

FOLGEN DES KLIMAWANDELS FÜR OZEANE UND KÜSTEN

Horst Sterr, Kiel

1. Einleitung

An den Rändern der Meere, in den Küstenregionen, ballen sich weltweit Milliarden von Menschen auf engstem Raum, die Mehrzahl aller Großstädte und Megastädte (mit mehr als 10 Mio. Einwohnern) liegt an der Küste. Warum ist das so? Nun, mehr als 70 % der Erdoberfläche werden von den Ozeanen und ihren Nebenmeeren eingenommen. Die Meere trennen also einerseits die Kontinente von einander; andererseits lebt ein großer Teil der Weltbevölkerung seit Jahrtausenden und auch heute noch vom Nahrungsangebot aus dem Meer. Die Küsten sind überdies Ausgangspunkte für Seefahrt und Handel und die Häfen dadurch industrielle Ballungsgebiete geworden. Darüber hinaus stellen Küstensäume und Inseln weltweit die Hauptanziehungsgebiete für Tourismus und Erholung dar.

Nun scheint es, als würde diese herausragende Bedeutung der Meeres- und Küstenräume durch den vom Menschen verursachten Klimawandel ernsthaft in Gefahr gebracht. Welche Rolle spielt eigentlich das Meer im globalen Klimasystem? Welche Gesamtbedeutung haben die Ozeane und Küsten für den Menschen? Und: was ist bislang über die möglichen Folgen des Klimawandels in den Küstenregionen weltweit bzw. an den deutschen Küsten bekannt? Mit welchen Szenarien müssen wir rechnen und können wir noch gegensteuern? Mit diesen Fragen befasst sich das vorliegende Kapitel dieser Broschüre in der hier gebotenen Kürze (für umfassendere Information siehe *WBGU 2006*).

Das Gremium der UN-Klimaexperten (Intergovernmental Panel on Climate Change = IPCC) geht in seinem 4. Sachstandsbericht vom März 2007 davon aus, dass die Anreicherung anthropogener Treibhausgase weltweit zu einer deutlichen Erwärmung führt, vermutlich in der Größenordnung von 2,5 bis 4 °C bis zum Jahr 2100 (*IPCC 2007a*). Das wäre 4-6-mal mehr als der bereits beobachtete Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre von 0,6 °C. Für die Ozeane und Küstenregionen, welche die globalen biogeochemischen Stoffkreisläufe und damit auch das Klimasystem in hohem Maße beeinflussen, ist mit weit reichenden Konsequenzen zu rechnen. Zu diesen gehören Verschiebungen im Nährstoffzyklus und in der Verteilung der Arten in den Meeren, die Bedrohung sensibler Ökosysteme und die Zunahme von Risiken

für die Küstenbevölkerung. Letztere resultieren einerseits aus dem Meeresspiegelanstieg und der Zunahme von Sturmereignissen (Überflutungsgefährdung, Küstenerosion, Salzwassereinfluss), andererseits aus der bereits fortgeschrittenen Degradation mariner Ressourcen (Rückgang der Fischbestände, Verlust der Filter- oder Pufferfunktionen von Korallenriffen, Mangroven, Watten etc.).

Die bereits durch intensive menschliche Nutzung stark in Mitleidenschaft gezogenen Meeres- und Küstenräume geraten nun also durch die Veränderungen im globalen Klimasystem unter zunehmenden Stress. Damit stellt sich die Frage, ob oder inwieweit Ozeane und Küstengebiete auch in den kommenden Jahrzehnten bis Jahrhunderten ihre elementare Bedeutung als Lebens- und Wirtschaftsraum für die Erdbevölkerung werden behalten können oder ob sie sich vielmehr zu einer langfristigen Bedrohung für Mensch und Klima entwickeln werden.

2. Bedeutung der Meere und Küstengebiete

Die Meere spielen eine zentrale Rolle im Kohlenstoffkreislauf unseres Planeten und haben bisher rund ein Drittel der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen. Da sie mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche bedecken, nehmen sie zunächst den überwiegenden Anteil der Sonnenwärme auf und prägen als Temperaturregulator unser Klimasystem. Auch der globale Wasserkreislauf wird vor allem durch die Verdunstung aus den Meeren angetrieben. Überdies beherbergen die Ozeane einen großen Reichtum an biologischer Vielfalt und versorgen den Menschen mit lebenswichtigen Proteinen, zumindest solange die marinen Ökosysteme weitgehend intakt sind. Eine intakte Meeresumwelt ist aber auch ein wichtiger Faktor für wirtschaftliche Entwicklung, soziales Wohlergehen und Lebensqualität. Mit anderen Worten: neben der Rolle als Klimaregulator erfüllen die Ozeane und Küstengewässer eine Vielzahl ökologischer und ökonomischer Funktionen, welche in Regulations-, Produktions-, Nutzungs- und Informationsfunktionen untergliedert werden können (Tab.1).

Es steht zu befürchten, dass die in Tab. 1 genannten Funktionen, welche für die ökologische Stabilität und die menschlichen Nutzung der Küstenlandschaften von herausragender Bedeutung sind, durch die klimabedingten Entwicklungen in diesem Jahrhundert tief greifend beeinträchtigt werden können. Überdies ist zu beachten, dass diese Räume – auch die deutschen Küstenregionen – bereits durch andere

Funktionen und Nutzungen	Ozeane	Küstengewässer
<i>Regulationsfunktionen</i>		
	(Beispiele)	(Beispiele)
Regulation der lokalen Energie- und Stoffbilanz	Wärmetransport durch Meeresströmungen; Upwelling	Sedimentablagerung am Kontinentalschelf
Regulation der chemischen Zusammensetzung von Wasser und Sediment	Deposition von Karbonaten und Salzen auf dem Meeresboden	Eintrag von Süßwasser an Flussmündungen; Ablagerung von (biogenem) Schlack und Sediment
Regulation des Wasseraustausches zwischen Land und Meer	Meeresverdunstung als Motor des globalen Wasserkreislaufs	Oszillation der Salz-Süßwassergrenze
Speicherung bzw. Verteilung von Nährstoffen und organischer Substanz	Ablagerung großer Mengen biogener Sedimente in Tiefseebecken	Bindung von terrigenen Nährstoffen (bes. N und P) an Sedimentpartikeln
Regulation der biotischen Nahrungsnetze	Vorhandensein spezieller Laichgebiete (Sargasso-See)	Verzahnung von Laich- und Aufwuchsräumen z.B. Ästuare
Nähr- und Schadstoff-Filterung	Sedimentation von Schwermetallen und Plankton	Existenz flacher Flutsäume (Seegras-, Salzwiesen)
Erhaltung von Lebens- und Aufwuchsräumen	regionale Vielfalt thermischer, chemischer u.a. Bedingungen	großräumige Ökosysteme (Riffe, Mangroven, Watten)
Erhaltung der Artenvielfalt	freie Fluktuation von Arten horizontal und vertikal	Entwicklung raumspezifischer Artendiversität
<i>Produktions- und Nutzungsfunktionen</i>		
Produktion von Trink- und Brauchwasser	Meerwasserentsalzung	Meerwasserentsalzung in Ballungs-/Trockengebieten
Nahrungsproduktion	Hochseefischerei (z.B. Hering, Thunfisch), Großalgenernte	Küstenfischerei (z.B. Dorsch, Muscheln), Aquakulturen
Produktion von Rohstoffen, Baumaterial etc.	Manganknollen, Öl, Erdgas	Sand, Korallenkalk, Mangrovenhölzer usw.
Produktion biologisch-genetischer Ressourcen	langzeitliches Überleben von Spezies	Ausprägung vielfältiger Artenspezifizierungen
Raum- und Ressourcenangebot für Menschen	Förderplattformen, Windfarmen, Schutzgebiete	Küsten- und Inselfiedlungen, Subsistenzwirtschaft; Häfen
Energienutzung	Wind, vertikaler Wärmeaustausch in Warmwassergebieten	Gezeitenkraftwerke, on-shore und off-shore Windanlagen
Transport	Seeverkehr	Küstenschifffahrt
Tourismus und Erholung	Kreuzfahrten, Inseltourismus	Ferienzentren, Segeln, Surfen, Tauchen, etc.
<i>Informationsfunktionen</i>		
ästhetische Information	Sonnenuntergang auf See	Naturerlebnisräume, Tierbeobachtung
historisch-kulturelle Information	Schiffswracks aus mehreren Jahrhunderten	Küstenarchäologie
erzieherische Funktion	Dokumentation mariner Lebewelt	Dokumentation spezifischer Küstenökosysteme (Korallen)
naturwissenschaftliche Information, neue Forschungsbereiche	Genetischer Pool der Meeresorganismen; biologische Evolution	Ökosystem- & Evolutionsforschung; Gen- & Medizintechnikentwicklung

Tab. 1: Bedeutung der Meere und Küsten.

Umweltveränderungen, z.B. durch intensive Grundwassernutzung, Nähr- und Schadstoffeinträge, künstliche Vertiefung der Flussmündungen, bereits stark in ihrem ökologischen Gleichgewicht betroffen bzw. gestört sind.

Insgesamt werden also die Bedrohungen bzw. Veränderungen der Meere und der küstennahen Lebensräume durch ein Zusammenwirken klimabedingter und anthropogener (menschgemachter) Risiken stark zunehmen und eine große Herausforderung für die Menschheit im 21. Jahrhundert darstellen.

3. Auswirkungen des Klimawandels auf die Meere

Laut IPCC werden die Reaktionen des Globalklimas auf die rasch steigenden Treibhausgaskonzentrationen auch die physikalischen, biologischen und biogeochemischen Charakteristika der Ozeane auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen beeinflussen. Zunächst wird sich die Wassersäule in den offenen Meeren bis in Tiefen von ca. 3000 m deutlich erwärmen, was schon heute mit Hilfe von Satellitendaten gut nachweisbar ist. Als unmittelbare Folgen der Erwärmung werden beschrieben:

- Abnahme der Meereisbedeckung und regionale Veränderungen des Salzgehalts der Ozeane
- Änderungen der ozeanischen Zirkulationsmuster („ozeanisches Förderband“)
- Meeresspiegelanstieg durch Ausdehnung der Wassersäule und Eisschmelze
- Auftreten von tropischen Wirbelstürmen
- polwärtige Verschiebung der Lebensräume und Arten; Veränderungen in der Artenvielfalt
- starke Belastung von sensiblen oder bereits geschädigten Ökosystemen, insbesondere der Korallenriffe

Eine geänderte ozeanische Zirkulation und vertikale Durchmischung wiederum beeinflussen das Nährstoffangebot und folglich die Produktion von Algen und Biomasse im Meer. In einem sog. Rückkopplungseffekt kann es zu einer Verringerung der Kohlenstoffspeicherung im Meer kommen. Verstärkt wird dieser Effekt möglicherweise durch den Prozess der Ozeanversauerung. Alles in allem ist zu erwarten, dass die Funktionen der Meere und Küstengewässer (Tab. 1) im Zuge des Klimawandels eine Reihe von Beeinträchtigungen bzw. Störungen erfahren werden. Im folgenden werden fünf Problembereiche skizziert, nämlich 1) Temperatur-Meereis-Meereströmungen; 2) Meeresspiegel; 3) Stürme, Sturmfluten & Seegang; 4) Ozeanversauerung; 5) Ökosystemgefährdung.

4. Meereis – Salzgehalt – Meereströmungen

Eindeutige Aussage aller Klimamodelle ist, dass die „menschgemachte“ Erwärmung der Erde durch Treibhausgase auf der Nordhalbkugel und besonders in den nördlichen Polarregionen stärker ausfallen wird als im globalen Durchschnitt. Statt der global angenommenen 2,5 bis 4 °C wird für die Gebiete nördlich 65° eine Temperaturzunahme von bis zu 6 °C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartet. Diese starke Erwärmung wird zu einem fortschreitenden Abschmelzen des Nordpolareises führen und damit zu einer Verringerung der Fläche mit Meereisbedeckung. Das Abschmelzen des im Nordmeer schwimmenden Eises resultiert nicht – wie oft vermutet – in einer Erhöhung des Meeresspiegels, da es sich im Schwimmgleichgewicht mit dem Ozeanwasser befindet (wie die Eiswürfel im Trinkglas). Stattdessen bringt es zwei andere, ebenfalls bedeutende Effekte mit sich: zum einen verstärkt sich die Sonneneinstrahlung im nordpolaren Raum weiter dadurch, dass weniger solare Strahlung durch die verkleinerte Eisfläche reflektiert werden kann, denn die Meeresoberfläche reflektiert die Sonne deutlich weniger als Eis (= Abnahme der Albedowirkung). Hier tritt also ein sog. Selbstverstärkungsmechanismus im Klimasystem in Kraft, der die Erwärmung in den höheren Breiten weiter anheizt. Zum anderen wird die Meeresoberfläche beim Abschmelzen des Polareises mit Süßwasser bedeckt und der Salzgehalt des Meeres dadurch verringert. Das scheint auf den ersten Blick vielleicht für einige Meeresorganismen von Bedeutung zu sein, für den Menschen aber nicht weiter schlimm. Bei näherer Betrachtung jedoch stellt sich der Salzgehalt des Meerwassers bzw. dessen regionale Unterschiede als der zentrale Antriebsmechanismus für die weltweite Ozeanzirkulation heraus. Abb. 5, Seite 6 zeigt das System der globalen Meereströmungen („ozeanisches Förderband“). Es wird angetrieben durch das Absinken riesiger Wassermassen im europäischen Nordmeer sowie im antarktischen Meer. In diesen polnahen Gebieten sinkt kaltes und salzhaltiges (und damit dichtes, schweres) Ozeanwasser in die Tiefe, von wo es in wärmere Regionen zurückströmt. Wenn nun das oberflächennahe Wasser des Nordpolarmeeres durch Eisschmelze „verdünnt“ und gleichzeitig zunehmend erwärmt wird, dann schwächt sich die Umwälzbewegung im Nordatlantik dadurch ab. Der Nordatlantikstrom, meist umgangssprachlich als Golfstrom bezeichnet, der einen „Wärmeofen“ für NW-Europa darstellt, könnte eventuell ganz versiegen, oder deutlich weniger Wärme als bisher zuführen. Paradoxerweise könnte es also mittelfristig, d.h. nach dem 21. Jhd. in Westeuropa sogar zu einer Abkühlung

kommen, südlichere Regionen würden sich dafür aber noch stärker erwärmen. Welche klimatischen Folgen ein 'Abreißen' des Golfstroms für die nord- und westeuropäische Region haben könnte, wird deutlich, wenn man das Klima Nordost-Kanadas oder Süd-Alaskas als Vergleich heranzieht, die auf der gleichen geographischen Breite liegen wie Norddeutschland. Das Ausmaß und der Zeitpunkt einer Änderung der ozeanischen Zirkulationsmuster sind allerdings bislang noch nicht präzise abschätzbar.

5. Meeresspiegelanstieg

Während der letzten Eiszeit lag der Meeresspiegel weltweit ca. 120 m tiefer und stieg zwischen 12.000 und 6.000 vor heute um etwa diesen Betrag an. Etwa 6000 Jahre lang, bis zum Beginn der Industrialisierung, war der Meeresspiegel dann weitgehend stabil. Seit ca. 150 Jahren verfügen wir über die Technik von einigermaßen verlässlichen Pegelmessungen und erst seit Anfang der 1990er Jahre kann man Änderungen des Meeresspiegels mit Hilfe von Satelliten recht genau bestimmen. Von diesen Beobachtungen wissen wir, dass es im 20. Jahrhundert einen Anstieg von global ca. 15 cm gab (also 1,5 mm pro Jahr); regional sind allerdings starke Abweichungen von diesem Wert zu verzeichnen, z.B. durch Landhebungs- oder Senkungsprozesse. Der Anstiegstrend hat sich zum Ende des 20. Jhd. hin und seither deutlich beschleunigt, wie die Zahlen in Tab. 2 zum Ausdruck bringen. Von fast allen Klimaforschern wird nun für das 21. Jhd. und danach eine deutliche Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung prognostiziert und viele Experten halten diese für eine der gravierendsten Folgen des Klimawandels überhaupt. Folgende Fragen sind vorrangig zu klären: welche Prozesse tragen insgesamt zum Meeresspiegelanstieg bei? Wie rasch geht der Anstieg global bzw. regional vor sich? Und: Wie hoch wird bzw. kann der Meeresspiegel bis zum Ende des 21. Jhd. maximal ansteigen? Die größten Volumenschwankungen der Weltmeere resultieren aus den als Eis auf dem Festland gebundenen Wassermengen. Die derzeit vorhandenen Landeismassen würden bei vollständigem Abschmelzen den Meeresspiegel um knapp 70 m ansteigen lassen; davon fallen 61,1 m auf das antarktische Inlandeis, 7,2 m auf den grönländischen Eisschild und ca. 1,5 m auf die übrigen Eiskörper incl. aller Gebirgsgletscher. Trotzdem brauchen wir auch langfristig keine Überflutungen im Bereich von Zehnermetern befürchten, da das Antarktiseis als weitgehend stabil gilt. Stattdessen bewegen sich die Abschätzungen für den Meeresspiegelanstieg (MSA)

im 21. Jahrhundert bisher noch im Dezimeterbereich. Im 4. IPCC-Bericht geht man von einer MSA-Spanne zwischen 20 cm und 60 cm bis zum Jahr 2100 aus, je nach Energienutzungs-Szenario (Abb. 1). Allerdings bestehen hier weiterhin erhebliche Unsicherheiten und es ist erforderlich, die Prozesse zu betrachten, die im Einzelnen zum Meeresspiegelanstieg beitragen. Der bisherige – und auch der künftige – MSA setzt sich im Wesentlichen aus zwei Effekten zusammen, nämlich zum einen aus der erwärmungsbedingten Ausdehnung der Wassersäule (auch sterischer Effekt genannt) und zum anderen aus der Zufuhr von Wasser beim Abschmelzen von Eis (eustatischer Effekt) (Tab. 2). In den letzten 40 Jahren dominierte der sterische Effekt; dieser nahm in jüngster Zeit weiter stark an Bedeutung zu und hat sich im Zeitraum 1993–2003 gegenüber 1961–2003 fast vervierfacht (von 0,42 auf 1,6 mm/J.). Auch ist insgesamt eine deutliche Beschleunigung des MSA am Ende des 20. Jhd. von vormals 1,8 auf nun 3,1 mm/Jahr festzustellen. Noch immer bleibt allerdings auch ein Unterschied zwischen den berechneten und den beobachteten Werten, was daran liegt, dass die Klimamodelle die exakten Prozessabläufe, die zum Meeresspiegelanstieg führen, noch nicht hinreichend präzise abbilden können (IPCC 2007a; 2007b). Tab. 2 zeigt, dass hinter dem Ausdehnungseffekt das Abschmelzen von Gletschern und Eiskappen den zweitgrößten Anteil am MSA hat. Allerdings ist dieser Anteil im letzten Jahrzehnt weniger rasch gewachsen als der

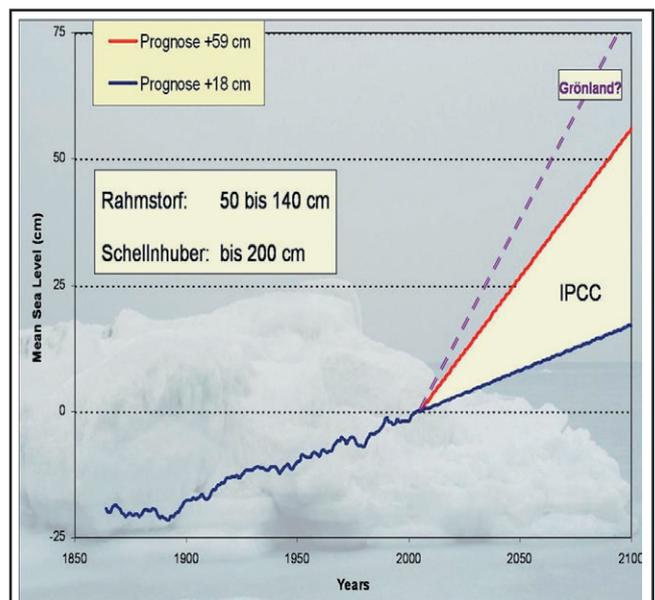


Abb. 1: Gemessener Anstieg des Meeresspiegels von 1870-2005 und Abschätzung des weiteren Trends im 21. Jhd. Die Spannweite der IPCC-Abschätzung (18-59 cm) ist geringer als die zweier deutscher Wissenschaftler, welche ein rascheres und stärkeres Abschmelzen des Grönlandeises vermuten.

Beiträge zum MSA	Ausmaß des Meeresspiegelanstiegs (in mm pro Jahr)	
	1961 - 2003	1993 - 2003
Thermische Ausdehnung	0,42 ± 0,12	1,6 ± 0,5
Gletscher und Eiskappen	0,50 ± 0,18	0,77 ± 0,22
Grönland-Eisschild	0,05 ± 0,12	0,21 ± 0,07
Antarktisches Eisschild	0,14 ± 0,41	0,21 ± 0,35
Summe individueller Beiträge zum Meeresspiegelanstieg (geschätzt)	1,1 ± 0,5	2,8 ± 0,7
Gesamter Meeresspiegelanstieg (aus Beobachtungen) ¹	1,8 ± 0,5	3,1 ± 0,7
Differenz (beobachtete Werte abzüglich der geschätzten Werte)	0,7 ± 0,7	0,3 ± 1,0

Tab. 2: Beobachtete Rate des Meeresspiegelanstiegs seit 1961 im Vergleich mit den (geschätzten bzw. berechneten) Beiträgen aus verschiedenen Quellen. (¹ Seit 1993 stehen präzisere Beobachtungen des Meeresspiegels durch Satelliten zur Verfügung).

Beitrag, der für das Abschmelzen von Grönlands berechnet wurde. Dieser jüngste Trend bei der Beschleunigung des Eisabschmelzens auf Grönland wird von einigen Forschern als ein alarmierendes Signal gewertet. Sie vermuten eine im 21. und 22. Jahrhundert stark beschleunigte Bilanzänderung beim Grönlandeis hin zum Eisverlust. Zum Beispiel wird – bedingt durch die wärmeren Temperaturen im Nordpolarmeer – ein rascheres Abfließen bzw. Kalben der Grönlandgletscher ins Meer angenommen. Die negative Eisbilanz wird vermutlich auch nicht durch höhere Schneefälle ausgeglichen, wie sie im Zuge der Erwärmung der Atmosphäre zu erwarten sind. Bei der großen Menge des auf Grönland gebundenen Eises ist daher mittelfristig (ab 2100) ein MSA-Beitrag von mehr als 1 m durch Grönland zu befürchten (Abb. 1). Längerfristig, d.h. bis 2300 werden ähnliche Prozesse des Eisverlustes sogar im Bereich des westantarktischen Eisschildes für möglich gehalten. In der Summe könnten anhaltende Massenverluste der beiden großen Eisschilder dann einen Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern zur Folge haben (Tab. 3). Beim Meeresspiegelanstieg müssen derart lange Zeiträume berücksichtigt werden, weil die relevanten Prozesse, wie das Abschmelzen

von Eisschilden und die Durchmischung der Ozeane, langsame geophysikalische Vorgänge sind. Aufgrund der physikalischen Trägheiten im System Meer werden diese Prozesse auch nach einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen und des Oberflächenklimas erst viele Jahrhunderte später zum Stillstand kommen. Ein Szenario mit einem MSA von 5 m oder mehr ist in seinen vielfältigen Auswirkungen derzeit kaum vorstellbar, aber selbst ein Anstieg um 0,5 m, d.h. eine Verdreifachung des bisherigen Wertes, wird eine Fülle von Problemen für die Küstenbewohner weltweit mit sich bringen (siehe unten).

6. Stürme, Sturmfluten & Seegang

Die Folgen des Klimawandels machen sich nicht nur in Form des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs bemerkbar. Ein allmählich verlaufender Anstieg über Jahrzehnte bis Jahrhunderte wäre ja auch mit technischen Mitteln möglicherweise noch beherrschbar. Die Gefahr für Küsten- und Inselbewohner resultiert dagegen meistens aus den Wetterextremereignissen in Form von tropischen Wirbelstürmen bzw. Sturmfluten, die mit ungewöhnlich hohen Wasserständen und Wellen in unregelmäßigen zeitlichen Abständen auf die Küsten treffen. Die gesellschaftlichen Risiken solcher Extremereignisse werden weiter unten erörtert. Im Zusammenhang mit globaler Erwärmung und Meeresspiegelanstieg stellt sich nun die Frage, ob gravierende Veränderungen auch bei den ozeanischen Extremereignissen zu erwarten sind. In diesem Bereich sind die wissenschaftlichen Erkenntnisse bisher allerdings noch recht lückenhaft. Am ehesten herrscht noch Einigkeit unter den Experten, dass die Stärke tropischer Wirbelstürme mit der Erwärmung der tropischen Meere zunimmt, denn aus dem warmen Oberflächenwasser ziehen Hurrikane und Taifune ihre zerstörerische Energie. Einige Fachleute sehen die Hurrikansaison 2005 im karibischen Raum als Vorboten zukünftiger Entwicklung an: dort gab es mit 27 Hurrikane so viele wie nie zuvor in einem Jahr; noch nie wuchsen so viele (nämlich 15) zur vollen Stärke heran und noch nie gab es drei Hurrikane der stärksten Kategorie 5 hintereinander, wobei bei ‚Wilma‘ (19.10.2005) der niedrigste je an der Erdoberfläche gemessene Luftdruck erreicht wurde (882 hPa). Und mit ‚Vince‘ erreichte im Oktober 2005 erstmals ein Hurrikan den westeuropäischen Küstenraum, nämlich Madeira und West-Spanien. Da man allerdings aus dem 20. Jhd. bereits Zyklen bei der Hurrikanaktivität kennt, lässt sich hieraus noch kein eindeutiger Trend ableiten.

Für den Nordatlantik und den Nordseeraum sind bislang ebenfalls keine eindeutigen Trends in Richtung auf

häufigere Sturmflutwetterlagen zu erkennen. Allerdings sagen die neuesten meteorologischen Modelle, mit denen Windstärken, Windrichtung, Wasserstände und Seegang in der Nordsee berechnet werden, vorher, dass Starkwinde aus N bis W über der Dt. Bucht zunehmen könnten und damit auch die Sturmfluten 30-50 cm höher auflaufen würden als bisher. Eine relativ sichere Annahme kann jedoch getroffen werden: bei einem um ca. 50 cm höherem Meeresspiegel (s.o.) werden gefährliche Sturmflutwasserstände wesentlich häufiger eintreten als vorher, einfach deshalb, weil das Basisniveau nun um einen halben Meter höher liegt. Ein sog. 100-jähriger Wasserstand, wie er bei der Sturmflut 1976 an der Nordseeküste eintrat (z.B. Cuxhaven mit 5,1 m über Mittelwasser), könnte aufgrund des Meeresspiegelanstiegs daher nun zu einem 10-jährigen Ereignis werden. Hier liegt ein Rückkopplungseffekt zwischen Meeresspiegelanstieg und Sturmflutgefahr vor, der nicht an meteorologische Veränderungen gebunden ist und bisher leider (zu) wenig beachtet wurde. Darüber hinaus wird mit diesen häufiger auftretenden Extremwasserständen im Normalfall auch hoher und energiereicher Seegang einhergehen, der nicht nur am Deich und im Vorland (Salzwiesen, Watten) sondern auch an den Stränden und Dünen zerstörerische Wirkung entfalten kann.

7. Ozeanversauerung

Seit der Mensch immer mehr CO₂ in die Atmosphäre befördert, nimmt auch die CO₂-Konzentration in den oberen Meeresschichten zu. Gegenwärtig nimmt der Ozean etwa 30 % der anthropogenen CO₂-Emissionen auf, das sind jährlich 2 Gt (Gigatonnen) Kohlenstoff zusätzlich zu dem bereits vorhandenen Kohlenstoff. In der Atmosphäre wirkt CO₂ zwar als Treibhausgas, verhält sich chemisch aber neutral, d.h. es reagiert nicht mit anderen Gasen. Im Ozean dagegen ist CO₂ chemisch aktiv. Das gelöste CO₂ trägt zu einer Absenkung des pH-Wertes und damit zu einer Versauerung des Meerwassers bei. Seit Beginn der Industrialisierung ist der pH-Wert des Oberflächenwassers der Meere im Mittel um etwa 0,11 Einheiten gesunken. Ausgehend von einem leicht alkalischen vorindustriellen pH-Wert von 8,18 hat also der Säuregehalt an der Meeresoberfläche zugenommen. Dadurch verändert sich auch die Konzentration von Karbonaten im Meerwasser (weniger Karbonat, mehr Hydrogenkarbonat), was zur Folge hat, dass Organismen wie Korallen, Muscheln etc. ihre Kalkgebilde, Schalen, Riffstrukturen usw. nicht mehr mit der bisherigen Geschwindigkeit aufbauen können. In diesen marinen Kalkablagerungen werden aber große Mengen von Kohlenstoff langfristig

Mechanismus	Anstieg in m
Thermische Ausdehnung	0,4 - 0,9
Gebirgsgletscher	0,2 - 0,4
Grönland	0,9 - 1,8
Westantarktis	1 - 2
<i>Summe</i>	<i>2,5 - 5,1</i>

Tab. 3: Geschätzter globaler Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2300 bei einer auf 3°C begrenzten globalen Erwärmung (Quelle: WBGU 2006).

gespeichert. Insofern tritt auch hier wiederum ein Rückkopplungseffekt in Kraft, der bewirkt, dass die Aufnahmefähigkeit der Meere für CO₂ allmählich sinkt. Meereswissenschaftler berechnen bereits bis zur Mitte dieses Jahrhunderts eine deutliche Verringerung der Aufnahmekapazität der Ozeane für anthropogenes CO₂. Damit verliert die global mit Abstand wichtigste Kohlenstoffsänke (weiter) an Effizienz, was die Erderwärmung zusätzlich beschleunigen dürfte.

8. Gefährdung der marinen Ökosysteme

Die eben beschriebene Veränderung des Karbonat-systems und die Versauerung der Meere könnten ohne Gegenmaßnahmen bereits in diesem Jahrhundert ein Ausmaß erreichen, wie es seit vielen Jahrmillionen nicht mehr vorgekommen ist. Die Störung des chemischen Gleichgewichts im Ozean wird zahlreiche Meereslebewesen stark in Mitleidenschaft ziehen und sensible marine Ökosysteme ernsthaft gefährden. In besonderem Maße sind – wie erwähnt – die kalkbildenden Organismen betroffen, wie z.B. bestimmte Planktongruppen, Muscheln, Schnecken, Korallen und Stachelhäuter (Seesterne und Seegurken). Die Umwandlung von im Wasser gelöstem Kalk in feste Skelett- oder Schalenstrukturen ist nur bei einer Übersättigung des Meerwassers mit Kalziumkarbonat (CaCO₃) möglich. Mit der Erniedrigung des pH-Werts geht daher eine Schwächung der Skelettstrukturen oder – bei Unterschreiten der Sättigungskonzentration für Kalziumkarbonat – sogar ihre Auflösung einher. Von den beiden Hauptformen des biogenen Kalks, Kalzit und Aragonit, ist die letztere Kristallform eher löslich als die erstere. Zu den Aragonit-bildenden Organismen zählen auch die Korallen, deren Wachstum somit ebenfalls von der Änderung des chemischen Gleichgewichts unmittelbar beeinträchtigt wird. Darüber hinaus machen den Korallen aber auch die steigenden Wassertemperaturen der tropischen Meere



Effekte und Folgen von Klimawandel und Meeresspiegelanstieg						
sozioökonomischer Sektor; Nutzungsbereich	Sturmfluten, Überschwemmung ¹	Küstenrückgang, Erosion von Stränden	Überflutung (dauerhaft) ¹	Ansteigender Grundwasserspiegel	Eindringen von Salzwasser	Änderungen / Gefährdung der Ökosysteme
Wohnen an der Küste	•	•	•	•		
Gesundheit, Sicherheit	•	•	•			
Wasserwirtschaft	•		•	•	•	•
Landwirtschaft	•	•	•	•	•	•
Fischerei, Aquakultur	•	•	•		•	•
Tourismus	•	•	•			•

Tab. 4: Überblick über die sozioökonomischen Folgen des Klimawandels und des damit verknüpften Meeresspiegelanstiegs in den wichtigsten Küstensektoren (¹ Mit Überflutung wird hier eine dauerhafte Wasserbedeckung von Landflächen bezeichnet - im Gegensatz zu einer vorübergehenden, eher episodischen Überschwemmung. Ohne Gegenmaßnahmen wäre der endgültige Verlust dieser Landflächen die Folge).

zu schaffen, denn die obere Toleranzgrenze für das Aufwachsen gesunder Korallenriffe liegt bei 30–31 °C. Da Korallenriffe vielfach bereits durch Verschmutzung, Dynamitfischen oder Abbau von Korallenkalk zum Hausbau vorgeschädigt sind, werden diese bedeutendsten aller Meeresökosysteme (wegen ihrer großen Artenvielfalt manchmal auch als die „Regenwälder der Meere“ bezeichnet) in vielen Gebieten durch Ozeanerwärmung und -versauerung wohl zum Sterben verdammt. Ein weltweiter Rückgang auf 30 % der heute noch lebenden Korallenriffe bis 2100 wird von vielen Experten für wahrscheinlich gehalten.

Weiterhin sind auch Auswirkungen der Versauerung auf das Nahrungsnetz denkbar. Unterschiedliche Reaktionen von Organismen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen können die Konkurrenzsituation unter den Arten und damit deren räumliche wie zeitliche Verteilung verändern, z.B. Verdrängung von kalkbildenden Algen durch Kieselalgen. Insgesamt zeichnet sich ab, dass sich ökologische Gleichgewichte im Meer zu Ungunsten der kalkbildenden Meeresorganismen verschieben werden. Wenn sich dadurch etwa die Zusammensetzungen im marinen Plankton in größerem Stil ändern, kann dies sogar die globalen biogeochemischen Kreisläufe beeinflussen, die als Klimaregulatoren fungieren.

Neben den Korallenriffen sind andere wertvolle Küstenökosysteme ebenfalls in ihrer Existenz nachhaltig bedroht. Anders als bei den Korallen, die einen Meeresspiegelanstieg von 0,5 bis 1 m durch Aufwachsen vermutlich kompensieren könnten,

sind Mangroven, Wattflächen, Salzmarschen oder Dünen unmittelbar gefährdet von steigenden Pegeln, Sturm(flut)einwirkungen und den resultierenden Erosionsprozessen. Nach neuen satellitengestützten Untersuchungen befinden sich bereits weltweit zwei Drittel aller Küsten im Rückgang – eine unmittelbare Folge des globalen und beschleunigten Meeresspiegelanstiegs.

9. Auswirkungen auf Küstengebiete weltweit

Fünf Effekte sind oben als Ergebnis des Klimawandels beschrieben worden. Sie alle sind mit zahlreichen, teils direkten, teils indirekten Auswirkungen verknüpft, welche die zukünftige Entwicklung von Küstenregionen weitreichend – und wohl meist negativ – beeinflussen werden. Diese Auswirkungen wirken besonders schwer, weil die Küsten global gesehen die am dichtesten besiedelten und am intensivsten genutzten Räume der Erde darstellen. Der Zuzug von Menschen aus dem Hinterland an die Küsten hält seit Jahrhunderten unvermindert an, weil Siedlungsflächen, Nahrungsquellen, Verkehrswege und Erholungsmöglichkeiten hier in einzigartig günstiger Weise miteinander verzahnt sind. Schätzungen der OECD gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2050 fast 2/3 der Menschheit in Küstennähe siedeln wird. In Tab. 4 sind die wichtigsten gesellschaftlichen Nutzungsbereiche von Küstenzonen genannt und gleichzeitig deren Anfälligkeit gegenüber dem Klimawandel und dessen Folgen dargestellt. Dabei

stehen die direkten, d.h. primären Auswirkungen im Vordergrund. Ebenfalls bedeutsame indirekte Folgen, z.B. gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Verschlechterung der Wasserqualität, finden hier keine Berücksichtigung.

Aus Tab. 4 wird deutlich, dass die gravierendsten Gefährdungen und Folgen für die Küstenbewohner einerseits vom Meeresspiegelanstieg, andererseits von den Änderungen bei den Extremereignissen (Sturmfluten, Wirbelstürme, Seegang) ausgehen. Die konkreten Effekte können wegen der regional jeweils unterschiedlichen Meeresspiegeltendenzen und der Vielfalt der Küstenräume allerdings unterschiedlich ausgeprägt sein.

In verschiedenen Studien wurde versucht, das Ausmaß der vom Meeresspiegelanstieg ausgehenden Gefährdung abzuschätzen (Schellnhuber und Sterr 1993; Behnen, 2000; IPCC 2001). Um die gefährdete Fläche entlang der Küsten zu erfassen, muss zunächst die globale Landflächenverteilung in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel betrachtet werden. Abb. 2a zeigt, dass es große Tieflandsgebiete gibt, die innerhalb des 1-m-Bereichs über der heutigen mittleren Hochwasserlinie liegen. Oberhalb der 1-m-Linie steigt die Landflächenverteilung als eine nahezu lineare Funktion der Höhe über der mittleren Hochwasserlinie an. Bei 20 m Höhe über dem Meeresspiegel wären bereits insgesamt 8 Mio. km² betroffen. Ein Anstieg von 20 m entspricht einem Extremszenario, das sich durch die anthropogene Erwärmung über einen Zeithorizont von rund 1.000 Jahren ergeben könnte, falls die Eismassen in Grönland und der Westantarktis weitestgehend abschmelzen sollten (siehe oben). Die besonders bedrohten Gebiete in Europa umfassen vor allem den Osten Englands und den Küstenstreifen, der sich von Belgien durch die Niederlande, den Nordwesten Deutschlands bis ins westliche und nördliche Dänemark

zieht, aber auch im Mittelmeer-, Schwarzmeer- und im Ostseeraum gibt es dicht besiedelte, überflutungsgefährdete Räume, z.B. das Delta des Po in Norditalien (inkl. der Lagune von Venedig) sowie die Deltas (Flussmündungen) von Rhône, Ebro, Donau, Oder und Weichsel. Schon heute liegen einige dicht besiedelte Gebiete in den Niederlanden, England, Deutschland und Italien unterhalb des normalen Hochwasserpegels. Für diese Gebiete ist eine reale Bedrohung schon jetzt gegeben und die Frage nach der Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs besonders bedeutsam, weil ein schnellerer Meeresspiegelanstieg die Umsetzung gesellschaftlicher Anpassungsstrategien, etwa die Intensivierung des Küstenschutzes oder die Aufgabe von Siedlungen im Überflutungsraum, erschweren könnte. Aus Abb. 2b geht hervor, dass bereits jetzt viele Millionen Küstenbewohner unmittelbar von Überschwemmungen und anderen Wirkungen des MSA betroffen sein werden. Derzeit wohnen bereits 275 Mio. Menschen innerhalb der besonders gefährdeten NN + 5-m-Zone; bis zum Ende des 21. Jhd. wird diese Zahl schätzungsweise auf 410 Mio. Menschen steigen. Für Europa wird geschätzt, dass bei einem Meeresspiegelanstieg von 1m etwa 13 Mio. Menschen bedroht wären.

Die schon seit längerer Zeit anhaltenden Tendenzen der Bevölkerungswanderung in Richtung auf küstennahe städtische Ballungsräume werden sich auch in den kommenden Jahrzehnten weiter fortsetzen. Bereits heute liegen 8 der 10 größten Städte der Welt an Küsten und sind akut oder mittelfristig überflutungsgefährdet. Es zeichnet sich ein eindeutiger Trend der globalen demographischen Entwicklung dahingehend ab, dass sowohl Anzahl als auch Größe der Millionenstädte im Küstenraum in diesem Jahrhundert stark anwachsen werden, insbesondere im asiatischen Raum. Wie viele Menschen bzw. Prozentanteile der Bevölkerung

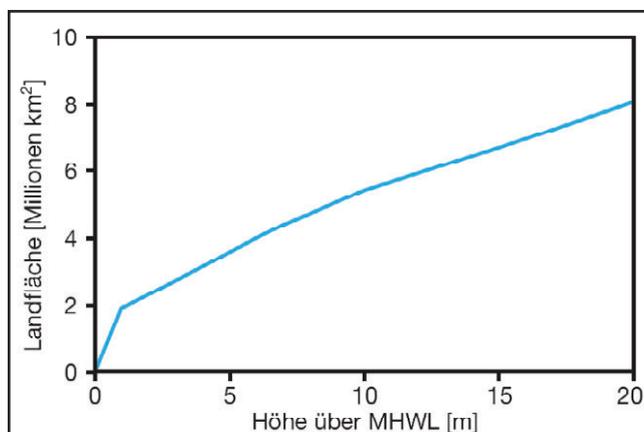


Abb. 2a: Höhenverteilung der weltweiten Landfläche über der mittleren Hochwasserlinie MHWL (WBGU 2006).

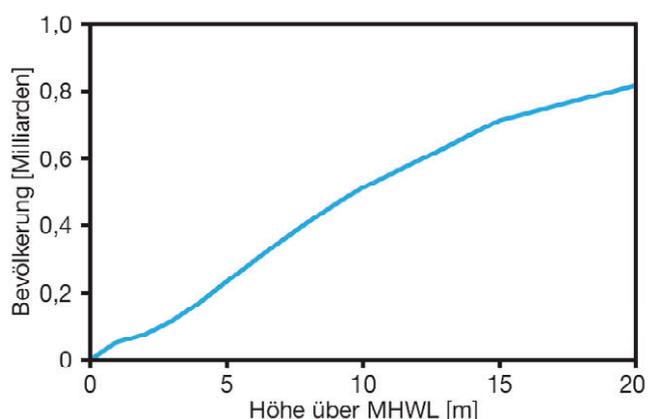


Abb. 2b: Höhenabhängige Verteilung der Weltbevölkerung (Stand 1995) (WBGU 2006).

Staaten geordnet nach Bevölkerung in niedriggelegenen Küstenregionen – Top Ten			Staaten geordnet nach Bevölkerungsanteil in niedriggelegenen Küstenregionen – Top Ten		
Staat	Bevölkerung in niedriggelegenen Küstenregionen (10 ³)	% der Bevölkerung in niedriggelegenen Küstenregionen	Staat	Bevölkerung in niedriggelegenen Küstenregionen (10 ³)	% der Bevölkerung in niedriggelegenen 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%

Anmerkung: Länder, in denen weniger als 100.000 Einwohner in den niedriggelegenen Küstenregionen leben, wurden ausgenommen. 15 kleine Inselstaaten, die ausgenommen wurden, haben Bevölkerungsanteile von mehr als 39 % in den niedriggelegenen Küstenregionen, und zusammengenommen eine Gesamtbevölkerung von 423.000 Einwohnern.

Tab. 5: Staaten mit der größten Bevölkerung und dem höchsten Bevölkerungsanteil in niedriggelegenen Küstengebieten.

von Küsten- und Inselstaaten bereits heute im gefährdeten Küstengebiet leben, dokumentiert Tab. 5. Auf den niedrig gelegenen Inselarchipelen wie etwa den Malediven umfasst die Bedrohung inzwischen nahezu die gesamte Bevölkerung und damit auch den größten Teil der Volkswirtschaft dieser Staaten. Ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg, auch wenn er nur im Dezimeterbereich erfolgen sollte, wird vermutlich Küstenbewohner in vielen Gebieten Asiens, Afrikas und Lateinamerikas zum Verlassen ihrer Heimat zwingen („Meeresflüchtlinge“) und darüber hinaus volkswirtschaftliche Schäden immensen Ausmaßes zur Folge haben. Diese Schäden können in vielfältiger Form auftreten und reichen von Vermögensschäden bis hin zu dem Verlust an Menschenleben oder dem Verlust von biologischer Vielfalt und von Ökosystemleistungen. Ein gradueller Meeresspiegelanstieg bzw. damit einhergehende Extremereignisse könnten beispielsweise die Abläufe in größeren Hafenstädten beeinträchtigen bzw. zeitweise unterbinden, wodurch in der Folge auch regionale Handels- und Transportnetzwerke betroffen wären. Damit ist auch zu erwarten, dass die geophysikalische Veränderung an Küsten großflächige wirtschaftliche Auswirkungen in benachbarten und inländischen Regionen hervorrufen (Dasgupta et al. 2007).

10. Auswirkungen auf den deutschen Küstenraum

Die deutschen Küstenregionen an Nord- und Ostsee sind trotz der naturräumlichen Unterschiede in ähnlicher Weise anfällig gegenüber Sturmfluten und Meeresspiegelanstieg. Für beide Küstengebiete charakteristisch sind

- ein seewärts flach abfallender Meeresboden;
- ein überwiegend niedriges und flaches, d.h. überflutungsgefährdetes Küstenrelief;
- seit der Eiszeit anhaltende Küstensenkungstendenzen und damit ein rascherer langfristiger (=säkularer) Meeresspiegelanstieg (1,5–2,5 mm/J.)
- tief in das Land eingreifende Flussmündungen;
- meist niedrige, dem Festland vorgelagerte Inseln
- ein großräumig hoher und dadurch versalzungsgefährdeter Grundwasserstand;
- an spezielle Überflutungs-, Salinitäts- und Substratverhältnisse angepasste Ökosysteme, wie z.B. Watten, Salzwiesen/ -marschen, Seegraswiesen, Verlandungszonen in den Boddengewässern von Mecklenburg-Vorpommern, Brackwassergebiete;
- in hochwassergefährdete und ökologisch bedeutsame Bereiche hinein reichende dichte Bebauung
- große wasserwirtschaftliche und wasserbauliche

Veränderungen im natürlichen System, z.B. Deich- und Entwässerungsanlagen, Sperrwerke etc.

Angesichts der oben beschriebenen Prozesse sieht sich auch der norddeutsche Küstenraum mit einer Reihe von teilweise bedrohlichen Klimafolgen konfrontiert (Textbox). Das hier beschriebene Szenario lag auch einigen wissenschaftlichen Untersuchungen der letzten Jahre zugrunde (z.B. *Daschkeit und Schottes, 2002; Sterr et al., 2000; 2003*). Aufgrund der Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs und der Änderungen im Windfeld werden Sturmfluten und deren Extremwasserstände an der Nordsee- und Ostseeküste künftig wohl wesentlich häufiger auftreten. Dadurch wächst auch die Belastung der Deiche, insbesondere wenn Extremwasserstände entweder sehr lange andauern oder sich in kürzeren Abständen wiederholen (eine Serie mit mehreren kleinen Sturmfluten gab es in Schleswig-Holstein wiederholt

Textbox: Gefährdungsprofil für Norddeutschland im Zuge des künftigen Klimawandels

- gesamte Küstenlänge: 3700 km;
- davon Nordsee mit Inseln 1580 km; Ostsee 2120 km (incl. Boddengewässer und Inseln);
- überflutungsgefährdet sind die Landflächen niedriger als 5 m über dem Meer an der Nordsee bzw. niedriger als 3 m über dem Meer an der Ostseeküste;
- dies entspricht einer Gesamtfläche von 13.900 km² oder 1390000 ha; ein Großteil davon ist derzeit durch Deiche geschützt;
- im Überflutungsgebiet leben 3.2 Millionen Menschen;
- die im Überflutungsgebiet vorhandenen volkswirtschaftlichen Werte belaufen sich auf mehr als 500 Milliarden Euro;
- im Überflutungsgebiet sind mehr als eine Million Arbeitsplätze angesiedelt;
- die größten Risiken bestehen für die Großstädte an der Nordsee (Hamburg, Bremen) durch Sturmfluten;
- auch Ostseestädte wie Kiel, Lübeck, Rostock und Greifswald sind – mangels Deichschutz – teilweise überflutungsgefährdet;
- den Tourismuszentren an Nord- und Ostsee droht der Verlust ihrer Strände;
- die Kosten für Küstenschutzmaßnahmen, v.a. Deichbau und Sandvorspülungen werden stark steigen;
- langfristig können große Teile der ökologisch wertvollen Salzwiesen und Wattflächen verloren gehen.

in den letzten Jahren, zuletzt im Winter 2006/2007). Die Wahrscheinlichkeit, dass Deiche überflutet werden oder brechen können, ist somit künftig stärker ins Kalkül zu ziehen. Höhere, häufigere oder länger andauernde Pegelstände sind allerdings Risiken, denen mit Küstenschutzmaßnahmen nicht kurzfristig, sondern nur im Zeitraum von Jahrzehnten begegnet werden kann. So weist in Hamburg etwa der Pegel St. Pauli seit sieben Jahrzehnten einen deutlich ansteigenden Trend bei Sturmflutwasserständen auf und Überflutungen im Stadt- und Hafengebiet treten fast jährlich auf. Allerdings spielen in diesem Fall neben dem Klima auch tief greifende Eingriffe in das Natursystem eine nachteilige Rolle, etwa die wiederholten Ausbaggerungen des Elbe-Fahrwassers für den Hamburger Hafen und die Eindeichung der Elbmarschen, die ehemals natürliche Überflutungsräume und Pufferzonen darstellten. Auf sehr niedrig gelegenen und nicht von Deichen geschützten Flächen, wie sie z.B. auf einigen Nordseeinseln, vor allem aber an der Ostseeküste verbreitet sind, muss ab Mitte des 21. Jhd. mit dauerhafter Überflutung gerechnet werden. Hier dürften vor allem ökologisch wertvolle Flächen wie Salzwiesen einen größeren Flächenverlust erleiden. Neben der – eher augenfälligen – Gefahr zeitweiliger oder dauerhafter Überflutung von Landflächen gibt es weitere langfristig problematische Folgen, die in der Betrachtung oft unberücksichtigt bleiben. Zu diesen zählen:

- die zunehmende Verschärfung der Küstenerosion,
- ansteigender Grundwasserspiegel bzw. Eindringen von Salzwasser in Oberflächen- und Grundwasser,
- die ungewisse Zukunft des Wattenmeeres.

Das Beispiel der Nordseeinsel Sylt zeigt, mit welchem hohem Aufwand der Mensch schon jetzt die ständig wiederkehrenden Verluste der für den Tourismus so wichtigen Strände zu bekämpfen versucht. Seit den 1990er Jahren wurden jährlich ca. 10 Mio. Euro für Sandaufspülungen an der Westseite von Sylt aufgewendet. Die Kosten einer dauerhaften Erhaltung der Sylter Strände werden künftig deutlich höher ausfallen, wenn man bei der bisherigen Strategie bleibt, den Sand auf der stark exponierten Westseite aufzubringen, wo der natürliche Küstenrückgang fast 1 m pro Jahr beträgt. Inzwischen gibt es auch Vorschläge, die Aufspülungen künftig auf der geschützten Ostseite der Insel vorzunehmen und langfristig dann auch den Schwerpunkt der touristischen Aktivitäten von der erosionsbedrohten Westküste auf die Wattseite von Sylt zu verlagern (*Reise, 2006*). Vielen anderen Stränden an Nord- und Ostsee wird allerdings nicht in ähnlicher Weise Aufmerksamkeit geschenkt wie auf Sylt, obwohl sie ebenfalls von den Tendenzen zur Erosion stark betroffen sind. Während auf Sylt das Land Schleswig-Holstein bisher die Kosten für die Sandaufspülungen

trägt, müssen viele Gemeinden etwa an der Ostsee weitgehend selbst für die Stranderhaltung aufkommen. Noch problematischer als Strandabtrag und Küsterrückgang könnten in einigen Jahrzehnten jedoch die Probleme im Bereich der eingedeichten Marschflächen sowie auf den davor liegenden Wattflächen werden. Während die Marschen bisher noch auf natürliche Weise entwässert werden können (das aus dem Hinterland kommende Wasser fließt bei Ebbe mit Gefälle in die Nordsee), wird dies bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,5 – 1 m nicht mehr möglich sein. Dann müssen die eingedeichten Flächen mit hohem Energie- und Kostenaufwand künstlich entwässert werden, eine Situation, die in den Niederlanden allerdings schon längst bekannt ist. Auch dieses Problem ist prinzipiell mit technischen Mitteln zu lösen. Keine Chancen korrigierend einzugreifen bleiben jedoch dem Menschen, wenn sich zeigt, dass das Wattenmeer entlang der Nordseeküste dem steigenden Meeresspiegel und den Angriffen von Sturmfluten und Seegang nicht mehr wie in der Vergangenheit Stand halten kann. Nach neueren Untersuchungen könnte dies bei einem Meeresspiegelanstieg von über 0,5 m/Jhd. eintreten.

Mit dem Wattenmeer würde nicht nur ein einzigartiger Naturraum verloren gehen, sondern gleichzeitig auch ein natürlicher „Energiepuffer“, der bislang die Deiche, das Festland und die Siedlungen vor noch größeren Sturmfluteinwirkungen und Zerstörungen bewahrt hat.

11. Fazit

Im 20. Jahrhundert hat gerade an den Küsten von hoch entwickelten Staaten wie Deutschland die Verwundbarkeit (Vulnerabilität) der sozioökonomischen Sphäre stark zugenommen, besonders infolge von ausufernder küstennaher Bebauung bzw. der Errichtung aufwändiger Infrastruktur (Häfen, Industrieanlagen, Feriencentren etc.) und rapider Entwicklung des Freizeit- und Tourismussektors. Dies bedeutet, dass die Schadensanfälligkeit, d.h. die volkswirtschaftlichen Risiken, die durch Sturmfluten, Meeresspiegelanstieg und Küstenerosion entstehen (können), heute sehr viel größer sind als noch im 19. Jahrhundert und damit eine der größten Herausforderungen für unsere Gesellschaft darstellen. So wurden nach der verheerenden Nordsee-Sturmflut vom Februar 1962, die in Hamburg und Schleswig-Holstein fast 350 Menschenleben forderte (soviel wie keine andere Naturkatastrophe in Deutschland nach dem Krieg) bereits viele Millionen DM und Euro in den Ausbau von Deichen und Küstenschutzanlagen investiert. Angesichts der skizzierten Entwicklungen des globalen Klimas und des Meeresspiegels ist nunmehr aber mit einem noch weitaus ernsteren Szenario in den kommenden Jahrzehnten zu rechnen.

Der prognostizierte Meeresspiegelanstieg und die ihn begleitenden Gefahren treffen alle tief liegenden Küstenregionen der Welt. Schwellenländer und Entwicklungsländer sind jedoch besonders verletzlich, da den ärmeren Nationen sowohl die finanziellen als auch die technischen Möglichkeiten für einen ausreichenden Schutz meist fehlen. Obgleich also die Industrieländer vermutlich mit teurerer und technisch aufwändiger Küstenschutztechnologie beim Klimawandel „gehalten“ können, ist es erforderlich, moderne Konzepte für Risikomanagement zu entwickeln, um weltweit der Gefährdung der Küstengebiete zu begegnen. Die Elemente eines solchen Konzeptes und die erforderlichen Schritte zur Umsetzung zeigt Abb. 3.

Für viele andere Küstenabschnitte der Welt muss die Vulnerabilität gegenüber einem Meeresspiegelanstieg, vor allem aufgrund einer (ökonomisch begründeten) geringen Adaptationskapazität, als deutlich höher eingeschätzt werden (einen Überblick geben *Sterr et al.* 2003; *Klein et al.* 2001)

Mittelfristig wird es allerdings entscheidend sein,

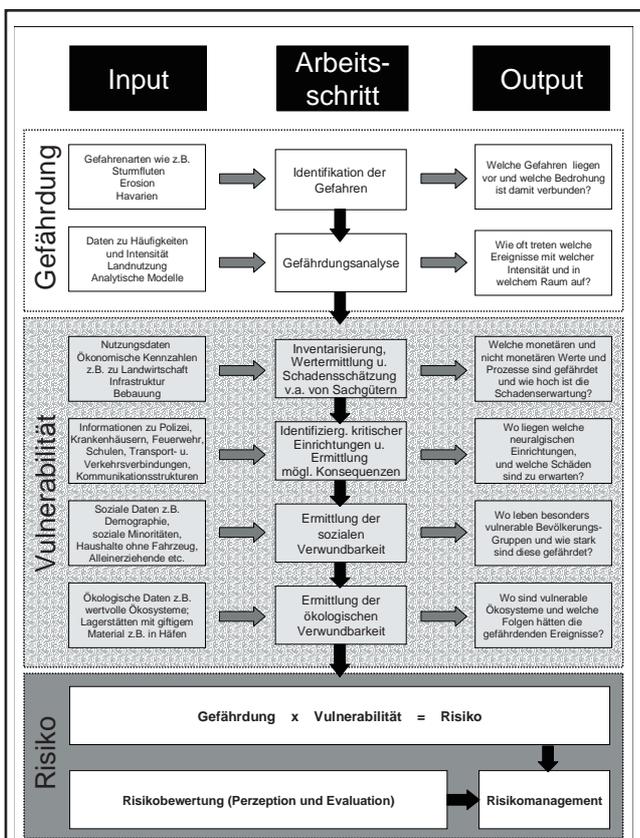


Abb. 3: Konzept eines Risikomanagements für Küstengebiete. Risiko ist hierbei das Produkt aus Gefährdung und Verwundbarkeit (Vulnerabilität).

nicht nur die Fähigkeit zur Anpassung an den Klimawandel weiterzuentwickeln, sondern auch konsequent das Ausmaß des Klimawandels und des Meeresspiegelanstiegs durch Klimaschutzmaßnahmen so gering wie möglich zu halten.

Literatur

- Behnen, T. (2000): Der beschleunigte Meeresspiegelanstieg und seine sozioökonomischen Folgen. Hann. Geogr. Arbeiten. 54, 222 S.
- Brückner, H. (2000): Küsten – sensible Geo- und Ökosysteme unter zunehmendem Stress. Petermanns Geographische Mitteilungen. 143. Jahrgang. 6-23.
- Brückner, H., Radtke, U. & Sterr, H. (2002): Trifft es nur die Armen ? Der Meeresspiegelanstieg und seine Folgen für die Küstentiefländer der Erde. In: Ehlers, E., Leser, H. (Hrsg.) Geographie heute für die Welt von morgen. 90-98. Klett-Perthes, Gotha
- Daschkeit, A. & Schottes, P. (Hrsg.) (2002): Klimafolgen für Mensch und Küste, am Beispiel der Nordseeinsel Sylt. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Dasgupta, S., Laplante, B., Meisner, C., Wheeler, D. & Yan J. (2007): The impact of Sea Level Rise on Developing Countries: a comparative analysis. World Bank Research working Paper 4136; 51S.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution to Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007a): Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution to Working Group I to the Forth Assessment Report of the IPCC. www.ipcc.ch
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007b): Climate Change 2007: Summary for Policy Makers on Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution to Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. . www.ipcc.ch
- Klein, R.J.T.; R.J. Nicholls; S. Ragoonaden; M. Capobianco; J. Aston & E.N. Buckley (2001): Technological options for adaptation to climate change in coastal zones. In: Journal of Coastal Research 17(3): 531-543.
- Münchener Rück (2005): Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten? Münchener Rück; München
- Rahmstorf, S. (2006): A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise, Science (express) 10.1126/science.
- Reise, K. (2006): Neue Ufer für die Nordseeküste. In: Wattenmeer International, 1-2006, S. 4-5
- Schellnhuber, H.-J. & Sterr, H. (1993): Klimaänderung und Küste. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Sterr, H., Ittekott V. & Klein R. (2000): Weltmeere und Küsten im Wandel des Klimas. Petermanns Geographische Mitteilungen. 143. Jahrgang. 24 - 31.
- Sterr, H., Schwarzer, K. & Hofstede, J. (2003): Auswirkungen von Wasserstandsschwankungen an der Küste. In: Hupfer, P., Harff, J., Sterr, H. & Stigge, H.-J. (Hrsg.): Die Wasserstände an der südwestlichen Ostseeküste: Entwicklungen - Sturmfluten - Klimawandel. Die Küste Bd. 66, 217 - 297. Heide
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten. Berlin. 114 S. www.wbgu.de