

3 Die ungewisse Zukunft der Küsten



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



Der Meeresspiegelanstieg – eine unausweichliche Bedrohung

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

Verlust von Lebensräumen und Kulturschätzen

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

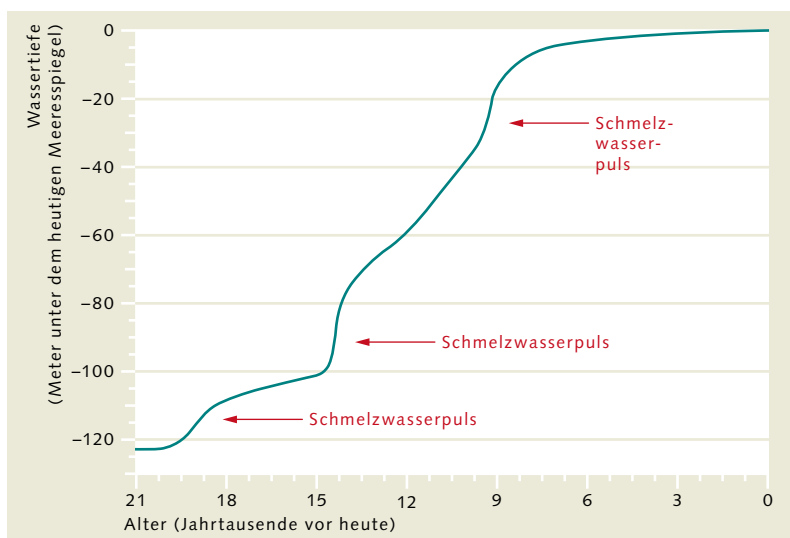
Weltweit versuchen Forscher die Frage zu beantworten, wie schnell und auch wie stark der Klimawandel das Was-

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

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

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

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



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



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

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

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

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

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

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

Der Meeresspiegelanstieg

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

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

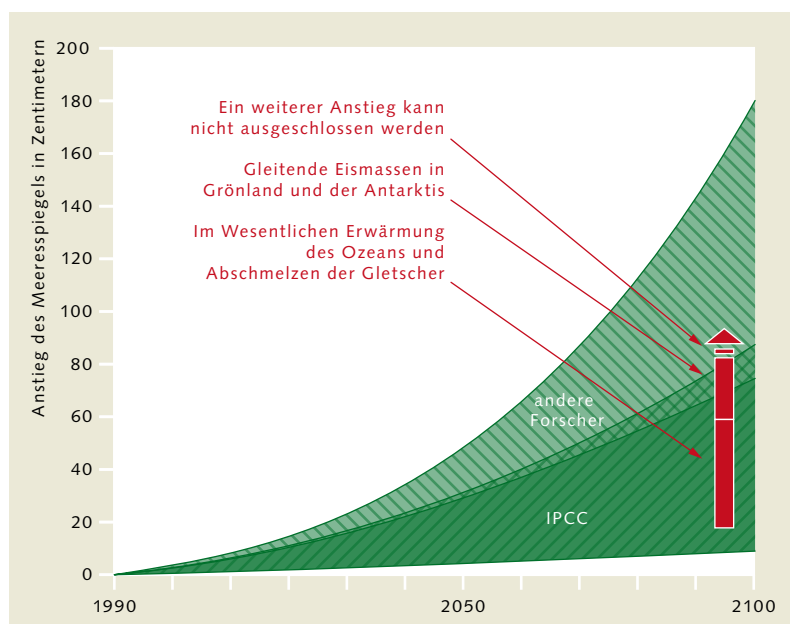


berücksichtigt, dass die großen Inlandeismassen der Erde (im Wesentlichen die Eismassen auf der Insel Grönland und in der Antarktis) durch die globale Erwärmung stärker abschmelzen könnten. Allerdings zeigen aktuelle Satellitenmessungen von den Rändern des grönländischen Eisschildes, der Westantarktis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

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

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

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



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

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

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

Wie Natur und Mensch die Küste verändern

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

Bedeutung und Eigenschaften der Küstenzonen

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

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

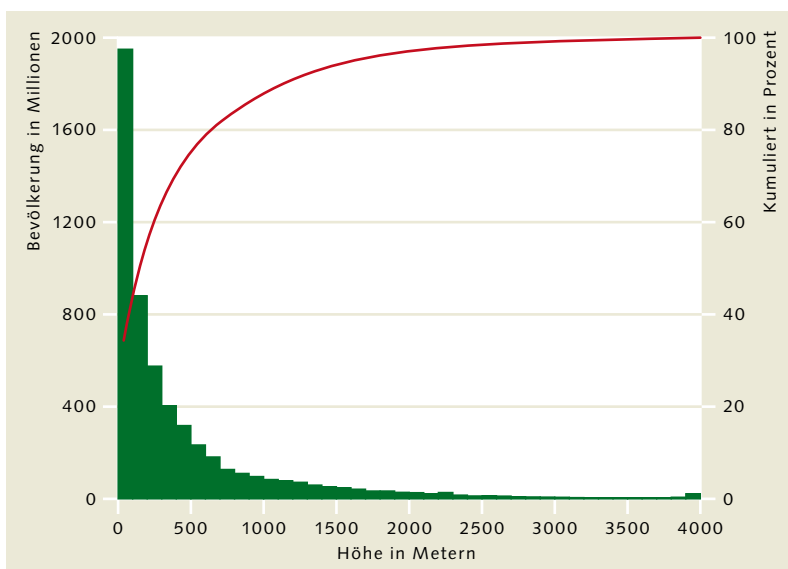
- Sie sind ein bevorzugtes Erholungs- und Tourismusgebiet.
- Sie sind Rohstoffquelle für Mineralien und geologische Produkte.
- Sie beinhalten wichtige Ökosysteme mit einer großen Artenvielfalt.
- Sie wirken als eine wichtige Sedimentationsfalle, die Sedimente aus Flüssen bindet.
- Durch ihre Pufferwirkung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

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

Sedimente formen Küsten

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

3.5 > Bevölkerungsverteilung nach Höhenlage.





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

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

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

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

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

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



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

Sedimente lassen die Erdkruste sinken

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

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

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

Der Mensch prägt das Gesicht der Küsten

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

Die Auswirkungen des Wasserbaus

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

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





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

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

Wenn die Küstenstädte wachsen

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

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

Der Klimawandel verändert die Küsten

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

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

Schmelzen von Meereis und Auftauen von Permafrostböden

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

Veränderung der Süßwasserbilanz, des Niederschlags und des Sedimenteintrags

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

Überflutung von Inseln und Küsten

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

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

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

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

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

Extreme Wasserstände

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

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

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



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

Häufung der Hochwasser

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

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

Der Kampf um den Lebensraum Küste

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

Die bange Frage, wie schlimm es wird

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

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

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

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

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

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





Wie der Klimawandel die Küsten Norddeutschlands bedroht

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

CONCLUSIO

Die Zukunft der Küste – Verteidigung oder geordneter Rückzug?

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

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

Abbildungsnachweis

S. 54–55: Seth Resnick/Getty Images, Abb. 3.1: maribus, Abb. 3.2: Brian Harris/eyevine, Abb. 3.3: imago/Photoshot/Evolve, Abb. 3.4: nach Vermeer und Rahmstorf (2009), IPCC 2007, Church et al. (2008), Abb. 3.5: nach Cohen und Small (1998), Abb. 3.6: Patricia Kreyer/PictureNature/Photoshot, Abb. 3.7: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Abb. 3.8: Keystone France/laif, Abb. 3.9: www.bildagentur-online.com, Abb. 3.10: nach Brooks et al. (2006), Abb. 3.11: Werner Baum/dpa Picture Alliance, Abb. 3.12: Andrew Biraj, Abb. 3.13: [M], Beate Zoellner/Bildmaschine.de, Abb. 3.14: Swart/Hollandse Hoogte/laif, Abb. 3.15: Schrottko, Stattegger und Vafeidis, Universität Kiel, Abb. 3.16: nach Sterr

Reproduktion, Übersetzung in fremde Sprachen, Mikroverfilmung und elektronische Verarbeitung sowie jede andere Art der Wiedergabe nur mit schriftlicher Genehmigung der maribus gGmbH. Sämtliche grafischen Abbildungen im „World Ocean Review“ wurden von Walther-Maria Scheid, Berlin, exklusiv angefertigt. Im Abbildungsverzeichnis sind die ursprünglichen Quellen aufgeführt, die in einigen Fällen als Vorlage gedient haben.

Impressum

Gesamtprojektleitung: Jan Lehmköster

Redaktion: Tim Schröder

Lektorat: Dimitri Ladischensky

Redaktionsteam Exzellenzcluster: Dr. Kirsten Schäfer, Dr. Emanuel Söding, Dr. Martina Zeller

Gestaltung und Satz: Simone Hoschack

Bildredaktion: Petra Kossmann

Grafiken: Walther-Maria Scheid für maribus

ISBN der Printversion: 978-3-86648-000-1

Herausgeber: maribus gGmbH, Pickhuben 2, 20457 Hamburg

www.maribus.com