ingenieurbüros, Behörden und Forschern gemeinsam gestartet wurde und inzwischen in mehreren Pilotprojekten umgesetzt worden ist. „Bauen mit der Natur" bedeutet, dass Küsten- und Hochwasserschutzmaßnahmen so gestaltet werden, dass sie sich an die natürlichen Gegebenheiten anpassen und zugleich neue Flächen für die Entwicklung von Naturräumen bieten. Ein Beispiel ist die Rückverlegung von Deichen und die Schaffung von Flutpoldern, in denen sich artenreiche Feuchtgebiete entwickeln können. Das „Bauen mit der Natur"-Prinzip ergänzt den klassischen Küstenschutz, der sich eher mit dem Prinzip „Bauen in der Natur" beschreiben lässt. Mit diesen klassischen Maßnahmen werden starre, künstliche Strukturen in die Landschaft gesetzt, die wie ein Fremdkörper wirken und Naturräume oftmals eher zerschneiden.

Großprojekt Scheldemündung

Eines der ersten Großprojekte, das dem „Bauen mit der Natur"-Gedanken folgt, ist die Schaffung mehrerer Polder entlang der Scheldemündung auf belgischer und niederländischer Seite. Dafür wird die alte Deichlinie jeweils zu einem flachen Überflutungsdeich abgetragen und der neue Deich zurückverlegt, sodass ein Polder entsteht. Dieser wird zum Fluss hin durch den Überflutungsdeich begrenzt, der nur bei hohem Wasserstand überspült wird. Zusätzlich wird der Wasserstand im Polder durch ein im Überflutungsdeich installiertes Siel reguliert. Der Sinn der flachen Überflutungsdeiche besteht darin, das Wasser im Polder zurückzuhalten, damit sich dort Feuchtgebiete bilden. Insgesamt werden die Polder eine Fläche von 40 Quadratkilometern haben. Im Fall eines Hochwassers können sie große Wassermengen zusätzlich aufnehmen und das Hinterland künftig vor Überflutungen schützen.

Auf etwa 60 Prozent der Polderfläche sollen sich Feuchtgebiete natürlich entwickeln, die unter anderem als Brutgebiete für Vögel dienen werden. 2006 wurde der erste Polder angelegt. 2030 soll das Projekt abgeschlossen sein. Die Gesamtkosten betragen rund 600 Millionen Euro. Im Vergleich dazu wären die Hochwasserschäden, die sich ergeben würden, wenn man die Polder nicht baute, deutlich größer. Diese könnten sich bis zum Jahr 2100 auf bis zu 1 Milliarde Euro jährlich belaufen.

4.20 > An der Scheldemündung werden neue Polder gebaut. Dazu wird der ehemalige Hauptdeich (A) abgetragen und zu einem Überflutungsdeich umfunktioniert. Der Wasserstand im Polder wird über ein Siel (B) reguliert, sodass sich ein Feuchtgebiet (C) bildet. Gegen hoch auflaufendes Hochwasser schützt der neue Hauptdeich (D), der weiter hinten liegt.

Andere Küsten, andere Maßnahmen

Wie die belgischen und niederländischen Experten betonen, ist das „Bauen mit der Natur" sowohl in Flussmündungen oder Deltas als auch an Sandküsten möglich. Letztere sind vor allem durch die Erosion betroffen, die sich im Zuge des Klimawandels durch häufigere oder höhere Sturmfluten noch verstärken könnte. Liegt Bebauung vor, können Gebäude beschädigt oder auf Dauer zerstört werden. Viele Sandküsten werden deshalb mit massiven Schutzbauten geschützt. Dazu gehören insbesondere Steinbuhnen, die wie lange Finger vom Ufer ins Meer hinausragen und die Wasserströmung am Ufer deutlich verringern. Diese Buhnen verhindern, dass bei starkem Wellengang Material von der Küste erodiert wird. Das birgt aber zugleich ein Problem, sofern die Hauptströmung parallel zur Küste verläuft. Normalerweise lagert sich Sediment, das an einem Ort abgetragen wird, an anderer Stelle wieder an. Es steht also dem Schutz der sandigen Küste an anderer Stelle wieder zur Verfügung. Wird dieser natürliche Sedimenttransport durch Buhnen unterbunden, können andere Küstenabschnitte ihrerseits stärker erodieren, weil der Nachschub ausbleibt. Durch den Bau von Buhnen kann es also an anderer Stelle zu einem Mangel an Sediment und zu einem langsamen Verlust von Stränden und Schutzdünen kommen.

Künstliche Insel als Sedimentspender

An vielen Küsten weltweit müssen Strände nach der Sturmsaison durch künstliche Aufspülungen wiederhergestellt werden. Dabei wird meist über Rohrleitungen Sand vom tieferen Meeresboden ans Land gepumpt oder der Sand mit Schiffen herantransportiert. Diese regelmäßigen Strandaufspülungen sind eine akzeptierte, aber aufwendige und teure Küstenschutzmaßnahme. In den Flächen, in denen der Sand abgebaut beziehungsweise aufgespült wird, kann es zudem zu Störungen der Lebensgemeinschaften kommen. Im Rahmen der „Bauen mit der Natur"-Initiative wurde deshalb ein Pilotprojekt gestartet, das die Erosionsproblematik an einem 17 Kilometer langen Küstenstreifen der Niederlande auf andere Weise lösen soll. Dazu wurde eine hakenförmige Halbinsel mit einem Volumen von 21 Millionen Kubikmetern aufgespült. Mit einer solchen Menge Sand könnte man etwa 60 Fußballfelder 50 Meter hoch bedecken. Die künstliche Insel fungiert als natürliches Sanddepot, das durch Wellen, Gezeitenströme und den Wind über mehrere Jahrzehnte abgetragen wird und den Stränden an dem 17 Kilometer langen Küstenabschnitt permanent frisches Sediment zum Ausgleichen der Erosion liefert. Diese Maßnahme erspart nicht nur den Bau neuer massiver Buhnen, sondern auch jährliche Aufspülungen an vielen Orten entlang der Küste. Dank dieser einmaligen Aufspülung entfallen zudem über einen langen Zeitraum die ständigen Störungen des Ökosystems durch jährlichen Sandabbau.

Im Mississippidelta vor der Küste des US-Bundesstaats Louisiana sind natürliche Küstenschutzmaßnahmen von noch größeren Dimensionen geplant. Das Delta ist stark

4.21 > Seit 2013 wird bei New Orleans Sand aus dem Mississippi über eine mehr als 20 Kilometer lange Rohrleitung in das Delta gepumpt. So entstehen Sandbänke, auf denen sich mehrere Quadratkilometer große Salzwiesen entwickeln. Diese wirken als natürlicher Küstenschutz.

von Überschwemmungen und Erosion betroffen, weil aufgrund von Staustufen entlang des Flusses heute kaum mehr Sediment aus dem Fluss ins Delta gelangt. In einem Großprojekt, das mehr als 100 Einzelmaßnahmen vorsieht, soll das Delta wieder wachsen und die Gefahr von Überflutungen verringert werden.

Seit 2013 wird zum Beispiel über eine mehr als 20 Kilometer lange Pipeline Sand hinaus ins Delta transportiert. Dieser wird mit Baggerschiffen im Mississippi gewonnen und von Bord der Schiffe direkt in die Pipeline gepumpt. Dadurch werden ökologisch wertvolle Sandbänke geschaffen, auf denen sich in den kommenden Jahrzehnten mehrere Quadratkilometer große Salzwiesen entwickeln, die als natürlicher Küstenschutz wirken. Konkret sollen somit Orte südlich von New Orleans vor Überflutungen geschützt werden. An anderen Stellen entlang der Küste Louisianas werden derzeit durch Baggerarbeiten Dünen wiederhergestellt und Strände verbreitert.

Muscheln schützen Küsten

Eine weitere ökosystembasierte Küstenschutzmaßnahme, die in Louisiana, in den Niederlanden und auch an anderen Küsten zum Einsatz kommt, ist die Schaffung von Austernbänken vor der Küste. Diese wirken wie ein natürlicher Wellenbrecher, der der Brandung bei Sturmfluten einen großen Teil der Energie nimmt, ehe diese das Ufer erreicht. Der Vorteil der Austernbänke besteht darin, dass sich diese von selbst erhalten, weil sich in jedem Jahr junge Muschellarven ansiedeln. Künstliche Wellenbrecher hingegen müssen regelmäßig gewartet und ausgebessert werden. Für die Ansiedlung der Austernbänke werden in vielen Fällen Drahtkörbe mit leeren Muschelschalen auf den Meeresboden gesetzt. Diese Muscheln bieten freischwimmenden Muschellarven einen festen Untergrund, auf dem sie sich ansiedeln und zu ausgewachsenen Muscheln entwickeln. Da sich von Jahr zu Jahr neue Larven ansiedeln, entsteht nach und nach ein Riff.

Der ökosystembasierte Ansatz – ein Trend mit Zukunft

Das niederländische „Bauen mit der Natur“-Konzept gilt inzwischen in vielen Ländern als Vorbild für einen naturnahen Schutz vor Sturmfluten und Binnenhochwasser. International spricht man heute von Ecosystem-based Coastal Defence (ökosystembasierter Küstenschutz). In Deutschland beispielsweise hat man an der Elbe im Süden der Stadt Hamburg in einem großen Pilotprojekt einen Deich zurückverlegt, um dort den Kreetsand-Polder zu schaffen. Dieser Polder soll das Umland vor Überflutungen durch Binnenhochwasser schützen, die nach lang anhaltenden Regenfällen auftreten. Dieses Projekt ist bemerkenswert, denn in Deutschland und auch vielen anderen Ländern gibt es trotz der Großprojekte in den Niederlanden durchaus Vorbehalte gegen einen ökosystembasierten Küstenschutz. Denn noch haben Fachleute erst relativ wenig Erfahrung mit solchen alternativen Maßnahmen. Noch ist zu wenig über die Schutzwirkung und Dauerhaftigkeit bekannt. Zudem fehlt es an Standards zum Bau und Management ökosystembasierter Alternativen. Daher vertraut man bislang eher dem klassischen Küstenschutzansatz mit starren Schutzbauten. Schließlich ist das Wissen über das Design und den Bau klassischer Küstenschutzanlagen wie etwa Deichen oder Flutwehren über viele Jahrzehnte gewachsen. Man hat aus Flutkatastrophen gelernt, wie diese Bauwerke gestaltet sein müssen, damit sie auch bei schweren Sturmfluten einen ausreichenden Schutz bieten.

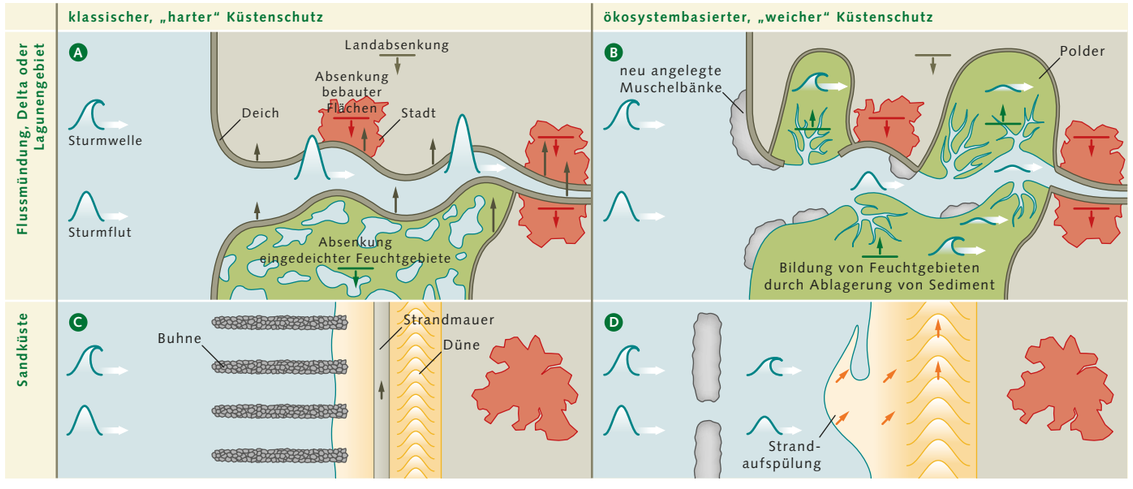
Alternativer Küstenschutz im Praxistest

Um die Zuverlässigkeit von ökosystembasierten Lösungen in der Praxis besser einschätzen zu können, gibt es aktuell mehrere Testprojekte. Auf der indonesischen Insel Bali beispielsweise wird eine ökosystembasierte Konstruktion mit einem klassischen, „harten“ Küstenschutzbau verglichen. Bali ist für Touristen aus aller Welt ein beliebtes Ferienziel, das sich vor allem durch seine weiten Strände und das klare Wasser auszeichnet. Der Erhalt der Schönheit und Unversehrtheit der Küsten ist daher von hoher wirtschaftlicher und sozialer Bedeutung.

Im konkreten Projekt geht es darum, einen Küstenabschnitt an der von Erosion betroffenen Südseite Balis zu schützen. Hier trägt starker Wellengang viel Sediment fort, und an frischem Sediment herrscht Mangel, weil die Region von felsigen Halbinseln eingerahmt ist, die den Transport von Sediment verhindern. In einer Kooperation von Küsteningenieuren aus Europa, lokalen Behörden und der Bevölkerung vor Ort wird nun eine neu geschaffene Schutzkonstruktion aus Bambuspfählen und Kokosfasermatten mit der Wirkung einer vor Kurzem erbauten, knapp 2 Meter hohen Schutzmauer aus Beton verglichen. Da von anderen Küstenabschnitten Balis bekannt ist, dass starre Schutzwände die Erosion verstärken können, weil sie die Brandung und den Wellenablauf verändern, will man jetzt herausfinden, ob die Konstruktion aus natürlichen Materialien besser geeignet ist, den Strand vor weiterem Abbruch bei starker Brandung zu schützen. Die Konstruktion besteht aus einer Reihe von Bambuspfählen, hinter die Kokosmatten auf dem Strand ausgerollt werden. Damit sie nicht fortgespült werden, werden die Matten hinter den Pfählen in den Sand eingegraben und anschließend mit kleinen Setzlingen eines einheimischen Dünengrases bepflanzt, die im Laufe der Zeit ein dichtes Wurzelgeflecht bilden und die Konstruktion stabilisieren sollen.

Ein solcher direkter Vergleich zwischen einer klassischen und einer ökosystembasierten Konstruktion bezüglich Leistungsfähigkeit und Schutzwirkung ist für die Insel Bali neu. Da die Bambus-Kokosfaser-Konstruktion erst in jüngster Zeit fertiggestellt worden ist, liegen noch keine Erkenntnisse darüber vor, wie leistungsfähig sie ist. Sollte sich der Schutz aus Bambus und Kokosfasermatten allerdings bewähren, hätte das folgende Vorteile:

- Kostenersparnis: In der Vergangenheit wurden für den Bau von Küstenschutzanlagen aus Beton Spezialisten und Arbeiter nach Bali eingeflogen. Das verursachte sehr hohe Kosten. Die Konstruktion aus Bambus und Kokosfasern ist günstiger als ein Bauwerk aus Beton.
- Expertise vor Ort: Bislang fehlte es an Spezialisten vor Ort, die die Betonbauwerke regelmäßig prüfen und warten, weshalb diese an vielen Stellen schadhaft sind. Beim Bau der Anlagen aus Bambuspfählen und Kokosfasermatten hingegen helfen Einheimische mit. Diese verfügen damit auch über das nötige Wissen, um die Anlagen instand zu halten.
- Nutzung einheimischer und nachwachsender Ressourcen: Bambus und Kokosfasern sind traditionelle, nachwachsende Materialien, die vor Ort gewonnen werden. Lange Transportwege entfallen.
- Schaffung von Arbeitsplätzen: Durch den Bau und die Wartung der natürlichen Küstenschutzanlagen entstehen vor Ort Arbeitsplätze.
- Identifikation mit dem Küstenschutz: Da die Einheimischen den Küstenschutz selbst errichten, entsteht eine andere Beziehung zum Bauwerk und ein Gefühl der Verantwortung für dessen Erhalt. Bei Konstruktionen, die von Fremdfirmen errichtet werden, wird die Pflege des Bauwerks oft vernachlässigt.



4.22 > Während man beim klassischen Küstenschutz Deiche oder andere künstliche Bauwerke im Zuge des Klimawandels erhöhen muss, schöpft man beim ökosystembasierten Küstenschutz das natürliche Potenzial des Küstenraums aus. Statt mit immer höheren Deichen (A) dem Wasser Grenzen zu setzen, kann man in Mündungsgebieten dem Meer durch den Bau von Poldern mehr Raum gegeben (B). Sandküsten können statt durch Buhnen und Strandmauern (C) zukünftig durch das Aufspülen von Depots (D) geschützt werden, die Küstengebiete über Jahrzehnte mit Sand versorgen.

Weltweit gibt es inzwischen eine ganze Reihe weiterer Projekte für einen ökosystembasierten, „weichen" Küstenschutz, die bereits umgesetzt wurden oder aktuell in der Planung sind. Experten für ökosystembasierten Küstenschutz empfehlen, neue Projekte zunächst in kleinen Pilotmaßnahmen zu testen und deren Eignung und Auswirkungen von interdisziplinären Teams aus Ingenieuren, Landschaftsplanern und Sozialwissenschaftlern zu prüfen. Insbesondere ist vorab zu untersuchen, inwieweit die Bevölkerung den Küstenschutz akzeptiert. Vor der Schaffung von Poldern etwa müssen vor allem die Besitzer und Nutzer der Flächen einbezogen werden. Wenn die Pilotprojekte erfolgreich sind, sollten die neuen Ideen dann Schritt für Schritt in größere Projekte überführt werden.

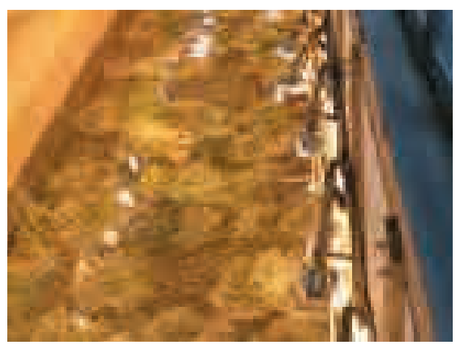
Seegras – eine Pflanze mit Potenzial

Eine neue Idee für den Küstenschutz, die in den nächsten Jahren in Pilotprojekte münden soll, ist die Ansiedlung von Seegraswiesen. Seegräser wachsen länglich und krautartig und ähneln damit den Gräsern an Land. Zudem bilden sie – anders als Tange, die sich zumeist am festen Untergrund anheften – Wurzeln aus, dank derer sie starken Wellenbewegungen widerstehen und das Sediment vor Belastungen und sukzessivem Abtrag schützen können. Sind Korallenriffe und Mangroven seit Langem als natürliche Wellenbrecher bekannt, so wurde die Bedeutung von Seegraswiesen für den Küstenschutz hingegen erst in den letzten Jahren deutlich, nachdem sie in vielen Küstenregionen abgestorben waren. Gründe dafür sind die Wasserverschmutzung und in überdüngten Gebieten das starke Algenwachstum, das zur Trübung des Wassers führt. Wo heute das Seegras fehlt, wird jetzt häufig verstärkt Sediment abgetragen. Neues Seegras siedelt sich kaum wieder an. Keimlinge finden keinen Halt mehr, weil in den kahlen Bereichen die Strömung zu stark ist.

Ein internationales Forscherteam aus Küsteningenieuren, Geoökologen und Materialwissenschaftlern arbeitet deshalb an Methoden, um die Ansiedlung von Seegras zu erleichtern. Sie entwickeln Kunststoffmatten aus künstlichem Seegras, die sie künftig am Meeresboden auslegen wollen. Das künstliche Seegras soll die Wasserströmung so weit reduzieren, dass sich wieder Seegraskeimlinge ansiedeln können. Zudem sind diese Matten so luftig gewebt, dass der Meeresboden darunter nicht hermetisch abgeriegelt wird und keine Organismen absterben. Während die Materialforscher die geeignete Kunststoffrezeptur für den Einsatz im Meerwasser entwickeln, führen die Ingenieure aktuell Experimente im Strömungskanal einer Hochschule durch. Mit diesen Experimenten wird man erstmals exakt quantifizieren können, wie stark die dämpfende Wirkung von Seegraswiesen im Hinblick auf den Küstenschutz ist. Auch will man herausfinden, wie schnell sich Seegraskeimlinge ansiedeln.

Salzwiese und Deich im Wellenkanal

Wie beim Seegraskonzept ist heute auch bei einigen anderen ökosystembasierten Küstenschutzlösungen noch nicht genau ermittelt, wie stark deren Schutzwirkung ist. Eine solche Quantifizierung ist wichtig, um einschätzen zu können, inwieweit sie künftig in der Lage sind, den klassischen Küstenschutz zu ergänzen oder gar zu ersetzen. So sind Salzwiesen, die an vielen Stellen entlang der Nordseeküste vor den Deichen liegen, zwar bekannt dafür, dass sie bei Sturmflut auflaufende Wellen bremsen. In welchem Maße dies allerdings geschieht, weiß man nicht genau. So hat man noch nicht ermessen können, wie groß die Schutzwirkung dicht bewachsener Salzwiesen ist, wenn die Halme der Gräser durch die Wellen brechen. Für entsprechende Messungen wurde nun vor Kurzem ein echtes Stück Salzwiese im Wattenmeer abgetragen



4.23 > In einem Wellenkanal wurde erstmals genau vermessen, wie gut Salzwiesen mit hohem Bewuchs die Brandung dämpfen können.

und in einem 300 Meter langen Wellenkanal starker Brandung ausgesetzt. Wie sich zeigte, verringerte sich die Schutzwirkung kaum, wenn die Halme brachen.

Bis heute gilt als Regel im Küstenschutz, die Grasnarbe von Deichen durch Schafbeweidung möglichst kurz zu halten. Zum einen wird durch den Tritt der Hufe der Boden verfestigt, sodass die Deiche bei Überflutung nicht aufweichen. Zum anderen soll durch die Beweidung verhindert werden, dass krautige Pflanzen in die Höhe wachsen. Wellen könnten sonst Pflanzenbüschel ausreißen, wodurch Löcher im Deich entstünden, die durch den Wellenschlag vergrößert würden. Im Extremfall könnte dies zu Deichbrüchen führen.

Erstmals untersuchen Küsteningenieure, inwieweit Deiche künftig mit verschiedenen Blütenpflanzen begrünt werden könnten, um damit artenreiche Wiesenbiotope zu schaffen. In einem Wellenbecken wird daher jetzt ein Deich in Originalgröße nachgebaut, der mit verschiedenen Mischungen aus Wildblumen begrünt werden soll. Um herauszufinden, welche Pflanzenmischung ein dichtes Wurzelwerk bildet, das die Grasnarbe festigt, und welche Wildblumen dauerhaft Überflutungen mit Salzwasser ertragen, werden sogar Sturmfluten simuliert.

Eine Synthese aus Alt und Neu

Bevor ökosystembasierte Maßnahmen als Alternativen im Küstenschutz breite Akzeptanz finden, werden weiter derartige Untersuchungen nötig sein. Ungeachtet dessen wird man den Herausforderungen, die der steigende Meeresspiegel mit sich bringt, künftig am besten mit einer Kombination aus dem ökosystembasierten und dem klassischen Küstenschutz begegnen. In den Niederlanden und Deutschland wird man beispielsweise nicht vollständig auf Deiche verzichten können.

Klar ist aber auch, dass beispielsweise durch Deiche kanalisierte Flussmündungen allein künftig keinen ausreichenden Schutz mehr werden bieten können. Das zeigen auch mathematische Modellrechnungen eines Teams australischer, deutscher und US-amerikanischer Forscher, die berechneten, wie sich die Wellendynamik verändert, wenn das Wasser durch den Meeresspiegelanstieg höher aufläuft. Unter der Annahme, dass die Watten nicht proportional zum Anstieg des Meeresspiegels mitwachsen

4.24 > Sogenannte Riffbälle als Wellenbrecher. Die von einer US-amerikanischen Nichtregierungsorganisation vertriebenen Kugeln werden für den Küstenschutz eingesetzt. Sie bilden zugleich wertvolle Unterwasserlebensräume.

werden, stellten sie fest, dass die Wellen nicht nur um den Betrag des Meeresspiegelanstiegs an Höhe gewinnen. Vielmehr wächst ihre Höhe überproportional. Das liegt daran, dass die Bodenreibung geringer wird, wenn das Wasser höher steht. Die bremsende Wirkung des Untergrunds lässt also nach.

Beunruhigend ist, dass dieser Effekt bereits deutlich zum Tragen kommt, wenn der Meeresspiegel nur um wenige Zentimeter höher ist. Wellen könnten aufgrund dieses Effektes um bis zu 56 Prozent höher auflaufen. Einen solchen Effekt berücksichtigt man bisher bei der Berechnung der Höhe von Küstenschutzbauten nicht. Derzeit wird lediglich der Betrag, um den der Meeresspiegel künftig voraussichtlich steigen wird, als Sicherheitsaufschlag in die Bauplanung einbezogen.

Bälle bremsen die Brandung

Anders als Buhnen, die vom Ufer ins Meer hinausgebaut werden, sind Wellenbrecher lang gestreckte Strukturen, die parallel zur Küste im Wasser versenkt werden. Sie verhindern, dass die Brandung ungebremst auf die Küste trifft, und schützen so beispielsweise Strände oder Promenaden. Klassischerweise werden sie heute aus massiven Betonklötzen oder großen Steinen im Wasser gebildet, die darüber hinaus aber keine weitere Funktion haben. Allerdings gibt es mit den sogenannten Riffbällen schon seit längerer Zeit eine ökosystembasierte Alterna-

tive. Die von einer US-amerikanischen Nichtregierungsorganisation vertriebenen, etwa 1 Meter breiten Hohlkugeln aus Beton haben mehrere Öffnungen und reduzieren nicht nur die Energie der Wellen, sondern bieten zugleich vielen Meeresorganismen und Fischen Unterschlupf. Sie werden im bis zu mehrere Meter tiefen Wasser versenkt und eignen sich für Organismen, die sich auf festem Untergrund ansiedeln, etwa Muscheln, Seeanemonen oder Schwämme. Mit der Zeit bilden sich so dicht besiedelte Unterwasserlebensräume. Auch in Deutschland wurden bereits Riffbälle versenkt, zum Beispiel in der Kieler Bucht.

Lohnt sich ökosystembasierter Küstenschutz?

Intakte Korallenriffe und Mangrovenwälder bieten kostenlosen Küstenschutz, doch andere ökosystembasierte Maßnahmen können durchaus hohe Kosten verursachen, wie das Polderprojekt in der Scheldemündung zeigt. Es stellt sich nicht nur die Frage, wie zuverlässig oder leistungsfähig ökosystembasierte Lösungen sind, sondern auch, wie teuer diese sind und wie hoch die Kosten im Vergleich zum klassischen Küstenschutz ausfallen.

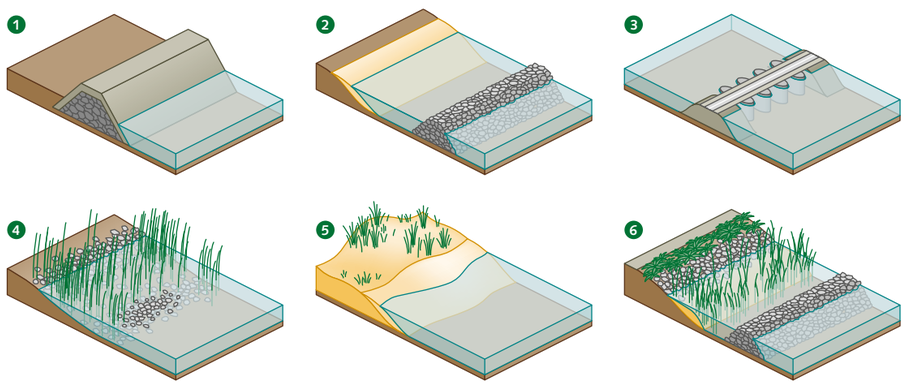
In einer aufwendigen Studie hat ein internationales Forscherteam erstmals 52 Küstenschutzprojekte analysiert, in denen Mangrovenpflanzungen und Salzwiesen angelegt beziehungsweise Korallenriffe durch junge Korallen restauriert wurden. Auch Seegraswiesen wurden betrachtet. Zum einen wurde untersucht, wie stark das Potenzial der Flächen für die Dämpfung von Wellen ist, zum anderen wie groß die Projektkosten im Vergleich zum „harten" Küstenschutz sind. Im Vergleich aller Projekte verringern die verschiedenen Lebensräume, je nach Situation vor Ort, die Wellenhöhe wie folgt:

- Korallenriffe um 54 bis 81 Prozent,
- Salzwiesen um 62 bis 79 Prozent,
- Seegraswiesen um 25 bis 45 Prozent,
- Mangroven zwischen 25 und 37 Prozent.

Anzumerken ist, dass die Mangrovenflächen der untersuchten Projekte nur zwischen 800 und 1500 Meter breit waren. Mangrovenwälder jedoch, die viele Kilometer breit sind, können Wellen bei Sturmflut durchaus zu 100 Prozent dämpfen, ehe diese das Ufer erreichen.

Die Salzwiesen wiederum, die analysiert wurden, hatten eine Breite von 100 bis 2800 Metern. Die Forscher weisen aber darauf hin, dass man bei der Schaffung von Salzwiesen nicht nur die Breite der Wiese, sondern auch die Höhe der Vegetation in Betracht ziehen sollte. Nach dieser Studie ist in Salzwiesen die dämpfende Wirkung am größten, wenn die Vegetation eine Höhe hat, die bis knapp unter die Wasseroberfläche reicht.

Bei Korallenriffen zeigte sich, dass diese die größte dämpfende Wirkung haben, wenn sie mindestens doppelt so lang wie die Länge der eintreffenden Welle sind und



4.25 > Neben klassischen Küstenschutzmethoden wie Deichen (1), Wellenbrechern (2) und Sperrwerken in Flussmündungen (3) werden heute zunehmend ökosystembasierte Maßnahmen umgesetzt. Dazu zählen die Schaffung künstlich angelegter Marschen (4), in denen sich frisches Sediment sammelt, Sandaufspülungen (5), durch die sich entlang der Küste Sände und Dünen bilden, sowie die Errichtung naturnaher Küstenlinien (6), bei denen sich hinter Strukturen, die als Wellenbrecher dienen, artenreiche Grüngürtel entwickeln.

4.26 > Der Hafen der britischen Stadt Cowes auf der Isle of Wight wird durch massive Wellenbrecher geschützt. Deren Bau ist häufig teurer als die Schaffung eines natürlichen Küstenschutzes wie etwa einer Salzwiese oder Seegraswiese. Ob sich ökosystembasierte Küstenschutzmaßnahmen tatsächlich realisieren lassen, hängt jedoch von der Gestalt und der Nutzung der Küste ab.

4.27 > Im niederländischen Katwijk aan Zee wurde ein Parkhaus parallel zur Uferstraße gebaut und anschließend mit Sand bedeckt, sodass eine künstliche hohe Düne entstanden ist.

höchstens in einer Tiefe liegen, die halb so groß ist wie die Wellenhöhe.

Weil es an Vergleichszahlen für Korallenriffe und Seegraswiesen fehlte, blieb die Kostenanalyse der Projekte auf Mangroven und Salzwiesen beschränkt. Für letztere zeigte die Studie Kostenvorteile gegenüber dem klassischen Küstenschutz in Form von Wellenbrechern mit der gleichen dämpfenden Wirkung. Für die Mangrovenprojekte ergab die Studie, dass diese drei- bis fünfmal billiger sein können als der Bau von Wellenbrechern. Salzwiesenprojekte, die insbesondere in Europa und den USA untersucht wurden, sind je nach Lage hingegen entweder genauso teuer wie klassische Wellenbrecher oder bis zu dreimal günstiger. Die Unterschiede kommen vor allem dadurch zustande, dass die Kosten für den Bau der Wellenbrecher mit der Wassertiefe überproportional zunehmen.

Die Schaffung von Mangroven und von Salzwiesen haben neben dem Kostenaspekt auch den Vorteil, dass beide Habitate mit dem steigenden Meeresspiegel wachsen können. Bei häufigeren Überflutungen wird mehr Sediment in die Flächen transportiert, sodass sich das Niveau hebt und der Küstenschutz bestehen bleibt. Wellenbrecher hingegen verlieren mit steigendem Meeresspiegel an Schutzwirkung.

Die Grenzen des ökosystembasierten Ansatzes

Ökosystembasierte Küstenschutzlösungen sind nicht für jede Art von Küste geeignet. Ein entscheidendes Ausschlusskriterium ist der hohe Platzbedarf vieler Lösungen. Die Schaffung von Poldern oder Mangrovenpflanzungen mit einer ausreichenden Breite ist an einem eng bebauten Küstenstreifen oder vor Häfen ausgeschlossen. In einem solchen Fall können für den Schutz der Ufer künstliche Riffe gebaut oder Seegraswiesen vor den Deichen angelegt werden. Bei großen Wassertiefen aber fallen auch diese Maßnahmen weg, und es bleibt als einzige Lösung ein starrer und klassischer Küstenschutz am Ufer nach dem Prinzip „Widerstand“. Mit steigendem Meeresspiegel müssen solche Konstruktionen entsprechend hoch ausgelegt werden.

Um der Ästhetik willen plant man in den Niederlanden, Deiche und Hochwasserschutzwände mit anderen Funktionen zu kombinieren und gewissermaßen als Multifunktionsbau mit Küstenschutzcharakter optisch in das Stadtbild zu integrieren. Angedacht ist beispielsweise in Deich- oder Dünenabschnitten der Bau von Parkhäusern, deren massive Wand zur See hin als Küstenschutz dient und mit einem davorliegenden Deich oder einer Düne zusätzlich geschützt wird. Auf dem Deich könnten dann Straßen oder Promenaden entlangführen. Ein entsprechendes Projekt wurde im niederländischen Katwijk aan Zee realisiert, wo ein Parkhaus parallel zur Küste gebaut, anschließend mit Sand bedeckt und mit Dünenvegetation bepflanzt wurde. Dadurch ist eine künstliche, hohe Düne entstanden, die die Stadt schützt und sich harmonisch in die Landschaft einfügt.

Dem Unausweichlichen begegnen

Selbst wenn man künftig konventionelle und ökosystembasierte Maßnahmen zu einem effektiven Küstenschutz vereint, werden sich nicht alle Küsten auf der Welt schützen lassen, wenn der Meeresspiegel im Laufe der kommenden Jahrhunderte um mehrere Meter steigen sollte. Es steht außer Frage, dass die Menschen bestimmte Küsten zwangsläufig werden verlassen müssen, weil diese auf Dauer überflutet oder durch häufige Überschwemmungen unbewohnbar sein werden. Zunächst dürfte dieses Schicksal manche der Inselstaaten im Südpazifik ereilen, weil diese zum Teil weniger als 1 Meter über dem Meeresspiegel liegen. Für die Regierungen der Inselstaaten stellt sich daher schon heute die Frage, wie sich dieser Rückzug so gestalten lässt, dass die Inselbevölkerung in einer neuen Heimat Fuß fassen und dort denselben Lebensstandard erreichen kann wie in der verlorenen Heimat.

Bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang die Bestrebungen der Regierung des westpazifischen Inselstaats Kiribati. Einerseits treibt sie Küstenschutzmaßnahmen voran, um insbesondere wirtschaftlich wichtige Einrichtungen wie etwa den Flughafen so lange wie möglich zu schützen. Angesichts erster Anzeichen des Meeresspiegelanstiegs wie häufigeren Sturmfluten, zunehmender Küstenerosion oder einer Versalzung der Süßwasserlinsen bereitet man sich andererseits dort aber auch schon jetzt auf eine künftige Auswanderung vor.

Die Regierung Kiribatis betont auf internationaler Bühne stets, dass man nicht als hilfloser Klimaflüchtling betrachtet werden wolle, sondern vielmehr als eine Nation, die gegen die Folgen eines Klimawandels kämpft, den sie nicht zu verantworten hat und zu dem sie letztlich selbst kaum beigetragen hat.

Geordneter Rückzug statt heilloser Flucht

Unter dem Motto „Migration with Dignity“ (Auswanderung mit Würde) hat der ehemalige Präsident von Kiribati, Anote Tong, eine Auswanderungsstrategie gestartet, mit der die Bevölkerung nach und nach dazu befähigt werden soll, sich im Ausland eine neue Existenz aufzubauen, ehe die Inseln unbewohnbar und die rund 100 000 Einwohner Kiribatis zu heimatlosen Flüchtlingen werden. Gemeinsam mit anderen pazifischen Inselstaaten werden offensiv Klimagerechtigkeit und Unterstützung durch die Industrienationen eingefordert – insbesondere im Hinblick darauf, den Bürgern der Inselstaaten im Ausland Perspektiven auf Arbeitsplätze zu bieten und eine permanente Aufenthaltsgenehmigung zu erteilen. Dieser öffentliche Druck hat dazu geführt, dass die Gefährdung der pazifischen Inselstaaten in den vergangenen Jahren weltweit in das Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt ist. Gleichwohl lässt die Unterstützung durch die Industriestaaten zu wünschen übrig – auch durch die direkten Nachbarstaaten Australien oder Neuseeland. Neuseeland hat beispielsweise Arbeitsprogramme aufgelegt, mit denen Arbeiter von den pazifischen Inselstaaten ins Land geholt werden. Als Klimahilfsprogramm aber wollen die neuseeländischen Behörden diese Programme nicht verstanden wissen. Zudem ist die Zahl der Einwanderer sehr gering. Was Kiribati betrifft, dürfen jedes Jahr nach einem Lotterieverfahren lediglich 75 ausgewählte Familien einwandern. Sofern sich die Einwanderer darum bemühen, Arbeit zu finden, erhalten sie eine permanente Aufenthaltsgenehmigung. Darüber hinaus bietet Neuseeland den Bewohnern von Kiribati seit 2007 Saisonarbeitsplätze in der Landwirtschaft an. Zwar haben sich daraus in manchen Fällen permanente Aufenthaltsgenehmigungen ergeben, von einem Klimahilfsprogramm auf breiter Basis aber kann bislang keine Rede sein. Kiribati und andere Inselstaaten fordern hier klare Zusagen der Industriestaaten.

Während es aus den übrigen Industrienationen bislang noch weniger Bereitschaft gibt, den Einwohnern der vom Meeresspiegelanstieg betroffenen Inselstaaten Aufenthaltsrechte für die Zukunft in Aussicht zu stellen, gibt es zwischen den pazifischen Inselstaaten selbst zum Teil eine bemerkenswerte Solidarität. Der Inselstaat Fidschi etwa hat Kiribati rund 24 Hektar Land verkauft. Viele

4.28 > Die Bewohner der Insel Nukunonu im Südpazifik wollen nicht als Klimaopfer betrachtet werden, sondern als Kämpfer gegen einen steigenden Meeresspiegel. Nach einem UN-Report könnte das Atoll, das zur Inselgruppe Tokelau gehört, im 21. Jahrhundert untergehen.

Inseln Fidschis liegen höher als die Kiribatis, sodass diese zukünftig vom Meeresspiegelanstieg weniger betroffen sein werden. Zunächst soll diese Landfläche, die sich auf der zweitgrößten Insel Fidschis, Vanua Levu, befindet, landwirtschaftlich genutzt werden. Kiribati will hier Lebensmittel anbauen, wenn die eigene landwirtschaftliche Fläche durch Überflutungen verloren geht. Sollten Teile der Inseln Kiribatis künftig gänzlich unbewohnbar werden, sollen in dem Gebiet die betroffenen Bürger Kiribatis siedeln dürfen. Hierzu hat der Präsident Fidschis öffentlich eine mündliche Zusage gegeben.

Ein Vorteil dieser Siedlungspolitik besteht darin, dass die Auswanderer aus Kiribati auf Vanua Levu ähnliche Lebensbedingungen wie in der Heimat finden. Die Bereitschaft der Regierung Fidschis, Flüchtlinge aufzunehmen, ist umso bemerkenswerter, als einige Inseln Fidschis selbst ähnlich wie Kiribati von Überflutungen betroffen sein werden. Fidschi wird daher zusätzlich die Umsiedlung von Binnenflüchtlingen meistern müssen. Geplant ist, dass diese ebenfalls vorwiegend auf Vanua Levu siedeln sollen.

Neue Heimat für Millionen von Menschen?

Das Beispiel Kiribatis zeigt, dass es bei frühzeitiger Planung möglich sein kann, sich rechtzeitig aus bedrohten Küstengebieten zurückziehen zu können, um sich mit Würde anderenorts eine neue Existenz aufzubauen. Kritiker geben aber zu bedenken, dass sichergestellt sein müsse, dass nicht nur eine gebildete Minderheit, sondern die gesamte Bevölkerung die Möglichkeit zum Auswandern habe. Zudem sei fraglich, inwieweit man das Beispiel Kiribatis auf andere Länder übertragen könne. Die rund 100 000 Einwohner Kiribatis etwa werden möglicherweise vollständig von anderen Nationen aufgenommen. Hingegen werden die vielen Millionen Menschen, die beispielsweise in Bangladesch in überflutungsgefährdeten Gebieten leben, nicht ohne Weiteres in den dicht besiedelten Nachbarstaaten unterkommen können. Viele Experten fordern daher im Hinblick auf den Meeresspiegelanstieg eine größere internationale Solidarität insbesondere von Seiten der Industrienationen.

Ein erstes positives Beispiel ist die von Norwegen und der Schweiz 2011 ins Leben gerufene Nansen-Initiative, die nach dem ersten Flüchtlingskommissar des früheren Völkerbundes, Fridtjof Nansen, benannt wurde. Die Arbeit der Initiative besteht darin, verschiedene Nationen im Hinblick auf die Problematik der Klimaflüchtlinge zu beraten und in die Beratungsprozesse politische Vertreter der Industrienationen und der zumeist betroffenen Entwicklungs- und Schwellenländer einzubinden. Dabei geht es vor allem auch darum, zwischen Staaten zu vermitteln – jenen, aus denen die Menschen fliehen, und jenen, die ein potenzielles Ziel der Flüchtlinge sind. Die Initiative ist weltweit sowohl im Binnenland aktiv, wo Menschen zum Beispiel vor Dürren fliehen, als auch an den Küsten. Sie hat in der Vergangenheit in verschiedenen Regionen große Diskussionsrunden initiiert, in denen Vertreter von Behörden und betroffene Menschen an einem Tisch saßen. Die Nansen-Initiative wurde inzwischen in die Platform on Disaster Displacement (Plattform für die Vertreibung durch Katastrophen) umbenannt, die die Arbeit weiterführt und unter anderem von staatlichen Institutionen wie der Schweizerischen Eidgenossenschaft und dem Außenministerium der Bundesrepublik Deutschland unterstützt wird.

Conclusio

Gemeinsam für eine schonende Nutzung und einen besseren Schutz

Eine nachhaltige Nutzung der Küsten lässt sich nur erreichen, wenn die verschiedenen Interessen diverser Nutzer miteinander in Einklang gebracht werden. International ist die Zuständigkeit zunächst klar durch das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (SRÜ) geregelt. Demnach gibt es das Küstenmeer, das zum Hoheitsgebiet eines Staates zählt. Daran schließt sich die Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) an, die zwar nicht zum Hoheitsgebiet eines Staates gehört, doch hat dieser hier das exklusive Recht, Ressourcen wie Erdöl und Fischbestände auszubeuten. Wie eine Nation ihre Küste nutzt, entscheidet sie hingegen allein.

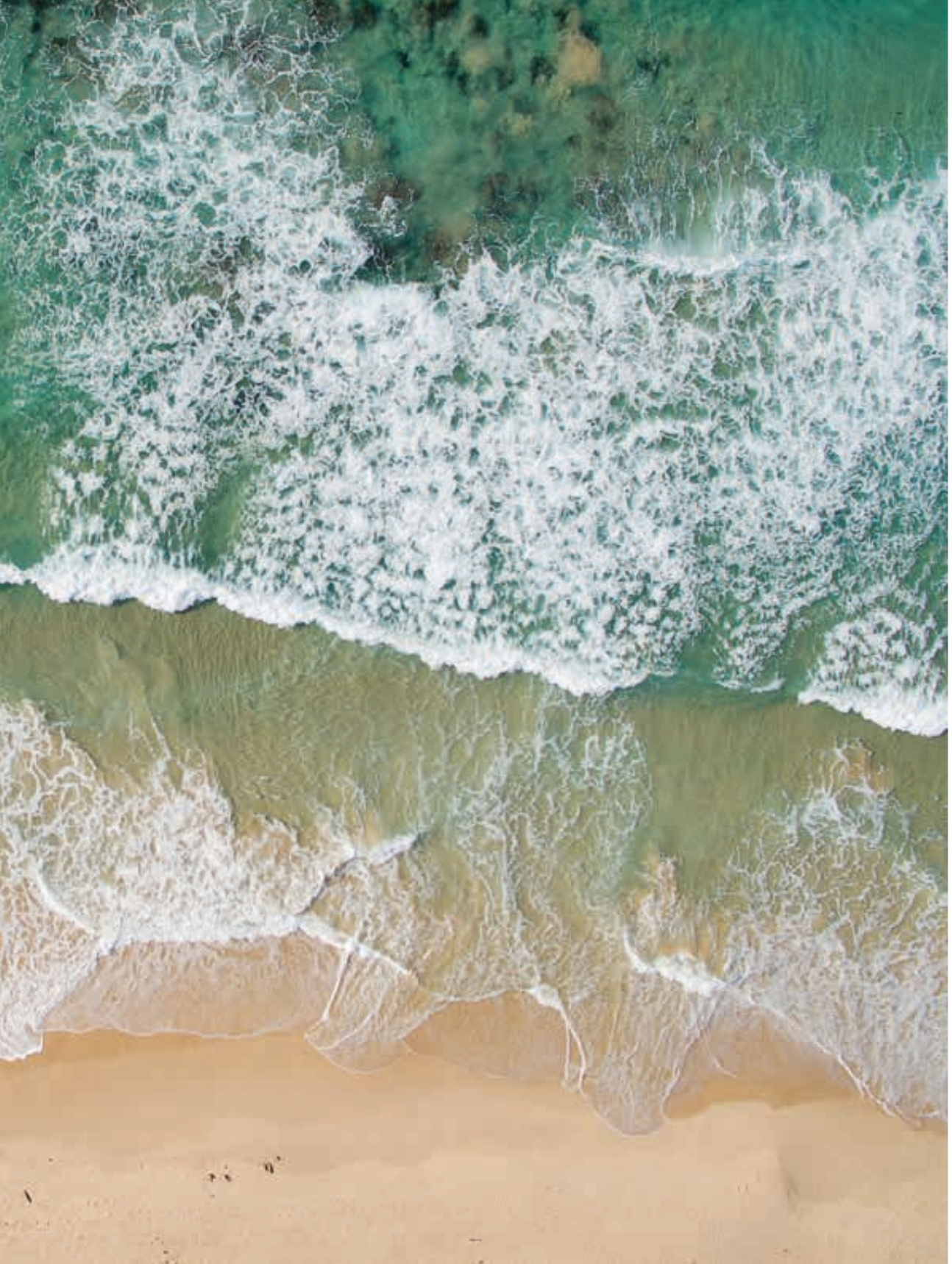
Um Interessenkonflikte zu vermeiden, bietet sich heute das Konzept des Integrierten Küstenzonenmanagements (Integrated Coastal Zone Management, ICZM) an, das die nachhaltige Entwicklung der Küstenzonen zum Ziel hat und auf Beispiele verweisen kann, in denen Konflikte zwischen Naturschutz und Tourismus vermieden oder nachhaltige Küstenfischereien realisiert werden konnten.

Erstrecken sich wichtige Küstengebiete über Staatsgrenzen, werden zusätzlich internationale Abstimmungen nötig. Dazu wurde das Konzept der sogenannten Large Marine Ecosystems (LMEs, große Meeresökosysteme) entwickelt, das in der Vergangenheit auch schon zu einigen Erfolgen geführt hat. So ist es zum Beispiel den Anrainern des LME im Golf von Bengalen gelungen, gemeinsame Maßnahmen zur Bekämpfung der Überfischung und der Meeresverschmutzung zu verabschieden.

Zu einem erfolgreichen Küstenmanagement wird künftig auch ein verlässlicher Schutz vor dem steigenden Meeresspiegel gehören. Galt bislang die Devise, eine Küstenlinie mit teils sehr mächtigen, starren Bauwerken wie Deichen oder Sperrwerken zu halten, so rückt man heute von diesem Paradigma ab. Insbesondere, weil die Folgen des Klimawandels heute nicht exakt vorhersehbar sind. Küstenschutzmaßnahmen müssen daher flexibler planbar sein. Eine vielversprechende Alternative ist der adaptive Küstenschutz, der verschiedene aufeinander aufbauende Maßnahmen vorsieht und mit dem Fortschreiten des Meeresspiegels in der Planung und Auslegung angepasst wird. Das kann eine Erhöhung der Deiche mithilfe von Schutzwänden sein oder die Schaffung neuer Überflutungsflächen, sogenannter Polder, in die Hochwasser gezielt umgeleitet wird. Ein erstes adaptives Großprojekt ist der Schutz der Themsemündung bei London. Zum adaptiven Küstenschutz gehört auch, Siedlungen künftig so zu bauen, dass diese gegen Hochwasser unempfindlich sind – etwa durch den Bau von schwimmenden Häusern.

Bedeutete Küstenschutz bislang vor allem, große Bauwerke zu realisieren, die Küstengebiete durchschnitten, so fordern Küsteningenieure jetzt verstärkt ein „Bauen mit der Natur“. Dabei will man das natürliche Potenzial der Küsten selbst nutzen, etwa durch die Ansiedlung von Austernriffen oder Seegraswiesen oder den Bau von Poldern, in denen sich artenreiche Salzwiesen entwickeln können. Trotz ermutigender Beispiele für Alternativen bleibt der Küstenschutz weltweit aber verhältnismäßig konservativ, da allgemein akzeptierte Standards oder Regelwerke für ökosystembasierte Maßnahmen bislang fehlen und die Wirksamkeit oft erst noch nachgewiesen werden muss. Diesen Mangel an Wissen gilt es nun schnell zu beheben.

Trotz aller Maßnahmen wird man bei steigendem Meeresspiegel nicht alle Küsten retten können. Die Regierungen von Inselstaaten versuchen daher schon heute, einen geordneten Rückzug vorzubereiten, etwa durch Bildungsprogramme, die die Bevölkerung für Arbeitsplätze im Ausland attraktiv macht. Dadurch sollen die Menschen, die bald Klimaflüchtlinge sein könnten, in die Lage versetzt werden, sich in anderen Ländern eine Existenz aufzubauen.



world ocean review
Mit den Meeren leben. 2017

5

Die Küsten – ein wertvoller Lebensraum unter Druck

Küsten sind ein besonderer Lebensraum. Sie sind der Übergangsbereich zwischen Land und Meer, werden von beiden Sphären beeinflusst und sind ausgesprochen vielgestaltig. Ist die Nordküste der französischen Bretagne durch Felsen geprägt und von zahlreichen Buchten eingeschnitten, erstrecken sich in Namibia die hohen Dünen der Wüste Namib bis an den Atlantik. In Sibirien wiederum besteht die flache Küste aus Permafrost, metertief gefrorenem Boden.

So unterschiedlich die Gestalt der Küsten ist, so vielfältig sind die Leistungen, die sie für den Menschen erbringen. Sie bieten wichtige Transportwege und Industriestandorte, sind ein bevorzugtes Erholungs- und Tourismusgebiet oder Rohstoffquelle für Mineralien und fossile Rohstoffe. Für den Menschen waren und sind Küsten deshalb als Siedlungsraum besonders beliebt. Seit Jahrzehnten nimmt die Bevölkerung in vielen Küstengebieten zu. Nach Schätzungen der Vereinten Nationen leben heute rund 2,8 Milliarden Menschen in einem Abstand von maximal 100 Kilometern zur Küste. Von den weltweit 20 Megastädten mit jeweils mehr als 10 Millionen Menschen liegen 13 in Küstennähe. Dazu zählen die Städte beziehungsweise Ballungszentren Mumbai (18,2), Dhaka (14,4 Millionen), Istanbul (14,4), Kalkutta (14,3) oder Peking (14,3). Nach Meinung vieler Experten wird die Verstädterung der Küstengebiete in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Man schätzt, dass 2060 etwa 1,4 Milliarden Menschen in den niedrig gelegenen Küstenzonen leben werden, die nur bis zu maximal 10 Meter über dem Meeresspiegel liegen.

Küsten sind letztlich im Vergleich zur gesamten Landmasse nur ein schmaler Saum, in dem das Land auf das Meer trifft. In vielen Fällen berücksichtigt der Mensch bei der Besiedlung nicht, dass dieser Saum einem ständigen natürlichen Wandel unterworfen ist – und dass durch diese Veränderungen im Laufe der Zeit auch Siedlungsgebiete des Menschen zerstört werden können. Dieser Wandel geht unterschiedlich schnell vonstatten: im Laufe von Jahrmillionen durch die Plattentektonik, durch die die Gestalt der Erdoberfläche und der Kontinente permanent verändert wird; im Rhythmus von mehreren Zehntausend Jahren durch den Wechsel von Warm- und Eiszeiten – und in den vergangenen Jahrhunderten insbesondere auch durch die Besiedlung durch den Menschen. In geologisch relativ kurzen Zeiträumen verändert vor allem die Schwankung des Meeresspiegels die Gestalt der Küsten stark.

Da während einer Eiszeit viel Wasser in Form von Eis und Schnee an Land gebunden ist und nur wenig Wasser vom Land ins Meer abfließt, sinkt der Meeresspiegel. Während der letzten Eiszeit vor rund 20 000 Jahren lag er um etwa 120 Meter tiefer als heute. Viele Gebiete, die heute überflutet sind, lagen damals trocken, und die aus dem Wasser ragende Landmasse war insgesamt etwa 20 Millionen Quadratkilometer größer als heute. Seit etwa 6000 Jahren hat sich der Meeresspiegel kaum verändert. Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt aber steigt er seit mehreren Jahrzehnten wieder stärker an, zuletzt um durchschnittlich 3 Millimeter pro Jahr. Es droht die Gefahr, dass ganze Inselstaaten oder tief liegende Küstengebiete künftig überflutet werden – beispielsweise in Bangladesch, das nur knapp über dem heutigen Meeresspiegel liegt.

Je nach Gestalt der Küste haben sich im Laufe der Zeit ganz unterschiedliche Lebensräume entwickelt. Wo Flüsse große Mengen an Nährstoffen und Sediment in die Küstengewässer tragen, gibt es heute je nach klimatischen Bedingungen und vorherrschender Strömung ausgedehnte Fluss-

Gesamt-Conclusio

deltas mit weiten Sandbänken, Wattengebiete oder Salzmarschen. Solche Küstengebiete sind wegen des starken Eintrags an Nährstoffen oftmals besonders produktiv und reich an Fischen. Zu den Flüssen, die besonders viel Sediment ins Meer tragen, gehört unter anderem der Mississippi, in dessen Mündungsbereich sich ein großes Delta entwickelt hat. Rekordhalter aber ist der Ganges: Rund 3,2 Milliarden Tonnen Material trägt dieser jährlich aus dem Himalajahochland ins Meer. Andere Küsten hingegen sind eher karg und felsig, etwa die Kalksteinküste Kroatiens. Dort gelangen nur wenige Nährstoffe ins Meer. Auch tropische Korallenriffe findet man vor allem dort, wo von Landseite aus kaum Nährstoffe und Sediment ins Meer fließen.

Die Küstengebiete der Welt werden heute intensiv genutzt. Sie liefern einen Großteil des weltweit wild gefangenen Fischs. So finden 90 Prozent der globalen Fischerei in Küstengewässern statt. Von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist auch die Förderung von Erdgas und Erdöl in küstennahen Gebieten. Obwohl beide Rohstoffe heute noch vor allem an Land gefördert werden, ist der Anteil aus dem Meer (Offshore-Gas und -Öl) beachtlich. So trägt Offshore-Öl mit etwa 40 Prozent und Offshore-Gas zu etwa 30 Prozent zur jeweiligen globalen Förderung bei.

Die Küstengewässer sind in den vergangenen Jahren verstärkt für die Erzeugung von Strom aus Windenergie interessant geworden. Die Zahl der Offshore-Windräder hat sich deutlich erhöht, sodass weltweit Ende 2015 Offshore-Windräder mit einer Gesamtleistung von gut 12 000 Megawatt in Betrieb waren, was in etwa der Leistung von 24 Atomreaktoren entspricht. Eine weitere Ressource, die die Küsten liefern, sind die mineralischen Rohstoffe, zu denen vor allem Sand und Kies zählen. Sie werden für die Betonherstellung, als Füllsand auf Baustellen oder zum Aufspülen neuer Hafen- und Wirtschaftsflächen an der Küste genutzt. Das größte Sandabbaugebiet befindet sich an der Küste von Marokko. Dünen werden dort in großem Stil mit Radladern abgebaggert, sodass die Küste in manchen Regionen einer Mondlandschaft gleicht.

Vielerorts nutzt der Mensch die Küsten heute über deren Belastungsgrenzen hinaus, wobei der Druck auf diese Lebensräume mannigfaltig ist. Aus ungeklärten Abwässern, aus intensiv gedüngten Agrargebieten oder aus der Aquakultur gelangen sehr viele Nährstoffe ins Meer, es kommt zur Eutrophierung und zu starken Algenblüten. Auch Schadstoffe, die aus industriellen Prozessen in die Küstengewässer gelangen, stellen eine Bedrohung dar. Dazu zählen schwermetallhaltige Verbindungen oder langlebige chemische Substanzen, die sich in der Nahrungskette anreichern und Krankheiten wie Krebs auslösen können. Ein Beispiel sind die polyfluorierten Verbindungen, die seit Jahren für alltägliche Produkte wie Outdoorbekleidung oder Pfannenbeschichtungen verwendet werden. Auch der Plastikabfall, der auf vielen verschiedenen Wegen ins Meer gelangt, stellt ein Problem dar, das aktuell stark diskutiert wird. Meerestiere oder Seevögel verschlucken die Plastikteile und sterben daran. Darüber hinaus zerfällt das Plastik in mikroskopisch kleine Bruchstücke, das Mikroplastik, das sich mittlerweile weltweit in den Meeren nachweisen lässt. Inwieweit Tiere es aufnehmen und wie gefährlich es ist, wird derzeit wissenschaftlich untersucht. Die globale Plastikproduktion nimmt seit Jahren zu. Allein zwischen 2005 und 2015 stieg sie um über 90 Millionen Tonnen von 230 auf mehr als 320 Millionen Tonnen.

Da die Küstengewässer besonders produktiv sind, wird hier intensiv Fisch gefangen. Das hat zur Überfischung vieler Bestände geführt. Darüber hinaus werden durch die Fischerei vielerorts Lebensräume am Meeresboden zerstört – beispielsweise Korallenriffe. In manchen Regionen, die reich an Korallen sind, führt die intensive Fischerei dazu, dass nach und nach Meeresorganismen überfischt werden. Verschwindet eine Art, wird die nächste bejagt. Durch die nicht nachhaltige Fischerei verarmen mit der Zeit die Lebensräume der Korallenriffe. Die Existenzgrundlage vieler Menschen steht somit auf dem Spiel.

Besonders unter Druck stehen heute die küstennahen Megacitys mit mehr als 10 Millionen Einwohnern. Diese Regionen zeichnen sich durch eine hohe Bevölkerungs- und Bebauungsdichte aus. Viele Menschen müssen zeitgleich mit Frischwasser, Nahrungsmitteln und Strom versorgt werden, was hohe Anforderungen an Infrastruktur, Logistik und Abfallentsorgung stellt. Weil permanent Menschen aus armen, ländlichen Regionen im Binnenland in die Küstenmetropolen ziehen, um dort Arbeit oder eine Ausbildung zu finden, werden diese Gebiete auch in Zukunft weiter wachsen – vor allem in Afrika, Südamerika und Südostasien. Durch dieses Wachstum wird die Landschaft zersiedelt. Naturgebiete wie Auen, Mangrovenwälder oder Salzwiesen gehen in kürzester Zeit verloren. Regionale Tier- und Pflanzenarten sind vom Aussterben bedroht. Hinzu kommt, dass durch die Zerstörung von Mangroven, die normalerweise als natürliche Wellenbrecher fungieren, heute viele Küstenabschnitte besonders überflutungsgefährdet sind. Die Überflutungen haben sich in manchen Megacitys überdies noch verschärft, da sich die dicht bebauten Stadtgebiete langsam absenken. Das liegt insbesondere an der Entnahme von Grundwasser zur Trinkwassergewinnung, das normalerweise wie ein Widerlager der schweren Bebauung entgegenwirkt. Zudem trägt auch die Verdichtung des Bodens zum Absinken bei. Die derzeit am schnellsten versinkende Stadt ist die indonesische Hauptstadt Jakarta, deren Stadtzentrum jährlich um etwa 10 Zentimeter absackt.

Zu diesen durch den Menschen lokal oder regional verursachten Problemen in den Küstengebieten kommen jene hinzu, die durch den weltweit wirkenden Klimawandel ausgelöst werden: die Meereserwärmung, die Versauerung des Meeres und der Meeresspiegelanstieg. Wie stark diese Folgen des Klimawandels für die Küstenlebensräume ausfallen werden, hängt in hohem Maße davon ab, wie viel Kohlendioxid (CO_2) künftig in die Erdatmosphäre gelangt. Die direkte Folge des starken CO_2-Ausstoßes ist die langsame Erwärmung der Atmosphäre, die eine Erwärmung insbesondere des Oberflächenwassers nach sich zieht, welches sich dann schlechter mit dem darunter liegenden kühleren und schwereren Wasser mischen kann. In der Folge gelangt weniger sauerstoffreiches Wasser in die Tiefe, was dort zu einem Sauerstoffmangel führen kann. Höhere Tiere wie Krebse, Muscheln oder Fische können in solchen Gebieten kaum mehr leben. Von der Erwärmung sind auch tropische Korallenarten betroffen. Derzeit geht man davon aus, dass etwa 20 Prozent der tropischen Korallenriffe durch die Erwärmung und andere Stressfaktoren wie etwa die Meeresverschmutzung unwiederbringlich zerstört und mindestens weitere 30 Prozent stark geschädigt sind. Bei anderen Meeresorganismen reagieren vor allem Eier und Larven empfindlich auf die Erwärmung des Wassers. Beim Kabeljau im Nordostatlantik etwa führt sie zum frühen Absterben. Modellrechnungen zeigen, dass dadurch künftig die Erträge

Gesamt-Conclusio

der Kabeljaufischerei in der Barentssee nördlich von Norwegen stark zurückgehen könnten.

Eine weitere Folge des Klimawandels ist die Versauerung der Meere. Dazu kommt es, weil sich zunehmend Kohlendioxid im Meerwasser löst, wodurch sich, vereinfacht ausgedrückt, Säure bildet. Betroffen sind vor allem jene Meeresorganismen, die Kalkschalen oder -skelette bilden. Bei Korallen, Muscheln und Schnecken nimmt die Kalkbildung in versauertem Wasser je nach untersuchter Tiergruppe um 22 bis 39 Prozent ab. Andererseits wurden inzwischen Studien veröffentlicht, die zeigen, dass sich einige Meeresorganismen im Laufe von mehreren Generationen durchaus an die Versauerung anpassen können. Wie stark die künftigen Auswirkungen der Versauerung sein werden, lässt sich daher heute noch nicht genau absehen.

Eine direkte Gefahr für den Menschen stellt der durch den Klimawandel verursachte Anstieg des Meeresspiegels dar. Derzeit steigt der Meeresspiegel um etwa 3 Millimeter pro Jahr, wobei sich der Anstieg noch verschärfen wird, sollten weiter Treibhausgase in großen Mengen durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe emittiert werden. Da die Entwicklung nicht genau vorhersehbar ist, geht der Weltklimarat (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) von vier Szenarien aus, die sich in der Annahme unterscheiden, wie hoch die CO_2-Konzentration in der Erdatmosphäre künftig sein könnte. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts könnte der Meeresspiegel weltweit nach dem extremen Szenario durchschnittlich um etwa 1 Meter steigen. Bis zum Jahr 2500 ist gar ein Anstieg um mehr als 6 Meter denkbar. Unter diesen Bedingungen wird der Küstenschutz immer mehr zu einer überlebenswichtigen Aufgabe.

Über Jahrhunderte konnte der Mensch sich an Sturmfluten und Überflutungen anpassen und entsprechende Schutzbauten entwickeln. Der künftige Verlauf des Meeresspiegelanstiegs aber ist nicht exakt vorhersehbar. Der Küstenschutz muss deshalb flexibler werden, um trotz der Ungewissheit Menschen und materielle Werte zu schützen. Setzte man bisher auf starren Küstenschutz in Form von Deichen und Sperrwerken, so dürfte man künftig vermehrt zu einem adaptiven Küstenschutz übergehen, der verschiedene aufeinander aufbauende Maßnahmen vorsieht und mit dem Fortschreiten des Meeresspiegels mitwächst. Entscheidend dabei ist, dass die verschiedenen Maßnahmen frühzeitig geplant und in einen Fahrplan eingeordnet werden, um jederzeit mit dem Meeresspiegelanstieg Schritt halten zu können. In den Niederlanden gibt es bereits derartige Großprojekte, und auch für den Schutz Londons und der Themsemündung wurde ein Maßnahmenkatalog zum adaptiven Küstenschutz entwickelt. Darüber hinaus fordern Küsteningenieure heute verstärkt ein „Bauen mit der Natur“. Dabei will man das Potenzial der Küsten selbst nutzen – etwa durch die Ansiedlung von Austernriffen oder Seegraswiesen oder den Bau von Poldern, in denen sich artenreiche Salzwiesen entwickeln können. Auch gilt die Devise, dass man lernen muss, mit dem steigenden Wasser zu leben – etwa indem man schwimmende Häuser errichtet. Küstenschutz kann zudem mit anderen Funktionen kombiniert werden und sich zugleich naturnah gestalten lassen. So werden in den Niederlanden bereits Parkhäuser entlang der Küste gebaut, die man anschließend mit Sand bedeckt und bepflanzt, um so künstliche Schutzdünen zu schaffen. Trotz aller Maßnahmen wird man künftig bei steigendem Meeresspiegel nicht alle Küsten weltweit retten können. Die Regierungen von Inselstaaten wie etwa Kiribati versuchen daher schon heute, einen geordneten Rückzug vorzubereiten – etwa durch Bildungsprogramme, die die Bevölkerung in die Lage versetzen soll, auch für ausländische Arbeitsmärkte interessant zu sein. Dadurch hätten die Menschen die Möglichkeit, sich in anderen Ländern eine Existenz aufzubauen, ehe sie zu mittellosen Klimaflüchtlingen werden.

Zu allen durch menschliche Übernutzung und durch Klimaerwärmung verursachten Belastungen kommen Naturgefahren wie etwa Erdbeben, Hangrutschungen oder Tsunamis hinzu. Zwar gab es diese Bedrohungen schon früher, da die Küsten heute aber dichter denn je besiedelt sind, ist das Schadensausmaß deutlich größer als zuvor. Daher versucht man heute, mithilfe ausgeklügelter Frühwarnsysteme die Menschen vor diesen Naturgefahren zu schützen. Besonders die USA und Japan haben diesbezüglich seit Mitte des vorigen Jahrhunderts eine Vorreiterrolle übernommen. Die schweren Tsunamis von 2004 im Indischen Ozean und 2011 in Japan führten dazu, dass die Tsunamiforschung und -frühwarnung noch stärker ausgebaut wurden, sodass heute in allen besonders gefährdeten Meeresgebieten leistungsfähige Warnsysteme vorliegen. Einen hundertprozentigen Schutz vor diesen Naturgefahren aber kann es nicht geben.

Die Küsten der Welt sind vielfach bedroht – heute am stärksten durch die Übernutzung durch den Menschen. Damit stellt sich die Frage, wie es künftig gelingen kann, ein schonendes Management der Küsten zu erreichen und Nutzungskonflikte, die sich durch entgegenstehende Interessen ergeben, von vornherein zu vermeiden. Ein wichtiger Lösungsansatz ist dabei das Integrierte Küstenzonenmanagement (Integrated Coastal Zone Management, ICZM), für das es auf regionaler Ebene durchaus schon erfolgreiche Beispiele gibt. So gibt es ICZM-Prozesse, in denen etwa Konflikte zwischen Naturschutz und Tourismus vermieden oder nachhaltige Küstenfischereien etabliert werden konnten. Bekannt sind Fälle, in denen Meeresgebiete von Behörden unter Schutz gestellt wurden, ohne vorher die vor Ort ansässigen Fischer in den Entscheidungsprozess einzubeziehen. Die betroffenen Fischer wiederum akzeptierten die Fischereiverbote in ihren Revieren vielfach nicht und fischten weiter. In ICZM-Prozessen aber finden die Fischer Gehör, zudem können sie eigene Vorschläge einbringen.

So wurden beispielsweise im indopazifischen Raum Schutzgebiete etabliert, in denen der Fischfang in Teilbereichen erlaubt ist oder vor Ort durch die Fischer selbst schonend organisiert wird, in sogenannten lokal verwalteten Meeresgebieten. Erstrecken sich wichtige Küstengebiete über Staatsgrenzen, werden zusätzlich internationale Abstimmungen nötig, wie etwa bei den Large Marine Ecosystems (LMEs,) großen küstennahen Meeresökosystemen, die sich durch eine typische Flora und Fauna auszeichnen. So ist es zum Beispiel den Anrainern des LME im Golf von Bengalen gelungen, gemeinsame Maßnahmen zur Bekämpfung der Überfischung und der Meeresverschmutzung zu verabschieden.

Nicht zuletzt spielen die Küsten der Welt auch in kultureller und ästhetischer Hinsicht eine besondere Rolle. Sie sind Orte der Erholung und bedeutende Reiseziele. Für viele Menschen und Kulturen haben sie bis heute nicht nur einen direkten Nutzen, sondern auch einen spirituellen Wert. Eine rein ökonomische Betrachtung der Küsten und ihrer Ökosystemleistungen, die sie für den Menschen erbringen, wird der tatsächlichen Bedeutung der Küsten daher nicht immer gerecht.

Glossar

Das Glossar erläutert Begriffe, die für das Verständnis der Texte besonders wichtig sind, aber in den einzelnen Kapiteln aus Platzgründen nicht ausführlich erläutert werden können.
Im Text sind Glossarbegriffe gefettet dargestellt.

Abrasion: das mechanische Abschleifen beziehungsweise Abtragen von Gesteinen in der Brandungszone. Zur Abrasion tragen verschiedene Mechanismen bei. Weiche Gesteine können allein durch den Wellenschlag abgeschliffen werden. Härtere Gesteine werden durch lockeres Material wie etwa Sand abgetragen, das mit der Brandung auf die Küste trifft. Ein weiterer Typ ist die Wetterabrasion, etwa das Auswaschen von Gesteinen durch Regen oder die Frostsprengung. Letztere bezeichnet das Phänomen, dass sich in Felsspalten eingedrungenes Wasser beim Gefrieren ausdehnt und damit Gesteine zum Abplatzen bringt.

amphibisch: Als amphibisch bezeichnet man Pflanzen- und Tierarten, die sowohl im Wasser als auch an Land leben können. Der Begriff leitet sich von griechisch *amphí* (beidseitig, zweifach) und *bios* (Leben) ab.

Ballastwasser: Wasser, das zum Stabilisieren von Schiffen in spezielle Ballastwassertanks im Rumpf gepumpt wird. Ballastwasser wird vor allem mit Handelsschiffen über große Distanzen transportiert. Darin enthaltene Organismen wie etwa Algen, Larven oder auch Bakterien können auf diese Weise leicht die Ozeane überwinden. Etablieren sie sich in einem neuen Lebensraum, können sie angestammte Arten verdrängen.

benthisch: Am Boden eines Gewässers lebende Organismen werden als benthisch bezeichnet.

Bestand: Ein Bestand ist eine sich selbst erhaltende Population einer Fischart, die in einer begrenzten Meeresregion vorkommt. In der Regel sind die verschiedenen Bestände einer Fischart so weit räumlich voneinander getrennt, dass sich die Individuen eines Bestands nicht mit denen eines anderen mischen, obgleich sie zur selben Art gehören.

Erdgeschichte: ein Forschungsgegenstand der Geologie. Sie umfasst den Zeitraum von der Entstehung der Erde bis zur geologischen Gegenwart.

Menschheitsgeschichte: die Zeitspanne, die vom Beginn der Entwicklung der Gattung *Homo* in Afrika bis in die Gegenwart reicht. Kenntnisse über die frühe Entwicklung liefert die Archäologie mit der Erforschung früher Überreste.

Nennleistung: die höchste Leistung, bei der eine mit Energie gespeiste Anlage auf Dauer betrieben werden kann, ohne dass die Anlage Schaden nimmt oder ihre Lebensdauer verkürzt wird. Bei Motoren oder Generatoren wird stets die Nennleistung angegeben. Im Alltag arbeiten technische Anlagen oftmals unterhalb der Nennleistung, nicht zuletzt, um sie zu schonen. Windradgeneratoren wiederum erreichen ihre Nennleistung in der Regel nur an sehr windigen Tagen.

Normalnull: Das Normalnull (NN) 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 Zuiderzee entsprach, einer Meeresbucht, die größtenteils auf dem Gebiet des heutigen IJsselmeeres lag.

parts per million (ppm): Der englische Ausdruck parts per million (ppm, Teile pro Million) bezeichnet ein Millionstel einer Substanz. 1 ppm einer Substanz entspricht damit einer Konzentration von 1:1 000 000 Teile.

Passat/Passatwinde: 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.

Porendruck: der Druck des Wassers, der zwischen den Partikeln des Sediments herrscht. Weil das Wasser nicht komprimierbar ist, erhöht sich der Porendruck, wenn sich frisches Sediment auf alten Sedimentschichten ablagert.

Schelfeis: sind große Eisplatten, die auf dem Meer schwimmen, aber noch mit dem Eis an Land verbunden sind. Schelfeis kann Hunderte Meter dick sein. Es entsteht unter anderem durch Gletscher, die sich vom Festland ins Meer hinausschieben.

Seltenerdmetalle: eine Gruppe von 17 Metallen, die im Periodensystem der chemischen Elemente nebeneinanderstehen und ähnliche Eigenschaften haben. Der ungewöhnliche Name rührt daher, dass diese Metalle früher aus Mineralien („Erden“) gewonnen wurden, die als sehr selten galten. Tatsächlich aber kommen viele der Seltenerdmetalle in der Erdkruste durchaus häufig vor. Größere Lagerstätten mit hohen Gehalten aber gibt es kaum. Die größten Vorkommen befinden sich in China in der Mongolei. Seltenerdmetalle werden in vielen Schlüsseltechnologien eingesetzt. So werden sie unter anderem für Dauermagnete in Magnetresonanztomografen (MRT) und in Generatoren von Windanlagen sowie für die Herstellung von Akkus, LEDs oder Plasmabildschirmen benötigt.

Abkürzungen

ABS Australian Bureau of Statistics; Australische Statistikbehörde

AMERB Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos; Management- und Nutzungsgebiete benthischer Ressourcen

AWZ Ausschließliche Wirtschaftszone

BOBLME Bay of Bengal Large Marine Ecosystem; großes Meeresökosystem im Golf von Bengalen

BEF Biodiversity and Ecosystem Functioning; Artenvielfalt und Funktionieren eines Ökosystems

CARIBE EWS Caribbean and Adjacent Regions Early Warning System; Tsunamifrühwarnsystem für die Karibik und benachbarte Regionen

Cosco China Ocean Shipping (Group) Company; chinesische Reederei

DART Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis; Tiefseeaufzeichnung und Meldung von Tsunamis

EU Europäische Union

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations; Welternährungsorganisation

GAO Government Accountability Office; US-amerikanischer Rechnungshof

GEF Global Environment Facility; globale Umweltfazilität, eine internationale Einrichtung zur Finanzierung von Umweltschutzprojekten

HSDRRS Hurricane and Storm Damage Risk Reduction System; System zur Verringerung des Hurrikan- und Sturmschadenrisikos für New Orleans

IMTA Integrated Multi-Trophic Aquaculture; Integrierte Multitrophische Aquakultur

ICZM Integrated Coastal Zone Management; Integriertes Küstenzonenmanagement (IKZM)

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change; Weltklimarat

ISA International Seabed Authority; Internationale Meeresbodenbehörde

IOC Intergovernmental Oceanographic Commission; Zwischenstaatliche Ozeanographische Kommission

IOTWS Indian Ocean Tsunami Warning System; Tsunamiwarnsystem für den Indischen Ozean

InaTEWS Indonesian Tsunami Early Warning System; indonesisches Tsunamifrühwarnsystem

IUCN International Union for Conservation of Nature and Natural Resources; Internationale Union zur Bewahrung der Natur und natürlicher Ressourcen

Jabodetabek Ballungsraum, der aus den indonesischen Städten Jakarta, Bogor, Depok, Tangerang und Bekasi gebildet wird

JMA Japan Meteorological Agency; Meteorologische Behörde Japans

LECZ Low Elevation Coastal Zone; niedrig gelegene Küstenzone

LME Large Marine Ecosystem; großes Meeresökosystem

LMMA Locally-Managed Marine Area Network; Netzwerk lokal verwalteter Meeresgebiete

MPA Marine Protected Area; Meeresschutzgebiet

NEAMTWS North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning and Mitigation System; ein Warn- und Schadensreduzierungssystem für den Nordostatlantik, das Mittelmeer und angrenzende Meere

NLWKN Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

OECD Organisation for Economic Co-operation and Development, Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Nachfolgeorganisation der Organisation für Europäische Wirtschaftliche Zusammenarbeit, OEEC)

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration; Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA

PTWC Pacific Tsunami Warning Center; Pazifisches Tsunamiwarnzentrum

PFCs Perfluorcarbone

PFOA Perfluorooctanoic acid; Perfluoroctansäure

PFOS Perfluoroctansulfonat

PBDE polybromierte Diphenylether

PCB polychlorierte Biphenyle

POPs persistent organic pollutants; persistente, organische Schadstoffe

ppm parts per million; Teile von einer Million, Millionstel

REACH Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals; Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe; EU-Chemikalienverordnung

RFMO Regional Fisheries Management Organisation; Regionale Organisation für das Fischereimanagement

SRÜ Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen

SMPAs Special Marine Protected Areas; spezielle Meeresschutz-gebiete in China

TURFs Territorial Use Rights in Fisheries; territoriale Nutzungsrechte in der Fischerei

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

UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur

UNHCR United Nations Human Rights Council; UN-Menschenrechtsrat

UNWTO United Nations World Tourism Organization; Weltorganisation für Tourismus

Quellenverzeichnis

Kapitel 1 – Die Dynamik der Küsten

Brown, S., R. J. Nicholls, C. D. Woodroffe, S. Hanson, J. Hinkel, A. S. Kebede, B. Neumann & A.T. Vafeidis, 2013. Sea-Level Rise Impacts and Responses: A Global Perspective. In: C. W. Finkl (Hrsg.). Coastal Hazards, Coastal Research Library, 6: 117–149. Springer.

Carlson, A. E. & K. Winsor, 2012. Northern Hemisphere ice-sheet responses to past climate warming. Nature Geoscience, 5: 607–613.

Crossland, C. J., D. Baird, J.-P. Ducrotoy & H. J. Lindeboom, 2005. The Coastal Zone – a Domain of Global Interactions. In: C. J. Crossland, H. H. Kremer, H. J. Lindeboom, J. I. Marshall Crossland & M. D. A. Le Tissier (Hrsg.), Coastal Fluxes in the Anthropocene. Springer.

Dürr, H. H., G. G. Laruelle, C. M. van Kempen, C. P. Slomp, M. Meybeck & H. Middelkoop, 2011. Worldwide Typology of Nearshore Coastal Systems: Defining the Estuarine Filter of River Inputs to the Oceans. Estuaries and Coasts, 34: 441–458.

Emeis, K.-C., J. van Beusekom, U. Callies, R. Ebinghaus, A. Kannen, G. Kraus, I. Kröncke, H. Lenhart, I. Lorkowski, V. Matthias, C. Möllmann, J. Pätsch, M. Scharfe, H. Thomas, R. Weisse & E. Zorita, 2014. The North Sea – A shelf sea in the Anthropocene. Journal of Marine Systems.

Flemming, B. W., 2011. Geology, Morphology, and Sedimentology of Estuaries and Coasts. In: E. Wolanski & E. D. S. McLusky (Hrsg.). Treatise on Estuarine and Coastal Science, 3: 7–38. Waltham, Academic Press.

Harff, J., G. Bailey & F. Lüth (Hrsg.), 2015. Geology and Archaeology: Submerged Landscapes of the Continental Shelf. Geological Society, London, Special Publications, 411.

Jensen, J. & K. Schwarzer, 2013. Kapitel 7 – Germany. In: E. Pranzini & A. Williams (Hrsg.). Coastal erosion and protection in Europe. Routledge.

Mensch – Landschaft – Meer: 75 Jahre Niedersächsisches Institut für historische Küstenforschung. Siedlungs- und Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet 2015. Niedersächsisches Institut für historische Küstenforschung (Hrsg.). Leidorf.

Neumann, B., A.T. Vafeidis, J. Zimmermann & R. J. Nicholls, 2015. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding – A Global Assessment. Plos One 10, 3: 1–34.

Tsukamoto, K., J. Aoyama & M. J. Miller, 2002. Migration, speciation, and the evolution of diadromy in anguillid eels. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences – NRC Research, 59: 1989–1998.

Whitehouse, H., F. Watkin Lui, J. Sellwood, M. J. Barrett & P. Chigeza, 2014. Sea Country: navigating Indigenous and colonial ontologies in Australian environmental education. Environmental Education Research, 20, 1: 56–69.

Kapitel 2 – Mit den Küsten leben

Callaway, R., G. H. Engelhard, J. Dann, J. Cotter & H. Rumohr, 2007. A century of North Sea epibenthos and trawling: comparison between 1902–1912, 1982–1985 and 2000. Marine Ecology Progress Series, 346: 27–43.

Carlos, M. D. & W. C. Dennison, R. J. W. Orth & T. J. B. Carruthers, 2008. The Charisma of Coastal Ecosystems: Addressing the Imbalance. Estuaries and Coasts, CERF 31: 233–238.

Climate Risks and Adaptation in Asian Coastal Megacities – a Synthesis Report, 2010. The World Bank.

Cloern, J. E., S. Q. Foster & A. E. Kleckner, 2014. Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems, Biogeosciences, 11: 2477–2501.

Elliott, M., N. D. Cutts & A. Trono, 2014. A typology of marine and estuarine hazards and risks as vectors of change: A review for vulnerable coasts and their management. Ocean & Coastal Management, 93: 88–99.

Evers, H. D. & A.-K. Hornidge, 2007. Knowledge hubs along the straits of Malacca. Asia Europe Journal, 3, 5: 417–433.

Ferse, S. C. A., M. Glaser, M. Neil & K. Schwerdtner Mánez, 2014. To cope or to sustain? Eroding long-term sustainability in an Indonesian coral reef fishery. Regional Environmental Change, 14: 2053–2065.

Glaser, M. & B. Glaeser, 2014. Towards a framework for cross-scale and multi-level analysis of coastal and marine social-ecological systems dynamics. Regional Environmental Change, 14: 2039–2052.

Humsa, T. Z. & R. K. Srivastava, 2015. Impact of Rare Earth Mining and Processing on Soil and Water Environment at Chavara, Kollam, Kerala: A case study. Procedia Earth and Planetary Science, 11: 566–581.

Kröncke, I., 2011. Changes in Dogger Bank macrofauna communities in the 20th century caused by fishing and climate. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 94: 234–245.

Neumann, H., R. Diekmann & I. Kröncke, 2016. Functional composition of epifauna in the south-eastern North Sea in relation to habitat characteristics and fishing effort. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 169.

Newton, A. & J. Weichselgartner, 2014: Hotspots of coastal vulnerability: A DPSIR analysis to find societal pathways and responses. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 140: 123–133.

Offshore Wind – Global Wind Report, 2015. Global Wind Energy Council.

Ostrom, E., 2007: A diagnostic approach for going beyond panaceas. PNAS, 104, 39: 15181–15187.

Ostrom, E., 2009: A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. Science, 325: 419–422.

Padawangi, R. & M. Douglass, 2015. Water, Water Everywhere: Toward Participatory Solutions to Chronic Urban Flooding in Jakarta. Pacific Affairs, 88, 3: 517–550.

Preview of Maritime Transport, 2015. United Nations Conference on Trade and Development.

Rijnsdorp, A. D., A. M. Buys, F. Storbeck & E. G. Visser, 1998. Micro-scale distribution of beam trawl effort in the southern North Sea between 1993 and 1996 in relation to the trawling frequency of the sea bed and the impact on benthic organisms. ICES Journal of Marine Science, 55: 403–419.

Rumohr, H. & T. Kujawski, 2000: The impact of trawl fishery on the epifauna of the southern North Sea. ICES Journal of Marine Science, 57: 1389–1394.

Schottenhammer, A., 2012. The "China Seas" in world history: A general outline of the role of Chinese and East Asian maritime space from its origins to c. 1800. Journal of Marine and Island Cultures, 1: 63–86

Sievanen, L., B. Crawford, R. Pollnac & C. Lowe, 2005. Weeding through assumptions of livelihood approaches in ICM: Seaweed farming in the Philippines and Indonesia. Ocean & Coastal Management, 48: 297–313.

Sinking Cities – an integrated approach towards solutions, 2013. Deltares – Taskforce Subsidence.

Teh, L. S. L., L. C. L. Teh & U. R. Sumaila, 2013. A Global Estimate of the Number of Coral Reef Fishers. Plos One, 8, 6.

The European offshore wind industry – key trends and statistics, 2015. European Wind Energy Association.

The European offshore wind industry – key trends and statistics 1st half 2016. Wind Europe.

The megacity state: The world's biggest cities shaping our future. Allianz Risk Pulse, 2015.

The State of World Fisheries and Aquaculture. Contributing to food security and nutrition for all, 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Tourism Highlights, 2016. World Tourism Organization.

Zope, P. E., T. I. Eldho & V. Jothiprakash, 2012. Effect of urbanization on the Mithi river basin in Mumbai: a case study. International SWAT Conference.

www.offshore-stiftung.de

Kapitel 3 – Bedrohung durch Klimawandel und Naturgefahren

Bäcklin, B.-M., C. Moraeus, K. Kauhala & M. Isomursu, 2013. Pregnancy rates of the marine mammals – Particular emphasis on Baltic grey and ringed seals. Core Indicator of Biodiversity Pregnancy rates of marine mammals. HELCOM.

Behrens, B., A. Androsov, A. Y. Babeyko, S. Harig, F. Klaschka & L. Mentrup, 2010. A new multi-sensor approach to simulation assisted tsunami early warning. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10: 1085–1100.

Behrens, J. & F. Dias, 2015. New computational methods in tsunami science. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 373.

Bernard, E. & V. Titov, 2015. Evolution of tsunami warning systems and products. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 373.

Buschbaum, C. & K. Reise, 2010. Neues Leben im Weltnaturerbe Wattenmeer. Biologie in unserer Zeit, 3, 40: 202–210.

Church, J. A., P. U. Clark, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. A. Merrifield, G. A. Milne, R. S. Nerem, P. D. Nunn, A. J. Payne, W. T. Pfeffer, D. Stammer & A. S. Unnikrishnan, 2013. In: T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (Hrsg.). Sea Level Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Dahlke, F. T., E. Leo, F. C. Mark, H.-O. Pörtner, U. Bickmeyer, S. Frickenhaus & D. Storch, 2016. Effects of ocean acidification increase embryonic sensitivity to thermal extremes in Atlantic cod, Gadus morhua. Global Change Biology.

Fernandes, J. A., E. Papathanasopoulou, C. Hattam, A. M. Queiros, W. W. W. L. Cheung, A. Yool, Y. Artioli, E. C. Pope, K. J. Flynn, G. Merino, P. Calosi, N. Beaumont, M. C. Austen, S. Widdicombe & M. Barange, 2017. Estimating the ecological,

economic and social impacts of ocean acidification and warming on UK fisheries. Fish and Fisheries, 18: 389–411.

Flynn, K. J., D. R. Clark, A. Mitra, H. Fabian, P. J. Hansen, P. M. Glibert, G. L. Wheeler, D. K. Stoecker, J. C. Blackford & C. Brownlee, 2015. Ocean acidification with (de)eutrophication will alter future phytoplankton growth and succession. Proceeding of the Royal Society B 282, 1804.

Hartmann, D. L., A. M. G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F. J. Dentener, E. J. Dlugokencky, D. R. Easterling, A. Kaplan, B. J. Soden, P. W. Thorne, M. Wild & P. M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (Hrsg.). Sea Level Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Heydebreck, F., J. Tang, Z. Xie & R. Ebinghaus, 2016. Emissions of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in a Textile Manufacturing Plant in China and Their Relevance for Workers' Exposure. Environmental Science & Technology, 50: 10386–10396.

Hinkel, J., D. Lincke, A.T. Vafeidis, M. Perrette, R. J. Nicholls, R. S. J. Tol, B. Marzeion, X. Fettweis, C. Ionescu & A. Levermann, 2014. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. PNAS 11, 9: 3292–3297.

Kroeker, K. J., R. L. Kordas, R. Crim, I. E. Hendriks, L. Ramajo, G. S. Singh, C. M. Duarte & J.-P. Gattuso, 2013: Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. Global Change Biology, 19: 1884–1896.

Lamarche, G., J. Mountjoy, S. Bull, T. Hubble, S. Krastel, E. Lane, A. Micallef, L. Moscardelli, C. Mueller, I. Pecher & S. Woelz (Hrsg.), 2016. Submarine Mass Movements and Their Consequences. 7th International Symposium, Springer.

Lennartz, S. T., A. Lehmann, J. Herrford, F. Malien, H.-P. Hansen, H. Biester & H. W. Bange, 2014. Long-term trends at the Boknis Eck time series station (Baltic Sea), 1957–2013: does climate change counteract the decline in eutrophication? Biogeosciences, 11: 6323–6339.

Li, W., T. M. Alves, M. Urlaub, A. Georgiopoulou, I. Klaucke, R. B. Wynn, F. Gross, M. Meyer, J. Repschläger, C. Berndt, S. Krastel, 2016. Morphology, age and sediment dynamics of the upper headwall of the Sahara Slide Complex, Northwest Africa: Evidence for a large Late Holocene failure. Marine Geology.

Meyer, J. & U. Riebesell, 2015. Reviews and Syntheses: Responses of coccolithophores to ocean acidification: a meta-analysis. Biogeosciences, 12: 1671–1682.

Müller, J. D., B. Schneider & G. Rehder, 2016: Long-term alkalinity trends in the Baltic Sea and their implications for CO_2-induced acidification. Limnology and Oceanography, 61, 6: 1984–2002.

Nagelkerken, I. & S. D. Connell, 2015. Global alteration of ocean ecosystem functioning due to increasing human CO_2 emissions. PNAS, 112, 43: 13272–13277.

Sandrini, G., Xing Ji, J. M. H. Verspagen, R. P. Tann, P. C. Slot, V. M. Luimstra, J. Merijn Schuurmans, H. C. P. Matthijs & J. Huisman, 2016. Rapid adaptation of harmful cyanobacteria to rising CO_2. PNAS, 113, 33: 9315–9320.

Shuto, N. & K. Fujima, 2009. A short history of tsunami research and countermeasures in Japan. Proceedings of the Japan Academy B, 85: 267–275.

Sloterdijk, H., P. Brehmer, O. Sadio, H. Müller, J. Döring & W. Ekau, 2017. Composition and structure of the larval fish community related to environmental parameters in a tropical estuary impacted by climate change. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 197: 10–26.

Sunday, J. M., P. Calosi, S. Dupont, P. L. Munday, J. H. Stillman & T. B. H. Reusch, 2014. Evolution in an acidifying ocean. Trends in Ecology & Evolution, February 2014, 29, 2: 117–125.

Tappin, D. R., P. Watts & S. T. Grilli, 2008. The Papua New Guinea tsunami of 17 July 1998: anatomy of a catastrophic event. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8: 243–266.

UNISDR Global Assessment Report 2015 – GAR15. Tsunami methodology and result overview. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Where the First Wave Arrives in Minutes. Indonesian Lessons on Surviving Tsunamis near Their Sources, 2010. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Intergovernmental Oceanographic Commission.

Witte, S., C. Buschbaum, J. E. E. van Beusekom, K. Reise, 2010: Does climatic warming explain why an introduced barnacle finally takes over after a lag of more than 50 years? Biological Invasions, 12: 3579–3589.

Wong, P. P., I. J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K. L. McInnes, Y. Saito & A. Sallenger, 2014: Coastal systems and low-lying areas. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea & L. L. White (Hrsg.). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

World Population Prospects. The 2015 Revision. Key Findings and Advance Tables, 2015. United Nations.

Kapitel 4 – Küsten besser schützen

Arns, A., S. Dangendorf, J. Jensen, S. Talke, J. Bender & C. Pattiaratchi, 2017. Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. Nature, Scientific Reports.

Brown, S., R. J. Nicholls, C. D. Woodroffe, S. Hanson, J. Hinkel, A. S. Kebede, B. Neumann & A.T. Vafeidis, 2013. Sea-Level Rise Impacts and Responses: A Global Perspective. In: C. W. Finkl (Hrsg.). Coastal Hazards, Coastal Research Library, 6: 117–149. Springer.

Burbridge, P., B. Glavovic & S. Olsen, 2011. Practitioner Reflections on Integrated Coastal Management Experience in Europe, South Africa, and Ecuador. Treatise on Estuarine and Coastal Science: 131–158.

David, C. G., N. Schulz & T. Schlurmann, in press. Assessing the Application Potential of Selected Ecosystem-based, Low-regret Coastal Protection Measures. In: F. G. Renaud, K. Sudmeier-Rieux, M. Estrella & U. Nehren (Hrsg.). Ecosystem-based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice. Springer.

Garbe, C., U. Pröbstl, M. Meyer & B. Räth, 2005. Natura 2000 und nachhaltiger Tourismus in sensiblen Gebieten Empfehlungen zum Management des Tourismus in Natura 2000-Gebieten im Sinne einer nachhaltigen Tourismusentwicklung. Bundesamt für Naturschutz.

Glavovic, B. C., K. Limburg, K.-K. Liu, K.-C. Emeis, H. Thomas, H. Kremer, B. Avril, J. Zhang, M. R. Mulholland, M. Glaser & D. P. Swaney, 2015. Living on the Margin in the Anthropocene: engagement arenas for sustainability research and action at the ocean–land interface. Current Opinion in Environmental Sustainability, 14: 1–7.

Haasnoot, M., J. H. Kwakkel, W. E. Walker & J. ter Maat, 2013. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. Global Environmental Change, 23: 485–498.

Hinkel, J., D. Lincke, A.T. Vafeidis, M. Perrette, R. J. Nicholls, R. S. J. Tol, B. Marzeion, X. Fettweis, C. Ionescu & A. Levermann, 2014. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. PNAS 11, 9: 3292–3297.

Hofstede, J., 2004. Timmendorfer Strand und Scharbeutz: zwei Ostseegemeinden schützen sich vor Klimaänderungen. In: G. Gönnert, H. Grassl, D. Kelletat, H. Kunz, B. Probst, H. von Storch & J. Sündermann (Hrsg.). Klimaänderung und Küstenschutz. Proceedings, Universität Hamburg.

Hofstede, J., 2014. Management von Küstenrisiken in Schleswig-Holstein. Geographische Rundschau, 3: 14–21.

Klepp, S. & J. Herbeck, 2016. The politics of environmental migration and climate justice in the Pacific region. Journal of Human Rights and the Environment, 7, 1: 54–73.

Louisiana's Comprehensive Master Plan for a Sustainable Coast, 2017. Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana.

Marencic, H. (Hrsg.), 2009. The Wadden Sea – Protection and Management. Quality Status Report 2009, Thematic Report No. 1. Wadden Sea Ecosystem, 25. Common Wadden Sea Secretariat.

Mee, L., 2012. Between the Devil and the Deep Blue Sea: The coastal zone in an Era of globalisation. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 96: 1–8.

Mit uns für das Watt! Ehrenamtliche und der Schutz des Wattenmeers, 2015. Tagungsband. Nationalparkverwaltung, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein.

Möller, I., M. Kudella, F. Rupprecht, T. Spencer, M. Paul, B. K. van Wesenbeeck, G. Wolters, K. Jensen, T. J. Bouma, M. Miranda-Lange & S. Schimmels, 2014. Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. Nature Geoscience, 7: 727–731.

Narayan, S., M. W. Beck, B. G. Reguero, I. J. Losada, B. van Wesenbeeck, N. Pontee, J. N. Sanchirico, J. C. Ingram, G.-M. Lange, K. A. Burks-Copes, 2016. The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature-Based Defences. Plos One, 11, 5.

Paul, M., T. J. Bouma & C. L. Amos. Wave attenuation by submerged vegetation: combining the effect of organism traits and tidal current. Marine Ecology Progress Series, 444: 31–41.

Paul, M. & C. L. Amos, 2011. Spatial and seasonal variation in wave attenuation over Zostera noltii. Journal of Geophysical Research, 116.

Paul, M. & L. G. Gillis, 2015. Let it flow: how does an underlying current affect wave propagation over a natural seagrass meadow? Marine Ecology Progress Series, 523: 57–70.

Pittman, J. & D. Armitage, 2016. Governance across the land-sea interface: A systematic review. Environmental Science & Policy, 64: 9–17.

Ranger, N., T. Reeder & J. Lowe, 2013. Addressing "deep" uncertainty over long-term climate in major infrastructure projects: four innovations of the Thames Estuary 2100 Project. Euro Journal on Decision Processes, 1: 233–262.

Results and achievements of the BOBLME Project, 2016. www.boblme.org

Richter, A., A. Groh & R. Dietrich, 2012. Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 53–54: 43–53.

Sievanen, L., B. Crawford, R. Pollnac & C. Lowe, 2005. Weeding through assumptions of livelihood approaches in ICM: Seaweed farming in the Philippines and Indonesia. Ocean & Coastal Management, 48: 297–313.

Temmerman, S., P. Meire, T. J. Bouma, P. M. J. Herman, T. Ysebaert & H. J. De Vriend, 2013. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. Nature, 504: 79–83

Temmermann, S. & M. L. Kirwan, 2015. Building land with a rising sea. Cost-efficient nature-based solutions can help to sustain coastal societies. Nature, 349, 6248: 588–589.

Thames Estuary 2100 – managing flood risk through London and the Thames estuary, 2012. Environment Agency. www.environment-agency.gov.uk

Wolff, M., 2015. From sea sharing to sea sparing – Is there a paradigm shift in ocean management? Ocean & Coastal Management, 116: 58–63.

Whole of Island Approach, Abaiang Atoll, Kiribati. Integrated Vulnerability and Adaptation Assessment – Synthesis report, 2016. The Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme, Secretariat of the Pacific Community, Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.

Abbildungsverzeichnis

Umschlagabbildung: WIN-Initiative/Getty Images; S. 2: neal/fotolia.com; S. 9 v.o.n.u.: mauritius images/imageBROKER/Holger Weitzel, mauritius images/Image Source/Corey Jenkins, Lohuizen/Noor/laif, Maria Feck/laif, neal/fotolia.com; S. 10/11: mauritius images/imageBroker/Holger Weitzel; Abb. 1.1: Arnaud Spani/hemis.fr/Fotofinder.com; Abb. 1.2: Alfred-Wegener-Institut; Abb. 1.3: maribus; Abb. 1.4: maribus; Abb. 1.5: maribus; Abb. 1.6: Aurora/Getty Images; Abb. 1.7: nach Tsukamoto et al.; Abb. 1.8: D. Fleetham/SeaTops.com; Abb. 1.9: maribus; Abb. 1.10: maribus; Abb. 1.11: maribus; Abb. 1.12: Science Photo Library/akg-images; Abb. 1.13: nach McNulty at al.; Abb. 1.14: Daniel Nösler/Landkreis Stade; Abb. 1.15: Richard Taylor/4Corners/Schapowalow/Mato; Abb. 1.16: Nordic Photos/lookphotos; Abb. 1.17: marziafra/fotolia.com; Abb. 1.18: maribus; Abb. 1.19: Image provided by the USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch. This image is part of the ongoing Landsat Earth as Art series/NASA; Abb. 1.20: nach Inman et al.; Abb. 1.21: Thomas Opel/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 1.22: Bernie Pettersen/SWNS.com/action press; Abb. 1.23: Flemming; Abb. 1.24: Flemming; Abb. 1.25: Thomas Ebert/laif; Abb. 1.26: maribus; Abb. 1.27: mauritius images/imageBroker/Flavia Raddavero; Abb. 1.28: Dürr et al.; Abb. 1.29: Milliman et al.; Abb. 1.30: Science Photo Library/Martyn F. Chillmaid; S. 42/43: mauritius images/Image Source/Corey Jenkins; Abb. 2.1: Public Domain; Abb. 2.2: Dörrbecker; Abb. 2.3: ug/fotolia.com; Abb. 2.4: maribus; Abb. 2.5: Interfoto/National Maritime Museum, London; Abb. 2.6: https://en.wikipedia.org/wiki/Battle_of_Gibraltar_(1607)#/media/File:Battle_of_Gibraltar_1607.jpg (Stand: 02.2017); Abb. 2.7: Interfoto/Mary Evans; Abb. 2.8: ullstein bild – The Estate of Emil Bieber/Klaus Niermann; Abb. 2.9: Watson & Sons, London; Abb. 2.10: maribus; Abb. 2.11: Timothy Laman/Getty Images; Abb. 2.12: nach FAO; Abb. 2.13: Yann Arthus-Bertrand/Getty Images; Abb. 2.14: Global Wind Energy Council (GWEC); Abb. 2.15: European Wind Energy Association (EWEA); Abb. 2.16: Veronique de Viguerie/Getty Images; Abb. 2.17: NYONair/Jumana El Heloueh; Abb. 2.18: Neumann et al.; Abb. 2.19: nach Hornidge et al.; Abb. 2.20: maribus; Abb. 2.21: Olaf Schülke/Süddeutsche Zeitung Photo; Abb. 2.22: UNCTAD; Abb. 2.23: UNCTAD; Abb. 2.24: Lincoln Fowler/Photographers Direct.Com; Abb. 2.25: Pietro Canali/SIME/Schapowalow/Mato; Abb. 2.26: UNWTO; Abb. 2.27: Robert Harding Productions/robertharding/laif; Abb. 2.28: UN; Abb. 2.29: Deltares; Abb. 2.30: Deltares; Abb. 2.31: Reuters/Damir Sagolj; Abb. 2.32: Didier Marti/Getty Images; Abb. 2.33: Image: Consortium NCICD/Design: KuiperCompagnons; Abb. 2.34: Stanley Greene/Noor; Abb. 2.35: [M] mare, Fotos: NASA image created by Jesse Allen Landsat 3 MSS data provided by the University of Maryland's Global Land Cover Facility. Landsat 7 ETM+ data provided courtesy of the Landsat Project Science Office, NASA/GSFC; Abb. 2.36: efishalbum.com; Abb. 2.37: picture alliance/AP Images/Apichart Weerawong; Abb. 2.38: Teh et al.; Abb. 2.39: maribus; Abb. 2.40: Loh Kok Sheng; Abb. 2.41: H. Hall/SeaTops.com; Abb. 2.42: Summerhill Books; Abb. 2.43: maribus; Abb. 2.44: Alf Norkko/Publication: A. Norkko, A. Villnäs, J. Norkko, S. Valanko, C. Pilditch. 2013. Size matters: implications of the loss of large individuals for ecosystem function. Scientific Reports 3: 2646. DOI 10.1038/srep02646; Abb. 2.45: © W. Eugene Smith/Magnum Photos/Agentur Focus; Abb. 2.46: Reuters/Ricardo Moraes; Abb. 2.47: Photo by India Today Group; Abb. 2.48: Plastics Europe; Abb. 2.49: OK Divers, Padangbai, Bali; S. 98/99: Lohuizen/Noor/laif; Abb. 3.1: Alan Duncan; Abb. 3.2: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Abb. 3.3: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Abb. 3.4: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Abb. 3.5: nach Magnan et al.; Abb. 3.6: Maike Nicolai, Geomar; Abb. 3.7: Lennartz et al.; Abb. 3.8: Kyodo News/action press; Abb. 3.9: Reinhard Dirscherl/ocean-photo.de; Abb. 3.10: maribus; Abb. 3.11: Science Photo Library/akg-images; Abb. 3.12: Flemming Dahlke/Alfred-Wegener-Institut; Abb. 3.13: Frank Hecker/Alamy Stock Foto; Abb. 3.14: Markus Geisen; Abb. 3.15: National Snow & Ice Data Center (NSIDC); Abb. 3.16: The Asahi Shimbun/Getty Images; Abb. 3.17: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Abb. 3.18: nach Richter et al.; Abb. 3.19: North Wind Picture Archives/akg-images; Abb. 3.20: maribus; Abb. 3.21: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); Abb. 3.22: maribus; Abb. 3.23: PTM Arakaki Collection, Cecilio Licos Photographer; Abb. 3.24: plainpicture/Magnum, the plainpicture edit/Steve McCurry; Abb. 3.25: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); Abb. 3.26 l.: Sasse/laif; Abb. 3.26 r.: Chaideer Mahyuddin/AFP; Abb. 3.27: Deutsches Geoforschungszentrum (GFZ); 3.28: nach Bondevik et al.; Abb. 3.29: NASA image created by Jesse Allen, using EO-1 ALI data provided courtesy of the NASA EO-1 Team; Abb. 3.30: maribus; Abb. 3.31: maribus; Abb. 3.32: maribus; Abb. 3.33: David Guillemet/davidphotosub.com; S. 140/141: Maria Feck/laif; Abb. 4.1: nach GRID-Arendal; Abb. 4.2: Harald Woeste/www.imagerover.com; Abb. 4.3: Kaiser/laif; Abb. 4.4: nach Meiner; Abb. 4.5: nach GESAMP; Abb. 4.6: Stacy Jupiter; Abb. 4.7: ZB, Planbureau en Bibliotheek van Zeeland/Beeldbank Zeeland/C. Kotvis; Abb. 4.8: ARCO/K. Wernicke; Abb. 4.9: nach Gemeinsames Wattenmeersekretariat (CWSS), 2004; Abb. 4.10: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); Abb. 4.11: https://archive.org/details/illustrationsdez00lesso (Stand: 08.2017); Abb. 4.12: Fernando Moleres/laif; Abb. 4.13: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Seaweed_farm_uroa_zanzibar.jpg (Stand: 08.2017); Abb. 4.14: Vlad Sokhin/laif; Abb. 4.15: Synthesis report, 2016. The Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme, Secretariat of the Pacific Community, Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit; Abb. 4.16: Archive of the Regional Public Water Authority Amstel, Gooi and Vecht, Amsterdam; Abb. 4.17: LKN-SH; Abb. 4.18: Swart/Hollandse Hoogte/laif; Abb. 4.19: mauritius images/Frans Lemmens/Alamy; Abb. 4.20: Yves Adams/vildaphoto; Abb. 4.21: Patrick M. Quigley/www.gulfcoastalairphoto.com/Coastal Protection and Restoration Authority; Abb. 4.22: nach Temmermann; Abb. 4.23: Dr. Iris Möller, Cambridge Coastal Research Unit, Department of Geography, University of Cambridge; Abb. 4.24: Helmut Corneli/imageBroker/vario images; Abb. 4.25: maribus; Abb. 4.26: Cowes Harbour Commission; Abb. 4.27: Luuk Kramer; Abb. 4.28: 350.org; S. 182: neal/fotolia.com

Index

Gefettete Seitenzahlen verweisen auf diejenigen Textstellen, die für das Verständnis besonders wichtig sind.

12-Seemeilen-Zone 143
200-Seemeilen-Zone 143

A
Aal 17
Abrasion 39
Accra 89 f.
Aceh 66
Acipenser sinensis 81
adaptive bleaching (adaptive Bleiche) 108
Adaptive Pathways Design (angepasste Entwicklungs- und Auslegungsplanung) 165 ff.
Afrika 17 ff., 50, 89
Afrikanische Platte 131
Agassizsee 20, 27
Ägypten 51
Alaska 32
Albedo 21
Aleuten 125
Alexander VI. 47
Algen 105, 160
Algenblüte 54, 88
Algenrasen 40
Algerien 131 ff.
Alkalinität **113**
Alpen 14
Amalfi 46
Amalfiküste 70
Ammoniak 55
Ammonifikation 55
Ammonium 54 ff.
Ammonium-Ionen **55**
Amphibien 18
amphibische Häuser 166
Amsterdam 164
Anchovis 135, 138
Anguilla anguilla 17
Anguilla japonica 17
Anguilla rostrata 17
Antarktis 20, 39, 118
anthropogener Treibhauseffekt 100
Apenninen-Halbinsel 45
Apulischer Sporn 131
Aquakultur 57, 89
Aquifer 73
Arabische Halbinsel 17
Arafurasee 22
Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB, Management- und Nutzungsgebiete benthischer Ressourcen) 158
Arktis 20, 39
Armada 48 f.
Ärmelkanal 49
Artenvielfalt 109 ff.
Arthropoden 18
Artverschiebungen 110 f.
Asien 22
Asthenosphäre 14
Atmosphäre 100 ff., 136
Aufspülungen 61 ff.
Augusta Victoria 51
Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ) 143 ff.
Austernbänke 172 ff.
Australien 17 ff., 61 ff., 96, 126, 179
Austrominius modestus 112
Ayutthaya 75
Azoren 47

B
Bagdad 46
Balanus crenatus 112
Balearen 132
Bali 172
Ballin, Albert 51
Ballastwasser 111
Banc d'Arguin 143
Banda Aceh 128
Bandasee 23
Bangkok 75
Bangladesch 34, 64, 121, 157, 180
Barentssee 110
Basalt 33
Baumkurrenfischerei 86
Bay of Bengal Large Marine Ecosystem (BOBLME) 157 ff.
Bekasi 77
Belgien 47, 86
Belize 31
Bento Rodrigues 93
Beringstraße 22
Bevölkerungswachstum 102 ff.
Beyoğlu 12
Biodiversity and Ecosystem Functioning (BEF) 88
Bioerosion 40
Bioinvasion 112
Biopolis-Programm 67
Black-Band-Krankheit, (Black Band Disease, BBD) 109
Blasentang 105
Blaualgen 52 ff.
Bogor 77
Boje 128
Bonga 111
Borneo 23, 56
Bornholm 24
Brahmaputra 36, 52
Brandung 31 f.
Brasilien 48, 93
Breitbandseismometer 130
Brighton 50 f.
Britische Ostindien-Kompanie 67
Brügge 47
Buchtenküste 31
Buhnen 173
Building with Nature **170 ff.**
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 144
Bundeswasserstraße 144
Burmaplatte 128
Burton, Robert 51

C
Cancún 72
Cape Cod 35
Cardiff 40
Caribbean and Adjacent Regions Early Warning System (CARIBE EWS, ein Frühwarnsystem für die Karibik und benachbarte Regionen) 129
Carrageen 160
Çatalhöyük 44
Chesapeake Bay 88
Chile 52, 126 ff., 158
China 38, 44 ff., 71 ff., 121, 146 ff.
Chlorophyll 106
Chlorverbindungen 72
Cholera 90
Coccolithophoriden 52, 114 f.
Columbia River 37
Commission on the Limits of the Continental Shelf (CLCS (Festlandsockelkommission) 144
Concholepas concholepas 158
Cornwall 33
Cosco 67
Cowes 177
Cuxhaven 51
Cyanobakterien 52 ff., 106

D
Dalmatien 47
Damaskus 46
Dänemark 24, 92, 110 ff., 146 ff.
DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis, Tiefseeaufzeichnung und Meldung von Tsunamis) 126 ff.
Indonesian Tsunami Early Warning System (InaTEWS, indonesisches Tsunamifrühwarnsystem) 129
Dechloran Plus 90
Deichgraf 145
Deichverbände 144
Delta **36**
– flussdominiert 36
– tidedominiert 36
– wellendominiert 36
Denitrifikation **54 f.**
Depok 77
Deutschland 24 ff., 60, 86, 146 ff.
Dhaka 12
Diamanten 63
Diatomeen 52
Dichtedifferenz 101
Diolkos 45
Doggerbank 25, 87 f.
Doggerland 24 f.
Dover 33, 114
Drake, Francis 48
Dreckiges Dutzend 90
Drucksensoren 128
Dubai 64
Dynamitfischerei 85, 148

E
Echolot-Technik 22
Eckernförder Bucht 27, 105 f.
Ecuador 126 ff.
Eis-Albedo-Rückkopplung 21
Eiszeiten 19 ff.
Eiweiß 57
Ekofisk-Ölfeld 59
Elbe 25, 36, 144 ff., 172
Elisabeth I. 48 f.
El Niño 118 f., **122 ff.**
El Niño Modoki 137 f.
El Niño/Südliche Oszillation (ENSO) 137
Emiliania huxleyi 115
Ems 144
England 33, 48, 167 f.
Erdanziehung 119
Erdbeben 122 ff.
Erdbebenstärke 126
Erderwärmung 102 ff.
Erdgeschichte **14 ff.**
Erdoberflächentemperatur 102 ff.
Erwärmung der Ozeane 100 ff.
Erzschlamm 93
Espírito Santo 93
Estland 47
Eurasische Platte 15 ff., 131
Europa 92
Europäischer Aal 17
eustatisch 116
Eutrophierung 54, 88 f., 108 ff.
Evolution 17
Existenzwert 52
Exzentrizität 21

F
FAO (Food and Agriculture Organization, Welternährungsorganisation) 57, 83, 147 f.
Feederschiffe 68
Felsbrockenküsten 34
Felsenküste 31 ff.
Festlandsockel 143 ff.
Festlandsockelkommission 144
Feuchtgebiete 100, 170
Feuerring 122 f.
Fidschi 149, 154, 179 f.
Fischbestand 83
Fischeier 110 f.
Fischlarven 110 f.
Fischnachwuchs 110 ff.
Fjord 31 ff.
Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie 154
Florida 35, 121
Fluke 18
Fly 93
Fogo 133 f.
fossile Energieträger 102 ff.
Fraktal 29
Frankreich 71, 131
Frühwarnsystem **122 ff.**
Fukushima 127

G
Ganges 36 ff., 52
Garuda 77
Gelber Fluss 38
gelöster anorganischer Kohlenstoff (DIC = dissolved inorganic carbon) 114
Genua 46
George Town 67
Gezeitenenergie 60
Ghana 59
Gibraltar 49, 122
glaziale Rundhöckerlandschaft 27
Gletscher 19–21
Gliederfüßer 18
Globale Partnerschaft für effektive Entwicklungszusammenarbeit (Global Partnership for Effective Development Cooperation) 161
Globale Umweltfazilität (Global Environment Facility, GEF) 157
globaler Energiebedarf 102 ff.
globaler Meeresspiegel 118 ff.
Gneis 27
Gold 63
Goldenes Horn 12
Golfstrom 25
Golf von Bengalen 34, 52, 157
Golf von Bohai 88
Golf von Korinth 45
Golf von Mexiko 48 ff., 78, 121 ff.
Golf von Salerno 46
Göllü Dağ 44
Gondwana 15 ff.
GPS-Sensor 130
Granit 27
Granitfelsen 33
Great Barrier Reef 96
Griechenland 96, 131
Grönland 20, 116 ff.
Großbritannien 24, 59, 67, 111
Großes Flussdelta 31
Großkontinent 14
Grundwasser 73 ff.
Grundwasserentnahme 73
Grundwasserleiter 73
Guangdong 81
Guangzhou 44

H
Hadley, George 136
Hadley-Zirkulation **136 f.**
Haff 36
Hainan 89
Half Moon Bay 31
Halong-Bucht 37
Hamburg 51 ff., 128, 144 f., 172
Handelsbündnis 47
Hangrutschungen **122 ff.**
Hanse 47
Happisburgh 38
Harmful Algal Blooms (HABs, schädliche Algenblüten) 106
Hauptdeichverbände 144
Hawaii 61, 121 ff.
Headlands 31
Heiligendamm 51
heiße Quellen 63
Herzmuschel 111
Himalaja 14 f., 54
Hochseefischerei 58
Hochwasserschutzsysteme 168
Hohe See 144
Holothuria nobilis 85
Holothuria scabra 84
Homo ercetus 22
Homo ergaster 22
Homo sapiens 22
Honduras 31
Hongkong 54 ff., 81 ff.
Honolulu 126
Hopperbagger 64
Houston 121
Humber 151
Hunchun 67
Hurricane and Storm Damage Risk Reduction System (HSDRRS, System zur Verringerung des Hurrikan- und Sturmschadenrisikos) 79
Hurrikan 78 f., 121
Hydrogenkarbonat 113 f.

I
Iara-Ölfeld 59
Ilmenit 93
Indian Ocean Tsunami Warning System (IOTWS, ein Warnsystem für den Indischen Ozean) 129
Indien 17, 34, 46, 64, 66, 83, 92, 121, 126, 157
Indisch-Australische Platte 128
Indischer Ozean 66, 130
Indonesian Tsunami Early Warning System (InaTEWS, indonesisches Tsunamifrühwarnsystem) 129
Indonesien 22, 57 ff., 76 ff., 108 ff., 122 ff., 154 ff., 172 ff.
Infrastrukturschäden 76 ff.
Integrated Coastal Zone Management (ICZM, Integriertes Küstenzonenmanagement) **148 ff.**
Integrated Vulnerability Assessments (Integrierte Vulnerabilitätsanalysen) 162
Integrierte Multitrophische Aquakultur (Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA) 58
Integriertes Küstenzonenmanagement (IKZM) **146 ff.**
Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC, Zwischenstaatliche Ozeanographische Kommission) 126 ff.
Internationale Meeresbodenbehörde (International Seabed Authority, ISA) 144
International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN, Internationale Union zur Bewahrung der Natur und natürlicher Ressourcen) 151
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen, Weltklimarat) **100 ff.**, 164
Irak 44
Iran 46
Ischia 50
Isfahan 46
Island 16
isostatisch 116
Israel 96
Istanbul 12, 46, 132
Isthmus von Korinth 44
Italien 131

J

Jabodetabek **77**
Jahrhundertfluten 121
Jakarta 76
Jakobsmuscheln 111
Japan 90, 107, 122 ff.
Japanischer Aal 17
Japan Meteorological Agency (JMA, Meteorologische Behörde Japans) 125
Java 23, 66, 128
Johor 66
Jubilee-Ölfeld 59
Jungferninseln 121

K

Kabeljau 110 f.
Kairo 46
Kalifornien 52 ff.
Kalk 113
Kalkalgen 114
Kalkflagellaten 52
Kalkpanzer 115
Kalkstein 37
Kalkutta 12
Kalzium-Ionen 114
Kalziumkarbonat 114
Kambodscha 82 f.
Kanada 20, 32
Kaperei **48**
Kapverden 133 f.
Karbonat 113
Karbonat-Anionen 114
Karibik 122
Karstlandschaft 37
Karthago 45 f.
Katastrophenvorsorge 78, 122 ff.
Katrina 79, 121
Kattegat 24, 110
Katwijk aan Zee 178
Kenichthys 18
Kerala 93 f.
Ketsana 77
Kieler Bucht 176
Kieler Förde 27
Kies 61 ff.
Kieselalgen 52 f.
Kiesküsten 34
Kiribati 162 f., 179
Kleinfischerei 83
Klimaanomalie 122
Klimasystem 100 ff.
Klimaträgheit 100
Klimawandel 73 ff., 100 ff., 163, 164 ff.
Knochenfisch 18
Knöllchenbakterien 55
Koh Kong 83
Kohlendioxidemissionen 100 ff.
Kohlensäure 114
Kohlenstoff-Konzentrationsmechanismus (Carbon Concentrating Mechanism, CCM) 116
Kohlenstoffverbindung 32
Kolumbien 35, 126
Kolumbus, Christoph 47
Kompaktion 40
Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung (United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD) 65
Königlich Niederländische Akademie der Wissenschaften 151
Konstantinopel 46
Kontinentalplatten 124
Kontinentalschelf 106
Kontinentalverschiebung **14 ff.**
Ko Phangan 101
Korallen 40, 89
Korallenbleiche 106 ff.
Koralleninseln 84
Korallenriffe 20, 83, 96 ff., 174 ff.
Kreidefelsen 33, 114
Kreuzfahrt 51
Krim 47
Kroatien 47
Kupferrückstände 93
Küsten
– an schnell fließenden Flüssen 37
– arheische 37
– Aufbauvorgänge 40
– energiearme 31 f.
– energiereiche 31 f.
– Filterfunktion 34 ff.
– Fischerei 58, 83
– karstdominiert 37
– Kategorien 31 f.
– Klärwerksfunktion 54
– Länge 28 ff.
– Management 146 ff.
– Schutzfunktion 56 ff.
– Tourismus 95 f.
– Übernutzung 72 ff.
– Urlaubsziel 50 ff.
– Zerstörungsvorgänge 39 f.
Küstenschutz **164 ff.**
– adaptiv 167 ff.
– klassisch 173 ff.
– konventionell 165 ff.
– ökosystembasiert 172 ff.

L

Lagune 36
Lampuuk 129
Landabsenkung 73 ff.
Landbrücke 22
Landelijke Vereniging tot Behoud van de Waddenzee (Verein zum Schutz des Wattenmeeres) 151
Landgang 18
Landwirbeltier 18
Landzunge 31
La Niña 137
Laos 82
Laptewsee 31
La-Rance-Gezeitenkraftwerk 61
Large Marine Ecosystems (LMEs) 156 f.
Latium 46
Lauge 113
Laurasia 15
Lava 40
Lena 31
Lissabon 48 ff., 122
Lithosphäre 14
Locally-Managed Marine Area Network (LMMA, Netzwerk lokal verwalteter Meeresgebiete) 148 ff.
Locos 158 ff.
Lofoten 110
Loire 71
lokaler Meeresspiegel 118 f.
Lolland 60
London 167 f.
London Array 60
Louisiana 78, 121, 171 f.
Low Elevation Coastal Zone (LECZ, niedrig gelegene Küstenzone) 64 f.
Luanda 64
Luftdruckunterschiede 136

M

Maasbommel 166
Maasvlakte 2 65
Macau 81
Madeira 47
Madras 64
Maeslant-Sperrwerk 169
Magma 14, 40
Makroplastik 94
Malaiische Halbinsel 66
Malakka **66**
Malaysia 66, 157
Malediven 157
Malta 51
Malta-Archipel 23
Malta-Ragusa-Plattform 23
Mandelbrot, Benoît 29
Mangroven 34 ff., 56 f., 89, 174 ff.
Manila 77 f.
Mariana 93
marine Wärmepumpe 25
Marokko 62, 122
Masjid Rahmatullah 129
Massachusetts 35
Massentourismus 72
Massivsulfide 63
Mauretanien 31, 52, 133, 143
Mauritania Slide Complex 133
Mauritius 49
Medan 67
Meereserwärmung 100 ff.
Meeresschutzgebiete (Marine Protected Areas, MPAs) 148
Meeresspiegel 19 ff., 129
Meeresspiegelanstieg 73 ff., 100 ff., 164 ff.
Meeresversauerung 100 ff.
Megacitys 73 ff.
Mekong 82
Melancholie 51
Menschheitsgeschichte 27
Mesoplastik 94
Mesopotamien 44
Messina 131
Miesmuscheln 111
Migration with Dignity 179 f.
Mikrofossilien 21
Mikroplastik 94
Milanković-Zyklen 21
Minamata 90 f.
Mineralien 61 ff.
Mineralseifen 63
Mississippi 40, 78, 121, 171
Mithi 78
Mittelatlantischer Rücken 15–17
Mittelmeer 45 f., 96, 111
Mobile 121
Momenten-Magnituden-Skala 126
Montenegro 47
Mumbai 12, 77 f.
Mündungstrichter 36
Muostach 32
Muschelbänke 87
Muscheln 54
Myanmar 82, 157

N

Nährstoffe 51 ff., 88 f.
Namibia 28, 44 ff.
Nansen, Fridtjof 180
Nansen-Initiative 180
National Data Buoy Center (NDBC, Nationales Zentrum für Bojendaten) 126
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA) 126, 157
Nationalpark Wattenmeer 151 ff.
Naturschutzbehörden 145
Nautilus Minerals 63
Neolithische Revolution 27
Neophyten 112
Neozoen 112
Neue Welt 47
Neufundland 48
Neuguinea 22, 69
Neuseeland 33, 179
New Orleans 78 f., 171
New York 121
Nicht-Nutzungswert 52
Niederlande 24, 49 ff., 86, 146 ff., 164 ff.
Niederländische Ostindien-Kompanie 50
Niedersachsen 144 f.
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) 144
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz 144
Nigeria 64
Nitrat-Ionen 54 f.
Nitrifikation **55**
Nitrit-Ionen 55
Nitrosomonas 55
Nizza 135
Nordafrika 45 f.
Nordamerika 20, 31
Nordamerikanische Platte 16
Nordatlantik 113
Norddeutschland 119
Nordkorea 67
Nordostatlantik 110
Nordostpassage 67
Nordsee 35, 47 ff., 86
Nordseeküste 31 f., 144 ff.
Nordstrander Bucht 152
Nordwesteuropa 113
No-Regret-Strategie 167
Norfolk 38
North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas Tsunami Warning and Mitigation System (NEAMTWS, ein Warn- und Schadensreduzierungssystem für den Nordostatlantik, das Mittelmeer und angrenzende Meere) 129 ff.
North Shields 86
Norwegen 26, 31, 59 f., 110, 133
Nukunonu 180
Nutzen 52

O

Obsidian 23, 44
Offshore-Bergbau 63
Offshore-Gas 59
Offshore-Öl 59
Offshore-Windräder 59 ff.
Ökosystemleistungen **51 ff.**, 72, 145 ff.
– bereitstellende 52, 57 ff.
– kulturelle 52, 69 ff.
– regulierende 51, 54 ff.
– unterstützende 51, 52 ff.
Ok Tedi 93
Oosterschelde 150
Oranje 63
Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) 90
Orinoko 35
Osmose-Kraftwerk 60
Ostfriesische Inseln 31
Ostia 46
Ostsee 24, 47, 105 ff., 155
Ozeanversauerung 100 ff.

P

Pacific Tsunami Warning Center (PTWC, Pazifisches Tsunamiwarnzentrum) 126 ff.
Palau 154
Palmi 131
Pangaea 15 f.
Panmana 93 f.
Pantelleria 23
Papua-Neuguinea 22, 93, 115, 132, 154
Paris-Deklaration über die Wirksamkeit der Entwicklungszusammenarbeit (Paris Declaration on Aid Effectiveness) 161
Pariser Seerechtsdeklaration 48
Partikelgröße 34
Passat 119, **136 f.**
Pazifik 122 ff.
Pegelstation 130
Peking 12
Peloponnes 45
Penang 67
Perfluorcarbone (PFCs) 92
Perlfluss 44 ff.
Perlflussdelta 80 f.
Permafrost **31 ff.**, 120
Peru 119, 135 ff.
PFOA (Perfluoroctansäure) 92
PFOS (Perfluoroctansulfonat) 92
Philipp II. 48
Philippinen 83, 122, 154 ff.
Phnom Penh 83
Phosphat 54
Phosphor 108 f.
Phosphorverbindungen 52
Photosynthese 52, 101, 105
pH-Wert 113 ff.
Phycocyanin 106
Phytoplankton 52 ff.
Piraterie 49
Pisa 46
Plastikmüll 94 f.
Platform on Disaster Displacement (Plattform für die Vertreibung durch Katastrophen) 180
Platin 63
Plattengrenzen 123
Plattentektonik **14 ff.**
Plattfische 86
Pohnpei 154
Polder **165 ff.**
polybromierte Diphenylether (PBDE) 90
polychlorierte Biphenyle (PCB) 72 ff.
POPs (persistent organic pollutants) 90
Porendruck 132
Porthleven 33
Portugal 47 ff., 122 ff.
Positano 70
Präzession 21
Primärproduktion 51 f.
Produktivität 52
Punische Kriege 46

Q

Qaanaaq 117
Quecksilbervergiftung 90

R

Radikale 106 ff.
Raja-Ampat-Archipel 108
REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals; Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe) 90
Reggio Calabria 131
Regionale Organisation für das Fischereimanagement (Regional Fisheries Management Organisation, RFMO) 144
regionaler Meeresspiegel 118 f.
Repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCPs) 102 ff.
Reval 47
Rhein 25, 151
Riesenwelle 123 ff.
Riffbälle 175 f.
Rifffischer 83 ff.
Riffrestaurierung 109 ff.
Ringdeiche 164
Ring of Fire 122 f.
Rio Doce 93

Rom 45 f.
Rotes Meer 46, 109
Rotterdam 50 ff., 168
Rügen 119
Ruimte voor de Rivier-Projekt 168 ff.
Russell, Richard 51
Russland 67, 122 ff.

S
Sahelzone 111
Sahul 23
Saint-Malo 61
Salak 56
Salomonen 154
Salzwassermarschen 79
Salzwiesen 35 ff., 120, 172 ff.
Sand 33, 61 ff., 81 ff.
Sandaale 87
Sandabbau 83
Sanddepot 171 f.
Sandküste 33 f.
Sandy 121
San Francisco 31
Santa Barbara 59
Sarazenen 46
Sardinien 45
Sargassosee 17
Saronischer Golf 45
Sauerstoffarmut 89
Sauerstoffmangel 54, 101
Säure 113
Scarborough 51
Scharbeutz 155
Schärenküste 27
Schelde 168
Schelf 143
Schelfeis 39
Schleswig-Holstein 144 f., 165
Schlick 34
Schluffpartikel 34
Schmelzwasserpuls 20 ff.
Schorre 39
Schotterküsten 34
Schweden 24, 110 ff.
Schwermetalle 93
Sediment 21, 38, 78
Seegraswiesen 54, 83 ff., 174 ff.
Seegurke 84 f.
Seehandel 45 ff.
Seemächte 47
Seepocke 112
Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (SRÜ) 142 ff.
Seerepublik 46 f.
Seismometer 125
Sekiseishoko-Riff 107
Seltenerdmetalle 63
Semibalanus balanoides 112
Sendai 123
Senegal 57, 111
Sensoren 125 ff.
Sevilla 48
S-Fischerei 158
Shanghai 79
Shetlandinseln 133
Shrimps 58
Sibirien 31 f., 67
Silfra-Spalte 16
Siltpartikel 34
Simeuluë 131
Simulationsmodelle 125
Sine-Saloum-Delta 111
Singapur 61 ff., 83
Sizilien 23, 45, 131
Skagerrak 110
Skandinavien 24, 31 f., 118 f.
Slowakei 68
small-scale fisheries 158
Sognefjord 26 f.
Solwara-1-Feld 63
Sorrentinische Halbinsel 46
South Tarawa 162
Spanien 47 ff., 71
spanische Flotte 48 f.
Special Marine Protected Areas (SMPAs) 154
Spermonde-Archipel 84 f.
Sri Lanka 128, 157
Srivijaya 66
Stackdeich 164
Stickstoff 54
Stickstofffixierung 55
Stickstoffverbindungen 52 ff.
Stickstoffzyklus 55
Stockholmer Übereinkommen 72 ff.
Stör 18, 81
Storegga-Rutschung 133
Strahlungsantrieb 102 ff.
Strahlungsleistung 102 ff.
Strandaufspülungen 171 ff.
Strandmauer 173
Straße von Malakka **66 ff.**
Stress 108 ff.
Stromgestehungskosten 59
Strömung 31 f.
Strömungsenergie 60
Sturmfluten 120 f., 164 ff.
Subduktion 14 ff.
Subduktionszone 124 ff.
Südafrika 63, 81
Südamerika 17, 48, 118
Südchinesisches Meer 54, 82
Südostasien 136
Südpazifik 57
Sueskanal 67
Sulawesi 84
Sumatra 23, 66, 128 f.
Summerland-Feld 59
Sundabogen 128 ff.
Sundaland 23 f.
Sundaplatte 128
Sundarbans 34
Superkontinent 14
Suppenschildkröte 96
Surinam 35
Sylt 112
Symbiose 106
Syrien 44, 96
systematische Wetteraufzeichnungen 102
Szenario 102 ff.

T
Taifun 77
Tangerang 77
Tangwälder 40
Tauchtourismus 96
tektonische Verwerfungen 132
Temperatursprungschicht 101
territoriale Nutzungsrechte in der Fischerei (Territorial Use Rights in Fisheries, TURFs) 158
Tethys-Korridor-Hypothese 17
Tethysmeer 17
Thailand 82, 128, 157
Thames Barrier 167 f.
Themse 25, 151, 167 f.
The Palm 61
The Palm Jebel Ali 64
The Palm Jumeirah 64
Thermalbad 50
Thermoabrasion 39
thermohaline Zirkulation 25
Thermokline 101
Tianjin 64 ff.
tidedominierte Flussmündung 36
Tidenhub 35
Tiefsee 100
Tilapia 111
Timmendorfer Strand 155
Titandioxid 93
Tōhoku 125
Tokelau 180
Tokio 74 ff.
Tong, Anote 179
Tonpartikel 34
Torres Strait 69
Tourismus 69 ff., 154
transienter Lebensraum 13
Treibhauseffekt 100 ff.
Treibhausgase 32, 100 ff.
Trinkwassergewinnung 73 ff.
Tropen 136
tropisches Korallenriff 31
Tsunami 57, 122 ff.
Tsunamiwarnsystem 123 ff.
Tumen 67
Tunesien 23, 131
Türkei 96, 131

U
Überdüngung 54, 88 f., 108 ff.
Überfischung 83
Überschwemmungen 73 ff.
Überseehandel 47, 65
Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) 69, 81, 157
UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur) 35, 44, 126 ff., 144 ff.
UN-Menschenrechtsrat (United Nations Human Rights Council, UNHCR) 93
Unterwasserarchäologie 22
USA 35, 71 ff., 120, 125 ff., 161
US-amerikanischer Rechnungshof (U. S. Government Accountability Office, GAO) 32
US-amerikanische Ostküste 54

V
Valdivia 126
Vanua Levu 149, 180
Venedig 46 f.
Venezuela 35
Vereinte Nationen 12, 57
Verkehrsdrehkreuz 49
Vertrag von Tordesillas 47 f.
Vietnam 82, 121
Vogelfußdelta 36
Vogelschutzrichtlinie 154
Vorderasien 44
Vøring-Plateau 133
Vulkanausbruch 122 ff.
Vulkangestein 33

W
Waikiki 126
Wales 40
Walker, Gilbert 136
Walker-Zirkulation 136
Wärmepuffer 103
Warmzeit 19 ff.
Wasserstoff 113
Watt 33 ff.
Wattenmeer 60, **144 ff.**
Wattgebiete 35
Wegener, Alfred 13
Weidenblattlarve 17
Weißes Syndrom (Acropora White Syndrome, AWS) 109
Wellenbrecher 172 ff.
Wellenenergie 60
Weltbank 89
Weltklimarat **100 ff.**, 164
Weltkulturerbe 44
Weltnaturerbe 35, 150 ff.
Weltorganisation für Tourismus (World Tourism Organization, UNWTO) 69
Weser 25, 144
Westsahara 62
Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 126, 157
Whole of Island Approach 163
Wilson, John Tuzo 14
Wilson-Zyklus 14 f.
Wolfsbarsch 111
Würmer 54
Wyer Island 69

X
Xayaburi-Staudamm 82
Xiaoqing 92

Z
Zellmembran 109
Zellschädigung 106 ff.
zentralasiatisches Hochland 38
Zentralasien 46
Zooxanthellen 106 ff.
Zucker 106 ff.
Zuiderzee 164
Zyanidfischerei 85, 149
Zypern 44

Mitwirkende

Zur Erstellung des „World Ocean Review“ 2017 haben viele Experten mit ihrem Fachwissen beigetragen. Beteiligt waren insbesondere Wissenschaftler der dem Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) angehörigen Einrichtungen sowie des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“.

Prof. Dr. Hermann W. Bange, Leiter der Arbeitsgruppe Biogeochemie von marinen Spurengasen am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel. Seine Forschungsinteressen gelten den ozeanischen Bildungswegen und Emissionen klimarelevanter Spurengase. Arbeiten seiner Arbeitsgruppe zu den ozeanischen Stickstoff- und Schwefelkreisläufen schließen auch Messungen von kurzlebigen Zwischenprodukten wie Hydroxylamin, Stickstoffmonoxid und anderen ein. Seine Arbeitsgruppe beteiligt sich regelmäßig an Messkampagnen im Atlantik, Pazifik und Indischen Ozean sowie im Südpolarmeer und in der Ostsee. Darüber hinaus ist er der Koordinator der Zeitserienstation Boknis Eck, einer Messstation, die seit 1957 Daten liefert und in der Eckernförder Bucht in der südwestlichen Ostsee liegt.

Prof. Dr. Ulrich Bathmann, Direktor und Biologischer Meereskundler am Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Professor für Erdsystemforschung an der Universität Rostock und Sprecher des Leibniz-WissenschaftsCampus Phosphorforschung. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der Küstenmeerforschung, den natürlichen und anthropogen induzierten Veränderungen der Vorgänge in Küstenmeeren und deren Auswirkungen auf die Gesellschaft. Er ist Mitglied in zahlreichen nationalen und internationalen Arbeitsgruppen, außerdem Vorsitzender des Konsortiums Deutsche Meeresforschung (KDM). Darüber hinaus ist er Mitglied des Präsidiums der Leibniz-Gemeinschaft und Mitglied der Deutschen Sektion der Zwischenstaatlichen Ozeanographischen Kommission.

Prof. Dr. Jörn Behrens, Mathematiker mit Schwerpunkt angewandte Mathematik an der Universität Hamburg. Er promovierte an der Universität Bremen und habilitierte sich an der Technischen Universität München. Er entwickelt nummerische Verfahren für Atmosphären- und Ozeansimulationen. 2006 wurde er Leiter der Tsunamimodellierung am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), wo er mit seiner Arbeitsgruppe die Simulationskomponente des Deutsch-Indonesischen Tsunamifrühwarnsystems (German Indo nesian Tsunami Early Warning System, GITEWS) entwickelte. 2009 nahm er einen Ruf an die Universität Hamburg an. Er ist dort Mitglied im Centrum für Erdsystemforschung und Nachhaltigkeit (CEN). Als Co-Chair einer UNESCO-Arbeitsgruppe für Gefahrenanalyse und Modellierung im Rahmen des Tsunamiwarnsystems für den Nordostatlantik, das Mittelmeer und angrenzende Meere (Intergovernmental Coordination Group for the Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas ICG/NEAMTWS) hat er 2016 maßgeblich an der Akkreditierung von Tsunamiwarnzentren in Frankreich und Italien mitgearbeitet.

Flemming Dahlke, Meeresbiologe am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI). Im Rahmen seiner Doktorarbeit untersucht er den Einfluss des Klimawandels auf die Verbreitung wichtiger Fischarten im Nordpolarmeer. Im Fokus steht hierbei die Bewertung klimatischer Risiken für den Erhalt geeigneter Reproduktionsgebiete mittels physiologiebasierter Vorhersagemodelle.

Prof. Dr. Ralf Ebinghaus, Chemiker im Institut für Küstenforschung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG). Er leitet dort die Abteilung für Umweltchemie und lehrt als Professor (h.c.) an der Leuphana Universität 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“ und Co-Editor der Zeitschriften „Chemosphere“ und „Atmospheric Chemistry and Physics“. Er ist Mitglied im Pool of Experts für das World Ocean Assessment der Vereinten Nationen.

Dr. Werner Ekau, Fischereibiologe am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) in Bremen. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen im Bereich Populationsdynamik und Anpassung unterschiedlicher Lebensstadien an die sich verändernde Umwelt. In Projekten wie GENUS (Geochemistry and Ecology of the Namibian Upwelling System) oder AWA (Ecosystem Approach to the management of fisheries and the marine environment in West African waters) untersucht er den Einfluss von Hypoxie beziehungsweise Versalzung von Ästuaren auf die Fortpflanzungsfähigkeit von heringsartigen Fischen. Außerdem ist er Direktor des deutschen Operationszentrums des International Ocean Institute (IOI).

Prof. Dr. Kay-Christian Emeis, Geowissenschaftler mit Schwerpunkt Biogeochemie an der Universität Hamburg und gleichzeitig Institutsleiter am Institut für Küstenforschung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG). Sein wissenschaftliches Interesse ist die Aufklärung von Stoffkreisläufen im Meer und die Erkundung des Einflusses menschlicher Aktivitäten auf Küstenökosysteme. Er promovierte in Hamburg und arbeitete dann an der Texas A&M University und der Woods Hole Oceanographic Institution in den USA, um über die Stationen Universität Kiel, Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW) und Universität Greifswald wieder nach Hamburg zurückzukommen.

Dr. Sebastian Ferse, Ökologe am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) in Bremen. Seine Forschungsarbeiten kombinieren natur- und sozialwissenschaftliche Ansätze und beschäftigen sich mit der Ökologie und menschlichen Nutzung tropischer Korallenriffe. Er befasst sich mit dem Management, der Biodiversität und Resilienz von Riffsystemen. Weitere Aspekte seiner Arbeit sind: Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen, Riffrestauration, Lebenssicherungsstrategien und kleinskalige Fischerei zudem das partizipative Management tropischer Küstenbereiche. Ein besonderer Fokus seiner Forschung liegt auf Indonesien, wo er seit rund 15 Jahren arbeitet.

Daniel Gerecke, Geograph und Berater für die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) im regionalen Vorhaben „Klimawandel in der pazifischen Inselregion“. Er ist verantwortlich für die Programmaktivitäten in den Bereichen Politikberatung und Anpassung an den Klimawandel in Kiribati und leitet zudem die Programmkomponente zu Klimawandel und Bildung in den Inselstaaten Fidschi, Kiribati, Samoa und Vanuatu.

Prof. Dr. Anna-Katharina Hornidge, Soziologin und Entwicklungsforscherin, Professorin an der Universität Bremen und Leiterin der Abteilung Sozialwissenschaften sowie der Arbeitsgruppe Entwicklungs- und Wissenssoziologie am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) in Bremen. Ihre Forschungsgebiete umfassen Wissenschafts- und Innovationsforschung mit Umwelt-/Meeresbezug sowie Adaptationsforschung im Entwicklungskontext. Ihre Arbeitsgruppe hat das Ziel, die marinen Sozialwissenschaften im Bereich der marinen Wissenschafts- und Zukunftsforschung weiter auszubauen.

PD Dr. Tim Jennerjahn, Biogeochemiker und Leiter der Arbeitsgruppe Ökologische Biogeochemie am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) in Bremen. Er untersucht seit vielen Jahren die Reaktion tropischer Küstenökosysteme auf klimabedingte und menschengemachte Umweltveränderungen. Er hat interdisziplinäre Forschungsverbünde in China, Indonesien, Indien oder auch Brasilien geleitet und an zahlreichen Expeditionen an Land und auf See teilgenommen. Er ist Chefredakteur der internationalen Fachzeitschrift „Estuarine, Coastal and Shelf Science“. Jennerjahn lehrt an der Universität Bremen.

Prof. Dr. Silja Klepp, Professorin für Humangeografie in Küsten- und Meeresgebieten an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und Mitglied des Exzellenzclusters „Ozean der Zukunft“. Ihre aktuelle Forschung im zentralen Pazifik beschäftigt sich mit dem Thema Klimawandel, Klimawandelanpassung und Migration. Sie integriert postkoloniale Perspektiven und kritische Theorien in das Forschungsfeld Klimawandelanpassung. Weitere Arbeitsschwerpunkte sind die kulturellen und sozialen Folgen des Klimawandels und Flucht und Migration sowie EU-Grenzregime. Silja Klepp forscht vor allem in Fidschi und Kiribati sowie im Mittelmeerraum.

Dr. Lotta Clara Kluger, marine Ökologin am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) in Bremen. Sie beschäftigt sich mit partizipativem, ökosystembasiertem Küsten- und Ressourcenmanagement und den vielfältigen Auswirkungen von Aquakultur. In interdisziplinären Projekten arbeitet sie in verschiedenen Ländern Südamerikas an ökologischen und sozialökonomischen Fragestellungen mit dem Ziel, die Nachhaltigkeit von (Kleinst-)Fischereien zu fördern.

Prof. Dr. Sebastian Krastel, mariner Geophysiker am Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und Mitglied im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“. Er beschäftigt sich mit Sedimentationsprozessen an Kontinentalhängen und damit verbundenen Naturgefahren. Dazu verwendet er vor allem akustische Methoden, um den Meeresboden und darunterliegende Schichten zu analysieren.

Dr. Lasse Marohn, Fischereibiologe am Thünen-Institut für Fischereiökologie in Hamburg. Er beschäftigt sich mit dem Bestandsmanagement und der Biologie des Europäischen Aals und anderer diadromer Wanderfischarten. Ein weiterer zentraler Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Untersuchung der Auswirkungen dynamischer Umweltbedingungen und anthropogener Einflüsse auf das Wanderverhalten und die Habitatpräferenz von Fischen.

Dr. Barbara Neumann, Geografin im Projekt Governance der Meere am Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS) in Potsdam und bis vor Kurzem noch Mitglied im Exzellenzcluster „Ozean der Zukunft“ in Kiel und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Geographischen Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Sie ist im Bereich Mensch-Umwelt-Forschung tätig und interessiert sich insbesondere für Mensch-Umwelt- und Land-Meer-Interaktionen im Küstenraum, deren Analyse und Bewertung. Aktuell beschäftigt sie sich unter anderem mit der Umsetzung des Nachhaltigkeitsziels Nummer 14 über den Schutz und die nachhaltige Nutzung von Meeren und marinen Ressourcen der UN-Agenda 2030, den zugrunde liegenden Nachhaltigkeitskonzepten und daraus erwachsenden Herausforderungen für die Governance der Meere und Küsten.

Dr. Hanna Sabaß, Portfolio-Managerin und Beraterin im regionalen Vorhaben „Klimawandel in der pazifischen Inselregion“ der GIZ. Sie ist Geografin und seit über zehn Jahren für die GIZ in den Themen Katastrophenvorsorge, Klimawandelanpassung, ländliche Regionalentwicklung und Umweltbildung tätig. Sie hat bis 2015 maßgeblich zur Entwicklung des „Whole of Island Approach“ und zur Koordinierung der Implementierungspartner auf Kiribati beigetragen. Sie lebt und arbeitet seit 2011 in Fidschi, von wo aus regionale Vorhaben in 15 pazifischen Inselstaaten umgesetzt werden.

Prof. Dr. Torsten Schlurmann, Küsteningenieur und geschäftsführender Leiter des Ludwig-Franzius-Instituts für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen an der Leibniz Universität Hannover. Zeitgleich leitet er das Forschungszentrum Küste mit dem Großforschungsgerät des Großen Wellenkanals (GWK). Nach Studium, Promotion und Habilitation im Bauingenieurwesen unterstützte er an der Universität der Vereinten Nationen die Implementierung eines Tsunamifrühwarnsystems im Indischen Ozean. 2007 folgte er dem Ruf auf eine W3-Professur nach Hannover. Seine Hauptforschungsgebiete sind die Erfassung und Modellierung von Prozessen im Ästuar- und Küsteningenieurwesen, speziell im Küstenschutz und Risikomanagement, in der Hafenplanung und -unterhaltung sowie in der Erprobung und Entwicklung maritimer Technologien, vor allem in der Offshore-Windenergie. In den letzten Jahren hat er sich insbesondere mit dem Konzept des integrierenden, proaktiven Ansatzes „Building with Nature“ befasst.

Dr. Daniela Storch, integrative Ökophysiologin am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven. Ihre Expertise liegt in der Ökophysiologie der Meerestiere und den verschiedenen Entwicklungsstadien. Sie leitet verschiedene Projekte, in denen sie mit ihren Mitarbeitern und Kollegen studiert, welche Lebensstadien am sensitivsten sind, wie sich diese Lebensstadien an Umweltveränderungen anpassen können und inwieweit die Verbreitung und Biodiversität mariner Meerestiere durch diese Lebensstadien beeinflusst werden.

Dr. Nicola Wannicke, Mikrobiologin am Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie in Greifswald (INP Greifswald). Sie erforscht die Wechselwirkung von kaltem atmosphärischem Plasma und Pflanzen. Bis vor Kurzem arbeitete sie am Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde in der Arbeitsgruppe Mariner Stickstoffkreislauf und beschäftigte sich dort mit den Auswirkungen der Ozeanversauerung auf Cyanobakterien. Zudem untersuchte sie Veränderungen des Wachstums und der Stickstofffixierung bei für die Ostsee typischen Arten wie *Nodularia spumigena* sowie deren Bildung toxischer Substanzen.

Dr. Ralf Weisse, Meteorologe und Leiter der Abteilung Küstenklima am Institut für Küstenforschung des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG). Sein Forschungsinteresse gilt dem marinen Klima und dessen Variabilität. Schwerpunktmäßig beschäftigt er sich mit Stürmen, Sturmfluten, Seegang und regionalen Meeresspiegeländerungen und deren Auswirkungen.

Prof. Dr. Christian Wild, Leiter der Abteilung Marine Ökologie und der Arbeitsgruppen Marine Ökologie und Korallenriffökologie am Fachbereich Biologie & Chemie der Universität Bremen. Davor war er Ansprechpartner für Korallenriffthemen bei der UNESCO in Paris und arbeitete als Nachwuchsgruppenleiter an der LMU München. Sein wichtigstes Projekt für die Zukunft ist die erstmalige Ausrichtung der Weltkorallenriffkonferenz in Bremen im Sommer 2020.

Dr. Anna-Katharina Wöbse, Umwelthistorikerin und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Biologiedidaktik der Justus-Liebig-Universität Gießen. Sie untersucht Fragen der Mensch-Natur-Beziehungen, der internationalen Umweltdiplomatie und der Visualisierung und Medialisierung von Natur- und Umweltkonflikten. Ihr aktuelles Forschungsprojekt rückt die Geschichte europäischer Feuchtgebiete vom Wattenmeer der Nordsee bis zur Camargue in den Fokus.

Prof. Dr. Matthias Wolff, Fischereiökologe am Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (ZMT) in Bremen und Professor für Marine Synökologie an der Universität Bremen. Er hat nach der Promotion an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel im Jahr 1985 die Fischereibiologie an der Universidad Católica del Norte (Chile) aufgebaut, bevor er ab 1991 beim Aufbau des ZMT in Bremen mitwirkte. Hier entwickelte er den ersten internationalen und multidisziplinären Masterstudiengang (International Studies in Aquatic Tropical Ecology, ISATEC) der Uni Bremen mit Orientierung auf das Management tropischer Küstensysteme. Von 2007 bis 2010 arbeitete er als Wissenschaftlicher Direktor der marinen Abteilung der Charles-Darwin-Station auf den Galapagosinseln. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen der Populationsdynamik und Fischerei aquatischer Ressourcen und in der trophischen Modellierung von Küstenökosystemen.

Prof. Dr. Hans-Peter Ziemek, Biologe am Institut für Biologiedidaktik der Justus-Liebig-Universität Gießen. Sein Forschungsinteresse gilt der Geschichte der Landschaft an der Westküste Schleswig-Holsteins und den Verhaltensweisen der hier agierenden Menschen. In Kooperation mit der Stiftung Naturschutzgeschichte (Königswinter) untersucht er dabei insbesondere die Entstehung nachhaltiger Schutzkonzepte und arbeitet an deren Weiterentwicklung unter Berücksichtigung des Klimawandels.

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 200 Wissenschaftler aus sieben Fakultäten der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, des GEOMAR Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel, des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) und der Muthesius Kunsthochschule zusammengeschlossen.

IOI: Das International Ocean Institute wurde 1972 als gemeinnützige Nichtregierungsorganisation von 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.

KDM: Das Konsortium Deutsche Meeresforschung bündelt die Expertise der deutschen Meeresforschung. Seine Mitglieder setzen sich aus allen Forschungseinrichtungen zusammen, die in Meeres-, Polar- und Küstenforschung aktiv sind. Ein Hauptanliegen des KDM ist, die Interessen der Meeresforschung gegenüber nationalen Entscheidungsträgern und der EU sowie gegenüber der Öffentlichkeit gemeinsam zu vertreten.

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 die des „World Ocean Review“ ist in erster Linie ein Unterfangen, das mit hohem Aufwand verbunden ist. Daher gilt mein Dank zuerst allen beteiligten Wissenschaftlern, die an dieser Ausgabe mitgewirkt haben. Ein herzliches Dankeschön auch den Organisationsteams des Exzellenzclusters und des Konsortiums Deutsche Meeresforschung für die reibungslose Kommunikation und die Arbeit hinter den Kulissen.

Dank gebührt darüber hinaus insbesondere auch dem Wissenschaftsjournalisten Tim Schröder, der den Texten 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 Anna Boucsein, die für die Gestaltung verantwortlich war, Petra Koßmann und Anastasia Hermann, die die Bildredaktion innehatten, 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

In der Reihe „World Ocean Review“ bisher erschienen und über www.worldoceanreview.com kostenlos bestellbar:

WOR 4, 2015
Der nachhaltige Umgang mit unseren Meeren – von der Idee zur Strategie

WOR 3, 2014
Rohstoffe aus dem Meer – Chancen und Risiken

WOR 2, 2013
Die Zukunft der Fische – die Fischerei der Zukunft

WOR 1, 2010
Mit den Meeren leben – ein Zustandsbericht

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster, maribus
Redaktion und Text: Tim Schröder
Lektorat: Dimitri Ladischensky, mare
Gestaltung und Satz: Anna Boucsein, mare; Andrea Best, mare
Bildredaktion: Petra Koßmann, mare; Anastasia Hermann, mare
Grafiken: Walther-Maria Scheid
Produktion: HS Printproduktion, Holger Schmirgalski
Druck: Ruksaldruck GmbH & Co. KG
Papier: Balance Silk, FSC®-zertifiziert

ISBN 978-3-86648-274-6
Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com

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.