

HORST STERR
 VENUGOPALAN ITTEKOT
 RICHARD J. T. KLEIN

Weltmeere und Küsten im Wandel des Klimas

6 Figuren im Text

Oceans and coasts responding to future climatic change

Abstract: The Second Assessment Report published by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 1996 indicates that accumulating greenhouse gas emissions will lead to significant global warming (2,5 to 3 °C) by the year 2100. This will trigger manifold reactions in the marine environment due to the close interactions that oceans and coastal regions have with the climate system, especially via the global carbon cycle. Changes of key climate parameters such as seasonal temperature, precipitation and wind regime are likely to bear significant effects on the availability of nutrients and thus primary productivity, the distribution of species and the biologic equilibrium in marine ecosystems. In addition there will be increasing risks for the coastal population (flooding, erosion, saltwater intrusion) as a result of accelerating sea-level rise and enhanced storminess but also due to a loss in important ecosystems functions (e. g. loss of the filtering or buffering functions of coral reefs, mangroves or tidal flats).

Zusammenfassung: Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht in seinem Sachstandsbericht vom Mai 1996 davon aus, dass die Anreicherung anthropogener Treibhausgase weltweit zu einer deutlichen Erwärmung führt, nämlich im Mittel 2,5 – 3 °C bis zum Jahr 2100. Für die Ozeane und Küstenregionen, welche die globalen biogeochemischen Stoffkreisläufe und damit auch das Klimasystem in hohem Maße beeinflussen, ist infolge der Änderungen wichtiger Klimaparameter (saisonalen Temperaturverlauf, Niederschläge, Windverhältnisse) 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, Salzwasserintrusion), andererseits aus der zu befürchtenden Degradation mariner Ressourcen (Rückgang der Fischbestände, Verlust der Filter- oder Pufferfunktionen von Korallenriffen, Mangroven, Watten usw.).

1. Einleitung

Die Entwicklung zu einem lebensfreundlichen Planeten verdankt die Erde kosmischen „Zufällen“, vor allem dem richtigen Abstand von der Sonne und dem *natürlichen Treibhauseffekt*. Dieser Effekt, das Ergebnis der Produktion von Kohlendioxid durch Pflanzen, bringt die Durchschnittstemperatur der Erde von –18 °C auf +15 °C und macht sie damit für den Menschen bewohnbar. Allerdings ist das Erdklima seit Urzeiten einem ständigen Wandel unterworfen, der zeitweise für warm-tropische Temperaturen sorgt, oder aber große Teile der Kontinente werden in Abkühlungsperioden mit dicken Eisschilden überzogen, wie dies in (Nordwest-)Europa und Nordamerika vor 15 000 bis 80 000 Jahren der Fall war. Dabei ist der Temperaturunterschied zwischen Eiszeiten und Zwischeneiszeiten wie der momentanen (holozänen) Warmzeit auf den ersten Blick mit 4–5 °C (global) recht gering. Die in den letzten 12 000 Jahren, also seit Beginn des holozänen Temperaturanstiegs eingetretenen Veränderungen, wie etwa die Verschiebungen ganzer Vegetationszonen um mehr als 1 000 km nordwärts, das Aussterben alter bzw. die Entstehung

vieler neuer Organismen und Arten, die Verlagerung von Meereströmungen u. ä., machen jedoch das subtile ökologische Gleichgewicht im System Erde deutlich. Für dieses Gleichgewicht stellt das Klima somit eine wichtige, wenn nicht die wichtigste Steuerungsgröße dar. Seit ca. 100–150 Jahren dreht nun auch der Mensch an der Klimaschraube und nimmt damit zunehmend Einfluss auf den Zustand unserer Geo- und Biosphäre. Seit einigen Jahrzehnten nehmen die wichtigsten, natürlich vorkommenden Treibhausgase (Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid) vor allem durch Verbrennen von Kohle, Öl, Gas und Wäldern sowie durch Verkehr, Agrar- und Industrieproduktion so rasch zu, dass eine Veränderung des Klimasystems – über seine natürliche Variabilität hinaus – immer wahrscheinlicher wird (Fig.1). Inzwischen gibt es kaum noch Klimaforscher, die die Möglichkeit eines deutlich fühlbaren anthropogenen Treibhauseffekts bis zur Mitte des 21. Jh. bestreiten. Vielmehr bestätigt das Intergovernmental Panel on Climate Change in seinem im Mai 1996 publizierten Bericht (IPCC Second Assessment Report), dass der menschliche Einfluss in der Klimaentwicklung immer deutlicher zum Vorschein kommt

(HOUGHTON et al. 1996). Einer bereits registrierten Erwärmung der mittleren Erdtemperatur um rund 0,5 °C in diesem Jahrhundert wird nach dieser Einschätzung mit großer Wahrscheinlichkeit eine weitere Temperaturzunahme um ca. 2,5 °C bis zum Jahr 2100 folgen (IPCC Szenario IS92a). Sowohl für die festländischen Gebiete als auch für die Meere und Küstenregionen ist dementsprechend mit weitreichenden ökologischen wie ökonomischen Konsequenzen zu rechnen (IPCC Working Group II 1996).

Die unbedingt ernst zu nehmenden Wirkungen von Klimaänderungen sind jedoch im Normalfall als indirekte „Impakts“ anzusehen, die sich den „anthropogenen Primärwirkungen“, also den menschgemachten Umweltveränderungen, die seit Jahrzehnten um sich greifen, zusätzlich überlagern. Denn unbestreitbar befinden sich die Ökosysteme, nicht nur die terrestrischen, sondern auch die marinen, bereits durch Landnutzungsänderungen, Industrialisierung, erhöhte Nahrungsmittelproduktion oder Schadstofffreisetzung unter großem Stress. Dies bedeutet auch, dass die Fähigkeit der Ökosysteme, sich der neuen Klimabelastung anzupassen, reduziert ist und sie dadurch anfälliger gegenüber thermischen, hydrologischen oder anderen Veränderungen werden.

Was die Ozeane betrifft, so ist schließlich noch zu beachten, dass sie selbst ein wichtiger Teil des Klimasystems sind und daher auch in die (mittel- und langfristige) Klimaentwicklung, z. B. über vielfältige Transport- oder Pufferungsmechanismen, umfassend eingreifen. Diese „doppelte Rolle“ der Weltmeere, einerseits als klimaregulierende Hydrosphäre und andererseits als betroffenes marines Ökosystem, welches für unzählige Menschen (und andere Organismen) die Existenzgrundlage darstellt, soll im Folgenden im Hinblick auf einen möglichen Klimawandel skizziert werden. Die Bedeutung der Ozeane als „Klimaregulator“ wurde durch das starke El-Niño-Ereignis im Winter 1997/98 eindrucksvoll dokumentiert.

2. Die Rolle der Ozeane im Klimasystem

Die Ozeane regulieren die großen biogeochemischen Stoffkreisläufe, insbesondere Kohlenstoff- und Nährstoffzyklus, und beeinflussen so das Klimasystem in umfassender Weise (Fig. 2). Horizontale und vertikale Durchmischungsprozesse in den Meeresbecken verändern z. B. die Menge des im Ozean gebundenen

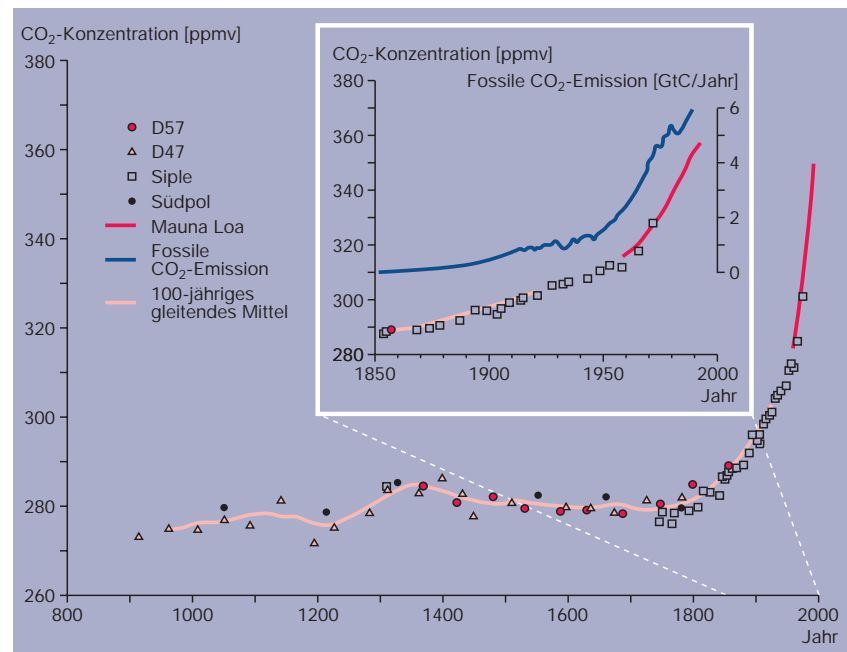


Fig. 1 Atmosphärische CO₂-Gehalte der letzten 1000 Jahre (aus Eiskernen: D47, D57, Siple und Südpol) und Mauna Loa, Hawaii (seit 1958). Es sind die rasche Zunahme der CO₂-Konzentrationen seit der Industrialisierung und der parallele Verlauf mit den CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu sehen (aus HOUGHTON et al. 1996).

Kohlenstoffs. Ist die Rate des im Wasser absorbierten CO₂ rückläufig, so wird sich daraus eine Verstärkung des Treibhauseffekts ergeben und umgekehrt (Rückkopplungseffekt). Bei der (langfristigen) Bindung von Kohlenstoff in Tiefseesedimenten spielt neben den – vor allem thermisch beeinflussten – Transportprozessen auch die biologische Produktivität der Meereszonen eine wichtige Rolle. Letztere wird aber auch maßgeblich vom lokalen Nährstoffangebot gesteuert, d. h., dass bei hoher Nährstofffracht eine relativ große Menge CO₂ als biogener Kohlenstoff im marinen Sediment gespeichert wird (Fig. 3).

Die Tatsache, dass die Speicherung von organischem Kohlenstoff von der Nährstoffzufuhr abhängt, unterstreicht nun die vergleichsweise große Bedeutung der Küstengewässer im Ozean-Klimasystem. Denn diese werden vom Festland her mit Stickstoff- und Phosphatnährstoffen stark befrachtet, so dass in den Flachwasserzonen bis hin zum Kontinentalrand sehr große Mengen Kohlenstoff sedimentieren können.

Ein weiterer Rückkopplungseffekt zum Klima besteht in der ebenfalls nährstoffabhängigen Veränderung des Algenwachstums. Bestimmte Phytoplanktonarten produzieren Dimethylsulfid (DMS), welches von der Wasseroberfläche als Aerosol an die Luft abgegeben wird. Die DMS-Partikel bilden Kondensationskerne und fördern damit die Wolkenbildung über dem Meer, welche eine wichtige Größe für Strahlungshaushalt und Verdunstung auf regionaler Ebene darstellt.

Sind die biogeochemischen Prozesse in den festlandsnahen Meeresräumen wichtig für das Klimageschehen, so gilt Gleiches auch in umgekehrter Rich-

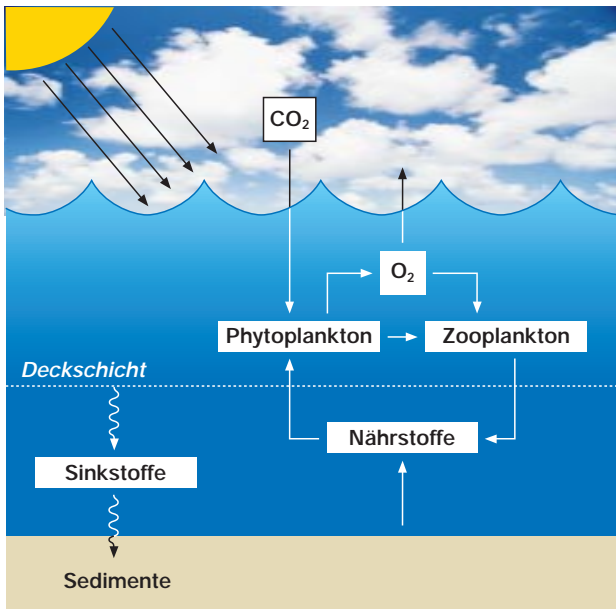


Fig. 2 Die ozeanische biologische Pumpe: Bei der Photosynthese wird CO_2 aus der Deckschicht zum Aufbau von Biomasse verwendet. Somit wird der Deckschicht CO_2 entzogen. Ein Teil des auf diese Weise fixierten Kohlenstoffs wird in Minuten, Stunden, Tagen oder Wochen innerhalb der Deckschicht wieder zu CO_2 oxidiert. Der Rest gelangt in größere Tiefen und bewirkt den Nettoentzug von CO_2 aus der Deckschicht. Dieses ist der entscheidende Transport, denn er entzieht der Deckschicht und damit der Atmosphäre auf Dauer CO_2 . Dieser Transport wird die biologische Pumpe genannt und beschreibt das an die Wasserzirkulation gekoppelte Absinken gelöster organischer Substanzen sowie das Absinken kohlenstoffhaltiger Partikel aufgrund der Gravitation. Die Effizienz der biologischen Pumpe bestimmt daher die Kapazität der ozeanischen Deckschicht als Puffer für den Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration und kann durch den erwarteten Klimawandel entscheidend verändert werden.

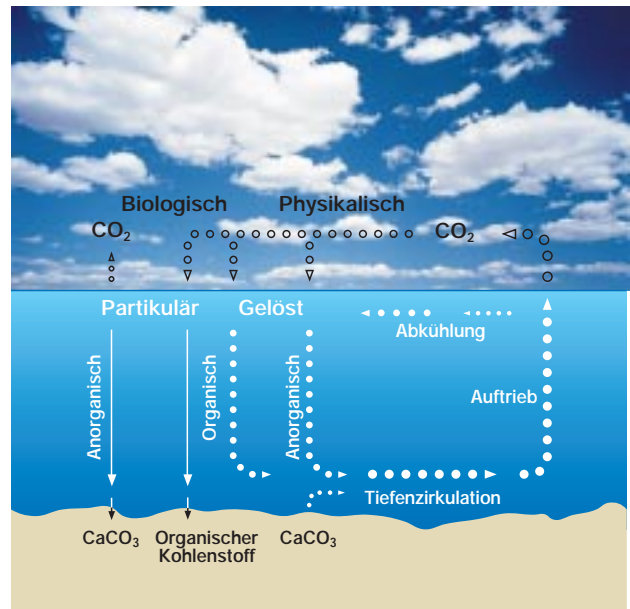


Fig. 3 Die zwei sogenannten „Kohlenstoffpumpen“ im Ozean: die „Löslichkeitspumpe“ und die „biologische Pumpe“. Der Begriff „Löslichkeitspumpe“ bezeichnet den Vertikaltransport von gelöstem CO_2 mit absinkendem Wasser aus der Deckschicht – ein rein physikalischer Vorgang, gekoppelt mit der Tiefenzirkulation des Ozeans. Der Begriff „biologische Pumpe“ bezeichnet den Vertikaltransport von Kohlenstoff, der durch biologische Aktivität in der Deckschicht (Primärproduktion) in Kalkschalen und organische Substanzen eingebaut wurde und als Bestandteil von Sinkstoffen in die Tiefsee absinkt. Passiv mit Wasser absinkender, gelöster organischer Kohlenstoff wird auch dieser Pumpe zugeordnet.

zung: Vor allem im Mündungsbereich großer Flüsse sowie in weitgehend abgeschlossenen Meeresbecken (Mittelmeer, Ostsee, Schwarzes Meer usw.) ist inzwischen das Seewasser durch Nähr- und Schadstoffeinträge stark verschmutzt. Die dadurch bedingte Minderung der natürlichen Stabilität bzw. Funktionalität der marinen und litoralen Ökosysteme, wie sie in vielen Regionen (z. B. Golf von Mexiko, Japanisches Meer) bereits deutlich zu beobachten ist, kann nun von den Folgen des Klimawandels zusätzlich gravierend verschärft werden. Deshalb hat IPCC Working Group II im Zustandsbericht den Impakts künftiger Klimaänderungen auf Meere, Küstenzonen und Inseln große Beachtung geschenkt (WATSON et al. 1996). Hiermit kommt nicht zuletzt die große, immer noch wachsende Bedeutung der Ozeane für den Menschen zum Ausdruck.

3. Bedeutung und Nutzung der Meere und Küsten

Neben der bereits erläuterten Rolle als Klimaregulator erfüllen die Ozeane und Küstengewässer eine Vielzahl ökologischer und ökonomisch wichtiger Funktionen,

die nach IPCC in die drei Gruppen Regulationsfunktionen, Produktions- und Nutzungsfunktionen sowie Informationsfunktionen untergliedert werden können (Fig. 4). So dienen typische Küstenökosysteme wie Seegras- und Salzwiesen einerseits als biochemische Filter für Nährstoffe oder Puffer gegen Energieeinträge der Brandung (Regulationsfunktionen) wie auch als Aufwuchsgebiete bzw. Lebensräume für Fische und Crustaceen (Produktionsfunktion); sie haben darüber hinaus einen Erkenntniswert, z.B. für das wissenschaftliche Verständnis spezifischer Ökosysteme (Informationsfunktion) sowie einen ästhetischen und emotionalen Wert „an sich“, der sich u.a. in der generell großen Anziehungskraft der Küstenlandschaft auf zahllose Menschen äußert. Bereits jetzt leben knapp 50% der Weltbevölkerung in Küstenregionen. Für diese stellt das Meer Rohstoffe, Nahrung, Lebens- und Erholungsraum oder Lagerstätten für Abfälle zur Verfügung; der heute auf der Erde vorhandene Reichtum von Arten und deren Überlebensfähigkeit sind nur der – über Jahrmilliarden entwickelten – Vielfalt der marinen bzw. litoralen (gezeitenbeeinflussten) Ökosysteme und Lebensformen, d.h. dem genetischen Erbe der Meere zu verdanken. Es wird oft übersehen, dass zusätzlich zur

Funktionen und Nutzungen	Funktions- und Nutzungsbeispiele	
	Ozeane	Küstengewässer
<p><i>Regulationsfunktionen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Regulation der lokalen Energie- und Stoffbilanz • Regulation der chemischen Zusammensetzung von Wasser • Regulation des Wasseraustausches zwischen Land und Meer • Speicherung bzw. Verteilung von Nährstoffen und organischer Substanz • Regulation der biotischen Nahrungsnetze • Nähr- und Schadstofffilterung • Erhaltung von Lebens- und Aufwuchsräumen • Erhaltung der Artenvielfalt 	<ul style="list-style-type: none"> Wärmetransport durch Meeresströmungen; Upwelling Deposition von Karbonaten und Salzen auf dem Meeresboden Meeresverdunstung als Motor des globalen Wasserkreislaufs Ablagerung großer Mengen biogener Sedimente in Tiefseebecken Vorhandensein spezieller Laichgebiete (Sargassosee) Sedimentation von Schwermetallen und Plankton Regionale Vielfalt thermischer, chemischer u. a. Bedingungen Freie Fluktuation von Arten horizontal und vertikal 	<ul style="list-style-type: none"> Sedimentablagerung am Kontinentalschelf Eintrag von Süßwasser an Flussmündungen; Ablagerung von (biogenem) Schlack und Sediment Oszillation der Salz-Süßwassergrenze Bindung von terrigenen Nährstoffen (N und P) an Sedimentpartikeln Verzahnung von Laich- und Aufwuchsräumen, z. B. Ästuare Existenz flacher Flutsäume (Seegras-, Salzwiesen) großräumige Ökosysteme, (Riffe, Mangroven, Watten) Entwicklung raumspezifischer Artendiversität
<p><i>Produktions- und Nutzungsfunktionen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Produktion von Trink- und Brauchwasser • Nahrungsproduktion • Produktion von Rohstoffen, Baumaterial usw. • Produktion biologisch-genetischer Ressourcen • Raum- und Ressourcenangebot für Menschen • Energienutzung • Transport • Tourismus und Erholung 	<ul style="list-style-type: none"> (Meerwasserentsalzung) Hochseefischerei (z. B. Hering, Thunfisch), Großalgenernte Manganknollen, Öl, Erdgas Langzeitliches Überleben von Spezies Förderplattformen Vertikaler Wärmeaustausch in Warmwassergebieten Seeverkehr (Kreuzfahrten) 	<ul style="list-style-type: none"> Meerwasserentsalzung in Ballungs- und Trockengebieten Küstenfischerei (z. B. Dorsch, Muscheln), Aquakultur Sand, Korallenkalk, Mangrovenhölzer usw. Ausprägung vielfältiger Artenspezifizierungen Küsten- und Inselsiedlungen, Subsistenzwirtschaft; Häfen Gezeitenkraftwerke, Onshore- und Offshore-Windanlagen Küstenschifffahrt Ferienzentren, Segeln, Surfen
<p><i>Informationsfunktionen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Ästhetische Information • Historisch-kulturelle Information • Erzieherische Funktion • Naturwissenschaftliche Information 	<ul style="list-style-type: none"> ? – Dokumentation mariner Lebewelt Biologische Erkenntnisse 	<ul style="list-style-type: none"> Naturerlebnisräume Küstenarchäologie Dokumentation spezifischer Küstenökosysteme (Korallen) Ökosystemforschung

Fig. 4 Bedeutung der Meere und ihrer Ökosysteme

direkten Produktgewinnung aus dem Meer auch die „von selbst ablaufenden“ Prozesse der Bioregulation im aquatischen Milieu eine große wirtschaftliche Rolle spielen. Bisher ist nur für wenige Meeresressourcen eine monetäre Bezifferung ihres Nutzungswerts für den Menschen in Mark und Pfennig möglich. Figur 4 gibt

einen Einblick in die Fülle der möglichen Funktionen und Nutzungen der Meeresräume, unter denen die Küstengewässer hinsichtlich ihres biogenetischen Potentials und ihrer Nutzungsdichte – im Vergleich zu ihrem Flächenanteil – eine herausragende Rolle spielen. Geht man von einem längerfristigen Trend der bevölkerungs-

geographischen Entwicklung seit 1970 aus, vor allem in der Dritten Welt, so dürfte bis zum Jahr 2030 die Zahl der Menschen, die am und vom Meer leben, auf mehr als zwei Drittel der Weltbevölkerung ansteigen. Der Großteil davon wird in Megastädten leben, mit mehr als 10 Mio. Einwohnern, mangelnder Infrastruktur und entsprechenden ökologischen Belastungen im weiteren Umfeld. Ein bereits klassisches Beispiel für diese Entwicklung findet man im Raum von Bangkok, wo die Stadterweiterung durch Abholzen der Mangrovenwälder meerwärts vorangetrieben wurde (Raumgewinn, Bauholzproduktion, Verkehrswege, Aquakultur, Subsistenzfischerei). Die ökologischen Funktionen und die Attraktivität der Mangroven (Sediment- und Schadstofffixierung; Lebensraum für Fische, Krebse; Artenvielfalt) fallen dabei jedoch dieser – nicht nachhaltig angelegten – Nutzung der Ressourcen rasch zum Opfer. Zu diesem vielfältigen Nutzungsdruck werden sich nach Ansicht von IPCC in den kommenden Jahrzehnten eine Reihe von klimabedingten Risiken hinzugesellen, die die Problemlage vieler Küsten weiter verschärfen. Diese werden noch weiter verschärft durch die Tatsache, dass in Bangkok wie auch in vielen anderen Städten der Untergrund infolge einer starken Grundwasserentnahme stark absinkt – um fast einen Meter in den letzten 3–4 Jahrzehnten.

4. Folgen des Klimawandels für die Meeresräume

Laut IPCC sind spezifische Reaktionen des Globalklimas auf die rasch steigenden Treibhausgaskonzentrationen zu erwarten, vor allem hinsichtlich der Temperaturverteilung (regional, saisonal sowie im Tag-Nacht-Verlauf) sowie der Niederschlagsverhältnisse und der Luftdruck- bzw. Windgradienten bestimmter Gebiete. Die Änderungen dieser klimatischen „Schlüsselparameter“ werden auch die physikalischen, biologischen und biogeochemischen Charakteristika der Ozeane auf verschiedenen Zeit- und Raumskalen beeinflussen. Diese Reaktionen wiederum werden zu Modifizierungen der ökologischen Strukturen im marinen Milieu führen, was auf die Funktionen der Meere (Fig. 4) nicht ohne Wirkung bleiben kann. In den offenen Meeren werden besonders als Ergebnis der sich erwärmenden Wasseroberflächen, der Abnahme der Meereisbedeckung und der damit einhergehenden Änderungen der ozeanischen Zirkulationsmuster (ocean conveyor belt) ökosystemare Anpassungen hervorgerufen. So führt eine höhere Meeresoberflächentemperatur zu einer polwärtigen Verschiebung der Organismenverteilung. Veränderungen in der Artenvielfalt, Aussterben bestimmter Arten und Ausbreitung anderer sind zu erwarten. Eine geänderte ozeanische Zirkulation und vertikale Durchmischung wiederum beeinflussen das Nährstoffangebot und folglich die Primärproduktion großer Meeresbereiche. Da die marine Primärproduktion einen wichtigen Platz im globalen Kohlenstoffkreis-

lauf einnimmt (als einer der Hauptspeicher für organisches C), ist auch hier ein Rückkopplungseffekt zwischen Ozean- und Klimasystem gegeben (Fig. 2). Welche klimatischen Folgen ein „Abreißen“ des Golfstroms für die nord- und westeuropäische Region haben könnte, wird deutlich, wenn man das Klima Westkanadas bzw. Südalaskas als Vergleich heranzieht.

Für die Küstengewässer und angrenzende Insel- bzw. Kontinentalgebiete werden sich die weitreichendsten Wirkungen ergeben aus

1. der erwarteten Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs und
2. den möglichen Veränderungen im Regime der Extremereignisse (Häufigkeit, Intensität von Stürmen und Sturmfluten; Auftreten von Starkregenereignissen usw.).

Ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg kann sich auf die natürlichen Küstensysteme auf vielfältige Weise auswirken. Aus Sicht des Menschen sind folgende sechs Effekte von besonderer Bedeutung:

- zunehmende Wahrscheinlichkeit des Eintretens von (Sturm-)Flutereignissen,
- Verschärfung der Erosion,
- dauerhafte Landverluste durch Überschwemmung,
- Ansteigen der Grundwasserspiegel,
- Eindringen von Salzwasser in Oberflächen- und Grundwasser,
- biologische Veränderungen in den Küstenökosystemen.

Die konkreten Effekte können wegen der regional jeweils unterschiedlichen Meeresspiegeltendenzen und der Vielfalt der Küstenräume allerdings ganz unterschiedlich ausgeprägt sein (WATSON et al. 1998).

Nach KLEIN & NICHOLLS (1999) können die möglichen sozioökonomischen Konsequenzen eines (beschleunigten) Meeresspiegelanstiegs unterteilt werden in

- a) reale Schäden an ökonomischen, ökologischen, kulturellen und elementar lebensnotwendigen Werten infolge von Landverlust sowie Verluste von Infrastruktur und natürlichen Lebensräumen (Habitaten),
- b) erhöhtes Überflutungsrisiko für die Küstenbevölkerung und deren Existenzgrundlagen (Siedlungsflächen, Wohnraum, Arbeitsplatz usw.),
- c) andere negative Folgen, insbesondere im Bereich der Wasserwirtschaft und der Ernährung (Landwirtschaft, Fischerei, Aquakultur).

In Figur 5 sind die wichtigsten Lebens- und Nutzungsbereiche von Küstenzonen aufgeführt und gleichzeitig deren Anfälligkeit gegenüber den genannten Auswirkungen angegeben, wobei direkte bzw. primäre Impakts im Vordergrund stehen, während indirekte Folgen (z. B. gesundheitliche Beeinträchtigung durch Verschlechterung der Wasserqualität) vernachlässigt werden.

Sektor	Biologisch-geophysikalische Effekte					
	Sturmfluthäufigkeit	Erosion	Überschwemmung	Ansteigender Grundwasserspiegel	Eindringen von Salzwasser	Ökosystemänderungen
Siedlungen und Wohnen	•	•	•	•		
Gesundheit, Sicherheit	•		•			
Wasserwirtschaft	•		•	•		•
Landwirtschaft	•	•	•	•	•	•
Fischerei	•	•	•		•	•
Tourismus	•	•	•			•

Fig. 5 Qualitativer Überblick über die direkten sozioökonomischen Folgen des Klimawandels und des damit verknüpften Meeresspiegelanstiegs in den wesentlichen Küstensektoren

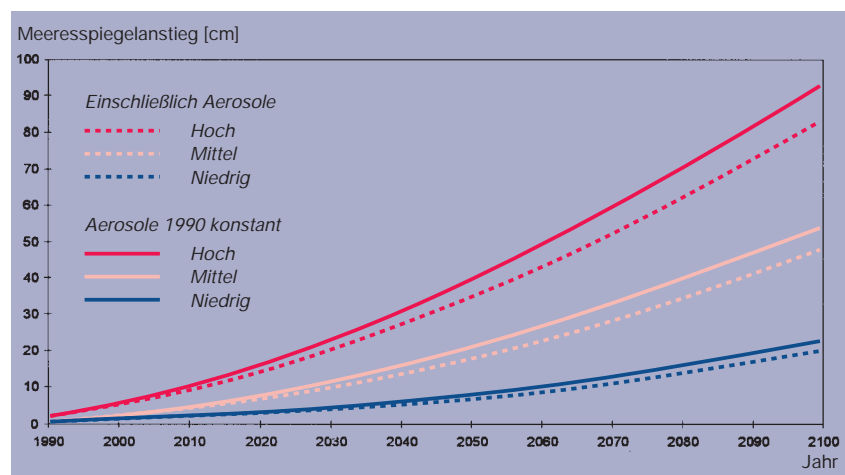
5. Künftige Meeresspiegelentwicklung

Der Anstieg des Meeresspiegels ist mit dem prognostizierten Trend einer globalen Erwärmung ursächlich verknüpft. Er setzt sich zusammen aus der stärkeren vertikalen Ausdehnung der Wassersäule einerseits (sterischer Effekt, ca. 60–70%) und dem vermehrten Zufluss von Süßwasser aus dem abschmelzenden Eis der Gebirgsgletscher und der Eisschilde in Grönland bzw. Antarktis (eustatischer Effekt, etwa 30–40%).

Die Szenarien für den Meeresspiegelanstieg im kommenden Jahrhundert wurden gegenüber der ersten IPCC-Abschätzung von 1990 (30–110 cm, mittlerer Wert 66 cm/Jh.) im Second Assessment Report (IPCC 1996) mit nun 49 cm/Jh. (Bereich 20–86 cm) durch Verbesserung der Klimamodelle (in denen nun auch eine weitere Steigerung des atmosphärischen Aerosolgehalts berücksichtigt ist) deutlich nach unten korrigiert (Fig. 6). Global gesehen, stellt diese Anstiegsrate allerdings immer noch eine Beschleunigung um das 2 bis 5fache des bisherigen registrierten Trends dar. Allerdings sind die Unsicherheiten in diesen Prognosen noch recht hoch, u. a. deshalb, weil künftige Bilanzänderungen beim Grönlandeis sehr schwierig abzuschätzen sind. Es ist unter Fachleuten nämlich noch umstritten, ob bei globaler Erwärmung eine Volumenverringerung dieses Eisschildes durch randliches Abschmelzen bzw. Kalben gegenüber einer möglichen Zunahme der Eismächtigkeit überwiegt. Diese ist mit großer Wahrscheinlichkeit wegen vermehrter Schneefälle für die Antarktis zu erwarten, was als negativer Beitrag in die Berechnung des Meeresspiegelanstiegs einfließt. Andererseits werden die Gebirgsgletscher noch stärker schrumpfen, als dies schon in den letzten 100 Jahren beobachtet werden konnte, so dass sich die Gesamtbilanz Eismassen zu Ozeanwasser zugunsten des Letzteren verschieben dürfte.

Allerdings stellt IPCC klar, dass die Änderungen des Meeresspiegels regional keineswegs parallel mit dem globalen Trend verlaufen müssen. In Abhängigkeit von glazialisostatischen Hebungs- oder Senkungstendenzen, lokaler Tektonik, natürlichen oder auch anthropogen bedingten Sackungstendenzen kommt es daher zu regionalen Modifikationen, die den globalen Anstiegstrend teils verstärken (z. B. Mississippidelta, japanische Ballungszentren; Ems-Dollart-Gebiet), teils abschwächen oder gar umkehren können (nördliche Ostsee, Ostkanada, Kanarische Inseln etc.). So dürfte etwa entlang der deutschen Ostseeküste und in Nordfriesland zum eustatischen Anstiegstrend zusätzlich eine leichte isostatisch bedingte Landsenkung von ca. 5 cm/Jh. hinzukommen. Da auch der Effekt der thermisch bedingten „Anhebung“ des Meeresspiegels in den europäischen Randmeeren überproportional groß ausfällt (er ist abhängig von der mittleren Wassertiefe eines Meeresbeckens), ist für die Küstenregionen der Nordsee und der südlichen Ostsee künftig mit einer Zunahme der Anstiegsraten zu rechnen. Eine Beschleunigung von bisher knapp 2 mm/Jahr auf 4–5 mm/Jahr ist hier aufgrund der genannten Effekte als plausibles Szenario anzusehen.

Fig. 6 Meeresspiegelanstiegskurven für den Zeitraum von 1990 bis 2100 auf der Basis des IPCC-Emissionsszenarios IS92a



6. Änderungen von Extremereignissen?

Obschon die lokalen Abweichungen im Vergleich zum globalen Trend erheblich sein können, ist wegen der Fülle vorhandener Pegelraten die Aussagesicherheit für den Meeresspiegelanstieg noch vergleichsweise günstig. Dagegen lassen die weiterhin bestehenden Beschränkungen der verfügbaren Klimamodelle, z. B. deren sehr unzureichende räumliche Auflösung oder die unzureichende Erfassung der Rückkopplungseffekte durch Wolken, derzeit keine belastbaren Aussagen bezüglich der möglichen Änderungen von Luftdruck, Stürmen (Häufigkeit, Stärke, Richtung) oder Niederschlägen zu. So enthält der 2. IPCC-Bericht auch keine präzisen Aussagen darüber, ob tropische bzw. außertropische Sturmereignisse durch den Treibhauseffekt an Häufigkeit oder Stärke zunehmen werden bzw. ihre Zugbahnen sich eventuell ändern. Auch die Frage nach signifikanten Veränderungen im regionalen Niederschlagsregime (Intensität, Dauer, Häufigkeit usw.) bleibt bislang weitgehend unbeantwortet. IPCC deutet lediglich an, dass für die mittleren und höheren Breiten der Nordhemisphäre eine Zunahme der winterlichen Niederschläge wahrscheinlich ist (WATSON et al. 1996). Solche Aussagen wären jedoch von größter Wichtigkeit für eine Abschätzung der künftigen Risikosituation oder der weiteren Nutzungsbedingungen für viele dicht besiedelte Küstenzonen: Drohen künftig durch eine Häufung von Extremereignissen regelmäßig Sturmfluten oder landseitige Überschwemmungen unbekanntem Ausmaßes oder welche Schutz- bzw. Anpassungsmaßnahmen sind besonders vordringlich für eine Erhaltung der Ressourcen, Lebensräume und Ökosysteme? In der südlichen Ostsee haben jüngste Untersuchungen von HUPFER et al. (1996) ein gehäuftes Auftreten von Sturmflutwasserständen in der 2. Hälfte dieses Jahrhunderts gezeigt.

7. Folgen für die Nutzung der Meere und Küsten

Die wahrscheinlichen wie auch die noch kaum abzuschätzenden Änderungen der regionalen Klimagegebenheiten werden sicherlich die Nutzung mariner und litoraler Ressourcen in weit reichendem Maße beeinflussen, und zwar in positiver wie in negativer Weise. In erster Linie betrifft dies die biologischen Ressourcen. Bei einer Abnahme der Primärproduktivität in den offenen Meeren ist eine reduzierte Ausbeute von wichtigen Fischarten zu erwarten. Dieser für die Ökonomie und Ernährungssituation vieler Küstenländer wichtige Effekt wird zunehmend verschärft durch die Verringerung bzw. Degradation vieler Aufwuchs- und Laichgebiete (z. B. Seegraswiesen, Mangroven), wie es als Ergebnis von zunehmendem Sedimentmangel und Gewässerverschmutzung vielerorts bereits zu beobachten ist. Erosion, Schadstoffeinträge oder Verschlickung in Küstenhabitaten werden ihrerseits wieder forciert durch

das Auftreten extremer Witterungsbedingungen (Stürme, Starkregen etc.), aber natürlich auch durch menschliche Eingriffe (Abholzung, Chemikalieneinsatz in der Landwirtschaft u. a.).

Andererseits könnten die Erträge bei der Ernte von Krill in antarktischen Gewässern bei einem Rückgang der Meereisbedeckung zunehmen.

Gravierende negative Folgen sind mit großer Sicherheit für temperaturempfindliche Ökosysteme zu erwarten. So geraten Korallenriffe, die hinsichtlich der Artenvielfalt, die sie beherbergen, als die „Regenwälder der Meere“ gelten, bei Wassertemperaturen über 30 °C aus ihrem ökologischen Gleichgewicht. Begünstigt durch die schlechte Gewässerqualität im Umfeld vieler Korallenriffe, ist das Phänomen des „Korallenausbleichens“, das dieses ökologische Umkippen anzeigt, bereits an vielen tropischen Küsten zu beobachten: Weil die Algenart, die an den Kalkröhren mit den Korallentierchen in Symbiose lebt, wegen der sehr hohen Wassertemperaturen und verstärkter UV-Strahlung nicht mehr existieren kann, verlieren die Riffe ihre rötliche oder bräunliche Färbung und sterben ab. Auch bestimmte Algenarten leben bereits an der Obergrenze ihrer thermischen Toleranz und werden bei höheren Wassertemperaturen absterben. Prinzipiell ist eine räumliche Umverteilung der temperatursensiblen Spezies wahrscheinlich; heute sind z. B. in der Nordsee mehr wärmeliebende Arten von Fischen, Mollusken, Quallen usw. anzutreffen als noch vor 2–3 Jahrzehnten.

Ungünstige Effekte sind auch für den Seeverkehr und die Meereswirtschaft zu erwarten. Während im offenen Meer die Zunahme von Stürmen einen neuen Risikofaktor für Schiffe und Förderanlagen darstellen könnte, wird vermutlich die fortschreitende Verschlickung von Flußmündungen und Ästuaren Beeinträchtigungen der Küstenschifffahrt bzw. höhere Kosten für die Unterhaltung der Hafenzufahrten mit sich bringen. Andererseits könnte in einigen Regionen die regionale Entwicklung des Tourismus entlang der Küsten und auf Inseln von künftigen Klimatrends profitieren, z. B. durch wärmere oder längere Sommer in Nord- und Mitteleuropa, andernorts aber auch von der Änderung sekundärer Klimaparameter wie Niederschläge, Bewölkung oder Winde negativ beeinflusst werden. Unberücksichtigt bleibt in dieser Betrachtung möglicher Klimafolgen die bereits erkennbare Ausdünnung der stratosphärischen Ozonschicht. Über die bereits genannten Effekte hinaus hat die daraus resultierende Verstärkung der UV-Einstrahlung vielfältige direkte (auf den Menschen selbst) und indirekte Auswirkungen (auf Artenvielfalt, biologische Produktivität, Nahrungsnetze).

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im 2. Bericht von IPCC und dessen neuesten Regionalanalysen (WATSON et al. 1996, 1998) sind die Ergebnisse aus zahlreichen Studien zur Vulnerabilität von Meeres- und Küstenräumen gegenüber den sich än-

dernden Klimabedingungen zusammengefasst. Am Beispiel von Ländern wie Bangladesch, Ägypten oder Marshallinseln werden der Umfang der Betroffenheit vieler Küstengebiete bzw. die sich zuspitzende Gefährdungssituation bereits jetzt sehr deutlich. Auch für die Ozeane sind Anpassungen an die wahrscheinlichen Folgen eines Klimawandels, soweit sie bisher überhaupt überblickt und verstanden werden können, recht beschränkt. Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass die Hauptprobleme meistens bereits durch direkte menschliche Eingriffe (Verschmutzung, Überfischung usw.) entstanden sind und nun durch die Reaktionen des Klimasystems zusätzlich überlagert werden. Nur in den wenigsten Fällen wird durch diese Klimateffekte eine Verbesserung der Problemsituation eintreten.

Dies bedeutet, dass zur Lösung der sich verschärfenden Risiken und Konflikte neben Grundlagenforschung auch problem- und strukturübergreifende Mechanismen entwickelt werden müssen. Zu den ersteren gehören Studien, die ein besseres Verständnis über die Rolle der Ozeane in der mittel- bis langzeitlichen Kli-

mavariabilität (d. h. über Jahrzehnte bis Jahrhunderte) ermöglichen und die resultierenden Rückkopplungen der hydrologischen und biogeochemischen Kreisläufe auf das Klimasystem verständlich machen. Keinesfalls dürfen die ozeanischen Prozesse getrennt von den Veränderungen auf dem Festland betrachtet werden. So sind die Küstenökosysteme besonders beeinflusst durch die Veränderung der Stofftransporte in den Flüssen, die meist das Ergebnis von Landnutzungsänderungen (Waldrodung), Staudambau usw. sind. Das Verständnis dieser Prozesse ist ein enorm wichtiger Schritt, um Anpassungsmöglichkeiten an die Folgen des Globalen Wandels abschätzen und – soweit möglich – verwirklichen zu können. Solche regionale Anpassungsstrategien sind zusätzlich zu einer global notwendigen Politik, die den erkennbaren Trend zur Verstärkung des Treibhauseffekts bremst, speziell für Küstenländer wohl unumgänglich. Dies beinhaltet u. a. die Aufgabe, möglichst rasch Konzepte und Strukturen für ein sog. integriertes Küstenmanagement ICZM (*Integrated Coastal Zone Management*) zu erarbeiten.

Literatur

- HOUGHTON, J. T., et al. [Eds.] (1996): *Climate Change 1995 – the Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of IPCC*. Cambridge.
- HUPFER, P., BAERENS, CH., KOLAX, M., & B. TINZ (1996): Beitrag zur Kenntnis der Auswirkungen von Klimaschwankungen auf die deutsche Ostseeküste. In: STERR, H., & CH. PREU [Hrsg.]: *Beiträge zur aktuellen Küstenforschung. Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft*, 18: 199–200.
- KLEIN, R. J. T., & R. J. NICHOLLS (1999): Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio*, 28 (2): 182–187.
- SCHELLNHUBER, H. J., & H. STERR [Hrsg.] (1993): *Klimaänderung und Küste, Einblick ins Treibhaus*. Heidelberg.
- WATSON, R. T., et al. [Eds.] (1996): *Climate Change 1995 – Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of IPCC*. Cambridge.
- WATSON, R. T., et al. [Eds.] (1998): *The Regional Impacts of Climate Change – An Assessment of Vulnerability. Special Report of Working Group II of IPCC*. Cambridge.

Manuskriptannahme: 20. Mai 1999

- Prof. Dr. HORST STERR, Universität Kiel, Geographisches Institut, AG Küstengeographie, D-24098 Kiel
E-mail: sterr@geographie.uni-kiel.de
- Prof. Dr. VENUGOPALAN ITTEKOT, Universität Hamburg, Institut für Biogeochemie und Meereschemie, Bundesstraße 55, D-20146 Hamburg
E-mail: ittekkot@dkrz.de
- RICHARD KLEIN M. Sc., Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Abteilung Globaler Wandel und Soziale Systeme, Postfach 601203, D-14412 Potsdam
E-mail: richard.klein@pik-potsdam.de