# 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.



100

# 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 ( $\mathrm{CO}_2$ ) werden dadurch zusätzlich freigesetzt, sodass nach dem Beginn der industriellen Revolution die  $\mathrm{CO}_2$ -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<sub>2</sub>) und andere klimarelevante Spurengase in der Atmosphäre wie etwa Methan (CH<sub>4</sub>) 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<sub>2</sub>, 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

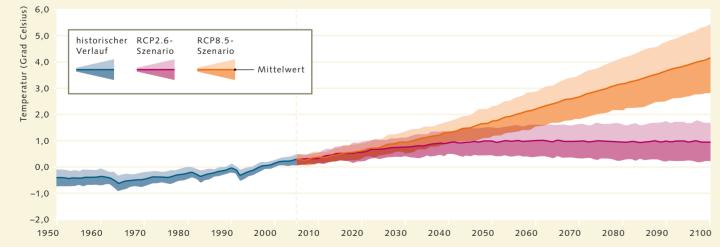
Niemand kann heute mit Gewissheit sagen, wie stark sich das Klima in Zukunft ändern wird, zumal unbekannt ist, wie viel Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) künftig durch die Verbrennung der fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Kohle ausgestoßen wird. Der Bedarf an fossilen Energieträgern wiederum hängt 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<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-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 CO2-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<sup>2</sup>) 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<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-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



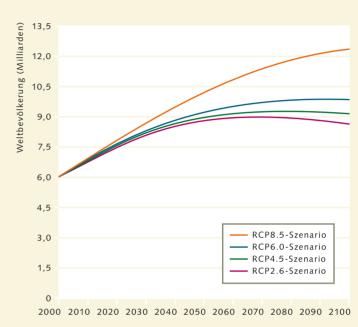
3.2 > Die mittlere globale Erdoberflächentemperatur wird auf alle Fälle steigen – beim RCP8.5-Szenario um mehr als 4 Grad Celsius gegenüber 1986–2005. Nur beim RCP2.6-Szenario lässt sich das Ziel, die Erderwärmung auf 2 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, noch einhalten.

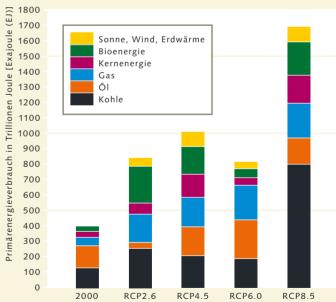
die Atmosphäre auf. Dank dieser großen Energieaufnahme fungieren die Ozeane als wichtiger Wärmepuffer, da sie das Aufheizen der Atmosphäre mildern.

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<sub>2</sub>-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.

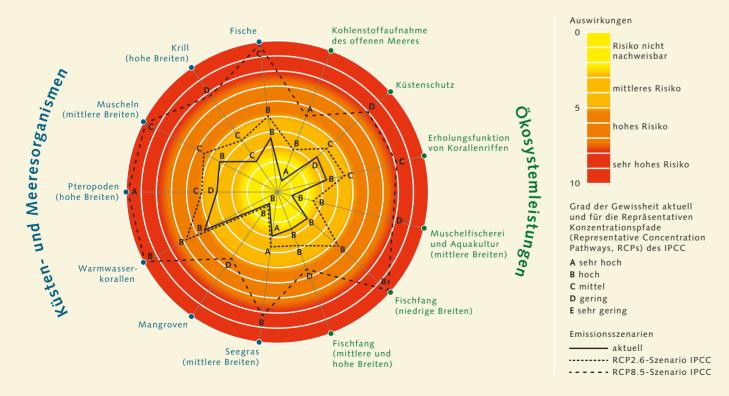




3.3 > Aus einer Reihe von Berechnungen hat der Weltklimarat Szenarien entworfen, die mögliche Entwicklungen des Klimawandels darstellen. Für diese Szenarien wurden Ursachen und Auswirkungen genauer betrachtet. Einen besonderen Einfluss auf den Verlauf des Klimawandels und die Zunahme der globalen durchschnittlichen 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	2100 CO <sub>2</sub> - Konzentration (ppm)	mittlerer Meeresspiegelanstieg (m)		Emissions- szenario	mittlerer Meeresspiegelanstieg (m)		
	(RCPs)		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 CO2-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 CO2-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.

Bedrohung durch Klimawandel und Naturgefahren <

# Einzigartige Messwerte aus 60 Jahren

verbraucht.

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

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 zurück zuführen ist. Erstaunlicherweise kommt es heute in den Frühiahrs- 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

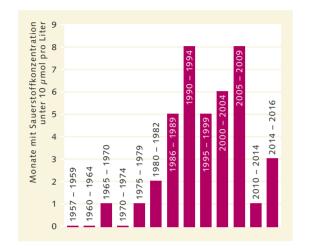


3.6 > Seit 1957 untersuchen Forscher regelmäßig das Wasser an einem bestimmten Punkt der Eckernförder Bucht an der Ostseeküste. Heute werden dazu moderne Wasserschöpfer verwendet, die in verschiedenen Tiefen Wasserproben nehmen.

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 erheb-

liche Einbußen bedeuten.

#### 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.



# 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.

108

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;

3.9 > Korallen blei-

chen aus, wenn sie

unter Stress geraten -

ralle im indonesischen

Raja-Ampat-Archipel

Die Korallen stoßen

dabei Zooxanthellen

ab, farbige Einzeller,

mit denen sie in Sym-

biose leben

etwa diese Steinko-

- zerstörerische Fischereipraktiken, die das Riff verwüsten, beispielsweise durch ankernde Boote oder durch Netze;
- Küstenentwicklung (Baumaßnahmen);

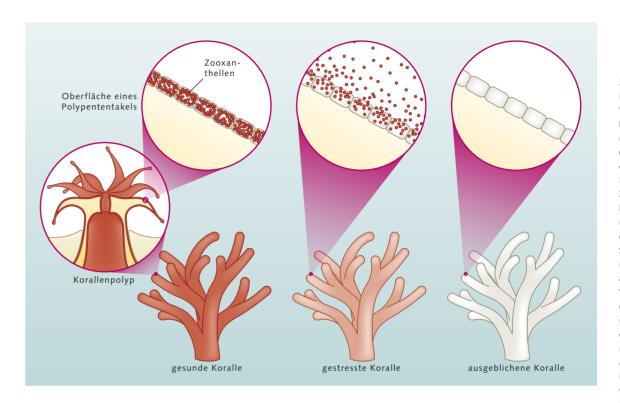


- Verschmutzung des Meerwassers durch Eintrag von Schadstoffen oder Trübstoffen aus den Flüssen;
- Verschmutzung des Meerwassers vor Ort durch direkte Einleitung von Abwässern an der Küste und von Handels- und Kreuzfahrtschiffen:
- Zerstörung durch Grundberührung von Fähren oder touristischen Booten.

#### 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.



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 Wei-Be 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.

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.

3.11 > Der Kabel-

deutendsten Fische

im Nordostatlantik.

Durch die Meereser-

wärmung könnten sich die Wachs-

tumsbedingungen

für Kabeljaueier und

tern. Dadurch könnte

-larven verschlech-

jau ist einer der wirtschaftlich be-

#### 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

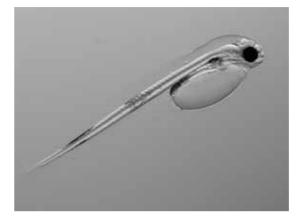


könnten. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits eine Erhöhung der Temperatur um 3 Grad zum Absterben der Eier oder zu mehr Missbildungen der Larven führt. Die Embryonen in den Fischeiern reagieren offenbar vor allem in einer frühen Phase der Entwicklung empfindlich auf zu warmes Wasser. Wie die Experimente 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 Kabel-





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.

jau 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.

# 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-

3.13 > 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.

112



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  ${\rm CO_2}$  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 CO2 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 CO2 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  ${\rm CO}_2$  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  $\mathrm{CO}_2$  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 Flüssig-

113

keit wie zum Beispie 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.

115

#### 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 ( $H_2CO_3$ ), Hydrogenkarbonatlonen ( $HCO_3^-$ ) und Karbonat-Anionen ( $CO_3^{2-}$ ). Diese Umwandlung wird in 3 Gleichungen dargestellt.

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3$$
  
 $H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-$   
 $HCO_2^- \leftrightarrow H^+ + CO_2^{2-}$ 

Die Gesamtheit aller sich vom CO<sub>2</sub> ableitenden chemischen Spezies im Wasser, also Kohlendioxid, Kohlensäure, Hydrogenkarbonatlonen 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  $\mathrm{CO_2}$ -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<sub>2</sub> 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<sup>+</sup>-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<sup>2+</sup>) aus dem Wasser auf und produzieren daraus das sogenannte Kalziumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>), 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<sub>2</sub> begast, sodass sich im Wasser ein CO<sub>2</sub>-Gehalt einstellte, der etwa dem Wert entsprach, der sich bei einer Verdoppelung des heutigen CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-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

# Geringere Artenvielfalt im Korallenriff

Wie sich eine zunehmende Versauerung in Korallenriffen im Osten Papua-Neuguineas auswirkt, zeigen Studien australischer Forscher. In diesen Gebieten steigt CO2 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 CO2-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 CO2-Quellen sind, desto saurer ist das Wasser, sodass man hier ie 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

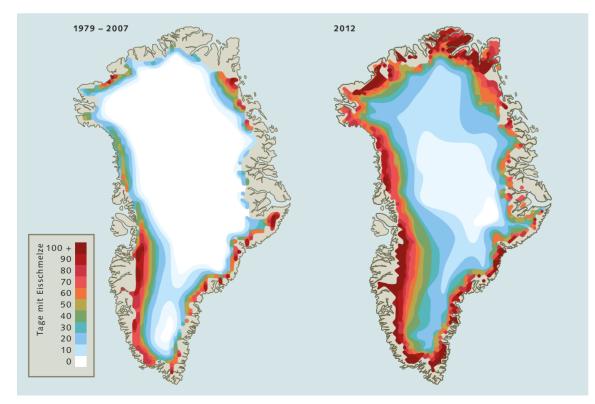
Während vor allem die kalkbildenden Lebewesen benachteiligt sind, zählen die Cyanobakterien, ehemals als Blaualgen bezeichnet, möglicherweise zu den Gewinnern. Cyanobakterien benötigen genau wie Pflanzen CO2, um daraus mithilfe der Photosynthese Zucker aufzubauen. Sie verfügen deshalb über Stoffwechselprozesse, die CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-Konzentrationen beziehungsweise niedrige pH-Werte im Wasser angepasst.

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



3.15 > 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.



> Kapitel 03

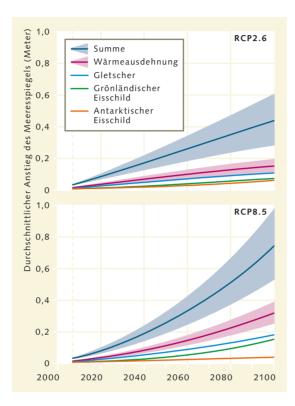
durch den Wechsel von Kalt- und Warmzeiten ergibt. Eispanzer, die sich während der Eiszeiten bilden, senken durch ihr hohes Gewicht die Erdkruste in bestimmten Regionen ab, wodurch der Meeresspiegel relativ zum Land ansteigt. Taut das Eis, hebt sich die Landmasse wieder – ein Phänomen, das noch heute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

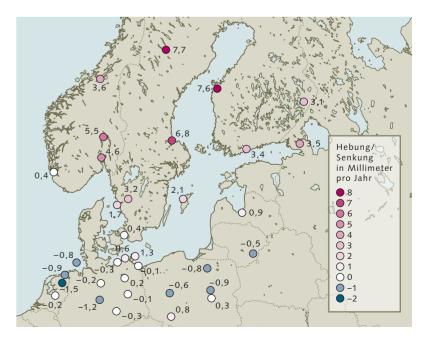
Zu lokalen Veränderungen des Meeresspiegels kommt es häufig auch durch die Bebauung mit Hochhäusern oder die Entnahme von Grundwasser für die Trinkwassergewinnung (siehe Kapitel 2). Flussdeltas wiederum sinken unter ihrem Eigengewicht ab. Dieses Absinken kann vielerorts heute nicht mehr kompensiert werden, 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 lahren:
- 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  ${\rm CO}_2$  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.

3.19 > Es war eine

der verheerendsten

Naturkatastrophen

in der europäischen

Geschichte. Als am

1. November 1755

Erde bebte, starben

mehrere Zehntau-

send Menschen unter den Trümmern von

Gebäuden, in einem

Großbrand und in

den Fluten eines

Tsunamis.

in Lissabon die

# 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,



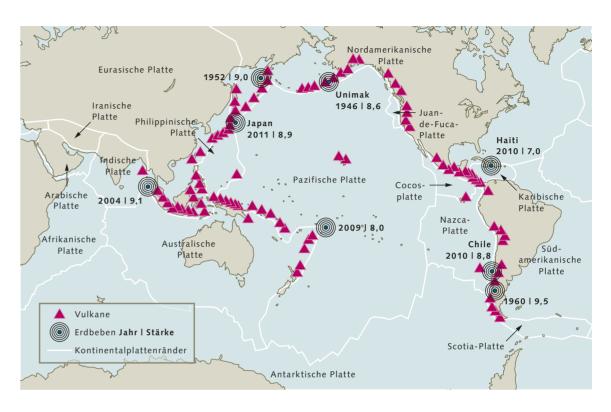
zumeist im Meer, ausgelöst. Andere Ursachen sind Vulkanausbrüche oder Hangrutschungen, bei denen große Mengen an Sand, Gestein oder Sediment wie bei einer Lawine herabstürzen. Je mehr Material sich dabei bewegt oder je schneller es rutscht, desto mehr Energie hat der dadurch ausgelöste Tsunami.

#### 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

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.

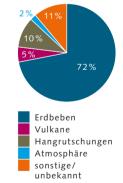
# Die Entwicklung des Tsunamiwarnsystems in Japan

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 japa-

nischen 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

124

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.

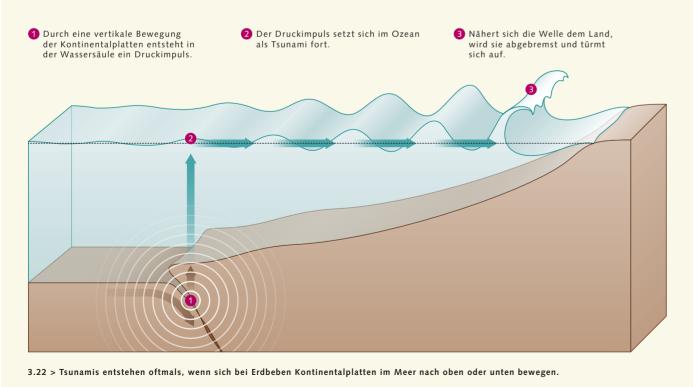
Mithilfe von ausgeklügelten Computermodellen versucht man heute noch besser zu verstehen, welche speziellen Charakteristika

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

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





Polizeistationen informiert. In der Regel dauerte es 20

Minuten von der Auswertung der Erdbebendaten bis zur

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 Stär-

ke und der Ort eines Erbebens immer besser und schnel-

ler zu bestimmen waren. Tsunamiwarnungen konnten

schließlich bereits 3 Minuten nach einem Erdbeben aus-

gegeben 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 Tohoku-Region zu einem schwe-

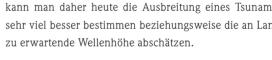
ren Seebeben. Durch das Beben und die ausgelöste Flut-

welle kamen etwa 16 000 Menschen ums Leben.

In den folgenden Jahren wurden in verschiedenen

Tsunamiwarnung.

kennen. Dank des Einsatzes dieser zusätzlichen Sensorik kann man daher heute die Ausbreitung eines Tsunamis sehr viel besser bestimmen beziehungsweise die an Land





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



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.

#### 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.

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.

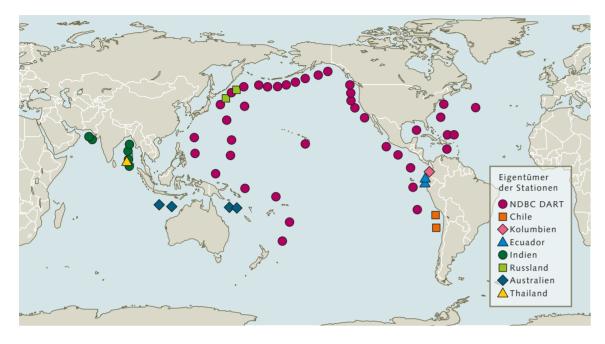
75 Prozent aller Tsunamiwarnungen waren Fehlalarme, die zu oft zu teuren Evakuierungen führten. 1986 führte eine Warnmeldung zur Evakuierung von Waikiki, einem Stadtteil von Honolulu. Mehrere Behördengebäude im Stadtgebiet mussten geräumt werden. Zwar liefen zum angegebenen Zeitpunkt Wellen am Strand 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 (Deepocean 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



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.

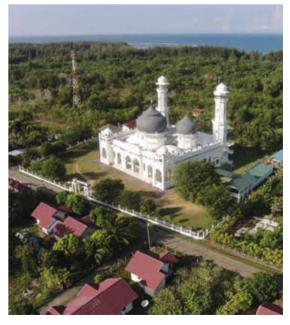
# Das indonesische Warnsystem – Aufbau aus dem Nichts

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.

130 > Kapitel 03 Bedrohung durch Klimawandel und Naturgefahren <

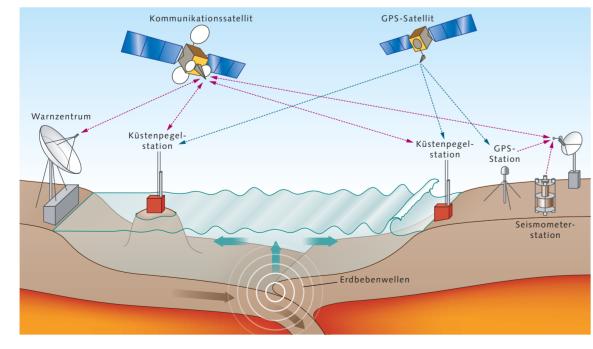
GPS-Sensoren wahrnehmen. Durch die Kombination dieser drei Sensortypen erhöht sich die Zuverlässigkeit der Vorhersage deutlich, denn aus der Information eines Sensortyps allein kann man nicht sicher auf einen Tsunami schließen.

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 Hochwasser-



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.

schutzgebäude direkt in den von Tsunamis bedrohten Gebieten.

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.

131

# 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-



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 sauer stoffgesättigt 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

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 tropischwarmes und regenreiches Regenwaldklima entwickeln konnte Das andere Strömungssystem, die Walker-Zirkulation, tritt hingegen nur im Pazifik auf. Sie verläuft guer 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.

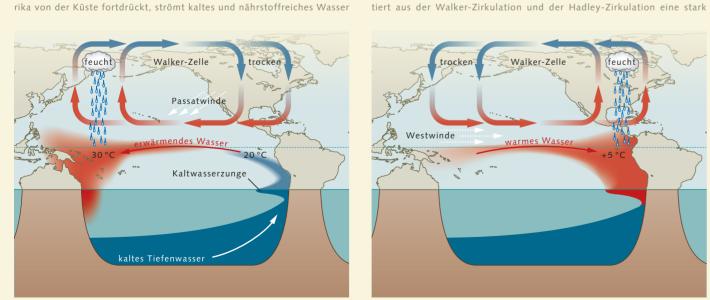
In der Regel liegt über dem westlichen Pazifik im Bereich Südostasiens ein stabiles Tiefdruckgebiet und über dem zentralen Pazifik ein Hochdruckgebiet. Das führt dazu, dass permanent Luftmassen aus dem Bereich des hohen Drucks nach Westen in den Bereich des niedrigen

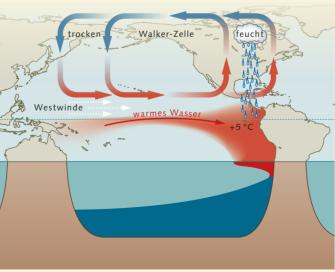
aus der Tiefe an die Meeresoherfläche nach Dieses Phänomen wird als

Auftrieb bezeichnet. Dieses kalte Wasser schiebt sich zunächst wie eine

Kaltwasserzunge in den Pazifik und wird dann auf seinem weiteren Weg

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 resul-



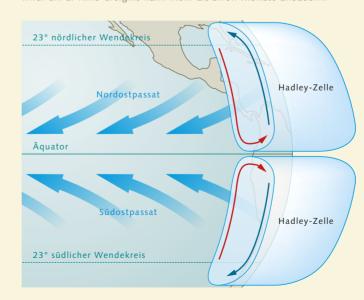


3.30 > Für gewöhnlich treiben stetige Passatwinde das Wasser von der Küste Südamerikas auf den Pazifik hinaus. Dadurch steigt vor Südamerika kaltes und nährstoffreiches Tiefenwasser auf. Während eines El-Niño-Ereignisses schwächen sich die Winde ab, sodass jetzt warmes Wasser Richtung Amerika strömt.

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.

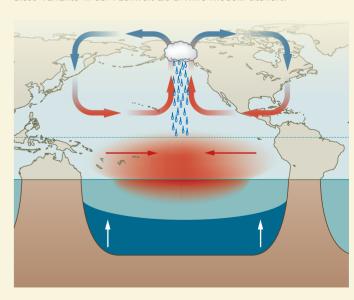
Der Name "El Niño" stammt aus dem Spanischen und heißt auf Deutsch übersetzt: "das Kind" beziehungsweise "das Christkind". Er geht auf südamerikanische Fischer zurück, die seit Langem wissen, dass ein El-Niño-Ereignis um die Weihnachtszeit herum seinen Höhepunkt erreicht. Wissenschaftler bezeichnen das 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.



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

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.



3.32 > 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.

# Klimawandel und Naturgefahren

bedrohen die Küsten

Wie stark die Folgen des Klimawandels für die Küstenlebensräume ausfallen werden, hängt in hohem Maße vom Kohlendioxidgehalt (CO2) in der Erdatmosphäre ab. Die direkte Folge des starken CO<sub>2</sub>-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  $\mathrm{CO}_2$  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  $\rm CO_2$ -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.