1 Die Dynamik der Küsten

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

Vom Werden und Vergehen der Küsten

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

Besondere Anziehungskraft

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

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

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

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

- sie umfassen etwa 20 Prozent der Erdoberfläche;
- sie bieten wichtige Transportwege und Industriestandorte;
- sie sind ein bevorzugtes Erholungs- und Tourismusgebiet;
- sie sind Rohstoffquelle für Mineralien und fossile Rohstoffe;
- sie beinhalten wichtige Ökosysteme mit einer großen Artenvielfalt;
- sie wirken als eine wichtige Sedimentationsfalle, die Sedimente aus Flüssen bindet;
- durch ihre Pufferwirkung zwischen Land und Meer beeinflussen sie viele globale Parameter;
- 75 Prozent aller Megastädte mit einer Einwohnerzahl von mehr als 10 Millionen befinden sich in den Küstenzonen;
- 90 Prozent der globalen Fischerei finden in Küstengewässern statt.

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

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

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

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

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

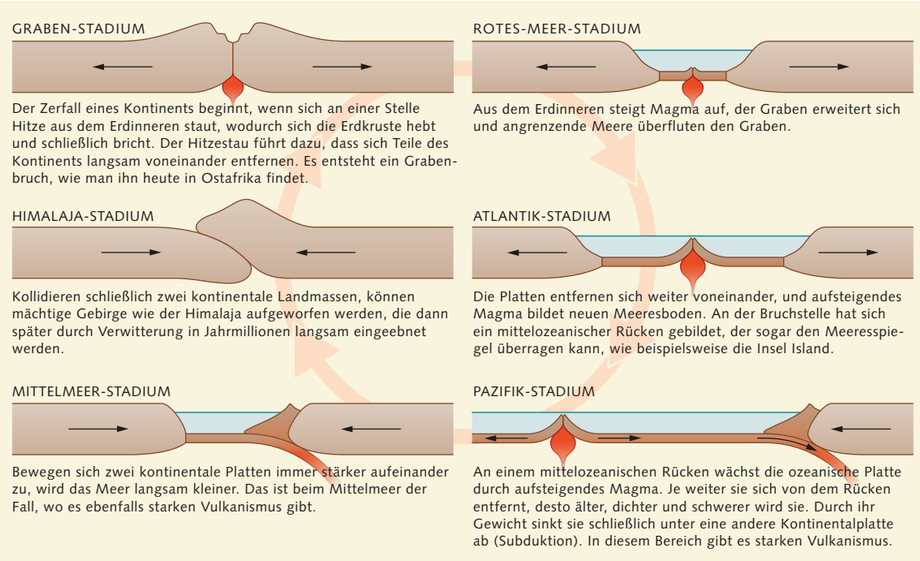
Bei aller Verschiedenheit haben viele Küsten eines gemein: die große Bedeutung für den Menschen. Küsten waren der Ausgangspunkt für Entdeckungsreisen und das Ziel von Eroberern. Archäologen und Völkerkundler gehen davon aus, dass die Küsten schon seit Jahrtausenden bei der Besiedlung neuer Kontinente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

Dynamischer Lebensraum

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

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

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



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

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

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

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

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

Der Superkontinent zerfällt

Im Laufe der **Erdgeschichte** wechselten sich mehrere Phasen ab. So gab es Zeiten, in denen die Kontinentalplatten in Form eines einzigen Superkontinents oder einiger weniger Großkontinente miteinander verbunden waren. Dann folgten Phasen, in denen die Riesen- und Großkontinente wieder auseinanderdrifteten. Diese Phasen werden nach dem kanadischen Geowissenschaftler John Tuzo Wilson, der dieses Prinzip erstmals in den 1960er-Jahren

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

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

in einem Fachartikel beschrieb, als Wilson-Zyklen bezeichnet. Der jüngste dieser Zyklen begann vor etwa 300 Millionen Jahren, als die Kontinentalplatten miteinander kollidierten und den Superkontinent Pangaea formten. Vor etwa 230 Millionen Jahren begann Pangaea wieder zu zerfallen und trennte sich zunächst in einen nördlichen (Laurasia) und in einen südlichen Teil (Gondwana). In einer zweiten Phase spaltete sich dann Gondwana vor 140 Millionen Jahren in die Landmassen auf, aus denen das heutige Afrika, Südamerika, Indien und Australien hervorgingen. Der Zerfall Laurasias begann vor circa 65 Millionen Jahren, als sich die nordamerikanische von der eurasischen Landmasse trennte. Dadurch öffnete sich der Nordatlantik, Indien wanderte mehr als 6000 Kilometer nach Nordosten und kollidierte schließlich vor etwa 40 Millionen Jahren mit der Eurasischen Platte. Im Laufe der Zeit faltete sich dadurch der Himalaja auf. Noch heute wandert Indien langsam Richtung Norden, wodurch der Himalaja jedes Jahr um etwa 1 Zentimeter in die Höhe wächst.

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

Landgang des Lebens

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

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

Die Evolution des Aals – eine Sache der Kontinentaldrift

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

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

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

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

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

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

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

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

Küsten als Brücken zwischen Meer und Land

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

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

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

Auf und Ab im Laufe von Zehntausenden von Jahren

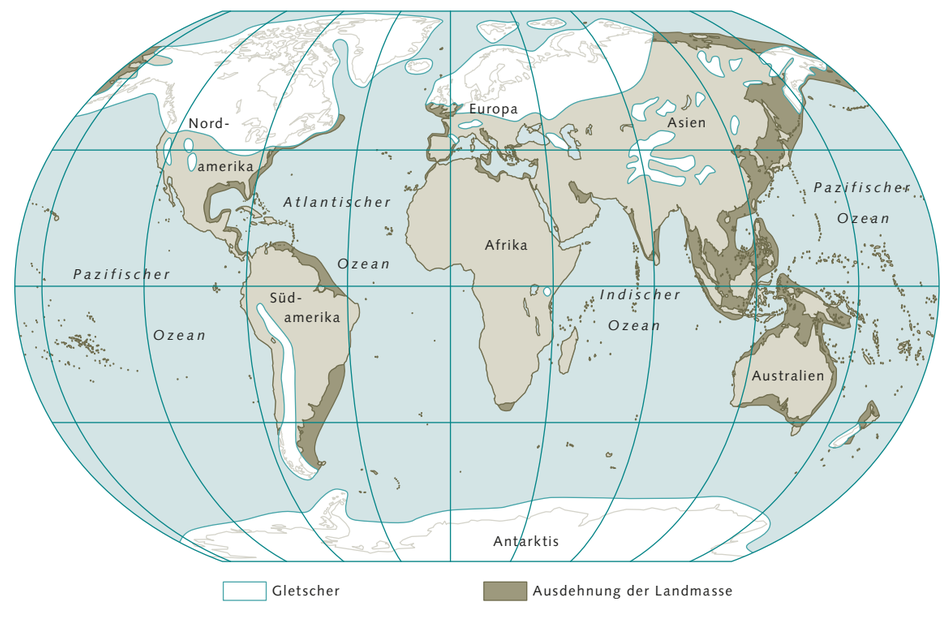
Küsten verändern nicht nur im Laufe von Jahrmillionen ihr Gesicht, wesentliche Veränderungen spielen sich auch schon in kürzeren Zeiträumen ab. Im Rhythmus von mehreren Zehntausend Jahren spielt vor allem der Wechsel von Warm- und Eiszeiten und damit des Meeresspiegels eine Rolle.

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

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

Das große Schmelzen

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

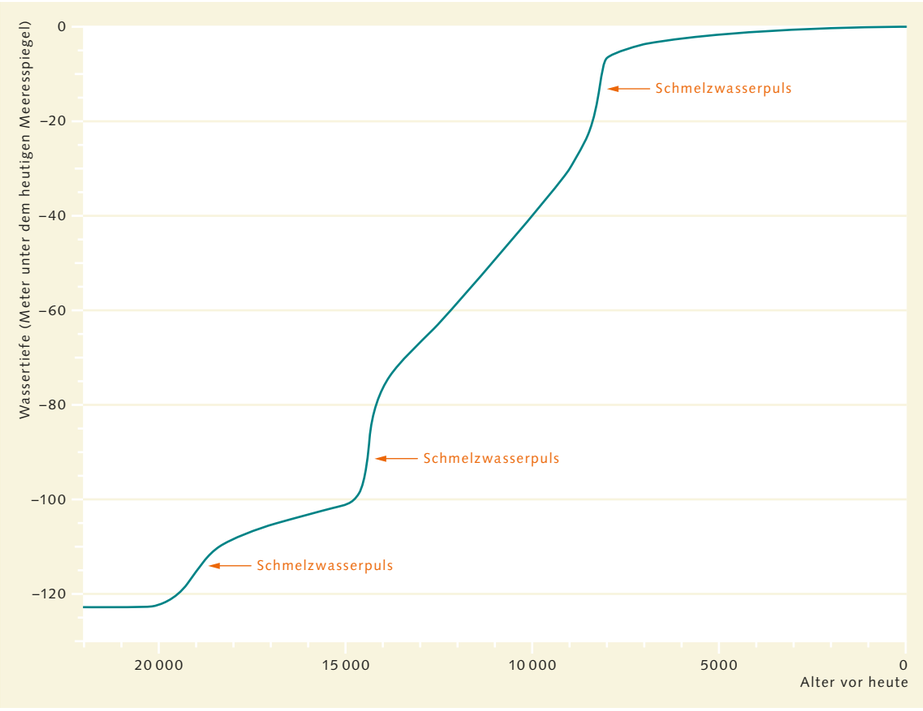


1.9 > Zum Höhepunkt der letzten Eiszeit lag der Meeresspiegel etwa 125 Meter tiefer als heute. Die aus dem Wasser ragende Landmasse war weltweit um etwa 20 Millionen Quadratkilometer größer.

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

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

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



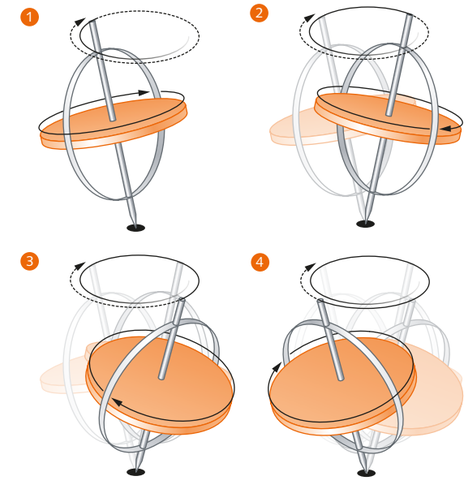
1.10 > Der Meeresspiegel ist über die Jahre nicht kontinuierlich gestiegen. Vielmehr gab es Sprünge, die durch Ereignisse wie die Schmelzwasserpulse ausgelöst wurden.

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

Die Sonne als Klimamotor

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

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



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

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

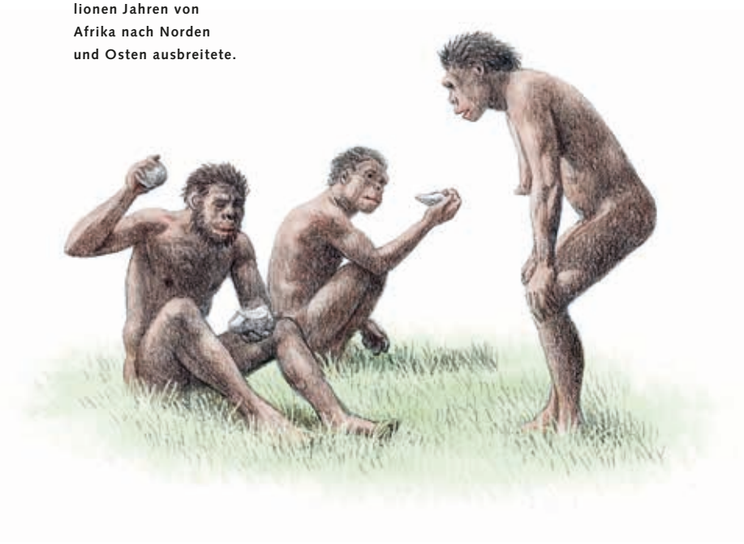
Die Veränderung des Meeresspiegels – ein Taktgeber für die Entwicklung des Menschen

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

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

Ursprung Afrika

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



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

Moderne Technik für alte Spuren

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

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

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

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

Sundaland – ein Schmelztiegel der Menschheit

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

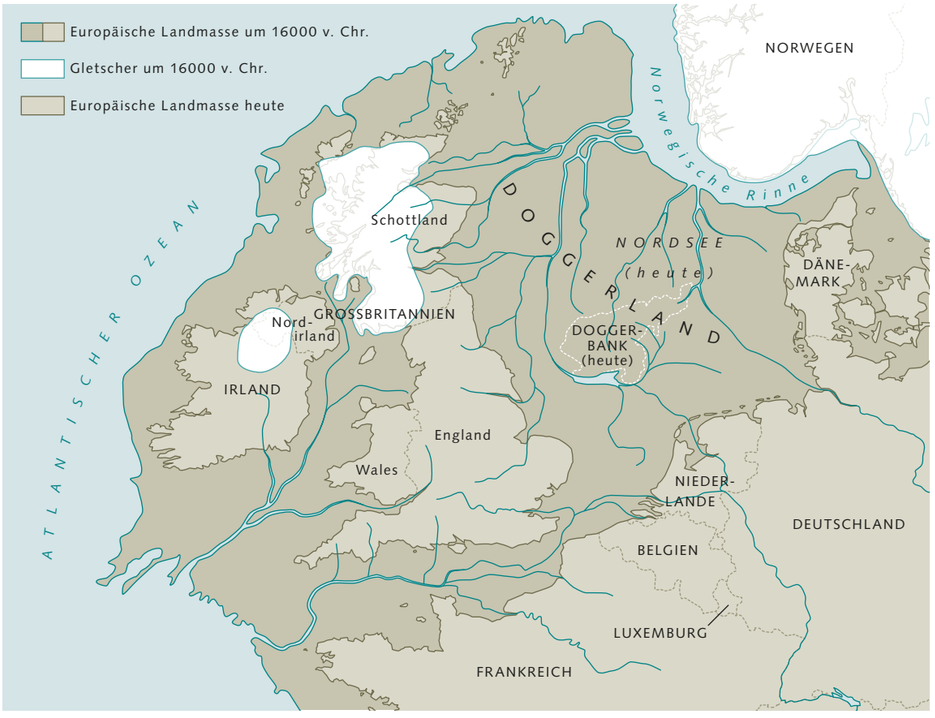
Noch ist über die Siedlungsgeschichte dieser Region zu wenig bekannt, sagen die Experten. Das sei bedauerlich, weil die Region auch ein wichtiger Trittstein für die Besiedlung Neuguineas und Australiens sei, die während der letzten Eiszeit eine zusammenhängende Landmasse bildeten, die als Sahul bezeichnet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

Die Ostsee – ein junges Küstenmeer

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

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

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



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

Land verschwindet

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

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

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

Schmelzwasser bringt die marine Wärmepumpe ins Stocken

Was das Leben an den Küsten betrifft, waren der Meeresspiegelanstieg und die Überflutung großer Regionen die wohl direktesten Folgen der vor 20 000 Jahren beginnenden Warmzeit. Dass diese Klimaänderungen für den Menschen aber noch deutlich weiter reichende Folgen hatten, macht erneut das Beispiel des Agassizsees in Nordamerika deutlich, aus dem sich mehrfach große Schmelzwassermengen ins Meer ergossen. Zu jener Zeit hatte sich die Nordhalbkugel im Vergleich zur Eiszeit schon sehr deutlich erwärmt. Der massive Abfluss von Süßwasser stoppte diesen Trend und führte zu einer neuerlichen Abkühlung der Nordhalbkugel um bis zu 5 Grad Celsius. Der Grund: Der Süßwasserschwall brachte die Wärmepumpe im Atlantik ins Stocken, die sogenannte thermohaline Zirkulation, die wie ein gigantisches Förderband den Globus umspannt (*thermo* – angetrieben durch Temperaturunterschiede; *halin* – angetrieben durch Salzgehaltsunterschiede). Bei diesem Phänomen, das in den polaren Meeresgebieten auftritt, sinkt kaltes salziges Wasser, das besonders schwer ist, in die Tiefe ab und gleitet dort in Richtung Äquator. Während dieses Oberflächenwasser absinkt, strömt warmes Wasser aus südlichen Meeresgebieten nach. Auf diesem Prinzip beruht auch der Golfstrom, dessen Ausläufer durch die thermohaline Zirkulation warmes Wasser aus südlichen Breiten nach Nordosten transportiert und damit zum milden Klima in Westeuropa beiträgt.

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

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

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

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

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

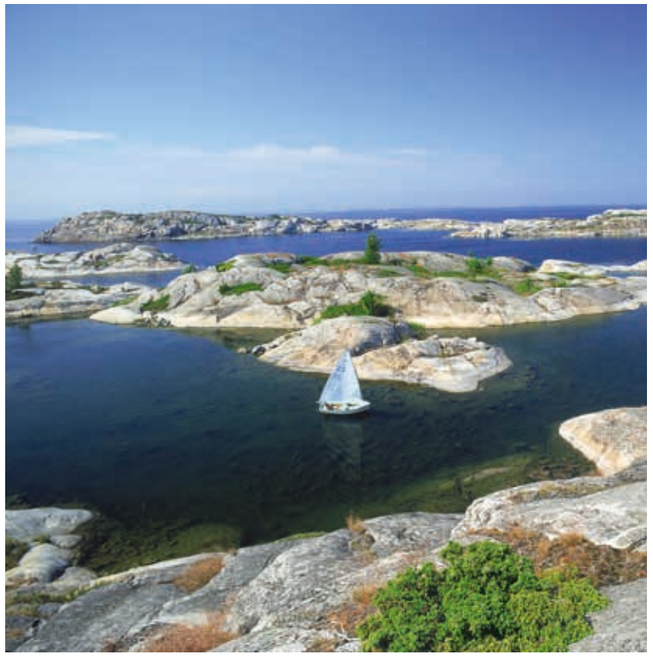
Alles in allem begann der vergleichsweise starke Anstieg des Meeresspiegels vor etwa 20 000 Jahren und dauerte bis vor etwa 6000 Jahren an. Seitdem hat sich der Meeresspiegel mit Schwankungen von wenigen Zentimetern pro Jahrhundert nur geringfügig verändert. Durch den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt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

Gletscher formen Küsten

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

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

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



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

Die vielen Gesichter der Küsten

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

Eine Million Kilometer Küste

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

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

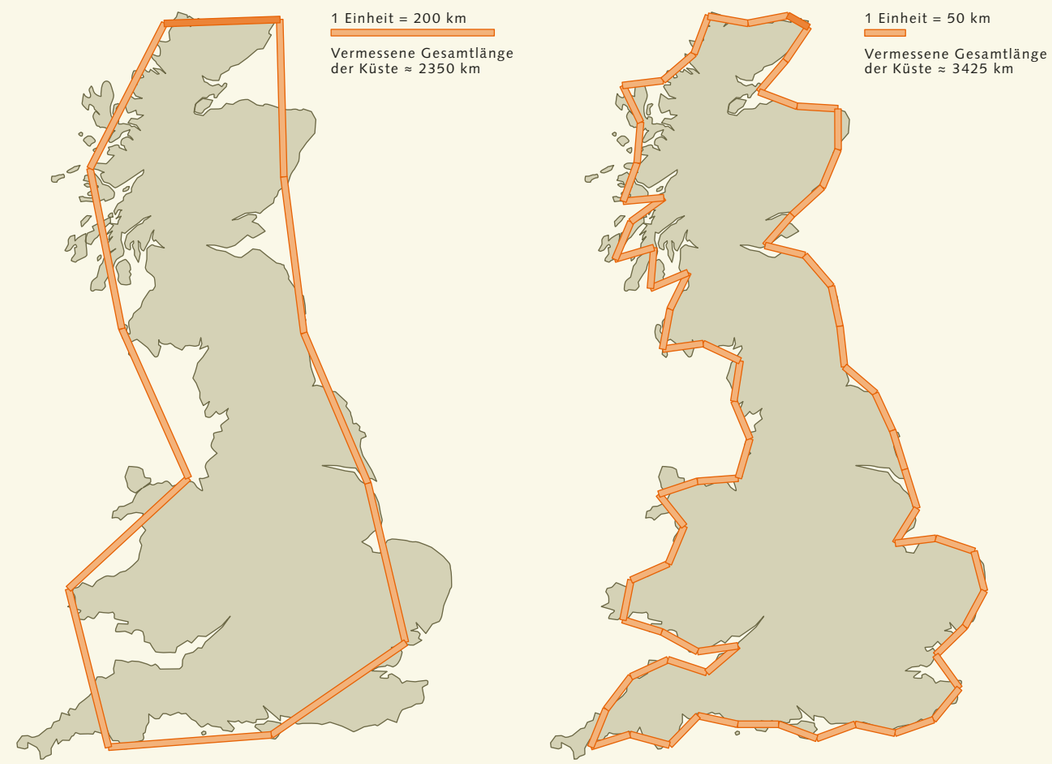
Geologen schätzen die weltweite Länge der Küsten auf etwa 1 Million Kilometer. Wobei die Länge natürlich

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

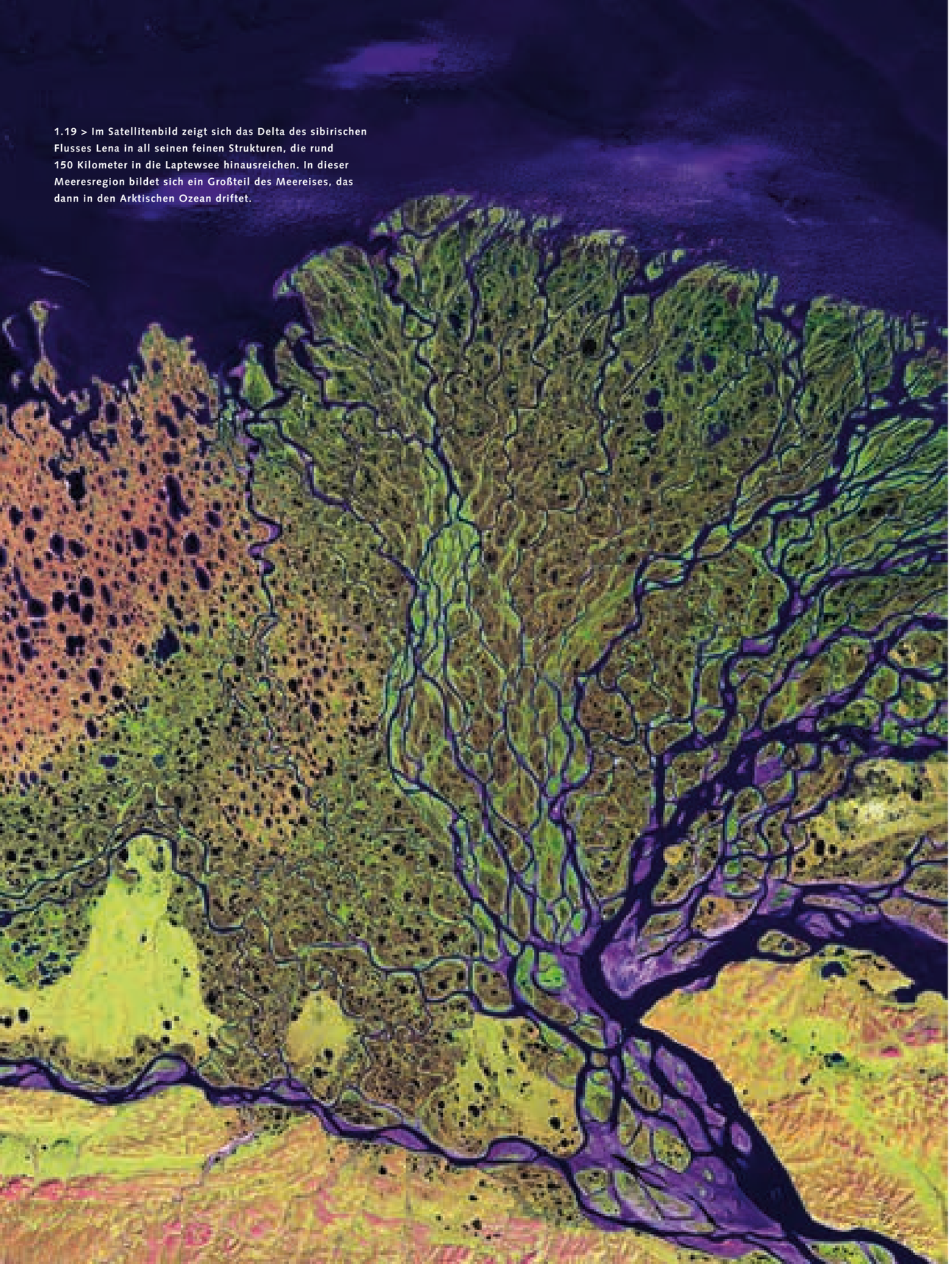
Wie lang sind die Küsten der Welt?

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

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



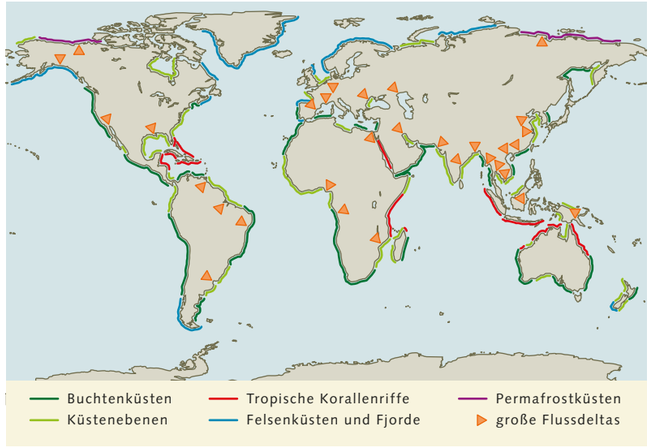
1.18 > Je feiner der Maßstab ist, den man bei der Vermessung einer Küste anlegt, desto größer wird die Länge, die man errechnet.



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

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

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



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

Wind und Wellen gestalten die Küsten

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

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

Tiefgefrorene Küste – der Permafrost

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

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

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

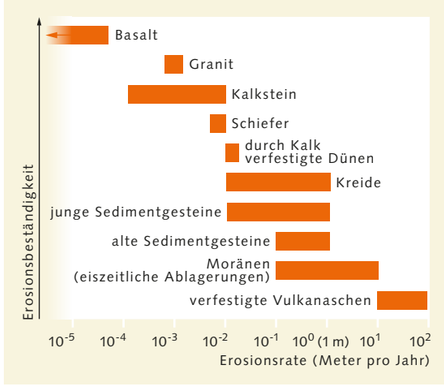
1.21 > Die sibirische Insel Muostach weist eine Permafrostküste auf, die wegen der Klimaerwärmung zunehmend anfällig für Erosion ist.

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

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

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

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

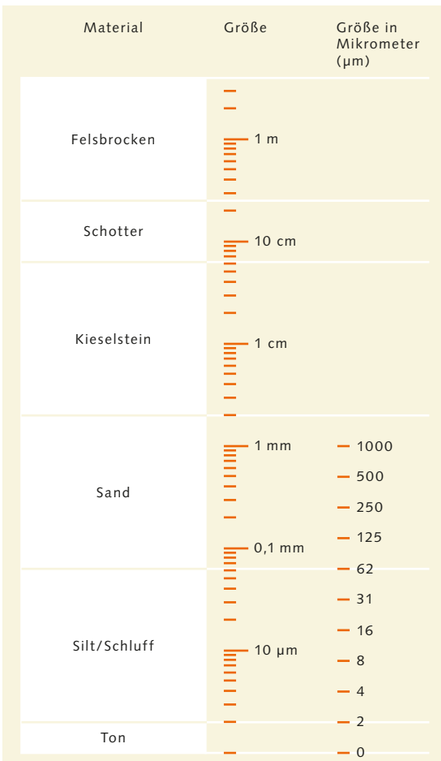


1.23 > Küsten werden, je nach dem Material, aus dem sie bestehen, langsamer oder schneller abgetragen. Manche können in einem Jahr um mehrere Meter schrumpfen.

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

Eine Frage der Partikelgröße

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



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

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

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

Die Filterfunktion der Küsten

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

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

Eine besondere Küstenform – die Wattgebiete

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

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

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

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

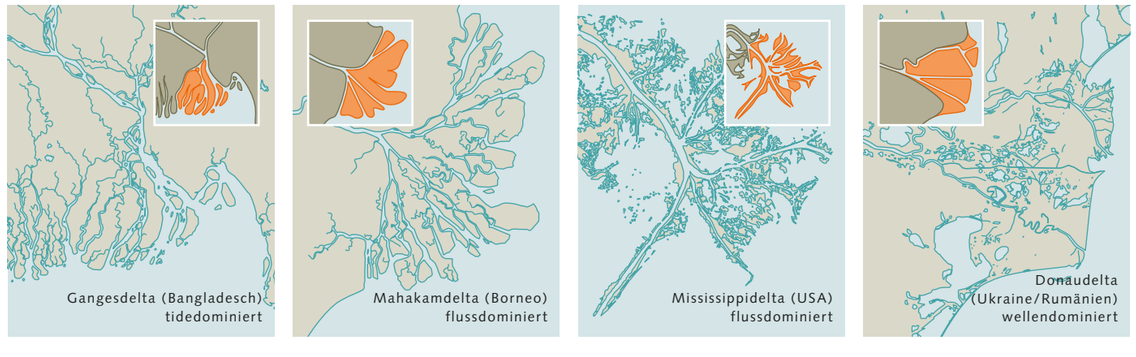
1.25 > Das Wattenmeer der Nordsee ist bei Touristen sehr beliebt. Viele Menschen sind fasziniert, wenn sie zum ersten Mal bei Ebbe über den schlickigen Meeresboden wandern.

Küsten mit stärkerer Filterfunktion

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

Küsten mit geringerer Filterfunktion

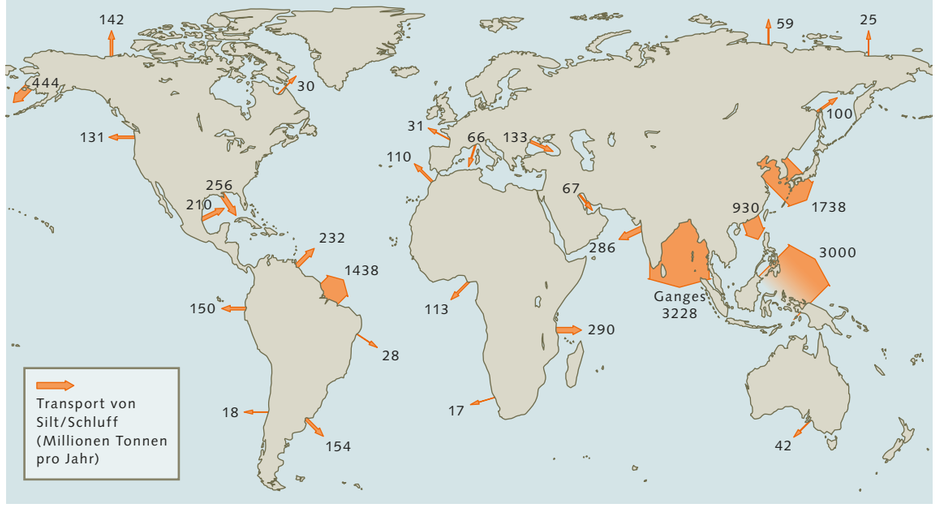
- **Küsten an schnell fließenden Flüssen:** In manchen Fällen tragen große Flüsse zwar viel Material mit sich, doch sind die Fließgeschwindigkeiten so hoch, dass sich das Material nicht in Küstennähe ablagert, sondern in einer Art Wolke ins Meer hinausgetragen wird. Insofern ist die Filterwirkung dieser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



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

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

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



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

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

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

Zerstörung und Aufbau

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

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

Zerstörungsvorgänge

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

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

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

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

Aufbauvorgänge

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

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

Conclusio

Die Gestalt unserer Küsten – eine lange und wechselvolle Geschichte

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

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

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

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

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

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

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