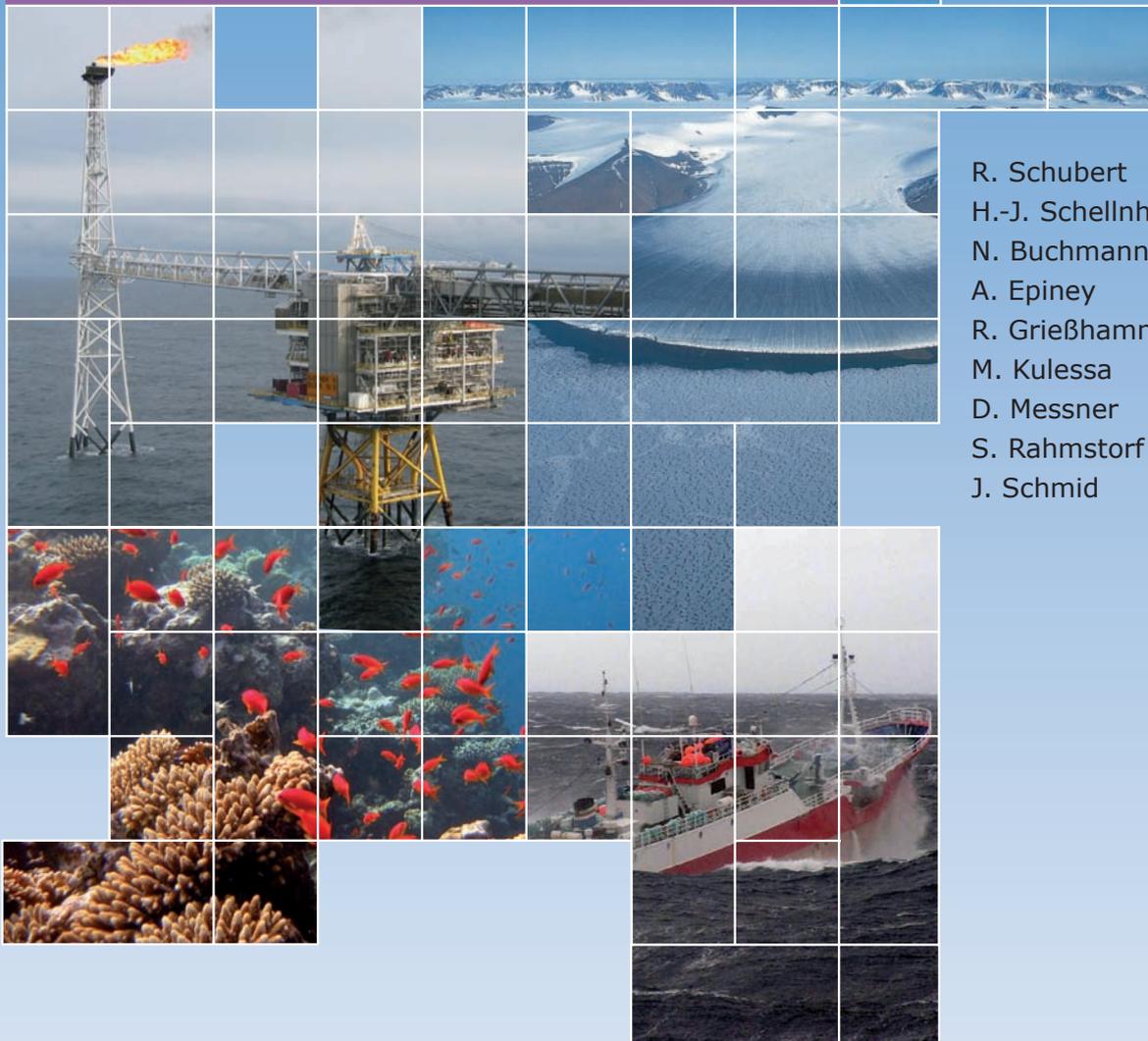




Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer

Sondergutachten



R. Schubert
H.-J. Schellnhuber
N. Buchmann
A. Epiney
R. Griebhammer
M. Kulesa
D. Messner
S. Rahmstorf
J. Schmid

Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

(Stand: 01. Januar 2006)

Prof. Dr. Renate Schubert (Vorsitzende), Ökonomin
Direktorin des Instituts für Wirtschaftsforschung der ETH Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber (stellv. Vorsitzender), Physiker
Direktor des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Visiting Professor der Oxford University (Fachbereich Physik und Christ Church College)

Prof. Dr. Nina Buchmann, Ökologin
Professorin für Graslandwissenschaften an der ETH Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Astrid Epiney, Juristin
Direktorin am Institut für Europarecht der Universität Fribourg, Schweiz

Dr. Rainer Grießhammer, Chemiker
Mitglied der Geschäftsführung des Öko-Instituts e.V., Freiburg

Prof. Dr. Margareta E. Kulessa, Ökonomin
Professorin für Allgemeine Volkswirtschaftslehre und Internationale Wirtschaftsbeziehungen an der Fachhochschule Mainz

Prof. Dr. Dirk Messner, Politikwissenschaftler
Direktor des Deutschen Instituts für Entwicklungspolitik, Bonn

Prof. Dr. Stefan Rahmstorf, Physiker
Leiter der Abteilung Klimasystem am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam

Prof. Dr. Jürgen Schmid, Ingenieur für Luft- und Raumfahrttechnik
Professor für Elektrotechnik/Informatik an der Universität Kassel und Leiter des Instituts für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel



**Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen**

Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer

Sondergutachten

Berlin 2006

ISBN 3-936191-13-1

Titelbilder: Slepner-Gasförderplattform in der Nordsee (M. Schulz-Baldes, WBGU), „Elefantenfußgletscher“ in der Arktis (H. Oerter, AWI Bremerhaven), Korallenriff (Dan Barbus, Rumänien), Raubfischer im Pazifik (Australian Customs Service)

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (WBGU)
Geschäftsstelle
Reichpietschufer 60–62, 8. OG
10785 Berlin

Telefon	(030) 263948 0
Fax	(030) 263948 50
E-Mail	wbgu@wbgu.de
Internet	http://www.wbgu.de

Redaktionsschluss 23. März 2006

Alle Publikationen des Beirats sind im Internet in deutscher und englischer Sprache abrufbar.

© 2006, WBGU

Danksagung

Die Erstellung dieses Sondergutachtens wäre ohne die engagierte und unermüdliche Arbeit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Geschäftsstelle und der Beiratsmitglieder nicht möglich gewesen.

Zum wissenschaftlichen Stab gehörten während der Arbeiten an diesem Gutachten:

Prof. Dr. Meinhard Schulz-Baldes (Generalsekretär), Dr. Carsten Loose (stellvertretender Generalsekretär, Geschäftsstelle Berlin), Steffen Bauer, MA (Forschungsstelle für Umweltpolitik, Freie Universität Berlin, seit 01.01.2006), Dr. Gregor Betz (PIK Potsdam, bis 30.09.2005), Dipl.-Phys. Gregor Czisch (Institut für elektrische Energietechnik/Rationelle Energieanwendung, IEE_RE, Kassel), Dipl.-Volksw. Oliver Deke (Geschäftsstelle Berlin, ab 17.10.2005), Dipl.-Umweltwiss. Tim Hasler (Geschäftsstelle Berlin), Dr. Monika Heupel (Universität Bremen, bis 15.10.2005), Dipl.-Volksw. Kristin Hoffmann (ETH Zürich), Dr. Susanne Kadner (PIK Potsdam, bis 30.04.2006), Dr. Sabina Keller (ETH Zürich), Dipl.-Pol. Lena Kempmann (Geschäftsstelle Berlin), Dipl.-Geogr. Andreas Manhart (Öko-Institut e.V., Freiburg), Dr. Franziska Matthies (Universität Kopenhagen, bis 31.10.2005), Dr. Nina V. Michaelis (Geschäftsstelle Berlin, bis 18.11.2005), Dipl.-Volksw. Markus Ohndorf (ETH Zürich), Dr. Benno Pilardeaux (Geschäftsstelle Berlin), Dr. Martin Scheyli (Universität Fribourg, Schweiz), Dr. Astrid Schulz (Geschäftsstelle Berlin), Dipl.-Pol. Joachim Schwerd (Fachhochschule Mainz).

Den externen Gutachtern dankt der Beirat für die Zuarbeit und wertvolle Hilfe. Im Einzelnen flossen folgende Expertisen und Stellungnahmen in das Gutachten ein:

- Prof. David Archer (Department of Geophysical Sciences, University of Chicago): Destabilization of Methane Hydrates: A Risk Analysis.
- Dr. Nick Brooks, Prof. Dr. Robert Nicholls, Prof. Dr. Jim Hall (Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK): Sea Level Rise: Coastal Impacts and Responses.
- Dr. Keith Brander (International Council for the Exploration of the Sea – ICES, Kopenhagen,

Dänemark): Assessment of Possible Impacts of Climate Change on Fisheries.

- Prof. Dr. Hans-Otto Pörtner (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven): Auswirkungen von CO₂-Eintrag und Temperaturerhöhung auf die marine Biosphäre.

Danken möchte der Beirat auch jenen Personen, die durch Hinweise und Beratung in einer Expertenbefragung der Arbeit am Gutachten wertvolle Dienste erwiesen haben:

- Dr. Peter G. Brewer (Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA),
- Prof. Atsushi Ishimatsu (Nagasaki University, Japan),
- Dr. James Orr (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-Sur-Yvette, Frankreich),
- Prof. Dr. Ulf Riebesell (Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, Kiel).

Für die Begutachtung einzelner Kapitel bzw. textliche Zuarbeiten dankt der Beirat überdies Dipl.-Phys. Jochen Bard (Institut für Solare Energieversorgungstechnik, ISET, Kassel), Dr. Matthias Hofmann (PIK Potsdam) sowie Dr. Corinne Le Quéré (School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, UK).

Der WBGU möchte sich überdies herzlich bei den Organisatoren und Gesprächspartnern während der Studienreise nach Norwegen vom 6. bis 14. Oktober 2005 bedanken. Viele Experten aus Verwaltung, Politik und Wissenschaft haben für den Beirat Führungen, Veranstaltungen und Präsentationen vorbereitet und standen für Diskussionen zur Verfügung. Besonderer Dank gilt Herrn Botschafter Roland Mauch und unserer Ansprechpartnerin in der deutschen Botschaft in Oslo, Frau Charlotte Schwarzer für die Mithilfe bei der Organisation der Reise.

Für wertvolle Gespräche und Diskussionen danken wir den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern folgender Institutionen und Firmen:

- SINTEF Stiftelsen for industriell og teknisk forskning, Trondheim,
- NTNU Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim,

- Universitetet i Bergen,
- Havforskningsinstituttet – Institute of Marine Research (IMR), Bergen,
- BCCR Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen,
- Havforskningsinstituttet, Austevoll, Storebø,
- Sea Star International AS, Storebø,
- Statoil ASA, Stavanger,
- Miljøstiftelsen Bellona, Oslo,
- Miljøverndepartementet (Umweltministerium), Oslo,
- Fiskeri- og Kystdepartementet (Fischerei- und Küstenministerium), Oslo,
- Olje- og Energidepartementet (Öl- und Energieministerium) Oslo.

Unser ganz besonderer Dank gilt der Firma Statoil, die den Besuch der Gasförderplattform „Sleipner“ in der Nordsee erlaubte und uns eingehend in die Technik der Plattform, der Gasförderung und CO₂-Sequestrierung einführte. Auf „Sleipner“ führte uns geduldig und alle Fragen beantwortend der Plattformchef Egil Kai Elde.

Inhaltsverzeichnis

	Danksagung	V
	Inhaltsverzeichnis	VII
	Tabellen	X
	Abbildungen	XI
	Kästen	XII
	Zusammenfassung für Entscheidungsträger	1
1	Einleitung	5
2	Globale Erwärmung und Meeresökosysteme	7
2.1	Klimafaktoren	7
2.1.1	Anstieg der Wassertemperaturen	7
2.1.2	Rückgang des arktischen Meereises	8
2.1.3	Änderung der Meeresströmungen	9
2.2	Auswirkungen der globalen Erwärmung auf Meeresökosysteme	11
2.2.1	Natürliche Klimavariabilität	11
2.2.2	Anthropogener Klimawandel	13
2.3	Schwerpunkt: Klima und Fischerei	17
2.3.1	Veränderungen bei Fischpopulationen	17
2.3.2	Regionale Prognosen der Auswirkungen auf die Fischerei	17
2.3.3	Globale Prognosen der Auswirkungen auf die Fischerei	19
2.4	Schwerpunkt: Klima und Korallenriffe	19
2.4.1	Auswirkungen der Erwärmung auf Korallen	20
2.4.2	Auswirkungen der Versauerung auf Korallen	21
2.4.3	Maßnahmen zum Schutz von Korallen	21
2.5	Leitplanke: Schutz der Meeresökosysteme	22
2.5.1	Leitplankenvorschlag	22
2.5.2	Begründung und Umsetzbarkeit	22
2.6	Handlungsempfehlungen: Management mariner Ökosysteme verbessern	23
2.6.1	Fischereimanagement	24
2.6.2	Meeresschutzgebiete	25
2.7	Forschungsempfehlungen	31
3	Meeresspiegelanstieg, Hurrikane und Gefährdung der Küsten	33
3.1	Klimafaktoren	33
3.1.1	Anstieg des Meeresspiegels	33
3.1.2	Verstärkung tropischer Wirbelstürme	38

3.2	Auswirkungen auf Küstengebiete	40
3.2.1	Naturräumliche Effekte	41
3.2.2	Gesellschaftliche Effekte	46
3.3	Leitplanke: Meeresspiegelanstieg	50
3.3.1	Leitplankenvorschlag	50
3.3.2	Begründung	51
3.3.3	Umsetzbarkeit	53
3.4	Handlungsempfehlungen: Anpassungsstrategien entwickeln und umsetzen	54
3.4.1	Küstenregionen an Klimafolgen anpassen	54
3.4.2	Völkerrechtliche Regelung des Verlusts an Territorium vereinbaren	62
3.5	Forschungsempfehlungen	65
4	Versauerung der Meere	67
4.1	Chemische Veränderungen im Meerwasser	67
4.1.1	CO ₂ -Eintrag	67
4.1.2	Änderung des Karbonathaushalts	68
4.1.3	Sonderrolle des CO ₂	69
4.2	Zukünftige Entwicklung der Kohlenstoffsенke Meer	69
4.3	Auswirkungen der Versauerung auf Meeresökosysteme	71
4.3.1	Physiologische Wirkungen auf Meeresorganismen	71
4.3.2	Auswirkungen auf kalkbildende Organismen	72
4.3.3	Ökosystemstruktur und höhere trophische Ebenen	74
4.3.4	Auswirkungen der Versauerung auf die Fischerei	74
4.3.5	Rückwirkungen veränderter Kalkbildung auf den Kohlenstoffkreislauf	74
4.4	Leitplanke: Versauerung der Meere	75
4.4.1	Leitplankenvorschlag	75
4.4.2	Begründung und Umsetzbarkeit	76
4.5	Handlungsempfehlungen: Klimaschutz und Meeresschutz verknüpfen	77
4.5.1	Rolle von CO ₂ im Klimaschutz neu bewerten	77
4.5.2	Emissionen aus der Schifffahrt berücksichtigen	78
4.6	Forschungsempfehlungen	79
5	CO₂-Speicherung im Meer und im Meeresboden	81
5.1	Sequestrierung von CO ₂	81
5.1.1	Potenziale und Kosten	81
5.1.2	Risiken und Nachhaltigkeit	82
5.2	CO ₂ -Speicherung im Meer	83
5.2.1	Speicherung und Verweildauer von CO ₂	83
5.2.2	Auswirkungen der CO ₂ -Speicherung auf Tiefseeorganismen	83
5.2.3	Völkerrechtliche Ausgangslage	84
5.3	CO ₂ -Speicherung in geologischen Formationen im Meeresboden	85
5.3.1	CO ₂ -Einbringung in den Meeresboden	85
5.3.2	Risiken und Nachhaltigkeit der CO ₂ -Speicherung im Meeresboden	85
5.3.3	Regulierung der CO ₂ -Einbringung in den Meeresboden	85
5.4	Handlungsempfehlungen: CO ₂ -Speicherung regulieren	90
5.4.1	Einbringung von CO ₂ in das Meer verbieten	90
5.4.2	Speicherung von CO ₂ im Meeresboden begrenzen	90
5.5	Forschungsempfehlungen	91
6	Methanhydrate im Meeresboden	93
6.1	Vorkommen von Methanhydraten	93
6.2	Methanfreisetzung durch Eingriffe des Menschen	94
6.2.1	Reaktion auf Druck- und Temperaturänderungen	94
6.2.2	Wirkung des Klimawandels auf Methanhydrate	94
6.2.3	Abbau von Methanhydraten	96

6.3	Mögliche Folgen der Methanfreisetzung	97
6.4	Handlungsempfehlungen: Freisetzung von Methan verhindern	98
6.5	Forschungsempfehlungen	99
7	Kernbotschaften	101
8	Literatur	103

Tabellen

Tab. 3.1-1	Geschätzter globaler Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2300 bei einer auf 3°C begrenzten globalen Erwärmung	38
Tab 3.2-1	Klassifizierung der durch einen Meeresspiegelanstieg verursachten Schäden	49
Tab. 4.3-1	Gruppen kalkbildender Meeresorganismen	72

Abbildungen

Abb. 2.1-1	Verlauf der global gemittelten Oberflächentemperatur der Meere	8
Abb. 2.1-2	Entwicklung der Oberflächentemperaturen im Nordatlantik und den europäischen Randmeeren	8
Abb. 2.1-3	Satellitenaufnahmen der arktischen Eisbedeckung	9
Abb. 2.1-4	Das System der globalen Meeresströmungen	10
Abb. 2.2-1	Schematische Struktur eines pelagischen Meeresökosystems	12
Abb. 2.2-2	Korrelation der Fangmengen verschiedener, wirtschaftlich bedeutender Fischbestände mit dem atmosphärischen Zirkulationsindex	13
Abb. 2.3-1	Voraussichtliche Verschiebung der Lebensräume einiger wichtiger kommerziell befischter Arten bei weiterer Erwärmung der Meere	18
Abb. 2.6-1	Ordnung der Meereszonen nach dem Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (UNCLOS)	28
Abb. 3.1-1	Mittlere globale Temperatur und Meeresspiegel zu verschiedenen Zeiten in der Erdgeschichte sowie die Projektion für das Jahr 2100	33
Abb. 3.1-2	Ausdehnung der Abschmelzfläche auf Grönland nach Satellitendaten	35
Abb. 3.1-3	Das Larsen-B-Eisschelf an der antarktischen Halbinsel auf Satellitenaufnahmen	36
Abb. 3.1-4	Der Anstieg des globalen Meeresspiegels aus Satellitenmessungen	37
Abb. 3.1-5	Zeitliche Entwicklung der Energie von Tropenstürmen und der mittleren Meerestemperatur im tropischen Atlantik von August bis Oktober	40
Abb. 3.2-1	Verteilung von Landfläche, ohne Antarktis, als Funktion der Höhe über der mittleren Hochwasserlinie	41
Abb. 3.2-2	Küstengebiete in Europa, Teilen Westasiens und Nordafrikas	42
Abb. 3.2-3	Küstengebiete entlang der Nordsee	42
Abb. 3.2-4	Küstengebiete entlang des Golf von Bengalen und im Ganges-Brahmaputra-Meghna-Flussdelta	43
Abb. 3.2-5	Bevölkerung, die im Jahr 1995 unterhalb einer bestimmten Höhe über der mittleren Hochwasserlinie lebte	47
Abb. 3.3-1	Überflutete Gebiete im südlichen Manhattan (New York)	51
Abb. 4.1-1	Schema des globalen Kohlenstoffkreislaufs	67
Abb. 4.1-2	Karbonatsystem des Meerwassers	68
Abb. 4.1-3	Projektion unterschiedlicher CO ₂ -Konzentrationen und ihrer Wirkung auf den Karbonathaushalt des Südlichen Ozeans	69
Abb. 4.3-1	Aragonitsättigung und gegenwärtige Riffstandorte von Warmwasserkorallen	73
Abb. 4.4-1	Variabilität des mittleren pH-Werts der Ozeane in der Vergangenheit und Gegenwart sowie Projektion für die Zukunft	75
Abb. 5.3-1	Das Slepner-Projekt in der Nordsee	86
Abb. 6.1-1	Änderung der Methanhydratschicht bei Erwärmung	94
Abb. 6.1-2	Ursachen und Folgen der Methanhydratdestabilisierung	95
Abb. 6.2-1	Atmosphärische Methankonzentration für ein Szenario mit einer Gesamtmenge von 1.000 Gt anthropogener CO ₂ -Emissionen	98

Kästen

Kasten 1-1	Das Leitplankenkonzept	6
Kasten 2.6-1	Ordnung der Meereszonen im Völkerrecht	28
Kasten 3.4-1	Konfliktpotenzial bei Umsiedlungen	56
Kasten 3.4-2	Küstenmanagement an der deutschen Nordsee	58
Kasten 5.3-1	Das Slepner-Projekt	86
Kasten 5.3-2	Erneuerbare Energien aus dem Meer	88

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Neue wissenschaftliche Erkenntnisse verdeutlichen, dass der Klimawandel große Veränderungen und Schäden für die Meeresumwelt und die Küsten verursachen wird, die erhebliche Folgen für den Menschen haben dürften. Die Oberflächenschichten erwärmen sich, der Meeresspiegel steigt immer rascher an, die Meere versauern zunehmend und die Meeresökosysteme sind bedroht. Die Menschheit ist dabei, Prozesse im Meer anzustoßen, die in den letzten Jahrmillionen ohne Beispiel sind, gleichzeitig aber wegen der erheblichen geophysikalischen Verzögerungseffekte den Zustand der Weltmeere für Jahrtausende bestimmen werden. Damit greift der Mensch an entscheidender Stelle in die Funktionsweise des Erdsystems ein, wobei viele Folgen noch nicht genau vorhersehbar sind. Entschlossenes und vorausschauendes Handeln ist jetzt notwendig, damit die Weltmeere kritische Systemgrenzen nicht überschreiten. Der Umgang des Menschen mit den Meeren wird eine entscheidende Bewährungsprobe auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft sein.

Meeresumwelt durch Klimaschutz bewahren

Die Erwärmung und Versauerung der Meere sowie ein deutlicher Anstieg des Meeresspiegels sind heute bereits messbar. Die Ursachen sind klar zu benennen: Die durch den Menschen verursachte Zunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre hat zu einer globalen Erwärmung geführt, die auch die Temperatur der obersten Schicht der Weltmeere erhöht hat. Als Folge steigt der Meeresspiegel, sowohl durch die thermische Ausdehnung des Wassers als auch durch schmelzende Eismassen. Gleichzeitig führt die stetig steigende CO₂-Konzentration in der Luft zu einem CO₂-Eintrag in das Meer und verursacht dort über chemische Reaktionen eine Versauerung des Meerwassers. Diese Veränderungen können nur durch drastische Verringerungen der anthropogenen Treibhausgasemissionen begrenzt werden. Rasches Handeln ist daher erforderlich:

- Ehrgeiziger Klimaschutz ist notwendig, um die Folgen von Erwärmung, Versauerung und Meer-

esspiegelanstieg für die Meeresumwelt und den Menschen zu begrenzen. Der WBGU empfiehlt deshalb, die globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen bis 2050 gegenüber 1990 in etwa zu halbieren. Anpassungsmaßnahmen können nur dann erfolgreich sein, wenn die gegenwärtige Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs und die zunehmende Versauerung der Meere gestoppt werden können.

- Die vom WBGU bereits früher empfohlene Leitplanke zur Begrenzung des Anstiegs der bodennahen Lufttemperatur auf höchstens 2°C gegenüber dem vorindustriellen Wert und der Temperaturänderungsrate auf maximal 0,2°C pro Jahrzehnt ist nicht nur zur Vermeidung gefährlicher Klimaänderungen sondern auch für den Meeresschutz erforderlich.

Widerstandsfähigkeit der Meeresökosysteme nachhaltig stärken

Marine Ökosysteme reagieren im Vergleich zu terrestrischen deutlich sensibler und schneller auf Klimaänderungen, z. B. durch räumliche Verschiebung von Populationen. Daher kann die vom Menschen verursachte Erwärmung der obersten Wasserschicht der Meere schwer vorhersagbare Änderungen der Nahrungsnetze und der Artenzusammensetzung zur Folge haben. Eine weitere Erhöhung der Wassertemperatur und die zunehmende Versauerung werden insgesamt große Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme und auch für die Fischerei haben.

Zu den ohnehin schon drastischen Folgen der Überfischung kommen für die Fischereiwirtschaft mit dem Klimawandel und der Versauerung also künftig zwei weitere Gefährdungen hinzu. Alle diese anthropogenen Faktoren zusammen genommen bedrohen angesichts einer weiter wachsenden Weltbevölkerung die ausreichende Nahrungsversorgung aus dem Meer.

Von der Klimaänderung akut bedroht sind die tropischen Korallenriffe, die bei weitem artenreichsten Ökosysteme im Meer. In 30–50 Jahren könnten die

meisten Riffe zerstört sein, weil viele Korallen bei höheren Wassertemperaturen nicht überlebensfähig sind. Dies hat unabsehbare Folgen vor Ort, denn für den Küstenschutz und die Proteinversorgung von Millionen von Menschen sind die Riffe unverzichtbar.

Eine der sichtbarsten Auswirkungen des Temperaturanstiegs ist der Rückgang des arktischen Meereises. Die Ausdehnung der Eisdecke im Sommer hat in den vergangenen 30 Jahren um 15–20% abgenommen. Modellszenarien für die Zukunft legen nahe, dass ohne Klimaschutz der Arktische Ozean gegen Ende des 21. Jahrhunderts im Sommer praktisch eisfrei sein dürfte, mit schwerwiegenden Folgen für Ökosysteme und Klimageschehen.

- Zur Bewahrung der biologischen Vielfalt im Meer und zur Stärkung der Resilienz der Meeresökosysteme schlägt der WBGU folgende Leitplanke vor: Mindestens 20–30% der Fläche mariner Ökosysteme sollten für ein ökologisch repräsentatives und effektiv betriebenes Schutzgebietssystem ausgewiesen werden. Der Meeresschutz muss vor allem für Korallenriffe und Gebiete, die als „Kinderstube“ für Fischpopulationen dienen, erheblich verbessert werden. Die bereits vereinbarten internationalen Ziele für Meeresschutzgebiete müssen umgesetzt und die entsprechende Regelungslücke auf der Hohen See sollte durch ein Abkommen im Rahmen des Seerechtsübereinkommens (UNCLOS) geschlossen werden.
- Die Bewirtschaftung der Meeresressourcen sollte dem „ökosystemaren Ansatz“ folgen. Insbesondere muss die öffentlich subventionierte Überfischung der Meere beendet werden, nicht zuletzt, um die Fischbestände gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu stärken. Dafür müssen nicht nur Fischereisubventionen, sondern auch Fangüberkapazitäten abgebaut und Maßnahmen gegen destruktive Fischereipraktiken sowie illegale bzw. unregulierte Fischerei ergriffen werden.
- Das Verständnis der Zusammenhänge zwischen anthropogenen Störungen, biologischer Vielfalt und Resilienz mariner Ökosysteme muss verbessert werden. Ein intensives Monitoring ist dabei eine Voraussetzung für die weitere Entwicklung gekoppelter Ökosystem-Klima-Modelle.

Meeresspiegelanstieg begrenzen und Strategien des Küstenzonenmanagements neu ausrichten

Ursache für den Meeresspiegelanstieg ist der Klimawandel, vor allem der Anstieg der Meerestemperaturen sowie das Abschmelzen von Inlandgletschern und kontinentalen Eisschilden. Lag der Meeresspiegelanstieg im 20. Jahrhundert global noch bei 1,5–

2,0 cm pro Jahrzehnt, zeigen Satellitenmessungen im vergangenen Jahrzehnt bereits einen Anstieg von 3 cm. Bei weiterer Erwärmung droht eine zusätzliche Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs. Es gibt Anzeichen für einen beginnenden Zerfall der Kontinentaleismassen auf Grönland und in der Antarktis, der in den kommenden Jahrhunderten mehrere Meter Meeresspiegelanstieg verursachen könnte.

Neben dem Meeresspiegelanstieg bedroht auch die zunehmende Zerstörungskraft von Hurrikanen viele Küstengebiete der Welt. Theorie, Beobachtungsdaten und Modellrechnungen sprechen dafür, dass eine Klimaerwärmung zwar nicht die Anzahl von Hurrikanen, wohl aber ihre Zerstörungskraft erhöht. Bei einem Anstieg der tropischen Meerestemperaturen um lediglich 0,5°C wurde in den letzten Jahrzehnten bereits ein Ansteigen der Hurrikanenergie um 70% beobachtet.

Meeresspiegelanstieg und Extremereignisse wie Hurrikane und Sturmfluten bedrohen die Küsten. Küstenschutz wird damit zu einer großen gesellschaftlichen und ökonomischen Herausforderung. Die bisherigen Ansätze für Schutz und Nutzung der Küstengebiete werden dieser Entwicklung nicht gerecht. Neuartige Kombinationen von Maßnahmen (Portfolio-Strategien) werden benötigt, wobei die Optionen Schutzgewährung, qualifizierter Rückzug und Akkomodation gegeneinander abzuwägen sind. Dabei sollten insbesondere die Belange von Küsten- und Naturschutz besser verknüpft und die von Anpassungs- oder Umsiedlungsmaßnahmen betroffene Bevölkerung in die Entscheidungen einbezogen werden.

- Der absolute Meeresspiegelanstieg sollte dauerhaft nicht mehr als 1 m betragen, und die Anstiegsgeschwindigkeit sollte stets unter 5 cm pro Jahrzehnt bleiben. Ansonsten würden mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr vertretbare Schäden und Verluste für Menschen und Ökosysteme eintreten.
- Wegen des zu erwartenden Meeresspiegelanstiegs müssen nationale und internationale Strategien für Schutzgewährung und Anpassung, aber auch für einen qualifizierten Rückzug aus gefährdeten Gebieten entwickelt werden.
- Natur- und Küstenschutz sollten besser verknüpft werden. Bei der Erstellung von Küstenschutzplänen und Strategien zur nachhaltigen Nutzung und Entwicklung von Küstenzonen müssen alle wesentlichen Politikbereiche einbezogen werden („integriertes Küstenzonenmanagement“).

Innovative völkerrechtliche Instrumente für Umgang mit „Meeresflüchtlingen“ vereinbaren

Der Meeresspiegelanstieg wird zur Überflutung von Küsten und kleinen Inselstaaten und damit zur Migration von „Meeresflüchtlingen“ führen. Beim derzeitigen Stand des Völkerrechts existiert weder eine Verpflichtung zur Aufnahme von Flüchtlingen aus Küstengebieten, noch ist die Kostenfrage geregelt. Längerfristig wird die Staatengemeinschaft das Problem der Flüchtlinge aus Küstengebieten aber nicht ignorieren können und deshalb entsprechende Instrumente zur gesicherten Aufnahme der Betroffenen in geeigneten, möglichst ihrer Präferenz entsprechenden Gebieten entwickeln müssen.

- Notwendig sind Vereinbarungen über die Aufnahme von Flüchtlingen aus Küstengebieten sowie die Übernahme der hiermit verbundenen Kosten, z. B. mittels eines Kompensationsfonds. Sinnvoll ist eine faire Lastenverteilung, bei der sich die Staaten nach Maßgabe ihrer Treibhausgasemissionen verbindlich verpflichten, für die Migranten Verantwortung zu übernehmen.
- Die politische Entscheidungsfindung sollte durch sozialwissenschaftliche und juristische Studien vorbereitet werden.

Versauerung der Meere rechtzeitig stoppen

Die Lösung von Kohlendioxid im Meerwasser führt zu einer erheblichen Versauerung (Absenkung des pH-Werts) und damit zu Veränderungen im biogeochemischen Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht. Die Meere haben bisher rund ein Drittel der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen, was bereits zu einer signifikanten Versauerung des Meerwassers geführt hat. Die CO₂-Emissionen beeinflussen somit die Meeresumwelt auch direkt – ohne Umweg über den Klimawandel. Eine ungebremste Fortsetzung des Trends wird zu einer Meeresversauerung führen, die in den letzten Jahrtausenden ohne Beispiel und über Jahrtausende unumkehrbar ist. Die Folgen für die marinen Ökosysteme lassen sich zwar noch nicht genau prognostizieren, aber besteht das Risiko einschneidender Veränderungen im Nahrungsnetz, da die Kalkbildung von Meeresorganismen behindert oder teilweise sogar unterbunden werden kann. Hier treten nun auf globaler Skala ähnliche Probleme auf, wie regional bei der Versauerung von Seen in den 1970er und 1980er Jahren („Saurer Regen“).

- Um zu verhindern, dass die Kalkbildung der Meeresorganismen gestört und dadurch das Risiko besteht, dass die marinen Nahrungsnetze umstrukturiert werden, sollte folgende Leitplanke

eingehalten werden: Der pH-Wert der obersten Meeresschicht sollte in keinem größeren Ozeangebiet (d. h. auch nicht im globalen Mittel) um mehr als 0,2 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Wert absinken.

- Technische Maßnahmen gegen die Versauerung, etwa eine großflächige Kalkung, sind im Meer nicht möglich. Es muss daher sichergestellt werden, dass die anthropogenen CO₂-Emissionen unabhängig von der Reduktion anderer Treibhausgasemissionen begrenzt werden. Der WBGU schlägt daher vor, in den Verhandlungen über zukünftige Verpflichtungen zur Klimarahmenkonvention die besondere Rolle des CO₂ gegenüber anderen Treibhausgasen zu berücksichtigen. Da die Folgen der Versauerung für die Meeresökosysteme und für biogeochemische Kreisläufe nur unzureichend verstanden sind, besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

CO₂-Speicherung regulieren

Das Kohlendioxid aus der Nutzung fossiler Energieträger kann durch technische Verfahren abgetrennt, verdichtet und über Pipelines oder mit Schiffen zu permanenten Lagern transportiert werden. Die Einlagerung von CO₂ kann dabei in geologischen Formationen an Land oder unter dem Meeresboden erfolgen. Theoretisch könnte das CO₂ auch in die Tiefsee einbracht werden. Einem langfristig orientierten Klimaschutz steht allerdings das Risiko des andauernden langsamen Entweichens des eingelagerten CO₂ in die Atmosphäre entgegen. Die Vor- und Nachteile der technischen und wirtschaftlichen Entwicklung der Sequestrierungstechnologien müssen daher im Vergleich mit anderen Klimaschutzmaßnahmen wie der Steigerung der Energieeffizienz und dem Umstieg auf erneuerbare Energieträger abgewogen werden.

- Die Einbringung von CO₂ in das Meerwasser sollte auf Grundlage des Vorsorgeprinzips untersagt werden, weil das Risiko ökologischer Schäden nicht einzuschätzen und die Rückhaltezeit im Ozean zu kurz ist.
- Die Einlagerung von CO₂ in geologische Formationen unter dem Meeresboden kann nur eine „Notlösung“ für einen Übergangszeitraum sein. Eine Genehmigung sollte lediglich dann erteilt werden, wenn strenge Kriterien bezüglich der technischen Sicherheit und vor allem der Permanenz der Speicher und der Umweltverträglichkeit eingehalten werden. Diese Kriterien sollten auch bei der Nutzung von CO₂ für „Enhanced Oil Recovery“ gelten. CO₂-Sequestrierung darf nicht zur Vernachlässigung nachhaltiger Emissionsver-

meidungsstrategien (z. B. Effizienzsteigerung und Förderung erneuerbarer Energien) führen und sollte daher nicht mit öffentlichen Mitteln gefördert werden.

- Unter dem Meeresboden eingelagertes CO₂ sollte bei der Aufstellung von Emissionsinventaren und im Rahmen der flexiblen Mechanismen der internationalen Klimaschutzpolitik nur teilweise als vermiedene Emission angerechnet werden, um dem Leckagerisiko Rechnung zu tragen. Ergänzend sind Haftungsregelungen vorzusehen.

Abbau von Methanhydraten mit strengen Auflagen versehen

In Form von Methanhydraten lagern im Meeresboden Kohlenstoffmengen, die in der Größenordnung der weltweiten Kohlevorräte liegen. Methanhydrate sind nur bei hohem Druck und niedrigen Temperaturen stabil. Derartige Bedingungen herrschen typischerweise auf dem Meeresboden ab rund 500 m Meerestiefe; in der Arktis liegt diese Grenze etwas höher. Die Stabilität der Methanhydratvorkommen kann einerseits durch den Klimawandel beeinträchtigt werden, andererseits durch Störungen als Folge der Förderung von Erdöl und Erdgas oder in Zukunft möglicherweise im Zuge des direkten Abbaus der Hydrate selbst. Nach Einschätzung des WBGU ist die Gefahr einer plötzlichen Freisetzung größerer, klimarelevanter Methanmengen innerhalb dieses Jahrhunderts jedoch sehr gering. Langfristig könnte es aber zu schleichenden Methanfreisetzungen über viele Jahrhunderte bis Jahrtausende aufgrund des langsamen Eindringens der globalen Erwärmung in die tieferen Ozeanschichten und Sedimente kommen.

- Wegen der möglichen Instabilitäten der Lagerstätten sollte bereits jetzt sichergestellt werden, dass ein Abbau von Methanhydraten im Meer allenfalls unter sehr strengen Auflagen erlaubt wird. Bisherige Regulierungssysteme für den Meeresbergbau sollten entsprechend überarbeitet und angepasst werden.

Bestehende Finanzierungsmechanismen ergänzen

Maßnahmen zur Vermeidung und Bewältigung der zu erwartenden negativen Effekte des Klimawandels auf den Lebensraum Meer können aus bereits bestehenden internationalen Fonds bestritten werden, deren Aufgabe die Finanzierung von Emissionsreduktionen bzw. von Anpassungsprojekten ist. Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese Mittel für die im vorliegenden Gutachten beschriebenen Auf-

gaben nicht ausreichen werden, vor allem weil die Mittel nicht für spezifisch meeresbezogene Projekte verwendet werden. Zur Ergänzung empfiehlt der WBGU daher:

- Die Fischereisubventionen müssen abgebaut werden, um Fehlanreize zur Überfischung zu vermeiden. Die dadurch freigesetzten öffentlichen Mittel können dann u. a. in den Meeresschutz investiert werden.
- Es sollten Entgelte für die Nutzung der Meere durch den Schiffsverkehr erhoben und die Einnahmen zweckgebunden verwendet werden.
- Der Aufbau von Mikroversicherungen zum Schutz individueller Vermögenswerte sollte insbesondere in Entwicklungsländern als ein Teilelement einer umfassenden Vorsorgestrategie (z. B. durch öffentliche Kofinanzierung) unterstützt werden.
- Ein Teil der öffentlichen Mittel zur Entwicklungszusammenarbeit, die derzeit zur Bewältigung weltweiter Katastrophenfolgen verwendet werden, sollte in Vorsorgemaßnahmen umgeleitet werden.

Mit diesem Sondergutachten hat der WBGU ein bisher wenig beachtetes und auch in seiner Brisanz weitgehend unterschätztes Thema aufgegriffen. Für die Zukunft des blauen Planeten Erde ist der Zustand der Meeresumwelt von elementarer Bedeutung. Der Mensch hat durch Übernutzung und Verschmutzung bereits großen Schaden in den Meeren angerichtet. Mit dem globalen Klimawandel kommt eine weitere, völlig neue Dimension der Bedrohung hinzu. Das vorliegende Sondergutachten zeigt die Bedrohungen auf und benennt den Handlungsbedarf sowie die Handlungsoptionen, die sich im Spannungsfeld von Klimawandel und Meeren ergeben. Das Gutachten will politische Entscheidungsträger dazu ermutigen, notwendige Maßnahmen rechtzeitig und entschlossen in Angriff zu nehmen – damit die Meere nicht zu warm werden, nicht zu hoch steigen und nicht versauern.

Die Weltmeere verändern sich rasant. Die oberen Schichten werden wärmer, der Meeresspiegel steigt immer rascher an, die Meere versauern zunehmend, was viele Meeresökosysteme bedroht. Die Menschheit ist dabei, Veränderungsprozesse im Meer anzustoßen, die in den letzten Jahrmillionen ohne Beispiel sind. Damit greift der Mensch an entscheidender Stelle in die Funktionsweise des Erdsystems ein: 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 so unser Klimasystem. Auch der globale Wasserkreislauf wird vor allem durch die Verdunstung aus den Meeren angetrieben. Schließlich beherbergen die Ozeane einen großen Reichtum an biologischer Vielfalt und versorgen den Menschen über den Fischfang mit lebenswichtigen Proteinen. Eine intakte Meeresumwelt ist aber auch ein wichtiger Faktor für wirtschaftliche Entwicklung, soziales Wohlergehen und Lebensqualität.

Durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse wird immer deutlicher, dass der Klimawandel große Veränderungen und Schäden für die Meeresumwelt und die Küsten verursachen wird, die auch erhebliche Folgen für den Menschen haben. Ein Großteil der Menschheit lebt heute in Küstennähe, mit stark steigender Tendenz. Die Bedrohung von Küstenbewohnern und Infrastruktur durch steigende Meeresspiegel und Extremereignisse wie Sturmfluten oder Hurrikane wird in den kommenden Jahrzehnten wachsen. Zudem können Klimawandel und Versauerung in Zusammenhang mit der drastischen Überfischung die Ernährung aus dem Meer gefährden. Es besteht dringender Handlungsbedarf, um die negativen Auswirkungen des Klimawandels für Ökosysteme und Menschen zu begrenzen, zumal das heutige Verhalten der Menschheit wegen der erheblichen Verzögerungseffekte den Zustand der Weltmeere für Jahrtausende bestimmen wird. Auch die Forschung ist gefordert, denn die Weltmeere sind in vieler Hinsicht immer noch *terra incognita*.

Eine Motivation für dieses Sondergutachten ist der veränderte wissenschaftliche Sachstand, der sich seit dem letzten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aus dem Jahr 2001 zum Meeresspiegelanstieg und zur Versauerung der Meere ergeben hat. Zudem fordern aktuelle Ereignisse, wie die außergewöhnliche Hurrikansaison 2005 oder auch die Diskussionen zu Methanhydraten und Kohlenstoffspeicherung, eine Stellungnahme des WBGU heraus. Nicht zuletzt unterstreicht der WBGU mit der Analyse der Klimawirkungen auf das Meer die Notwendigkeit und Dringlichkeit eines energischen Klimaschutzes und der Entwicklung geeigneter Anpassungsstrategien. Der Beirat möchte mit seinen Erkenntnissen auch einen Beitrag zur Gestaltung einer neuen EU-Meerpolitik leisten.

Ziel dieses Sondergutachten ist nicht eine umfassende Bestandsaufnahme des Zustands der Meere. So soll hier etwa nicht die langjährige Diskussion zur Überfischung der Meere dargestellt werden. Vielmehr konzentriert sich der WBGU auf zentrale Zusammenhänge zwischen Klimawandel und den Meeren, zu denen es neue wissenschaftliche Einsichten gibt. Dazu gehören neue Erkenntnisse zu Erwärmung, Meeresströmungen, Meeresspiegelanstieg, Kohlenstoffaufnahme und Versauerung sowie zu den Auswirkungen dieser Faktoren auf marine Ökosysteme. Zudem werden die Entwicklung tropischer Wirbelstürme, die Kohlenstoffspeicherung im oder unter dem Meer und die Risiken von Methanhydratvorkommen im Meeresboden vertieft diskutiert. Viele dieser Themen sind eng miteinander verzahnt – Korallenriffe etwa sind gleichzeitig von Erwärmung, Meeresspiegelanstieg, Stürmen und Versauerung betroffen. Jedes Thema wird von den physikalisch-chemischen Grundlagen über die ökologischen Folgen bis hin zu den Auswirkungen auf den Menschen entwickelt, um darauf aufbauend politische Handlungs- sowie Forschungsempfehlungen abzuleiten. Als normativen Rahmen für die Analyse verwendet der WBGU das von ihm entwickelte Leitplankenkonzept (Kasten 1-1). Analog zur Klimaschutzleitplanke schlägt der Beirat für den nachhaltigen Umgang mit den Meeren einen Satz von „Meeres-

Kasten 1-1

Das Leitplankenkonzept

Der WBGU hat zur Operationalisierung des Begriffs nachhaltige Entwicklung das Leitplankenkonzept entwickelt (z. B. WBGU, 2003a). Leitplanken sind quantitativ definierbare Schadensgrenzen, deren Überschreitung heute oder in Zukunft intolerable Folgen mit sich brächte, so dass auch großer Nutzen in anderen Bereichen diese Schäden nicht ausgleichen könnte. Der Raum wünschenswerter nachhaltiger Entwicklungen wird also durch Leitplanken eingeschränkt. So hat der Beirat z. B. wiederholt gefordert, eine Erhöhung der mittleren globalen Temperatur um mehr als 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu verhindern. Jenseits dieses Wertes beginnt ein Bereich der Klimaänderung, der durch nicht tolerierbare Entwicklungen und Risiken gekennzeichnet ist.

Ausgangspunkt für das Leitplankenkonzept ist die Einsicht, dass es kaum möglich ist, eine wünschenswerte, nachhaltige Zukunft positiv, also im Sinne eines zu erreichenden Ziels oder Zustands zu definieren. Man kann sich aber auf die Abgrenzung eines Bereichs einigen, der als inakzeptabel anerkannt wird und den die Gesellschaft vermeiden will. Innerhalb der Leitplanken gibt es zunächst keine weiteren Vorgaben und die Gesellschaft kann sich im freien Spiel der Kräfte entfalten. Erst wenn das System sich auf Kollisionskurs mit einer Leitplanke befindet, sollen Maßnahmen ergriffen werden, um eine Verletzung der Leitplanke zu verhindern. Das Einhalten aller Leitplanken bedeutet allerdings nicht, dass alle sozioökonomischen Missstände oder ökologischen Schäden abgewendet werden können, denn globale Leitplanken können nicht sämtliche regionalen und sektoralen Auswirkungen des Globalen Wandels berücksichtigen. Zudem ist das Wissen begrenzt und Fehleinschätzungen sind möglich. Daher ist die Einhaltung der Leitplanken eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für die Nachhaltigkeit der künftigen Entwicklung.

Das Leitplankenkonzept kann mit Analogie zum Straßenverkehr verdeutlicht werden: Leitplanken verhalten sich wie Geschwindigkeitsbeschränkungen, die z. B. in Ortschaften nur maximal 50 km pro Stunde zulassen. Dabei lassen sich zwar empirisch die Auswirkungen einer Begrenzung auf 40, 50 oder 60 km pro Stunde ermitteln, die Wahl des Zahlenwertes ist am Ende aber eine normative Entscheidung und repräsentiert eine sinnvolle Art, kollektiv mit einem Risiko umzugehen. Die Einhaltung des Tempolimits kann nicht garantieren, dass keine schweren Unfälle

vorkommen, aber sie vermag das Risiko in einem gesamtgesellschaftlich akzeptierten Rahmen zu halten. Die vom WBGU formulierten Leitplanken fußen auf grundlegenden Normen und Prinzipien, auf die sich die Weltgemeinschaft in unterschiedlicher Formulierung geeinigt hat. Sie können allerdings nur Vorschläge sein, denn die Festlegung nicht tolerierbarer Belastungen kann nicht allein die Wissenschaft leisten, sondern muss – unterstützt durch wissenschaftliche Expertise – in einem weltweiten demokratischen Entscheidungsprozess erfolgen. So ist z. B. die Einhaltung der Klimaschutzleitplanke (nicht mehr als 2°C globale Erwärmung) mittlerweile ein Ziel der Europäischen Union.

LEITPLANKEN FÜR DEN MEERESSCHUTZ

Im vorliegenden Gutachten wendet der Beirat das Leitplankenkonzept auf den Meeresschutz an. Dabei wird auf frühere Gutachten aufgebaut, in denen der WBGU wiederholt für eine zweifache Klimaschutzleitplanke argumentiert hat (WBGU, 1995, 2003b). Die in diesem Gutachten erörterten Umweltveränderungen in den Meeren erhärten diese Forderung. Darüber hinaus werden weitere Leitplanken entwickelt, die den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Meeren betreffen und in den jeweiligen Kapitel hergeleitet und begründet werden. Dabei handelt es sich im Überblick um folgende Leitplanken:

- **Klimaschutz:** Auch aus Gründen des Meeresschutzes sind die Auswirkungen von Klimaänderungen intolerabel, die mit einem mittleren globalen Anstieg der bodennahen Lufttemperatur um mehr als 2°C gegenüber dem vorindustriellen Wert oder einer Temperaturänderungsrate von mehr als 0,2°C pro Jahrzehnt verbunden sind.
- **Meeresökosysteme:** Mindestens 20–30% der Fläche mariner Ökosysteme sollten als ökologisch repräsentatives und effektiv betriebenes Schutzgebietssystem ausgewiesen werden.
- **Meeresspiegelanstieg:** Der absolute Meeresspiegelanstieg sollte dauerhaft nicht mehr als 1 m betragen, und die Anstiegsgeschwindigkeit sollte stets unter 5 cm pro Jahrzehnt bleiben. Ansonsten würden mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht tolerierbare Schäden und Verluste für Menschen und Ökosysteme eintreten.
- **Versauerung der Meere:** Um zu verhindern, dass die Kalkbildung der Meeresorganismen gestört wird und dadurch das Risiko besteht, dass die marinen Nahrungsnetze umstrukturiert werden, sollte folgende Leitplanke eingehalten werden: Der pH-Wert der obersten Meeresschicht sollte in keinem größeren Ozeangebiet (d. h. auch nicht im globalen Mittel) um mehr als 0,2 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Wert absinken.

leitplanken“ vor, also quantitative Grenzen, die nicht überschritten werden dürfen.

Ohne entschlossenes und vorausschauendes Handeln können die Weltmeere schon in wenigen Jahrzehnten kritische Systemgrenzen erreichen, bei denen schwere und zum Teil irreversible Schäden für Natur und Mensch eintreten. Der Umgang des Menschen mit den Meeren wird also eine entscheidende Bewährungsprobe auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft sein.

2.1 Klimafaktoren

2.1.1 Anstieg der Wassertemperaturen

Die Temperaturen im Meer beeinflussen das Leben im Meer sowie die Löslichkeit von Kohlendioxid im Wasser. Sie verändern die Dichte des Meerwassers und beeinflussen dadurch die Strömungen und den Meeresspiegel: Die thermische Ausdehnung des Wassers trägt wesentlich zum Meeresspiegelanstieg bei. Die Oberflächentemperatur der Meere beeinflusst auch die Atmosphäre auf vielfältige Weise. Die in Europa im Winter häufig auftretende „milde Atlantikluft“ hat ihre Wärme aus dem relativ warmen Ozean aufgenommen. Auch führen hohe Wassertemperaturen zu verstärkter Verdunstung, was eine wichtige Energiequelle der Atmosphäre (z. B. für tropische Wirbelstürme) und die Wasserquelle vieler Extremniederschläge (u. a. der Elbeflut 2002) darstellt.

In den letzten Jahren wurden durch internationale Anstrengungen zum Datenaustausch erheblich verbesserte Datensätze zu den globalen Ozeantemperaturen der letzten 50 Jahre für die Forschung verfügbar (NODC, 2001). Auf der Basis von über 7 Mio. gemessenen Temperaturprofilen haben Levitus et al. (2005) den Zeitverlauf des Wärmegehalts der Weltmeere rekonstruiert. Sie belegen einen Anstieg der gespeicherten Wärmemenge um $15 \cdot 10^{22}$ Joule von 1955–1998. Dies entspricht einer mittleren Wärmeaufnahme von 0,2 Watt pro m^2 über diesen Zeitraum, bezogen auf die gesamte Erdoberfläche. Für den Zeitraum 1993–2003 betrug die Wärmeaufnahme sogar 0,6 Watt pro m^2 (Willis et al., 2004). Diese Wärmezunahme im Ozean zeigt, dass die Erde derzeit mehr Energie von der Sonne aufnimmt als sie wieder abstrahlen kann. Damit belegen die Messungen ein Ungleichgewicht in der Wärmebilanz der Erde, wie es aufgrund des anthropogenen Treibhauseffekts zu erwarten ist (Hansen et al., 2005).

Global und über die gesamte Wassersäule gemittelt ist die Temperatur des Ozeans seit 1955 nur um $0,04^\circ\text{C}$ angestiegen. Das liegt daran, dass sich bisher nur eine Oberflächenschicht (d. h. die durchmischte Deckschicht) von wenigen 100 m Tiefe erwärmt hat, die mittlere Ozeantiefe jedoch 3.800 m beträgt. Der durch thermische Expansion des Wassers verursachte Meeresspiegelanstieg beträgt daher bisher nur einen Bruchteil dessen, was eine Erwärmung bis in die Tiefsee im Laufe der Jahrhunderte ergeben wird (Kap. 3.1.1).

Abbildung 2.1-1 zeigt den Verlauf der für das Klimasystem besonders wichtigen Meeresoberflächentemperatur. Dieser ähnelt stark der Entwicklung der Lufttemperaturen, die Erwärmung fällt jedoch etwas geringer aus ($0,6^\circ\text{C}$ seit Beginn des 20. Jahrhunderts). Beides ist nicht überraschend. Die Meeresoberfläche ist thermisch eng an die darüber liegende Atmosphäre gekoppelt. Da sich die Landflächen, die 30% der Erdoberfläche ausmachen, wegen ihrer geringeren Wärmekapazität schneller erwärmen als die Ozeane, steigt die global gemittelte Lufttemperatur insgesamt schneller als die des Meeres. Ein Datensatz der von Schiffen nachts über dem Meer gemessenen Lufttemperatur (Parker et al., 1995) zeigt ebenfalls einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Wassertemperaturen. Diese Daten belegen den Erwärmungstrend der Meere an der Oberfläche und bestätigen damit nochmals die von Wetterstationen gemessene globale Erwärmung.

Abbildung 2.1-2 zeigt die Erwärmung der Oberflächentemperaturen im Nordatlantik, die sich in weiten Teilen im Bereich von $0,3\text{--}1^\circ\text{C}$ über den gezeigten Zeitraum bewegt. Eine wesentlich stärkere Erwärmung um mehrere Grad findet man in arktischen Breiten, vor allem aufgrund positiver (verstärkender) Rückkopplungen mit dem schwindenden Meereis (Kap. 2.1.1). Einige kleinere Stellen weisen aufgrund dynamischer Veränderungen im Meer eine Abkühlung auf – dies gilt insbesondere für den Golfstrombereich vor der Küste der USA und Meeresgebiete nahe Grönland. Ursache sind hier wahrscheinlich natürliche, interne Schwankungen in der Zirkulation.

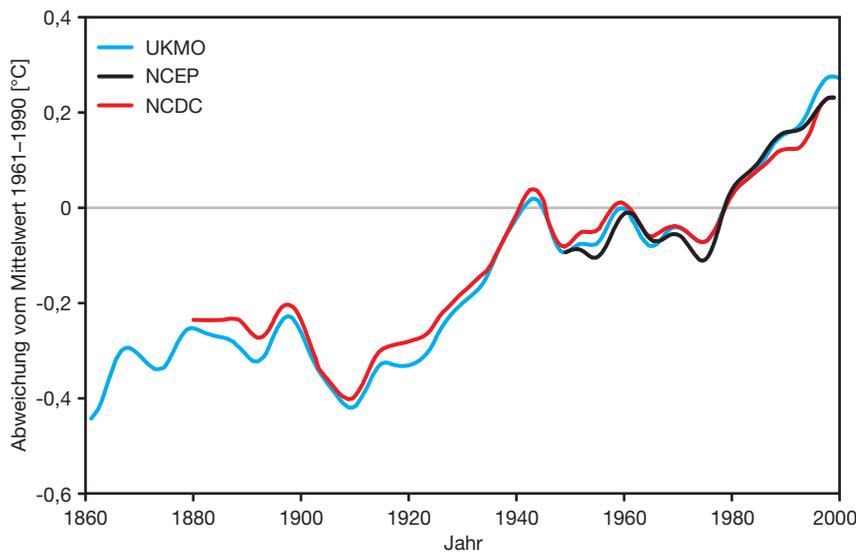


Abbildung 2.1-1
Verlauf der global gemittelten Oberflächentemperatur der Meere, nach drei Datenzentren: Dem UK Met Office (UKMO, blau), dem US-amerikanischen National Centre for Environmental Prediction (NCEP, schwarz) und dem US-amerikanischen National Climatic Data Centre (NCDC, rot).
Quelle: IPCC, 2001a

lation, die den allgemeinen Erwärmungstrend durch die Treibhausgase überlagern.

Von besonderem Interesse ist der Anstieg der Meerestemperaturen in tropischen Breiten, weil er tropische Stürme beeinflusst; er wird in Kapitel 3.1.2 diskutiert.

2.1.2 Rückgang des arktischen Meereises

Im Bereich der Arktis ist in den letzten Jahrzehnten eine besonders starke Erwärmung des Meerwassers zu beobachten, die 2004 gemeinsam mit ihren Auswirkungen in einer internationalen Studie detailliert beschrieben wurde (Arctic Climate Impact Assessment; ACIA, 2005).

Die Studie konstatiert einen starken Rückgang des arktischen Meereises, der sich nicht durch natürliche Prozesse, sondern nur durch menschliche Einflüsse erklären lässt. Der Rückgang des Eises ist deutlich auf Satellitenbildern zu erkennen (Abb. 2.1-3). Die Satellitenzeitreihe von 1979–2005 zeigt eine Abnahme der Eisfläche um 15–20% und die geringste je gemessene Eisausdehnung im September 2005. Durch Zusammenstellung von Beobachtungen von Schiffen und Küsten aus lässt sich die Entwicklung bis in die Zeit vor Beginn der Satellitenmessungen zurückverfolgen. Solche Beobachtungen gehen bis ins Jahr 1900 zurück und erfassen etwa 77% der Fläche der Arktis. Diese Langzeitdaten legen nahe, dass das derzeitige Schrumpfen der Eisdicke ein wahrscheinlich in den letzten hundert Jahren einmaliger Vorgang ist.

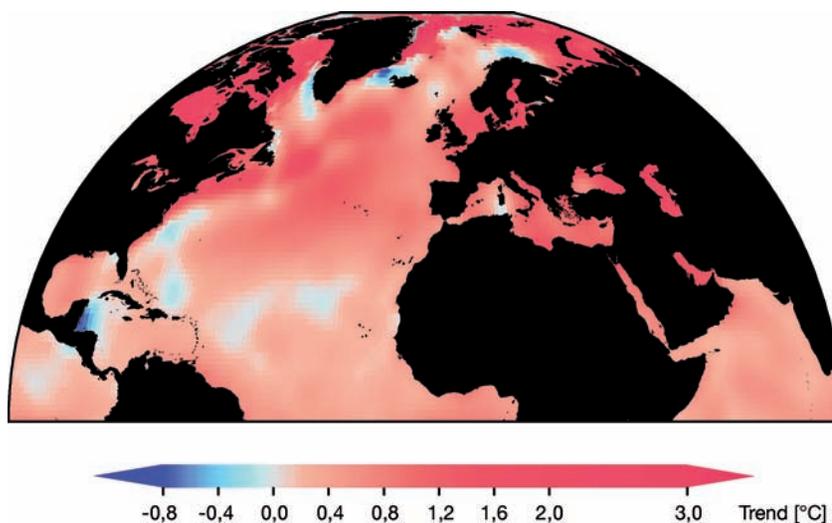


Abbildung 2.1-2
Entwicklung der Oberflächentemperaturen im Nordatlantik und den europäischen Randmeeren. Gezeigt ist die Veränderung der Jahresmitteltemperatur zwischen 1978 und 2002 (als linearer Trend) auf Basis des GISST-Datensatzes des britischen Hadley Centre.
Quelle: PIK nach Hadley Centre, 2003

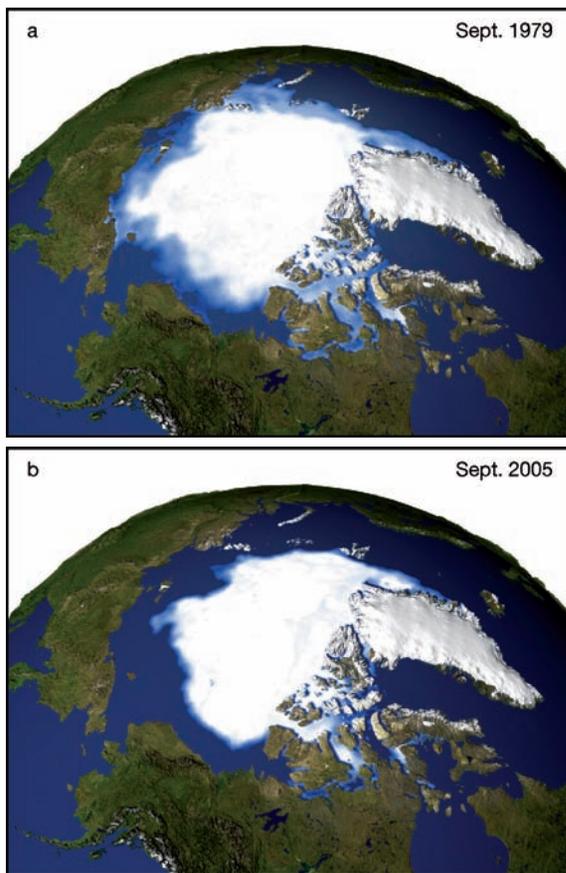


Abbildung 2.1-3

Satellitenaufnahmen der arktischen Eisbedeckung, (a) September 1979 und (b) September 2005.
Quelle: NASA, 2005

Die Entwicklung der Dicke des arktischen Eises ist schwerer zu beobachten als seine Ausdehnung. Mit dem Ende des Kalten Krieges wurden dazu Messungen militärischer U-Boote verfügbar, die unter dem arktischen Eis patrouillierten. Diese Daten legten nahe, dass die Dicke des Eises bereits um 40% abgenommen haben könnte (Rothrock et al., 1999). Andere Untersuchungen zeigen nur eine geringere Abnahme der Dicke. Johannessen et al. (2005) geben 8–15% an, so dass die tatsächliche Veränderung noch als ungeklärt gelten muss.

Weitere Erkenntnisse ergeben sich aus Modellrechnungen für den Arktischen Ozean mit hoher räumlicher Auflösung, angetrieben mit beobachteten Wetterdaten. Sie zeigen für die letzten Jahrzehnte eine Abnahme der Eisausdehnung in Übereinstimmung mit den bereits diskutierten Satellitendaten. Dabei nimmt im Modell die Eisdicke wesentlich stärker ab, und zwar um 43% seit 1988 (Lindsay und Zhang, 2005). Ähnliche Ergebnisse erhalten auch Maslowski et al. (2005). Bei ungebremster Erwärmung zeigen die Szenarien mit globalen Modellen,

dass der Arktische Ozean gegen Ende dieses Jahrhunderts im Sommer praktisch eisfrei sein dürfte (MPI für Meteorologie, 2005). Die genannten regionalen Modelle lassen befürchten, dass dies auch bereits früher eintreten könnte.

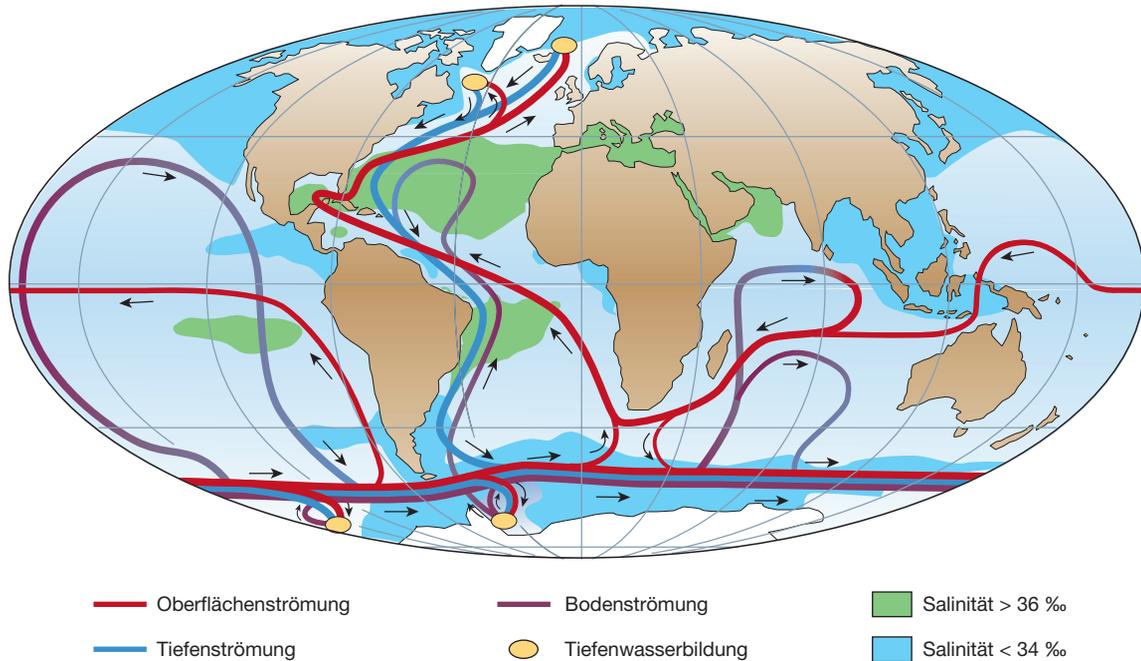
2.1.3

Änderung der Meeresströmungen

Die Wissenschaft befasst sich seit den 1980er Jahren mit der Frage möglicher abrupter Änderungen der Atlantikströmungen und ihrer Auswirkungen auf das Klima (Broecker, 1987). Das grundlegende Problem – eine mögliche stark nichtlineare Reaktion der Strömung auf Süßwassereintrag – ist bereits seit den 1960er Jahren bekannt (Stommel, 1961). Über die Wahrscheinlichkeit und die möglichen Folgen eines solchen Ereignisses wird in den letzten Jahren zunehmend geforscht; die Forschung ist jedoch noch in einer frühen Phase und viele Fragen sind nach wie vor ungeklärt. Die Gefahr von Änderungen der Meeresströme ist u. a. durch den „Pentagon-Bericht“ von Schwartz und Randall (2003), der 2004 in die Medien gelangte, in das öffentliche Bewusstsein vorgedrungen. Dieser Bericht entwickelt ein Worst-Case-Szenario, bei dem in den kommenden 10–20 Jahren der Nordatlantikstrom zum Erliegen kommt, was zu einer starken Abkühlung im Nordatlantikraum innerhalb weniger Jahre führen würde. Dies ist allerdings ein spekulatives und extrem unwahrscheinliches Szenario. Nach derzeitigem Stand deutet nichts auf eine kurz bevorstehende Strömungsänderung hin. Auf längere Sicht und bei starker weiterer Klimaerwärmung – etwa ab der Mitte dieses Jahrhunderts – kann dies jedoch zu einer ernsthaften Gefahr werden.

Normalerweise sinken riesige Wassermassen im europäischen Nordmeer und in der Labradorsee in die Tiefe. Dieses Wasser strömt dann in 2–3 km Tiefe nach Süden bis ins Südpolarmeer (Abb. 2.1-4). Zum Ausgleich strömt an der Oberfläche warmes Wasser von Süden her in die nördlichen Breiten. Dies führt zu einer großräumigen Umwälzbewegung im Atlantik, bei der etwa 15 Mio. m³ Wasser pro Sekunde bewegt werden. Wie eine Zentralheizung transportiert der Ozean auf diese Weise 10¹⁵ Watt an Wärme in den nördlichen Atlantikraum, was mehr als das Zweitausendfache der gesamten Kraftwerksleistung Europas beträgt.

Der globale Klimawandel wirkt auf diese Strömung, indem er die Dichte des Meerwassers auf zwei Arten verringert: Zum einen führt der Temperaturanstieg des Wassers zu thermischer Ausdehnung, zum anderen verdünnen verstärkte Niederschläge und Schmelzwasser das Meerwasser mit Süßwasser. Das

**Abbildung 2.1-4**

Das System der globalen Meeresströmungen. Gezeigt ist vor allem die durch Temperatur- und Salzgehaltsunterschiede ausgelöste „thermohaline“ Zirkulation.

Quelle: nach Rahmstorf, 2002

Absinken des Wassers im nördlichen Atlantik, die so genannte Tiefenwasserbildung, kann dadurch beeinträchtigt werden. Insbesondere im Nordmeer ist bereits seit Jahrzehnten ein Trend einer Salzgehaltsabnahme zu beobachten (Curry und Mauritzen, 2005), der allerdings nach Modellberechnungen bisher noch zu schwach sein dürfte, um einen spürbaren Einfluss auf die Atlantikströmungen zu haben.

Britische Forscher haben kürzlich über Messungen berichtet, wonach sich die Umwälzbewegung des Atlantik bereits um 30% abgeschwächt haben könnte (Bryden et al., 2005). Die Interpretation dieser neuen Daten ist in Fachkreisen jedoch umstritten – u. a. weil sie weder zu den Modellrechnungen noch zu den Temperaturveränderungen an der Meeresoberfläche passen (Abb. 2.1-2), wo eine derartige Abschwächung des Wärmetransports als Abkühlung sichtbar sein sollte. Sollte sich jedoch der Trend zu Erwärmung und Salzgehaltsabnahme in den kommenden Jahrzehnten weiter verstärken, dürfte dies im Verlauf des Jahrhunderts tatsächlich zu einer deutlichen Abschwächung der Atlantikströmung führen, im Extremfall womöglich sogar zu einem völligen Abbrechen der Tiefenwasserbildung.

Die Folgen wären aller Voraussicht nach gravierend. Der Nordatlantikstrom – übrigens nicht der Golfstrom, wie oft vereinfachend zu lesen ist – und der größte Teil des atlantischen Wärmetransports würden versiegen. Dies würde die Temperaturverteilung

über dem ganzen Atlantikraum stark verändern. Dabei kann es je nach bereits zuvor erfolgter Erwärmung regional sogar zu einer Abkühlung unter heutige Temperaturen kommen. Die Südhalbkugel würde sich dafür umso stärker erwärmen.

Als Folge der dynamischen Anpassung der Meeresoberfläche an die veränderten Strömungen würde der Meeresspiegel im Nordatlantik ohne Verzögerung um bis zu 1 m steigen und auf der Südhalbkugel etwas fallen. Diese Umverteilung des Wassers hätte zunächst keinen Einfluss auf den globalen Mittelwert des Meeresspiegels (Levermann et al., 2005). Doch auch im globalen Mittel würde der Meeresspiegel längerfristig zusätzlich um ca. 0,5 m ansteigen, da sich der tiefe Ozean nach Versiegen des Nachschubs an kaltem Wasser allmählich erwärmt. Sehr wahrscheinlich würden sich zudem die tropischen Niederschlagsgürtel verschieben, da der so genannte thermische Äquator nach Süden wandern würde (Claussen et al., 2003) – dies zeigen Modellsimulationen und Daten aus der Klimageschichte übereinstimmend.

Erste Simulationsrechnungen zeigen außerdem eine Halbierung der Planktonbiomasse im Atlantik (Schmittner, 2005), der heute dank der thermohalinen Zirkulation zu den fruchtbarsten Meeresgebieten und ertragreichsten Fischgründen der Erde gehört. Ein Versiegen der Tiefenwasserbildung

dürfte außerdem die Aufnahme von anthropogenem CO₂ durch den Ozean verringern (siehe Kap. 4).

Ein Abreißen des Nordatlantikstroms ist ein schwer kalkulierbares Risiko mit gravierenden negativen Folgen. Ein entscheidender Faktor wird die Süßwassermenge sein, die künftig in den nördlichen Atlantik gelangt. Dies wird insbesondere von der Geschwindigkeit abhängen, mit der Grönlands Eisschild abschmilzt. Eine zuverlässige Vorhersage ist beim gegenwärtigen Wissensstand nicht möglich; bestenfalls kann eine Art Gefahrenabschätzung versucht werden. Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung hat zusammen mit der amerikanischen Carnegie-Mellon University dazu im Herbst 2004 ein Dutzend der weltweit führenden Experten detailliert befragt, in jeweils ca. sechs Stunden dauernden Interviews. Das Risiko eines totalen Ausfalls der atlantischen Tiefenwasserbildung und der damit zusammenhängenden Strömungen wurde dabei sehr unterschiedlich, von einem Teil der Experten jedoch überraschend hoch eingeschätzt (Zickfeld et al., eingereicht). Bei einer angenommenen globalen Erwärmung von nur 2°C bis zum Jahr 2100 sahen vier der Experten bereits ein Risiko von mehr als 5%; bei 3–5°C Erwärmung sahen vier der Experten die Gefahr sogar die 50%-Marke übersteigen.

2.2

Auswirkungen der globalen Erwärmung auf Meeresökosysteme

Im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen die Auswirkungen der Klimaerwärmung (Kap. 2.1) auf Meeresökosysteme. Der WBGU versteht darunter das gesamte marine Gebiet von der hohen See bis zu aquatisch geprägten Küstenökosystemen. Der Beirat hat bewusst nur Faktoren herausgegriffen, die für die Themenstellung dieses Sondergutachtens wichtig sind. Ausgeklammert wird die Überfischung, die heute als der bedeutendste negative Einfluss des Menschen auf marine Ökosysteme angesehen wird (Pauly et al., 2002; MA, 2005b). Ebenfalls nicht behandelt werden die direkte Zerstörung mariner Ökosysteme, die Verschmutzung und die Einführung nicht heimischer Arten (GESAMP, 2001; UNEP, 2002). Die Versauerung der Meere wird in Kapitel 4 abgehandelt. All diese anthropogenen Einflüsse haben die Resilienz vieler Meeresökosysteme bereits stark verringert (Jackson et al., 2001).

Von diesen Einflüssen ist vor allem der produktivste Teil der Ozeane, die flachen Kontinentalschelfe (<200 m Wassertiefe), betroffen. Die Schelfe machen zwar weniger als 7% der Ozeanfläche aus, doch findet hier der Großteil der Primär- und Sekundärproduktion statt, und hier liegen die produktivsten

Fischgründe (Kap. 2.3). Die Primärproduktion der Meere durch Algen (Phytoplankton) ist auf die lichtdurchlässige oberste Wasserschicht beschränkt, die so genannte euphotische Zone (bis ca. 200 m Wassertiefe). Von diesen Primärproduzenten lebt eine Vielzahl von Sekundärproduzenten – vor allem Zooplankton, Fische und Meeressäuger – sowohl im freien Wasser (Pelagial) als auch am und im Meeresboden (Benthos). Alle Organismen sind durch ein komplexes Nahrungsnetz miteinander verknüpft (Abb. 2.2-1). Die Fauna der lichtlosen Tiefe ist energetisch auf den organischen Kohlenstoff aus der Primärproduktion angewiesen, der in Form von abgestorbenem Material in die Tiefe sinkt („biologische Pumpe“). Nur in der Umgebung hydrothermaler Quellen in der Tiefsee bilden Bakterien durch Chemosynthese eine vom Sonnenlicht unabhängige Basis für höhere Lebensformen.

Auch die Küstenökosysteme sind von großer biologischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Vor allem die artenreichen Feuchtgebiete, Mangrovenwälder und Korallenriffe tragen neben ihrem wirtschaftlichen Nutzen wesentlich zum Schutz der Küste vor Überschwemmungen und Erosion bei (Kap. 3.2).

2.2.1

Natürliche Klimavariabilität

Die natürliche Variabilität abiotischer Faktoren in marinen Ökosystemen, z. B. der Wassertemperatur oder der Ozeanströmungen, ist hoch und verläuft oft nichtlinear bzw. zyklisch. Das Studium der Wirkung der natürlichen Klimavariabilität kann wertvollen Aufschluss über die Folgen der globalen Erwärmung geben. Meeresökosysteme reagieren im Vergleich zu terrestrischen deutlich sensibler und schneller auf veränderte klimatische Bedingungen, mit nur schwer vorhersagbaren Änderungen der Artenzusammensetzung, räumlicher Verschiebung von Populationen oder umstrukturierten Nahrungsnetzen (Steele, 1998; Hsieh et al., 2005; Übersicht bei Brander, 2005). So zeigt Klyashtorin (2001), dass viele atlantische und pazifische Fischbestände über viele Jahrzehnte eng mit Klimaparametern korrelierten (Abb. 2.2-2), z. B. mit dem atmosphärischen Zirkulationsindex, der die atmosphärischen Bedingungen in der Atlantisch-Eurasischen Region beschreibt. Schon kleine natürliche Klimaänderungen können große Effekte auf marine Ökosysteme und Fischbestände haben – durch direkte Temperatureffekte, als Folge veränderter Primärproduktion oder auch durch Einflüsse auf wichtige Entwicklungsstadien (z. B. juveniler Fischstadien: Attrill und Power, 2002). So reagierten die Kabeljaubestände bei Grönland auf die Erwärmung des Nordatlantiks in den 1920er und 1930er Jahren

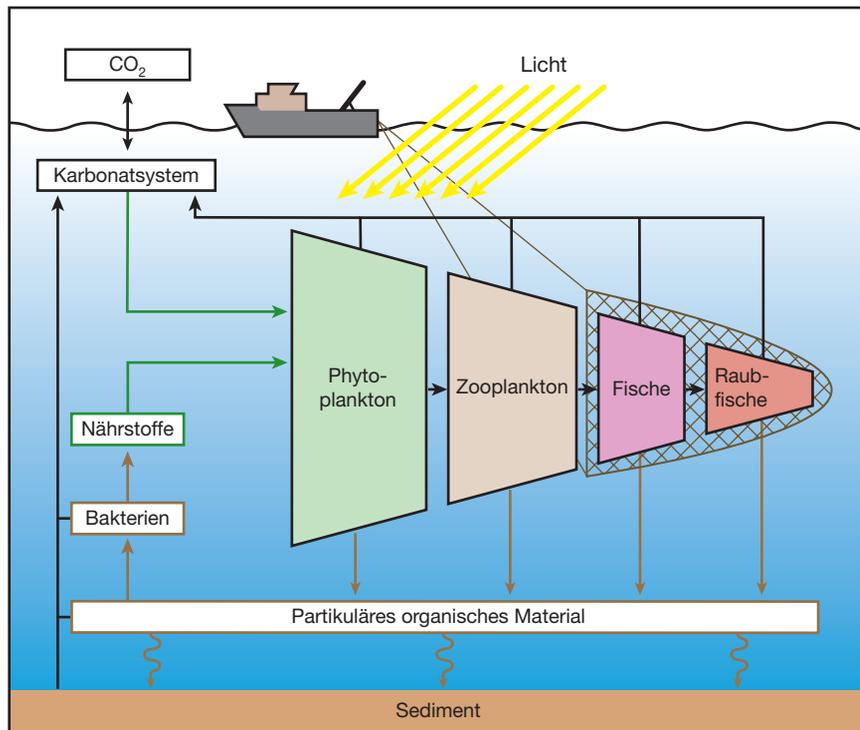


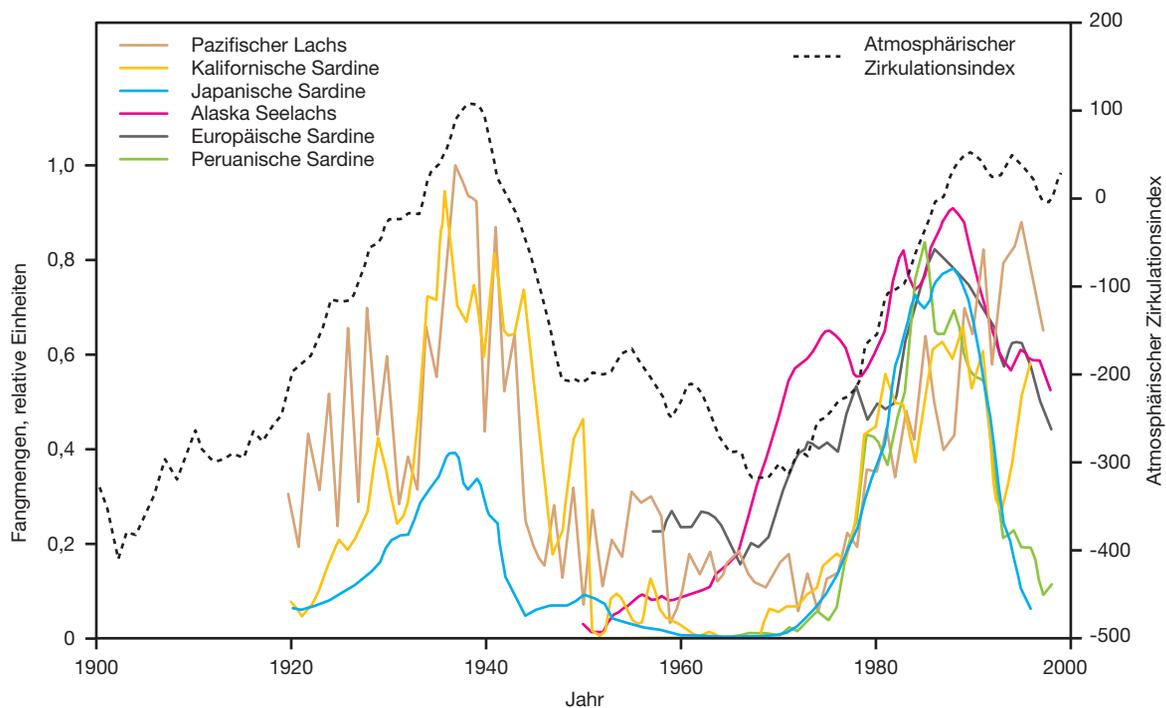
Abbildung 2.2-1
Schematische Struktur eines pelagischen Meeresökosystems. Grüne Pfeile: Input in die Primärproduktion; schwarze Pfeile: Wechselwirkungen mit dem Karbonatsystem; braune Pfeile: Abbau von Biomasse. Meeressäuger und Vögel wurden der Übersicht halber nicht berücksichtigt. Quelle: WBGU

mit rascher Ausdehnung in Richtung Norden (ca. 50 km pro Jahr) und erheblichem Bestandszuwachs, der später als Folge von Überfischung und verschlechterten Klimabedingungen wieder stark zurückging (Jensen, 1939). Vor allem kleine, Plankton fressende Fischarten wie Sardine oder Anchovis zeigen starke natürliche Bestandsschwankungen, bei denen großskalige natürliche Klimavariationen eine wichtige Rolle spielen (Barber, 2001; PICES, 2004). So haben die kurzfristigen Störungen der ENSO-Ereignisse (El Niño/Southern Oscillation) jeweils für etwa 2–3 Jahre tiefgreifende Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme des Peru-Humboldt-Strömungssystems (verringerte Nährstoffversorgung und somit geringere Primärproduktion, zum Teil Zusammenbruch von Fischpopulationen; Barber, 2001) und auf den weltweit produktivsten Fischbestand (peruanische Anchovis; FAO, 2004; Bertrand et al., 2004). Die Wirkungen der ENSO-Ereignisse sind jedoch reversibel, so dass in der Regel schon nach wenigen Jahren der „normale“ Zustand wieder erreicht wird (Fiedler, 2002).

Regionale klimatische Bedingungen und mit ihnen Struktur und Dynamik der Ökosysteme in einer Meeresregion können aber auch – von kleinen Unterschieden zwischen den Jahren abgesehen – über eine Periode von mehreren Jahren oder Jahrzehnten relativ stabil bleiben, was insgesamt als Regime bezeichnet wird. Wenn ein solcher relativ stabiler Zustand schnell, etwa im Verlauf von ein

oder zwei Jahren, in einen anderen übergeht, dann nennt man dies einen Regimeübergang („regime shift“; King, 2005). Mit diesen Regimeübergängen gehen teils erhebliche Strukturveränderungen der betroffenen marinen Ökosysteme einher, vom Phytoplankton bis hin zu den obersten trophischen Ebenen im Nahrungsnetz, z. B. den großen räuberischen Fischen.

Regimeübergänge wurden vielfach und in verschiedenen Meeresgebieten beobachtet (King, 2005). So hat sich in der Nordsee in den späten 1980er Jahren ein Regimeübergang ereignet, der mit abrupten Veränderungen der Oberflächentemperatur, der Windverhältnisse und einer Vielzahl biologischer Parameter verbunden war (Reid et al., 2001; Beaugrand, 2004; Alheit et al., 2005). Durch die Zunahme westlicher Winde wurde der Einstrom warmen Wassers in die Nordsee verstärkt, was u. a. die Lebensbedingungen für den Kabeljau in der Nordsee verschlechterte. Ein Zusammenhang zwischen dieser persistenten Veränderung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und der anthropogenen Klimaerwärmung ist wahrscheinlich (Gillett et al., 2003). Im Nordpazifik, vor der kalifornischen Küste, lassen sich alternierende Regime mit einer Periode von ca. 60 Jahren über fast zwei Jahrtausende nachweisen (Baumgartner et al., 1992). Sie haben eine deutliche Umstrukturierung der marinen Ökosysteme zur Folge (Hare und Mantua, 2000; King, 2005).

**Abbildung 2.2-2**

Korrelation der Fangmengen verschiedener, wirtschaftlich bedeutender Fischbestände mit dem atmosphärischen Zirkulationsindex.

Quelle: zusammengestellt nach Klyashtorin, 2001

Wie Regimeübergänge ausgelöst werden und welche Effekte sie im Nahrungsnetz des Ökosystems haben, ist nur unzureichend verstanden, auch wenn Beobachtungen der sich verändernden Ökosystemstrukturen teilweise detailliert vorliegen. Die vom Phytoplankton, also von der Basis des Nahrungsnetzes ausgehenden Energieflüsse können eine wichtige Rolle spielen („bottom up“; z. B. Richardson und Schoeman, 2004). Strukturveränderungen können aber auch „top down“ durch Zusammenbruch der Populationen räuberischer Fische verursacht werden, sei es als Folge von Überfischung (Worm und Myers, 2003; Frank et al., 2005) oder von Klimaänderung (Polovina, 2005), die über trophische Kopplungen bis auf die unteren Ebenen des Nahrungsnetzes durchschlägt.

2.2.2

Anthropogener Klimawandel

Obwohl die natürliche Variabilität regional groß sein kann, hat sich an den meisten Orten bereits heute der globale Erwärmungstrend durchgesetzt (Abb. 2.1-2). Der anthropogene Einfluss auf verschiedene Klimafaktoren (Kap. 2.1) hat heute bereits beobachtbare Effekte auf die Verbreitung mariner Organismen und die Artenzusammensetzung der Meeresökosys-

teme (Übersicht bei Brander, 2005). Klimawirkungen sind für alle Ebenen des Ökosystems beschrieben worden, von der Primärproduktion (Kap. 2.2.2.2) über das Zooplankton (z. B. Richardson und Schoeman, 2004) und kleine pelagische Fischarten (Sardinen) bis hin zu den großen Raubfischen (tropischer Thunfisch: Lehodey et al., 2003).

2.2.2.1

Auswirkungen der Wassertemperatur auf die Physiologie von Meeresorganismen

Die Temperatur hat nach neuen Erkenntnissen einen größeren Einfluss auf die Verbreitung von Tier- und Pflanzenarten als bisher angenommen, und das unabhängig vom Platz der Organismen im Nahrungsnetz (Huntley et al., 2004). Das thermische Toleranzfenster, in dem eine Art überleben, wachsen und sich reproduzieren kann, definiert demnach in hohem Maß ihre Verbreitung (Pörtner, 2005). Eine erhöhte Wassertemperatur (Kap. 2.1.1) beeinflusst das Leben von Meeresorganismen direkt wie indirekt. Eine direkte physiologische Wirkung auf die Organismen liegt vor, wenn die obere Grenze der Temperaturtoleranz einer Art überschritten wird. Dies trifft z. B. auf tropische Korallen zu (Kap. 2.4.1). Eine indirekte Wirkung der zunehmenden Wasser-

temperaturen liegt vor, wenn z. B. für eine Art früher orts- oder zeitgleich vorhandene Nahrungsorganismen durch temperaturbedingte Veränderungen im Artenspektrum eines Ökosystems nicht mehr zur Verfügung stehen (Kap. 2.2.2.5). Beide Wirkungsketten können zum Verschieben von Populationen, zur Einwanderung nicht heimischer Arten und auch zum Verschwinden von Arten führen.

2.2.2.2 Phytoplankton und globale Primärproduktion

Die vom Menschen veränderten Klimafaktoren wirken sich zunächst auf das Phytoplankton und somit auf die Primärproduktion aus. Da sich das gesamte marine Ökosystem bis hin zu großen Räubern wie Thun oder Hai über verschiedene trophische Stufen letztlich aus der Primärproduktion speist, wird sich eine Veränderung der Primärproduktion durch diese Kopplung auch auf die höheren trophischen Ebenen der Nahrungsnetze auswirken und sich in veränderten Artenzusammensetzungen oder Biomassen im gesamten Ökosystem widerspiegeln. Die Primärproduktion wird von mehreren Klimafaktoren beeinflusst (Fasham, 2003):

- *Temperatur:* Wachstum und Artenzusammensetzung des Phytoplanktons sind stark temperaturabhängig. Die Primärproduktion wird durch Erwärmung zunächst direkt gefördert. Doch kann die erhöhte Temperatur indirekt auch die Produktion bremsen, z. B. über verringerte Nährstoffzufuhr als Folge einer ausgeprägteren Temperaturschichtung.
- *Licht:* Veränderungen der Eis- oder Wolkenbedeckung des Oberflächenwassers haben direkten Einfluss auf die Primärproduktion, da das Phytoplankton Sonnenlicht als Energiequelle benötigt. Die Lichtversorgung des Phytoplanktons nimmt auch mit wachsender Durchmischungstiefe des Oberflächenwassers ab.
- *Nährstoffe:* Der Klimawandel kann indirekt auch die Versorgung des Phytoplanktons mit Nährstoffen (vor allem Stickstoff und Phosphor, aber auch „Mikronährstoffe“ wie z. B. Eisen; Jickells et al., 2005) beeinflussen. Aus der produktiven oberen Schicht der Ozeane werden durch das Absinken abgestorbener Organismen ständig organische Substanz und damit auch Nährstoffe in die Tiefsee exportiert („biologische Pumpe“; Falkowski et al., 2003). Der Rücktransport in die oberen Schichten findet vor allem durch Aufwärtsströmungen und vertikale Mischung statt, die über Temperaturschichtung, Wind- und Strömungsverhältnisse vom Klima beeinflusst werden (z. B. Sarmiento et al., 2003).

Hinzu kommt, dass die Klimaerwärmung wesentlich durch steigende CO₂-Konzentrationen verursacht wird. Dies führt bei vielen Phytoplanktonarten zu einer direkten Erhöhung der Photosyntheserate, wobei allerdings die Artengruppen unterschiedlich profitieren (Kap. 4.3.1). Diese verschiedenen Faktoren sind zusätzlich untereinander gekoppelt: So verursacht die Erwärmung der Oberflächenschichten nicht nur erhöhte Photosyntheseraten, sondern auch eine stabilere Temperaturschichtung der Wassersäule, was die Nährstoffversorgung verschlechtert und die Planktonproduktion schwächt. Die verstärkte Schichtung kann zudem die Dynamik der Phytoplanktonproduktion destabilisieren (Huisman et al., 2006). Eine zunehmende Windgeschwindigkeit wirkt dem Temperatureffekt auf die Schichtung entgegen. Im Nordostatlantik führen diese gegenläufigen Effekte in der Summe zu einer Zunahme des Phytoplanktons in Kaltwassergebieten (da hier bei guter Nährstoffversorgung und hoher Turbulenz die verbesserten Stoffwechselraten durch Temperaturerhöhung überwiegen) und zu einer Abnahme in Warmwassergebieten (da sich hier bei verstärkter Schichtung unter Nährstofflimitierung die Wachstumsbedingungen verschlechtern; Richardson und Schoeman, 2004). Es überrascht daher nicht, dass die Effekte schwierig zu modellieren sind und regional äußerst unterschiedlich ausfallen.

Die satellitengestützte Beobachtung der Phytoplanktonbiomasse über den Chlorophyllgehalt des Meerwassers ergibt, dass sich die globale jährliche Primärproduktion seit den 1980er Jahren in neun von zwölf Ozeangebieten abgeschwächt hat, im globalen Mittel um mehr als 6% (Gregg et al., 2003). 70% dieser globalen Abschwächung wurde in den hohen nördlichen Breiten beobachtet, was vermutlich durch die schlechtere Nährstoffversorgung aufgrund gestiegener Temperatur verursacht wird. Nur drei tropische Ozeangebiete (Nord- und Äquatorialindik sowie Äquatorialatlantik) weisen eine Zunahme auf. Für den Nordatlantik zeigen langjährige Datenreihen, die auf Probennahmen beruhen, eine Zunahme der Phytoplanktons nördlich 55°N und eine Abnahme südlich 50°N (Richardson und Schoeman, 2004). Die Projektionen für eine Zukunft mit globaler Erwärmung weisen widersprüchliche Trends auf. Die Modellierung von Bopp et al. (2001) zeigt bei Verdoppelung der atmosphärischen CO₂-Konzentration eine Reduktion der globalen marinen Exportproduktion um ca. 6% in den nächsten 65–75 Jahren, die mit der Primärproduktion gut korreliert. Dabei wird die tropische Produktion durch eine verstärkte Schichtung und somit reduzierte Nährstoffversorgung zurückgehen, während sie in den subpolaren Gebieten zunehmen soll. Im Gegensatz dazu zeigen die Modelle von Sarmiento et al. (2004) – bei

großer Unsicherheit – eher die Tendenz zu einer leichten Erhöhung der globalen Primärproduktion. Auch hier sind die Auswirkungen regional äußerst unterschiedlich. Die Autoren des Arctic Climate Impact Assessment halten es für wahrscheinlich, dass sich eine moderate Erwärmung fördernd auf die Primärproduktion in der Arktis auswirken würde – vor allem durch die Reduktion des Meereises (ACIA, 2005).

Die vorliegenden Ergebnisse sind also teilweise widersprüchlich, und regionale Beobachtungen lassen sich nicht immer mit Modellprognosen in Einklang bringen. Das Verständnis der Prozesse – z. B. die Temperatursensitivität der Primärproduktion – ist offensichtlich unzureichend. Die Qualität gekoppelter Klima-, Ozean- und Ökosystemmodelle läßt derzeit keine belastbaren Aussagen zu (Sarmiento et al., 2004), wenn auch einige Regionalmodelle die Zusammenhänge zwischen der Veränderung von Ozeanströmungen bis hin zur Primärproduktion bereits abbilden können (Beispiele in Brander, 2005).

Es ist zwar unwahrscheinlich, aber nicht auszuschließen, dass der Klimawandel zu einer Unterbrechung des Nordatlantikstroms führt (Kap. 2.1.3; Rahmstorf, 2000; Curry und Mauritzen, 2005). Für dieses Szenario zeigen die Simulationen von Schmittner (2005) eine gänzlich veränderte ökosystemare Situation: Die Biomasse von Phyto- und Zooplankton des Nordatlantiks würde wegen stark abgeschwächter Nährstoffversorgung des Oberflächenwassers um die Hälfte abnehmen, mit entsprechend großen Auswirkungen auf die Ökosystemproduktivität und -struktur.

2.2.2.3 Zooplankton

Die Primärproduktion des Phytoplanktons ist Nahrungsgrundlage für das Zooplankton (Sekundärproduktion: häufig Kleinkrebse), das wiederum als Nahrung für den Aufbau von Fischpopulationen von entscheidender Bedeutung ist. Vor allem Fischlarven sind auf eine zeitgleiche, hohe Verfügbarkeit von geeignetem Zooplankton angewiesen, damit die Fischbestände aufgestockt werden und die Produktion aufrechterhalten wird. Auch beim Zooplankton zeigen die folgenden Beispiele, dass bereits deutliche Veränderungen als Folge des anthropogenen Klimawandels festzustellen sind.

Im Nordatlantik wurde die Verbreitung von Ruderfußkrebse (Copepoden), einer wichtigen Gruppe im marinen Nahrungsnetz, als Folge einer Kombination von Veränderungen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und des anthropogenen Klimawandels um ca. 10° Breite nordwärts verschoben

(Beaugrand et al., 2002). Beim Nordseekabeljau haben diese Veränderungen zusätzlich zur Überfischung dazu beigetragen, dass die Fischlarven schlechte Bedingungen vorfanden und die Populationen stetig abnahmen (Beaugrand et al., 2003).

In der Antarktis hat der Krill (*Euphausia superba*) seit 1976 deutlich abgenommen, während andere Zooplanktonarten (Salpen) zugenommen haben, was wahrscheinlich auf die klimabedingte Reduktion des Meereises rund um die antarktische Halbinsel zurückzuführen ist (Atkinson et al., 2004). Da Krill als Futter für Fische, Pinguine, Robben und Wale wichtig ist, hat dies wesentliche Veränderungen des Nahrungsnetzes im Südlichen Ozean zur Folge. Sedi-mentuntersuchungen an planktischen Kammerlingen (Foraminiferen) über die vergangenen 1.400 Jahre zeigen in den letzten Jahrzehnten eine atypisch veränderte Artenzusammensetzung. Dies deutet darauf hin, dass die anthropogene Erwärmung des Ozeans den Bereich der natürlichen Variabilität bereits überschritten hat (Field et al., 2006).

2.2.2.4 Marine Säugetiere

Durch die Erwärmung verringert sich die Ausdehnung des arktischen Meereises, was vor allem Tierarten wie Eisbär und Ringelrobbe trifft, die unmittelbar in ihren Ernährungsgewohnheiten bzw. bei der Aufzucht der Jungen von diesem Habitat abhängen (ACIA, 2005).

Eisbären ernähren sich fast ausschließlich von Robben, die an den Lebensraum Eis gebunden sind. Eisbärenweibchen gebären ihre Jungen in Höhlen an Land. Um im Frühjahr nach dem Winterschlaf zu den Jagdgebieten auf dem Eis zu kommen, ist die Mutter mit den Jungen auf Eiskorridore angewiesen, weil die Jungtiere größere Freiwasserflächen nicht überwinden können. Zieht sich das Eis weiter zurück, können sie die Jagdreviere nicht mehr erreichen. Erwachsene Eisbären sind zwar gute Schwimmer, die Strecken von über 100 km bewältigen können. Monnett et al. (2005) berichten jedoch über eine Verdopplung der im offenen Wasser gesichteten, schwimmenden Eisbären innerhalb der 20-jährigen Beobachtungszeit sowie über jüngste Funde von vier ertrunkenen Eisbären vor Alaska an einer Stelle, wo das Eis über 200 km nördlich der saisonüblichen Grenze lag. Im Bereich ihres südlichsten Vorkommens, der kanadischen Hudson Bay, sank die Eisbärenpopulation seit 1987 um 22 % (Carlton, 2005). Eisbären bliebe beim Verlust der sommerlichen Meeresdecke nur ein Leben an Land, dort allerdings in Konkurrenz zu Braun- und Grizzlybären und in ver-

mehrtem Kontakt zum Menschen und daher wohl mit nur wenig Aussicht auf ein Überleben dieser Art.

Szenarien für die Ostsee ergeben, dass auch hier die Eisbedeckung in den kommenden 30 Jahren deutlich abnehmen wird. Die baltische Ringelrobbe benötigt für die Aufzucht der Jungen mindestens zwei Monate lang eine feste Eisschicht mit Schneebedeckung. Von den bisherigen vier Aufzuchtgebieten in der Ostsee mit separaten Populationen wird künftig wohl nur noch im Bottnischen Meerbusen ein geeignetes Areal vorhanden sein (Meier et al., 2004). Auch in der Antarktis gibt es erste Beobachtungen, die auf Klimaänderungen zurückgeführt werden: Seit zwanzig Jahren ist die Geburtenrate der Pelzrobben rückläufig. Dieser Rückgang korreliert mit den ungewöhnlich hohen Temperaturen des Oberflächenwassers nach den häufigen El-Niño-Ereignissen zwischen 1987 und 1998 und wird vermutlich durch das gesunkene Nahrungsangebot – vorwiegend Krill – für die Robbenweibchen verstärkt (Forcada et al., 2005).

Diese Beispiele zeigen, wie einschneidend sich klimabedingte Veränderungen im Lebensraum Eis auf die höchste trophische Ebene auswirken können.

2.2.2.5 Ökosystemare Wirkungen

Temperaturerhöhung und andere Faktoren des Klimawandels wirken auf Organismengruppen jeweils unterschiedlich, so dass verschieden starke oder schnelle Populationsverschiebungen Arten trennen können, die früher im gleichen Gebiet oder gleichzeitig auftraten. Diese Entkopplung zwischen vormals synchronen trophischen Ebenen kann erhebliche Veränderungen der Ökosystemstruktur hervorrufen („trophic mismatch“, z. B. in der Nordsee; Edwards und Richardson, 2004). Klimainduzierte räumliche Veränderungen der Phytoplanktonverteilung können über das herbivore Zooplankton bis zum carnivoren Zooplankton durchschlagen, so dass sich auch Fische, Seevögel und Säugetiere an die neuen Bedingungen anpassen müssen (Richardson und Schoeman, 2004).

Derartige großräumige Verschiebungen auf verschiedenen Ebenen eines Nahrungsnetzes konnten u. a. bereits im Nordatlantik beobachtet werden (Beaugrand und Reid, 2003). Nach einer außergewöhnlichen Temperaturzunahme verschoben sich im Verlauf der 1980er Jahre Kaltwasserarten wie Leuchtkrebse (Euphausiden) und Ruderfußkrebse (Copepoden) nordwärts und gingen im Bestand zurück, während die kleineren, wärmeliebenden Arten entsprechend zunahm (Beaugrand et al., 2002). Dies hatte wiederum einen Rückgang der

Lachspopulation zur Folge. Für die Zukunft erwarten Beaugrand und Reid (2003) einen weiteren Rückgang der Anzahl und der Verbreitung der Lachspopulation, vor allem an den südlichen Rändern ihrer geographischen Verbreitung (Spanien und Frankreich).

Als Folge der Verschiebung der Verbreitungsgebiete vieler Arten in Richtung Pole nimmt der Druck auf marine Ökosysteme in den polaren Regionen durch neu einwandernde Arten stetig zu, während die an niedrige Temperaturen angepassten Bewohner dieser Gebiete nicht in kühlere Breiten ausweichen können. Sie sind also besonders empfindlich gegenüber dem Klimawandel, so dass besonders bei den polar-marinen Meeresökosystemen Verluste von Habitaten und Arten zu erwarten sind (Smetscek und Nicol, 2005; ACIA, 2005). Zudem sind in der Arktis die regionalen Ausprägungen der globalen Erwärmung besonders deutlich spürbar, u. a. weil es dort als Folge der Albedoveränderungen durch das zurückgehende Meereis eine besonders starke Rückkopplung mit der regionalen Temperatur gibt (Kap. 2.1.2).

Durch die Klimaerwärmung wird die Primärproduktion im Arktischen Ozean wahrscheinlich zunehmen, wenn auch von einem sehr niedrigen Niveau aus (ACIA, 2005). Die erhöhte Produktion kann entweder durch das Zooplankton genutzt werden oder aussedimentieren und damit den Bodentieren als Nahrung dienen. In Gebieten mit saisonaler Eisbedeckung kann aufgrund der klimabedingten Veränderung des Beginns der Eisschmelze im Frühjahr eine zeitliche Verschiebung zwischen der Phytoplanktonblüte und dem massenhaften Vorkommen des Zooplanktons auftreten, ebenso zwischen dem Zooplankton und den Fischlarven. Dadurch würde aufgrund mangelnder Synchronisation nur ein geringerer Anteil der Primärproduktion für höhere Ebenen des Nahrungsnetzes zur Verfügung stehen. Wie sich die erhöhte Primärproduktion letztlich auf Fisch-, Vogel- und Säugerpopulationen auswirkt, kann jedoch kaum verlässlich prognostiziert werden (ACIA, 2005).

Eine wichtige Frage ist, ob der anthropogene Klimawandel natürlich vorkommende Regimeübergänge beeinflussen kann (Kap. 2.2.1). Bei der geringen Resilienz der marinen Ökosystemstrukturen und der Stärke des zu erwartenden anthropogenen Klimasignals (Kap. 2.2.2) ist keinesfalls auszuschließen, dass Regimeübergänge künftig qualitativ anders ablaufen, häufiger oder seltener werden oder in Regionen stattfinden, in denen sie bisher nicht auftraten. Die beobachtete Beschleunigung der Periodizität der Regimeübergänge im Nordpazifik (King, 2005) könnte darauf hindeuten, dass es einen Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel gibt,

eine abschließende Beurteilung ist aber derzeit nicht möglich (Brander, 2005).

Insgesamt stützen die neuen Befunde aus der Meeresökologie die in vergangenen Gutachten des WBGU geforderten verstärkten Anstrengungen im Klimaschutz (z. B. WBGU, 2003b), denn im Falle einer ungebremsen Klimaerwärmung lassen sich erhebliche, unvorhersehbare und unerwünschte Veränderungen der Meeresökosysteme nicht ausschließen.

2.3

Schwerpunkt: Klima und Fischerei

Fisch ist für mehr als 2,6 Mrd. Menschen die Grundlage für mindestens 20% ihrer Proteinversorgung (FAO, 2004). Die industrielle Fischerei nimmt zu und konkurriert zunehmend mit den 30 Mio. traditionellen Fischern, die vielfach Einkommenseinbußen hinnehmen mussten (World Bank, 2004). Die Weltfischproduktion stagniert in den letzten Jahren bei rund 130 Mio. t pro Jahr, wobei der Anteil des im Meer gefangenen Fisch leicht zurückgeht und der Anteil der Aquakultur steigt (FAO, 2004). Die Fischbestände sind sehr ungleichmäßig im Meer verteilt: Weniger als 7% der Ozeanfläche gehören zu den Kontinentalschelfen (Wassertiefe <200 m), diese sorgen aber für mehr als 90% des globalen Fischfangs (Pauly et al., 2002).

Gleichzeitig ist der menschliche Einfluss auf die Meeresökosysteme der Kontinentalschelfe besonders groß: Überfischung (FAO, 2004; MA, 2005b) einschließlich illegaler bzw. unregulierter Fischerei (Gianni und Simpson, 2005), Degradation und Zerstörung mariner und Küstenhabitats (z. B. Korallen, Kap. 2.4), die Verbreitung nicht heimischer Arten oder die Verschmutzung der Weltmeere (GESAMP, 2001) und als neue Bedrohung die Versauerung (Kap. 4) gefährden die Ökosysteme und die Nachhaltigkeit ihrer Nutzung. Das mangelhafte Fischereimanagement und die dadurch ausgelöste Überfischung sind sicherlich von größerer Bedeutung für die Fischbestände als der bisher beobachtete anthropogene Klimawandel (Worm und Myers, 2004; ACIA, 2005). Künftig kann dieser aber erhebliche zusätzliche Belastungen für die marinen Ökosysteme verursachen (IPCC, 2001b; Richardson und Schoeman, 2004).

2.3.1

Veränderungen bei Fischpopulationen

Auf die anthropogene Klimaerwärmung reagieren die Arten in marinen Ökosystemen ähnlich wie in

terrestrischen häufig mit einer Verschiebung polwärts (Parmesan und Yohe, 2003). Auch bei vielen Fischpopulationen der europäischen Schelfgewässer gibt es immer mehr Hinweise auf eine durch Erwärmung verursachte Verschiebung nach Norden (Abb. 2.3-1). So nimmt der Bestand des Kabeljaus in der Nordsee in einem Maß ab, das nicht allein mit Überfischung erklärt werden kann. Dort wird bereits heute das obere Limit des thermischen Toleranzfensters erreicht, so dass die Population nach Norden ausweicht. Der Rückgang des Kabeljaus korreliert zudem signifikant mit der veränderten Artenzusammensetzung, der Bestandsabnahme und der kleineren mittleren Körpergröße des Zooplanktons (Beaugrand et al., 2003), was wahrscheinlich auf die Klimaänderungen zurückgeführt werden kann. In der Nordsee sind über den Zeitraum von 1925–2004 grundlegende Veränderungen des pelagischen Ökosystems beobachtet worden, mit einer deutlichen Verschiebung vieler Populationen nach Norden und der Einwanderung südlicher Arten (Beare et al., 2004). Diese systematischen Langzeittrends korrelieren mit der steigenden Meerestemperatur. Aus den Beobachtungen in der Nordsee ziehen Perry et al. (2005) den Schluss, dass ein weiterer Temperaturanstieg zusätzliche, im Detail kaum zu prognostizierende Änderungen von Artenzusammensetzung und Ökosystemstruktur verursachen und damit wahrscheinlich erheblichen Anpassungsdruck auf die kommerzielle Fischerei ausüben würde. Auch für verschiedene arktische Seegebiete werden bei regionaler Erwärmung um 1–3°C Verschiebungen von Fischpopulationen in Richtung Norden, teils sogar die Etablierung eigenständiger Populationen (z. B. Kabeljau bei Grönland) sowie die Einwanderung südlicher Arten erwartet (ACIA, 2005).

2.3.2

Regionale Prognosen der Auswirkungen auf die Fischerei

Für einige Meeresregionen, vor allem für die Gewässer der nördlichen Breiten, ist das Verständnis der Ökosystemstrukturen und die Reaktion auf natürliche Klimavariabilität gut genug, um mögliche Auswirkungen des Klimawandels zu diskutieren. So gilt z. B. das Europäische Nordmeer als sehr gut untersucht (Skjoldal, 2004). Basierend auf den Erfahrungen mit natürlicher Klimavariabilität ist davon auszugehen, dass regionale Temperaturerhöhungen von 2–4°C die Primär- und Sekundärproduktion des subarktischen Teils des Europäischen Nordmeers erhöhen und damit die Voraussetzung für die Fischproduktion verbessern könnten (Skjoldal und Sætre, 2004). Dabei wird sich allerdings das Artenspektrum

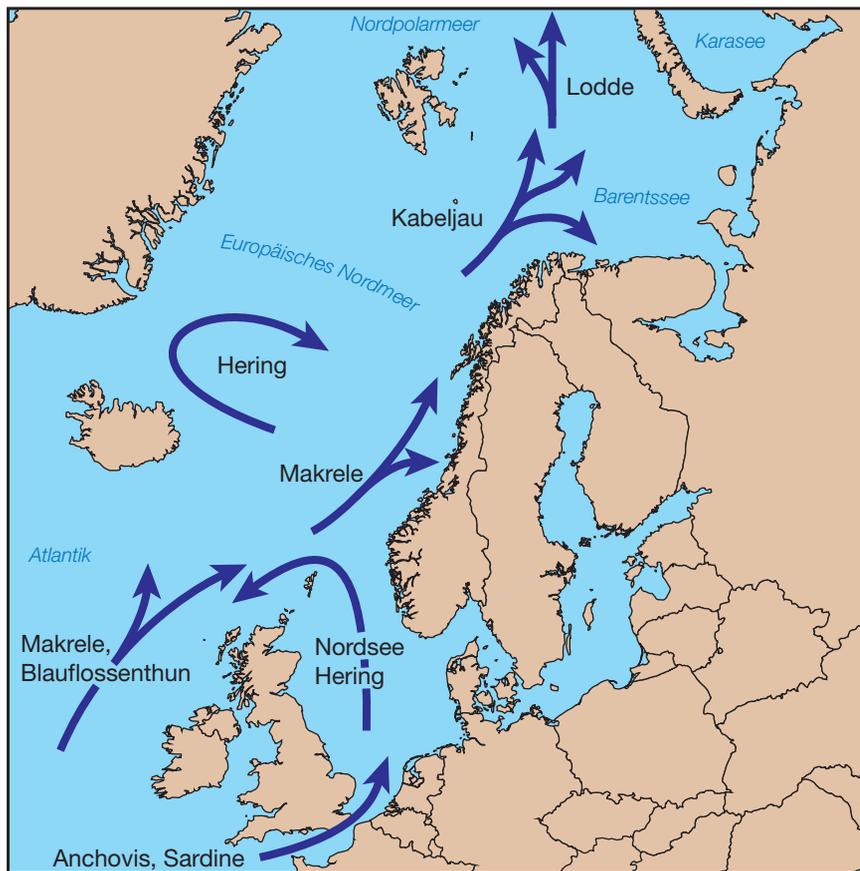


Abbildung 2.3-1
Voraussichtliche Verschiebung der Lebensräume einiger wichtiger kommerziell befischter Arten bei weiterer Erwärmung der Meere. Quelle: ACIA, 2005 verändert nach Blindheim et al., 2001

verschieben, d. h. es werden warmwasserliebende südliche Arten hinzukommen.

Die Autoren des Arctic Climate Impact Assessment gehen ebenfalls davon aus, dass eine regionale Erwärmung um 1–3°C die Bedingungen für einige ökonomisch bedeutende Fischpopulationen wie z. B. Atlantischer Kabeljau oder Hering verbessern wird, da der Rückgang des Meereises sowohl die Primär- und Sekundärproduktion steigern als auch die Verbreitung dieser Arten nach Norden ermöglichen wird (ACIA, 2005).

Regimeübergänge mit deutlicher Veränderung der Artenzusammensetzung (Kap. 2.2.1) werden vom ACIA zwar nicht ausgeschlossen, aber die Anpassung der Fischereiwirtschaft an die neuen Bedingungen wird als wenig aufwändig erachtet. Insgesamt kommt das ACIA (2005) zu dem Schluss, dass die Art und Effektivität des Fischereimanagements – vor allem die Verhinderung der Überfischung durch die Anwendung des Vorsorgeprinzips – deutlich größeren Einfluss auf die Produktion in der Arktis haben wird als ein für das 21. Jahrhundert prognostizierter moderater regionaler Klimawandel von 1–3°C. Demzufolge werden auch kaum signifikante ökonomische oder soziale Auswirkungen auf nationaler Ebene erwartet, selbst wenn einzelne arktische Regionen,

die stark von der Fischerei abhängig sind, deutlich beeinflusst werden können.

Diese Einschätzung verändert sich im Falle erheblicher regionaler Klimaänderungen (>3°C). Während die Autoren des ACIA (2005) in einigen arktischen Seegebieten negative Konsequenzen für die Fischerei für möglich halten, wagen sie aufgrund eines mangelnden Verständnisses der ökosystemaren Zusammenhänge für die Mehrzahl der arktischen Regionen keinerlei Prognosen. Obwohl die arktischen Gewässer vergleichsweise gut untersucht sind, gibt es derzeit kein verlässliches, an Klimaszenarien gekoppeltes Ökosystemmodell. Daher muss die Einschätzung der ökosystemaren Wirkungen spekulativ bleiben. Um die offenen Fragen beantworten zu können, ist in der Forschung ein stärker ökosystembasierter Ansatz zu verfolgen. Verbesserte numerische ökologische Modelle auf Grundlage eines integrierten Umweltmonitorings sind hierfür ein wichtiger Ansatz (Skjoldal und Sætre, 2004; Kap. 2.7).

2.3.3

Globale Prognosen der Auswirkungen auf die Fischerei

Die FAO, die als UN-Sonderorganisation auch für Fischerei zuständig ist, nennt den künftigen anthropogenen Klimawandel als ein Beispiel für Unsicherheiten, die einen Vorsorgeansatz für das Fischereimanagement rechtfertigen (FAO, 2000). Im Lagebericht zur Fischerei 2002 weist die FAO in einem eigenen Kapitel auf die Bedeutung der natürlichen Langzeitvariabilität des Klimas für die Entwicklung der Fischbestände hin. Sie stellt darüber hinaus fest, dass eine globale Erwärmung deutliche – positive oder negative – Auswirkungen auf einige, wenn nicht sogar die meisten kommerziellen Fischbestände haben könnte (FAO, 2002). Dabei dürften durch Überfischung drastisch reduzierte Bestände anfälliger für Klimaänderungen sein als nachhaltig genutzte (FAO, 2004). Dennoch beruhen die Langzeitprojektionen der FAO bis heute u. a. auf der Annahme, dass sich die Umweltbedingungen, so auch das Klima, nicht wesentlich ändern.

Der IPCC (2001b) weist auf die zunehmend anerkannte Beziehung zwischen natürlicher Klimavariabilität und der Dynamik von Fischbeständen hin und zieht die Schlussfolgerung, dass die globale Erwärmung diese Zusammenhänge komplizieren und das Fischereimanagement schwieriger machen wird. Der Klimawandel hat also das Potenzial, im Verlauf der nächsten Jahrzehnte ein bedeutender Faktor für das Management mariner Ressourcen zu werden, wobei die Wirkungen je nach Region und Ökosystemcharakteristik sehr weit streuen werden (IPCC, 2001b).

Auch die Autoren des Millennium Ecosystem Assessment warnen vor den Folgen des Klimawandels, ohne allerdings eine genaue Analyse vorzunehmen. Sie bezeichnen das derzeitige Wissen über die Wirkungen des Klimawandels auf Meeresökosysteme als unzureichend. Sie weisen insbesondere darauf hin, dass die Reaktion der Fischbestände auf Umwelteinflüsse nicht zuletzt von ihrer Populationsgröße abhängt. Gesunde Bestände mit großer Produktion von Fischlarven können sich besser an Populationsverschiebungen und Veränderungen der Ökosystemstrukturen anpassen. Dementsprechend reagieren durch Überfischung stark verkleinerte Bestände gegenüber Umwelteinflüssen wie z. B. dem Klimawandel besonders empfindlich (MA, 2005b), weil der für die Reproduktion erforderliche minimale Bestand leichter unterschritten wird.

Trotz der unbefriedigenden wissenschaftlichen Datenlage lassen sich einige allgemeine Empfehlungen für das Management mariner Ökosysteme und

das Fischereimanagement ableiten, die in Kapitel 2.6 erläutert werden.

2.4

Schwerpunkt: Klima und Korallenriffe

Tropische Korallenriffe gelten als das artenreichste marine Biotop, nicht so sehr wegen des Artenreichtums der riffbildenden Korallen selbst (beschrieben sind über 835 Arten), sondern wegen der biologischen Vielfalt der Organismen, die auf und von Korallenriffen leben, mit geschätzten 0,5–2 Mio. Arten (Reaka-Kudla, 1997). Korallenriffe liefern wichtige Produkte wie Fische oder Baumaterial (Blöcke aus Korallenkalk). Sie bieten Schutz vor Tsunamis und Küstenerosion und sind gleichzeitig aufgrund ihrer ästhetischen und kulturellen Werte z. B. für den Tourismus eine wichtige Einnahmequelle. Obwohl Korallenriffe nur 1,2% der Fläche der globalen Kontinentalschelfe bedecken, wird geschätzt, dass über 100 Mio. Menschen wirtschaftlich von Korallenriffen abhängen (Hoegh-Guldberg, 2005). Der Statusbericht der weltweiten Korallenriffe (Wilkinson, 2004) gibt seit den 1950er Jahren Auskunft über ihre Entwicklung und eine besorgniserregende Einschätzung der zukünftigen Trends:

- 20% aller Korallenriffe sind zerstört und zeigen keine unmittelbare Aussicht auf Erholung,
- 24% aller Korallenriffe stehen durch menschlichen Druck vor dem unmittelbaren Kollaps,
- weitere 26% sind längerfristig gefährdet.

Die Veränderungen der vergangenen 20–50 Jahre werden als „Korallenriffkrise“ bezeichnet, weil die Anpassungsfähigkeit von Korallen und den mit ihnen vergesellschafteten Tieren und Pflanzen an die veränderten Umweltbedingungen weltweit überschritten wird (Hoegh-Guldberg, 1999; Pandolfi et al., 2003). Der Druck durch menschliche Aktivitäten entsteht lokal zum einen durch schlechte Praktiken des Landmanagements, wodurch Sedimente, Nährstoffe und Schadstoffe freigesetzt und ins Meer gespült werden, die dann die Riffe schädigen. Zum anderen reduzieren Überfischung und vor allem die Fischerei mit destruktiven Methoden (Dynamit, Zyanid, schwere Fischereigeschirre) die Populationen von Schlüsselarten im Riff, wodurch die Funktion des Ökosystems geschädigt und die Produktivität gesenkt wird. Nach einer Schädigung sind dann z. B. Makroalgen im Wachstum gegenüber Korallen bevorteilt, weil der Fraßdruck durch Fische sinkt, die sich von diesen Algen ernährten und die selektiv gefangen wurden.

Neben den genannten lokalen Stressoren gewinnen zwei Folgen der globalen Klimaänderung für den Zustand der Korallenriffe zunehmend an Gewicht

und sollen daher in diesem Kapitel näher untersucht werden: der Anstieg der Meerwassertemperatur und die Versauerung des Meerwassers. Beide Faktoren tragen einzeln und wohl auch synergistisch zusammen mit den lokalen anthropogenen Stressoren zur Zerstörung der Korallenriffe bei.

Erst in den vergangenen Dekaden wurden Korallenriffe auch in den tiefen, lichtlosen Kaltwasserzonen in so gut wie allen Weltmeeren entdeckt (Freiwald et al., 2004). Ihre Ökosysteme und deren hohe Gefährdung vor allem durch Schleppnetzfischerei werden momentan erforscht. Ob auch sie durch Auswirkungen des Klimawandels wie Temperaturänderung und veränderte Verfügbarkeit von Kalziumkarbonat bedroht werden, ist ungeklärt.

2.4.1 Auswirkungen der Erwärmung auf Korallen

Korallenriffe dominieren tropische Küsten in den Breiten zwischen 25°N und 25°S, was einem Temperaturbereich des Meerwassers von 18–30°C entspricht (Veron, 1986). Zusammen mit der Atmosphäre haben sich in den vergangenen Jahrzehnten auch die Oberflächenschichten des Meeres erwärmt (Kap. 2.1.1). In sieben tropischen Regionen mit Korallenvorkommen wurde im 20. Jahrhundert eine Erwärmung von 0,7–1,7°C gemessen (Hoegh-Guldberg, 1999).

Seit 1979 wird mit zunehmender Häufigkeit und geografischer Ausdehnung ein neues Phänomen beschrieben, die Korallenbleiche. Sie bezeichnet den Verlust einzelliger Algen, die mit den Korallen in Symbiose leben. Gerät eine Koralle in eine Stresssituation, die in der Natur wie im Labor durch hohe oder niedrige Temperaturen, intensives Licht, Veränderungen im Salzgehalt und andere physikalische, chemische und mikrobielle Stressoren hervorgerufen werden kann, werden die Algen aus dem Korallengewebe ausgestoßen. Das lebende Gewebe der Korallen ist ohne Algenzellen durchsichtig, so dass das weißliche Kalkskelett durchscheint – daher der Begriff Korallenbleiche. Dieses Phänomen ist teilweise reversibel, weil Algenzellen wieder in das Körpergewebe aufgenommen werden können. Bei längerem Andauern der Korallenbleiche sterben die Korallen jedoch ab.

Massenhaft auftretende Korallenbleichen werden erst seit Beginn der 1980er Jahre in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben. Starke, zunehmend weltweit auftretende Ereignisse korrelieren mit hoher Oberflächentemperatur des Meerwassers und mit Störungen, die mit einem El-Niño-Ereignis (El Niño/Southern Oscillation, ENSO) verbunden sind. Das mit weitem Abstand stärkste Ereignis trat

1997/1998 auf, in dessen Folge weltweit 16% aller tropischen Korallen starben. Regional lagen die Werte darüber, beispielsweise bei 46% im westlichen Indischen Ozean (Wilkinson, 2004).

Die Höhe und Dauer der Temperaturanomalie sind wichtige Größen für die Vorhersage von Korallenbleichen. Als Indikator wurden die „Degree Heating Weeks“ (DHW) entwickelt, die den thermischen Stress über 12 Wochen akkumulieren. 1 DHW entspricht 1 Woche mit einer Temperatur von 1°C über dem Sommermaximum in den vergangenen 12 Wochen. Die US-amerikanische National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) betreibt dafür ein Frühwarnsystem. Die Analyse der Messreihen zeigt, dass 8 DHW in 99% aller Fälle zu einer Korallenbleiche führten. Korallenbleichen können heute mit über 90%iger Wahrscheinlichkeit einige Wochen vor Auftreten des Ereignisses vorausgesagt werden (Strong et al., 2000). Die weltweite Fläche der Korallenriffe, die von DHW >4 betroffen sind, steigt kontinuierlich an (Wilkinson, 2004). Modellrechnungen auf der Basis von IPCC-Szenarien zeigen: 2030–2050 könnten Ereignisse wie im Ausnahmejahr 1998 jährlich auftreten und korallendominierte Ökosysteme somit der Vergangenheit angehören (Hoegh-Guldberg, 2005). Donner et al. (2005) kommen durch die Verknüpfung der Daten des NOAA-Frühwarnsystems mit globalen Zirkulationsmodellen zu ähnlichen Prognosen. Demnach würden bei der großen Mehrheit aller Korallenriffe in 30–50 Jahren alle ein bis zwei Jahre Korallenbleichen auftreten, sollten sich die Korallen nicht in ihrer Temperaturtoleranz um 0,2–1°C pro Dekade anpassen.

Wichtig ist die Beobachtung, dass der Schwellenwert der Meerwassertemperatur für das Auslösen einer Korallenbleiche an vielen Standorten nur 1–2°C über dem Maximum der Sommertemperatur liegt. Tropische Korallen leben also nahe der Höchsttemperatur, bei der sie noch existieren können (Hoegh-Guldberg, 1999). Unter der Prämisse, dass die oberflächennahen Meerwassertemperaturen weiter steigen werden, stellt sich die Frage, wie Korallen auf diese Temperaturerhöhung reagieren könnten. Hughes et al. (2003) beschreiben mögliche Reaktionen: Eher unwahrscheinlich ist danach ein konstanter Schwellenwert für alle Korallenarten, vielmehr variieren die Schwellenwerte je nach Korallenart, Meerestiefe und Ort in einer gewissen Bandbreite. Am realistischsten scheint ein Modell zu sein, in dem sich die unterschiedlichen Schwellenwerte für das Absterben der Korallen mit der Zeit durch Akklimatisierung und Evolution verändern. Symbiotische Algen, die in unterschiedlichen Genotypen auftreten, sind beispielsweise an unterschiedliche Temperaturübergrenzen angepasst. Nach einer Korallenbleiche könnten wärmetolerantere Algen-

stämme in das Korallengewebe aufgenommen werden, einen besseren Schutz gegen künftige Temperaturspitzen bieten und somit eine begrenzte Anpassung an den Klimawandel ermöglichen (Baker et al., 2004; Rowan, 2004). Hoegh-Guldberg (2005) äußert allerdings die Sorge, dass die evolutionäre Anpassung von Korallen und Algen nicht mit der raschen Umweltveränderung Schritt halten könnte, die sich in nur wenigen Jahrzehnten vollzieht.

Korallenriffe könnten auf erhöhte Meerwassertemperaturen auch mit einer Verschiebung der Verbreitung oder des Artenspektrums reagieren. Eine Verschiebung des Verbreitungsgebiets polwärts wird aber allenfalls nur wenige Grad geografischer Breite betragen können, weil sowohl das Licht (für die Photosynthese der symbiontischen Algen) als auch die Aragonitübersättigung (für die Kalzifizierung) begrenzende Parameter sind (Buddemeier et al., 2004).

2.4.2

Auswirkungen der Versauerung auf Korallen

Die Versauerung des Meeres durch die Hydrolyse von CO_2 im Meerwasser (Kap. 4.1) beeinflusst die Karbonatchemie und betrifft damit auch die Korallen, die Skelette aus Kalziumkarbonat erzeugen (Orr et al., 2005). Dabei ist die Kalkbildung (Kalzifizierung) nicht nur Grundlage für das Wachstum der Korallenriffe, sie wirkt auch dem Prozess der Erosion der Riffe entgegen. Durch die CO_2 -bedingte Drosselung der Kalkbildungsrate wird die Ausbreitung der Korallenriffe in kühlere Meeresgebiete behindert, so dass nach aktuellen Perspektiven sowohl erhöhte Temperaturen als auch erhöhte CO_2 -Gehalte die Verbreitungsgebiete heutiger Korallenriffe drastisch einschränken werden (Hoegh-Guldberg, 2005).

In Laborexperimenten, welche eine verdoppelte CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre simulierten, sank die Kalkbildungsrate bei Korallen um 11–37% (Gattuso et al., 1999). Modellrechnungen von Kleypas et al. (1999) bestätigen diese Ergebnisse. Danach ist die Kalkbildung heute bereits um 6–11% gegenüber vorindustriellen Werten gefallen. Bei einer CO_2 -Verdopplung wird mit einer weiteren Verringerung um 8–17% gegenüber den heutigen Werten gerechnet. Eine verringerte Kalzifizierung bedeutet ein langsames Wachstum des Korallenskeletts und damit eine verringerte Konkurrenzfähigkeit um Raum im Korallenriff. Außerdem entstehen Skelette mit geringerer Dichte, die zu höherer Bruchgefahr und Anfälligkeit gegenüber Erosion führen.

Die Kalzifizierungsrate wird neben der CO_2 -Konzentration auch durch die Wassertemperatur beeinflusst. Erhöhte Meerwassertemperaturen könnten zu

höherer Stoffwechselaktivität und verstärkter Photosyntheseleistung der symbiontischen Algen führen und damit auch zu höherer Kalkbildung bei Korallen (Lough und Barnes, 2000). McNeil et al. (2004) schließen aus In-situ-Untersuchungen und Modellrechnungen, dass die Kalzifizierungsraten der Korallen im Jahr 2100 trotz abnehmender Aragonitübersättigung aufgrund der Meerereswärmung sogar um 35% über den vorindustriellen Raten liegen könnten, vorausgesetzt es findet eine Anpassung der Korallen an höhere Meerwassertemperaturen statt. Diese Thesen sind wissenschaftlich umstritten (Kleypas et al., 2005). Um langfristig die Kalzifizierung zu steigern, müsste der Temperaturanstieg des Meerwassers unterhalb der thermischen Toleranzgrenze der Korallen bleiben. Die zentrale Frage bleibt also auch hier, ob sich die tropischen Korallen und ihre symbiontischen Algen in ihrer Temperaturtoleranz genetisch schnell genug an die steigenden Meerwassertemperaturen anpassen können. Die möglicherweise erhöhte Kalzifizierung bliebe dann ohne Bedeutung, wenn die Korallen an Hitzestress eingingen.

2.4.3

Maßnahmen zum Schutz von Korallen

Aufgrund der Spezialisierung der tropischen Korallenriffe auf ein enges Spektrum an Temperatur, Aragonitübersättigung und hoher Lichteinstrahlung stellt der Klimawandel neben den lokalen anthropogenen Stressoren eine große Bedrohung für sie dar. Zunehmende Korallenbleichen unterstreichen die Notwendigkeit, klimapolitische Maßnahmen energisch umzusetzen. Auch die gesündesten Riffe sind gegen diese Auswirkungen nicht gefeit, wie der Statusbericht der Korallenriffe zeigt (Wilkinson, 2004). Es wurde aber festgestellt, dass „gesunde“, in unberührten Gegenden gelegene Riffe bei Korallenbleichen die größte Überlebenschance besaßen. Es ist also sinnvoll, die Resilienz von Korallengemeinschaften durch Schutz zu stärken.

Dafür wird die Einrichtung von Meeresschutzgebieten (Marine Protected Areas, MPA) als besonders wirkungsvoll angesehen, möglichst in ihrer weitgehendsten Form als No-take Areas, die für die Fischerei geschlossen sind (Hughes et al., 2003; Bellwood et al., 2004; Kap. 2.6.2). Der Fokus auf Schutzgebiete darf aber nicht zur Vernachlässigung des Managements der verbleibenden, viel größeren Riffflächen führen, die nicht unter Schutz stehen. Auf regionaler Ebene müssen die kritischen funktionellen Gruppen (Vergesellschaftung bestimmter, regional oft verschiedener Arten, die das Ökosystem aufrecht erhalten) geschützt werden, sonst verliert das Gebiet an Widerstandskraft.

2.5

Leitplanke: Schutz der Meeresökosysteme

2.5.1

Leitplankenvorschlag

Das Leitplankenkonzept des WBGU dient der Operationalisierung des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung (Kasten 1-1). Für den Schutz von Meeresökosystemen läßt sich eine Leitplanke entwickeln, auch wenn sie angesichts der noch schwachen wissenschaftlichen Grundlage einen vorläufigen Charakter haben muss. In Analogie zur ökologischen Leitplanke des WBGU (2000) für terrestrische Land- und Süßwasserökosysteme schlägt der Beirat vor, mindestens 20–30 % der Fläche mariner Ökosysteme für ein ökologisch repräsentatives und effektiv betriebenes Schutzgebietssystem auszuweisen.

2.5.2

Begründung und Umsetzbarkeit

Diese Leitplanke hat ihre Begründung u. a. in der Erkenntnis, dass Ökosysteme und ihre biologische Vielfalt für die Menschheit überlebenswichtig sind, weil sie eine Vielzahl an Funktionen, Dienstleistungen und Produkten bereitstellen (MA, 2005a). Der Ökosystemschutz ist daher als Baustein nachhaltiger Entwicklung unverzichtbar. Der WBGU (2000) hat in seinem Biosphärentgutachten fünf Prinzipien entwickelt, die als Grundlage für den nachhaltigen Umgang mit Ökosystemen und als Hintergrund für die Entwicklung einer Leitplanke für den Schutz der Meeresökosysteme dienen können: (1) Bewahrung der Integrität von Bioregionen, (2) Sicherung biologischer Ressourcen, (3) Erhaltung von Biopotenzialen für die Zukunft, (4) Bewahrung des globalen Naturerbes, (5) Erhaltung der Regelungsfunktionen der Biosphäre.

Geschützte naturnahe Meeresökosysteme haben für den Menschen viele wichtige Funktionen (Kap. 2.6). Für den Küstenschutz (z. B. gegen Sedimentabtrag, Wellenerosion und Überflutung; Kap. 3.2), die Wasserreinigung, als Instrument des Fischereimanagements (Gell und Roberts, 2003; Kap. 2.6.2.1) oder für den Tourismus spielen sie eine große Rolle. Sie sind zudem unverzichtbar für die Erhaltung der biologischen Vielfalt und für die Steigerung der Widerstandsfähigkeit der Meeresökosysteme gegenüber anthropogenen Stressfaktoren.

Es ist mittlerweile international anerkanntes Ziel, bis 2012 ein marines Schutzgebietsnetzwerk aufzubauen (Kap. 2.6.2.2). Obwohl die normativen Grund-

sätze und der Wert bzw. die Leistungen mariner Ökosysteme sowie die Notwendigkeit ihres Schutzes unumstritten sind, ist es sehr schwierig, dies in eine quantitative Leitplanke zu übersetzen, da die wissenschaftliche Grundlage für eine Quantifizierung noch schwach ist. Zudem kann eine simple globale „Schutznorm“ den regional höchst unterschiedlichen ökologischen Beständen und Situationen kaum gerecht werden, so dass sie nur als Richtwert dienen und nicht unmittelbar auf alle Regionen angewandt werden kann (Bohnsack et al., 2002; Agardy et al., 2003; Rodrigues et al., 2004). Umgekehrt kann das derzeit praktizierte Freigeben nahezu sämtlicher mariner und Küstenökosysteme für Übernutzung oder Zerstörung sicher als nicht tolerierbar bezeichnet werden. Daher sollte eine globale Richtschnur geschaffen werden, welche hilft, die bestehenden erheblichen Defizite zu kommunizieren und die weitere Zerstörung der Lebensgrundlagen zunächst zumindest zu verlangsamen.

Der IUCN World Parks Congress hat den Schutz von 20–30 % jedes marinen Habitattyps empfohlen (WPC, 2003a), in der Biodiversitätskonvention war dieses Flächenziel ebenfalls in der Diskussion, auch wenn es letztlich nicht akzeptiert wurde (CBD, 2003). Im nationalen Bereich werden ähnliche Zahlen diskutiert: USA: 20 % (NRC, 2001), Großbritannien: 30 % (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004) sowie z. B. Bahamas, Kanada und die Philippinen: 20 % (Agardy et al., 2003). Australien hat bewiesen, dass diese Werte nicht unrealistisch sind, indem es die Schutzfläche des Great Barrier Reef in den vergangenen Jahrzehnten von unter 5 % auf 33 % gesteigert hat. Wegen der erheblichen wissenschaftlichen Unsicherheiten kann der konkrete Wert für das Flächenziel nur einen vorläufigen Charakter haben bis bessere Daten und Schätzungen vorliegen.

Angesichts der Tatsache, dass heute weltweit deutlich weniger als 1 % der marinen Fläche unter Schutz steht (Chape et al., 2005), ergibt sich unabhängig vom konkreten Wert des Flächenziels in jedem Fall ein erheblicher Handlungsbedarf, auf den in Kapitel 2.6.2 eingegangen wird. Zum Vergleich: An Land sind derzeit ca. 12 % der Fläche geschützt (WPC, 2003b), was dem terrestrischen Flächenziel für den Ökosystemschutz (10–20%; WBGU, 2000) deutlich näher liegt. Um den Umsetzungsgrad dieser Flächenziele überprüfen zu können, stehen mit dem UNEP World Conservation Monitoring Centre und dem IUCN erfahrene und kompetente Institutionen bereit, die bei entsprechender Ausstattung das Monitoring sicherstellen könnten. Zudem gibt es Berichtspflichten, z. B. im Rahmen der Biodiversitätskonvention und der Ramsar-Konvention.

Bei derartigen Flächenzielen muss – wie auch im terrestrischen Bereich – immer wieder darauf hingewiesen werden, dass die Ausweisung von Schutzgebieten allein noch keinen Schutz gewährleistet; gutes Management und ausreichende finanzielle Ausstattung müssen hinzu kommen (WBGU, 2000). Außerdem müssen auch die übrigen 70–80% der Meeresfläche ohne Schutzstatus nachhaltig und mit integrierten Managementkonzepten auf Basis des ökosystemaren Ansatzes bewirtschaftet werden. Allein mit Schutzgebieten lässt sich der Verlust biologischer Vielfalt nicht aufhalten (WBGU, 2000), insbesondere wenn die Überfischung nicht eingedämmt wird und sich Klimazonen verschieben. Für die Ökosystemleitplanke gilt zudem, dass ihre Einhaltung nur dann einen Schutz für Meeresökosysteme bieten kann, wenn auch die anderen Leitplanken eingehalten werden, insbesondere die Klimaschutzleitplanke (Kasten 1-1) und die Versauerungsleitplanke (Kap. 4.4). Auch das größte und exzellent geführte Schutzgebietssystem kann die Folgen eines ungebremsten Klimawandels oder einer extremen Versauerung nur sehr eingeschränkt mildern: Großflächige, intolerierbare Verluste ökologischer Leistungen wären die Folge.

2.6

Handlungsempfehlungen: Management mariner Ökosysteme verbessern

Der anthropogene Klimawandel hat das Potenzial, künftig erhebliche zusätzliche Belastungen für die marinen Ökosysteme zu verursachen (Kap. 2.2–2.4). Ebenso können Auswirkungen auf die kommerzielle Fischerei nicht ausgeschlossen werden, zumal bereits die natürliche Klimavariabilität eine große Rolle bei der Fluktuation der Fischbestände spielt. Die anthropogenen Temperaturänderungen sind im Begriff, in einigen Regionen die bisher durch natürliche Variabilität erreichten Höchstwerte zu übersteigen (z. B. in der Arktis: ACIA, 2005). Global aggregierte Vorhersagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf Meeresökosysteme sind beim derzeitigen Stand des Wissens aber kaum möglich. Da keine vergleichbaren historischen Messdaten oder Erfahrungswerte aus der Vergangenheit verfügbar sind, würden Prognosen zu Spekulationen.

Die Vermeidung des Klimawandels, vor allem eine erhebliche Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen (WBGU, 2003b; Schellnhuber et al., 2006), ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Begrenzung zusätzlicher Belastungen für die Meeresökosysteme. Eine Vermeidungsoption, die das Meer direkt betrifft, ist die CO₂-Speicherung im Meeresboden (Kap. 5). Wegen der geophysikalischen Verzögerungseffekte des Klimasystems werden aber selbst bei engagierter Emissionsminderung Anpassungsmaßnahmen unumgänglich sein. Daher soll die Anpassung an den Klimawandel im Folgenden im Vordergrund stehen, wobei der WBGU hier den Schwerpunkt auf Fischereimanagement und Meereschutzgebiete legt. Anpassungsmaßnahmen sind auch aus anderen Gründen sinnvoll, denn der Klimawandel ist nur einer von vielen menschlichen Einflüssen, die Meeresökosysteme degradieren (Überfischung, Zerstörung und Verschmutzung mariner Ökosysteme, Einführung nicht heimischer Arten u. a.; GESAMP, 2001; UNEP, 2002). Schon bei getrennter Betrachtung ist jeder einzelne dieser Faktoren eine erhebliche Herausforderung für die internationale Gemeinschaft.

Es sind vor allem die Kopplung und synergistische Wirkung der verschiedenen Einflussfaktoren, die zusätzliche Aufmerksamkeit erfordern (Brander, 2005). Ein Korallenriff, das durch Raubfischerei mit Gift oder Dynamit vorgeschädigt ist, wird auf eine ungewöhnlich starke Hitzeperiode besonders empfindlich reagieren (Kap. 3.3; Wilkinson, 2004). Der durch Überfischung stark reduzierte Bestand einer Fischart wird sich viel langsamer regenerieren, wenn die Küstenökosysteme, die als „Kinderstube“ dienen, durch Infrastrukturmaßnahmen oder Verschmutzung stark belastet sind oder wenn eine Erwärmung zusätzlichen Stress ausübt. Die Liste der Beispiele ließe sich leicht verlängern (Übersicht in Brander, 2005). Daraus wird ersichtlich, dass eine integrierte Betrachtung der unterschiedlichen Faktoren eine wichtige Voraussetzung für erfolgreiches Management mariner Ökosysteme ist. So wird es in den nächsten Jahren um so mehr darauf ankommen, die gegenwärtige Überfischung und auch die anderen destruktiven anthropogenen Faktoren gleichzeitig einzudämmen, damit der Klimawandel auf marine Ökosysteme mit ausreichender Resilienz trifft (Brander, 2005).

Aus diesen Gründen ist der von der Biodiversitätskonvention entwickelte und auf dem Weltgipfel für Nachhaltige Entwicklung (WSSD) bestätigte ökosystemare Ansatz für Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Ökosysteme und ihrer lebenden Ressourcen von großer Bedeutung (z. B. OSPAR, 2003). Für die Umsetzung müssen Forschung und Monitoring zu marinen Ökosystemen und Ozeanregimen verbessert und dieses Wissen in die Beurteilung und das Management der kommerziell interessanten Fischarten einbezogen werden (FAO, 2003; Kap. 2.7). Das derzeitige Wissen über die überaus komplexen Zusammenhänge zwischen Klima, physikochemischen Meeresbedingungen, marinen Ökosystemen und Fischerei reicht nicht aus, um verlässliche Prognosen über die Reaktion der marinen Systeme auf

Klimaveränderungen abzugeben (ACIA, 2005; Kap. 2.7). Dennoch darf das unzureichende Wissen nicht als Grund für die Verzögerung von Schutz- oder Managementmaßnahmen dienen, sondern es muss gemäß des Vorsorgeprinzips auch unter Unsicherheit gehandelt werden. Dieses Vorsorgeprinzip ist bereits in der multilateralen Fischereipolitik verankert, z. B. im UN-Abkommen über wandernde Fischbestände.

2.6.1 Fischereimanagement

Für die nationalen und internationalen Institutionen ist es eine Herausforderung, mit der komplexen Gemengelage aus vielfältigen anthropogenen Einflüssen umzugehen, wie sie derzeit die Fischerei kennzeichnen, daraus Entscheidungen für nachhaltiges Management abzuleiten und diese nicht zuletzt auch vor Ort durchzusetzen. Bis heute kann die Situation nicht zufrieden stellen: Die seit Jahrzehnten bekannten und auf Weltkonferenzen wiederholten Aufforderungen zu einem nachhaltigen Umgang mit den Fischbeständen haben insgesamt gesehen (und mit wichtigen regionalen Ausnahmen) kaum zu einer Verbesserung der Situation geführt (Kap. 2.3). Die Hälfte der Fischbestände sind maximal ausgenutzt, ein Viertel als Folge von Überfischung bereits kollabiert (FAO, 2004). Illegale bzw. unregulierte Fischerei auf Hoher See ist trotz internationaler Bemühungen immer noch ein ungelöstes Problem (FAO, 2001). Diese bereits sehr schwierige Situation wird in Zukunft durch den Klimawandel verschärft. Zudem wurden durch neue Techniken die Grenzen des Machbaren in der Fischerei immer weiter hinausgeschoben, etwa durch das Auffinden von Fisch über stark verbesserte Sensorik und die Erreichbarkeit auch großer Tiefen und spezieller Bestände durch moderne Fangmethoden. Es gibt heute kaum noch einen Lebensraum im Meer, der für Fischereiaktivitäten unzugänglich ist.

Aus diesen Gründen ist Management der Fischgründe auf Grundlage des ökosystemaren Ansatzes und des Vorsorgeprinzips dringend geboten, um die Resilienz der Ökosysteme zu erhalten (Scheffer et al., 2001; Pikitch et al., 2004). Das Abkommen zu Erhaltung und Bewirtschaftung von wandernden Fischbeständen im Bereich der Hohen See basiert auf der Anwendung des Vorsorgeprinzips. Auch in den Konzepten der FAO (z. B. beim Code of Conduct for Responsible Fisheries; FAO, 1995) spielen Vorsorgeprinzip und Ökosystemschutz seit langem eine tragende Rolle. Die Meeresschutzstrategie der EU nennt den ökosystembasierten Ansatz als ein Schlüsselement (EU-Kommission, 2005), klammert aber dennoch die Fischereipolitik aus der Stra-

ategie aus. Zudem bleiben die vorgesehenen verbindlichen Vorgaben sehr vage, so dass die Effektivität der Strategie voraussichtlich weitgehend von der Umsetzung der Mitgliedsstaaten abhängen wird.

Die breite Durchsetzung nachhaltiger Fischereibewirtschaftung ist seit langem überfällig (Fujita et al., 2004). Die wissenschaftlichen und konzeptionellen Grundlagen liegen vor und wurden auf internationaler politischer Ebene wiederholt bekräftigt. Auch die rechtlichen Regelungen auf nationaler bzw. regionaler Ebene sind vielfach bereits ausreichend. So hat z. B. in der Europäischen Union die gemeinsame Fischereipolitik einen umweltpolitisch durchaus akzeptablen rechtlichen Rahmen erhalten. Es fehlt aber nach wie vor an der konsequenten Umsetzung, vor allem der Einhaltung der vom ICES wissenschaftlich empfohlenen Fangquoten sowie am raschen Abbau der Überkapazitäten (SRU, 2004). Es kann in diesem Kapitel nicht darum gehen, die ganze Problematik des weltweiten Fischereimanagements und seiner Unzulänglichkeiten zu behandeln. Es sollen vielmehr Empfehlungen abgeleitet oder bereits vorhandene bestärkt werden, die sich aus dem zusätzlichen Problem des Klimawandels und seiner Wirkungen auf die Fischerei ergeben.

- Der Paradigmenwechsel weg von der öffentlich finanzierten Überfischung (SRU, 2004) hin zu einer nachhaltigen Fischereiwirtschaft ist überfällig. Dazu sollten die Bemühungen zur Lösung der Hauptprobleme der marinen Fischerei, namentlich die Überkapazität der Fangflotten, destruktive Fischereipraktiken, exzessiver Beifang, überhöhte Fangquoten, illegale bzw. unregulierte Fischerei auf Hoher See, Habitaterstörung in Küstenökosystemen und Verschmutzung und Förderung der Kennzeichnung nachhaltiger Meeresprodukte (Labelling) dringend verstärkt werden. Die Umsetzung der auf dem Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung (WSSD) beschlossenen Ziele ist dafür eine wesentliche Messlatte.
- Der Abbau von Subventionen im Fischereisektor ist ein wirksames Mittel, um die Überfischung zu verlangsamen und langfristig zu stoppen. Schätzungen der weltweiten Fischereisubventionen gehen von jährlich 15–30 Mrd. US-\$ aus (Milazzo, 1998; Virdin und Schorr, 2001). Diese Subventionen sollten zurückgeführt werden, um damit die Anreize zur Übernutzung der Meere zu reduzieren. Gleichzeitig würden öffentliche Mittel freigesetzt, die u. a. auch in den Meeresschutz investiert werden können.
- Die jüngsten Anstrengungen im Rahmen der WTO zur Rückführung der Fischereisubventionen werden vom WGBU begrüßt. Dies gilt vor allem für Subventionen in den OECD-Ländern und insbesondere in der EU (SRU, 2004). Nega-

tive soziale und ökologische Auswirkungen eines Subventionsabbaus, die sich aus der Suche nach neuen Formen der Einkommenserzielung oder alternativen Naturnutzungen besonders in Entwicklungsländern ergeben können, sind zu prüfen und gegebenenfalls zu berücksichtigen. Ein zügiger und konsequenter Wechsel in der internationalen Subventionspolitik darf sich hierdurch aber nicht verzögern.

- Aufgrund der komplexen Interaktion vieler anthropogener und natürlicher Faktoren ist der von der Biodiversitätskonvention entwickelte und auf dem WSSD bestätigte integrierte ökosystemare Ansatz für Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Meere und ihrer lebenden Ressourcen von großer Bedeutung. Zum einen muss das Monitoring von Ozeanregimen und Ökosystemparametern (z. B. Indikatorarten) verbessert und zum anderen dieses Wissen über den Ökosystemzustand in die Beurteilung und das Management der kommerziell interessanten Fischbestände einbezogen werden (FAO, 2003).
- Der Vorsorgeansatz sollte konsequent zur Grundlage des Fischereimanagements werden. Insbesondere bei der Prognose der Bestandsentwicklung und der daraus abgeleiteten Berechnung der Fangquoten sollten Sicherheitsmargen berücksichtigt werden, die selbst im Falle eines durch Klimawandel verursachten Regimeübergangs gewährleisten, dass der für die Reproduktion erforderliche minimale Bestand nicht unterschritten wird und eine gesunde Alterstruktur der Population erhalten bleibt (King, 2005). Das Fischereimanagement muss in die Lage versetzt werden, auf einen Regimeübergang rechtzeitig mit angepassten Strategien zu reagieren (Polovina, 2005). Ein Beispiel für einen solchen Anpassungsbedarf ist die Kabeljaufischerei in der Nordsee (Kap. 2.3.1).
- Für das kurzfristige Management (1–5 Jahre) wird der vom Menschen verursachte Klimawandel zwar relativ geringe Auswirkungen haben, die interannuelle Variabilität und das Auftreten von Klimaereignissen wie dem El Niño können aber sehr große Effekte auslösen (Barber, 2001). Die Erfassung und Prognose dieser Faktoren ist eine wichtige Forschungsaufgabe.
- Die Rolle des künftigen Klimas wird derzeit bei der Entwicklung mittelfristiger Managementstrategien (5–25 Jahre) meist ignoriert, weil sie entweder als vernachlässigbar angesehen oder für nicht vorhersagbar gehalten wird. Da in diesem Zeitraum der Klimawandel die Bestandsrekrutierung und -verteilung bereits erheblich beeinflussen kann, wird es notwendig werden, diese Effekte in das Fischereimanagement einzubeziehen. Die

Wirkungen von Klimavariabilität und -ereignissen auf Fischbestände können derzeit lediglich im Nachhinein analysiert werden. Angesichts des bereits sichtbaren Klimawandels sollte künftig Prognosekapazität aufgebaut und in Form von Risikoanalysen berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für empfindliche Populationen am Rande ihres Verbreitungsgebiets.

- Bei der Weiterentwicklung der Modelle, die als Grundlage für Quotenfestlegungen dienen, sollte der Weg von der Analyse und Modellierung einzelner, kommerziell interessanter Fischpopulationen hin zu ökosystembasierten Modellen führen, die auch die dynamischen Interaktionen zwischen Klima, Ozean und marinen Ökosystemen berücksichtigen (Pikitch et al., 2004). Statische Konzepte, die auf der Annahme unveränderter Umweltbedingungen beruhen, werden zunehmend zweifelhaft.
- Bei terrestrischen Ökosystemen ist die Aufteilung in Gebiete mit unterschiedlicher Nutzungsintensität eine seit langem etablierte Verfahrensweise zur Lösung von Nutzungskonflikten (WBGU, 2000). Auch für den Ozean wird die Zonierung im Rahmen mariner Raumplanungssysteme zunehmend als nützliches Instrument für nachhaltiges, ökosystembasiertes Fischereimanagement erkannt (Pauly et al., 2002; SRU, 2004; Pikitch et al., 2004; Boersma et al., 2004). Meeresschutzgebiete spielen als Bestandteil dieser marinen Raumplanung eine besondere Rolle, da sie im Konzert mit den anderen Maßnahmen ein wichtiges Instrument für die Umsetzung des ökosystemaren Ansatzes sind. Die Empfehlungen hierzu werden in Kapitel 2.6.2 eingehend behandelt.

2.6.2

Meeresschutzgebiete

2.6.2.1

Definition und Motivation

Klimawandel, Versauerung und Meeresspiegelanstieg werden auf die marine Umwelt erhebliche Wirkungen ausüben (Kap. 2.2–2.4). Dabei treffen diese „neuen“ anthropogenen Faktoren auf Meeressysteme, die durch Überfischung, Verschmutzung, invasive Arten und andere Einwirkungen durch den Menschen in vielen Regionen bereits erheblich geschwächt sind. Die Empfehlungen für ein verbessertes Fischereimanagement wurden in Kapitel 2.6.1 vorgestellt. Hier soll es um Meeresschutzgebiete (Marine Protected Areas, MPA) gehen, die – wie ihre Pendanten an Land – zu den wichtigsten Instrumenten

des Ökosystemschutzes zählen (IUCN, 1994; Kelleher, 1999; Murray et al., 1999).

Die IUCN definiert ein Meeresschutzgebiet als: „Gebiet innerhalb oder unterhalb des Gezeitenbereichs, einschließlich seiner darüberliegenden Wassersäule und der dazugehörigen Flora, Fauna sowie historischen und kulturellen Werte, das gesetzlich oder durch andere wirksame Mittel in seiner Gesamtheit oder in Teilen geschützt wird“ (eigene Übersetzung nach IUCN, 1988).

MPA spielen im Meeresschutz eine besondere Rolle, da sie eines der direkten und am einfachsten anwendbaren Instrumente für den ökosystemaren Ansatz sind (Royal Commission on Environmental Pollution, 2004). Sie können zwar weder den Klimawandel oder die Versauerung aufhalten, noch die Einwanderung nicht heimischer Arten verhindern oder weitwandernde Arten vollständig schützen. Aber sie sind ein wichtiges Instrument, um einerseits die Resilienz und Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme zu verbessern und andererseits anthropogene Faktoren wie Überfischung oder Habitatzerstörung in ihren Grenzen durch Management oder Verbote einzudämmen (z. B. Mumby et al., 2006). So sind MPA z. B. die wichtigsten Instrumente beim Umgang mit Korallenbleichen, da hierdurch zwar nicht die eigentliche Ursache bekämpft, aber die allgemeine Widerstandsfähigkeit der Riffe erhöht werden kann (Grimsditch und Salm, 2005). Die wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Resilienz und anthropogenem Einfluss sowie biologischer Vielfalt müssen allerdings noch verbessert werden (Kap. 2.7). Für den Küstenschutz sind naturnahe Ökosysteme ebenfalls von Bedeutung: Beispielsweise konnte der asiatische Tsunami vom 26. Dezember 2004 an den Stellen, wo die Mangroven bzw. Korallen zerstört worden waren, viel weiter ins Land vordringen als andernorts (Danielsen et al., 2005; Fernando und McCulley, 2005). Geschützte Küstenökosysteme sind daher auch ein wichtiges Element von Anpassungsstrategien gegenüber dem Klimawandel (Kap. 3.4.1).

Zusätzlich zum Ökosystemschutz können MPA auch als Instrument des Fischereimanagements für die Erhaltung kommerzieller Fischbestände von Nutzen sein, z. B. wenn das traditionelle Management versagt und Überfischung ausgelöst hat, oder um gegen künftige derartige Fehler abzusichern (Bohnsack, 1998; Pauly, et al., 2002; Gell und Roberts, 2003). Selbst bestandserhaltende Fischerei kann eine Reihe negativer Effekte für marine Ökosysteme haben, was sich durch die Einrichtung von MPA mildern lässt (Palumbi, 2003). Auch können MPA Fischarten, die nicht unter Monitoring oder Management stehen, aber dennoch gefangen werden, einen Rückzugsraum geben. Küstenökosysteme und Ästuar-

sind zudem wichtig, um Kinderstuben vieler Fischarten gegen Klimavariabilität zu schützen (Attrill und Power, 2002). MPA sollten im Zusammenhang mit den traditionellen Instrumenten des Fischereimanagements gesehen werden, u. a. da durch die Einrichtung eines großflächigen Netzwerks von MPA die Quotenfestlegungen betroffen sein können, wenn sich Fischereiaktivitäten auf die Gebiete außerhalb der MPA beschränken müssen (Hilborn, 2003).

Auch im marinen Bereich gibt es eine abgestufte Reihe von Schutzkategorien. Sie reicht von totalem Schutz (marine Reservate mit dem Verbot extraktiver Nutzung) bis zu Gebieten, die vornehmlich der Aufrechterhaltung der nachhaltigen Nutzung mariner Ressourcen oder ihrer traditionellen Nutzung dienen (IUCN, 1994). Eine besondere Ausprägung der MPA sind Gebiete, die für die Fischerei geschlossen sind (No-take Areas). Häufig sind unterschiedliche Schutzkategorien angrenzend angeordnet, mit Kernzonen unter Totalschutz und Randzonen mit geringeren Nutzungsbeschränkungen (Agardy et al., 2003). Die Effektivität von Meeresschutzgebieten kann verbessert werden, wenn sie in den Rahmen eines Schutzgebietssystems gestellt werden, der ökologische Repräsentativität und Vernetzung sicherstellen soll.

Auch wenn es noch Unstimmigkeiten über das optimale Design und Management von Meeresschutzgebieten gibt (NRC, 2001), besteht doch weitgehend Konsens darüber, dass adaptives Management, die Verknüpfung einzelner MPA zu Schutzgebietssystemen, Partizipation bzw. Komanagement sowie eine integrierte Betrachtung der Beziehungen zwischen MPA und der intensiver genutzten Flächen außerhalb wichtige Punkte bei Gestaltung und Management von MPA sind.

2.6.2.2 Internationale politische Zielsetzungen

Wegen dieses doppelten Nutzens von Meeresschutzgebieten für den Ökosystemschutz einerseits und als Instrument für das Fischereimanagement andererseits (Lubchenko et al., 2003) schlägt der WBGU als Leitplanke vor, 20–30% des Meeres als ein vernetztes System von MPA auszuweisen (Kap. 2.5.1). Der derzeitige Anteil der geschützten Fläche liegt nur bei weniger als 1% der marinen Habitate. Der Nachholbedarf ist also sehr groß und hat erst in jüngster Zeit zu einer Vielzahl politischer Zielsetzungen geführt:

- Auf dem WSSD hat sich die Weltgemeinschaft zum Ziel gesetzt, bis 2012 ein ökologisch repräsentatives und gut geführtes Netzwerk von Meeresschutzgebieten einzurichten (WSSD, 2002).

- Der World Parks Congress hat diese Zielsetzung 2003 bestätigt und durch die Empfehlung konkretisiert, mindestens 20–30% jedes marinen Habitats streng zu schützen (WPC, 2003a).
- Die Biodiversitätskonvention hat im Rahmen seines Arbeitsprogramms für Schutzgebiete das WSSD-Ziel für MPA aufgegriffen, wenn auch ohne konkrete Flächenangabe (CBD, 2004a).
- Ein regionales Beispiel ist die OSPAR/HELCOM-Konvention, die sich ebenfalls zum Ziel gesetzt hat, bis 2010 ein gut geführtes und ökologisch kohärentes marines Schutzgebietssystem zu schaffen (OSPAR, 2003).

2.6.2.3

Völkerrechtliche Ausgangslage

Das Konzept von MPA oder verwandter Begriffe wird zwar in den verschiedenen internationalen Konventionen verwendet, allerdings erfolgt dies uneinheitlich und ist insofern noch konkretisierungsbedürftig (Agardy et al., 2003). Die politischen Zielsetzungen ordnen sich in folgenden völkerrechtlichen Rahmen ein:

- Die Biodiversitätskonvention – deren Zielsetzungen sich auch auf die marinen Ökosysteme erstrecken – sieht Schutzgebiete als Maßnahme für die In-situ-Erhaltung vor (Art. 8 Bst. a).
- Das Seerechtsübereinkommen (UNCLOS) erwähnt besondere Schutzgebiete explizit lediglich in folgendem Zusammenhang: Art. 211 Abs. 6 ermöglicht im Zusammenhang mit Maßnahmen gegen die Verschmutzung des Meeres durch die Schifffahrt eine Verschärfung des Schutzes durch die Bezeichnung besonderer Schutzgebiete. Der Küstenstaat, der von dieser Bestimmung Gebrauch machen will, kann gegenüber der zuständigen Internationalen Seeschifffahrtsorganisation (International Maritime Organization, IMO) ein Gebiet innerhalb seiner ausschließlichen Wirtschaftszone bezeichnen und beantragen, die IMO möge die besondere Schutzbedürftigkeit des Gebiets bestätigen. Dies kann mit den ozeanographischen und ökologischen Verhältnissen dieses Gebiets begründet werden, mit dessen Nutzung oder dem Schutz der Ressourcen. Die besonderen Maßnahmen beschränken sich unter dieser Bestimmung allerdings auf solche zur Verhütung der Verschmutzung durch Schiffe.
- Weiter finden sich in verschiedenen Abkommen aus dem Bereich des völkerrechtlichen Meeresschutzes Begriffe bzw. Konzepte, die eine ähnliche Zielsetzung wie MPA verfolgen. So ermöglicht das Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe (MARPOL-Kon-

vention) die Einrichtung von „Particularly Sensitive Sea Areas“ (PSSA); hier ist der Zweck der Schutzgebiete der Schutz vor Verschmutzung durch Schiffe in besonders fragilen, entsprechend auszuweisenden Gebieten. Weitere Beispiele sind das Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR-Übereinkommen) sowie das Mittelmeerübereinkommen, die jeweils einen spezifischen Anhang (OSPAR) bzw. ein besonderes Protokoll (Mittelmeerübereinkommen) zur Einrichtung von „Specially Protected Areas“ enthalten. Die IMO hat in einer Resolution (A.885 (21)) Verfahren für die Einrichtung von PSSA benannt (Hohmann, 2001).

Die Voraussetzungen für die Einrichtung von Schutzgebieten sind je nach Meereszone unterschiedlich. Die vom Völkerrecht gezogenen Grenzen hängen also primär davon ab, in welcher Meereszone im konkreten Fall ein Schutzgebiet ausgewiesen werden soll (Kasten 2.6-1; Proelß, 2004).

- Bei inneren Gewässern und dem Küstenmeer kann der Küstenstaat grundsätzlich frei über die Einrichtung von MPA entscheiden. Eine gewisse Relativierung ist hier nur in Bezug auf Beschränkungen der Schifffahrt zu beachten (Kasten 2.6-1).
- Vergleichbar ist die Rechtslage im Bereich der ausschließlichen Wirtschaftszone (Exclusive Economic Zone, EEZ). Die UNCLOS erkennt dem Küstenstaat in dieser Meereszone einzelne Souveränitätsrechte zu, welche sich auf die Nutzung und den Schutz der lebenden und nicht lebenden natürlichen Ressourcen der betreffenden Meereszone mitsamt des dazugehörigen Meeresbodens und dessen Untergrunds beziehen. In Bezug auf die Errichtung von MPA bedeutet dies, dass der Küstenstaat insofern frei ist, als damit eine Beschränkung der Nutzung der natürlichen Ressourcen angestrebt wird. Allerdings darf die Einrichtung von MPA in dieser Zone u. a. die friedliche Durchfahrt fremder Schiffe nicht beeinträchtigen (Kasten 2.6-1).
- Auf Hoher See schließlich ist die Einrichtung von MPA nicht grundsätzlich ausgeschlossen (Proelß, 2004), bringt aber rechtliche Probleme mit sich, (Platzöder, 2001; Warner, 2001), die in Kapitel 2.6.2.4 erörtert werden
- Im Gegensatz zu regional begrenzten Abkommen (z. B. OSPAR-Übereinkommen, Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets – Helsinki-Übereinkommen, Mittelmeerübereinkommen) gibt es derzeit kein globales völkerrechtliches Instrument, das die Einrichtung von grenzüberschreitenden MPA besonders fördert bzw. die Staaten hierzu verpflichtet.

Kasten 2.6-1

Ordnung der Meereszonen im Völkerrecht

Das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (UNCLOS) gibt die völkerrechtlichen Grundsätze vor, welche für die Abgrenzung der Meereszonen gelten, was auch für die Einrichtung von MPA relevant ist. Kurz zusammengefasst sieht die Ordnung der Meereszonen folgendermaßen aus (Abb. 2.6-1):

- **Hohe See:** Als „Hohe See“ sind gemäß Art. 86 und 89 UNCLOS jene Meeresgebiete zu verstehen, die frei von staatlicher Souveränität und Hoheitsgewalt sind und insofern einen „Raum unter internationaler Verwaltung“ bilden. Es gilt hier der Grundsatz der Freiheit der Hohen See. Letztere umfasst im Wesentlichen die Freiheit der Schifffahrt, des Überflugs, der Verlegung unterseeischer Kabel und Rohrleitungen, der Errichtung künstlicher Inseln und anderer Anlagen, der Fischerei sowie der wissenschaftlichen Forschung. Diese Freiheiten gelten für alle Staaten, auch Binnenländer. Im Bereich der Hohen See sind demnach einzelne Staaten in keiner Weise befugt, in eigener Regie irgendwelche Nutzungsbeschränkungen mit Geltung für andere Staaten festzulegen. Auch internationale Vereinbarungen zwischen einzelnen Staaten können immer nur die betreffenden Staaten selbst binden, nicht aber Drittstaaten.

Von der Hohen See sind jene Bereiche des Meeres abzugrenzen, die abgestuften territorialen Hoheitsrechten der Küstenstaaten unterliegen. Entsprechende Meereszonen

mit unterschiedlichen küstenstaatlichen Hoheitsrechten sind gemäß Art. 86 UNCLOS:

- **Ausschließliche Wirtschaftszone (Exclusive Economic Zone, EEZ):** Hier beginnt – in Abgrenzung zur Hohen See – die Möglichkeit des Küstenstaats, Hoheitsrechte auszuüben, die sich aus territorialen Ansprüchen ergeben. Die entsprechenden Souveränitätsrechte sind allerdings insofern eingeschränkt, als sie sich lediglich auf die Nutzung und den Schutz der lebenden und nicht lebenden natürlichen Ressourcen der betreffenden Meereszone mitsamt des dazugehörigen Meeresbodens und dessen Untergrunds beziehen.
- **Festlandsockel:** Auch dieser Begriff bezieht sich auf die Ausbeutbarkeit von natürlichen Ressourcen, hier allerdings spezifisch des küstennahen Meeresbodens und des Meeresuntergrunds. So übt der Küstenstaat zufolge Art. 77 Abs. 1 und 2 UNCLOS über den Festlandsockel in ausschließlicher Weise souveräne Rechte zum Zweck der Erforschung und der Ausbeutung der natürlichen Ressourcen aus. Der für die Nutzung des Festlandsockels geltende Ressourcenbegriff ist allerdings im Vergleich zur ausschließlichen Wirtschaftszone eingeschränkt (nicht lebende Ressourcen des Meeresbodens und dessen Untergrunds sowie „unbewegliche“ Lebewesen).
- **Küstenmeer:** Hier beschränken sich die besonderen Rechte des Küstenstaats nicht mehr nur auf die Nutzung der Meeresressourcen, sondern kommen einer eigentlichen territorialen Souveränität gleich.
- **Binnengewässer:** Hier erreichen die Souveränitäts- und Hoheitsrechte des Küstenstaats ihre weitestgehende Ausdehnung. Diese Meereszone bildet einen Bestandteil des Staatsgebiets.

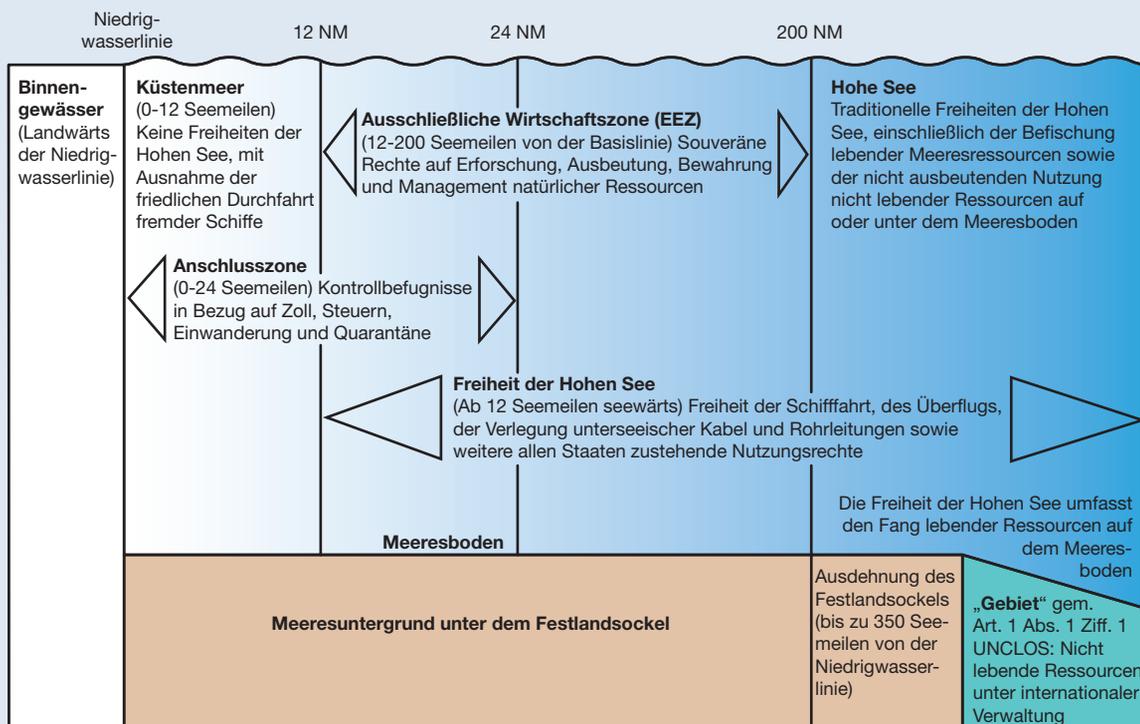


Abbildung 2.6-1

Ordnung der Meereszonen nach dem Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen (UNCLOS). Nautische Meile = NM = Seemeile (1 NM = 1,852 km).

Quelle: Gorina-Ysern et al., 2004

2.6.2.4

Meeresschutzgebiete auf Hoher See

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Einrichtung von Meeresschutzgebieten auf Hoher See weisen erhebliche Mängel auf (CBD, 2005a). Die regionalen (bereichsübergreifenden) seerechtlichen Übereinkommen betreffen lediglich sehr begrenzte Teile der Meeresgebiete außerhalb nationaler Hoheitszonen, so dass weite Bereiche der Weltmeere nicht abgedeckt sind. Zudem beschränken sich bestehende regionale Regime zum Fischereimanagement auf bestimmte befischte Arten, etwa Thunfisch, während nicht intensiv befischte Arten ausgeblendet sind; auch ist der ökosystemare Ansatz in diesen Regimen nur mangelhaft entwickelt.

Laut Seerechtsübereinkommen gilt der völkerrechtlich zwingende (d. h. nicht grundsätzlich einschränkbare) Grundsatz der Schifffahrtsweltfreiheit (Art. 87 UNCLOS). Die Einrichtung von MPA auf Hoher See, die den Schiffsverkehr unterbinden oder begrenzen sollen, fällt damit außer Betracht. Zudem können Staaten Vereinbarungen über die Einrichtung von MPA auf Hoher See nicht zu Lasten uneteiligter Drittstaaten abschließen. Eine entsprechende Verpflichtungsvereinbarung unter jenen Staaten, die in einer bestimmten Region die hauptsächlichlichen Nutzer der Hohen See sind, hat somit keine bindende Wirkung für Drittstaaten. Zur sogenannten Freiheit der Hohen See gehört u. a. weiter das grundsätzliche Recht eines jeden Staats, auf Hoher See die Meeresressourcen zu nutzen (z. B. Fischfang). Im Gegensatz zur Schifffahrtsweltfreiheit gilt dieser Anspruch jedoch nicht uneingeschränkt, und entsprechend gibt es bereits eine Anzahl internationaler Konventionen, welche die Nutzung lebender Meeresressourcen insbesondere in Bezug auf bestimmte Arten auch auf Hoher See Regeln unterwerfen. Beispiele sind das Verbot der Befischung anadromer Arten (Fische, die im Süßwasser laichen und im Meerwasser leben, z. B. der Lachs) auf Hoher See gemäß Art. 66 Abs. 3 Bst. a UNCLOS oder die Walschutzgebiete im Rahmen des Übereinkommens zur Regelung des Walfangs (Gerber et al., 2005).

Aufgrund drängender Probleme, etwa der zunehmenden Zerstörung empfindlicher unterseeischer Strukturen mit besonders hoher biologischer Vielfalt durch Fischereiaktivitäten (z. B. „seamounts“ oder Kaltwasserkorallenriffe; UNGA, 2004; CBD, 2004b) und dem Ausmaß illegaler bzw. unregulierter Fischerei (FAO, 2001), ist es notwendig, dass Lösungen für den Meeresschutz auf Hoher See schnell gefunden und umgesetzt werden. Angesichts des deutlichen Willens der internationalen Gemeinschaft, Meeresschutzgebiete als Instrument intensiver zu nutzen, besteht konkreter Handlungsbedarf, MPA auf Hoher

See völkerrechtlich besser zu verankern. Folgende konkrete Anforderungen sind an ein zu entwickelndes Regime zu Schutzgebieten auf Hoher See zu stellen (CBD, 2005a):

- Über den artenspezifischen oder regionalen Ansatz hinaus muss eine integrierte Vorgehensweise erreicht werden, welche auch auf Hoher See eine großräumige Vernetzung des Schutzes mariner Ökosysteme ermöglicht. Dabei sollte es einen offenen Zugang zu den Meeresschutzgebieten auf Hoher See für Forschungszwecke geben, sofern dies nicht dem Schutzzweck zuwider läuft.
- Angesichts des Problems der illegalen bzw. unregulierten Befischung der Hohen See – das mangels territorialer hoheitlicher Durchsetzungsgewalt in dieser Meereszone nicht von Einzelstaaten angegangen werden kann – sind Mechanismen zur Durchsetzung allfälliger Schutzpflichten auf Hoher See ins Auge zu fassen (Platzöder, 2001; Warner, 2001).
- Angesichts der Notwendigkeit großräumiger Vernetzung ist darauf hinzuwirken, dass die Einrichtung von MPA auf Hoher See – anders als bisher im Rahmen der jeweiligen spezifischen Konventionen geschehen – koordiniert erfolgt (CBD, 2005b).

2.6.2.5

Verhandlungsprozesse

Auf globaler Ebene wird derzeit vor allem in zwei parallelen politischen Prozessen über MPA verhandelt:

- In der Biodiversitätskonvention stehen in einer Arbeitsgruppe zu Schutzgebieten auch die MPA auf der Tagesordnung, was Schutzgebiete außerhalb der nationalen Hoheitsgebiete mit einschließt. Die Versuche, konkrete Gebiete auf der Hohen See zu vereinbaren, die für MPA geeignet sind, bzw. eine konkrete Zielsetzung, 5–10 MPA auf Hoher See bis 2008 auszuweisen, scheiterten bisher allerdings am Widerstand weniger Fischereinationen (z. B. Island, Norwegen, Neuseeland).
- 2004 wurde eine informelle Arbeitsgruppe der Generalversammlung der Vereinten Nationen gegründet (UNGA, 2004), die ein breites Mandat bezüglich der Erhaltung biologischer Vielfalt außerhalb der nationalen Hoheitsgebiete hat und im Februar 2006 erstmals getagt hat. Obwohl die Positionen der Ländergruppen zu MPA auf Hoher See noch weit auseinander liegen, wird von vielen Staaten Handlungsbedarf angesichts der völkerrechtlichen Lücke gesehen.

2.6.2.6 Handlungsempfehlungen für Meeresschutzgebiete

Bei aller Bedeutung der Meeresschutzgebiete darf der Meeresnaturschutz dennoch nicht auf dieses Instrument reduziert werden. Die Einhaltung der ökologischen Leitplanke (20–30% der Meeresökosystemfläche unter Schutz; Kap. 2.5) ist zwar für den Schutz der Meeresumwelt unabdingbar, aber auch die Flächen außerhalb der MPA müssen auf Basis des ökosystemaren Ansatzes nachhaltig bewirtschaftet werden. Eine besonders wichtige Voraussetzung für den Erfolg von MPA ist die dringend gebotene Durchsetzung einer nachhaltigen Fischereiwirtschaft (Kap. 2.6.1). Eine andere Voraussetzung ist die Einhaltung der Klimaschutz- und der Versauerungsleitplanke (Kasten 7-1), ohne die auch ein ausgezeichnetes Schutzgebietssystem den Großteil seiner Wirkung einbüßt. Zudem reicht es nicht aus, MPA zu planen, auszuweisen und sinnvoll untereinander zu vernetzen, sie müssen auch gut geführt und angemessen finanziell ausgestattet sein. Nur so besteht eine Chance, auch für die Meeresökosysteme das internationale Ziel einzuhalten, die Verlustrate der biologischen Vielfalt bis 2010 signifikant zu verringern.

INTERNATIONALE ZIELE UMSETZEN

- Die Wachstumsrate der MPA-Fläche ist mit 3–5% pro Jahr derzeit viel zu niedrig, um bei einem derzeitigen Stand von unter 1% die international vereinbarten Ziele rechtzeitig erreichen zu können (Wood et al., 2005). Hier müssen die Anstrengungen deutlich verstärkt werden.
- Die MPA sollten groß genug und untereinander in Schutzgebietssystemen vernetzt sein, eine Zonierung unterschiedlicher Nutzungsformen und -intensitäten beinhalten und in ein integriertes Management der umliegenden Schelf- und Küstengebiete eingebunden sein. Zudem sollten sie als flexible und lernfähige Instrumente konzipiert werden, da der Klimawandel zu einer Neugestaltung zwingen kann, wenn sich Ökosystemprozesse ändern bzw. verlagern (Soto, 2002). Die Verbesserung der wissenschaftlichen Grundlagen sollten dabei parallel zum aktuellen Management erfolgen. Adaptive Managementstrategien und Flexibilität angesichts schwer zu prognostizierender lokaler Wirkungen des Klimawandels sind entscheidend.
- Im Küstenmeer und in den EEZ können die Staaten ohne völkerrechtliche Probleme bereits beginnen, die internationalen Ziele umzusetzen. Sowohl die EU-Habitat- als auch die Vogelschutz-Richtlinie sind in der EEZ voll anwendbar. In Deutschland ist dies auch bereits geschehen: Im Rahmen von NATURA 2000 wurden ca. 30% des

deutschen Meeresanteils an der EEZ als Schutzgebiete bei der EU-Kommission in Brüssel gemeldet. Allerdings ist eine Einschränkung der Fischerei bisher nicht ohne weiteres möglich, da hier die Kompetenzen der EU greifen. MPA sollten als Instrument der nachhaltigen Fischereiwirtschaft wirksamer genutzt werden, etwa durch dauerhafte oder zeitweilige Beschränkungen der Fischerei in Schutzgebieten (SRU, 2004).

- Besonders in Entwicklungsländern besteht großer Nachholbedarf. Es gibt dort nicht nur zu wenige MPA, darüber hinaus sind die ausgewiesenen Schutzgebiete vielfach nur „Papierparks“, in denen ein effektiver Schutz nicht durchgesetzt wird oder werden kann. Die Entwicklungszusammenarbeit sollte daher einen Schwerpunkt auf die Einrichtung und Betreuung von MPA setzen. Dabei sollten sowohl Schutzgebietsspezialisten als auch Fischereivertreter zusammenarbeiten und die lokale Bevölkerung bei Planung und Management mit einbezogen werden.

FINANZIERUNG SICHERSTELLEN

Aus dem Unterschied zwischen der Leitplanke für Meeresökosystemschutz (20–30% der Fläche) und dem derzeitigen Schutzstatus (weniger als 1% der Fläche; Kap. 2.5.2) ergibt sich ein erheblicher zusätzlicher Finanzierungsbedarf. Balmford et al. (2004) kommen zu dem Ergebnis, dass ein Flächenschutz in dieser Größenordnung mit jährlichen Kosten von 5–19 Mrd. US-\$ verbunden ist. Dies schließt einmalige Implementierungskosten und laufende Kosten ein. Indirekte Kosten, die z. B. Fischereiunternehmen durch den Nutzungsausschluss entstehen, sind in diesen Zahlen allerdings nicht enthalten.

- Der WBGU sieht die Verantwortung für ein kostendeckendes Management von Meeresschutzgebieten bei den nationalen Regierungen und der internationalen Gebergemeinschaft. Bisher gelang es häufig nicht, Finanzmittel im ausreichenden und dauerhaften Maße bereitzustellen: Die Zahlungen von öffentlichen Geldgebern sind oft gering und unterliegen konkurrierenden Verwendungen. Dies gilt auch für internationale Transferzahlungen wie sie durch die Globale Umweltfazilität (GEF) oder durch Geber im Rahmen der bilateralen Entwicklungszusammenarbeit geleistet werden (OECD, 2002; GEF, 2005a). Die öffentlichen Geldgeber sind aufgefordert, zusätzliche Anstrengungen für eine ausreichende und nachhaltige Mittelbereitstellung zu unternehmen. Einen ergänzenden Beitrag können Instrumente wie Nutzungsentgelte oder die Förderung privater Spendentätigkeit für Schutzmaßnahmen leisten (Emerton, 1999; Morling, 2004).

HOCHSEESCHUTZGEBIETE: VÖLKERRECHTLICHE LÜCKEN SCHLIESSEN

Die laufenden politischen Verhandlungsprozesse zur Entwicklung eines Instruments zu Einrichtung und Management von Schutzgebieten auf der Hohen See sind zu begrüßen und sollten von der Bundesregierung mit Nachdruck unterstützt werden. Grundlage hierfür ist die UNCLOS. Auch wenn dessen Schwerpunkt auf den Regeln zur Nutzung und weniger auf dem Schutz und der Bewahrung von Meeresressourcen liegt, setzt es letztlich auch den rechtlichen Rahmen für den Schutz der Meeresumwelt (Platzöder, 2001). Seine grundlegende Änderung stellt keine politische Option dar, aber eine moderate Ergänzung des Seerechts scheint politisch wie auch rechtlich machbar, wobei folgende Optionen in Frage kommen:

- Im Vordergrund steht die Entwicklung eines multilateralen Abkommens über die Einrichtung von Schutzgebieten und entsprechenden Systemen auf Hoher See, das – als Zusatzprotokoll oder ergänzende Konvention – an die UNCLOS angebunden ist. Für diese Vorgehensweise besteht bereits das Beispiel des an die UNCLOS angebandenen Abkommens über die Erhaltung und Bewirtschaftung gebietsübergreifender Fischbestände und Bestände weit wandernder Fische, welches hauptsächlich die Nutzung der betreffenden Fischarten außerhalb nationaler Hoheitszonen betrifft.
- Die genannten Überwachungs- und Koordinationsaufgaben würden sinnvollerweise dem gleichen, noch zu schaffenden internationalen Regime anvertraut. Rechtlich wäre der Mechanismus primär im erwähnten seerechtlichen Abkommen festzuschreiben. In die richtige Richtung geht hier der Vorschlag zur Einrichtung einer Global Oceans Commission, der anlässlich des ersten internationalen Kongresses zu Meeresschutzgebieten vom Oktober 2005 in Geelong (Australien) gemacht wurde.
- Auch die Biodiversitätskonvention (CBD) sollte entsprechend ergänzt bzw. ausgebaut werden, wobei allerdings Überschneidungen zu vermeiden sind. Die CBD hat im Bereich des Schutzes biologischer Vielfalt ein erhebliches Maß an fachlicher Kompetenz aufgebaut, so dass sie – etwa durch fachliche Zuarbeit – in die UNCLOS-Verhandlungsprozesse eingebunden werden sollte. Zugleich sollten Funktion und Kompetenzen des neuen Regimes von der CBD explizit anerkannt werden. Dazu sollten die relevanten CBD-Verhandlungsprozesse gestärkt werden mit dem Ziel, der CBD eine vorrangige Bedeutung bei der inhaltlichen Ausgestaltung der MPA auf Hoher See zu sichern, z. B. bei den Kriterien für ihre Auswahl oder bei den Instrumenten. Zur Unterstüt-

zung grenzübergreifender Schutzbemühungen sollte geprüft werden, ob auf Grundlage der Ergebnisse der laufenden Arbeitsgruppe mittelfristig die Entwicklung eines Schutzgebieteprotokolls zur CBD sinnvoll ist. Dies sollte die gesamte Palette der Schutzgebiete umfassen und sich nicht auf MPA beschränken.

- Die informelle Arbeitsgruppe der Generalversammlung der Vereinten Nationen über marine biologische Vielfalt außerhalb der nationalen Hoheitsgebiete hat einen ersten Schritt getan, die völkerrechtliche Lücke bei MPA auf Hoher See zu schließen. Die Bundesregierung sollte bei der nächsten UN-Generalversammlung darauf dringen, diese gute Grundlage zu nutzen, um die Fortführung des Verhandlungsprozesses sicherzustellen.

2.7 Forschungsempfehlungen

FORSCHUNG ZU KLIMAFAKTOREN

- *Verhalten von Meereis:* Die Möglichkeiten des Monitorings insbesondere von Veränderungen der Dicke des arktischen Meereises sind noch ungenügend, und die Modelle zur Simulation des Meereises müssen weiter entwickelt werden, damit die künftige Entwicklung des Eises besser abgeschätzt werden kann.
- *Verhalten von Kontinentaleis:* Die Zukunft des grönländischen Eisschildes wird wahrscheinlich für die künftige Entwicklung der Meeresströme im Atlantik entscheidend sein. Es muss insbesondere die Fähigkeit erheblich verbessert werden, die Dynamik von Kontinentaleismassen zu modellieren.
- *Stabilität der Atlantikzirkulation und Risiko von Strömungsänderungen:* Klimamodelle divergieren noch erheblich in ihren Aussagen zur künftigen Stabilität der Meeresströmungen. Die Gründe liegen zum Teil in ungenügend verstandenen internen ozeanischen Prozessen (etwa der Vermischung) als auch in schwer quantifizierbaren Wechselwirkungen mit anderen Klimakomponenten (z. B. Süßwasserbudget des Nordatlantik). Sowohl durch Beobachtungen als auch weitere Anstrengungen bei der Modellierung können hier die Unsicherheiten verringert werden.

FORSCHUNG ZU MARINEN ÖKOSYSTEMEN, FISCHEREI UND MEERESSCHUTZGEBIETEN

- *Monitoring:* Vor allem bei der Nährstoffsituation und beim Plankton (insbesondere Zooplankton) sind Beobachtungsdaten über große Meeresgebiete und Zeiträume von erheblicher Bedeutung.

Da sie u. a. wichtige Inputs für die Modellierung mariner Ökosysteme liefern, sollten entsprechende Monitoringvorhaben (z. B. mit dem Continuous Plankton Recorder) unterstützt werden.

- *Systemverständnis*: Über Struktur und Dynamik mariner Ökosysteme ist zu wenig bekannt, um die Wirkungen des Klimawandels zuverlässig einzuschätzen. Die Bedeutung von Temperatureffekten auf die Primärproduktion, die Auswirkungen des Rückgangs des Meereises oder die Entkopplung trophischer Ebenen durch unterschiedliche Reaktionen von Arten auf den Klimawandel (z. B. Wanderung, Anpassung) sind Beispiele hierfür. Es sollten vermehrt ökosystembasierte Forschungsansätze verwendet werden, um das Verständnis der Zusammenhänge zwischen anthropogener Störung, biologischer Vielfalt und Resilienz mariner Ökosystemen zu verbessern und in neue Ökosystemmodelle einfließen zu lassen. Die internationalen Forschungsprojekte GLOBEC und das neue IMBER haben hierzu detaillierte Themenkataloge erarbeitet (GLOBEC, 1999; IMBER, 2005). Diese interdisziplinären Forschungsansätze sollten seitens der nationalen Forschungsförderung verstärkt voran getrieben werden.
- *Modellierung mariner Ökosysteme*: Um die Auswirkungen veränderter Klimafaktoren (Temperatur, Wind- und Strömungsmuster usw.) auf marine Ökosysteme besser zu verstehen, muss das Wissen über die verschiedenen Ökosystemkomponenten in verbesserte Ökosystemmodelle integriert und mit aktuellen Klima/Ozeanmodellen gekoppelt werden.
- *Verbesserung der Grundlagen des Fischereimanagements*: Zur Umsetzung des ökosystemaren Ansatzes im Fischereimanagement sollte die Entwicklung der Modelle von der Betrachtung einzelner Fischarten und der Annahme konstanter Umweltbedingungen hin zur umfassenderen Ökosystemmodellierung gehen. Hierzu sollten auch qualitative Modelle unter Einbezug des Expertenwissens über dynamische Systemprozesse genutzt werden (Kropp et al., 2005). Besonderes Augenmerk verdient die Dynamik von Fischpopulationen bei natürlicher Klimavariabilität und anthropogenem Klimawandel sowie die sozioökonomischen Folgen und mögliche Anpassungsmaßnahmen.
- *Design und Management von Meeresschutzgebieten*: Die theoretische Basis des Designs von Meeresschutzgebieten sollte vom Studium einzelner Arten hin zu Multispezies- und Ökosystemansätzen entwickelt werden. Insbesondere ist die Verknüpfung von MPA untereinander und mit nachhaltigen Nutzungskonzepten der umliegenden Küsten- und Meeresgebiete von Bedeutung.

Die Gestaltung von MPA angesichts des Klimawandels und des Potenzials zur Anpassung birgt viele offene Fragen. Im Sinne des adaptiven Managements müssen Forschungs- und Monitoringaspekte bei Design und Management von MPA besser berücksichtigt werden. Die Grundlagen zu Definition von Leitplanken bzw. Flächenzielen sollte verbessert werden, insbesondere des Flächenanteils, der streng geschützt werden sollte (No-take Areas). Außerdem gibt es Bedarf an verstärkter Begleitforschung zu partizipativen Ansätzen (z. B. „community-based management“) und Nutzung traditionellen Wissens sowie zum Einbezug von Managementenerfahrungen der lokalen Bevölkerung.

3.1 Klimafaktoren

3.1.1 Anstieg des Meeresspiegels

3.1.1.1 Lehren aus der Erdgeschichte

Ein Anstieg des Meeresspiegels gehört zu den physikalisch unausweichlichen Folgen der globalen Erwärmung. Einen engen Zusammenhang zwischen Temperatur und Meeresspiegel zeigt auch die Klimageschichte. Auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit (vor rund 20.000 Jahren) lag der Meeresspiegel ca. 120 m niedriger als heute und das Klima war global ca. 4–7°C kälter. Während der letzten Warmperiode dagegen, dem Eem (vor 120.000 Jahren), war das Klima geringfügig wärmer als heute (ca. 1°C), der Meeresspiegel aber wahrscheinlich mehrere Meter höher: Schätzungen variieren von 2–6 m (Oppenheimer und Alley, 2004). Geht man Jahrtausende in der Erdgeschichte zurück, findet man noch wärmere Klimaepochen. Vor 3 Mio. Jahren, im Pliozän, war das mittlere Klima etwa 2–3°C wärmer als heute, und der Meeresspiegel lag 25–35 m höher (Dowsett et al., 1994).

Der Hauptgrund dieser großen Meeresspiegeländerungen liegt in der Veränderung der Wassermenge, die in Form von Eis an Land gebunden ist. Das „Meeresspiegeläquivalent“ der Eismasse auf Grönland beträgt 7 m, das des westantarktischen Eisschildes 6 m, und das des ostantarktischen Eisschildes sogar über 50 m. Vor etwa 35 Mio. Jahren (im Eozän) war unser Planet dank der damals aus Gründen der Plattentektonik hohen CO₂-Konzentration zum letzten Mal ganz frei von polaren Eiskappen, und der Meeresspiegel lag daher knapp 70 m höher als heute (Zachos et al., 2001; Barrett, 2003). Über derart lange Zeiträume können dazu noch Veränderungen im Volumen der Ozeanbecken

aufgrund der Plattentektonik zu Meeresspiegeländerungen beitragen.

Trägt man die genannten Werte in einer Grafik auf (Abb. 3.1-1), ergibt sich ein Zusammenhang von Temperatur und Meeresspiegel, der für eine Erwärmung von global 3°C einen Meeresspiegelanstieg um einige 10 m nahe legen würde. Dies ist eine Größenordnung mehr, als das IPCC bis zum Jahr 2100 erwartet (9–88 cm; IPCC, 2001a). Der Hauptgrund für diese scheinbare Diskrepanz ist, dass der in der Abbildung gezeigte Zusammenhang für ein Klima nahe dem Gleichgewicht gilt (nach mehreren Jahrtausenden bei annähernd konstanten Temperaturen) – nicht während rascher Veränderungen, wie sie derzeit durchlaufen werden. Die Zahlen geben also einen Anhaltspunkt dafür, welche Meeresspiegeländerung sich nach Jahrtausenden etwa bei 3°C Erwärmung einstellen dürfte. Sie erlauben jedoch noch keine Aussage darüber, wie schnell die Eismassen bei einer Erwärmung schmelzen könnten, und wie rasch der Meeresspiegel dadurch ansteigen könnte.

Über die mögliche Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs gibt das Ende der letzten Eiszeit Aufschluss. Damals erwärmte sich die globale Mitteltemperatur

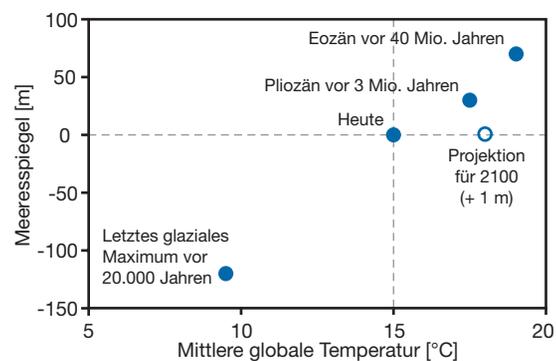


Abbildung 3.1-1

Mittlere globale Temperatur und Meeresspiegel (relativ zu heute) zu verschiedenen Zeiten in der Erdgeschichte sowie die Projektion für das Jahr 2100 (1 m über dem heutigen Meeresspiegel). Langfristig ist wahrscheinlich mit einem vielfach höheren Meeresspiegelanstieg zu rechnen, als er bis 2100 erwartet wird.

Quelle: nach Archer, 2006

peratur um ca. 4–7°C – also um einen Betrag, wie er auch in den pessimistischeren Szenarien für die Zukunft erreicht wird. Allerdings dauerte die damalige Erwärmung rund 5.000 Jahre, lief also sehr viel langsamer ab. Vor 15.000–10.000 Jahren stieg der Meeresspiegel dabei um 80 m, also im Mittel um 1,6 m pro Jahrhundert (Fairbanks, 1989). Phasenweise wurden bis zu 5 m pro Jahrhundert erreicht (Clark et al., 2004).

Diese Werte lassen sich nicht einfach auf die heutige Situation übertragen. Die damaligen Eisschilde waren erheblich größer, was auch größere Abschmelzgebiete an den Rändern und damit einen größeren Schmelzwasserfluss ermöglichte. Zudem war aufgrund der Erdbahnzyklen um die Sonne (Milankovich-Zyklen; Ruddiman, 2000) die Sonneneinstrahlung in den hohen Breiten der Nordhalbkugel im Sommer deutlich stärker, eine Situation, die sich nicht direkt mit einer global erhöhten Treibhausgaskonzentration vergleichen lässt. Diese beiden Faktoren sprechen für höhere Abschmelzraten am Ende der Eiszeit im Vergleich zur aktuellen Erwärmung. Die damals viel langsamere Erwärmung spricht dagegen für geringere Abschmelzraten. Tatsächlich hielt das Verschwinden der damaligen Eisschilde größtenteils mit der allmählichen Klimaerwärmung Schritt, so dass die Annahme plausibel ist, dass die Eismassen bei einer schnelleren Erwärmung auch noch deutlich rascher abgeschmolzen wären.

Insgesamt lassen sich aus dieser Diskussion zwei Folgerungen ableiten. Erstens sind Anstiegsraten des Meeresspiegels bis 5 m pro Jahrhundert dokumentiert, die wahrscheinlich noch keinen oberen Grenzwert darstellen. Die Klimageschichte zeigt also, dass ein vielfach schnellerer Anstieg möglich ist, als durch das IPCC für das 21. Jahrhundert erwartet wird. Zweitens spricht eine solche Anstiegsrate, auch unter Berücksichtigung der Bedingungen am Ende der letzten Eiszeit, für dynamische Schmelzprozesse der Eisschilde. Gemeint ist damit kein reines Abschmelzen durch Kontakt mit wärmerer Luft, sondern ein beschleunigtes Abfließen des Eises ins Meer.

3.1.1.2 Dynamik der Kontinentaleismassen

Die Erde hat derzeit zwei große kontinentale Eisschilde mit einer Dicke von 3–4 km, in Grönland und in der Antarktis. Beide befinden sich in einem Fließgleichgewicht: Im Zentrum wird durch Schneefälle laufend Eis nachgebildet, während zu den Rändern hin Eis abfließt. Unter dauerhaft konstanten Klimabedingungen sind diese Prozesse im Gleichgewicht und die Größe der Eismasse verändert sich nicht.

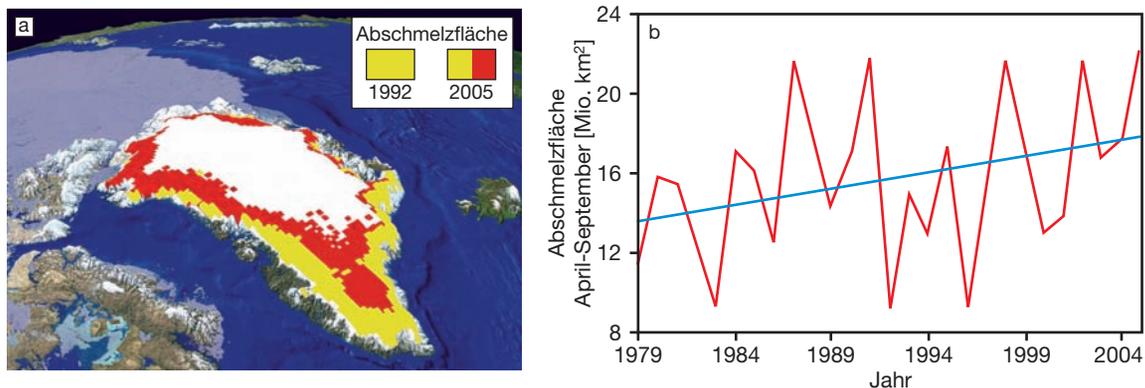
Allerdings ist es in der Antarktis wesentlich kälter als in Grönland. Daher schmilzt in Grönland ein großer Teil des zu den Rändern hin abfließenden Eises noch auf dem Land (wie bei einem Gebirgsgletscher); in der Antarktis erreicht es dagegen das Meer, und die Zungen der Eisströme treiben in Form von Eisschelfen auf dem Wasser.

Es ist nach wie vor schwierig, Veränderungen im Gesamtvolumen der beiden Eismassen zuverlässig zu messen. Dazu werden von Satelliten oder Flugzeugen Höhenprofile aufgenommen. Über die Fehlermargen dieser Messungen gibt es noch Diskussionen; die oft zerklüftete Topographie an den Rändern der Eisschilde erfassen sie nur sehr ungenügend. Neuerdings kommen auch Satellitenmessungen von Anomalien des Gravitationsfeldes hinzu. Veränderungen an den Rändern der Eismassen lassen sich durch Messungen vor Ort und durch Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit von Eis durch Satelliten am besten beobachten.

Die verschiedenen Messmethoden ergeben für beide Eisschilde qualitativ folgendes Bild: In den letzten zehn bis zwanzig Jahren scheint die Dicke im Zentrum etwas anzuwachsen, wie es durch die Klimaerwärmung aufgrund verstärkter Schneefälle auch zu erwarten ist. Dagegen sind an den Rändern zunehmend dynamische Abschmelzprozesse zu beobachten. Die quantitative Nettobilanz dieser Prozesse ist nicht genau bekannt, daher werden im Folgenden kurz einige der aktuellen Messergebnisse diskutiert.

In Grönland fließt etwa die Hälfte des Eises über nur 12 schnell fließende Auslassgletscher ab; die Massenbilanz des Eises hängt daher sehr stark von Veränderungen in diesen Eisströmen ab (Dowdeswell, 2006). Neue Daten zeigen, dass mehrere dieser Gletscher (u. a. der Jakobshavn Isbrae) ihre Fließgeschwindigkeit in den letzten Jahren verdoppelt haben (Joughin et al., 2004; Rignot und Kanagaratnam, 2006). Messungen der Abschmelzfläche, die sich auf Satellitenbildern erkennen lässt, zeigen zudem eine Zunahme um 25% von 1979 bis 2005 (Abb. 3.1-2); im Jahr 2005 erreichte sie den bisherigen Höchststand (Steffen und Huff, 2005). Wenn sich die Fläche, die vom Abschmelzen betroffen ist, vergrößert, sollte sich dies auch in einem Masseverlust der Eiskappe auswirken. Weiter hat sich gezeigt, dass Schmelzwasser von der Eisoberfläche durch Löcher (so genannte Gletschermühlen) unter das Eis gelangt und dort wie ein Schmiermittel wirkt, was ein Abfließen des Eises beschleunigt (Zwally et al., 2002).

Rignot und Kanagaratnam (2006) schließen aus der Beschleunigung der Eisströme auf einen Masseverlust entsprechend 0,5 mm Meeresspiegelanstieg pro Jahr, wobei sich dieser Wert in den letzten zehn

**Abbildung 3.1-2**

Ausdehnung der Abschmelzfläche auf Grönland nach Satellitendaten. Gezeigt sind die beiden extremen Jahre 1992 (nach dem Ausbruch des Pinatubo) und 2005 (a) sowie die zeitliche Entwicklung (b).

Quelle: Steffen und Huff, 2005

Jahren verdoppelt hat. Dies wäre ein Sechstel des aktuell gemessenen globalen Meeresspiegelanstiegs (Abb. 3.1-4). Dem gegenüber stehen die Messungen der Eishöhe mit Satellitenaltimetern (Johanessen et al., 2005; Zwally et al., 2005), die auf eine Zunahme der Masse des Grönlandeises hinweisen (entsprechend einer Meeresspiegelveränderung von $-0,03$ mm pro Jahr), die aber die kleinräumigen Prozesse an den Rändern nicht richtig erfassen. Da diese Zunahme deutlich kleiner ist als der von Rignot und Kanagaratnam beobachtete Verlust, muss man in der Summe von einem Masseverlust des Grönlandeises ausgehen, auch wenn noch erhebliche Unsicherheiten in den Zahlen bestehen und die verschiedenen Messmethoden noch besser miteinander abgeglichen werden müssen.

Wichtiger als die aktuell noch kleinen und nur ungenau erfassbaren Veränderungen der Massenbilanz ist allerdings, was in Zukunft bei weiter fortschreitender Erwärmung zu erwarten ist. Modellrechnungen zeigen, dass bei einer Erwärmung der oberflächennahen Luftschicht über Grönland um $2,7^{\circ}\text{C}$ oder mehr wahrscheinlich der gesamte Eisschild allmählich abschmelzen wird (Gregory et al., 2004). Chylek und Lohmann (2005) schätzen, dass die Erwärmung über Grönland das 2,2-fache der globalen Erwärmung betragen dürfte (eine Folge der Verstärkung von Klimaveränderungen in Polnähe), so dass eine kritische Erwärmung über Grönland bereits bei einer globalen Erwärmung von $1,2^{\circ}\text{C}$ erreicht werden könnte.

Wie schnell das Grönlandeis abschmelzen – und damit der Meeresspiegel ansteigen – könnte, ist allerdings derzeit offen. Der letzte IPCC-Bericht ging noch von konservativen Schätzungen aus der Differenz von Abschmelzen und Schneefall mit relativ einfachen Modellen aus und kam auf eine Abschmelzdauer von mehreren Jahrtausenden (IPCC,

2001a). Dabei wurden aber die oben diskutierten, inzwischen beobachteten dynamischen Abfließprozesse nicht berücksichtigt, die einen wesentlich schnelleren Abbau des Eises bedeuten könnten. Dieser Prozess wird von derzeitigen Eismodellen noch nicht richtig erfasst.

Für die antarktische Eismasse wurde im IPCC-Bericht 2001 für die Zukunft kein Abschmelzen erwartet, sondern im Gegenteil ein leichter Zuwachs an Eis aufgrund erhöhter Schneefallmengen. Neuere Daten zeigen jedoch auch in der Antarktis einen Masseverlust und eine dynamische Reaktion des Eises, insbesondere des kleineren westantarktischen Eisschildes. Im Februar 2002 zerbarst das Jahrtausende alte Larsen-B-Eisschelf vor der antarktischen Halbinsel nach einer Erwärmung in dieser Region auf spektakuläre Weise (Abb. 3.1-3). Dies hat zunächst keine direkte Auswirkung auf den Meeresspiegel, da Eisschelfe ohnehin auf dem Meer schwimmen und ihrer Masse entsprechend Wasser verdrängen. Offenbar hat es aber Auswirkungen auf das Kontinentaleis: Die Eisströme, die hinter dem Larsen-B-Eisschelf vom Kontinentaleis abfließen, haben sich seither stark beschleunigt (bis zur 8-fachen Geschwindigkeit: Rignot et al., 2004; Scambos et al., 2004). Die schwimmenden Eisschelfe, die teilweise auf Felsvorsprüngen festsitzen, bremsen also den Abfluss der Eisströme ins Meer. Auch anderswo in der Antarktis, z. B. in Pine Island Bay, hat sich der Abfluss von Kontinentaleis beschleunigt (Rignot et al., 2002). Zudem konnte gezeigt werden, dass die Schmelzrate der Eisströme, dort wo sie ins Meer münden, sehr empfindlich von den Meerestemperaturen abhängt: Pro $0,1^{\circ}\text{C}$ Anstieg der Wassertemperatur erhöht sich die Schmelzrate um 1 m pro Jahr (Rignot und Jacobs, 2002). Sollten sich also die Wassertemperaturen um die Antarktis erhöhen oder sollten größere Eisschelfe, etwa das Ross-Eisschelf, eines

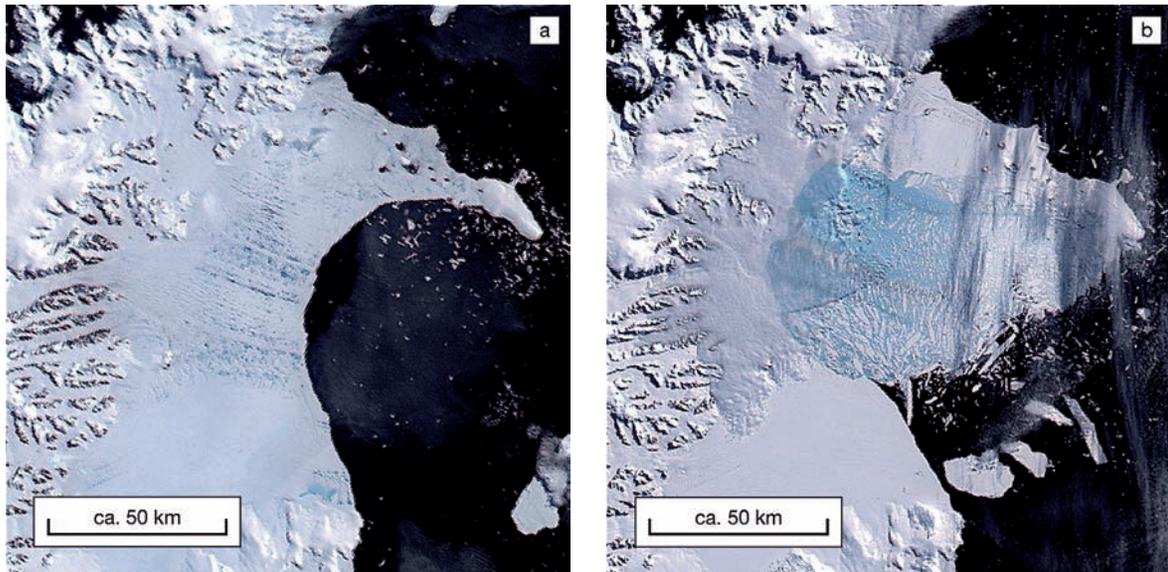


Abbildung 3.1-3

Das Larsen-B-Eisschelf an der antarktischen Halbinsel auf Satellitenaufnahmen vom 31. Januar (a) und 5. März 2002 (b).
Quelle: NSIDC, 2002

Tages verschwinden, dann muss mit einem beschleunigten Abfließen des westantarktischen Eisschildes gerechnet werden.

Neueste Daten des Satelliten GRACE, der Anomalien im Schwerefeld präzise vermessen kann, zeigen eine Abnahme der antarktischen Eismasse um 152 km^3 pro Jahr während der vergangenen Jahre. Dies entspricht einem Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von $0,4 \text{ mm}$ pro Jahr (Velicogna und Wahr, eingereicht). Der Leiter des British Antarctic Survey, Chris Rapley, hat die Antarktis in diesem Zusammenhang einen „erwachten Riesen“ genannt.

Insgesamt legen die neuen Beobachtungen nahe, dass der letzte IPCC-Bericht den künftigen Meeresspiegelanstieg unterschätzt haben könnte. Ein dynamischer Zerfall der Eisschilde könnte möglicherweise in einem Zeitraum von Jahrhunderten, statt Jahrtausenden, ablaufen. Leider erlauben die derzeit verfügbaren Eismodelle noch keine verlässlichen Prognosen über die weitere Entwicklung der Eisschilde. Diese Unsicherheit wiegt umso schwerer, weil der Zerfall von Eisschilden aufgrund positiver Rückkopplungsprozesse wahrscheinlich nur sehr schwer zu stoppen sein wird, wenn er in Gang gekommen ist. Zu diesen Rückkopplungsprozessen gehört etwa die Schmelzung der Gletscherunterseite durch Schmelzwasser von der Oberfläche und die Reibungswärme aufgrund des schnelleren Fließens, oder ein Abheben von Schelfeis von festen Auflagepunkten durch den Meeresspiegelanstieg.

3.1.1.3

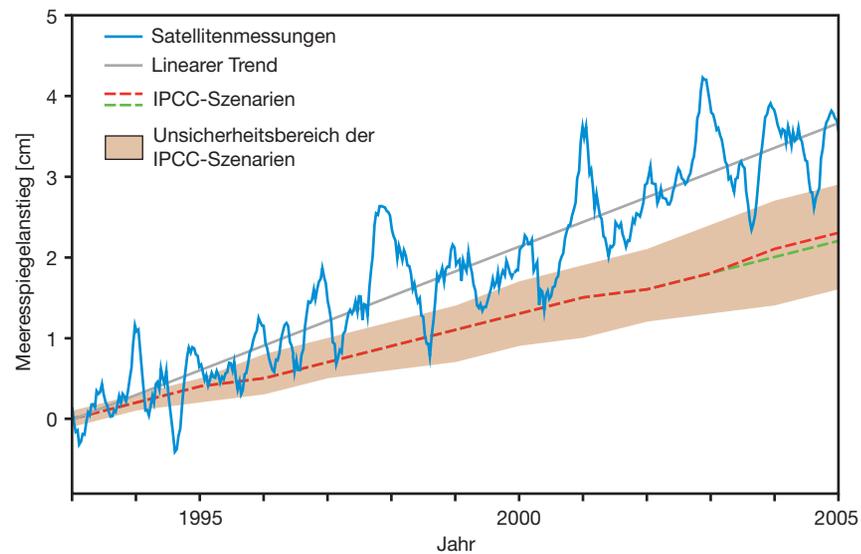
Weitere Beiträge zum Meeresspiegelanstieg

Andere Beiträge zum globalen Meeresspiegel sind vor allem die thermische Ausdehnung des Wassers und das Abschmelzen der kleineren Gebirgsgletscher. Der regionale Meeresspiegel wird dazu noch von Veränderungen der Meeresströmungen und von geologischen Prozessen (lokale Hebung oder Senkung von Landmassen) beeinflusst. Solange der globale Trend klein ist, können die regionalen Prozesse noch überwiegen. So zeigen Satelliten- und Pegelmessungen trotz des globalen Meeresspiegelanstiegs noch Gebiete mit fallendem Meeresspiegel, etwa im Indischen Ozean um die Malediven (Cazenave und Nerem, 2004). Beschleunigt sich der globale Meeresspiegelanstieg, wird dies jedoch schließlich die lokalen Effekte übertreffen und überall zu einem Anstieg führen.

Seit 1870 ist der Meeresspiegel nach Pegelmessungen an den Küsten um global 20 cm angestiegen; dabei beschleunigt sich der Anstieg im Verlauf des 20. Jahrhunderts immer mehr, während die Anstiegsrate Anfang des 19. Jahrhunderts noch nahe null lag (Church und White, 2006). Auch über die letzten Jahrtausende davor ist der Meeresspiegel nach geologischen Daten kaum gestiegen (Peltier, 2004) – dies bestätigen auch Analysen des Wasserstandes zur Zeit des Römischen Reiches (Lambeck et al., 2004). Seit 1993 lässt sich der Meeresspiegel global und exakt von Satelliten aus messen – über diesen Zeitraum ist ein Anstieg um 3 cm pro Jahrzehnt zu verzeichnen (Abb. 3.1-4). Bis zu 5 mm des rezenten Anstiegs

Abbildung 3.1-4

Der Anstieg des globalen Meeresspiegels aus Satellitenmessungen (obere Linie, mit ihrem linearen Trend) sowie die Projektionen des IPCC (2001a) mit ihrem Unsicherheitsbereich. Quelle: Cazenave und Nerem, 2004



könnten eine Schwankung infolge des Ausbruchs des Vulkans Pinatubo 1991 sein (Church et al., 2005). Unabhängige Schätzungen der einzelnen Beiträge ergeben aktuell 1,6 cm pro Jahrzehnt (Willis et al., 2004) durch die Erwärmung des Meerwassers und 0,5 cm pro Jahrzehnt von Gebirgsgletschern und kleineren Eismassen außerhalb von Grönland und der Antarktis (Raper und Braithwaite, 2006). Damit verblieben etwa 1 cm pro Jahrzehnt für die beiden großen Kontinentaleismassen, was mit der Diskussion in Kapitel 3.1.1.2 konsistent ist. Angesichts der Unsicherheiten in den einzelnen Beiträgen ist es aber noch zu früh, eine definitive Bilanz des derzeitigen Meeresspiegelanstiegs zu ziehen.

Die verschiedenen Szenarien des IPCC-Berichts 2001 ergaben einen Anstieg von 9–88 cm von 1990 bis zum Jahr 2100. Die niedrigeren Werte liegen dabei deutlich unterhalb der bereits jetzt gemessenen Anstiegsrate. Auch dies spricht dafür, dass das IPCC den Meeresspiegelanstieg bisher unterschätzt hat.

3.1.1.4

Neue Abschätzung des Meeresspiegelanstiegs

Die Physik der beobachteten, oben diskutierten dynamischen Prozesse im Kontinentaleis ist noch ungenügend verstanden, und gegenwärtige Kontinentaleismodelle erfassen diese Prozesse noch nicht ausreichend. Hier besteht dringender weiterer Forschungsbedarf (Kap. 3.5). Verbesserte Abschätzungen sind beim heutigen Kenntnisstand schwierig und nur mit großen Unsicherheiten möglich. Eine derartige, notwendigerweise grobe Abschätzung wird im Folgenden versucht.

Betrachtet wird dabei der Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2300 bei einer Stabilisierung der Erwärmung bei 3°C über dem vorindustriellen Wert. Der vergleichsweise lange Zeithorizont wurde wegen der intrinsischen Zeitskalen der relevanten Prozesse gewählt, die sowohl für das Abschmelzen von Eisschilden als auch die thermische Ausdehnung des Meerwassers mehrere Jahrhunderte betragen. Nach einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration und des Oberflächenklimas wird der Meeresspiegel noch Jahrhunderte weiter ansteigen. Um die Folgen der anthropogenen Emissionen der nächsten Jahrzehnte für den Meeresspiegel abzuschätzen, reicht daher eine Betrachtung bis zum Jahr 2100 nicht aus.

Bei einer mittleren Klimasensitivität von 3°C entspricht dieses Szenario der Wirkung einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration, also einem CO₂-Äquivalent von 560 ppm. Wenn der weltweite Anteil des CO₂ bei 60% des Strahlungsantriebs durch anthropogene Treibhausgasemissionen bliebe, dann entsprächen 560 ppm CO₂-Äquivalent einer Stabilisierung bei 450 ppm CO₂.

- *Thermische Ausdehnung:* Hierfür werden die Werte des IPCC übernommen (0,4–0,9 m; IPCC, 2001a, dort Abb. 11.15a), die auf Modellsimulationen für ein Szenario der CO₂-Verdoppelung beruhen.
- *Gletscher:* Für das Volumen aller Gletscher außerhalb von Grönland und der Antarktis gibt dieser IPCC-Bericht ein Meeresspiegeläquivalent von 0,5 m an; bei 3°C globaler Erwärmung wäre mit einem Verlust von 80% der Gletschermasse im Jahr 2300 zu rechnen. Eine neuere Arbeit (Raper und Braithwaite, 2006) halbiert diesen Wert allerdings; daher wird eine Spanne von 0,2–0,4 m verwendet.

- *Grönland:* Das vom IPCC (2001a) gezeigte Modell ergibt für Grönland bei lokal 5,5°C Erwärmung (was bei 3°C globaler Erwärmung ein plausibler Wert ist; Chylek und Lohmann, 2005) einen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von 0,9 m bis zum Jahr 2300. Die oben genannten dynamischen Mechanismen sind hier jedoch nicht berücksichtigt, so dass dieser Wert eher eine untere Grenze darstellt; daher werden hier 0,9–1,8 m angenommen.
- *Antarktis:* Für die Antarktis ist das Verhalten des westantarktischen Eisschildes (WAIS) entscheidend. IPCC hielt 2001 einen Zerfall dieses Eisschildes noch für sehr unwahrscheinlich, da die bis dato existierenden Modelle die Vorstellung nahe legten, dass das Kontinentaleis nicht auf Veränderungen an den vorgelagerten Eisschelfen reagiert. Dies muss inzwischen als widerlegt gelten, wie die oben diskutierten Beobachtungen zeigen. Verschwinden durch die Erwärmung des Meerwassers weitere Eisschelfe (wie Larsen B; Abb. 3.1-3), ist ein Abschmelzen des WAIS auf einer ähnlichen Zeitskala wie Grönland zu befürchten. Hierdurch werden 1–2 m Meeresspiegelanstieg bis 2300 angenommen. Bei konstanter Rate entspricht dies einem Verschwinden des WAIS über einen Zeitraum von 900–1.800 Jahren, manche Glaziologen halten auch einen weitgehenden Zerfall innerhalb 300–400 Jahren für möglich.

In der Summe ergibt sich ein Anstieg um ca. 3–5 m bis zum Jahr 2300. Der Wert von 3 m entspricht einem Verlust von je einem Sechstel des Grönländischen und des westantarktischen Eisschildes; 5 m entsprechen je einem Drittel (Tab. 3.1-1).

Es stellt sich die Frage, ob diese Zahlen konsistent sind mit der heute beobachteten Anstiegsrate von 3 cm pro Jahrzehnt. Aufgrund der Trägheit und Nichtlinearität und des erst langsam anlaufenden Anstiegs lässt sich dies noch nicht beantworten. Bei der heute gemessenen Anstiegsrate würde sich bis 2300 nur knapp 1 m Meeresspiegelanstieg ergeben. Der jetzige Anstieg ist jedoch eine Reaktion auf nur

0,7°C globale Erwärmung. Eine vierfach schnellere Anstiegsrate ist bei 3°C Erwärmung daher plausibel und wäre konsistent mit dem oben abgeschätzten Bereich.

Diese grobe Überschlagsrechnung, die kein Worst-Case-Szenario darstellt, zeigt das Gefährdungspotenzial durch den Meeresspiegelanstieg auf, der sich als eine der schwerwiegendsten Folgen der globalen Erwärmung erweisen könnte. Genauere und besser abgesicherte Abschätzungen sind daher dringend erforderlich. Forschungsbedarf besteht hier vor allem bei der Dynamik der Kontinentaleismassen und der Dynamik der Ozeane (insbesondere deren Vermischung), um die Unsicherheit in der thermischen Ausdehnung zu reduzieren (Kap. 3.5).

3.1.2 Verstärkung tropischer Wirbelstürme

Meeresbezogene Folgen des Klimawandels bedrohen Menschen und Ökosysteme nicht nur durch den Anstieg des Meeresspiegels sondern auch durch Wetterextremereignisse wie tropische Wirbelstürme. Die Hurrikansaison 2005 hat eine Reihe von Rekorden gebrochen: Noch nie seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1851 gab es im Atlantik so viele tropische Wirbelstürme (27, sechs mehr als der bisherige Rekord), noch nie wuchsen so viele zur vollen Stärke heran (15, vier mehr als der frühere Rekord), und noch nie gab es gleich drei Hurrikane der schlimmsten Kategorie 5. Noch nie wurde ein derart intensiver Hurrikan gemessen wie Wilma, mit nur 882 mb Zentraldruck am 19. Oktober 2005. Und mit Vince entstand erstmals ein Tropensturm nahe an Europa; er entwickelte sich bei Madeira am 9. Oktober 2005 zum Hurrikan und traf in abgeschwächter Form in Spanien auf Land.

Bereits die Hurrikansaison 2004 war außergewöhnlich. Erstmals wurde Florida von vier Hurrikänen in einem Jahr heimgesucht, und erstmals wurde Japan von zehn Taifunen getroffen, wie die Hurrikane im Pazifik genannt werden. Für die Klimatologen noch interessanter war die Tatsache, dass im März 2004 erstmals ein Hurrikan im Südatlantik entstand: Catarina. Er bildete sich in einem Gebiet vor der brasilianischen Küste, wo eine Simulationsrechnung des britischen Hadley Centre zuvor die Entstehung von Hurrikänen durch die globale Erwärmung vorhergesagt hatte (Met Office, 2006).

Es stellt sich die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen globaler Erwärmung und Hurrikänen gibt. Die zentrale Aussage zum letzten IPCC-Bericht lautete, dass eine Zunahme in der Anzahl tropischer Wirbelstürme durch die globale Erwärmung nicht zu erwarten ist, und dass Beobachtungs-

Tabelle 3.1-1

Geschätzter globaler Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2300 bei einer auf 3°C begrenzten globalen Erwärmung (Erläuterung im Text).

Quelle: WBGU

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>

daten auch keinen signifikanten Trend in der Anzahl dieser Stürme zeigen.

Seit diesem IPCC-Bericht hat es eine Reihe neuer Forschungsarbeiten zum Thema gegeben. Sie widersprechen zwar nicht der genannten IPCC-Aussage, werfen aber dennoch ein ganz neues Licht auf die obige Frage, indem nicht mehr die Anzahl der Tropenstürme im Mittelpunkt des Interesses steht, sondern deren Stärke. Beides wird durch unterschiedliche Faktoren bestimmt. Tropenstürme entstehen aus einer kleinen Störung (etwa einem Gewitter) über dem tropischen Ozean. Im Atlantik hat diese Störung ihren Ursprung oft auf dem afrikanischen Kontinent. Was die Häufigkeit solcher „Keimzellen“ für Wirbelstürme steuert, ist bisher ungenügend verstanden. Für einen direkten Einfluss der globalen Erwärmung auf diesen Prozess gibt es aber keine Hinweise.

Die weitere Entwicklung eines Tropensturms, nachdem er einmal entstanden ist, wird dagegen stark von seinem Umfeld bestimmt, d. h. von den Meerestemperaturen und der atmosphärischen Zirkulation. Insbesondere die Meerestemperaturen sind dabei von der anthropogenen Erwärmung betroffen. Ob die atmosphärische Zirkulation sich durch die Erwärmung ebenfalls verändert, und inwieweit dies die Entwicklung von Hurrikanen fördert oder hemmt, ist noch unklar. Hier ist man auf Simulationen mit globalen Modellen angewiesen, die jedoch bei der Auflösung von Hurrikanen noch Schwächen haben. Durch Messdaten gut belegt ist dagegen:

1. Wärmere Meerestemperaturen führen zu stärkeren Hurrikanen mit mehr Niederschlägen.
2. Die Meerestemperaturen in den Tropen in der relevanten Saison (etwa Juni–November) haben zugenommen und sind in den letzten Jahren sowohl im Atlantik als auch im Pazifik auf dem höchsten Stand seit Beginn der Messreihen, die (wenn auch mit abnehmender Qualität) bis ins 19. Jahrhundert zurückreichen.
3. Die Energie von Hurrikanen hat sowohl im Atlantik als auch im Pazifik zugenommen, auf Höchstwerte seit Beginn zuverlässiger Daten in den 1950er Jahren. Während die Gesamtzahl der Tropenstürme sich kaum verändert hat, hat die Anzahl der besonders schweren Hurrikane (Kategorie 4 und 5) deutlich zugenommen.

Der erste Punkt ist theoretisch gut untermauert: Warme Meerestemperaturen sind eine Energiequelle für Hurrikane, daher sind sie ein tropisches Phänomen. Dies wird in den Vorhersagen des National Hurricane Center routinemäßig genutzt. Emanuel (2005) hat diesen Zusammenhang anhand der Messdaten seit 1950 belegt. Dabei definierte er einen Index für die Stärke der Hurrikane, den „Power Dissipation Index“ (PDI), der dem Kubik der Windgeschwindigkeit aufsummiert über die Ausdehnung

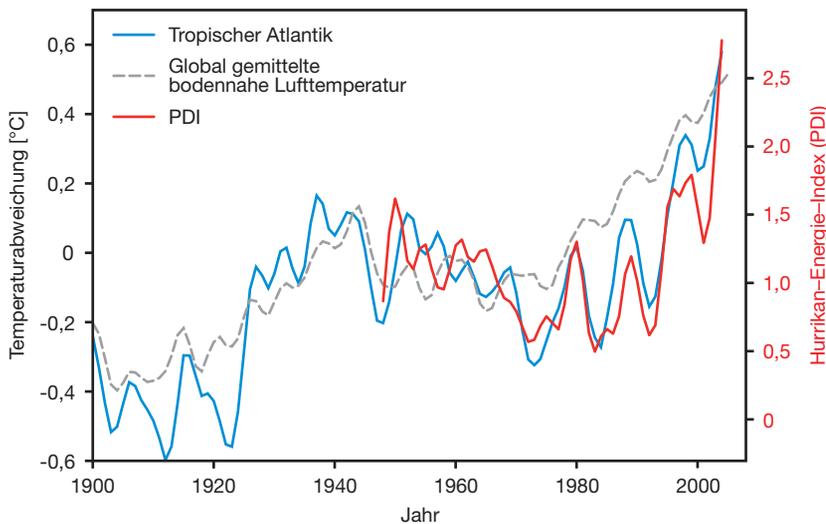
und Dauer eines Hurrikans entspricht. Eine Zunahme des PDI entsteht also durch stärkere, größere oder länger andauernde Hurrikane. Der PDI kann als ein annäherndes Maß für das Zerstörungspotenzial von Hurrikanen interpretiert werden.

Abbildung 3.1-5 zeigt die Zunahme des PDI über die letzten Jahrzehnte im Atlantik; eine ähnliche Entwicklung gibt es auch im Pazifik. Neben dieser Zunahme ist auch der Zusammenhang mit der ebenfalls gezeigten global gemittelten bodennahen Lufttemperatur deutlich erkennbar. Die Zunahme des PDI mit der Temperatur ist in den Daten allerdings wesentlich stärker, als es sich aus der Theorie der Hurrikanenergie herleiten lässt. Diese Diskrepanz ist noch unverstanden. Eine denkbare Hypothese ist, dass die warme Oberflächenschicht des Meeres dicker geworden ist, so dass die für den Hurrikan zugängliche Wärmemenge überproportional zur Temperatur gestiegen ist (Scharroo et al., 2005).

Eine andere Studie (Webster et al., 2005) hat unter Verwendung von Satellitendaten gezeigt, dass sich die Anzahl von Hurrikanen der Kategorien 4 und 5 seit 1970 global (also im Pazifik, Atlantik und Indik) nahezu verdoppelt hat – dies obwohl die Gesamtzahl der Tropenstürme in diesem Zeitraum keinen signifikanten Trend aufweist. Dieses Ergebnis bestätigt nochmals die Aussage des IPCC (2001a), wonach die Anzahl sich nicht verändert, und von Emanuel (2005), wonach die Stärke zunimmt.

Eine Arbeitsgruppe in Princeton hat in mehreren Studien untersucht, wie sich die globale Erwärmung in einem der Hurrikanmodelle auswirkt, die regelmäßig für die Vorhersagen des National Hurricane Center eingesetzt werden (Knutson und Tuleya, 2004). Dazu wurde das Modell mit Randbedingungen aus mehreren globalen Klimamodellen betrieben, jeweils für das heutige Klima und für ein Erwärmungsszenario. Die Häufigkeitsverteilung der Hurrikane verschob sich dabei deutlich in Richtung auf die stärkeren Stürme – Hurrikane der stärksten Kategorie 5 traten in dem Erwärmungsszenario sogar dreimal häufiger auf als im Kontrollklima. Da die globalen Klimamodelle selbst bisher keine ausreichende Auflösung haben, um Hurrikane gut zu beschreiben, ist diese Studie mit einem regionalen, hoch auflösenden Vorhersagemodell die bisher aussagekräftigste Simulationsrechnung zur künftigen Entwicklung dieser Stürme.

Theorie, Beobachtungsdaten und Modellrechnungen sprechen daher dafür, dass eine Klimaerwärmung zu stärkeren Hurrikanen führt. Dabei ist der in den Messdaten gefundene Effekt noch stärker als theoretisch erwartet. Bei einer Erwärmung der tropischen Meerestemperatur um lediglich 0,5°C hat die Hurrikanenergie in den letzten Jahrzehnten global um 70% zugenommen, im Atlantik sogar noch

**Abbildung 3.1-5**

Zeitliche Entwicklung der Energie von Tropenstürmen (Power Dissipation Index – PDI, rot) und der mittleren Meerestemperatur im tropischen Atlantik von August bis Oktober (blau). Zum Vergleich ist der Verlauf der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur gezeigt (gestrichelte graue Linie).
Quelle: nach Emanuel, 2005

mehr (Emanuel, 2005). Eine neue Datenanalyse bestätigt zudem, dass der Temperaturanstieg der Hauptgrund für diese beobachtete Energiezunahme ist, andere Faktoren spielen eine untergeordnete Rolle (Hoyos et al., 2006).

Dennoch gibt es in den USA einige Hurrikanforscher, die das extreme Jahr 2005 allein auf einen natürlichen Zyklus zurückführen, und zwar auf eine Schwankung der in Kapitel 2.1.3 diskutierten Atlantikströmung (der „thermohalinen Zirkulation“). Dies ist bisher auch die Position des National Hurricane Center der USA. Diese Hurrikanforscher lehnen übrigens nicht den Zusammenhang zwischen höheren Temperaturen und stärkeren Hurrikanen ab, sondern sie bestreiten, dass die Erwärmung selbst anthropogen ist; einige von ihnen bestreiten sogar generell den anthropogenen Klimawandel. Zu dieser Frage werden in naher Zukunft einige Studien erscheinen, die den anthropogenen Anteil an den erhöhten Atlantiktemperaturen genauer analysieren.

Ein natürlicher Zyklus könnte, zusätzlich zur globalen Erwärmung, im Atlantik in der Tat zu dem schlimmen Jahr 2005 beigetragen haben. Ein solcher Zyklus kann aber weder erklären, wieso die Temperaturen jetzt höher sind als je zuvor seit Beginn der Messungen (und als im letzten Maximum dieses Zyklus um 1950), noch kann er den Anstieg im Pazifik erklären – auch dort, wo die Mehrzahl der Tropenstürme auftritt, zeigt ihre Energie seit Jahrzehnten einen Aufwärtstrend. Zudem liegt die beobachtete Temperaturentwicklung im tropischen Atlantik im Rahmen der globalen Erwärmungstrends (Abb. 3.1-5, 2.1-1 und 2.1-2) und ist konsistent mit dem, was Modellrechnungen als Folge der anthropogenen Emissionen ergeben.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Unter Hurrikanexperten (die meist aus der Wettervorhersage

und nicht aus der Klimaforschung kommen) besteht ein Konsens, dass wärmere Meerestemperaturen die Tropenstürme verstärken. Unter Klimaexperten besteht ein Konsens, dass die anthropogene Erwärmung wesentlich zur beobachteten Erwärmung der tropischen Ozeane beigetragen hat. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen globaler Erwärmung und stärkeren Hurrikanen ist damit zwar noch nicht bewiesen und bedarf weiterer Erforschung, er muss jedoch beim gegenwärtigen Wissensstand als sehr wahrscheinlich gelten.

3.2

Auswirkungen auf Küstengebiete

Die Folgen des Klimawandels, sei es in Form eines Meeresspiegelanstiegs oder vermehrten und stärkeren Wetterextremen, werden die zukünftige Entwicklung von Küstenregionen direkt beeinflussen. Die Länge der weltweiten Küstenlinien (ohne Berücksichtigung kleiner Verästelungen von weniger als einigen km) hat eine Größenordnung von etwa 1 Mio. km. Küstenregionen sind für die Menschheit von herausragender Bedeutung. Sie bieten Siedlungsräume, sind Zentren wirtschaftlicher Aktivitäten (Turner et al., 1996) und beherbergen nicht zuletzt ein reiches Vorkommen an biologischer Vielfalt.

Momentan lassen sich die unmittelbaren Auswirkungen des Klimawandels, wie z. B. Umfang und Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs, noch nicht genau voraussagen. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass die Gefährdung von Küstengebieten deutlich zunehmen wird und damit die Anzahl der vom Klimawandel betroffenen Menschen. Dies ergibt sich bereits aus der Tatsache, dass sich menschliche Siedlungen häufig in Küstennähe befinden.

Acht der zehn größten Städte der Welt liegen heute an Küsten (UN, 2004), und Schätzungen zufolge leben 21 % der Weltbevölkerung weniger als 30 km vom Meer entfernt (Cohen et al., 1997; Gommaes et al., 1998). Die große Attraktivität von Küstenregionen spiegelt sich auch in den hohen Wachstumsraten der dortigen Bevölkerung wider, welche etwa das Doppelte des globalen Durchschnitts betragen (Bijlsma et al., 1996). Die weltweiten Urbanisierungstendenzen werden diese Entwicklung in Zukunft noch verstärken. Bis 2030 könnten ungefähr 50 % der Weltbevölkerung innerhalb 100 km Entfernung von der Küste leben (Small und Nicholls, 2003).

Wie sich der Meeresspiegelanstieg und klimawandelbedingte Wetterextreme auf Küstengebiete und auf Menschen auswirken werden, hängt in erster Linie von der Art und Anzahl der betroffenen natürlichen und sozialen Systeme ab. Zu den natürlichen Systemen werden vor allem Flussdeltas, tiefliegende Küstenebenen, Koralleninseln und Atolle, Barriereinseln und Lagunen, Strände, Küstenfeuchtgebiete und Ästuarie gehören (IPCC, 2001b). Im Folgenden wird genauer untersucht, welche naturräumlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen zu erwarten sind und inwieweit eine Gefährdung für den Menschen besteht.

3.2.1

Naturräumliche Effekte

3.2.1.1

Überflutungen aufgrund des Meeresspiegelanstiegs

Durch den Anstieg des mittleren Meeresspiegels wird es in einigen Regionen der Erde zur Überflutung von Küstengebieten und Inselgruppen kommen. 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.

Um die Größe der insgesamt vom Meeresspiegelanstieg gefährdeten Regionen abschätzen zu können, haben Brooks et al. (2006) Daten über die globale Landflächenverteilung in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel zusammengestellt. Abbildung 3.2-1 zeigt, dass große Gebiete 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

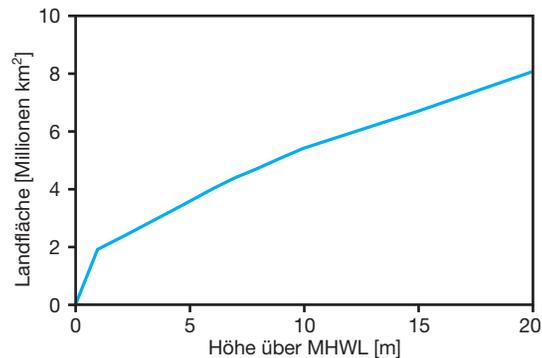


Abbildung 3.2-1

Verteilung von Landfläche, ohne Antarktis, als Funktion der Höhe über der mittleren Hochwasserlinie (MHWL).

Quelle: ISciences, 2003

an. Bei 20 m Höhe über dem Meeresspiegel wären bereits insgesamt 8 Mio. km² betroffen.

Zur Illustration der räumlichen Verteilung dieser Landflächen werden Beispiele von Gebieten gezeigt, die unterhalb von 2 m bzw. 20 m über dem Meeresniveau liegen. Ein Anstieg von 20 m (Abb. 3.2-2) 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 (Kap. 3.1.1). 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.

Die besonders bedrohten Gebiete in Europa bei 20 m Anstieg umfassen vor allem den Osten Englands, das Delta des Po in Norditalien und den Küstenstreifen, der sich von Belgien durch die Niederlande, den Nordwesten Deutschlands bis ins westliche und nördliche Dänemark zieht (Abb. 3.2-2).

Ein Anstieg von 2 m (Abb. 3.2-3 und 3.2-4) könnte im kommenden Jahrhundert eintreten. Zur Veranschaulichung der Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs von 2 m zeigt Abbildung 3.2-3 Gebiete an der Nordsee und nordeuropäischen Küsten. Da sich diese Art der Darstellung auf die absolute Höhe über dem Meeresspiegel bezieht, schließt sie auch Bereiche ein, die derzeit bereits von Deichen geschützt werden. Schon heute liegen einige dicht besiedelte Gebiete in den Niederlanden, England, Deutschland und Italien unterhalb des normalen Hochwasserpegels (EEA, 2005). Für diese Gebiete ist der Meeresspiegelanstieg besonders bedrohlich. Hier erhält die

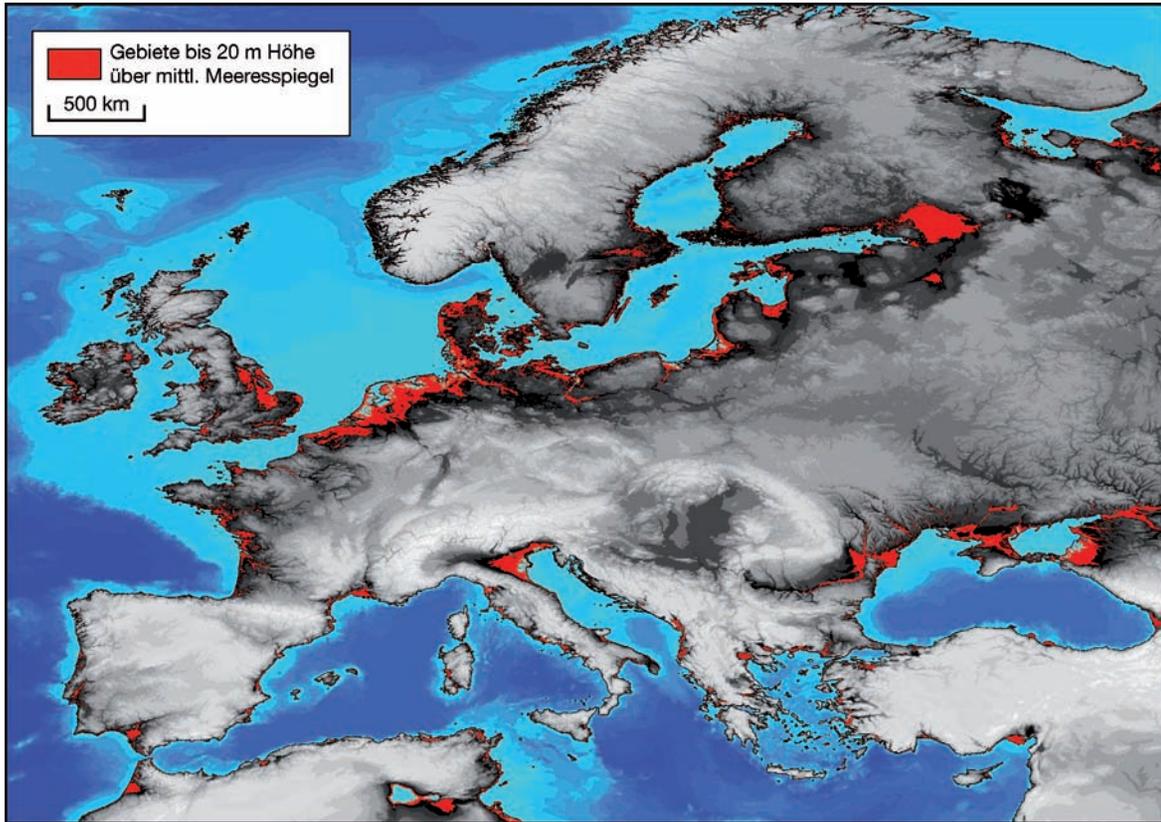


Abbildung 3.2-2
Küstengebiete in Europa, Teilen Westasiens und Nordafrikas. Rot gefärbt sind Landgebiete, die niedriger als 20 m über dem gegenwärtigen mittleren Meeresspiegel liegen (ohne Berücksichtigung von künftigen Küstenschutzmaßnahmen).
Quelle: Brooks et al., 2006

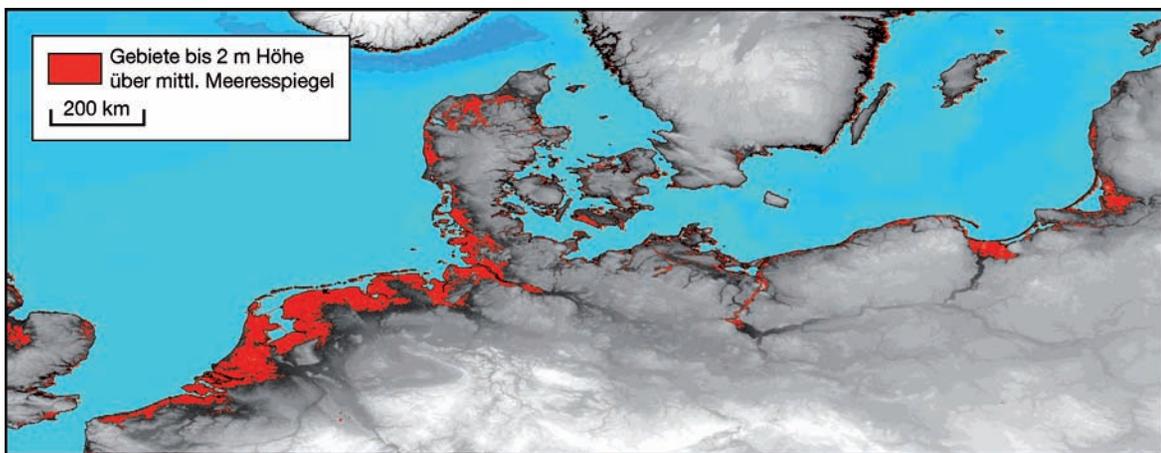


Abbildung 3.2-3
Küstengebiete entlang der Nordsee. Rot gefärbt sind Landgebiete, die niedriger als 2 m über dem gegenwärtigen mittleren Meeresspiegel liegen (ohne Berücksichtigung von künftigen Küstenschutzmaßnahmen).
Quelle: Brooks et al., 2006

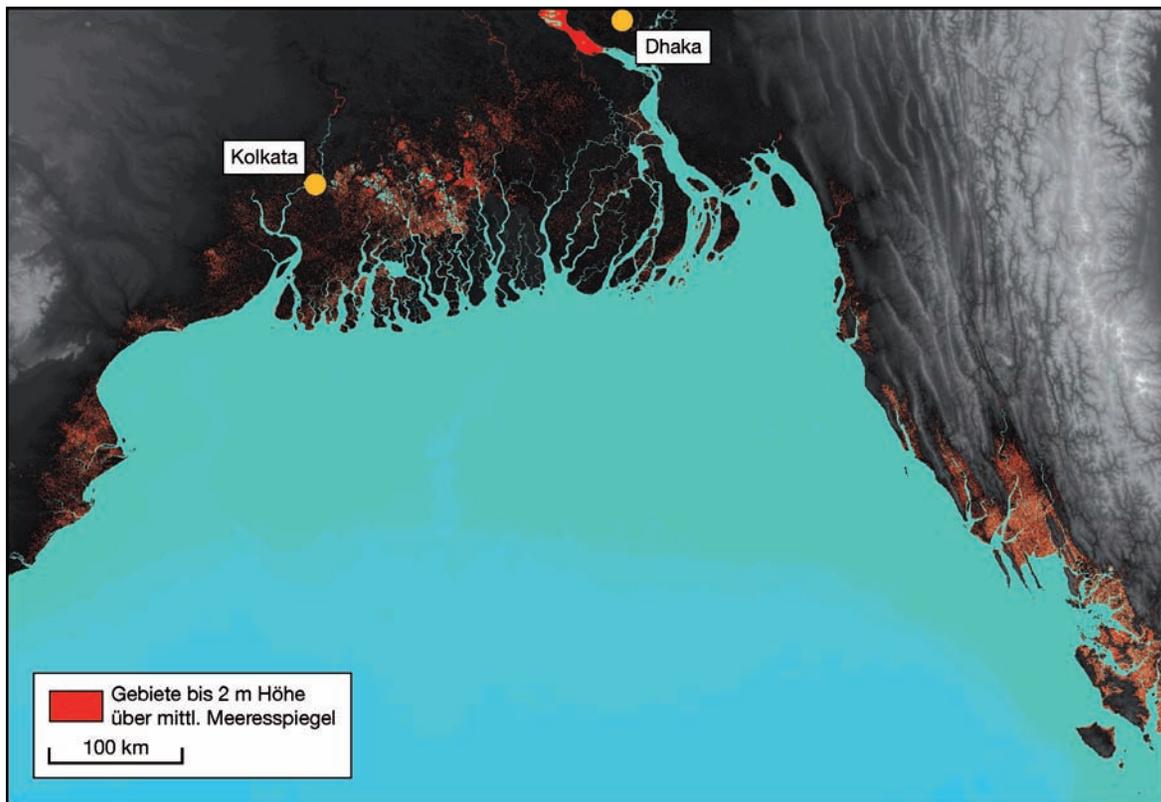


Abbildung 3.2-4

Küstengebiete entlang des Golf von Bengalen und im Ganges-Brahmaputra-Meghna-Flussdelta. Rot gefärbt sind Landgebiete, die niedriger als 2 m über dem gegenwärtigen mittleren Meeresspiegel liegen (ohne Berücksichtigung von künftigen Küstenschutzmaßnahmen).

Quelle: Brooks et al., 2006

Frage der Veränderungsgeschwindigkeit zusätzliche Bedeutung, weil ein schnellerer Anstieg die Umsetzung gesellschaftlicher Anpassungsstrategien erschweren könnte (Brooks et al., 2006).

In Asien wäre bei einem Meeresspiegelanstieg von 2 m (Abb. 3.2-4) beispielsweise das dicht bevölkerte Flussdelta von Ganges-Brahmaputra-Meghna betroffen, mit einem Netzwerk von 230 Flüssen. Das gesamte Flussgebiet umfasst eine Fläche von 175 Mio. ha und erstreckt sich von Indien und Bangladesh bis nach Nepal, China und Bhutan (Mirza et al., 2003). Derzeit leben ungefähr 129 Mio. Menschen in diesem Flussdelta (Woodroffe et al., 2006), wovon ein Großteil heute noch in ländlichen Gebieten siedelt. Mit Dhaka und Kolkata (früher Kalkutta) gibt es hier bereits zwei schnell wachsende Megastädte, also Städte mit mehr als 10 Mio. Einwohnern.

3.2.1.2 Überschwemmungen aufgrund von Sturmfluten

In den meisten Fällen dürften die schwersten Folgen des Meeresspiegelanstiegs nicht im sehr langsamen

Ansteigen des mittleren Wasserstandes bestehen, sondern im vermehrten Auftreten von Sturmfluten.

Das Entstehen von Sturmfluten wird oft durch das Zusammenspiel von Sturmsystemen und Gezeiten bedingt. Wenn bei Flut Stürme das Wasser auf die Küste drücken, kann dies zu Überschwemmungen großer Landstriche führen. Vor allem in Flussmündungen kann so landeinwärts über große Distanzen Schaden angerichtet werden (SwissRe, 1998). Mit dem Begriff Überschwemmung wird hier eine zeitlich begrenzte, teilweise oder vollständige Wasserbedeckung normalerweise trockener Gebiete beschrieben. Diese kann sowohl dadurch verursacht werden, dass oberirdische (stehende oder fließende) Gewässer über die Ufer treten, als auch durch die Folgen von Starkniederschlägen (Münchener Rück, 1997).

Durch einen Meeresspiegelanstieg wird die Exposition von Küstenbewohnern gegenüber Sturmfluten und Sturmwellen und damit das Überschwemmungsrisiko steigen. Die Zerstörungskraft derartiger Wetterextreme erhöht sich als direkte Konsequenz des Meeresspiegelanstiegs (Jimenez und Sanchez-Arcilla, 1997). Höhere Wellen werden leichter die ursprüngliche Küstenlinie erreichen und auch weiter

landeinwärts vordringen. Bereits die Wasserstände des 2-m-Szenarios übersteigen die Normen heute zugelassener Küstenschutzbauten. Obwohl Großbritannien beispielsweise Schutzstrukturen besitzt, die die Wellenhöhe in Küstennähe reduzieren, bleibt es fraglich, ob diese Maßnahmen auch einen langfristigen Schutz gewähren können, wenn also die Ausnahmesituation zum Normalfall wird. Sollten sich Wassertiefen ändern oder Uferregionen steiler werden, was einen direkten Energiezuwachs der an Land kommenden Wellen zur Folge hätte, dann wären die heutigen Konstruktionen als Küstenschutzmaßnahmen nicht mehr ausreichend (Burgess und Townend, 2004).

Weitere Faktoren könnten das Risiko von Überschwemmungen signifikant erhöhen: Durch den Klimawandel bedingte Änderungen ozeanischer und atmosphärischer Zirkulationsmuster können Stürme und ihr Zerstörungspotenzial regional und lokal beeinflussen. So wird beispielsweise mit einer Zunahme der Stärke von tropischen Wirbelstürmen gerechnet (Kap. 3.1.2). Außerdem könnte die Klimaerwärmung zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufs beitragen, was einen Anstieg in der Häufigkeit und Intensität von Extremniederschlägen wahrscheinlich macht (IPCC, 2001a).

Entscheidend für die Folgen den Meeresspiegelanstiegs ist also weniger, wieviel höher der mittlere Wasserstand liegt, sondern wie häufig bestimmte Höchststände während Sturmfluten erreicht werden. Dies kann man aus einem Vergleich des erwarteten mittleren Anstiegs mit der Statistik vergangener Sturmfluten abschätzen. Demnach könnten sich die Wiederkehrperioden, d. h. die Zeitintervalle zwischen bestimmten kritischen Pegelständen, in Zukunft stark reduzieren (Lowe et al., 2001). So zeigt ein Modell des Hadley Centre für eine Region im Osten Englands, das auf der Kombination von meteorologischen Daten und einem angenommenen Meeresspiegelanstieg von 0,5 m bis 2100 basiert, eine Verkürzung der Wiederkehrperioden von Wasserstandshöchstwerten von 500 auf 12 Jahre (Lowe et al., 2001). Ähnliche Trends, beruhend auf verschiedenen Klimaszenarien, wurden für den Großraum von New York City berechnet. Demnach dürfte sich die Wiederkehrperiode einer Jahrhundertflut in den 2080er Jahren bei einem Meeresspiegelanstieg von 24–95 cm auf 4–60 Jahre verkürzen (Gornitz et al., 2002; Kap. 3.3). Bei zu kurzen Wiederkehrperioden von destruktiven Extremereignissen wäre ein Wiederaufbau geschädigter Infrastruktur nicht mehr sinnvoll; sie müsste aufgegeben werden.

Landnutzungsänderungen wie Rodung von Wäldern, Urbanisierung und die Beseitigung von Schwemmlandebenen und Feuchtgebieten, können das Risiko von Überschwemmungen zusätzlich erhö-

hen, indem sie beispielsweise die Wasserspeicherkapazität von Böden verringern (Kundzewicz und Schellnhuber, 2004). Begradigte oder zugebaute Flüsse ohne naturnahe Wälder und Feuchtgebiete haben in Extremsituationen weniger Pufferkapazitäten. Oft entscheidet das durch wasserbauliche Maßnahmen beeinflusste Strömungs- und Sedimentationsverhalten von Flüssen, ob unwitterbedingte Überschwemmungsrisiken verstärkt oder aber abgeschwächt werden.

3.2.1.3 Erosion von Küsten

Im Gegensatz zu Überschwemmungen, die eher seltene Ereignisse mit teilweise katastrophalen Folgen sind, stellt Erosion einen episodisch auftretenden Prozess dar (Hall et al., 2002). Während des Erosionsvorgangs tragen Wellen Feststoffe wie Sand, Schlamm und Gestein von der Küste ab und lagern sie größtenteils an anderen Abschnitten wieder an. Ein Anstieg des Meeresspiegels könnte diese Erosionsprozesse beschleunigen (Zhang et al., 2004; Stive, 2004). Vor allem bei einem geringen Anstieg dürfte die Bedeutung der Erosion im Vergleich zu Überflutungen größer ausfallen (Smith und Lazo, 2001).

Die Erosionsraten hängen dabei von den lokalen Gegebenheiten ab. Sollte es zur Unterspülung und dem darauf folgenden Einsturz von Steilküsten oder Küstenschutzstrukturen kommen, kann Erosion eine ernstzunehmende Gefahr darstellen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig anzumerken, dass vor allem die Anstiegsraten des Meeresspiegels für die Veränderung der Küstenmorphologie relevant sind. Wenn Sedimentationsraten mit denen des Meeresspiegelanstiegs Schritt halten können, kann sich ein neues Gleichgewicht einstellen und auf die Entwicklung des Küstenverlaufs stabilisierend auswirken. Sedimentationsprozesse haben so seit Beginn des Holozäns zur Küstenentwicklung beigetragen und vor allem während der Überflutung von Flussdeltas die Erhaltung von Landfläche gesichert (Brooks et al., 2006). Sollte sich der Meeresspiegelanstieg allerdings so stark beschleunigen, dass sich kein neues Gleichgewicht ausbilden kann oder sollten Sedimentationsraten durch Managementmaßnahmen deutlich reduziert werden, dann wird der Verlust von Küstenstreifen wahrscheinlich. Ein bekanntes Beispiel dafür ist der Nil, wo die Sedimentationsraten vor allem durch den Bau des Assuan-Staudamms verringert wurden, was zur Beschleunigung der durch Gezeiten verursachten Erosion des nördlichen Nildeltas führte (Stanley und Warne, 1998).

Viele Autoren, wie beispielsweise auch Zhang et al. (2004), beziehen sich in ihren Prognosen über die durch Meeresspiegelanstieg bedingte Erosion von Küstenbereichen auf die Bruun'sche Regel (Bruun, 1962). Diese besagt, dass Erosionsraten ungefähr 50–100-mal höher als die relativen Anstiegsraten des Meeresspiegels sind, d. h. ein Meeresspiegelanstieg von 1 m würde den Verlust eines 50–100 m breiten Küstenstreifens nach sich ziehen. Die Meinungen über die allgemeine Anwendbarkeit der Bruun'schen Regel gehen allerdings auseinander, weil diese auf der Annahme eines vereinfachten, zweidimensionalen Systems und der Ausbildung eines Sedimentationsgleichgewichts im Uferbereich beruht. Diese Voraussetzungen sind aber in realen Situationen kaum vorzufinden. Es bleibt daher festzustellen, dass zur Abschätzung der Folgen von Erosion auf den Küstenlinienverlauf aufwändigere Modelle verwendet werden sollten, die beispielsweise auch Sedimenttransporte entlang der Küste und Änderungen des Sedimentationsgleichgewichts, wie sie bei einem Meeresspiegelanstieg wahrscheinlich werden, mit einbeziehen.

3.2.1.4

Auswirkungen auf das Grundwasser

Der Meeresspiegelanstieg kann auch den Grundwasserspiegel einer Küstenregion ansteigen lassen. Dies wird zum einen durch geographische Faktoren (z. B. Höhe über dem Meeresspiegel), zum anderen durch geologische Faktoren (z. B. Beschaffenheit von Gesteins- und Bodenschichten) bestimmt.

Vor allem in Flussdeltas könnte sich ein durch den Meeresspiegel verursachter Anstieg des Grundwasserspiegels bis zu 20–50 km landeinwärts bemerkbar machen. Diese Abschätzung beruht vor allem auf der Beobachtung, dass Grundwasser entlang von Küsten oberhalb eines dichten, sich landeinwärts bewegenden Salzwasserkeils fließt. Diese Balance zwischen Süß- und Meerwasser wird physikalisch durch das Verhältnis der unterschiedlichen Wasserdichten bestimmt. Durch einen Anstieg des Meeresspiegels würde demzufolge auch das darüber liegende Grundwasser ansteigen (Barlow, 2003). Dies kann Bodenvernässung zur Folge haben. Dadurch entstehen nicht nur Auswirkungen auf die Süßwasserversorgung einer Region, sondern auch auf die Landwirtschaft (Versalzungsgefahr), die Stabilität von Fundamenten und die Sicherheit und das Funktionieren von Entwässerungs- und anderen Untergrundsystemen wie U-Bahnen.

Zusätzlich kann ein Anstieg des Meeresspiegels das Eindringen von Salzwasser in Küstenaquifere fördern (Meerwasserintrusion). Sherif und Singh

(1999) sind in Modellsimulationen zu dem Ergebnis gekommen, dass ein Anstieg von 0,5 m im Mittelmeer dazu führte, dass Salzwasser 9 km weit in die Küstenaquifere des Nildeltas eindrange. Bei einem gleichen Anstieg wäre im Golf von Bengalen dagegen nur eine Zone von 0,4 km landeinwärts betroffen. Dies hätte eine zunehmende Versalzung des Grund- und Oberflächenwassers zur Folge, mit beträchtlichen Auswirkungen auf die Landwirtschaft und Trinkwasserversorgung. Das Eindringen von Salzwasser in die Grundwasserspeicher von Küstenzonen ist bereits heute weltweit zu beobachten, beispielsweise in China und Indien (Shah et al., 2000). Durch die zunehmende Übernutzung von Süßwasservorräten in den dicht besiedelten Küstenzonen kann dieser Vorgang noch erheblich verstärkt werden.

Obwohl der Meeresspiegelanstieg die Versalzung von Trichter-mündungen von Flüssen und küstennahen Grundwasserreservoirs bewirken kann, wird dieser Prozess noch durch eine Reihe anderer Faktoren bestimmt. So kontrolliert auch das Abflussverhalten von Niederschlägen und deren Beitrag zur Grundwassererneuerung die Meerwasserintrusion in Küstengebieten. Dabei kann ein erhöhter Süßwasserabfluss der Meerwasserintrusion entgegenwirken. Meerwasserintrusion hätte lang anhaltende Folgen. Bis zur Einstellung eines auf den neuen Meeresspiegel abgestimmten Gleichgewichts wird bei manchen dieser Aquifere Hunderte bis Tausende von Jahren dauern (Barlow, 2003).

3.2.1.5

Biologische Auswirkungen

Neben Temperaturanstieg und Versauerung ist der zu erwartende Meeresspiegelanstieg ein wichtiger zusätzlicher Stressfaktor für die oft besonders artenreichen terrestrischen Küstenökosysteme bzw. küstennahen Ökosysteme. Zwei besonders relevante Ökosystemtypen sind Korallenriffe (Kap. 2.4) und Mangrovenwälder, da sie nicht nur eine große biologische Vielfalt aufweisen, sondern gleichzeitig eine wichtige Rolle für den Küstenschutz spielen. Letzteres hat die Tsunami-Katastrophe im Dezember 2004 im Indischen Ozean gezeigt: Die Flutwelle wurde an Küsten mit intakten Korallenriffen und Mangrovenwäldern abgebremst, so dass die Schäden dort weniger verheerend ausfielen (Fernando and McCulley, 2005; Dahdouh-Guebas et al., 2005; Danielsen et al., 2005).

Wie Korallenriffe auf den Meeresspiegelanstieg reagieren werden, kann aus der Rekonstruktion der Vergangenheit oder mit Modellsimulationen abgeleitet werden. Die Anpassungsfähigkeit von Korallen

war in prähistorischer Zeit sehr unterschiedlich ausgeprägt (Montaggioni, 2005). Das durchschnittliche vertikale Wachstum der Korallenriffe seit der letzten Eiszeit wird mit maximal 10 mm pro Jahr angegeben (IPCC, 2001b). Da die Wachstumsraten der Korallen aber von vielen Faktoren beeinflusst werden (Kap. 2.4) und Korallen in diesem Jahrhundert auch durch Erwärmung, Versauerung und andere Umweltfaktoren beeinträchtigt werden, können kaum Prognosen für die Anpassungsfähigkeit dieser Ökosysteme in Hinblick auf den steigenden Wasserspiegel gemacht werden.

Etwa 8% der weltweiten Küstenlinien werden heute von Mangroven gesäumt, mehr als die Hälfte der Mangrovenwälder ist allerdings bereits verschwunden (WRI, 2001). Der beobachtete Rückgang ist zum großen Teil auf die veränderte Küstennutzung durch den Menschen zurückzuführen. Dass auch der Meeresspiegelanstieg lokal einen Einfluss auf die Verbreitung von Mangroven hat, zeigt eine Studie über die Veränderungen von Mangrovengürteln im Amazonasgebiet (Cohen und Lara, 2003). Der Anstieg des Meeresspiegels wird die küstennahen Mangrovengürtel in Zukunft weiter landeinwärts drängen. Die Mangroven werden allerdings nur dort überleben können, wo ihnen neben der intensiven Landnutzung durch den Menschen genügend Raum gelassen wird. Für die Bewahrung dieser wertvollen Ökosysteme ist es deshalb dringend notwendig, Schutzgebiete zu erhalten oder neu zu schaffen, die eine breite Pufferzone auf dem Festland einschließen. Nicholls (2004) bewertete mit Hilfe des HadCM3-Modells die Sensibilität von Küstenregionen gegenüber Überflutungen unter den verschiedenen SRES-Szenarien (IPCC, 2000). Demnach hat der Meeresspiegelanstieg in jedem Szenario den Verlust von Feuchtgebieten zur Folge. Allerdings zeigt diese Studie auch, dass die direkte durch den Menschen verursachte Zerstörung von Feuchtgebieten die durch den Klimawandel bedingten Verluste übertreffen kann.

Eine zusätzliche Belastung für Küstenökosysteme sind die durch den Meeresspiegelanstieg bedingten Änderungen des Tidenhubs und der Hochwasserhöhe. Die Folge sind veränderte Wassertiefen, Licht- und Temperaturverhältnisse, Strömungsgeschwindigkeiten und eine Verschiebung der Süß- und Salzwasserverteilung. Dies kann zu physiologischen Belastungen für einige Tier- und Pflanzenarten führen und dadurch einen Habitatwechsel erfordern. Studien zeigen, dass bereits geringe Meerwasserintrusionen in Küstenseen zu großen Störungen in der Struktur und Vielfalt von Zooplanktonpopulationen führen. Demzufolge können kleine Salinitätsänderungen einen Rückgang in der Biodiversität von Küstenökosystemen zur Folge haben (Schallenberg

et al., 2003). Das Funktionieren und die Erhaltung von Ökosystemen ist also nicht nur durch Überflutungen aufgrund des Meeresspiegelanstiegs bedroht, sondern auch durch Änderungen in der Häufigkeit und Stärke von Meerwasserintrusionen.

Ein neuartiges interaktives Werkzeug zur integrierten Analyse der Folgen des Meeresspiegelanstiegs ist das DIVA-Modell (DINAS-COAST Consortium, 2004). Das Modell simuliert die Auswirkungen des lokalen Meeresspiegelanstiegs (inklusive tektonischer Hebungen und Senkungen) auf die Ökosysteme und Bevölkerung der Küstenregionen der Welt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anpassungsstrategien. Es beruht auf der Zerlegung der weltweiten Küstenlinien in mehr als 10.000 nach morphologischen und sozioökonomischen Gesichtspunkten homogene Segmente, einer eigens entwickelten umfangreichen weltweiten Datenbank und einer Reihe von gekoppelten Modulen. Für ein mittleres Anstiegsszenario des Meeresspiegels um 50 cm bis zum Jahr 2100 ergibt das Modell einen Verlust von mehr als der Hälfte der Süßwasserfeuchtgebiete im Küstenbereich, etwa 20% der Küstenwälder und einem Viertel der Mangroven.

3.2.2 Gesellschaftliche Effekte

3.2.2.1 Auswirkungen auf den Menschen

Die Vielzahl der naturräumlichen Effekte des Meeresspiegelanstiegs wird Auswirkungen auf den Menschen und die für ihn lebensnotwendigen Systeme mit sich bringen. Es ist wahrscheinlich, dass sich einige dieser Effekte gegenseitig verstärken werden, wie z. B. Überschwemmungen und Erosionsereignisse. Für die Bewohner von Küstenregionen wird der Meeresspiegelanstieg daher die größte Herausforderung des globalen Klimawandels darstellen (IPCC, 2001b).

Das Ausmaß der klimabedingten Gefährdung wird außerdem davon bestimmt, inwieweit die Ökosysteme der betroffenen Küstenregionen vorgeschädigt sind. Bereits bestehende Umweltprobleme befinden sich häufig in Wechselwirkung mit den Auswirkungen des Klimawandels. Beispielsweise können Nutzungsänderungen (Entwaldung, Besiedlung usw.) in hydrologischen Einzugsgebieten oder die Degradation von Küstenökosystemen (Korallensterben durch Verschmutzung des Meerwassers, Abholzung von Mangrovenwäldern zur Gewinnung von Baumaterial und Flächen für Aquakulturanlagen usw.) die Gefahr von Überschwemmungen erhöhen.

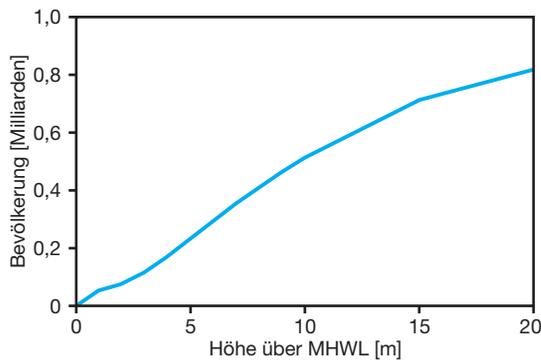


Abbildung 3.2-5

Bevölkerung, die im Jahr 1995 unterhalb einer bestimmten Höhe über der mittleren Hochwasserlinie (MHWL) lebte. Quelle: Brooks et al., 2006

In Großstädten beobachtet man darüber hinaus, dass Landmassen teilweise bis unterhalb des Meeresspiegels absinken. Die physische Auflast von Gebäuden und Infrastruktur trägt dazu ebenso bei wie eine intensiv urbane Wirtschaftsweise in Verbindung mit Grundwasserentnahme, Kanalisierung und Bautätigkeit. Nicholls (1995) schätzt, dass derartige Absenkungsraten lokal im Extremfall bis zu 1 m pro Jahrzehnt betragen können. Durch den Meeresspiegelanstieg steigt das Überflutungsrisiko für diese Regionen dann zusätzlich. Die Überlagerung mehrerer Prozesse – das Verschwinden natürlicher Barrieren, das Absinken von Landmassen bis unterhalb des Meeresspiegels und der Anstieg des Meeresspiegels als Folge des Klimawandels – erhöht das Risiko für den Menschen (Nicholls, 2003).

Beruhend auf den Bevölkerungszahlen von 1995 leben derzeit 60 Mio. Menschen innerhalb der 1-m-Zone und 275 Mio. Menschen innerhalb der 5-m-Zone über dem mittleren Meeresspiegel. Wenn Prognosen über das Bevölkerungswachstum in diese Schätzungen einbezogen werden, steigen die Zahlen bis Ende des 21. Jahrhunderts auf 130 Mio. (1-m-Zone) bzw. 410 Mio. Menschen (5-m-Zone; Nicholls et al., 2005). Die neuere Studie von Brooks et al. (2006) kommt zu ähnlichen Ergebnissen (Abb. 3.2-5).

Wie die gefährdete Bevölkerung letztendlich mit den Herausforderungen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs umgehen wird, stellt einen komplexen und dynamischen Prozess dar. Abwanderungen werden von der jeweiligen Situation vor Ort bestimmt und können von der geplanten Emigration, basierend auf Risikoabwägungen und ökonomischen Überlegungen, bis hin zu überstürzten Fluchtbewegungen infolge von Überschwemmungen, Sturmfluten oder plötzlichen Erosionsereignissen reichen. Aufgrund der wahrscheinlichen Zunahme von Wetterextremereignissen werden spontane Abwan-

derungen aufgrund von Katastrophen die geplanten Abwanderungen voraussichtlich zahlenmäßig über-treffen (Brooks et al., 2006). Dies wäre vor allem dann der Fall, wenn durchgreifende Veränderungen der Landschaft eintreten und die Kosten zum Schutz der betroffenen Bevölkerung unverhältnismäßig hoch ansteigen. Menschen aus tiefliegenden Küstenregionen, vor allem Flussdeltas und kleinen Inselstaaten, sind diesbezüglich besonders bedroht (Nicholls, 2003). So zeigen Studien, dass ohne aufwändige Schutzmaßnahmen in den Verwaltungsbezirken Alexandria und Port Said in Ägypten bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,5 m ungefähr 1,5 Mio. Menschen gefährdet sind (El-Raey et al., 1999). Für Europa wird geschätzt, dass bei einem Meeresspiegelanstieg um 1 m 13 Mio. Menschen bedroht wären (EEA, 2005).

Es gibt eine Reihe von Modellsimulationen, um die Zahl der von Überflutungen gefährdeten Menschen genauer abzuschätzen. Nicholls et al. (2006) simulierten beispielsweise mit Hilfe des FUND-Modells die Folgen eines Zerfalls des westantarktischen Eisschildes und des daraus resultierenden Meeresspiegelanstiegs von 5 m über einen Zeitraum von 100 bis 1.000 Jahren, beginnend im Jahre 2030. Die Auswirkungen von Küstenschutzmaßnahmen wurden mit Kosten-Nutzen-Analysen evaluiert. In allen Szenarien erreichen erzwungene Abwanderungen zwischen 2030 und 2060 ihren Höhepunkt. Basierend auf der (extremen) Annahme eines schnellen Zerfalls des Eisschildes innerhalb von 100 Jahren werden insgesamt 15 Mio. Menschen zur Abwanderung gezwungen sein. Das Maximum der Abwanderung liegt bei 350.000 Menschen pro Jahr. Allerdings machen diese Zahlen nur 2–3% der insgesamt gefährdeten Menschen aus, weil als Annahme zugrundegelegt wird, dass groß angelegte Küstenschutzmaßnahmen durchgeführt werden. Bei der Abschätzung von Überschwemmungsrisiken kommen Hall et al. (2005) zu dem Schluss, dass sich in Großbritannien in den 2080er Jahren unter den A1- und A2-SRES-Szenarien des IPCC die Zahl der bedrohten Menschen, verglichen zu 2002, von 0,9 Mio. auf 1,8 Mio. Menschen verdoppeln wird.

„MEERESFLÜCHTLINGE“

Ob Küstenbewohner, die ihre Heimat aufgrund klimabedingter Umweltveränderungen verlassen mussten („Meeresflüchtlinge“), zurückkehren oder sich weiter von der Küste entfernt ansiedeln, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Einerseits wird die Entscheidung davon beeinflusst, ob Küstenschutzstrukturen aufgebaut werden und wie wirksam bzw. vertrauenswürdig diese sind. Andererseits spielt aber auch das Verhalten lokaler und regionaler Regierungen eine Rolle, wenn diese etwa von einer

Rückkehr in evakuierte Gebiete abrat oder dies sogar unterbinden (Brooks et al., 2006). Aus den Wechselwirkungen dieser Faktoren und Maßnahmen wird sich letztendlich die tatsächliche Zahl der Meeresflüchtlinge bestimmen.

In jedem Fall müssen Meeresflüchtlinge langfristig wieder an anderen Orten angesiedelt werden und stellen die Politik so vor neuartige Herausforderungen. Dies gilt vor allem für die Bewohner einiger tief liegender Atolle wie z. B. den Malediven, Marshall Inseln, Kiribati, Tuvalu oder Tokelau. Diese Inselstaaten, mit einer Gesamtbevölkerung von über 500.000 Menschen (CIA, 2005), liegen durchschnittlich nur 2 m über dem Meeresspiegel und laufen deshalb Gefahr, durch den Klimawandel unbewohnbar zu werden oder völlig zu verschwinden. Ihre Bewohner sind einer stets wachsenden Gefahr von Versalzung und Trinkwasserknappheit und erhöhten Sturm- und Überschwemmungsrisiken ausgesetzt, selbst wenn die 1-m-Leitplanke (Kap. 3.3) erfolgreich eingehalten werden sollte (Barnett und Adger, 2003). Diese Faktoren wirken sich bereits heute aus: Die ersten Umsiedlungen auf höher gelegene Gebiete fanden bereits im Dezember 2005 auf der pazifischen Insel Vanuatu statt. In diesem Fall war die Umsiedlung des Dorfes Lateu durch die immer kürzer werdenden Abstände zwischen Sturmfluten notwendig geworden. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) betrachtet diese Umsiedlung als die wahrscheinlich erste formal registrierte Maßnahme dieser Art, die sich direkt aus den Folgen des Klimawandels ergibt (UNEP, 2005).

Es gibt bereits offizielle Programme, die sich mit dem Problem der Meeresflüchtlinge beschäftigen. Neuseeland hat mit den Regierungen von Tuvalu, Fiji, Kiribati und Tonga innerhalb der „Pacific Access Category“ Einwanderungsregelungen für deren Bewohner getroffen. Jedes Jahr erhält eine bestimmte Anzahl von Flüchtlingen, deren Status sich direkt aus den Folgen des Klimawandels ergibt, eine Aufenthaltserlaubnis für Neuseeland. Allerdings ist die Erteilung einer solchen Aufenthaltserlaubnis an eine Reihe Bedingungen geknüpft, die derzeit die Älteren und Armen noch ausschließt (Friends of the Earth, 2005). Es bedarf hier also einer völkerrechtlichen Regelung, die das Recht der Meeresflüchtlinge auf Aufnahme in anderen Staaten festschreibt (Kap. 3.4.2.3).

BEDROHUNG MENSCHLICHER GESUNDHEIT

An der Küste bedrohen vor allem Sturmfluten und Überschwemmungen das Leben und die Gesundheit vieler Menschen. Bereits heute sind insgesamt 75 Mio. Menschen in Küstenregionen von sturmbedingten Überschwemmungen bedroht. Nimmt man ein mittleres Klimawandelszenario mit einem

Meeresspiegelanstieg von 0,4 m bis zu den 2080er Jahren an, so wird diese Zahl schätzungsweise auf 200 Mio. ansteigen (IPCC, 2001b; Patz et al., 2005).

Bei der Bewertung der gesundheitlichen Folgen von Sturmfluten und Überschwemmungen lässt sich zwischen deren direkten, mittel- und langfristigen Auswirkungen unterscheiden. Unter direkten Auswirkungen versteht man diejenigen, die unmittelbar während des Ereignisses auftreten und durch das Einwirken des Hochwassers ausgelöst werden. Dazu zählen Todesfälle und Verletzungen, die auf Ertrinken und den Aufprall auf harte Gegenstände zurückzuführen sind, Unterkühlung und Herzstillstand (WHO, 2002). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) berechnete in diesem Zusammenhang, dass das relative Risiko im Jahr 2030 durch Überschwemmungen in Küstengebieten der EUR-B-Region getötet zu werden 6,3-mal höher sei als in den Basisjahren 1980–1999 (McMichael et al., 2004). Zu den davon betroffenen Staaten der EUR-B-Region zählen einige der ehemaligen Sowjetrepubliken, mehrere Balkanländer, sowie die Türkei, Polen und die zukünftigen EU-Staaten Bulgarien und Rumänien.

Die mittelfristigen Auswirkungen von Überschwemmungen äußern sich vor allem in der Zunahme übertragbarer Krankheiten, verursacht durch die Aufnahme von oder den Kontakt mit kontaminiertem Wasser (z. B. Cholera, Hepatitis A, Leptospirose) oder Atemwegsinfektionen aufgrund überfüllter Unterkünfte (IPCC, 2001b). Das Fehlen funktionierender sanitärer Einrichtungen und einer öffentlichen Gesundheitsversorgung erhöht in ärmeren Ländern diese Risiken noch zusätzlich. Beispielsweise gehörten nach der Flutkatastrophe 1988 in Bangladesh Diarrhoe und Atemwegsinfektionen zu den häufigsten Krankheiten, und die wässrige Diarrhoe wurde zur häufigsten Todesursache für alle Altersgruppen unter 45 Jahren (Siddique et al., 1991).

Längerfristig gesehen können die Folgen des Meeresspiegelanstiegs dazu beitragen, die Häufigkeit und Verteilung von Krankheitsüberträgern zu beeinflussen. So wird sich die Überflutung von Küstenregionen auf das Vorkommen von in Brackwasser brütenden Mücken auswirken, z. B. auf die Malariaüberträger *Anopheles subpictus* und *A. sundaicus* in Asien. Überflutungen könnten aber auch die natürlichen Lebensräume von Krankheitserregern zerstören, wie beispielsweise des EEE-Virus (östliches Pferde-Enzephalitis-Virus) das in Süßwasserfeuchtgebieten entlang der Küsten der USA zu finden ist (IPCC, 2001b).

Zusätzlich stellen der Meeresspiegelanstieg und die Folgen von Sturmfluten und Überschwemmungen auch eine Bedrohung der Trinkwasser-

versorgung und Nahrungssicherheit dar. Zum einen ist hier die zunehmende Versalzung von Süßwasserreservoirs zu nennen, die neben der Trinkwassergewinnung auch die landwirtschaftliche Produktivität in Küstennähe beeinträchtigen kann. Zum anderen können Überschwemmungen zu beträchtlichen Ernteaussfällen führen, so wie bei der Flut 1998 in Bangladesch, wo der Ausfall der Reisernte über die Hälfte der landwirtschaftlichen Verluste insgesamt ausmachte und sich auf nur 24% des erwarteten Ertrages der landwirtschaftlichen Jahresproduktion belief. Nahrungsmittelknappheit und Unterernährung sind mögliche Folgen (del Ninno et al., 2001; WHO, 2002).

Bedingt durch den Schock und die Folgen der Ereignisse können Überschwemmungen auch langfristige Auswirkungen auf die psychische Verfassung der betroffenen Menschen haben. Der Verlust von Familienmitgliedern und Freunden, sozialen Netzwerken, Eigentum und Arbeit kann zu posttraumatischem Stresssyndrom führen. Dieses äußert sich in Angstgefühlen, Depressionen, psychosozialen Störungen und kann sogar zu einem Anstieg von Selbstmordraten führen. Es muss damit gerechnet werden, dass derartige psychische Probleme noch Monate bis Jahre nach einem solchen Ereignis auftreten können (WHO, 2002).

Laut einer Studie der Weltgesundheitsorganisation sterben bereits heute jährlich mehr als 150.000 Menschen an den Folgen des Klimawandels (WHO, 2002). Ursache hierfür sind vor allem die Zunahme an Durchfallerkrankungen, Malaria und Unterernährung. Bis zum Jahr 2030, so die Schätzung der WHO, wird sich das zusätzliche Gesundheitsrisiko durch den Klimawandel weltweit mehr als verdoppeln (McMichael et al., 2004). Dabei wird eine starke Zunahme des relativen Überschwemmungsrisikos prognostiziert, mit geringeren Zuwächsen bei Malaria, Unterernährung und Durchfallerkrankungen. Diese geringeren relativen Veränderungen können aber eine weitaus höhere Krankheitsbürde verursachen. Also scheinen Infektionskrankheiten ein größeres Risiko für den Menschen darzustellen als die direkten Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs. Allerdings vernachlässigen die heutigen Modelle

noch mögliche Wechselwirkungen zwischen diesen verschiedenen Gesundheitsrisiken.

3.2.2.2

Volkswirtschaftliche Schäden

Auch die monetäre Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf Küstengebiete stellt die Wissenschaft vor große Herausforderungen. Um Aussagen über die Gesamtkosten der meeresbezogenen Auswirkungen des Klimawandels treffen zu können, bedarf es detaillierter, räumlich hochaufgelöster Analysen, die Aussagen über die zu erwartenden Schäden erlauben. Diese Schäden können in vielfältiger Form auftreten und reichen von Vermögensschäden bis hin zu Kosten aus dem Verlust an Menschenleben oder aus dem Verlust biologischer Vielfalt und von Ökosystemleistungen. Tabelle 3.2-1 gibt einige Beispiele für die von einem Meeresspiegelanstieg betroffenen Bereiche und die zu erwartenden Schäden und Verluste.

Um potenzielle Sachschäden und Auswirkungen auf den Menschen zu beurteilen, ist zu berücksichtigen, dass zahlreiche Megastädte von einem Meeresspiegelanstieg betroffen sein werden. Von den weltweit 20 Megastädten befinden sich 15 in exponierter Lage zum Meer (berechnet nach Daten von Klein et al., 2002; UN, 2004), darunter Tokio, Mumbai und New York. Da mit der Entwicklung von Megastädten oft eine Verschärfung bereits bestehender, lokaler Umweltprobleme einhergeht, wie z. B. das Absinken des Grundwasserspiegels, mangelt es diesen Gebieten an natürlichen Pufferkapazitäten, um die Folgen des Meeresspiegelanstiegs auszugleichen. Beispielsweise könnte hier die Trinkwasserversorgung gefährdet werden. Diese zählt neben Verkehrs-, Telekommunikations- und Energieversorgungsnetzen, dem Notfall-, Rettungs- und Gesundheitswesen, aber auch dem Einzelhandel, der öffentlichen Verwaltung, Finanz- und Rechnungswesen zur so genannten kritischen Infrastruktur (Bruneau et al., 2003; DRM, 2006). Darunter versteht man Einrichtungen, die eine Erfüllung lebenswichtiger Bedürfnisse und die Sicherheit der Bevölkerung garantieren, die Ord-

Tabelle 3.2-1

Klassifizierung der durch einen Meeresspiegelanstieg verursachten Schäden. Quelle: verändert nach Fankhauser, 1995

Bereiche	Schäden oder Verluste
Infrastruktur	Gebäude, Verkehrsinfrastruktur (Straßen, Bahnnetze, Häfen, Flughäfen), Energieinfrastruktur, Küstenschutzstrukturen
Wirtschaftliche Sektoren	Fischerei, Landwirtschaft, Forstwirtschaft (Holzgewinnung in Mangrovenwäldern), Tourismus, Transport/Verkehr
Menschliches Wohlbefinden	Sterblichkeit, Verbreitung von Krankheiten, Flucht/Migration, Verlust von Landschaften und Kulturgütern
Ökosysteme	Leistungen der Küstenökosysteme, biologische Vielfalt einschließlich einiger artenreicher Inseln, Störung des Gleichgewichts von Süß- und Salzwasser

nung aufrechterhalten und eine minimale öffentliche Grundversorgung oder eine funktionsfähige Wirtschaft sicherstellen (Kommission der Europäischen Gemeinschaft, 2005a). Ein Ausfall oder eine Beeinträchtigung dieser Infrastruktur kann Versorgungsengpässe und erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit nach sich ziehen (BBK, 2006) und sich sogar destabilisierend auf eine gesamte Region auswirken. 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 (Brooks et al., 2006).

Zu den Kosten aus Sachschäden oder Produktionsausfällen kommen noch die Kosten, die sich aus dem Verlust von Ökosystemleistungen ergeben. So können beispielsweise die negativen Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf Küstenökosysteme lokale Fischereierträge beeinträchtigen (Brooks et al., 2006). In vielen, vor allem ärmeren Ländern hängt die Sicherung des Lebensunterhalts von Küstenbevölkerungen oft direkt von dem Ertrag dieser Ökosysteme ab. Eine Störung des Süßwasserhaushalts, z. B. durch Meerwasserintrusion (Kap. 3.2.1.4) kann zudem Auswirkungen auf die Landwirtschaft haben. Schon jetzt werden gemeinnützige Anbauflächen auf den Inseln Tuvalu durch eine zunehmende Versalzung des Grundwassers geschädigt (Friends of the Earth, 2005). Neben den Risiken in der Nahrungsmittelversorgung führt dies auch zu einem Rückgang der lokalen ökonomischen Aktivität.

In die Gesamtkosten des Klimawandels gehen zum einen die monetär bewerteten Schäden ein, die der Klimawandel verursacht, und zum anderen die Kosten der Anpassung an den Klimawandel. Dabei sollten dem ökonomischen Effizienzprinzip entsprechend solche Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden, bei denen die Nutzen der Maßnahmen (in Form von vermiedenen Schäden) die Kosten (beispielsweise in Form von Bau- und Instandhaltungskosten von Dämmen) übersteigen. In anderen Fällen erscheint es unter streng ökonomischen Gesichtspunkten sinnvoll, auf Anpassung zu verzichten und klimawandelbedingte Schäden hinzunehmen. Das kosteneffiziente Strategien-Portfolio hängt wiederum von den ökologischen und sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen einer Region ab, die sich ebenfalls im Zeitverlauf verändern. Für die Planung von Strategien und für die Entscheidungsfindung ist wichtig, dass die verbundenen Kos-

ten- und Nutzenkategorien möglichst vollständig erfasst und berücksichtigt werden (Kap. 3.4.1.1).

Um die weltweiten Gesamtkosten des Klimawandels ermitteln zu können, bedarf es einer Vielzahl von Daten. Vor allem für die Aufstellung und Bewertung potenzieller Schäden sind detaillierte Informationen notwendig. Diese sind jedoch häufig nicht umfassend und insbesondere in Entwicklungsländern nur rudimentär vorhanden. Wie in Tabelle 3.2-1 gezeigt, treten Schäden in vielfältiger Form auf und schließen auch Güter ein, die nicht am Markt gehandelt werden, also keinen Preis haben. Dies trifft vor allem auf den Verlust von Ökosystemleistungen und biologischer Vielfalt zu, welche mit Hilfe von Befragungen und ökonomischen Schätzmethode monetär quantifiziert werden können. Allerdings bestehen hier große Unsicherheiten.

Menschen werden die Auswirkungen des Klimawandels nicht einfach hinnehmen, sondern sich durch Anpassungsmaßnahmen vor Schäden schützen. Daher muss im Rahmen ökonomischer Analysen eine kosteneffiziente Strategienkombination ermittelt werden. Hierzu werden Modelle benötigt, welche sowohl den Klimawandel als auch die Entwicklung der Volkswirtschaften weltweit simulieren. Einige solche Modelle existieren zwar bereits (Fankhauser, 1995; Yohe et al., 1999; Darwin und Tol, 2001), sie basieren aber auf stark vereinfachenden Annahmen, weshalb globale Kostenschätzungen derzeit nur in sehr grober Form möglich und damit von sehr beschränkter Aussagekraft sind. Auf der Basis von Daten aus regionalen Vulnerabilitätsanalysen lassen sich die meeresbezogenen Kosten des Klimawandels aber zumindest für kleinere Räume genauer spezifizieren (z. B. Kasten 3.4-2).

3.3

Leitplanke: Meeresspiegelanstieg

3.3.1

Leitplankenvorschlag

Der WBGU schlägt folgende Leitplanke vor: Der absolute Meeresspiegelanstieg sollte dauerhaft (auch über viele Jahrhunderte) nicht mehr als 1 m betragen, und die Anstiegsgeschwindigkeit sollte stets unter 5 cm pro Jahrzehnt bleiben. Zum Vergleich: Der anthropogene Meeresspiegelanstieg beträgt bisher insgesamt 20 cm, die Rate liegt aktuell bei 3 cm pro Jahrzehnt (Kap. 3.1).

3.3.2 Begründung

Die vorgeschlagenen Werte beruhen auf der Einschätzung des WBGU, dass ein höherer oder rascherer Anstieg des Meeresspiegels mit großer Wahrscheinlichkeit zu nicht mehr vertretbaren Schäden und Verlusten für Mensch und Natur führen würde. Wie bei Leitplanken generell der Fall, enthält diese Einschätzung eine normative Wertung und ist nicht allein aus wissenschaftlichen Prinzipien ableitbar (Kasten 1-1), zumal über die konkreten Folgen des Meeresspiegelanstiegs nach wie vor erhebliche Unsicherheiten bestehen. Der WBGU hofft, mit diesem Vorschlag eine breite gesellschaftliche Diskussion über ein akzeptables Ausmaß des Meeresspiegelanstiegs sowie weitere Forschung über dessen Folgen anregen zu können.

Wie bei der Klimaschutzleitplanke des WBGU zum globalen Temperaturanstieg (2°C insgesamt sowie nicht mehr als $0,2^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt; Kasten 1-1) hängen auch beim Meeresspiegelanstieg die Folgen sowohl vom Gesamtwert als auch von der Rate ab. Die Auswirkungen auf langfristig unbewegliche

Strukturen wie etwa Städte oder Weltkulturerbestätten hängen mehr vom Absolutwert ab, während die Anstiegsrate eher für dynamische Systeme wichtig ist, wie etwa Ökosysteme, Strände oder einige Korallenatolle, die sich in gewissem Ausmaß anpassen können. Zwischen beiden – Gesamtwert und Rate – gibt es dabei einen jeweils unterschiedlichen Trade-off, in dem Sinne, dass ein höherer Absolutwert bei einer geringeren Rate toleriert werden kann, während die maximale Rate bestenfalls kurzzeitig tolerabel wäre.

ABSOLUTER ANSTIEG

Um eine absolute, auch langfristig nicht zu überschreitende Meeresspiegelleitplanke zu begründen, müssen die Konsequenzen eines womöglich sehr langsamen Meeresspiegelanstiegs betrachtet werden. Der WBGU hält nach dem jetzigen Wissensstand einen Anstieg um mehr als 1 m für unvermeidbar, weil auch bei einer sehr langen Anpassungszeit schwerwiegende Konsequenzen kaum abzuwehren wären. Dies betrifft z. B. eine ganze Reihe küstennaher Megastädte, wie New York, Lagos oder Kinshasa.

New York City besteht aus mehreren Inseln und Halbinseln und hat etwa 1.000 km Küstenlinie

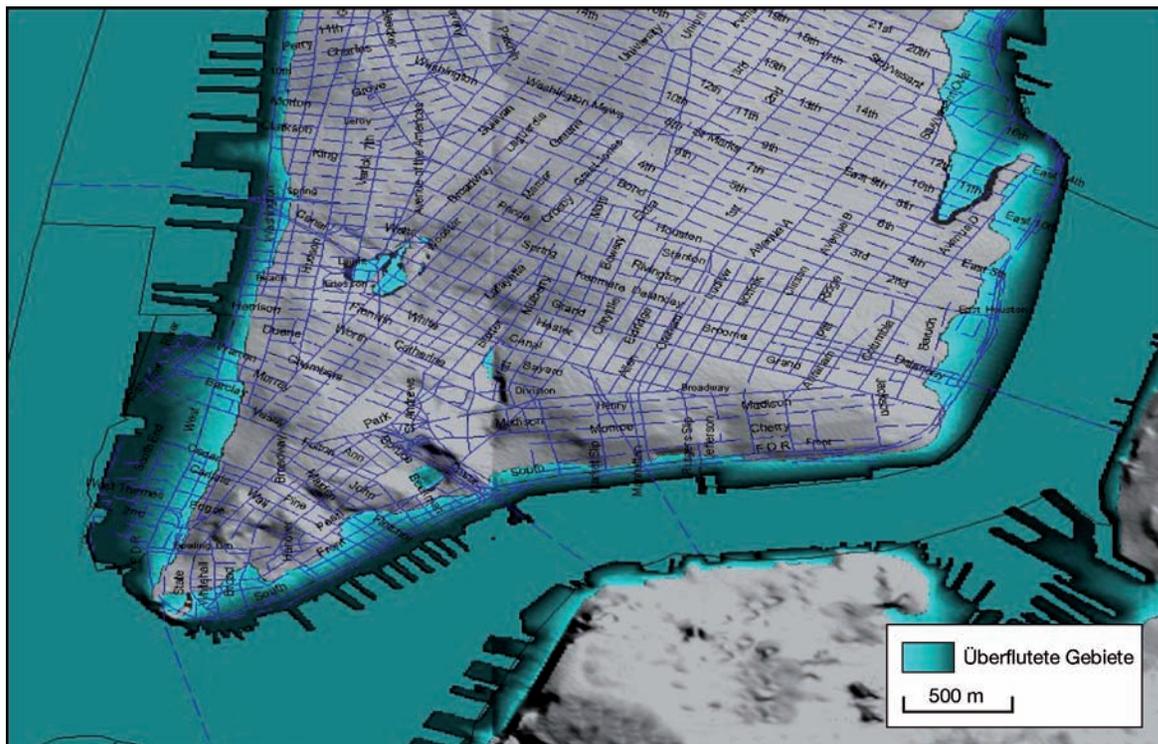


Abbildung 3.3-1

Überflutete Gebiete (blau) im südlichen Manhattan (New York) bei einer beim derzeitigen Meeresspiegel statistisch einmal pro Jahrhundert auftretenden Sturmflut. Bei einem Meeresspiegelanstieg um 1 m würde eine derart hohe Sturmflut etwa alle vier Jahre auftreten.

Quelle: Rosenzweig und Solecki, 2001; Daten nach USGS, U.S. Army Corps of Engineers, Marquise McGraw, NASA GISS

(Bloomfield et al., 1999). Abbildung 3.3-1 zeigt die Überschwemmung im südlichen Manhattan, die bei heutigem Meeresspiegel bei einer „Jahrhundertflut“ (Wasserpegel 3 m über normal) auftreten würde. Hier wäre mit massiven Schäden zu rechnen, mit Überschwemmung von wichtiger Infrastruktur bis hin zu einigen U-Bahnstationen. Bei einem Meeresspiegelanstieg um 1 m würde diese Sturmfluthöhe statistisch nicht mehr einmal im Jahrhundert, sondern alle vier Jahre erreicht. Eine Jahrhundertflut würde dann entsprechend weiter in die Straßen von Manhattan vordringen.

Ähnliche Sturmflutprobleme sind auch in anderen Städten sowie in großen Flussdeltas zu erwarten (z. B. am Gelben Fluss, Yangtze, Ganges-Brahmaputra, Mississippi oder Nil). In Entwicklungsländern sind in diesen gefährdeten Gebieten häufig arme Bevölkerungsgruppen konzentriert.

Der IPCC hat bereits in seinem ersten Bericht eine Reihe von Inselstaaten genannt, die durch den Meeresspiegelanstieg erheblich bedroht wären. Viele kleine Inselstaaten würden bei einem Anstieg von 1 m bereits einen signifikanten Teil ihrer Landfläche verlieren (IPCC, 1990). Ein Teil der Inseln drohen bei einem solchen Anstieg durch Sturmfluten unbewohnbar zu werden. Zu den betroffenen Inselstaaten gehören beispielsweise die Malediven, Kiribati, Tuvalu und die Marshall Inseln mit rund 500.000 Menschen. Verschärft wird diese Problematik durch die verstärkten tropischen Wirbelstürme (Kap. 3.1.2). Davon wären auch die in der Karibik gelegenen Inseln Anguilla, Kaiman, Turks- und Caicosinseln sowie der Inselstaat der Bahamas, mit insgesamt 380.000 Menschen betroffen. Obwohl einige dieser Inseln Erhebungen bis zu 65 m über den Meeresspiegel aufweisen, würden Sturmfluten dort mit dem Meeresspiegelanstieg immer weiter ins Landesinnere vordringen. Bei vielen dieser Inseln befindet sich fast die gesamte Infrastruktur (z. B. Flughäfen, Straßen) direkt an der Küste.

Bei einem Meeresspiegelanstieg von über 1 m droht außerdem der unwiederbringliche Verlust von Welterbestätten. Die Kulturgüter der Vergangenheit besitzen einen „außergewöhnlichen universellen Wert“ (UNESCO, 1972). Die UNESCO hat daher 1972 das „Internationale Übereinkommen zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt“ verabschiedet, welches inzwischen von 180 Staaten unterzeichnet wurde. Ein wichtiger Bestandteil des Welterbes ist seine Universalität, es gehört allen Menschen und Völkern dieser Welt, ganz gleich auf welchem Territorium es sich befindet.

Dem Schutz dieser Welterbestätten sollte daher große Bedeutung beigemessen werden. Durch einen Anstieg von über 1 m wären beispielsweise der Itsukushima-Shinto-Schrein in Japan aus dem 12. Jahr-

hundert und der Shore-Tempel im indischen Mahabalipuram aus dem 8. Jahrhundert direkt bedroht. Beides sind wichtige religiöse Stätten und erhalten ihren besonderen Charakter durch ihre Lage am Meer. Um diese vor dem Meeresspiegelanstieg zu schützen, könnte eine potenzielle Verlegung der Denkmäler erwogen werden, was zumindest einen teilweisen Verlust bedeuten würde, da diese symbolisch und historisch in ihrer Umgebung verwurzelt sind.

Durch einen Anstieg um 1 m wären u. a. auch Venedig und St. Petersburg stark gefährdet. Die Sturmflut von 1966 setzte mit Wasserstandshöchstwerten von 2 m über normal einen Großteil Venedigs unter Wasser. Als Folge wurden nicht nur Häuser und Betriebe sondern auch wertvolle Kunstwerke zerstört (Nosengo, 2003). Auch in St. Petersburg könnte eine Sturmflut verheerende Folgen haben. So schätzt ein Mitarbeiter der European Bank of Reconstruction and Development (EBRD), dass eine durch Sturmflut bedingte Wasserstandserhöhung von 2,5 m rund 10% der Stadt überschwemmen würde, bei einem größeren Anstieg wäre sogar bis zu einem Drittel betroffen (Walsh, 2003). Als Folge dieser Gefährdungen werden derzeit umfangreiche Projekte zum Aufbau von Schutzstrukturen durchgeführt; im Falle von St. Petersburg auch mit internationaler Finanzierung.

Auch viele wertvolle Küstenökosysteme würden durch einen solchen Meeresspiegelanstieg bedroht, z. B. der Kakadu Nationalpark in Australien und die Mangrovenwälder des Sundarban Nationalparks in Bangladesh und Indien (UNESCO, 2006).

ANSTIEGSGESCHWINDIGKEIT

Die Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstiegs darf die Anpassungsfähigkeit der menschlichen Gesellschaft und die von Meeres- und Küstenökosystemen nicht überfordern.

Die Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen lässt sich an den Beispielen von Korallenriffen, Mangrovenwäldern und Stränden abschätzen. Der letzte große Anstieg des Meeresspiegels fand am Ende der letzten Eiszeit statt, zwischen 18.000 und 5.000 Jahren vor heute. Seither lag die Anstiegsrate stets unterhalb von 20 cm pro Jahrhundert, zumeist weit darunter (Walbroeck et al., 2002; Peltier, 2004). Nach dem Ende dieses großen Anstiegs konnten sich daher im Holozän Korallenriffe, Strände, Mangrovenwälder und andere Ökosysteme entlang der entstandenen stabilen Küstenlinien neu etablieren.

Das vertikale Wachstum von Korallenriffen wird mit maximal 10 cm pro Jahrzehnt angegeben (IPCC, 2001b). Bei sehr günstigen Bedingungen könnten sie also vermutlich mit einer solchen Anstiegsrate des Meeresspiegels Schritt halten. Die künftigen Wachs-

tumsraten werden allerdings durch die Versauerung und Erwärmung der Meere und andere Umweltbelastungen deutlich geringer sein (Kap. 2.4).

Die Anpassungsfähigkeit von Mangrovenwäldern und Stränden hängt stark vom Nachschub an Sedimenten ab. Ein heute bereits beobachteter Rückgang der Sandstrände entlang vieler Küsten wird als Folge des Meeresspiegelanstiegs gesehen (Leatherman, 2001). Ellison und Stoddart (1991) analysieren die Entwicklung von Mangrovenwäldern während des Holozäns und kommen zu dem Schluss, dass in einer Situation mit wenig Sedimentnachschub schon die derzeitige Anstiegsrate des Meeresspiegels die Anpassungsfähigkeit überfordert und zum Verlust von Mangrovenwäldern führen wird. Andere Autoren (Snedaker et al., 1994) argumentieren dagegen, dass bei günstigem Habitat ein Rückzug der Mangroven landeinwärts auch mit einem deutlich höheren Meeresspiegelanstieg noch Schritt halten könnte. Solch günstige Bedingungen werden jedoch in vielen Fällen nicht vorhanden sein. Das globale DIVA-Modell (Kap. 3.2.1.5) ergibt bei einem Szenario mit einem nahezu linearen Anstieg um 5 cm pro Jahrzehnt einen kontinuierlichen Verlust an Mangrovenwäldern, deren Anpassungsgrenze damit also bereits überschritten ist – bis 2100 würde so ein Viertel aller Mangrovenwälder verschwinden.

Die Szenarien des IPCC (2001a) liefern gegen Ende dieses Jahrhunderts Anstiegsraten von 3–7 cm pro Jahrzehnt, im Extremfall bis zu 13 cm pro Jahrzehnt. In Anbetracht dieser Tatsachen schlägt der WBGU als Leitplanke für eine maximale Anstiegsrate 5 cm pro Jahrzehnt vor. Dabei muss beachtet werden, dass auch die Einhaltung dieser Leitplanke nicht vor bereits erheblichen Schäden schützt, wie dies auch bei den anderen Leitplanken des WBGU der Fall ist (Kasten 1-1).

3.3.3

Umsetzbarkeit

Der aktuelle und künftig absehbare Meeresspiegelanstieg ist nahezu vollständig vom Menschen verursacht, daher ist der weitere Verlauf auch vom Menschen beeinflussbar. Grenzen werden der Kontrollierbarkeit einerseits durch die langen Zeitskalen in der Reaktion des Meeresspiegels gesetzt (Jahrhunderte), andererseits durch die schwere Vorhersagbarkeit und das möglicherweise stark nichtlineare Verhalten der großen Kontinentaleismassen. Dennoch sind die vorgeschlagenen Leitplanken nach heutigem Wissensstand durch eine geeignete Klimaschutzstrategie einhaltbar.

Eine Stabilisierung der globalen Temperatur bei 2°C über dem vorindustriellen Niveau würde nach Modellrechnungen allein durch thermische Expansion langfristig (nach 1.000 Jahren) zu einem Meeresspiegelanstieg um etwa 0,5 m führen. Dazu käme ein Anteil von Gebirgsgletschern von etwa 20 cm (Kap. 3.1.1.4). Entscheidend für die Einhaltung der Leitplanke wäre demnach, ein größeres Abschmelzen der Kontinentaleismassen in Grönland und der Antarktis zu verhindern. Weitere Forschung muss ergeben, welche Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs dazu erforderlich ist. Denkbar ist, dass dies langfristig wieder ein Absinken der Temperatur unter die 2°C-Grenze notwendig machen könnte.

Die Leitplanke der Anstiegsgeschwindigkeit würde in diesem Jahrhundert nur von der pessimistischeren Hälfte der IPCC-Szenarien (2001a) überschritten, die optimistischeren halten sie auch ohne Klimaschutzmaßnahmen ein. Zu bedenken ist allerdings, dass die derzeit beobachtete Anstiegsrate von 3 cm pro Jahrzehnt bereits deutlich über all diesen Szenarien liegt (Abb. 3.1-4). Daher muss davon ausgegangen werden, dass der IPCC (2001a) den Anstieg wahrscheinlich unterschätzt hat, und dass auch zur Einhaltung dieser Leitplanke Klimaschutzmaßnahmen erforderlich sind. Geht man von einer relativ glatten und allmählichen Veränderung der Anstiegsrate aus, wie alle Szenarien sie zeigen, würde die Einhaltung der Leitplanke der Anstiegsgeschwindigkeit einen Meeresspiegelanstieg von maximal etwa 40 cm im 21. Jahrhundert bedeuten. Dies wäre das Doppelte des bisherigen anthropogenen Meeresspiegelanstiegs.

Die Klimaschutz- und Meeresspiegelleitplanken sind eng miteinander verknüpft, da der Meeresspiegelanstieg direkt durch die globale Erwärmung verursacht wird. In den nächsten Jahrzehnten dürften die notwendigen Klimaschutzstrategien zur Einhaltung des 2°C-Ziels und zur Einhaltung der Meeresspiegelleitplanken vergleichbar und kompatibel sein. Dennoch sind diese Leitplanken wegen der Langfristigkeit des Meeresspiegelanstiegs und der Unsicherheiten im Verhalten der Kontinentaleismassen nicht redundant. Selbst wenn die Klimaschutzleitplanke eingehalten wird und sich das Klima dauerhaft um 2°C erwärmt, könnte dies bereits zum Abschmelzen des Grönlandeises und somit zur Verletzung der Meeresspiegelleitplanke führen. Daher ist denkbar, dass die Meeresspiegelleitplanke vor allem langfristig, also in kommenden Jahrhunderten, strikte Emissionsbegrenzungen notwendig macht, damit die Kontinentaleismassen stabilisiert werden.

Daher muss ein Emissionspfad eingeschlagen werden, der zu einer Stabilisierung der globalen Temperatur auf niedrigem Niveau nach 2100 führt,

möglicherweise deutlich unterhalb von 2°C über dem vorindustriellen Niveau. Die Meeresspiegelleitplanke bestimmt damit insbesondere die längerfristigen Klimaschutzziele ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts. In den kommenden Jahrzehnten stützt sie vor allem als zusätzliche Begründung das 2°C-Ziel. Sollten die Kontinentaleismassen von Grönland und der Antarktis jedoch unerwartet rasch abnehmen, könnte die Meeresspiegelleitplanke auch schon früher stärkere Klimaschutzmaßnahmen erfordern als die 2°C-Leitplanke. Sie gibt daher besonderen Anlass zu einer verstärkten Beobachtung der Eisschilde, um rechtzeitig gefährliche Entwicklungen zu erkennen.

3.4 Handlungsempfehlungen: Anpassungsstrategien entwickeln und umsetzen

In seinen bisherigen Arbeiten zur Klimapolitik hat der WBGU deutlich gemacht, dass die Priorität auf Strategien zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen liegen sollte. Selbst wenn es aber gelingt, Treibhausgasemissionen substanziell zu vermeiden und die Meeresspiegelleitplanke einzuhalten, werden sich einige Auswirkungen des Klimawandels auf Küstengebiete nicht mehr vermeiden lassen. Um diesen Auswirkungen zu begegnen, sind geeignete Anpassungsmaßnahmen erforderlich. In Bezug auf Strategien zur Anpassung an den Meeresspiegelanstieg und an Wetterextremereignisse untersucht der WBGU vor allem zwei Fragen:

1. Wie kann den zu erwartenden Zerstörungen von Infrastruktur und Siedlungen an Küsten begegnet werden?
2. Wie lassen sich die Verluste an Territorium völkerrechtlich regeln?

3.4.1 Küstenregionen an Klimafolgen anpassen

3.4.1.1 Anpassungsoptionen: Kategorisierung und Bewertung

In welchem Ausmaß die Folgen des Klimawandels zu Schäden in Küstengebieten führen und aus Gefahren Katastrophen werden, ist regional sehr unterschiedlich und abhängig von der Verwundbarkeit der betroffenen Gebiete. Diese wird von der Disposition und der Widerstandsfähigkeit der natürlichen, gesellschaftlichen, infrastrukturellen, ökonomischen, institutionellen und kulturellen Subsysteme bestimmt

(Titus et al., 1991; Klein et al., 1999). Widerstandsfähigkeit meint hierbei die Fähigkeit von Subsystemen, wiederholt Störungen aufzufangen, so dass die wesentlichen Strukturen und Abläufe aufrechterhalten werden können (Burton und Lim, 2001; Burton et al., 2002; Adger et al., 2005).

Industrieländer werden mit Gefährdungen besser umgehen können als Entwicklungsländer, weil ihnen Kapazitäten wie eine effiziente institutionelle Infrastruktur, technisches Wissen und finanzielle Ressourcen in größerem Umfang zur Verfügung stehen. So kostete der Hurrikan Andrew, ein Ereignis der Kategorie 5 gemäß der Saffir-Simpson-Hurrikanskala, 1992 in den USA 23 Menschen das Leben. Ein Taifun mit vergleichbarer Stärke, der Bangladesh im Jahre 1991 traf, führte durch weitreichende Überflutungen dagegen zu über 100.000 Toten und Millionen von Flüchtlingen (Adger et al., 2005).

Die Vielzahl von Einflussfaktoren und Wechselwirkungen macht es notwendig, Anpassungsstrategien kontextabhängig zu entwickeln. Anpassung soll dabei zwei Zwecken genügen: Der Verminderung der Schäden einerseits und der Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der bereits genannten Subsysteme andererseits. Grundsätzlich kommen drei verschiedene Anpassungsoptionen als Antwort auf die skizzierten Gefährdungen in Betracht: Schutzgewährung („protection“), qualifizierter Rückzug („managed retreat“) und Akkommodation („accommodation“) (IPCC, 2001b).

SCHUTZGEWÄHRUNG

Bei der Schutzgewährung geht es darum, die Küsten durch strukturelle Maßnahmen vor dem Meeresspiegelanstieg zu schützen. In Frage kommen „harte Maßnahmen“, wie der Bau von Dämmen, Deichen oder Sturmflutwehren und „weiche Maßnahmen“, wie die Erhaltung oder Neuanlage schützender Küstenökosysteme (z. B. Feuchtgebiete, Mangroven, Inseln) oder Sandvorspülungen als natürliche Barrieren. Harte Strukturanpassungen sind in Bau und Wartung überaus kostenintensiv. Zudem vergrößern sie den Druck auf angrenzende Ökosysteme, z. B. steigt die Gefahr des Verlusts an Feuchtgebieten. Ohne weitere Eingriffe verlagern sich Feuchtgebiete bei Überflutungen in der Regel landeinwärts. Diese Form der autonomen Anpassung wird durch den Bau von Dämmen verhindert, weil Flächen auf der Meerseite von Dämmen überschwemmt werden während sich auf der Landseite keine neuen Feuchtgebiete bilden können. Für die Küsten der USA wird geschätzt, dass hierdurch 50% aller vorhandenen Feuchtgebiete verloren gingen (Titus, 1990). Entlang der Küstenregionen der EU wurde zudem beobachtet, dass harte Strukturanpassungen Erosionsprozesse in angrenzenden Küstengebieten auslösen bzw.

beschleunigen können. Dies kann wiederum die Funktionsfähigkeit harter Schutzmaßnahmen erheblich beeinträchtigen (Kommission der Europäischen Gemeinschaft, 2005b; Brooks et al., 2006). Aufgrund der Vielzahl von Problemen, die mit harten Struktur- anpassungsmaßnahmen verbunden sind, wird heute, wenn möglich, auf weiche Maßnahmen zurückgegriffen. Weiche Strategien greifen weniger stark in die Küstenökosysteme ein und erlauben, flexibler auf das mit Unsicherheit behaftete Ausmaß des Meeresspiegelanstiegs zu reagieren. Letztendlich hängt aber die Frage nach der Effektivität von weichen und harten Maßnahmen vom naturräumlichen und gesellschaftlichen Kontext ab.

QUALIFIZIERTER RÜCKZUG

Qualifizierter Rückzug bedeutet, dass die Nutzung küstennaher Bereiche reduziert wird bzw. Gebiete vollständig aufgegeben werden. Als Strategien kommen hier die Verlagerung von Gebäuden und Siedlungen sowie die staatliche Regulierung der Nutzung vulnerabler Gebiete in Frage. Rückzug kann mittels ordnungsrechtlicher Maßnahmen durchgesetzt werden, z. B. durch die Regulierung der Landnutzung im Rahmen der nationalen Bau- und Planungsgesetzgebung. Eine andere Möglichkeit bietet das Setzen von Anreizen, welche die Entscheidung zum freiwilligen Rückzug begünstigen. Maßnahmen dieser Art veranlassen Haushalte und private Unternehmen, alle Kosten der Küstennutzung bei Investitionsentscheidungen einzubeziehen. Eine gezielte Informationspolitik durch die öffentlichen Gebietskörperschaften könnte in diesem Zusammenhang dazu beitragen, das Bewusstsein für die Tragweite von klimabedingten Risiken zu schärfen.

Im Einzelfall kann es darüberhinaus sinnvoll sein, die Umsiedlung von Menschen von der Küste in weniger gefährdete Gebiete aktiv zu unterstützen, beispielsweise über die Verteilung von Fördergeldern durch die übergeordneten Gebietskörperschaften oder im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit.

Die Frage der Umsiedlung von Gemeinden und deren Bewohnern stellt sich in Küstengebieten sehr konkret nach dem Auftreten von Naturkatastrophen, d. h. wenn Infrastruktur weiträumig zerstört ist. Es muss dann entschieden werden, ob die Prognosen für den zukünftigen Meeresspiegelanstieg sowie die Anzahl und Intensität von Wetterextremereignissen in der Zukunft einen Wiederaufbau ökonomisch sinnvoll erscheinen lassen. Die Einwohner werden umso eher in den gefährdeten Regionen bleiben, je mehr sie darauf vertrauen können, dass der Staat die Kosten von Schutzmaßnahmen mitträgt. Wenn jedoch jeder Einzelne mit den Kosten des Schutzes konfrontiert wird, verliert der Wiederaufbau an

Attraktivität und immer mehr Menschen werden sich zu einer Abwanderung in weniger gefährdete Gebiete entschließen. Um also in solchen Fällen die richtigen Anreize zu setzen, müsste die staatliche (und internationale) Wiederaufbauhilfe an eine entsprechende Abwanderungsbedingung geknüpft sein. Auch Gemeinden müssen zwischen den Anpassungsoptionen Schutz und Rückzug abwägen. Nach einer Naturkatastrophe werden sie dazu neigen, zerstörte Infrastruktur sehr rasch wieder aufzubauen, um so das öffentliche Leben zu gewährleisten. Deshalb ist es für gefährdete Gebiete von Bedeutung, schon vor dem Auftreten einer Naturkatastrophe Strategien zur Umsiedlung zu entwickeln (Brooks et al., 2006).

Trotz staatlich gesetzter Anreize zur Abwanderung und einer adäquaten Informationspolitik der öffentlichen Institutionen ist es denkbar, dass Menschen nicht freiwillig zur Umsiedlung bereit sind. Der Staat muss in einer solchen Situation entscheiden, ob er zulässt, dass die Betroffenen das Risiko von Vermögens- und Personenschäden selbstverantwortlich tragen sollen oder ob er Bevölkerungsteile zwangs- umsiedelt. Letztere Option kann allerdings erhebliches Konfliktpotenzial mit sich bringen (Kasten 3.4-1).

Staatliche Maßnahmen, die Abwanderung aus Küstengebieten fördern, sollten durch Maßnahmen ergänzt werden, die Zuwanderung von Menschen und Unternehmen begrenzen. Beispielsweise sorgt die Erhebung einer Steuer in Höhe der durch den Zuzug von Menschen in Küstengebiete verursachten gesellschaftlichen Kosten dafür, dass diese Kosten in das Wanderungskalkül des Einzelnen einfließen und somit entscheidungsrelevant werden.

Staatliche Regulierung kann also grundsätzlich die Umsiedlung von Menschen in die gewünschte Richtung unterstützen. Es ist allerdings auch möglich, dass Fehlanreize gesetzt werden, z. B. im Zusammenhang mit Eingriffen in Versicherungsmärkte. So ist eigentlich zu erwarten, dass es aufgrund der zunehmenden Überflutungen und Wirbelstürme zu ökonomischen Anpassungen auf den Versicherungsmärkten kommt: Die Prämien von Versicherungen gegen Flutschäden steigen bzw. private Versicherer ziehen sich aus dem Markt zurück. Dadurch nimmt die Attraktivität von Küsten als Siedlungsraum ab. Werden Versicherungsprämien jedoch durch staatliche Zuschüsse künstlich niedrig gehalten, wie in den USA, kommt es zu einer Verzerrung der Preise. Anreize zur Migration werden hierdurch reduziert.

AKKOMMODATION

Bei der dritten Strategie, der Akkommodation, geht es um eine Veränderung der Nutzung bzw. der Subsysteme im Hinblick darauf, dass sie den neuen Gefahren Rechnung tragen. Die in den gefährdeten

Kasten 3.4-1**Konfliktpotenzial bei Umsiedlungen**

Politische Entscheidungsträger müssen, je nach regionalem Bedrohungsszenario, die geplante Umsiedlung von Bevölkerungsgruppen in Betracht ziehen. Allerdings zeigen zahlreiche Projekte mit unterschiedlichsten sozioökonomischen und politischen Bedingungen die vielfältigen Probleme, die durch derartige Maßnahmen hervorgerufen werden können. Als Beispiele können sowohl Staudamm-, als auch Bergbau- und Infrastrukturprojekte genannt werden (z. B. Drei-Schluchten-Damm in China, Braunkohletagebau in Garzweiler, Straßenbau im Großraum Manila usw.).

Zwar handelt es sich bei der Umsiedlung von gefährdeten Küstenbewohnern in der Regel um eine Notwendigkeit zum Schutz der betroffenen Personen, es ist aber auch hier beträchtliches Konfliktpotenzial abzusehen. Beispielsweise können Entscheidungen für den Schutz wichtiger Infrastruktureinrichtungen eine Ungleichbehandlung von Bevölkerungsgruppen darstellen (die Bevölkerung nahe einer zu schützenden Einrichtung wird ebenfalls geschützt, während andere Siedlungen geräumt werden). Zudem ist mit einer Verschärfung von Nutzungskonflikten im Zielgebiet der Umsiedlung zu rechnen (Konflikte zwischen alteingesessenen Bewohnern und neuen Siedlern). Mit massiven Widerständen ist vor allem in solchen Regionen zu rechnen, in denen Umsiedlungsprogramme in der Vergangenheit als staatliche Repressionsmaßnahme genutzt wurde.

Regionen ansässigen Menschen nutzen das gefährdete Land auch weiterhin, jedoch ohne zu versuchen, es vor Überflutungen zu schützen. Dies kann beispielsweise durch die Errichtung von Katastrophenmanagementsystemen geschehen (Aufbau von Notunterkünften, Erstellung von Einsatzplänen, gezielte öffentliche Bildung und Kommunikation). Ebenso ist es möglich, die Landnutzung zu verändern, z. B. durch den Anbau von Getreidesorten, die gegenüber zunehmender Bodenversalzung bzw. Überflutung resistent sind oder durch die Umwandlung von Ackerland in Fischzuchtanlagen. Darüberhinaus beinhaltet Akkommodation bauliche Maßnahmen (erhöhte Bauweise, Keller- und Gebäudeabdichtungen).

PORTFOLIO-ANSATZ

Häufig werden diese Optionen nicht alternativ umgesetzt, sondern in Strategien kombiniert. Es wird also ein „Portfolio-Ansatz“ verfolgt, um angemessene Antworten auf die regionalen Rahmenbedingungen zu geben. Eine mögliche Strategiekombination stellt der partielle Rückzug dar, wonach allein Gebiete, die eine hohe Konzentration von Menschen, Werten und Funktionen aufweisen, geschützt werden. Die anderen Gebiete werden der Überflutung preisgegeben. Schutzmaßnahmen wären demnach schwerpunktmäßig in politischen und wirtschaftlichen Zentren, wie (Groß-)Städten und Industriegebieten, durchzuführen. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf dem Schutz der „kritischen Infrastruktur“, also derjenigen Infrastruktur, die so wesentlich ist, dass sich ihre Zerstörung destabilisierend auf das öffentliche Leben und die wirtschaftliche Aktivität eines Landes auswirken würde.

Als weitere Strategie kommt die Verknüpfung von Schutzgewährung und Akkommodation in Frage. Hierbei könnte z. B. das Ziel definiert werden, die Widerstandsfähigkeit von Küsten durch die Erhaltung von Mangrovenwäldern als natürliche Barriere zu stärken. Im Rahmen der lokalen Land-

nutzungsplanung könnten Rückzugsgebiete geschaffen bzw. erweitert werden, welche die landwärtige Verschiebung der Ökosysteme erlauben und damit die Fähigkeit zur autonomen Anpassung unterstützen würden (Nicholls, 2003).

3.4.1.2**Auswahl von Anpassungsstrategien**

Um angemessene Anpassungsstrategien für eine spezifische Region auszuwählen, können Kosten-Nutzen-Analysen herangezogen werden (Kasten 3.4-2). Dieses Instrument erfordert umfassende Informationen über den Zustand der Küstengebiete und über die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten. In diesem Kontext muss auch das Zusammenspiel zwischen Land und Meer für Wirtschaft und Industrie, Hafenanlagen, Gebäude, Grundwasser und die Entnahme von Baumaterial bewertet werden (Kullenberg, 2001; SEEDS, 2005). Die hierfür notwendigen Daten werden im Rahmen von Vulnerabilitätsstudien erhoben und ausgewertet (Burton und Dore, 2000).

Anders als Vermeidungsstrategien haben Anpassungsprojekte im Wesentlichen lokale Effekte, d. h. sie erzeugen keinen direkten globalen Nutzen für die Umwelt. Weil zudem das Ausmaß der Klimawirkungen Auswirkungen mit Unsicherheit behaftet ist, sollten zunächst No-Regret-Maßnahmen ermittelt und umgesetzt werden. Das sind solche Maßnahmen, die unabhängig von den letztlich realisierten klimabedingten Schäden insgesamt einen Vorteil für die Beteiligten erbringen. Derartige Maßnahmen werden durch die beteiligten Anspruchsgruppen eher unterstützt, weil sie den Unsicherheiten des Klimawandels Rechnung tragen und auch ohne das Eintreten von Klimaveränderungen zu wünschenswerten Ergebnissen führen. Ein Beispiel hierfür ist eine vorgeschädigte Küstenregion mit einer hohen Bevölkerungsdichte, für die ein Anstieg des Meeresspiegels

die bereits bestehenden Probleme noch verschärfen würde. Eine verbesserte Nutzungsplanung der Küstengebiete wäre hier eine angemessene Anpassungsstrategie gegenüber dem Meeresspiegelanstieg. Sie würde aber auch dann einen positiven Nettonutzen erzeugen, wenn die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels ausblieben.

Transaktionskosten, institutionelles Versagen oder der Mangel an Informationen haben in der Praxis häufig dazu beigetragen, dass solche Projekte nicht durchgeführt wurden. Anpassungsprojekte können helfen, diese Hindernisse abzubauen (Fankhauser, 1998). So könnte beispielsweise die Umsetzung eines integrierten Küstenzonenmanagements dazu beitragen, den Informationsaustausch zwischen den verschiedenen politischen Entscheidungsträgern zu verbessern und auf diese Weise Projekte leichter durchführbar zu machen.

3.4.1.3

Umsetzung von Anpassungsstrategien

Anpassung verlangt mehr als nur die Umsetzung technischer Optionen. Nicht nur, dass die Strategienauswahl von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, sondern die Strategien selbst entfalten Wirkungen auf die Subsysteme der Region, in der sie umgesetzt werden. Zudem gilt es, die Vielzahl von Verantwortlichkeiten und Interessen beteiligter bzw. betroffener gesellschaftlicher Gruppen miteinander in Einklang zu bringen (Nicholls, 2003).

RISIKOMANAGEMENT

Ein geeignetes Verfahren zur Umsetzung von Anpassungsstrategien stellt das Risikomanagement dar. Risikomanagementpläne ordnen für alle Phasen – vor, während und nach einem Ereignis – Verantwortlichkeiten zu (öffentliche versus private, kommunale, nationale bzw. internationale Ebene). Sie beschreiben, zu welchem Zeitpunkt welche Maßnahmen ergriffen werden (strategische versus taktische Maßnahmen) und auf welche Art und Weise die verantwortlichen Personen reagieren bzw. wem sie Bericht erstatten sollen (Boyd et al., 2005). In vielen Fällen wird das Thema Klimawandel von den politischen Entscheidungsträgern nicht prioritär behandelt, weswegen durch den Klimawandel bedingte Änderungen der Gefahrenlage nicht genügend berücksichtigt werden. Somit werden Risiken häufig als gering eingeschätzt und Gefährdungen für eher unwahrscheinlich gehalten, was zur Folge hat, dass vorhandene Risikomanagementpläne nicht angemessen ausgerichtet sind. Das Beispiel des Hurrikans Katrina, der im August 2005 an der US-amerikanischen Küste für Zerstörungen bisher unbekanntes Ausmaßes sorgte,

zeigt, dass mangelnde Planung die Betroffenheit von Menschen erheblich erhöhen kann.

Die Erarbeitung eines geeigneten Risikomanagements erfolgt idealerweise als Kreislaufprozess. Im Vorfeld eines Extremereignisses folgt auf die *Planungsphase* (1. Phase) – zu diesem Zeitpunkt werden präventive und reaktive Strategien erarbeitet – die *Vorbereitungsphase* (2. Phase). Maßnahmen in dieser Phase sind darauf gerichtet, die Wahrscheinlichkeit zu verringern, dass aus Gefahrenpotenzialen Katastrophen resultieren. Dies kann durch die Erstellung von Einsatzplänen, Notfalltrainings sowie durch gezielte öffentliche Informations- und Bildungskampagnen oder über Vereinbarungen zur internationalen Kooperation im Bereich Katastrophenhilfe und im Umgang mit Umweltflüchtlingen gelingen. Tritt ein Ereignis tatsächlich ein, folgt die *Reaktionsphase* (3. Phase). Hier geht es um Maßnahmen während und nach dem Ereignis. Dazu gehören die Notfallbetreuung, Maßnahmen zur Verhinderung von Folgeschäden, wie dem Ausbruch von Seuchen oder die Durchführung von Aktionen, die auf eine beschleunigte Erholung der betroffenen Gebiete gerichtet sind. Die *Wiederaufbauphase* (4. Phase) schließt den Prozess der Bewältigung eines Ereignisses ab. Alle Aktivitäten dieser Phase sind auf die Wiederherstellung der normalen Systemfunktionen, beispielsweise über die Auszahlung von Versicherungsleistungen, die Errichtung vorübergehender Notfallquartiere oder den Wiederaufbau der physischen Infrastruktur, gerichtet. Im Anschluss an die vier Phasen werden Probleme bei der Bewältigung des Ereignisses identifiziert und Fehler analysiert. Die gesammelten Erfahrungen werden dann in einer erneuten Planungsphase ausgewertet und in Form von verbesserten Strategien umgesetzt (Boyd et al., 2005).

Bei schleichenden Gefährdungen liegt der Schwerpunkt des Risikomanagements dagegen auf der regelmäßigen Bewertung des Gefährdungspotenzials und der Identifizierung der anfälligsten Individuen und Regionen. Beim Risikomanagement kommt es auf die Anpassung an sich fortlaufend verändernde Bedingungen an. Eine hohe Flexibilität der Strategien ist hierzu notwendig. Solche Strategien beinhalten insbesondere wissenschaftliches Monitoring, öffentliche Bildung und Kommunikation sowie rechtliche Regelungen (Boyd et al., 2005).

INTEGRIERTES KÜSTENZONENMANAGEMENT

Um der hohen Komplexität an Wirkungszusammenhängen gerecht zu werden, sollten Anpassungsmaßnahmen sehr breit, d. h. in allen wesentlichen Politikbereichen verankert sein. Dazu bieten sich Küstenschutzpläne und Strategien zur nachhaltigen Entwicklung an. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom „Integrierten Küstenzonenmanagement“.

Kasten 3.4-2**Küstenmanagement an der deutschen Nordsee**

Globale Prognosen über die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs sind nicht unmittelbar auf regionale oder lokale Verhältnisse übertragbar. Auch innerhalb des deutschen Küstenraums lassen sich große Unterschiede bezüglich der Gefährdungssituation und der sozioökonomischen Resilienz feststellen. Um sinnvolle Anpassungsmaßnahmen an künftige Klimafolgen treffen zu können, müssen daher szenariengestützte, kleinräumige Untersuchungen durchgeführt werden, die sowohl natürliche als auch gesellschaftliche Gegebenheiten analysieren. Solche Studien liegen für die deutsche Nordsee für zwei Regionen vor: für die Insel Sylt und für die nordwestdeutsche Küstenregion.

Aufgrund ihrer besonderen Gefährdungslage und wirtschaftlichen Produktivität wurde die Nordseeinsel Sylt im Auftrag des BMBF im Rahmen der Studie „Klimafolgen für Mensch und Küste“ analysiert. Die Insel ist ein offenes System mit negativer Sedimentbilanz, in welchem Erosionsprozesse zu einer stetigen Verkleinerung des Territoriums führen. Es wird erwartet, dass der Meeresspiegelanstieg diese Prozesse verstärkt. Die Wirtschaftsstruktur von Sylt ist durch eine stark einseitige Ausrichtung auf den Tourismus gekennzeichnet, der sich auf der Westseite der Insel konzentriert.

Zur Abschätzung der Klimafolgen bis zum Jahr 2050 wurden verschiedene Szenarien erarbeitet. Der hier vorgestellten Variante wurden ein lokaler Meeresspiegelanstieg bis zu 25 cm und Änderungen in den Windverhältnissen, dem Tidenhub und dem Seegang (d. h. Wellenhöhe, -auf- und -periode) zu Grunde gelegt. Wetterextreme und deren Auswirkungen auf naturräumliche und sozioökonomische Strukturen wurden nicht berücksichtigt, so dass hierzu noch Forschungsbedarf besteht. Die Ergebnisse der Modellsimulationen lassen veränderte Sedimenttransporte an der Westküste der Insel erwarten, welche sich negativ auf die seegangsdämpfende Wirkung eines vorgelagerten Riffs auswirken würden. Die drei Gemeinden Rantum, Hörnum und Wenningstedt wären davon wahrscheinlich am stärksten gefährdet.

Die Studie empfiehlt die Anpassung dieser Küstengebiete im Sinne eines „Portfolio-Ansatzes“, d. h. als Bündelung verschiedener Einzelstrategien. Dabei werden die drei Komponenten Schutzgewährung, qualifizierter Rückzug und Akkommodation berücksichtigt. Als optimale Strategie zum Schutz der heutigen Küstenform Sylts wurde eine Kombination aus weichen und harten Küstenschutzmaßnahmen identifiziert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den ökologisch verträglichen Sandvorspülungen, die bereits heute an der Westküste der Insel zum Einsatz kommen.

Zur ökonomischen Bewertung der vorgeschlagenen Anpassungsmaßnahmen wurde eine Kosten-Nutzen-Analyse für die Westküste der Insel erstellt. Die Anpassungskosten bestünden demzufolge vor allem aus den Kosten der zusätzlichen Sandvorspülungen. Der Gegenwartswert dieser Kosten wird für den Zeitraum bis 2050 auf 33 Mio. € geschätzt. Dem stehen die Nutzen des Küstenschutzes aus vermiedenen Verlusten an Sachwerten, Infrastruktur sowie Stränden und Dünen gegenüber. Der Gegenwartswert dieses Nutzens wird mit 381 Mio. € beziffert. Die Analyse zeigt für diesen Zeitraum demzufolge ein eindeutig positives Nutzen-Kosten-Verhältnis des Küstenschutzes für die Insel Sylt. Das untersuchte Szenario illustriert, dass die Insel Sylt gegen einen geringen Anstieg des Meeresspiegels um 25 cm

durch Sandvorspülungen voraussichtlich effizient geschützt werden kann.

Dabei ist zu beachten, dass Sylt mit seinen geographischen Besonderheiten und seiner sehr hohen, durch den Tourismus bedingten Wertekonzentration einen besonderen Fall darstellt. Die empfohlenen Anpassungsmaßnahmen sind sicherlich auf die meisten anderen Küstenregionen der Welt nicht übertragbar. So sind Sandvorspülungen nur möglich bzw. ökonomisch und ökologisch sinnvoll, wenn in der Küstenregion Sand in ausreichender Menge vorhanden ist. Zudem ergeben sich die geschätzten Anpassungskosten aus einer Küstenschutzstrategie, die hauptsächlich auf den Erosionsschutz des im Vergleich zum Strand höher gelegenen Hauptteils der Insel ausgerichtet ist. Für flachere Küstenabschnitte dürften Sandvorspülungen bei einem steigenden Meeresspiegel – insbesondere bei extremen Wetterlagen – keinen ausreichenden Schutz bieten.

Aufbauend auf den Erfahrungen der Sylt-Studie wurden im Projekt „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste“ (KRIM) nicht nur die Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für verschiedene Küstenabschnitte untersucht, sondern auch die damit einhergehenden Risiken von Wetterextremereignissen. Die Studie analysiert – ebenfalls mit einem Zeithorizont bis 2050 – künftige Klimafolgen zusammen mit den möglichen gesellschaftlichen Anpassungsmaßnahmen und deren Wirkungen.

Das KRIM-Projekt geht von einer regionalen Temperaturerhöhung um 2,8°C, einem lokalen Meeresspiegelanstieg von 55 cm und Änderungen des mittleren Tidenhubs, des Niederschlags, Seegangs und der winterlichen Windstärke und -richtung aus. Zudem werden Wetterextreme mit Wasserhöchststandswerten von +200 cm berücksichtigt.

Um die Folgen dieses Klimaszenarios für die nordwestdeutsche Küstenregion zu analysieren, wurden die daraus resultierenden Risiken von Extremereignissen berechnet und den Kosten und regionalwirtschaftlichen Folgeeffekten möglicher Küstenschutzstrategien gegenübergestellt. Alternative Strategien wurden durch Kosten-Nutzen-Analysen vergleichend bewertet. Bei der Ermittlung der potenziellen Sturmflutschäden berücksichtigte das KRIM-Projekt nicht nur ökologische Schäden sowie Vermögensschäden an Sachen und Infrastruktur, sondern auch die daraus resultierenden volkswirtschaftlichen Wertschöpfungs-, Einkommens- und Arbeitsplatzverluste. Bei der Wertermittlung von Vermögensschäden kam ein mesoskaliges Verfahren zum Einsatz, d. h. es wurde auf aggregierte Daten amtlicher Regionalstatistiken zurückgegriffen. Im Anschluss an die Wertermittlung wurden die Schäden als Funktion der Überflutungshöhen verrechnet.

Als Elemente von Schutzgewährung und Akkommodation wurden unter anderem eine Deicherhöhung und die Errichtung einer zweiten Deichlinie für das Untersuchungsgebiet Wangerland geprüft. Wangerland (Region nördlich des Jadebusens) befindet sich in einer geographisch sehr exponierten Lage mit langen zu schützenden Küstenlinien, weist dafür aber nur relativ geringe Vermögenswerte auf. Bezogen auf das angenommene Investitionsjahr 2010 (Basisszenario) wurden die Kosten einer Deicherhöhung mit 10,5 Mio. € (für eine durchschnittliche Erhöhung um 0,75 m auf 28 km Deichstrecke) und die Kosten zur Errichtung einer zweiten Deichlinie (Variante II) mit 20 Mio. € (für 17 km Deichlinie in einer Höhe von 3 m über NN) veranschlagt. Dagegen beläuft sich der Gegenwartswert der Vermögensschäden im KRIM-Klimaszenario auf 63 Mio. € (2000) – berechnet unter Einsatz der Über-

flutungssimulationen und bis zum Jahr 2050. Demzufolge ist das Nutzen-Kosten-Verhältnis für die Küstenschutzoption Deicherhöhung am Günstigsten, so dass eine Handlungsempfehlung für diese Küstenschutzmaßnahme ausgesprochen wurde.

Die Vorgehensweise des KRIM-Projekts bietet eine Leitlinie für den Umgang mit durch Klimawandel bedingten Unsicherheiten im Küstenmanagement und zeigt, wie die wirtschaftliche Zukunft von Küstenregionen prognostiziert und geplant werden könnte. Es besteht hier aber weiterhin erheblicher Forschungsbedarf: (1) höhere Meeresspiegelszenarien untersuchen, (2) bestehende Erkenntnisse über regionale Schäden und die Kosten verschiedener Vermeidungsstrategien erweitern (z. B. für die Option qualifizierter Rückzug), (3) weitere Küstenabschnitte in diese Analysen mit einbeziehen. Schließlich bedarf es einer Vielzahl derartiger kleinräumiger Untersuchungen, um verlässlichere überregionale Prognosen über die finanziellen Aus-

wirkungen des Klimawandels abzuleiten und den Bereich möglicher Handlungsoptionen besser abstecken zu können.

Die genannten Fallbeispiele zeigen, dass in diesen Fällen bei einem Anstieg deutlich unterhalb der WBGU-Meeresspiegelleitplanke die Probleme voraussichtlich durch geeignete Anpassungsmaßnahmen zu bewältigen sind. Ein Anstieg von mehr als 1 m wurde für diese Regionen leider nicht untersucht. Eine erfolgreiche Anpassung dürfte bei einem derart hohen Anstieg vielerorts nicht mehr zu vertretbaren Kosten möglich sein. Das Problem der Finanzierbarkeit würde sich dagegen in Entwicklungsländern bereits bei den hier vorgestellten Szenarien und Strategien stellen. Die genannten Anpassungsmaßnahmen können daher nicht verallgemeinert werden.

Quellen: Daschkeit und Schottes, 2002; Mai et al., 2004; Elsner et al., 2005

Im Rahmen dieses Managementsystems werden sowohl Daten über Ökosysteme als auch Daten über soziale Systeme erhoben und verarbeitet. Integriertes Küstenzonenmanagement als Instrument zur Risikosteuerung ist dabei als dynamischer Prozess zu verstehen, der auf der Grundlage einer koordinierten Strategie mit dem Ziel entwickelt und implementiert wird, ökologische, soziokulturelle und institutionelle Ressourcen so zu steuern, dass Küstengebiete nachhaltig erhalten werden und deren vielfältige Nutzung weiterhin möglich bleibt (Fankhauser, 1998; Yeung, 2001).

Eine wesentliche Herausforderung bei der Erarbeitung dieser integrierten Küstenmanagementsysteme liegt in der Koordinierung der sektoralen, konkurrierenden und gelegentlich überlappenden Kompetenzen der verschiedenen Entscheidungsebenen und Fachbereiche der Verwaltung. Häufig werden adäquate Antworten durch die starke institutionelle Fragmentierung verhindert. Der WBGU empfiehlt deshalb die Schaffung integrierter Institutionen, welche alle wesentlichen Kompetenzen bündeln sollen. Solche Institutionen würden es auch ermöglichen, die Vielfalt von Interessen der betroffenen gesellschaftlichen Gruppen aufeinander abzustimmen. Gemeinden bzw. lokale Verwaltungsebenen spielen bei der Koordinierung eine wesentliche Rolle. Ein hohes Maß an lokaler Verantwortlichkeit könnte dafür sorgen, dass vor Ort vorhandenes Wissen über Bewältigungsstrategien effizient genutzt wird, die betroffenen gesellschaftlichen Gruppen angemessen in den Planungs- und Entscheidungsprozess eingebunden werden und die Küstenmanagementsysteme auf diesem Weg von der Bevölkerung akzeptiert werden (SEEDS, 2005; WCDR, 2005; Kasten 3.4-2).

Es besteht noch ein erheblicher Nachholbedarf, Informationen über die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels systematisch in die Umsetzung von Küstenmanagementsystemen zu integrieren. Trotz fundierter naturwissenschaftlicher Erkenntnisse über die potenziellen Folgen des Klimawandels werden noch zu wenig politische Anstrengungen unternommen, um adäquate Handlungsstrategien zu entwerfen.

Vor diesem Hintergrund ist die nationale Strategie der Bundesregierung für ein integriertes Management der deutschen Küstengebiete zu begrüßen (Bundesregierung, 2006). Die Strategie berücksichtigt die Vielzahl von Akteuren und vereint die konkurrierenden Interessen an Schutz und Nutzung von deutschen Küstenbereichen in einem integrierten Gesamtkonzept. Der Klimawandel wird zwar als eine wesentliche Komponente bei der langfristigen Ausrichtung der vorsorgenden Regionalplanung betont. Angesichts der Schwere der zu erwartenden Klimafolgen ist es aber notwendig, eine verbesserte wissenschaftliche Basis für die Weiterentwicklung der Strategie zu erarbeiten. Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Meeresspiegelanstiegs und an Wetterextreme werden künftig in das Zentrum der Strategie rücken müssen.

3.4.1.4 Künftige Herausforderungen

Zwei Aspekte der Umsetzung von Anpassungsstrategien gilt es an dieser Stelle zu betonen. Die Bedeutung von proaktiven Maßnahmen und die besonderen Herausforderungen der Umsetzung von Anpassungsstrategien in Entwicklungsländern.

FRÜHWARNSYSTEME

Risikomanagementpläne umfassen sowohl proaktive als auch reaktive Elemente der Anpassung. Proaktive Elemente sind für die kosteneffiziente Gestaltung von Anpassung besonders wichtig, weil sie die Übersetzung von Risiken in Katastrophen verhindern oder zumindest verringern. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf plötzliche Gefahren. In der Vergangenheit lag die Finanzierung von Anpassungsstrategien aber schwerpunktmäßig auf reaktiven Maßnahmen, wie der Finanzierung des Wiederaufbaus zerstörter Infrastruktur nach dem Eintritt einer Naturkatastrophe (WCDR, 2005). Eine Neuausrichtung von Finanzmitteln, verbunden mit einer veränderten Prioritätensetzung bei der Auswahl geeigneter Anpassungsstrategien, scheint daher notwendig. Auf der World Conference on Disaster Reduction (WCDR) im japanischen Kobe wurde 2005 beschlossen, dass 10 % der Mittel, die bisher für Ex-Post-Maßnahmen nach Naturkatastrophen aufgewendet werden, in den nächsten 10 Jahren in die Prävention umgeleitet werden sollen (WCDR, 2005; Münchener Rück, 2005a). Die Bedeutung von proaktiven Maßnahmen unterstreicht auch der von der Konferenz verabschiedete Plan über die Förderung eines internationalen Frühwarnprogramms. Damit sollen vorhandene Lücken im Bereich der Frühwarnung aufgedeckt und geschlossen werden (UN ISDR, 2005c). Als Schlüsselemente für verbesserte Frühwarnsysteme gelten die Entwicklung von nationalen, integrierten Risikoreduktionsstrategien, der Aufbau von Risikomanagementkapazitäten sowie verbesserte technische Ausstattung und Ausbildung. Darüber hinaus sollen Strategien entwickelt werden, um die Weiterleitung von Warnungen an die Betroffenen zu verbessern. Die Aspekte der Frühwarnung reichen dabei von den technischen Kapazitäten bis hin zu Vorbereitungsmaßnahmen auf Gemeindeebene. Bisher ist jedoch gerade die Verknüpfung von Planung und Vorsorge mit adäquaten Antwortstrategien häufig mangelhaft. Auch diese Schwäche bestehender Systeme soll künftig überwunden werden. Zur Erreichung der in Kobe formulierten Ziele bedarf es vor allem der internationalen Kooperation im Datenaustausch, bei der Verbreitung von Warnungen sowie beim Aufbau institutioneller Strukturen. Zum heutigen Zeitpunkt scheint es besonders dringlich, das Problembewusstsein bei Regierungen zu erhöhen sowie Prioritäten bei der Erarbeitung geeigneter Risikostrategien festzulegen.

BESONDERE ANFORDERUNGEN IN ENTWICKLUNGSLÄNDERN

Klimawandel wird vor allem in Entwicklungsländern starke Auswirkungen entfalten. 97 % der durch Naturkatastrophen getöteten Menschen sind in die-

sen Ländern zu verzeichnen (Freeman et al., 2003). Die Schäden stellen erhebliche Hindernisse für die wirtschaftliche Entwicklung dieser Länder dar. Anpassung ist demnach gerade in diesen Regionen von Bedeutung. Allerdings fehlen neben technischem Wissen und geeigneten Institutionen vor allem finanzielle Ressourcen, um die notwendigen Maßnahmen durchzuführen. In der internationalen Gemeinschaft besteht breiter Konsens darüber, dass Entwicklungsländer bei der Bewältigung der Auswirkungen von Klimaveränderungen zu unterstützen sind. Bereits in Art. 4 Abs. 3 der Klimarahmenkonvention sagen die Vertragsstaaten den betroffenen Ländern finanzielle und technische Unterstützung zu. Im Rahmen des „Hyogo Framework for Action“, dem auf der WCDR verabschiedeten 10-jährigen Aktionsprogramm, wurde dieses Anliegen nochmals bekräftigt (WCDR, 2005). Zudem hat sich in den letzten Jahren die Erkenntnis durchgesetzt, dass Anpassungsstrategien an Naturkatastrophen und schleichende Gefahren als feste Bestandteile in die nachhaltige Entwicklungspolitik zu integrieren sind (UNFCCC, 1992; UN ISDR, 2005a, b).

3.4.1.5 Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen in Entwicklungsländern

Um Entwicklungsländer in ihrer Anpassung an die allgemeinen Folgen des Klimawandels finanziell zu unterstützen, stellen verschiedene internationale Finanzierungsinstitutionen auf multilateraler Ebene Transferleistungen bereit.

INTERNATIONALE FONDS

In den letzten Jahren wurden internationale Finanzierungsfonds eingerichtet, die Anpassungsmaßnahmen in Entwicklungsländern fördern. Innerhalb der Klimarahmenkonvention wurden bisher drei Fonds geschaffen, die Mittel zur Anpassung an den Klimawandel generell, also nicht speziell meeresbezogen, bereitstellen: Der Special Climate Change Fund (SCCF), der Least Developed Countries Fund (LDCF) und der Adaptation Fund (GEF, 2005b).

Aufgabe des SCCF ist explizit die Finanzierung von Anpassungsprojekten und Technologietransfer. Bis Ende 2004 verzeichnete der Fonds freiwillige Einzahlungen der OECD-Länder und weiterer Industrieländer in Höhe von 34,7 Mio. US-\$. Seit Anfang 2005 ist er in der Lage, Projekte effektiv zu unterstützen.

Der LDCF unterstützt schwerpunktmäßig Entwicklungsländer bei der Erstellung und Umsetzung von National Adaptation Programs of Action (NAPA). NAPA sollen jene Felder identifizieren, in

denen der größte Handlungsbedarf in Bezug auf Anpassung besteht. Von den bisher eingezahlten 32,5 Mio. US-\$ wurden für die Erstellung von NAPA bereits 11 Mio. US-\$ ausgegeben.

Der Adaptation Fund schließlich wurde im Rahmen der Umsetzung von Art. 12, Abs. 8 des Kioto-Protokolls eingerichtet. Haupteinnahmequelle des Fonds ist eine Sonderabgabe auf CDM-Projekte in Höhe von 2% des Zertifikatpreises. Erst im Jahr 2008, d. h. dem Beginn der ersten Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls, ist mit Auszahlungen aus diesem Fonds zu rechnen. Eine solche faktische Besteuerung von Vermeidungsprojekten ist wegen des Einnahmeneffekts zu begrüßen, wegen des Lenkungseffekts allerdings sehr kritisch zu sehen.

Daneben stellt die Global Environmental Facility (GEF) Mittel für Projekte im Schwerpunkt Klimawandel bereit. Der Fokus liegt dabei allerdings nicht auf Anpassungs- sondern auf Vermeidungsprojekten.

EFFIZIENTER EINSATZ VON MITTELN DER ENTWICKLUNGSZUSAMMENARBEIT

Neben diesen Fonds leisten die internationalen Geber im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit finanzielle Hilfe an von Naturkatastrophen betroffene Entwicklungsländer. In den letzten Jahren ist z. B. der Anteil von Mitteln, welche die Weltbank zur Bewältigung von Folgen aus Naturkatastrophen wie tropischen Stürmen zur Verfügung gestellt hat, deutlich von 3% auf 8% des Weltbank-Portfolios gestiegen (Freeman et al., 2003). Es werden also zunehmend Finanzmittel in Projekten gebunden, die nicht dem originären Ziel der Förderung von wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung dienen.

Wenn die internationale Entwicklungszusammenarbeit dazu dienen soll, den Aufbau von Anpassungskapazitäten in Entwicklungsländern zu unterstützen, dann müssten Hilfeleistungen in stärkerem Maße als bisher für präventive Strategien eingesetzt werden, wie z. B. den Aufbau von Frühwarnsystemen. Eine solche teilweise Umschichtung von der nachsorgenden Hilfe hin zur Gefahrenprävention gewinnt gerade vor dem Hintergrund einer erwarteten Verstärkung klimabedingter Extremereignisse an Bedeutung. Um Effizienzverluste zu vermeiden, sollte darüber hinaus die Entwicklungszusammenarbeit mit den Politiken der beschriebenen speziellen Anpassungsfonds abgestimmt werden.

Gleichzeitig sollte die Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen nicht das eigentliche Ziel der Entwicklungszusammenarbeit aus den Augen verlieren. Wirtschaftliche und soziale Entwicklung stellt an sich immer noch die beste Anpassungsstrategie dar, weil sie in der Regel die Anpassungskapazitäten eines Entwicklungslandes erhöht und damit dessen Vulne-

rabilität gegenüber Auswirkungen des Klimawandels reduziert (Schelling, 1992).

ERGÄNZENDE INSTRUMENTE: SCHWERPUNKT MIKROVERSICHERUNG

Der Finanzierungsbedarf für Anpassungsmaßnahmen kann nicht seriös quantifiziert werden, da auch nur annähernd verlässliche Schadensschätzungen fehlen (Kap. 3.2.2.2). Dennoch ist davon auszugehen, dass die oben erwähnten Mittel nicht ausreichen werden und dass daher eine möglichst breite Absicherung der Finanzierung von Anpassungsmaßnahmen sinnvoll ist. Deshalb kommen neben den bestehenden Finanzierungsinstrumenten und der Reallokation vorhandener Mittel auch neue Finanzierungsmechanismen in Frage (WBGU, 2002).

Ein weiteres Instrument ist die Förderung von Mikroversicherungen zur Risikostreuung bei individuellen Notlagen, die in Ländern mit niedrigen Pro-Kopf-Einkommen an Bedeutung gewinnt. Mikroversicherungen sind darauf ausgerichtet, Haushalten und Kleinbetrieben, die lediglich über ein geringes und zum Teil unregelmäßiges Einkommen verfügen, einen Versicherungsschutz zu extrem niedrigen Prämien zu ermöglichen und die im Schadensfall verfügbaren Finanzmittel zu erhöhen. Mikroversicherungen setzen demnach nicht auf der nationalen bzw. internationalen Ebene an, sondern sind auf den Schutz von individuellen Vermögenswerten gerichtet (Münchener Rück, 2005b).

Es gibt bereits Erfahrungen mit Mikroversicherungen in Bereichen, in denen individuelle Risiken voneinander unabhängig sind, z. B. bei Risiken aus Krankheit oder Unfall (Brown und Churchill, 1999, 2000; Ahmed et al., 2005; Cohen et al., 2005). Fallstudien in Indien, Kenia oder Uganda zeigen, dass vor allem Lebensversicherungen und Krankenversicherungen schon heute erfolgreich angewendet werden (Brown und Churchill, 1999, 2000; Athreye und Roth, 2005). Mikroversicherungen für Risiken aus Naturkatastrophen befinden sich hingegen erst in einem Pilotstadium. Die Anwendung von Mikroversicherungen auf Naturkatastrophen ist besonders schwierig, weil es in der Regel eine Vielzahl von Betroffenen gibt und die individuellen Schadensrisiken der lokalen Versicherungsnehmer somit voneinander abhängig sind. Im Schadensfall werden deshalb hohe Forderungen an die Versicherungen gerichtet, die deren Kapitalausstattung möglicherweise übersteigen. Der Ausweg über eine Erhöhung des Kapitalstocks oder Rückversicherungen erhöht jedoch die Kapitalkosten für die Versicherungsgeber und damit auch den Preis der Versicherung. Unter diesen Voraussetzungen werden viele Haushalte und Betriebe mit geringem Einkommen letztlich auf eine private Absicherung verzichten.

Um ihnen dennoch ein günstiges und effektives Versicherungsprodukt an die Hand zu geben, könnten bestehende Mikroversicherungssysteme für unabhängige Risiken um die Deckung von Schäden aus Naturkatastrophen erweitert werden. Die Kosten des Versicherungsschutzes werden gering gehalten, indem effektive institutionelle Kapazitäten aufgebaut und Versicherungsnehmer in Gruppen und Gemeinden gebündelt werden. Darüber hinaus könnte der Staat Versicherungen gegen Naturkatastrophen verpflichtend einführen. Hierdurch könnte zügig eine große Anzahl an Versicherten gewonnen und eine breite geographische Streuung der Versicherten erreicht werden, was das Problem der Korrelation individueller Schadensrisiken stark vermindern dürfte. Ob eine solche Zwangsversicherung – insbesondere in Ländern mit noch unzureichenden sozialen Sicherungssystemen – tatsächlich sinnvoll wäre, ist im Rahmen künftiger Forschungsvorhaben zu klären.

Um den Erfolg eher regional bzw. national operierender Versicherer von Naturkatastrophen langfristig zu sichern, ist deren Anbindung an den internationalen Kapitalmarkt von Bedeutung. So übernehmen beispielsweise Rückversicherungsunternehmen als „Versicherer der Versicherer“ gegen die Zahlung von Prämien einen Teil des Risikos der Versicherer. Auf diese Weise werden Risiken noch breiter gestreut und die Versicherer vom Risiko extrem hoher Auszahlungen befreit.

Mikroversicherungsprogramme sollten durch den Staat aktiv gefördert werden (öffentliche Kofinanzierung): Neben dem Setzen der notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen ist in der Anfangsphase auch eine finanzielle Unterstützung vor allem beim Aufbau der notwendigen institutionellen Infrastruktur denkbar, beispielsweise im Rahmen von Public-Private-Partnerships und in Zusammenarbeit mit Entwicklungsorganisationen (Linnerooth-Bayer und Mechler, 2005).

3.4.2 Völkerrechtliche Regelung des Verlusts an Territorium vereinbaren

Anpassungsstrategien berühren Aspekte, die auch aus rechtlicher Perspektive relevant sind. Bei einem kontinuierlich steigenden Meeresspiegel ist zu erwarten, dass sich in vielen Fällen ein qualifizierter Rückzug als unvermeidbar darstellen wird. Insbesondere muss damit gerechnet werden, dass Staatsterritorien durch Überflutung teilweise oder vollständig verloren gehen und Menschen zur Aufgabe ihrer Siedlungsgebiete gezwungen werden. Aus völkerrechtlicher Sicht ergeben sich zum einen Fragen

zur Aufnahme der vom Meeresspiegelanstieg vertriebenen Menschen. Zum anderen stellen sich Fragen nach finanzieller Kompensation, wenn Staaten von den Auswirkungen des durch Klimawandel bedingten Meeresspiegelanstiegs betroffen sind, die selbst nicht maßgeblich zur Verursachung beigetragen haben.

3.4.2.1 Verkleinerung des Staatsterritoriums

Verkleinert sich ein Staatsterritorium aufgrund des Meeresspiegelanstiegs, so zieht dies aus völkerrechtlicher Sicht – mit Ausnahme von Fragen der Kompensation (Kap. 3.4.2.4) – keine besonderen Konsequenzen nach sich. Auf Grundlage der einschlägigen völkerrechtlichen Regeln fällt in einer solchen Konstellation das konstituierende Staatsgebiet entsprechend kleiner aus. In Einzelfällen kann sich aber eine Anpassung bestimmter völkerrechtlicher Verpflichtungen als notwendig erweisen, insbesondere von solchen, die sich auf ein untergegangenes Territorium beziehen. Insgesamt stellen die einschlägigen völkerrechtlichen Regeln befriedigende Antworten auf die hier zu erwartenden rechtlichen Probleme zur Verfügung. Zu beachten ist, dass eine Verkleinerung des Territoriums dazu führen kann, dass sich auch die Grenzen der seerechtlichen Hoheitsbereiche verschieben, da sich die für die Bemessung maßgeblichen Punkte verändern.

3.4.2.2 Untergang von (Insel-)Staaten

Nach bisherigem Kenntnisstand werden insbesondere Inselstaaten, die nur wenige Meter über dem Meeresspiegel liegen, durch den vom Klimawandel bedingten Anstieg des Meeresspiegels existenziell betroffen sein (CSD, 2004). Dazu gehört beispielsweise die Inselgruppe der Malediven, die maximal 2 m über dem Meeresspiegel liegt; oder die auf Korallenriffen gelegenen Inselgruppen Tuvalu, Kiribati und Tonga. Diese kleinen Inselstaaten, die zugleich Entwicklungsländer sind (SIDS, Small Island Developing States), bilden eine Interessengemeinschaft, die sich insbesondere bei den internationalen Verhandlungen zur Klimarahmenkonvention (UNFCCC) als politische Allianz bemerkbar macht (Burns, 1997; Slade, 2001). Zwar werden die SIDS (wie auch Staaten mit tiefliegenden Küstengebieten) bereits in der UNFCCC besonders berücksichtigt: So sollen für sie besondere Maßnahmen in Erwägung gezogen werden (Art. 4 Abs. 8 Bst. a und b UNFCCC). In Betracht kommen dabei Finanzierung,

Versicherung und die Weitergabe von Technologien, um den speziellen Bedürfnissen und Anliegen dieser Staaten gerecht zu werden. Die besondere Berücksichtigung der Inselstaaten in der UNFCCC erschöpft sich allerdings bereits mit diesem wenig konkreten Hinweis. Zudem werden in Art. 4 Abs. 8 UNFCCC die zu berücksichtigenden spezifischen Bedürfnisse weiterer Kategorien von Entwicklungsländern derart weit gefasst, dass letztlich fast jeder Vertragsstaat, der ein Entwicklungsland ist, in irgendeiner Weise für sich eine besondere Empfindlichkeit beanspruchen kann. Aus diesen Bestimmungen der Konvention können also keine konkreten Rechte für die Inselstaaten abgeleitet werden. Im Kioto-Protokoll finden die Inselstaaten keine spezifische Erwähnung. In den ergänzenden Vereinbarungen der Vertragsstaaten, insbesondere den Marrakesh Accords, werden die Bedürfnisse der Inselstaaten zwar wiederholt besonders hervorgehoben, dies führte aber bisher nicht zu institutionellen oder sonstigen besonderen Vorkehrungen.

Auch in anderen regionalen oder globalen Vereinbarungen insbesondere seerechtlicher Natur werden Inselstaaten nicht im Sinne von Ländern mit besonderen ökologischen oder sonstigen Problemen in rechtlich unmittelbar wirksamer Weise wahrgenommen. Dies gilt auch für die Seerechtskonvention, obwohl in ihr Inseln als meeresgeographische Kategorie, die für die Festlegung von Meereszonen mit den entsprechenden Hoheitsrechten von Bedeutung ist, eine wichtige Rolle spielen (Jesus, 2003).

Aus völkerrechtlicher Sicht ist das Vorhandensein eines Staatsgebiets konstituierendes Element des Staates, so dass dieser im Falle des Untergangs seines Territoriums aufhört zu existieren. Beim derzeitigen Stand des Völkerrechts besteht auch keinerlei Anspruch auf die Zuweisung einer Art „Ersatzterritorium“, was aus politischer Sicht möglich wäre. Nicht zuletzt die Erfahrungen im Nahen Osten zeigen jedoch, dass die Schaffung eines Staates bzw. eines neuen Staatsgebiets ein erhebliches Konfliktpotenzial birgt, da heute kaum mehr unbesiedelte Gebiete in Betracht kommen.

3.4.2.3

Umgang mit „Meeresflüchtlingen“

Geht ein Staat unter, werden seine Staatsbürger zu Staatenlosen. Die „Meeresflüchtlinge“ werden voraussichtlich Schutz in Nachbarländern suchen, was deren Aufnahmekapazitäten deutlich überschreiten könnte. Nach Ansicht des WBGU ist daher eine Regelung der Rechtsstellung dieser Menschen erforderlich.

Der WBGU empfiehlt, eine solche völkerrechtliche Regelung an folgenden Prinzipien auszurichten: Als Grundlage sollte ein Recht auf geregelte Aufnahme bzw. Umsiedlung der betroffenen Bevölkerungen vereinbart werden. Hier stellt sich die Frage, welche Verpflichtungen dies für potenzielle Aufnahmestaaten mit sich bringt, wobei zwischen der konkreten Aufnahme von Flüchtlingen und der Übernahme der Kosten unterschieden werden muss. Aus humanitärer Sicht bietet sich primär eine Aufnahme in jenen Staaten an, die eine geographische Nähe oder besondere Verbindungen zu einem untergegangenen Staat aufweisen. Dabei sollte den Aufzunehmenden ein Mitspracherecht bezüglich der Auswahl ihres neuen Lebensumfelds eingeräumt werden; Umsiedlungen unter Zwang sollten möglichst vermieden werden. Zugleich muss aber auch unter Einbeziehung der gesamten internationalen Gemeinschaft ein Verteilungsschlüssel angestrebt werden, welcher gewährleistet, dass keine Überbelastung einzelner Aufnahmestaaten entsteht. Dabei verlangt eine faire und effiziente Lastenverteilung, dass die Kosten der Aufnahme im Sinne des Verursacherprinzips aufgeteilt werden. Der entsprechende Verteilungsschlüssel sollte sich somit am völkerrechtlichen Grundsatz der gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeit orientieren. Demnach kommt jenen Staaten die Hauptlast zu, welche am stärksten zu den globalen Treibhausgasemissionen beitragen und zugleich über die größten finanziellen Ressourcen verfügen (Grundsatz 7 Rio-Deklaration, Art. 3 Abs. 1 und Art. 4 Abs. 1 UNFCCC; Kellersmann, 2000; Stone, 2004). Das Problem der Meeresflüchtlinge ist im Übrigen grundsätzlicher Natur, d. h. sie stellt sich nicht nur beim Untergang eines Staates, sondern auch im Falle gravierender durch den Klimawandel bedingter Überflutungen und Zerstörungen in einem weiterhin existierenden Staat.

Die rechtliche Ausgestaltung und Anwendung kann sich in der Praxis allerdings schwierig gestalten: Wie lassen sich Flüchtlinge, die ihr Lebensumfeld aufgrund des Klimawandels verloren haben und die damit zu Anspruchsberechtigten werden, von anderen Gruppen von Flüchtlingen unterscheiden? Wie kann das grundsätzliche Problem der Zuweisung von Ursachen gelöst werden? Hurrikane oder Wetterextreme, die Fluchtbewegungen auslösen, treten auch ohne anthropogenen Klimawandel auf, können jedoch durch diesen verstärkt oder verändert werden (Kap. 3.1.2; Stone und Allen, 2005). Für diese Probleme müssen bei der rechtlichen Ausgestaltung des Umgangs mit Meeresflüchtlingen Lösungen gefunden werden. Vor diesem Hintergrund empfiehlt der WBGU, die Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet erheblich zu verstärken, insbesondere was die

Analyse und Exploration effektiver und fairer Lastenverteilungssysteme angeht.

Als weitere Schwierigkeit kommt hinzu, dass „Umweltflüchtlinge“ keiner gängigen Kategorie des internationalen Flüchtlings- und Migrationsrechts entsprechen (GCIM, 2005). Flüchtling ist gemäß der Genfer Flüchtlingskonvention nur, wer aus politischen, ethnischen, religiösen oder vergleichbaren Gründen verfolgt wird. Es lassen sich also keine spezifischen völkerrechtlichen Pflichten in Bezug auf den Umgang mit „Meeresflüchtlingen“ ableiten. Diese Lücke im internationalen Flüchtlingsrecht muss nach Ansicht des WBGU geschlossen werden. Denkbar sind dabei bilaterale Abkommen etwa mit Nachbarstaaten oder ein multilaterales Abkommen. Bei letzterem stellt sich die Frage, ob entweder die bestehenden Konventionen, insbesondere die UN-Flüchtlingskonvention, entsprechend ergänzt werden können, ohne dabei die Definition des Flüchtlingsbegriffs selbst neu zur Verhandlung zu stellen, oder ob der Abschluss eines spezifischen Abkommens sinnvoller wäre. Gemäß dem Non-Refoulement-Prinzip dürfen verfolgte Personen nicht in einen Staat abgeschoben werden, in dem ihnen Folter oder unmenschliche Behandlung droht. Analog dazu müssten sich die Staaten verpflichten, Meeresflüchtlinge nicht in ihren Herkunftsstaat abzuschicken, wenn die Lebensumstände als Folge des Klimawandels dort unzumutbar geworden sind, d. h. ein menschenwürdiges Leben nicht möglich bzw. das Existenzminimum nicht gewährleistet ist. Die Bedeutung einer solchen Rechtsentwicklung dürfte dabei über die besondere Problematik der Meeresflüchtlinge hinausgehen, also auch andere Formen umweltbedingter Migration betreffen.

3.4.2.4 Kompensation für Landverluste

Sowohl im Zusammenhang mit dem Verlust an Territorium als auch mit dem Untergang von Inselstaaten spielen Fragen der Entschädigung eine wichtige Rolle. Dabei sind verschiedene Konstellationen zu unterscheiden.

Soweit es um die rein nationale Ebene geht, also um Schäden von Privaten aufgrund des (Wert-)Verlusts von Eigentum oder von Einnahmenverlusten, ist die nationale Rechtsordnung zugrunde zu legen, womit dieser Fall für das vorliegende Gutachten nicht relevant ist. Allerdings können mögliche internationale Vereinbarungen Rückwirkungen auf die privaten Akteure entfalten, indem etwa ein Staat die Aufbringung international vereinbarter Kompensationszahlungen durch Angaben und Steuern auf den Privatsektor überwälzt.

Von Bedeutung ist hingegen die Frage, ob und inwieweit die internationale Gemeinschaft oder einzelne andere Staaten zu Kompensationszahlungen verpflichtet sind, wenn in einem Staat aufgrund des Meeresspiegelanstiegs direkte oder indirekte Schäden eintreten. Diese Frage ist auf Grundlage des geltenden Völkerrechts nach herrschender Meinung und auf Grundlage der diesbezüglich klaren Staatenpraxis zu verneinen: Auch wenn das Problem des Meeresspiegelanstiegs kaum durch die betroffenen Insel- oder Küstenstaaten selbst, sondern hauptsächlich durch die Emission von Treibhausgasen in den Industrie- und Schwellenländer verursacht wird, lässt sich beim derzeitigen Stand des Völkerrechts weder eine Pflicht zur Wiedergutmachung noch zum Schadensersatz nachweisen. Hintergrund ist die völkerrechtlich letztlich noch nicht befriedigend gelöste Problematik der Summationseffekte gewisser Verhaltensweisen und der teilweise unzureichend nachweisbaren Kausalzusammenhänge. Beim derzeitigen Stand des internationalen Rechts greift daher das völkergewohnheitsrechtlich anerkannte Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbeeinträchtigungen nicht (Epiney, 1995; Beyerlin, 2000; Wolfrum, 2000; Sands, 2003). Nichtsdestotrotz sind die Ursache-Wirkungs-Beziehungen in vielerlei Hinsicht bewiesen, und es lässt sich nicht bezweifeln, dass die meeresbezogenen Klimafolgen bestimmte Entwicklungsländer vor Probleme stellen, die diese in finanzieller Hinsicht kaum allein bewältigen können.

Vor diesem Hintergrund empfiehlt der WBGU den Abschluss eines völkerrechtlichen Abkommens, durch das insbesondere Industrieländer verpflichtet werden, die ausreichende Finanzierung eines international verwalteten Kompensationsfonds zu garantieren. Die Mittel aus diesem Fonds sollten für Anpassungsprogramme in vom Meeresspiegelanstieg besonders betroffenen Staaten vergeben werden. Die jeweiligen nationalen Beitragspflichten sollten sich an den verursachten Treibhausgasemissionen orientieren, so dass die Zahlungen als Kompensation für die tatsächliche Mitverursachung von Schäden betrachtet werden (Kap. 3.4.1.5). Ist ein solcher Kompensationsfonds zur Unterstützung der betroffenen Staaten einmal eingerichtet, dann könnte er auch Aufgaben im Zusammenhang mit dem internationalen Lastenausgleich bei der Aufnahme von Meeresflüchtlingen infolge des Meeresspiegelanstiegs übernehmen und Zahlungen an die Aufnahmeländer leisten (Kap. 3.4.2.3).

Denkbar wäre es auf den ersten Blick zwar auch, auf die bereits im Rahmen des Klimaregimes bestehenden finanziellen und technologischen Ressourcentransfers zurückzugreifen. So postuliert die Mauritius-Strategie (Ziff. 78 bis Bst. a) zur Förderung der SIDS, die Anpassung an den Klimawandel und an

den Anstieg des Meeresspiegels solle mit Hilfe des Least Developed Countries Fund sowie des Special Climate Change Fund im Rahmen der Klimarahmenkonvention erfolgen. Dagegen ist einzuwenden, dass es sich hier wohl kaum um eine eigentliche Kompensation im Sinne einer Entschädigung für klimabedingte Schäden handelt. Es ist darüber hinaus vorstellbar, dass die United Nations Compensation Commission in diesem Bereich tätig wird; so hat sie beispielsweise kürzlich Kompensationszahlungen für Umweltschäden aus dem Golfkrieg 1990–1991 zugesprochen (Sands, 2003). Allerdings erscheint auch dieses Instrument für spezifische Kompensationen für durch den klimabedingten Meeresspiegelanstieg verursachte Schäden zu unspezifisch. Man könnte sich allenfalls vorstellen, die Verwaltung des hier postulierten eigenständigen Kompensationsregimes einem bestehenden Gremium anzuvertrauen.

3.5 Forschungsempfehlungen

HURRIKANBILDUNG UND -STÄRKE

Der Zusammenhang von Hurrikanaktivität und globaler Erwärmung muss besser erforscht werden, sowohl durch weitere Datenanalysen zur vergangenen Entwicklung als auch durch Modellierung der künftigen Entwicklung des Hurrikanklimas, einschließlich der möglichen Gefährdung bisher nicht betroffener Gebiete (Südamerika, Südeuropa).

AUSMASS UND GESCHWINDIGKEIT DES MEERESSPIEGELANSTIEGS

Die größte Unsicherheit über den künftigen Meeresspiegelanstieg liegt im Verhalten der Kontinentaleismassen in Grönland und der Antarktis. Diese Unsicherheit zu reduzieren benötigt Anstrengungen zum besseren Verständnis der Eisdynamik und einen Entwicklungsschub bei den Kontinentaleismodellen. Dazu gehört auch die Erforschung der Stabilität der Eisschelfe und deren Wechselwirkung mit dem Kontinentaleis. Weitere Unsicherheiten liegen in der Ozeandynamik, insbesondere der Intensität der Durchmischung der Ozeane, die einen starken Einfluss auf den Meeresspiegel hat und deren Beschreibung in globalen Klimamodellen verbessert werden sollte.

GLOBALES SCHADENSPOTENZIAL DES MEERESSPIEGELANSTIEGS

Im allgemeinen Kontext der Frage nach einem „gefährlichen Klimawandel“ ist die Teilfrage nach einem „gefährlichen Meeresspiegelanstieg“ möglichst quantitativ zu beantworten. Dazu müssen die gesundheitlichen, sozioökonomischen und ökologi-

schen Folgen für verschiedene Szenarien (x m Anstieg in y Jahren) global aufsummiert werden. Die heutigen Abschätzungen sind in dieser Hinsicht nicht belastbar und durch eine neue Generation von Impaktanalysen zu ersetzen. Die provisorische absolute Leitplanke des WBGU (maximal 1 m Meeresspiegelanstieg) könnte auf diese Weise präzisiert werden.

VERWUNDBARKEIT VON KÜSTENMEGASTÄDTEN IN ENTWICKLUNGSLÄNDERN

Klimawandel und Urbanisierung sind dominierende Trends des Globalen Wandels. Das Zusammenwirken beider Entwicklungen in den großen Küstentädten in Entwicklungsländern kann zu einer nahezu unbeherrschbaren Lage führen, insbesondere wenn das Arsenal der Antwortstrategien wegen sozialer, ökonomischer und institutioneller Defizite beschränkt ist. Für die besonders kritischen Megastädte (z. B. Lagos, Mumbai, Havanna) sollten interdisziplinäre Studien zur Abschätzung der Problemhöhe durchgeführt werden.

REGIONALE PORTFOLIO-STRATEGIEN DES KÜSTENMANAGEMENTS

Durch die dramatischen geophysikalischen Auswirkungen des Klimawandels auf die Küstenzonen (selbst im Falle energischer Maßnahmen zur Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen) müssen die traditionellen Konzepte des Küstenmanagements revidiert werden. Insbesondere gilt es zu bewerten, in welchem Verhältnis die Strategieelemente Schutzgewährung, qualifizierter Rückzug und Akkommodation stehen sollten. Für diese Bewertung sind u. a. Kosten-Nutzen-Analysen zu entwickeln, die den neuartigen Schadenspotenzialen Rechnung tragen. Gegenwärtig gibt es solche Untersuchungen nur für vereinzelte Küstenabschnitte, z. B. in Großbritannien. Eine integrierte Neuabschätzung robuster und effektiver Portfolio-Strategien für die deutschen Küsten erscheint dringend geboten.

„MEERESFLÜCHTLINGE“: RECHTLICHE UND INSTITUTIONELLE ASPEKTE

Mit der Bedrohung von Küstenregionen und potenziellen Vernichtung ganzer Staatsterritorien durch den klimabedingten Meeresspiegelanstieg entsteht ein neuartiges Migrationsproblem, dessen rechtliche Dimensionen ausgelotet werden müssen. Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der Ausgestaltung völkerrechtlicher Regelungen bezüglich der Aufnahme von „Meeresflüchtlingen“, Kompensationsleistungen und verursachergerechter Lastenverteilung. Von großer Bedeutung für die Lösung der rechtlichen Probleme sind in diesem Zusammenhang auch Fortschritte bei der wissenschaftlichen Zuweis-

barkeit von Schäden bzw. Territorialverlusten, die in Folge des menschengemachten Klimawandels entstehen („attribution problem“). Darüber hinaus besteht Bedarf an operativen Abschätzungen, etwa der Evaluierung der bestehenden UN-Institutionen zur Bewältigung von Flüchtlingsströmen im Licht der künftig vermutlich um Größenordnungen verschärften Anforderungen.

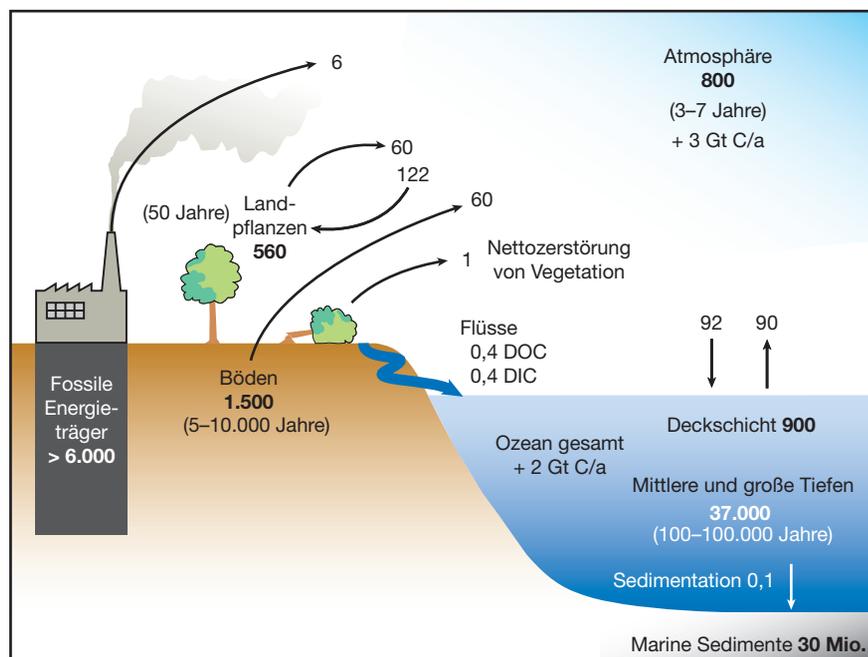
4.1 Chemische Veränderungen im Meerwasser

4.1.1 CO₂-Eintrag

Die Weltmeere speichern rund 38.000 Gigatonnen Kohlenstoff (Gt C). Im Ozean ist damit gegenwärtig etwa 50-mal mehr CO₂ gespeichert als in der Atmosphäre, und 20-mal mehr als in der terrestrischen Biosphäre und den Böden (Abb. 4.1-1). Der Ozean ist aber nicht nur ein bedeutender CO₂-Speicher, sondern auch langfristig die wichtigste CO₂-Senke. Angetrieben durch die Partialdruckdifferenz des CO₂ zwischen der Atmosphäre und dem Meerwasser gelangt ein Teil des anthropogenen CO₂ in die oberflächenschicht des Meeres und mit den Meeresströmungen über Zeiträume von Jahrzehnten bis Jahrhunderten schließlich auch in den tiefen Ozean.

Bereits seit einigen Jahrzehnten ist eine Zunahme der CO₂-Konzentration in den oberen Meeresschichten nachweisbar (Sabine et al., 2004), die auf den gestiegenen CO₂-Anteil in der Atmosphäre zurückzuführen ist. Gegenwärtig nimmt der Ozean jährlich 2 Gt C auf, das entspricht etwa 30% der anthropogenen CO₂-Emissionen (IPCC, 2001a). Insgesamt haben die Ozeane zwischen 1800 und 1995 etwa 118 ± 19 Gt C absorbiert. Das entspricht etwa 48% der kumulierten CO₂-Emissionen aus fossilen Energieträgern (einschließlich der Zementherstellung) bzw. 27–34% der gesamten anthropogenen CO₂-Emissionen (einschließlich derjenigen aus Landnutzungsänderungen; Sabine et al., 2004). Das anthropogene CO₂-Signal im Meer ist im Mittel bis zu einer Wassertiefe von etwa 1.000 m nachweisbar. Durch den langsamen Austausch der Meeresschichten hat es die Tiefsee in weiten Teilen des Ozeans allerdings noch nicht erreicht. Im Nordatlantik reicht das anthropogene CO₂-Signal durch die dort stattfindende Tiefenwasserbildung schon bis 3.000 m hinab.

Abbildung 4.1-1
 Schema des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Werte für die Kohlenstoffvorräte sind in Gt C angegeben (fettgedruckte Zahlen). Werte für die mittleren Kohlenstoffflüsse sind in Gt C pro Jahr angegeben (normal gedruckte Zahlen). Zeitangaben in Klammern. Der Fluss in die Böden beträgt etwa 1,5 Gt C pro Jahr. DOC = gelöster organischer Kohlenstoff, DIC = gelöster anorganischer Kohlenstoff. Quellen: verändert nach Schlesinger, 1997 und WBGU, 2003b. Zahlen ergänzt und aktualisiert für Ozean und fossile Energieträger: Sabine et al., 2003; marine Sedimente: Raven et al., 2005; Atmosphäre: NOAA-ESRL, 2006



In der Atmosphäre verhält sich CO_2 im Wesentlichen chemisch neutral, d. h. es reagiert nicht mit anderen Gasen, trägt aber durch seine starke Wechselwirkung mit Infrarotstrahlung zum Klimawandel bei. Im Ozean dagegen ist CO_2 chemisch aktiv. Gelöstes CO_2 trägt zu einer Absenkung des pH-Werts bei, d. h. zu einer Versauerung des Meerwassers. Dieser Effekt ist bereits messbar: Seit Beginn der Industrialisierung ist der pH-Wert des Oberflächenwassers der Meere im Mittel um etwa 0,11 Einheiten gesunken. Dies entspricht einer Zunahme der Konzentration von Wasserstoffionen (H^+ -Ionen) um etwa 30%. Ausgehend von einem leicht alkalischen vorindustriellen pH-Wert von 8,18 (Raven et al., 2005) hat also der Säuregehalt des Ozeans an seiner Oberfläche zugenommen. Auf Basis der verschiedenen IPCC-Emissionsszenarien ist bei einer atmosphärischen CO_2 -Konzentration von 650 ppm bis zum Jahr 2100 eine Verringerung des mittleren pH-Werts um insgesamt 0,30 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Wert zu erwarten. Bei einer atmosphärischen Konzentration von 970 ppm würde sich der pH-Wert um 0,46 Einheiten reduzieren. Gelingt es dagegen, das CO_2 in der Atmosphäre auf 450 ppm zu begrenzen, dann beträgt die pH-Reduktion nur 0,17 Einheiten (Caldeira und Wickett, 2005).

4.1.2 Änderung des Karbonathaushalts

Der in den Meeren gespeicherte Kohlenstoff liegt in unterschiedlichen chemischen Formen vor. Ein kleiner Teil ist in der Biosphäre und in organischen Verbindungen gespeichert, der weit überwiegende Teil ist dagegen in anorganischen Verbindungen enthalten, die auch als DIC (Dissolved Inorganic Carbon) bezeichnet werden. Von diesen Verbindungen ist jedoch nur 1% direkt im Wasser gelöstes CO_2 , 91% liegen als Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) vor und 8% als Karbonat (CO_3^{2-}). Diese drei Verbindungen stehen über eine Gleichgewichtsreaktion in Beziehung:



Das relative Verhältnis dieser Kohlenstoffverbindungen reflektiert dabei den pH-Wert des Wassers (Abb. 4.1-2). Nur CO_2 kann mit der Atmosphäre ausgetauscht werden. Durch den Eintrag von CO_2 wird der Partialdruck von CO_2 im Meerwasser erhöht, gleichzeitig verschiebt sich das Gleichgewicht zu Gunsten von Hydrogenkarbonat und zu Ungunsten von Karbonat.

Durch den Eintrag von anthropogenem CO_2 hat die Karbonatkonzentration in der Meeresoberfläche

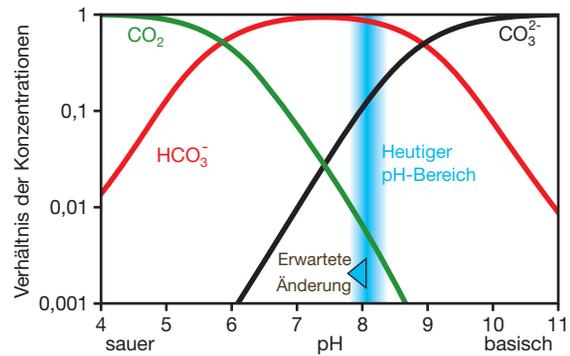


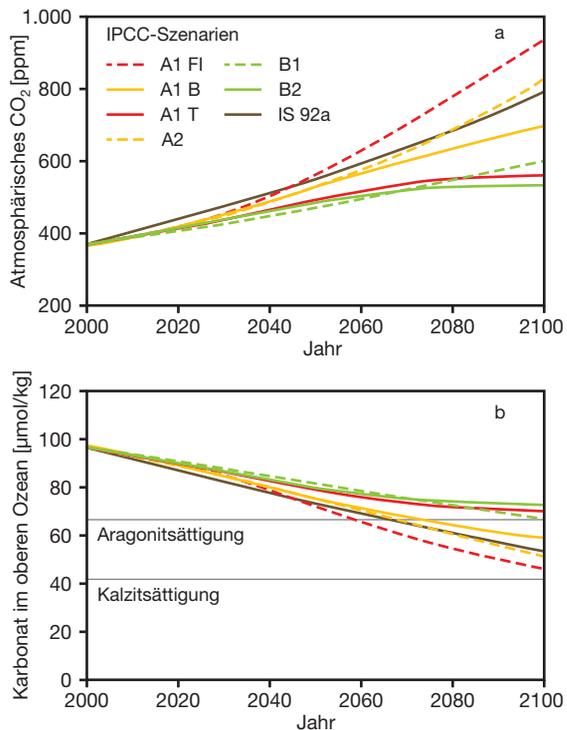
Abbildung 4.1-2

Karbonatsystem des Meerwassers. Relatives Verhältnis der drei anorganischen Komponenten CO_2 , HCO_3^- und CO_3^{2-} . Der blau schattierte Bereich zeigt schematisch den pH-Bereich, der heute im Meer vorkommt. Der Pfeil skizziert die erwartete Verschiebung des mittleren pH-Werts, wenn die atmosphärische CO_2 -Konzentration etwa 750 ppm erreicht. Quelle: Raven et al., 2005

chenschicht bereits um 10% gegenüber dem vorindustriellen Niveau abgenommen (Orr et al., 2005).

Die Sättigung des Meerwassers mit Karbonationen ist von besonderer Bedeutung für diejenigen Meeresorganismen, die für ihre Schalen oder Skelettstrukturen Kalk (Kalziumkarbonat, CaCO_3) bilden (Kap. 4.3.2). Kalk kommt bei Meeresorganismen vor allem in den Formen Aragonit und Kalzit vor, die sich durch ihre Kristallstruktur unterscheiden (Tab. 4.3-1). Das Meerwasser ist gegenüber dem leichter löslichen Aragonit übersättigt, wenn die Karbonatkonzentration oberhalb von $66 \mu\text{mol pro kg}$ liegt. Fällt sie unter diesen Wert, löst sich das von den Organismen gebildete Aragonit im Wasser – man spricht von Aragonituntersättigung. Aufgrund der zunehmenden Löslichkeit des Kalks mit abnehmender Temperatur und zunehmendem Druck sind die tieferen Meeresschichten in der Regel untersättigt, d. h. absinkender Kalk löst sich in der Tiefe wieder im Wasser. Die Grenze zwischen der untersättigten und der übersättigten Schicht wird als Sättigungshorizont bezeichnet.

Die gegenwärtige Karbonatkonzentration an der Meeresoberfläche ist regional unterschiedlich: Die höchste Konzentration (im Mittel $240 \mu\text{mol pro kg}$) findet sich in den Tropen, während sie im Südlichen Ozean im Mittel nur $105 \mu\text{mol pro kg}$ beträgt (Orr et al., 2005). Bei fortschreitendem CO_2 -Eintrag in das Meer sind daher zuerst die Meeresorganismen im Südlichen Ozean von Aragonituntersättigung bedroht (Kap. 4.3.2). Orr et al. (2005) berechnen die mögliche zukünftige Entwicklung der Karbonatkonzentration des Südlichen Ozeans für verschiedene Emissionsszenarien. Danach könnte dieser bei einem Business-as-usual-Szenario bereits Mitte dieses Jahrhunderts an seiner Oberfläche gegenüber

**Abbildung 4.1-3**

Projektion unterschiedlicher CO₂-Konzentrationen (a) und ihrer Wirkung auf den Karbonathaushalt des Südlichen Ozeans (b). Aufgetragen sind die Verläufe unterschiedlicher IPCC-Szenarien.

Quelle: Orr et al., 2005

Aragonit untersättigt sein (Abb. 4.1-3). Ab einer atmosphärischen CO₂-Konzentration von ca. 600 ppm ist der überwiegende Teil der Oberflächenschicht des Südlichen Ozeans untersättigt. Bereits vor Erreichen dieser Grenze wandert jedoch der Sättigungshorizont nach oben, d. h. die Meeresdeckschicht, die gegenüber Aragonit übersättigt ist, wird dünner, und die Kalkbildung wird erschwert. Auch sind einzelne Teile der Oberflächenschicht bereits früher betroffen. Gegenüber dem schwerer löslichen Kalzit bleibt die Oberflächenschicht auch für höhere CO₂-Konzentration noch gesättigt, aber auch der Kalzitsättigungshorizont verschiebt sich nach oben. Durch die Verschiebung der Sättigungshorizonte verändern sich die Bedingungen für die biogene Kalkbildung, was erhebliche Konsequenzen für Meeresorganismen und -ökosysteme haben kann (Kap. 4.3).

4.1.3 Sonderrolle des CO₂

Bei der Versauerung der Meere handelt es sich um einen Effekt, der ausschließlich auf den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre zurückzuführen ist. Dadurch unterscheidet er sich vom Klimawandel, der durch die Strahlungswirkung des atmosphärischen CO₂-Anstiegs, aber eben auch des Anstiegs von Methan, Lachgas und einigen weiteren klimawirksamen Gasen hervorgerufen wird. In Bezug auf den Klimawandel wird daher häufig mit CO₂-Äquivalenten gerechnet, d. h. die Strahlungswirkung der verschiedenen Gase wird auf die entsprechende Strahlungswirkung von CO₂ umgerechnet. Für den Klimaschutz wird argumentiert, dass es keinen Unterschied macht, ob die Strahlungswirkung allein von CO₂ verursacht wird oder von anderen emittierten Treibhausgasen. Dies trifft für den Effekt der Versauerung der Meere aber nicht zu. Für den Meeresschutz ist daher die Minderung der CO₂-Emissionen doppelt relevant: Zum einen um die globale Erwärmung, zum anderen um die Versauerung zu begrenzen.

Die Versauerung ist vor allem eine Konsequenz des schnellen Anstiegs der CO₂-Menge im Ozean. Bei einem langsamen Eintrag von CO₂, wie er in der Erdgeschichte wiederholt stattgefunden hat (etwa zum Ende der letzten Eiszeiten, als die CO₂-Konzentration über einen Zeitraum von 6.000 Jahren um 80 ppm stieg) oder in den Klimaepochen mit hohem CO₂-Gehalt (etwa vor 100–200 Mio. Jahren) mischt sich das CO₂ bis in die Tiefsee, wo eine langsame Auflösung von kalkhaltigen Sedimenten der Versauerung entgegenwirkt. Der pH-Wert des Meeres bleibt in diesem Fall annähernd konstant (Raven et al., 2005).

4.2 Zukünftige Entwicklung der Kohlenstoffsенke Meer

Wie in Kapitel 4.1 bereits angesprochen, ist das Meer die bedeutendste Nettosenke für CO₂. Ohne die Aufnahme von anthropogenem CO₂ durch den Ozean läge der CO₂-Anteil in der Atmosphäre um mehr als 55 ppm über dem derzeitigen Niveau (Sabine et al., 2004). Die zukünftige Entwicklung der CO₂-Senke Meer wird deshalb weitgehend bestimmen, wie stark sich die anthropogenen CO₂-Emissionen in einer Erhöhung der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid niederschlagen. Langfristig, d. h. im Zeitraum mehrerer Jahrhunderte (in dem sich die Weltmeere einmal durchmischen) kann der Ozean ja nach Gesamtmenge des emittierten Kohlenstoffs

etwa 65–80% der anthropogenen CO_2 -Emissionen aufnehmen. Auf noch längeren Zeitskalen erhöht sich dieser Anteil durch die Auflösung von Kalksedimenten auf 85–92% (Caldeira et al., 2005). In den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten kann allerdings nur ein Teil dieses großen Senkenpotentials zum Tragen kommen: der begrenzende Faktor ist der Transport des an der Oberfläche aufgenommen Kohlenstoffs in die tieferen Meeresschichten. Tatsächlich haben die Weltmeere bisher erst 30% des anthropogenen Kohlenstoffs aufgenommen, den sie langfristig bei gegenwärtiger atmosphärischer Konzentration absorbieren können (Sabine et al., 2004).

Die große Bedeutung des Meeres als Senke gilt im Übrigen nicht für die anderen im Kioto-Protokoll geregelten Treibhausgase: Die stärkste Senke für Methan und auch für HFC ist z. B. die chemische Reaktion mit dem Hydroxylradikal OH^\cdot in der unteren Atmosphäre, während N_2O überwiegend in der Stratosphäre durch die UV-Strahlung der Sonne zerstört wird. Die Industriegase PFC und SF_6 zersetzen sich erst oberhalb der Stratosphäre. Das Meer ist allerdings eine bedeutende Quelle für N_2O , deren zukünftige Entwicklung unter Einwirkung des Klimawandels unklar ist.

Vor der Industrialisierung war der Ozean annähernd im Gleichgewicht und keine CO_2 -Senke. An seiner Oberfläche gab er jährlich etwa 0,6 Gt C an die Atmosphäre ab, während gleichzeitig dieselbe Menge Kohlenstoff aus der terrestrischen Biosphäre (und damit letztendlich aus der Atmosphäre) in Form von organischem Material über die Flüsse eingetragen wurde (Watson und Orr, 2003). Der atmosphärische CO_2 -Anteil änderte sich dadurch nicht und blieb über Jahrtausende konstant bei etwa 280 ppm. Der Grund für die heutige Senkenfunktion des Meeres ist die anthropogene Störung des Kohlenstoffkreislaufs: Steigt die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre, gibt diese so lange CO_2 an den Ozean ab, bis die Partialdrücke in Oberflächenwasser und Atmosphäre wieder ausgeglichen sind. Seit Beginn der Industrialisierung ist die atmosphärische CO_2 -Konzentration annähernd exponentiell gestiegen. Bisher ist dadurch auch die jährliche CO_2 -Aufnahme durch den Ozean immer weiter angestiegen, und zwar nahezu proportional zur atmosphärischen CO_2 -Konzentration, wie Modellergebnisse nahelegen (Gloor et al., 2003). Dies kann jedoch aus verschiedenen Gründen nicht auf die Zukunft übertragen werden, wie unten näher erläutert wird.

Stellt man die vom Ozean aufgenommene CO_2 -Menge den anthropogenen Emissionen gegenüber, so scheint die Effizienz der Ozeansenke schon heute zu sinken: Sabine et al. (2004) zeigen anhand der Auswertung von Beobachtungsdaten, dass im Zeitraum 1800–1994 vom Ozean 28–34% der anthropo-

genen Emissionen aufgenommen wurden, während es im Zeitraum 1980–1999 nur 26% waren. Aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Bestimmung der globalen Kohlenstoffbilanz ist diese Abnahme zwar nicht statistisch signifikant, aber allein aufgrund bekannter geochemischer Prozesse zu erwarten.

Je mehr CO_2 bereits in den Ozean eingetragen wurde, desto geringer ist die Karbonatkonzentration in der Oberflächenschicht (Kap. 4.1.2). Dies verringert die Aufnahmekapazität für weiteres CO_2 . Modellergebnisse zeigen, dass die relative CO_2 -Speicherung durch den Ozean (d. h. der Anteil der anthropogenen Emissionen, der im Verlauf weniger Jahrzehnte durch den Ozean aufgenommen wird) durch diesen Effekt um einige Prozent sinkt, wenn eine atmosphärische CO_2 -Konzentration von 450 ppm erreicht wird. Bei 750 ppm CO_2 in der Atmosphäre verringert sich die relative CO_2 -Aufnahme bereits um 10% (Le Quéré, persönliche Mitteilung). Dieser geochemische Effekt ist in Modellen zum Kohlenstoffzyklus vollständig berücksichtigt und wird daher selten explizit diskutiert (Gruber et al., 2004). Auch sehr langfristig, d. h. über Zeiträume, in denen sich der Ozean vollständig durchmischt, bewirkt dieser Effekt, dass der in der Atmosphäre verbleibende Anteil der anthropogenen CO_2 -Emissionen immer größer wird, je mehr CO_2 insgesamt emittiert wurde.

Auch der Klimawandel als Folge der Treibhausgasemissionen wirkt sich auf die Stärke der Ozeansenke aus: Die Löslichkeit von CO_2 im Meerwasser nimmt mit steigender Temperatur ab. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte durch diesen Effekt die kumulierte CO_2 -Aufnahme um 9–14% geringer ausfallen als ohne Temperaturänderung (Greenblatt und Sarmiento, 2004). Dieser Effekt ist gut verstanden, die Unsicherheit resultiert im Wesentlichen aus der Unsicherheit über das Ausmaß der zu erwartenden Temperaturänderung.

Eine weitere Auswirkung des Klimawandels ist eine zunehmende Schichtungsstabilität des Meerwassers, d. h. die vertikale Durchmischung wird reduziert. Dies hat eine Reihe komplexer Wirkungen. Einerseits werden dadurch der Transport von mit Kohlenstoff angereichertem Oberflächenwasser in die Tiefe sowie der Transport von kohlenstoffärmerem Wasser an die Oberfläche geschwächt, was die Senkenwirkung des Ozeans mindert. Andererseits können sich Änderungen der biologischen Produktivität ergeben, etwa durch veränderte Nährstoffverfügbarkeit. Die biologische Produktivität ist von hoher Bedeutung für die Kohlenstoffbilanz der Meeresoberflächenschicht: CO_2 wird von Meeresorganismen über Photosynthese aufgenommen und in organische Substanz eingebaut; absterbende Organismen sinken ab und werden in unterschiedlichen Wasser-

tiefen zersetzt. Freigesetzte Nährstoffe und Kohlenstoff gelangen zum Teil durch vertikale Durchmischung wieder in die Deckschicht, der Nettoexport in die Tiefsee ist jedoch erheblich. Jährlich werden durch diese „biologische Pumpe“ 10 Gt Kohlenstoff aus der Meeresoberflächenschicht in die Tiefsee überführt. Der Einfluss von erhöhter Schichtungsstabilität und veränderter biologischer Produktivität auf die Senkenwirkung des Ozeans ist höchst unsicher. Greenblatt und Sarmiento (2004) geben für die Änderung der kumulierten CO_2 -Aufnahme bis zum Ende des Jahrhunderts durch diese Effekte eine Spannbreite von -2% (also verringerte Senkenfunktion des Ozeans) bis +10% (erhöhte Senkenfunktion) an.

Viele der genannten Effekte sind noch schlecht quantifizierbar, jedoch ist wahrscheinlich, dass der Klimawandel insgesamt zu einer deutlichen Abschwächung der Effizienz der Kohlenstoffsenke Meer beiträgt. Nach der Übersicht über verschiedene Modellergebnisse von Greenblatt und Sarmiento (2004) könnte die kumulierte CO_2 -Aufnahme durch den Ozean bis zum Ende dieses Jahrhunderts durch die oben besprochenen klimabedingten Einflüsse (Temperaturerhöhung, erhöhte Schichtungsstabilität und biologische Effekte) um 4–15% geringer ausfallen, als es ohne diese Einflüsse der Fall wäre. Diese Abschwächung ist zu den geochemischen Effekten hinzuzurechnen, die ohnehin zu einer Minderung der relativen Senke in einer ähnlichen Größenordnung führen.

Wie schon angedeutet, sind die größten Unsicherheitsfaktoren bei der Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Ozeansenke biologische Prozesse, also die Auswirkungen der anthropogenen Atmosphärenstörung und der Versauerung der Meere auf die marine Primärproduktion, die biologische Pumpe und die Kalkbildung (Kap. 4.3.5). Diskutiert wird auch eine Schwächung der Ozeansenke durch Veränderungen im „equatorial upwelling“, dem windgetriebenen Aufsteigen von Wasser am Äquator (Winguth et al., 2005). Auch schwer zu prognostizierende, nichtlineare Ereignisse wie eine starke Verminderung der ozeanischen Konvektion oder der thermohalinen Zirkulation oder biologische Regimeübergänge (Kap. 2.2.1) könnten einen erheblichen Einfluss haben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei steigender atmosphärischer CO_2 -Konzentration der durch den Ozean aufgenommene Anteil der anthropogenen CO_2 -Emissionen sinken wird, selbst wenn die absolute Aufnahmerate noch ansteigt (IPCC, 2001a).

4.3

Auswirkungen der Versauerung auf Meeresökosysteme

Der CO_2 -Eintrag ins Meer führt zu Verschiebungen im Karbonatsystem des Meerwassers und zu einer Absenkung des pH-Werts, also zur Versauerung des Ozeans (Kap. 4.1.1; Turley et al., 2006). Diese Veränderung des Karbonatsystems könnte ohne Gegenmaßnahmen bereits in diesem Jahrhundert ein Ausmaß erreichen, wie es wahrscheinlich seit vielen Jahrmillionen nicht vorgekommen ist (Feely et al., 2004). Der Mensch greift somit erheblich in das chemische Gleichgewicht des Ozeans ein, was für die Meereslebewesen und -ökosysteme nicht ohne Folgen bleiben wird.

4.3.1

Physiologische Wirkungen auf Meeresorganismen

Eine stark erhöhte CO_2 -Konzentration (Hyperkapnie) hat viele negative physiologische Wirkungen, die experimentell an verschiedenen Meeresorganismen untersucht worden sind. Es wurden zahlreiche Veränderungen bei Meeresorganismen nachgewiesen, z. B. bei der Produktivität von Algen, den Stoffwechselraten von Zooplankton und Fischen, der Sauerstoffversorgung von Kalmaren, der Reproduktion bei Muscheln, der Nitrifizierung durch Mikroorganismen und der Aufnahme von Metallen (Übersicht in Pörtner, 2005). Viele dieser Experimente sind allerdings mit CO_2 -Konzentrationen durchgeführt worden, die weit über denen liegen, die bei heute diskutierten Emissionsszenarien bis 2100 zu erwarten sind. Daher sind zusätzliche Studien erforderlich, um die kurz- und mittelfristigen Effekte der Versauerung abschätzen zu können (Kap. 4.6). Aus heutiger Sicht scheint es unwahrscheinlich, dass Meeresorganismen bei den zu erwartenden künftigen atmosphärischen CO_2 -gehalten unter akuten Vergiftungsercheinungen leiden werden (Pörtner, 2005).

Eine Verdopplung der gegenwärtigen CO_2 -Konzentration führt bei vielen Phytoplanktonarten zu einer Erhöhung der Photosyntheserate um etwa 10% (Raven et al., 2005). Allerdings weisen die unterschiedlichen Gruppen des Phytoplanktons in Bezug auf die Photosynthese verschiedene Sensitivitäten gegenüber erhöhten CO_2 -Konzentrationen auf, was an Unterschieden der Kohlenstoffaufnahme (CO_2 versus HCO_3^-) und an unterschiedlichem Sättigungsverhalten der Photosynthese liegt. Die Zusammenhänge zwischen Photosynthese, Primärproduktion des Phytoplanktons, mikrobieller Respiration und den Folgewirkungen im Nahrungsnetz

werden allerdings durch eine Vielzahl anderer Faktoren (Temperatur, Licht- und Nährstoffversorgung, unterschiedliches Fraßrisiko durch Zooplankton, Anpassungsprozesse usw.) kompliziert. Beim derzeitigen Wissensstand können keine eindeutigen Schlüsse für die Wirkungen der Versauerung auf Wachstum und Zusammensetzung des Phytoplanktons gezogen werden.

4.3.2 Auswirkungen auf kalkbildende Organismen

Die Kalkbildung ist neben der Photosynthese wohl der wichtigste von der Erhöhung der CO_2 -Konzentration betroffene physiologische Prozess. Er hat weitreichende Konsequenzen für die ökologische Funktion der Meeresökosysteme und kann zudem Rückwirkungen auf die Atmosphärenkonzentration von CO_2 und somit auf das Klimasystem haben (Kap. 4.3.5).

Viele Meeresorganismen verwenden für ihre Skelett- oder Schalenstrukturen Kalk (Kalziumkarbonat), der aus dem Meerwasser extrahiert werden muss. Dies ist nur bei einer Übersättigung des Meerwassers mit Kalziumkarbonat möglich, weswegen die zunehmende CO_2 -Konzentration und der absinkende pH-Wert die Kalkbildung erschweren (Raven et al., 2005). Damit geht eine Schwächung der Skelettstrukturen oder – bei Unterschreiten der Sättigungskonzentration für Kalziumkarbonat – sogar ihre Auflösung einher. Kalk tritt als Baumaterial für Organismen in verschiedenen kristallinen Formen auf: Aragonit und Kalzit sind die beiden wichtigsten (Tab. 4.3-1). Organismen, die Aragonit für ihre Schalen oder Skelette verwenden, werden als Erste unter der Versauerung leiden, da Aragonit sich wegen

einer unterschiedlichen Kristallstruktur unter den veränderten Bedingungen leichter auflöst.

Die Versauerung hat Einfluss auf alle marinen kalkbildenden Arten, wie z. B. bestimmte Planktongruppen, Muscheln, Schnecken und Korallen. Stachelhäuter (z. B. Seesterne und Seegurken) sind besonders gefährdet, da ihre Kalzitstrukturen viel Magnesium enthalten und daher unter erhöhtem CO_2 sogar noch leichter löslich sind als Aragonit (Shirayama und Thornton, 2005). Korallen sind zwar die auffälligsten und bekanntesten kalkbildenden marinen Organismen und leiden als Aragonitproduzenten besonders unter der Versauerung (Kap. 2.4), aber sie tragen nur zu 10% zur globalen marinen Kalkproduktion von jährlich 0,64–2 Gt C bei (Zondervan et al., 2001). Die Simulationen von Guinotte et al. (2003) weisen darauf hin, dass bei einer atmosphärischen CO_2 -Konzentration von knapp 520 ppm, die bereits etwa Mitte des Jahrhunderts erreicht sein könnte, nahezu alle heutigen Riffstandorte von Warmwasserkorallen wegen zu geringer Aragonit-sättigung kaum noch für Korallenwachstum geeignet wären (Abb. 4.3-1).

Die globale marine Kalkbildung wird zu etwa drei Vierteln von Planktonorganismen verursacht, vor allem von Coccolithophoriden, Kammerlingen (Foraminiferen) und Flügelschnecken (Pteropoden). Davon sind die Coccolithophoriden von besonderer Bedeutung, da diese einzelligen Primärproduzenten, die großflächige Planktonblüten mit nur wenigen Arten erzeugen können, einen großen Beitrag zum Export von Kalziumkarbonat in die Tiefsee leisten und daher eine wesentliche Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf spielen (Riebesell et al., 2000; Zondervan et al., 2001; Kap. 4.3.5). Bei Experimenten sowohl mit Monokulturen als auch mit natürlichen Planktongesellschaften zeigte sich, dass sich die Kalkbildung der Coccolithophoriden bei erhöhten

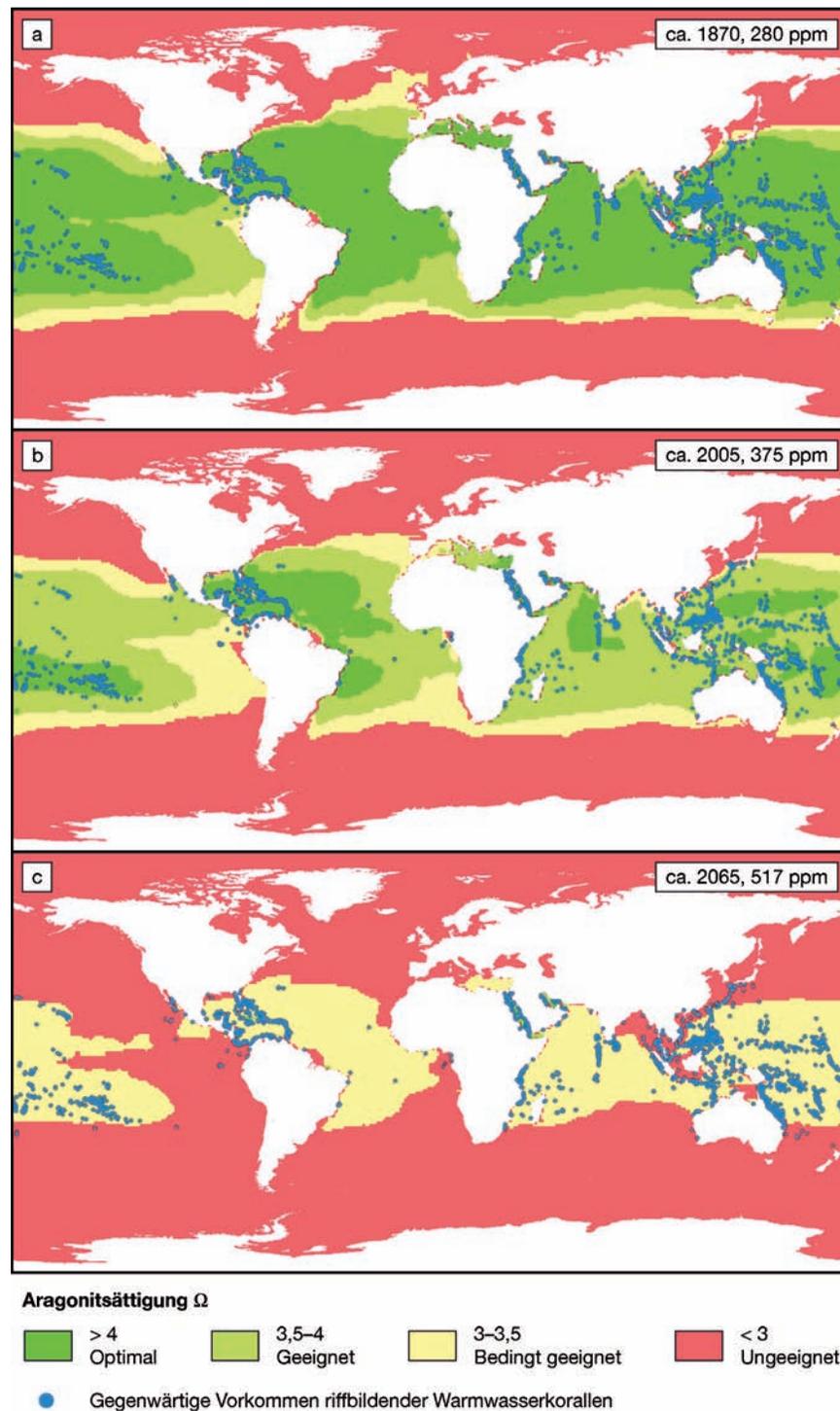
Organismen	Photosynthese	Kristallform des Kalks	Lebensgemeinschaft
Coccolithophoriden	ja	Kalzit	Plankton
Makroalgen*	ja	Aragonit oder Kalzit	Benthos
Kammerlinge	nein einige	Kalzit Kalzit	Benthos Plankton
Korallen			
Warmwasser	ja (in Symbiose)	Aragonit	Benthos
Kaltwasser	nein	Aragonit	Benthos
Flügelschnecken	nein	Aragonit	Plankton
Andere Mollusken*	nein	Aragonit oder Kalzit	Benthos oder Plankton
Stachelhäuter	nein	Mg-Kalzit	Benthos
Krebstiere*	nein	Kalzit	Benthos oder Plankton

Tabelle 4.3-1

Gruppen kalkbildender Meeresorganismen. Kalk (Kalziumkarbonat) kommt in verschiedenen Kristallformen vor. Aragonit löst sich bei geringen Karbonationenkonzentrationen schneller als Kalzit, aber langsamer als Kalzit, aber langsamer als Kalzit, aber langsamer als Kalzit (Mg-Kalzit).
*: nicht alle Arten der Gruppe sind Kalkbildner.
Quelle: nach Raven et al., 2005

Abbildung 4.3-1

Aragonitsättigung und gegenwärtige Riffstandorte von Warmwasserkorallen (blaue Punkte). (a) vorindustrielle Werte (ca. 1870, atmosphärische CO_2 -Konzentration 280 ppm), (b) Gegenwart (ca. 2005, 375 ppm CO_2), (c) Zukunft (ca. 2065, 517 ppm CO_2). Der Grad der Aragonitsättigung (Ω) bezeichnet das relative Verhältnis zwischen dem Produkt der Konzentrationen von Kalzium- und Karbonationen und dem Löslichkeitsprodukt für Aragonit. Standorte mit einer Aragonitsättigung unterhalb von 3,5 sind nur noch bedingt für riffbildende Warmwasserkorallen geeignet (marginal), unterhalb von 3 sind sie ungeeignet. Quelle: Steffen et al., 2004



atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen deutlich abschwächt (Riebesell et al., 2000; Riebesell, 2004). Flügelschnecken sind wichtige Komponenten in den marinen Nahrungsnetzen polarer und subpolarer Breiten, wo sie dichte Populationen (bis zu 1.000 Individuen pro m^3) bilden und als Nahrung für die oberen trophischen Stufen des Nahrungsnetzes die-

nen. Sie sind in diesen Regionen für einen wesentlichen Teil des Exports partikulären Kohlenstoffs in die Tiefe verantwortlich. Wenn die Karbonatsättigung im Meerwasser einen kritischen Wert unterschreitet, können diese Tiere wahrscheinlich keine Schalen mehr bilden. Für wichtige Teile ihres Lebensraums, dem Südlichen Ozean, wird (unter

Annahme des IS92-Szenarios des IPCC) eine Untersättigung in Bezug auf Aragonit bereits ab 2050 prognostiziert, so dass dadurch ihr Verbreitungsgebiet stark eingeschränkt würde (Orr et al., 2005; Raven et al., 2005).

Über die Kapazität der Organismen, sich an diese Veränderungen anzupassen, besteht große Unsicherheit, da bisher noch zu wenige Ergebnisse aus Langzeitexperimenten vorliegen (Raven et al., 2005; Pörtner, 2005).

4.3.3 Ökosystemstruktur und höhere trophische Ebenen

Die prognostizierten pH-Absenkungen im Verlauf dieses Jahrhunderts können also erhebliche Auswirkungen auf kalkbildende Organismen und somit auf die marine Biosphäre insgesamt haben (Orr et al., 2005). Parallel hierzu ist mit einer deutlichen klimabedingten Erwärmung zu rechnen. Beide Wirkungen sind nicht unabhängig: Der CO₂-Anstieg kann z. B. die Temperaturtoleranz für Tiere verringern (Pörtner, 2005). Vor allem die Korallenökosysteme sind ein Beispiel für solche synergistischen negativen Effekte (Kap. 2.4; Hoegh-Guldberg, 2005).

Es sind aber auch Auswirkungen der Versauerung auf das Nahrungsnetz denkbar. Unterschiedliche Reaktionen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen könnten über Wachstum oder Reproduktion der Organismen durch veränderte Konkurrenz die räumliche wie zeitliche Verteilung der Arten ändern (Rost und Sültemeyer, 2003). Bereits beobachtete Auswirkungen bei Primärproduzenten sind u. a. ein unterschiedlich großer CO₂-Düngeeffekt (der z. B. Coccolithophoriden gegenüber Kieselalgen bevorzugt) und eine verminderte Kalkbildung (was Coccolithophoriden benachteiligen könnte; Riebesell, 2004). In Langzeituntersuchungen im Nordostatlantik wurde beobachtet, dass Änderungen des Phytoplanktons durch eine enge Kopplung mit ihren Fraßfeinden zunächst zum algenfressenden Zooplankton und weiter bis zum räuberischen Zooplankton weitergegeben werden können (Richardson und Schoeman, 2004). Eine veränderte Artenzusammensetzung des Phytoplanktons kann sich also auch auf das Zooplankton auswirken. Auch bei polaren Ökosystemen ist denkbar, dass die reduzierte Kalkbildung bei Flügelschnecken Auswirkungen auf die höheren Ebenen des Nahrungsnetzes hat, auch wenn dies spekulativ und kaum prognostizierbar ist (Orr et al., 2005). Ebenso spekulativ sind Aussagen über mögliche Anpassungsprozesse auf der Ebene der Ökosystemstruktur, etwa ob entstandene Lücken ohne wesentliche Folgen für die Gesamtproduktivität durch andere Arten besetzt werden können.

4.3.4 Auswirkungen der Versauerung auf die Fischerei

Die Versauerung der Weltmeere könnte auch Auswirkungen auf die Fischerei haben. Unmittelbare toxische Effekte der erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen auf Fische sind zwar nicht zu erwarten, da die akute Empfindlichkeit von Fischen gegenüber CO₂ erst jenseits der prognostizierten Konzentrationen beginnt (Pörtner, 2005; Kap. 4.3.1). Erschwerte Kalkbildung kann allerdings Veränderungen der Artenzusammensetzung des Phytoplanktons auslösen, was sich über trophische Kopplung bis in die oberen Schichten des Nahrungsnetzes auswirken kann (Richardson und Schoeman, 2004; Kap. 4.3.3). Es ist nicht auszuschließen, dass derartige Änderungen von Struktur und Funktion mariner Ökosysteme auch Auswirkungen auf die pelagische Fischerei haben wird, aber die Prognose bleibt beim derzeitigen Kenntnisstand sehr spekulativ (Raven et al., 2005).

Die durch Versauerung veränderten Wachstums- und Konkurrenzbedingungen der Arten in tropischen Korallenriffen werden wahrscheinlich auch einen anderen wichtigen Zweig der Fischerei betreffen: Millionen Menschen hängen in ihrer Proteinversorgung von der Subsistenzfischerei auf Korallenriffen ab (Raven et al., 2005), die ihrerseits u. a. auch durch Versauerung bedroht sind (Kap. 2.4). Ein großflächiger Verlust von Korallenhabitaten hätte zweifellos negative Auswirkungen auf diese Fischerei, mit schwer abschätzbaren sozioökonomischen Folgen.

4.3.5 Rückwirkungen veränderter Kalkbildung auf den Kohlenstoffkreislauf

Insgesamt werden sich ökologische Gleichgewichte im Meer zu Ungunsten der kalkbildenden Meeresorganismen verschieben, was über veränderte Artenzusammensetzungen im marinen Phytoplankton möglicherweise sogar die globalen biogeochemischen Kreisläufe beeinflussen kann. Die hier beschriebenen Folgen veränderter Kalkbildungsraten des Plankton bilden nur einen kleinen Ausschnitt aller Wechselwirkungen zwischen Klimasystem und Meer, die in der Gesamtschau in Kapitel 4.2 beschrieben sind.

Die jährliche Primärproduktion im Meer liegt bei ca. 50 Gt C, wovon ca. 10 Gt C über die biologische Pumpe in die Tiefsee exportiert werden. Für diesen wichtigen Prozess im globalen Kohlenstoffkreislauf, der insgesamt zur Senkenfunktion des Ozeans beiträgt, macht es einen großen Unterschied, ob die Pro-

duktion durch kalkbildende Arten wie z. B. Coccolithophoriden oder durch nicht kalkbildende Arten wie z. B. Kieselalgen erfolgt.

Die Kalkbildung mariner Organismen ist immer mit einer CO_2 -Produktion verbunden:



Diese „Karbonat-Gegenpumpe“ wird mit zunehmender CO_2 -Atmosphärenkonzentration als Folge der veränderten Karbonatpufferkapazität immer stärker. Bei Annahme einer konstanten Kalkbildung würde dadurch die künftige Senkenwirkung des Meeres abgeschwächt. Wenn sich aber die biogene Kalkbildung als Folge der pH-Absenkung vermindert, kann dieser Effekt überkompensiert werden, so dass sich die Senkenwirkung sogar verstärkt. Dies hätte allerdings nur eine geringe Wirkung auf die CO_2 -Aufnahme des Ozeans (Zondervan et al., 2001). Eine Reihe anderer Effekte komplizieren das Bild weiter (Riebesell, 2004): Verminderte Kalkbildung könnte auch die Dichte und somit die Absinkrate der Partikel in die tieferen Wasserschichten reduzieren, wodurch der Kohlenstoffexport durch die biologische Pumpe verlangsamt würde. Dem steht eine mögliche Beschleunigung der Absinkraten durch vermehrte Bildung extrazellulärer Polysaccharide gegenüber (Engel et al., 2004). Die gegenwärtigen Planktonblüten der Coccolithophoriden bedecken große Meeresflächen über hunderttausende km^2 und hellen wegen ihres Kalkgehalts die Farbe des Meerwassers auf. Ihr Ausfall könnte daher die globale Albedo um bis zu 0,13% reduzieren, was die Erderwärmung leicht beschleunigen müsste (Tyrell et al., 1999). Die Größenordnungen einiger dieser Faktoren sind unklar, der Gesamteffekt aller dieser Fakto-

ren auf die Wechselwirkungen zwischen atmosphärischer CO_2 -Konzentration und biologischer mariner Produktion ist derzeit nicht zu ermitteln und rechtfertigt verstärkte Forschungsanstrengungen (IMBER, 2005; Raven et al., 2005).

4.4

Leitplanke: Versauerung der Meere

4.4.1

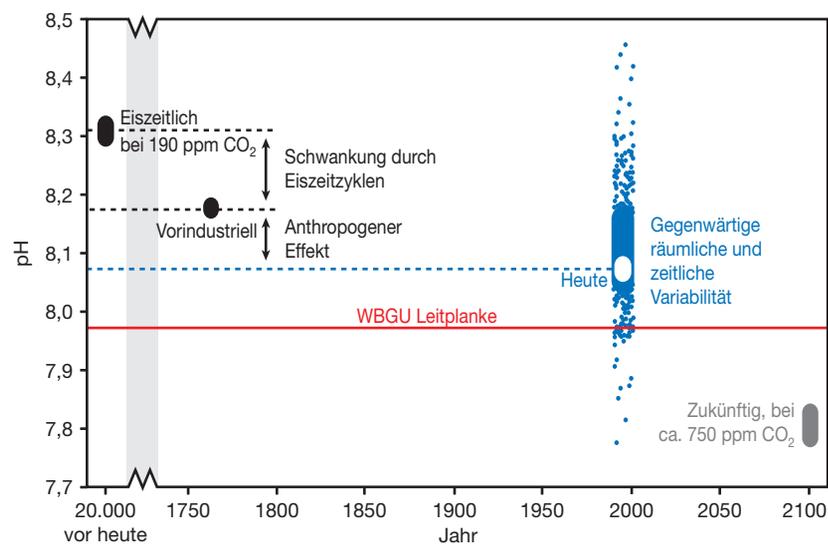
Leitplankenvorschlag

Um unerwünschte bzw. riskante Veränderungen der marinen Nahrungsnetze durch Aragonituntersättigung zu verhindern (Kap. 4.3), sollte der pH-Wert der obersten Meeresschicht (Deckschicht) in keinem größeren Ozeangebiet (d. h. auch nicht im globalen Mittel) um mehr als 0,2 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Wert von im Mittel 8,18 absinken. Eine pH-Absenkung um 0,2 Einheiten entspräche einer Zunahme der H^+ -Ionenkonzentration um ca. 60% gegenüber dem vorindustriellen Wert. Die bisherige pH-Reduktion von 0,11 Einheiten seit der Industrialisierung entspricht einem Anstieg der H^+ -Ionenkonzentration um etwa 30%. Der gegenwärtige mittlere pH-Wert der Meeresoberflächen beträgt 8,07 (Raven et al., 2005). Abbildung 4.4-1 illustriert die WBGU-Versauerungsleitplanke.

Es ist allerdings notwendig, die räumliche und zeitliche Mittelung, auf die sich die Leitplanke bezieht, weiter zu spezifizieren, da der pH-Wert einer starken natürlichen Variabilität unterliegt. Nach Haugan und Drange (1996) unterscheiden sich die pH-Werte der Meeresoberfläche weltweit um bis

Abbildung 4.4-1

Variabilität des mittleren pH-Werts der Ozeane in der Vergangenheit und Gegenwart sowie Projektion für die Zukunft für eine atmosphärische CO_2 -Konzentration von ca. 750 ppm. Die rote Linie illustriert die vom WBGU vorgeschlagene Versauerungsleitplanke. Quelle: nach IMBER, 2005



zu 0,5 pH-Einheiten, während lokale, jahreszeitliche Schwankungen etwa 0,1 pH-Einheiten betragen können (in hochproduktiven Gebieten sogar 0,2–0,3 pH-Einheiten; Riebesell, persönliche Mitteilung).

Nach Simulationsrechnungen von Caldeira und Wickett (2005) führt eine Stabilisierung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration bei 540 ppm bis zum Jahr 2100 im globalen Mittel bereits zu einer pH-Absenkung der Meeresoberflächenschicht um 0,23 gegenüber dem vorindustriellen Niveau, d. h. bei dieser CO_2 -Konzentration wäre die Versauerungsleitplanke bereits überschritten. Eine Stabilisierung bei 450 ppm bis 2100 reduziert den pH-Wert um 0,17, ist also voraussichtlich mit der Versauerungsleitplanke vereinbar. Es bleibt allerdings noch zu überprüfen, ob bei diesem Stabilisierungswert lokal über einen längeren Zeitraum höhere pH-Reduktionen auftreten können, die insbesondere im Südlichen Ozean zu einer Untersättigung der Meeresoberflächenschicht mit Aragonit führen können. Zu beachten ist, dass es sich hier jeweils um die Stabilisierung von CO_2 selbst handelt, und nicht um das Stabilisierungsniveau der Treibhause in ihrer Gesamtheit, die durch das CO_2 -Äquivalent beschrieben wird.

4.4.2

Begründung und Umsetzbarkeit

Die größte Bedrohung für die Meeresorganismen durch die Versauerung hängt mit der Löslichkeit von Kalziumkarbonat zusammen, das sie für den Aufbau von Schalen und Skelettstrukturen verwenden (Kap. 4.3). Die leichter lösliche Variante des Kalziumkarbonats ist das Aragonit, das z. B. von Korallen und bestimmten Planktonarten verwendet wird (Tab. 4.3-1). Kalkbildende Meeresorganismen sind wichtige Bestandteile mariner Ökosysteme, so dass ihre Gefährdung einen nicht tolerierbaren Eingriff in das Erdsystem darstellen würde.

Unterschreitet die Konzentration der Karbonationen einen kritischen Wert von 66 $\mu\text{mol pro kg}$, so ist das Meerwasser nicht mehr gegenüber Aragonit gesättigt, d. h. Meeresorganismen können keine Aragonitschalen mehr bilden. Dies ist vor allem in der Oberflächenschicht zu vermeiden, in der die Primärproduktion des Meeres erfolgt. Die Gefahr einer Aragonituntersättigung in der Meeresoberflächenschicht ist insbesondere im Südlichen Ozean gegeben. Nach Orr et al. (2005) zeigen Simulationen, bei denen die pH-Absenkung im Mittel etwa 0,25 beträgt, bereits eine deutlichen Reduktion der vertikalen Ausdehnung der gesättigten Schicht und einer Untersättigung in Teilgebieten des Südlichen Ozeans. Eine solche Situation sollte nach Ansicht des WBGU vermieden werden.

Der pH-Wert ist aber nicht nur für die Kalkbildung, sondern auch für viele andere Prozesse im marinen System eine wichtige Leitgröße (z. B. Verfügbarkeit von Nährstoffen). Innerhalb der letzten 23 Mio. Jahre lagen die natürlichen Schwankungen des mittleren pH-Werts zwischen Glazial- und Inter-glazialperioden in einer Bandbreite von wenig mehr als 0,1 (Abb. 4.4-1), so dass sich die Meeresorganismen über lange Zeit an einen recht engen pH-Bereich angepasst konnten, der im Oberflächenwasser kaum je unterschritten wird (IMBER, 2005). Dies ist ein weiteres Argument für die Anwendung des Vorsorgeprinzips, zumal die wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Auswirkungen der Versauerung noch sehr lückenhaft sind (Kap. 4.3).

Wegen der großen Bedeutung der Folgen der Ozeanversauerung sollte die Forschung auf diesem Gebiet erheblich intensiviert werden (Kap. 4.6). Solange noch kein tragfähiger wissenschaftlicher Konsens über die tolerierbare Grenze der Auswirkungen der Versauerung besteht, sollte gemäß dem Vorsorgeprinzip ein Sicherheitsabstand eingehalten werden. Der WBGU orientiert seinen Vorschlag, eine pH-Absenkung von mehr als 0,2 abzuwenden, an dem Ziel, eine Aragonituntersättigung der Meeresoberfläche zu vermeiden. Sollte sich herausstellen, dass bereits vor Erreichen der Aragonituntersättigung andere nicht tolerierbare Schäden eintreten, muss die Leitplanke entsprechend angepasst werden.

Da der CO_2 -Eintrag ins Meer durch den Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration und damit die anthropogenen CO_2 -Emissionen verursacht wird, lässt sich die pH-Absenkung des Ozeans durch Emissionsminderung begrenzen. Der Prozess der Versauerung ist jedoch faktisch irreversibel – solange keine Möglichkeit besteht, die atmosphärische CO_2 -Konzentration zu senken, wird der pH-Wert der Oberflächenschicht auf sehr lange Zeit nicht wieder steigen. Da eine Überschreitung der Leitplanke damit unumkehrbar wäre, hat das Vorsorgeprinzip für dieses Problem eine besonders große Bedeutung.

Die Einhaltung der Leitplanke lässt sich wissenschaftlich zuverlässig überprüfen: Einerseits kann der pH-Wert im Meerwasser direkt bestimmt werden, andererseits kann auch aus der Messung der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen auf den mittleren pH-Wert im Meer geschlossen werden.

Die Versauerungs- und die Klimaschutzleitplanke könnten Redundanzen bezüglich der erforderlichen Maßnahmen zu ihrer Einhaltung aufweisen, sind aber nicht gegenseitig ersetzbar: Der anthropogene Treibhauseffekt wird durch ein ganzes Bündel von Treibhausgasen verursacht, darunter zu ca. 60% von CO_2 . Für die Versauerung der Meere hingegen ist

von diesen Gasen nur das CO₂ verantwortlich. Eine Stabilisierung bei 450 ppm bis 2100 würde den pH-Wert um nur 0,17 reduzieren, also die Versauerungsleitplanke einhalten. Die Einhaltung der Klimaschutzleitplanke von 2°C macht – je nach Klimasensitivität – ebenfalls eine Stabilisierungskonzentration bei 450 ppm oder weniger notwendig. Daher würde die Einhaltung der Klimaschutzleitplanke auch die Einhaltung der Versauerungsleitplanke einschließen, vorausgesetzt, dass CO₂ bei der Emissionsreduktion angemessen berücksichtigt wird.

4.5

Handlungsempfehlungen: Klimaschutz und Meeresschutz verknüpfen

In den 1970er und 1980er Jahren wurde das Phänomen des „Sauren Regens“ bekannt. Verantwortlich sind säurebildende Abgase aus der Verbrennung fossiler Energieträger (vor allem SO₂ und NO_x). Dieses Problem, nicht zuletzt verbunden mit dem Medien-echo unter dem Schlagwort „Waldsterben“, übte erheblichen Druck auf Politik und Industrie aus. Mit großem technischen und finanziellen Aufwand wurden daraufhin die Großkraftwerke mit Rauchgaswäschern ausgestattet, Katalysatoren für Autos vorgeschrieben und großflächig Wälder und Seen gekalkt. Vergleicht man den Sauren Regen mit der jetzt bereits laufenden Versauerung der Weltmeere, so wiegt die Gefährdung der Weltmeere erheblich schwerer. Dennoch ist das Medien- und Politikinteresse im Vergleich zum Sauren Regen vernachlässigbar klein und das Problem wird nahezu ignoriert. Die Politik ist daher aufgerufen, das Problem der Versauerung der Weltmeere in seiner Tragweite zu erkennen und ähnlich weitreichende und effektive Maßnahmen umzusetzen wie beim Sauren Regen.

4.5.1

Rolle von CO₂ im Klimaschutz neu bewerten

Die Freisetzung von CO₂ zieht besonders weitreichende Folgen für Meeresökosysteme nach sich: Einerseits wirkt CO₂ als Treibhausgas auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und trägt damit zur globalen Erwärmung und damit auch zur Erwärmung des Meeres bei. Andererseits löst sich ein großer Teil des durch die Menschen emittierten CO₂ im Meerwasser, wo es zusätzlich zu chemischen Veränderungen führt. Angesichts dieser besonders schädlichen Wirkungen des CO₂ auf das Meer sollte diesem Treibhausgas im Rahmen der Klimapolitik besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

HANDLUNGSBEDARF

Die Einhaltung der Leitplanke zur Versauerung des Meeres ist nur durch die Begrenzung des Anstiegs der atmosphärischen CO₂-Konzentration möglich. Technische Lösungen, wie etwa eine Kalkung der Oberflächenschicht des Meeres, sind angesichts der Größenordnung des Problems unrealistisch (Raven et al., 2005). Allerdings wird sich das versauerte Oberflächenwasser mit den Ozeanströmungen im Zeitraum von Jahrhunderten auch in die Tiefsee mischen. Eine Handlungsoption ist daher die Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration, was langfristig auch eine Versauerung der tieferen Meeresschichten auf das Niveau der Oberflächenschicht zur Folge hätte. Alternativ könnte auch eine Obergrenze für die insgesamt durch die Menschen in die Atmosphäre emittierte Menge an CO₂ vereinbart werden. Dadurch könnte mittelfristig die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wieder absinken und eine Versauerung der Tiefsee vermieden werden.

RECHTLICHE GRUNDLAGEN

Durch die derzeitigen klimapolitischen Instrumente wird der Aspekt der Versauerung der Meere aufgrund des CO₂-Eintrags nicht berücksichtigt. Nach Ansicht des WBGU ergibt sich aber aus der Klimarahmenkonvention (UNFCCC), dass den Auswirkungen des Klimawandels auf die Meere Rechnung zu tragen ist, auch wenn dieser Aspekt weder beim Abschluss der UNFCCC im Vordergrund stand noch im Kioto-Protokoll bei der Festlegung der Reduktionsverpflichtungen erfasst wurde. Nach Art. 1 Abs. 3 UNFCCC ist nämlich unter „Klimasystem“ die Gesamtheit der Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und Geosphäre inklusive deren Wechselwirkungen zu verstehen. Der Begriff „Klimasystem“ ist demnach so umfassend definiert, dass auch die Meere, die einen Teil der Hydrosphäre darstellen, eingeschlossen sind, ebenso wie die Wechselwirkungen der Meere mit der Atmosphäre und der Biosphäre. Die Zielsetzung des Art. 2 UNFCCC, „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“, beinhaltet damit auch die Auswirkungen des Treibhausgasanstiegs auf die Meere. Im Falle der Versauerung kann die Bedeutung des Art. 2 UNFCCC folgendermaßen konkretisiert werden: CO₂ ist ein Treibhausgas, und eine übermäßig hohe CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hat eine gefährliche Störung der Meeresökosysteme zu Folge, denn CO₂ löst sich im Wasser und führt zu Versauerung (Kap. 4.1 und 4.3). Die Meere gehören zur Hydrosphäre und die Meereslebewesen sind Bestandteil der Biosphäre. Es geht bei dem Problem der Versauerung also um eine Interaktion zwischen

Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre, die alle Bestandteile des Klimasystems sind (Art. 1 Abs. 3 UNFCCC). Zu den Zielsetzungen der Konvention gehört damit eindeutig, eine gefährliche Versauerung der Meere zu verhindern. Außerdem hält Art. 2 UNFCCC u. a. fest, dass sich die Ökosysteme den Klimaänderungen auf natürliche Weise anpassen können sollen. Die Einhaltung dieser Vorgabe ist bei der heute zu beobachtenden Geschwindigkeit der Versauerung in Zweifel zu ziehen: Die Anpassungsfähigkeit mariner Ökosysteme kann beispielsweise dann überfordert werden, wenn die Aragonit-sättigungshorizonte im Südlichen Ozean bis an die Oberfläche steigen (Kap. 4.3). Damit ist unmittelbarer Handlungsbedarf gegeben, die Versauerung zu begrenzen und im Rahmen der UNFCCC entsprechende Maßnahmen zu vereinbaren.

EMPFEHLUNGEN

Vor diesem Hintergrund plädiert der WBGU dafür, in der Klimapolitik alle Auswirkungen auf den Lebensraum Meer zu beachten. Bei den anstehenden Verhandlungen über die zweite Verpflichtungsperiode des Kioto-Protokolls sollte sich die Bundesregierung dafür einsetzen, dass die direkten negativen Auswirkungen der CO₂-Emissionen auf das Meer berücksichtigt werden. Die angestrebte Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre sollte deshalb so ausgerichtet sein, dass die Versauerung der Meere angemessen begrenzt wird. Dazu sollte CO₂ nicht nur als Teil eines Korbs verschiedener Treibhausgase betrachtet werden. Vielmehr sollte unabhängig von der Reduktion anderer Treibhausgase auch die Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf einem Niveau sichergestellt werden, das die Einhaltung der Versauerungsleitplanke erlaubt (Kap. 4.4).

Unter Umständen müsste dafür zusätzlich zu den bestehenden Reduktionsverpflichtungen eine Obergrenze für CO₂-Emissionen der einzelnen Staaten bzw. Staatengruppen definiert werden, die diese dann komplementär zu den sonstigen Verpflichtungen einzuhalten hätten. Im Einzelnen wären die genauen Wirkungen dieser und möglicher weiterer Instrumente noch zu klären; hier dürfte insbesondere auch dem Anpassungsbedarf der bestehenden flexiblen Mechanismen (Emissionshandel, Clean Development Mechanism und Joint Implementation) eine besondere Bedeutung zukommen.

Die Festlegung einer eigenen Obergrenze für CO₂ wäre hingegen dann nicht notwendig, wenn sich die Staaten auf eine Reduktion der Treibhausgasemissionen einigten, die die Einhaltung der WBGU-Klimaschutzleitplanke gewährleisten, und wenn sich der Anteil von CO₂ an den Treibhausgasemissionen nicht wesentlich veränderte. In diesem Fall wäre die

dafür notwendige CO₂-Reduktion aller Wahrscheinlichkeit nach ausreichend, um eine Überschreitung der Versauerungsleitplanke zu vermeiden.

4.5.2

Emissionen aus der Schifffahrt berücksichtigen

Um die Stabilisierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration zu erreichen, sollten die CO₂-Emissionen durch den Seeschiffahrt und den internationalen Luftverkehr stärker in Emissionsreduktionsstrategien integriert werden. Für beide Bereiche sind bisher keine quantitativen Reduktionsverpflichtungen vereinbart worden. Der WBGU empfiehlt diese Regelungslücken zu schließen, indem die durch den internationalen Luft- und Schiffsverkehr verursachten CO₂-Emissionen in Verhandlungen über zukünftige Reduktionsverpflichtungen im Rahmen des Kioto-Prozesses einbezogen werden. Nach bisherigen Schätzungen machen die weltweiten CO₂-Emissionen aus der Schifffahrt rund 2% der globalen Emissionen aus. Im letzten Jahrzehnt sind sie mehr als doppelt so schnell gestiegen wie die Gesamtemissionen (Bode et al., 2002; IEA, 2002). Dies verdeutlicht den dringenden Handlungsbedarf.

Neben der Emission von CO₂ trägt die Seeschiffahrt auch durch Einträge von Schadstoffen, Nährstoffen und Sedimentpartikeln zu Belastungen der Meeres- und Küstenökosysteme bei. Vor diesem Hintergrund bietet die Regulierung der Seeschiffahrt einen Anknüpfungspunkt für eine Verbindung von Klima- und Meeresschutz auf der Instrumentenebene.

Aufgrund der relativen Umweltfreundlichkeit und der ökonomischen Bedeutung des Seeverkehrs muss eine Regulierung nicht auf die Verringerung des Schiffsverkehrsaufkommens abzielen. Vielmehr geht es darum, Anreize für technologische Innovationen und Verbesserungen im Umweltmanagement zu schaffen, die sowohl die Belastung der Meere reduzieren als auch zur Vermeidung von CO₂-Emissionen beitragen. Der WBGU empfiehlt zu diesem Zweck, Entgelte für die Nutzung der Meere durch die Seeschiffahrt zu erheben (WBGU, 2002).

Mit diesem Instrument wird der Zusammenhang zwischen der Nutzung der Umweltgüter „Meer“ und „Atmosphäre“ und deren nutzungsabhängige Beeinträchtigung verdeutlicht. Ein Entgelt spiegelt die Knappheit der Umweltgüter und die Kosten ihrer Bereitstellung wider. Die Wirtschaftsakteure, die durch ein Entgelt belastet sind, haben einen Anreiz, ihre Nutzung der globalen Umweltgüter anzupassen und nachhaltiger zu gestalten (WBGU, 2002).

Mögliche Ausgestaltungen eines Nutzungsentgelts hat der WBGU detailliert beschrieben

(WBGU, 2002). Auf Basis eines allein für den EU-Raum vorgeschlagenen Entgelteregimes ließe sich ein jährliches Aufkommen von 0,4–0,7 Mrd. € erzielen. Der WBGU schlägt eine Verwendung der erzielten Mittel zum Meeresschutz vor, da so ein sachlicher Zusammenhang zwischen der Belastung und Entlastung der Meere hergestellt wird (WBGU, 2002).

4.6 Forschungsempfehlungen

VERSAUERUNG UND MEERESÖKOSYSTEME

Die physiologischen Effekte der Versauerung auf Meeresorganismen, insbesondere auf Kalkbildner, und die Auswirkungen im Meeresökosystem sind nur unzureichend verstanden. Physiologische Versuche mit moderat erhöhten CO₂-Konzentrationen und Experimente zur Wirkung auf marine Nahrungsnetze (trophische Kopplung zwischen Phytoplankton, Zooplankton und Fischen) sowie Untersuchungen möglicher Anpassungsprozesse, physiologischer Art auf evolutionärer Basis sind erforderlich.

BIOGENE KALKBILDUNG UND KOHLENSTOFFKREISLAUF

Das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen kalkbildendem Plankton, der biologischen Pumpe und dem globalen Kohlenstoffkreislauf ist ähnlich lückenhaft, so dass eine Modellierung des Nettoeffekts noch nicht möglich ist. Deshalb sollten u. a. Modellstudien über die versauerungsbedingte Reduktion der biologischen Exportproduktion aufgrund verringerten mineralischen Ballasts (Kalkschalen) durchgeführt werden.

WEITERE AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS

Die Versauerung ist wahrscheinlich nur eine von vielen Veränderungen, die sich in der Biogeochemie der Ozeane durch anthropogene Treibhausgasemissionen bzw. durch den Klimawandel ergeben wird. Andere Aspekte, wie die Auswirkungen auf Sauerstoffbilanz und Nährstoffversorgung der Meere, sind kaum verstanden und sollten dringend erforscht werden, um rechtzeitig mögliche kritische Entwicklungen erkennen zu können.

ZUKÜNFTIGE CO₂-AUFNAHME DURCH DEN OZEAN

Die CO₂-Aufnahme durch den Ozean spielt eine Schlüsselrolle beim Klimawandel. Daher sollte den Wechselwirkungen zwischen dem atmosphärischen Strahlungshaushalt, der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre und den physikalischen, chemischen und biologischen Änderungen im Ozean verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

INTERNATIONALE FORSCHUNGSPROGRAMME

Die Förderung von Projekten zu den oben genannten Fragen der internationalen Forschungsprogramme (z. B. SOLAS, 2004; IMBER, 2005) ist zu empfehlen.

CO₂ UND KLIMASCHUTZ

Falls sich eine eigene Reduktionsverpflichtung für CO₂ als notwendig erweist, sind Möglichkeiten der Ausgestaltung zu entwickeln und zu bewerten. Weiter sind die sich hieraus ergebenden Implikationen für die flexiblen Mechanismen des Kioto-Protokolls (insbesondere CDM und Emissionshandel) zu untersuchen.

Die Sequestrierung von CO₂ gilt in jüngster Zeit zunehmend als Hoffnungsträger des Klimaschutzes (IEA, 2004). Der IPCC hat dieses Thema in einem kürzlich erschienenen Sonderbericht ausführlich erörtert (IPCC, 2005). Schätzungen gehen davon aus, dass diese Technologie bis 2015 Marktreife erlangen könnte (IEA, 2004). Binnen 50 Jahren könnten 20–40% der CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Brennstoffe abgetrennt, aufgefangen und eingelagert werden (IPCC, 2005), vorausgesetzt, Forschung und Entwicklung würden deutlich intensiviert (IEA, 2004). Die Technologie der Sequestrierung ist für das vorliegende Gutachten von unmittelbarer Bedeutung, da sie auch die Einlagerung von CO₂ im Meer und im Meeresboden umfasst (Kasten 5.3-1).

5.1 Sequestrierung von CO₂

5.1.1 Potenziale und Kosten

Die technische Umsetzung der CO₂-Sequestrierung lässt sich in drei Prozesse unterteilen: Abscheidung, Transport und Speicherung des CO₂ (IEA, 2004). Als Speicherorte kommen geologische Formationen an Land einschließlich ausgebeuteter Öl- und Gasfelder und nicht abbaubarer Kohleflöze, geologische Lagerstätten im Meeresboden sowie die Meerwassersäule in Frage. Die chemische Fixierung an Metalloxiden ist denkbar, kommt aber angesichts hohen Energieaufwands und sehr hoher Kosten derzeit weniger in Betracht (IPCC, 2005).

Die Lagerkapazität in ausgebeuteten Öl- und Gasfeldern umfasst etwa das 30- bis 40-fache des derzeitigen jährlichen CO₂-Ausstoßes aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Das Lagerpotenzial durch Enhanced Oil Recovery (EOR), bei der man CO₂ zur Erhöhung der Ölausbeute in die Kavernen verpresst, wird auf das 3–5-fache des jährlichen CO₂-Ausstoßes geschätzt. Bei der Absorption in Kohleflözen variieren die Angaben von etwa 13% bis zum

Neunfachen des Jahresausstoßes an CO₂. In salinen Aquiferen unter dem Meer könnte mindestens das 40-fache des Jahresausstoßes an CO₂ deponiert werden (IPCC, 2005). Allerdings gibt es – abgesehen von EOR – wenig Erfahrungen mit der geologischen Speicherung, und über die Eignung der potenziellen Lagerstätten herrscht Unklarheit.

Für die Sequestrierung von CO₂ gelten große Punktquellen, etwa fossile Großkraftwerke, in der Nähe eines potenziellen Speicherorts als besonders attraktiv. An fossilen Kraftwerken könnten typischerweise 80–90% des freiwerdenden CO₂ abgeschieden werden. Allerdings wird hierfür Energie benötigt, wodurch sich der Brennstoffverbrauch um 16–31% (bei Nachrüstung bestehender Braunkohlekraftwerke sogar um 70%) erhöht. Transport und Injektion des CO₂ erfordern demgegenüber einen vergleichsweise geringen Energieaufwand. Es muss 20–40% mehr CO₂ eingelagert werden, als vermieden wird – bei Nachrüstung bestehender Braunkohlekraftwerke sogar mehr als das Doppelte.

Auch CO₂-Emissionen großtechnischer Biomasseanlagen kommen für die Sequestrierung in Frage. Hierdurch würde eine reale CO₂-Senke geschaffen werden, da der in der Biomasse enthaltene Kohlenstoff vorher über die pflanzliche Photosynthese der Atmosphäre entzogen wurde.

Die Kosten der CO₂-Abscheidung werden je nach Energieträger, Alter, Kraftwerkstyp und angewandter Abscheidungstechnologie derzeit auf 11–57 US-\$ pro t CO₂ geschätzt (IPCC, 2005). Beim CO₂-Transport sind Pipelines Stand der Technik. Allein in den USA werden jährlich 40 Mt CO₂ über Pipelines mit einer Gesamtlänge von 2.500 km transportiert. Der Schiffstransport ist Pipelines bei großen Distanzen über See jedoch wirtschaftlich überlegen. Gegenüber Transportkosten für eine Tonne CO₂ per Pipeline von durchschnittlich 4–30 US-\$ pro 1.000 km, entstehen beim Schiffstransport Kosten von etwa 15–25 US-\$ pro 5.000 km (IEA, 2004; IPCC, 2005). Die Einbringungs- und Lagerungskosten werden mit 0,5–8 US-\$ pro t CO₂ als vergleichsweise gering eingeschätzt. Hinzu kommen geringfügige Aufwendungen für die Überwachung und Wartung der Lager-

stätten. Die Gesamtkosten der Sequestrierung bei Speicherung im Meer bzw. unter dem Meeresboden liegen somit schätzungsweise zwischen 20 und 100 US-\$ pro t CO₂.

Die Stromerzeugungskosten pro MWh würden sich nach derzeitigem Wissensstand durch die Sequestrierung des freigesetzten CO₂ um 12–34 US-\$ für neue Kraftwerke und um 33–44 US-\$ für nachgerüstete Braunkohlekraftwerke erhöhen (IPCC, 2005). Durch Addition auf die Stromerzeugungskosten von derzeit ungefähr 25–55 US-\$ pro MWh, die im Wesentlichen von den jeweiligen Brennstoffpreisen abhängen, ergäben sich insgesamt Stromerzeugungskosten von 45–80 US-\$ pro MWh, vergleichbar mit vielen Wind- und Kleinwasserkraftanlagen (Kasten 5.3-2). Die Stromerzeugung in fossilen Kraftwerken würde sich durch die Sequestrierung um 30–60% für neue Kraftwerke und bis zum Dreifachen bei Nachrüstung bestehender Kraftwerke verteuern. Optimistische Prognosen gehen zwar davon aus, dass sich die Sequestrierungskosten bis zum Jahr 2030 spürbar senken lassen. Die Elektrizitätsgewinnung aus erneuerbaren Energien dürfte mit ungefähr 10–20 US-\$ pro MWh (IEA, 2004) und langfristig voraussichtlich ansteigenden Preisen für fossile Brennstoffe aber noch an wirtschaftlicher Attraktivität gewinnen.

5.1.2

Risiken und Nachhaltigkeit

Schwerer als die Unsicherheiten über die Entwicklung der Kosten wiegt jedoch die Ungewissheit hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit der Sequestrierung. Dabei müssen grundsätzlich drei Arten von Risiken in Betracht gezogen werden.

1. *Die Gefahr von Unfällen:* Ähnlich wie bei Erdgaspipelines kann es auch bei CO₂-Pipelines zum unbeabsichtigten Austritt (Leckagen) von CO₂ kommen. Treten dabei CO₂-Konzentrationen von mehr als 7–10% in der Außenluft auf, bestehen Gefahren für Gesundheit und Leben. Erfahrungen mit bestehenden Pipelinesystemen zeigen allerdings, dass größere Schäden an Pipelines sehr selten sind. Zudem kann das Risiko durch ein verbessertes Design der Pipelines und Monitoring weiter gesenkt werden. Plötzliches Entweichen größerer CO₂-Mengen ist auch während der CO₂-Injektion in die Endlagerstätte denkbar. Zudem kann ähnlich wie bei EOR oder der Erdgaslagerung das eingelagerte CO₂ abrupt – etwa durch mangelhafte Abdichtung der Lagerstätte – austreten (IPCC, 2005). Solche Großunfälle bei der Lagerung von CO₂ gelten als wenig wahrscheinlich. Wenn sie aber auftreten, sind ihre unmittelbaren Folgen auf See deutlich geringer als in

bewohnten Gegenden an Land, wo mit gravierenden, im Extremfall tödlichen Folgen für den Menschen gerechnet werden muss.

2. *Mögliche Folgen für die Meeresökologie:* Dies ist insbesondere bei der nach Überzeugung des WBGU nicht vertretbaren CO₂-Verklappung im Meerwasser der Fall und wird im Kapitel 5.2 diskutiert.
3. *Andauerndes, schleichendes Entweichen des gelagerten CO₂:* Dieses Risiko ist für den langfristig orientierten Klimaschutz von großer Bedeutung. Der IPCC-Bericht (IPCC, 2005) nennt zwar keine konkreten Zahlen für akzeptable Leckageraten. Eine einfache Überschlagsrechnung ergibt jedoch eine Richtschnur. Die kumulativen Emissionen in den verschiedenen SRES-Szenarien für 1990–2100 variieren zwischen 1.000 Gt C (B1-Szenario) und 2.200 Gt C (A1FI-Szenario) (IPCC, 2000). Um die Klimaschutzleitplanke von 2°C einzuhalten, dürfen kumulativ nur noch 500 Gt C in die Atmosphäre gelangen (Meinshausen, 2006). Gegenüber einem mittleren Emissionsszenario, bei dem 1.500 Gt C bis zum Jahr 2100 emittiert werden würden, muss also die Emission von rund 1.000 Gt C vermieden werden. Würde diese Menge sequestriert werden, würde bei einer Leckagerate von 0,1% pro Jahr (d. h. einer Rückhaltezeit von 1.000 Jahren) bereits jährlich 1 Gt C unkontrolliert entweichen. Bei Einhaltung der 2°C-Leitplanke liegen jedoch die langfristig (etwa ab dem Jahr 2200) akzeptablen Gesamtemissionen sogar für den Fall einer mittleren Klimasensitivität von 3°C bei maximal 1 Gt C pro Jahr (Caldeira et al., 2003). Selbst bei dem oben angenommenen mittleren Emissionsszenario, das nicht den ungünstigsten Fall darstellt, würde langfristig allein die Leckage aus den CO₂-Lagerstätten bereits 100% der erlaubten CO₂-Emissionen verursachen. Noch problematischer wird es, wenn weniger optimistische Annahmen getroffen werden: Tatsächlich könnte sich die Klimasensitivität als höher erweisen, andere Treibhausgase (z. B. Methan, Kap. 6) könnten verstärkt zur Erwärmung beitragen, oder die vorgeschlagene 2°C-Leitplanke könnte sich langfristig als zu hoch erweisen, etwa weil dadurch das Abschmelzen des Grönlandeises ausgelöst wird (Kap. 3). Alles in allem erscheint daher maximal ein Zehntel der oben genannten Leckagerate akzeptabel, also 0,01% pro Jahr. Das entspricht einer Rückhaltezeit von 10.000 Jahren. Sequestrierung stellt also nur dann eine akzeptable Klimaschutztechnologie dar, wenn sichergestellt werden kann, dass das CO₂ über mindestens 10.000 Jahre in seinem Lager verbleibt.

5.2

CO₂-Speicherung im Meer

Für die Kohlenstoffspeicherung im Ozean werden grundsätzlich zwei Optionen diskutiert: Die physikalisch-chemische Lösung im Meerwasser und die im weitesten Sinn biologisch-technische Speicherung in Meeresökosystemen, vor allem durch Eisendüngung. Im Folgenden werden lediglich physikalisch-chemische Techniken näher erörtert. Nicht vertieft wird die Idee, in Meeresgebieten, in denen der Mikronährstoff Eisen für die Primärproduktion der limitierende Faktor ist (vor allem im Südlichem Ozean), durch die permanente Zugabe von Eisen Algenblüten auszulösen und somit das Senkenpotenzial des Ozeans zu erhöhen. Zum einen ist die erwartete Größenordnung der Mengeneffekte wohl eher gering (wie auch ein Vergleich mit paläoklimatologischen Daten vermuten lässt), und es gibt Zweifel an der ausreichenden Langfristigkeit der Speicherung (Kap. 5.1.2). Zum anderen sind die Risiken einer großskaligen Eisendüngung im Hinblick auf die mittelbaren Folgen für die Meeresökosysteme schwer abzuschätzen. Der WBGU hat an anderer Stelle bereits die Gründe für seine Ablehnung der Eisendüngung von Ozeanen dargelegt (WBGU, 2003a).

5.2.1

Speicherung und Verweildauer von CO₂

Eine diskutierte Form der CO₂-Speicherung stellt die direkte Einleitung in das Meerwasser dar. Der CO₂-Gehalt der Meeresoberfläche steht in einem sich relativ schnell einstellenden Gleichgewicht mit der Atmosphäre, so dass ein künstlich überhöhter CO₂-Gehalt des Oberflächenwassers innerhalb kürzester Zeit in die Atmosphäre ausgasen würde. Daher kann allenfalls die Einleitung in die Tiefsee einen langen Aufenthalt des Kohlenstoffs im Meer gewährleisten. Das dort eingeleitete CO₂ kann für einige Jahrhunderte von der Atmosphäre isoliert bleiben (IPCC, 2005), auf längeren Zeitskalen stellt sich aber ein Gleichgewicht zwischen der atmosphärischen CO₂-Konzentration und derjenigen im Meer ein. Dann werden je nach atmosphärischer CO₂-Konzentration zwischen 65% und 80% des anthropogenen CO₂ im Meer gespeichert sein, unabhängig davon, ob das CO₂ in die Atmosphäre emittiert oder in den Ozean eingeleitet wurde (Caldeira et al., 2005). Die Einbringung von CO₂ in das Meerwasser könnte daher zwar einen Höchstwert in der atmosphärischen CO₂-Konzentration abschwächen; sie hat aber keinen Einfluss auf das längerfristige Stabilisationsniveau des

atmosphärischen CO₂. Sie stellt daher – unabhängig von den Folgen für die Meeresökologie (Kap. 5.2.2) – keine nachhaltige Lösung des Problems dar, da auf diese Weise zukünftige Generationen durch irreversible Folgen belastet würden.

Eine andere, technische Möglichkeit wäre die Lagerung von CO₂ als Flüssigkeit oder Hydrat auf dem Meeresboden, was aufgrund der dann höheren Dichte von CO₂ nur in Wassertiefen ab 3.000 m möglich ist. Ohne eine physikalische Barriere würde sich jedoch das CO₂ auch aus solchen Reservoiren langsam in der darüber liegenden Wassersäule lösen. Auch diese Technologie führt also allenfalls zu einer zeitlichen Verschiebung der Folgen des Klimawandels, nicht aber zu ihrer Minderung. Keine der diskutierten technischen Möglichkeiten der Sequestrierung im Meerwasser wurde bisher in Feldstudien von nennenswertem Umfang erprobt. Für keines der bisher vorgeschlagenen Forschungsprojekte wurde die Genehmigung erteilt, auch nur wenige Tonnen Kohlendioxid in die Tiefsee einzuleiten.

5.2.2

Auswirkungen der CO₂-Speicherung auf Tiefseeorganismen

Wie an der Meeresoberfläche ändert auch die direkte Einleitung von CO₂ in die Tiefsee die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Meerwassers. Dies betrifft zunächst die unmittelbare Umgebung des Ortes der Einleitung, beispielsweise den Endpunkt der Pipeline, durch die das flüssige CO₂ in die Tiefsee strömt. Hier kann es, wie Simulationen zeigen, lokal zu sehr starken Änderungen des pH-Werts um bis zu mehrere Einheiten kommen. Durch technische Ausgestaltungen, die zu einer schnelleren Verdünnung führen (etwa eine von einem Schiff geschleppte Pipeline), kann die maximale lokale pH-Änderung abgesenkt werden. In der etwas weiteren Umgebung (mehrere km) ist die Geschwindigkeit der Verdünnung im Wesentlichen durch die Ozeanströmungen bestimmt, so dass die chemischen und physikalischen Auswirkungen mit Ozean-Zirkulationsmodellen abgeschätzt werden können. Bei einer Einleitung von 0,1 Gt C pro Jahr (das sind weniger als 2% der industriellen Emissionen und etwa 5% des heutigen, anthropogen verursachten CO₂-Eintrags über die Meeresoberfläche) könnte sich beispielsweise über einen Zeitraum von 100 Jahren in bis zu 0,01% des Meeresvolumens der pH-Wert um 0,3 Einheiten absenken (Caldeira et al., 2005). Die CO₂-Speicherung in der Tiefsee könnte daher auch ernste Auswirkungen auf das Tiefseeökosystem haben. Die Entwicklung der Tiefseeorganismen verläuft sehr langsam, ihre Stoffwechselraten

sind niedriger und ihre Lebenserwartung höher als in anderen Meeresschichten (IPCC, 2005). Die Bewohner der Tiefseeökosysteme haben sich während ihrer Evolution an die sehr speziellen Lebensbedingungen angepasst, mit ihren typischerweise sehr stabilen Temperatur- und Druckverhältnissen und relativ konstanten CO₂-Konzentrationen (mit Ausnahme der vulkanischen CO₂-Quellen). Solche gleichbleibenden Umgebungsvariablen erfordern keine schnellen Anpassungsstrategien. Daher muss bei einer möglichen Speicherung von CO₂ auf dem Meeresboden ebenso wie bei Leckagen der Speicherstätten unter dem Meeresboden damit gerechnet werden, dass die dortigen Ökosysteme sehr stark geschädigt werden bzw. sehr lange brauchen, um sich von einer Veränderung ihrer Umgebung zu erholen (IPCC, 2005).

Über die Organismen der Tiefsee, ihre Lebensformen und Interaktionen, ist generell sehr wenig bekannt. Die direkte Wirkung von CO₂ auf marine Organismen ist bisher vorwiegend im Labor untersucht worden. Studien über Beobachtungen im Feld fehlen weitgehend, bis auf einige wenige Experimente mit kleinen CO₂-Wolken auf dem Meeresboden und Untersuchungen an vulkanischen CO₂-Quellen (Pörtner, 2005).

In einem dieser Experimente *in situ* wurde vor der Küste Kaliforniens in 3.600 m Tiefe flüssiges CO₂ ausgebracht, um das Überleben und Verhalten der Tiefseefauna nach direktem Kontakt mit CO₂ zu untersuchen (Barry et al., 2004). Je nach pH-Änderungen und Abstand zu der CO₂-Fahne variierte die Überlebensrate der Tiere. Flagellaten, Amöben und Nematoden in der Sedimentszone nahe der CO₂-Quelle zeigten eine hohe Sterblichkeit. In einer weiteren Studie wurden Duftstoffe von Beutetieren mit dem Ausbringen von CO₂ kombiniert (Tamburri et al., 2000). Fische und Wirbellose wurden vom Duft angezogen und schienen teilweise sogar eine Distanz von nur wenigen cm zur CO₂-Quelle trotz des tiefen pH-Werts relativ unbeschadet zu überstehen. Aasfressende Schleimaale nahmen – angelockt durch den Duft der Beute – die eigene Narkotisierung durch den hohen CO₂-Gehalt in Kauf. Tyler (2003) befürchtet daher, dass Tiere, die bei einer CO₂-Einbringung in die Tiefsee durch den direkten Kontakt mit CO₂ sterben würden, größere Aasfresser anziehen könnten, die wiederum durch die CO₂-Wolke getötet würden. Hierbei dürften Tintenfische und andere Wirbellose im Vergleich zu Wirbeltieren empfindlicher auf eine hohe CO₂-Konzentration reagieren (Pörtner et al., 2004), da ihre Körperflüssigkeit kein Hämoglobin enthält, das hilft, den Körper vor großen pH-Schwankungen zu schützen. So könnte auch eine kleine, lokale CO₂-Wolke weitreichende Auswirkungen auf die Umgebung haben.

Risiken bestehen auch bei Ausgasungen in die Atmosphäre. Zwei Katastrophen ereigneten sich in den 1980er Jahren, als aus den vulkanischen Seen Monoun und Nyos in Kamerun große CO₂-Wolken aus gasgesättigtem Tiefenwasser in die Atmosphäre gelangten. Das Unglück am Nyos-See hatte verheerende Auswirkungen: Rund 80 Mio. m³ CO₂ wurden ausgestoßen, was bis zu 10 km vom See entfernt das Leben von mindestens 1.700 Menschen und mehreren Tausend Tieren forderte (Kling et al., 1987; Clarke, 2001). Ob der Nyos-See vor der Katastrophe in irgendeiner Form Leben beherbergte, und wie sich die Gaswolke auf diese Biosphäre auswirkte, wird in der Literatur kaum erörtert. Freeth (1987) beschrieb, dass trotz ansonsten günstiger Lebensbedingungen die lokale Bevölkerung weder vor der Katastrophe Fische im See gesichtet hatte, noch dass nach dem Ereignis Fischkadaver aufgefunden worden seien.

Falls eine große, in die Tiefsee gepumpte CO₂-Wolke an die Meeresoberfläche oder in höhere Wasserschichten aufstiege, kann also über die ökologischen Folgen nur spekuliert werden. Zusammenfassend sprechen daher auch die kaum kalkulierbaren ökologischen Risiken für ein generelles Verbot der CO₂-Speicherung im Meerwasser.

5.2.3 Völkerrechtliche Ausgangslage

Für die CO₂-Speicherung im Meer und im Meeresboden lassen sich die relevanten völkerrechtlichen Vorgaben wie folgt zusammenfassen: Nach dem Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen – das London-Übereinkommen von 1972 – ist das Einbringen bestimmter, in Anlage I des Übereinkommens aufgeführter Abfälle und Stoffe in die See verboten. Weitere, in Anlage II des Übereinkommens aufgelistete Abfälle und Stoffe dürfen nur mit vorheriger Sondererlaubnis eingebracht werden. Sonstige Abfälle und Stoffe dürfen bei Vorliegen einer vorherigen, „allgemeinen“ Erlaubnis eingebracht werden. In der „Schwarzen Liste“ von Anlage I sind seit dem 1. Januar 1996 auch Industrieabfälle aufgeführt (Ziff. 11), womit „Abfälle aus Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen“ gemeint sind. Es ist davon auszugehen, dass abgetrenntes CO₂ aus solchen Prozessen stammt und folglich als Industrieabfall im Sinne von Anlage I gilt. Allerdings enthält das Übereinkommen hinsichtlich der Behandlung von Stoffen, deren Einbringung in die See verboten ist, eine wichtige Ausnahme im Zusammenhang mit der Gewinnung mineralischer Ressourcen: Gemäß Art. III Ziff. 1 Bst. c London-Übereinkommen fällt die „Beseitigung von Abfällen

oder sonstigen Stoffen, die unmittelbar oder mittelbar aus der Erforschung, der Ausbeutung und der damit zusammenhängenden, auf See durchgeführten Verarbeitung von mineralischen Schätzen des Meeresbodens herrühren“, nicht unter die Bestimmungen der Konvention. Mit anderen Worten ist die Einbringung von CO₂, das bei der Gewinnung von Erdöl oder Erdgas auf See anfällt, nach dem Übereinkommen erlaubt, sofern die entsprechenden Verarbeitungsprozesse auf See stattfinden.

Die gleiche Rechtslage bestünde grundsätzlich unter dem Protokoll von 1996, wenn auch der Ansatz variiert. Das Protokoll – das künftig die Konvention ersetzen soll, derzeit aber mangels der erforderlichen Anzahl von Ratifikationen noch nicht in Kraft ist – enthält ein grundsätzliches Verbot des Einbringens in die See, verbunden mit einer Auflistung (Anlage 1) der entsprechenden Ausnahmen. Unter diesen Ausnahmen ist CO₂ nicht aufgeführt. Daraus folgt, dass die Einbringung von CO₂ nach dem Protokoll grundsätzlich verboten wäre, sobald es in Kraft tritt. Die Einbringung ist gemäß des Protokolls aber weiterhin dann erlaubt, wenn das CO₂ bei der Gewinnung von Erdöl oder Erdgas auf See anfällt und auch die Verarbeitung dort erfolgt (Art. 1 Ziff. 4.3).

5.3

CO₂-Speicherung in geologischen Formationen im Meeresboden

5.3.1

CO₂-Einbringung in den Meeresboden

Die Einbringung von CO₂ in geologische Formationen unter dem Meeresboden unterscheidet sich nicht grundsätzlich von der Einbringung an Land. Auch hier bieten sich beispielsweise saline Aquifere als Speicher an oder die Verpressung von CO₂ in Erdöllagerstätten, womit gleichzeitig die Ölausbeute gesteigert werden kann. Lediglich die technischen Einrichtungen müssen an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden. Die anwendbaren Monitoring-Techniken unterscheiden sich an Land und im Meer jedoch deutlich. Außerdem bestehen in sicherheitstechnischer Hinsicht einige Unterschiede.

Derzeit wird nicht nur hoher Forschungsaufwand zur CO₂-Einlagerung im Meeresboden betrieben (CSLF, 2005), sondern es gibt bereits praktische Erfahrungen auf diesem Gebiet, und weitere Projekte sind geplant (Bellona Foundation, 2005; Deutsche BP, 2005). Wenn die Abgaben auf CO₂ bzw. die Preise für Emissionsrechte steigen, nimmt die ökonomische Attraktivität der Sequestrierung zu, so dass über das Sleipner-Projekt (Kasten 5.3-1) und EOR

(Kap. 5.1) hinaus mit zunehmendem Engagement des Unternehmenssektors zu rechnen ist. So denkt man im norwegischen Unternehmen Statoil bereits darüber nach, „ausländisches“ CO₂ durch Pipelines zur Sleipner-Gasplattform des Unternehmens zu transportieren und dort in die bereits genutzte CO₂-Lagerstätte unter dem Meer einzulagern.

5.3.2

Risiken und Nachhaltigkeit der CO₂-Speicherung im Meeresboden

Beim Entweichen von CO₂ aus seiner Lagerstätte unter dem Meeresboden sind verschiedene Szenarien vorstellbar. Falls das CO₂ in einer Tiefe austritt, in der es schon als Hydrat vorliegt, sind die geringsten Schäden zu befürchten. Wird das CO₂ aber im Wasser gelöst, trägt es zur Versauerung des Meeres bei. Die möglichen schädlichen Folgen von eventuellen Leckagen für Meeresorganismen wurden bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben. Bei sehr großen Leckagen könnte das CO₂ auch an die Meeresoberfläche gelangen, wo es einerseits zur Anreicherung des CO₂ in der Atmosphäre beiträgt und andererseits in näherer Umgebung auch ein Gesundheitsrisiko darstellt. Sofern sich die Lagerstätte aber nicht direkt an der Küste in der Nähe menschlicher Ansiedlungen befindet, ist auf See von einem deutlich geringeren gesundheitlichen Risiko für den Menschen auszugehen als an Land. Selbst bei Anwesenheit von Menschen ist dort die Wahrscheinlichkeit gefährlich hoher CO₂-Konzentrationen extrem gering, da im Gegensatz zum Land keine Bildung von CO₂-Seen möglich ist. Solche CO₂-Seen können sich in der Regel nur in Landsenken ohne bzw. mit schlechtem „Abfluss“ bilden und halten.

Für die langfristige Nachhaltigkeit gilt, wie in Kapitel 5.1.2 erläutert, dass eine Rückhaltezeit des CO₂ von mindestens 10.000 Jahren erforderlich ist.

5.3.3

Regulierung der CO₂-Einbringung in den Meeresboden

Die Möglichkeit der Einlagerung von CO₂ in geologische Formationen tief unter dem Meeresboden sollte vor dem Hintergrund weltweit steigender CO₂-Emissionen nicht ganz ausgeschlossen werden. Allerdings sind auch mit der Einlagerung im Meeresboden durchaus Probleme verbunden (Kap. 5.3.2). Zum einen kann ein Entweichen von CO₂ in die Atmosphäre nicht gänzlich ausgeschlossen werden, sei es in Folge technischer Mängel, wegen Unfällen beim Transport-, Injektions- und Lagerungsprozess oder

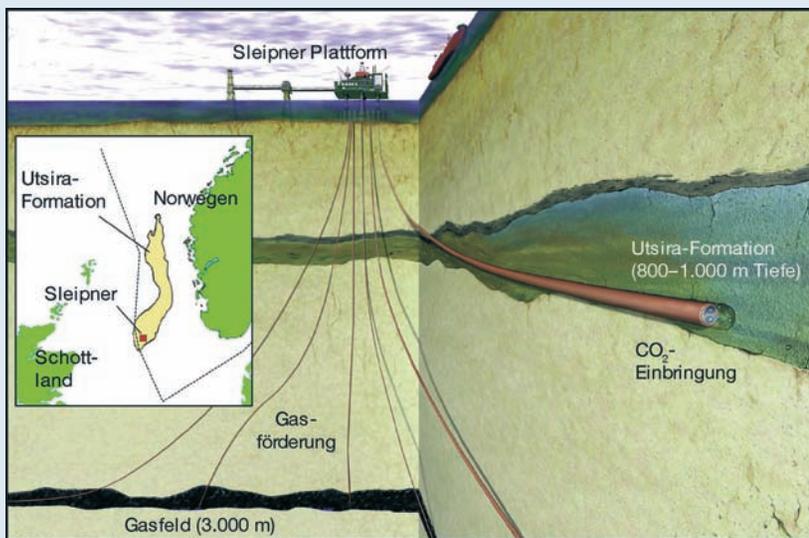
Kasten 5.3-1**Das Sleipner-Projekt**

Die Sleipner-Plattform in der Nordsee liegt ungefähr 250 km von der Küste Norwegens entfernt. Es ist das erste kommerzielle Projekt zur CO₂-Speicherung in einem salinen Aquifer unter dem Meeresboden. Hier wird vor Ort von Erdgas abgetrenntes CO₂ in eine Tiefe von 800 m unter den Meeresboden in die Utsira-Sandsteinformation verbracht. Die CO₂-Sequestrierung ist hier betriebswirtschaftlich vergleichsweise interessant, da die Abtrennung des CO₂ vom Gas für die spätere technische Nutzung ohnehin erforderlich ist und seine Emission in die Atmosphäre vom norwegischen Staat mit Abgaben belastet würde. Seit Oktober 1996 wird jährlich etwa 1 Mt CO₂ in den Untergrund injiziert. Bis Anfang 2005 wurden mehr als 7 Mt CO₂ in den Aquifer verbracht. Am Ende der Projektlaufzeit sollen es

etwa 20 Mt CO₂ sein. Die Lagerstätte könnte insgesamt 1–10 Gt CO₂ speichern.

Das Projekt wird wissenschaftlich begleitet, auch um die Sicherheit der Sequestrierung zu erforschen. Die ersten Forschungsergebnisse zeigen, dass ein dichtes Deckgestein die Utsira-Formation an der Oberseite gegen CO₂-Verluste abdichtet. Simulationsrechnungen für Hunderttausende von Jahren legen nahe, dass sich das CO₂ im Porenwasser löst und dann in gelöster Form nach unten sinkt. Die Wahrscheinlichkeit von Langzeitleakagen ist dort minimal, so dass das Gas nach diesen Berechnungen in den nächsten 100.000 Jahren nicht in die Nordsee entweichen sollte. Selbst nach 1 Mio. Jahre sollte demnach jährlich nur ein Millionstel des CO₂ entweichen. Damit könnte dieser Speicher die geforderte Rückhaltezeit von mehr als 10.000 Jahren erfüllen (Kap. 5.1.2). Diese Folgerung muss allerdings noch wissenschaftlich besser abgesichert werden.

Quellen: IPCC, 2005; Statoil, 2005

**Abbildung 5.3-1**

Das Sleipner-Projekt in der Nordsee, vereinfachte Darstellung. Die Erdgasförderung erfolgt aus dem Gasfeld Sleipner-Ost. Das abgetrennte CO₂ wird in die Utsira-Sandsteinformation eingebracht. Die kleine Grafik zeigt Lage und Größe der Utsira-Formation in der Nordsee.

Quelle: Statoil, 2005

aufgrund ungeeigneter geologischer Formationen. Nach gegenwärtigem Wissensstand könnten sich die Leckageraten zwar unter bestimmten geologischen und technischen Voraussetzungen als vertretbar erweisen (Leckagerate <0,01 % pro Jahr). Um dies hinreichend absichern zu können, besteht aber nach wie vor deutlicher Forschungsbedarf. Dies betrifft insbesondere die Fragen, welche Kriterien die geologischen Formationen erfüllen müssen, und wie sich ein etwaiges Entweichen des Gases in das Meerwasser erfassen und quantitativ bestimmen lässt.

Zum anderen birgt eine politische und ökonomische Fokussierung auf die Option der Sequestrierung die Gefahr, dass die Umsetzung deutlich überlegener Klimaschutzstrategien wie die Steigerung der Energieeffizienz und der Umstieg auf erneuerbare Energien vernachlässigt wird. Das Ziel einer nachhaltigen Energiewirtschaft erfordert jedoch vor allem in die-

sen Bereichen politische Förderung, Innovationen und Einsatz ökonomischer Ressourcen (WBGU, 2003a). Ein hohes Potenzial an erneuerbaren Energien findet sich zudem im und über dem Meer (Kasten 5.3-2).

Der Beirat beurteilt die CO₂-Speicherung im Meeresboden daher allenfalls als eine ergänzende Übergangsoption (WBGU, 2003a), deren Einsatz begrenzt und reguliert werden sollte.

5.3.3.1**Vorgaben des Seevölkerrechts**

Ebenso wie bei der Einbringung von CO₂ in das Meerwasser ist nach dem London-Übereinkommen von 1972 und dem London-Protokoll von 1996 die

Einlagerung von CO₂ in geologischen Formationen unter dem Meer zulässig, wenn das sequestrierte CO₂ aus Prozessen stammt, die sich im Zuge der Verarbeitung von mineralischen Schätzen des Meeresbodens ergeben (Kap. 5.2.3). Dies ist etwa beim Sleipner-Projekt (Kasten 5.3-1) der Fall.

Es ist hingegen nicht eindeutig geklärt, ob das London-Übereinkommen von 1972 bzw. künftig das London-Protokoll von 1996 die Speicherung von CO₂, das an Land abgeschieden wurde, unter dem Meer – also etwa in salinen Aquiferen – zulässt (IEA, 2005). Nach Art. III Ziff. 3 des Übereinkommens bezeichnen die Ausdrücke „Meer“ bzw. „See“ „alle Meeresgewässer“. Es ist umstritten, ob damit auch der Meeresboden und der -untergrund von der Geltung des Übereinkommens erfasst sind. Deutschland hatte sich in einer Umfrage der IMO für eine solche Auslegung ausgesprochen, weil die Geschichte und der Zweck des Übereinkommens es nahe legten, dass der Begriff „alle Meeresgewässer“ auch den Meeresboden sowie den -untergrund umfasse. Das Protokoll von 1996 definiert in Art. 1 Ziff. 7 den Ausdruck „Meer“ bzw. „See“ etwas genauer, nämlich als „alle Meeresgewässer mit Ausnahme der inneren Gewässer von Staaten sowie deren Meeresboden und seinen Untergrund; der Ausdruck umfasst jedoch keine unterhalb des Meeresbodens gelegenen Depots, die nur vom Land aus zugänglich sind“. Allerdings wird auch hier kontrovers diskutiert, bis in welche Tiefe der damit gemeinte Meeresuntergrund reicht. Deutschland plädierte in der oben erwähnten IMO-Umfrage auch an dieser Stelle für eine möglichst umfassende Auslegung.

Bei der Auslegung der Vertragstexte ist jedoch zu berücksichtigen, dass die CO₂-Sequestrierung einschließlich der Speicherung im und unter dem Meer weder bei der Aushandlung des London-Abkommens von 1972 noch des Protokolls von 1996 auf der Agenda stand. Insofern kann aus den rechtlichen Formulierungen nicht auf den Willen der beteiligten Staaten hinsichtlich des Umgangs mit CO₂ geschlossen werden. Die Vertragsstaaten des London-Übereinkommens beschäftigen sich mittlerweile intensiv mit dem Thema (IMO, 2004), so auch auf dem 27. Konsultativtreffen der Vertragsstaaten im Oktober 2005. Angesichts der zahlreichen Wissenslücken und der offenen Frage, ob die Einlagerung von CO₂ im Meeresboden im London-Übereinkommen und/oder im London-Protokoll behandelt werden soll, einigte man sich darauf, das Thema beim 28. Treffen nochmals eingehender zu diskutieren. Will man die Sequestrierung von CO₂, das aus der Abscheidung an Land stammt, in den Meeresboden erlauben, müsste Anlage I des London-Protokolls unter Umständen angepasst werden, was auch im Interesse einer Klarstellung sinnvoll wäre. Bei heutigem Wissensstand

wäre somit Art. 31 Abs. 1 der Wiener Konvention über das Recht der Verträge zu berücksichtigen, wonach ein Vertrag nach Treu und Glauben in Übereinstimmung mit der gewöhnlichen, seinen Bestimmungen in ihrem Zusammenhang zukommenden Bedeutung und im Lichte seines Ziels und Zwecks auszulegen ist.

5.3.3.2

Klimarahmenkonvention und Kioto-Protokoll

Die Erstellung der nationalen Emissionsinventare gemäß Klimarahmenkonvention und Kioto-Protokoll fußt auf den IPCC-Richtlinien. Diese gehen bisher nicht ausdrücklich auf die Sequestrierung ein. Der Bericht des IPCC zu Sequestrierung (IPCC, 2005) sieht allerdings durchaus die Möglichkeit, die gültige Rahmenordnung sowie ihre Prinzipien und Ansätze auf Sequestrierungsaktivitäten anzuwenden. Das Vorgehen Norwegens lässt Schlüsse darüber zu, wie die Übertragung allgemeiner Regelungen praktisch aussehen könnte: Norwegen berichtet über die CO₂-Mengen, die bei Sleipner (Kasten 5.3-1) sequestriert werden und schlägt Emissionen, die während des Injektionsvorgangs entweichen, seinen nationalen Emissionen konsequenterweise hinzu (IPCC, 2005). Das sequestrierte CO₂ wird dem Emissionsinventar nicht zugerechnet; es gilt als praktisch nicht emittiert. 2006 steht die Überarbeitung der Richtlinien an, und es ist zu erwarten, dass die bisherige Diskussion über eine Standardisierung für die Erfassung sequestrierten CO₂ hier einfließen wird und in absehbarer Zeit Regelungen getroffen werden. Außer der Frage nach der konkreten Erfassung des sequestrierten CO₂ in den nationalen Berichten muss auch geklärt werden, ob und wie Projekte der Sequestrierung in die flexiblen Mechanismen – Emissionshandel, Clean Development Mechanism (CDM) und Joint Implementation (JI) – integriert werden sollen (Bode und Jung, 2005; IPCC, 2005). Die Berücksichtigung des sequestrierten CO₂ im Rahmen der flexiblen Mechanismen wirft verschiedene Fragen auf (Bode und Jung, 2005), die hier aber nicht näher beschrieben werden sollen. Besonders kompliziert wird es z. B. beim CDM, wenn ein Annex-B-Staat an Land abgeschiedenes CO₂ aus Entwicklungsländern „importiert“ und in bereits genutzten Speichern unter dem Meer lagert. Hier wird das Zusätzlichkeitskriterium des CDM streng genommen nicht erfüllt, so dass im Grunde keine CDM-Gutschriften erteilt werden können. Außerdem kommt es nicht zwingend zum Technologietransfer in Entwicklungsländer, was ja ein ausdrückliches Ziel des CDM ist. Ähnlich komplexe Fragen

Kasten 5.3-2**Erneuerbare Energien aus dem Meer**

Der Ozean bietet über seine Rolle im Klimasystem hinaus Optionen, die anthropogene Klimaerwärmung auch aktiv zu mindern. Einerseits kann die verstärkte Nutzbarmachung erneuerbarer Energien aus dem Meer fossile Energieträger substituieren und somit die CO₂-Emissionen verringern. Andererseits kann das Meer durch die CO₂-Speicherung in geeigneten geologischen Formationen im Meeresboden eine zusätzliche anthropogene Senke für dieses Treibhausgas bieten. Im Folgenden werden kurz die Potenziale für erneuerbare Energien aus dem Meer vorgestellt und dann ein grober Vergleich der jeweiligen Kosten dieser beiden Optionen vorgenommen.

POTENZIALE ERNEUERBARER ENERGIEN DES MEERES

Auf die Meere entfällt durch ihren Anteil an der Erdoberfläche gut 70% der solaren Einstrahlung und fast 90% der Windenergie (Czisch, 2005). Sie halten damit den größten Teil der weltweiten Ressourcen an erneuerbaren Energien bereit. Technisch und wirtschaftlich nutzbar sind aus heutiger Sicht jedoch nur Bruchteile dieses theoretisch vorhandenen Energieangebots. Das Potenzial wird zusätzlich dadurch verringert, dass es gerade entlang der dicht besiedelten Küsten vielfältige konkurrierende Nutzungen gibt. Weiter wird das nachhaltig nutzbare Potenzial dadurch verkleinert, dass auch ökologische Aspekte berücksichtigt werden müssen (WBGU, 2003a). So darf der Ausbau der erneuerbaren Energien nicht mit den Ökosystemleitplanken kollidieren (20–30% der Meeresökosysteme unter Schutz; Kap. 2.5). Dies schränkt insgesamt die Flächen für eine nachhaltige Nutzung der erneuerbaren Energie erheblich ein.

- *Windenergie:* Studien über das europäische Offshore-Windenergiepotenzial (Sea Wind Europe, 2003) gehen davon aus, dass bis 2015 etwa 111 GW mit einer Erzeugung von 340 TWh pro Jahr nutzbar sind, das entspricht etwa 10% des technischen Potenzials. Siegfriedsen et al. (2003) kommen zu dem Ergebnis, dass außerhalb der Europäischen Union etwa 4.600 TWh pro Jahr aus Offshore-Windkraftanlagen erzeugt werden könnten. Mit insgesamt knapp 5.000 TWh pro Jahr wäre demzufolge ein Drittel des heutigen Weltstrombedarfs von ca. 15.500 TWh pro Jahr mit Offshore-Windenergie zu decken. In 19 von 20 untersuchten Ländern mit den größten Potenzialen außerhalb der EU ließe sich bis zum Jahr 2020 mehr als 10% des Strombedarfs aus Offshore-Windkraftanlagen decken. Damit ist die Windenergie die bedeutendste der hier betrachteten Energieformen im Hinblick auf Potenziale und den Ausbau.
- *Wellenenergie:* Wavenet (2003) schätzt das weltweite technische Erzeugungspotenzial auf 11.400 TWh pro Jahr. Das nachhaltige Erzeugungspotenzial der Wellenenergie beträgt weltweit ca. 1.700 TWh pro Jahr, d. h. gut 10% des heutigen Strombedarfs. Für das Jahr 2020 wird für die EU eine jährliche Erzeugung von 9 TWh angegeben. Erst später wird mit nennenswerten Beiträgen der Wellenenergie zum Weltstrombedarf gerechnet.

- *Strömungsenergie:* In Küstennähe treten u. a. durch die Gezeiten starke Meeresströmungen auf. In Nordamerika, Europa, Südostasien und Australien wird ihr Potenzial zur Energiegewinnung auf 120 TWh pro Jahr geschätzt. Das gesamte nachhaltig nutzbare Potenzial dürfte weltweit bei einigen hundert TWh pro Jahr liegen. Meeresströmungsturbinen könnten in 5–10 Jahren eine ähnliche Entwicklungsdynamik wie derzeit Offshore-Windkraftanlagen erzielen.
- *Energie aus Osmose:* Ein weiteres Verfahren zur Energieerzeugung beruht auf der Ausnutzung des osmotischen Druckes zwischen Süß- und Meerwasser, z. B. an einer Flussmündung mithilfe spezieller Membranen mit hoher Salzrückhaltung. Diese Technologie befindet sich zurzeit noch im Labormaßstab. Weltweit ist an Flüssen über 500 m³ pro Sekunde theoretisch eine Leistung von ca. 730 GW erreichbar. Unter Berücksichtigung der ökologischen Leitplanken und der Belange der Schifffahrt, ergibt sich ein nachhaltiges Potenzial von etwa 50% des technischen Potenzials mit 2.000 TWh pro Jahr.

Die Nutzung vorwiegend küstennaher und aus heutiger Sicht technisch erreichbarer Meeresflächen ergibt unter Berücksichtigung von Wind, Wellen, Strömungen und Osmose ein weltweit nutzbares Potenzial von insgesamt etwa 9.000 TWh pro Jahr, wobei vor allem die Windkraft das bei weitem größte und zudem kurzfristig nutzbare Potenzial bietet. Unberücksichtigt bleibt hierbei die Frage, welches Gesamtpotenzial bei gleichzeitiger Nutzung der küstennahen Meeresflächen durch Anlagen zur Stromerzeugung aus Wind und Wellen tatsächlich möglich wäre, denn einige Wellenenergieanlagen lassen sich nicht ohne weiteres im gleichen Gebiet mit Windfarmen kombinieren. Darüber hinaus führt die Installation sehr vieler Anlagen mit hoher Dichte zu erheblichen Veränderungen des Habitats, Schallemissionen, erhöhtem Schiffsverkehr und anderen Auswirkungen wie z. B. durch Seekabel, die in der Summe eine gleichzeitige Nutzung eines Gebietes durch mehrere Technologien möglicherweise als nicht nachhaltig einstufen lassen.

NUTZUNG ERNEUERBARER ENERGIEN VERSUS CO₂-SEQUESTRIERUNG

Die Bandbreite heutiger Stromerzeugungskosten aus fossilen Kraftwerken liegt bei 25–55 US-\$ pro MWh, die von Windenergie und Kleinwasserkraft bei 35–90 US-\$ pro MWh (IEA, 2005). Die Mehrkosten für die CO₂-Sequestrierung bei der Stromproduktion in fossilen Kraftwerken liegen zwischen 30% und 60%, je nach Technologie und Rahmenbedingungen. Unterstellt man bei der zukünftigen Kostenentwicklung bei den Brennstoffen nur moderate Preissteigerungen und eine weitere Kostenreduktion der Investitionen sowohl für fossile Kraftwerke als auch bei den erneuerbaren Energien, so dürfte die Sequestrierung mit fortgesetzter Nutzung fossiler Energieträger mittel- und langfristig mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zu höheren CO₂-Vermeidungskosten führen als die Nutzung der erneuerbaren Energien.

Darüber hinaus mindert Sequestrierung nicht die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und die mit ihren Knappheiten verbundenen Konflikte. Es spricht also vieles dafür, eine starke Nutzung erneuerbarer Energien der CO₂-Sequestrierung vorzuziehen.

bestehen im Zusammenhang mit dem Emissionshandel und II.

5.3.3.3

Instrumente zur Regulierung der CO₂-Speicherung im Meeresboden

Das Leckagerisiko macht nach Auffassung des WBGU eine Regulierung der Aktivitäten zur Einlagerung von CO₂ im Meeresboden erforderlich. Zum einen bedarf es konsequenter Mindeststandards und deren Einhaltung, um die Risiken zu minimieren. Zum anderen empfiehlt sich der Einsatz mengen- oder haftungspolitischer Instrumente, die dem Leckagerisiko Rechnung tragen und somit vermeiden helfen, dass risikoärmere, nachhaltige Emissionsvermeidungsoptionen (z. B. Steigerung der Energieeffizienz, erneuerbare Energien) vernachlässigt werden.

GEOLOGISCHE UND TECHNISCHE MINDESTSTANDARDS

Die langfristige Entweichungsrate von CO₂ muss sehr gering und zudem gut beobachtbar sein (Überwachung und Überprüfung). So muss zum einen die Verweildauer des eingelagerten CO₂ mit mindestens 10.000 Jahren in der Deponie sehr hoch sein. Diese Anforderung ist nach heutigem Kenntnisstand zumindest in tief gelegenen Aquiferen durchaus einhaltbar (Ploetz, 2003; IPCC, 2005). Zum anderen müssen die CO₂-Deponien gut zu überwachen sein, d. h. sowohl die entweichende als auch die eingelagerte CO₂-Menge müssen zuverlässig erfasst werden können. Adäquate Techniken zur Messung des entweichenden CO₂ liegen jedoch noch nicht vor.

MITTELBARE MENGENBEGRENZUNGEN

Insbesondere das Leckagerisiko spricht dafür, dass sequestriertes CO₂ in internationalen Klimaschutzvereinbarungen nicht in vollem Umfang als vermiedene CO₂-Emission gewertet wird. Durch Speicherung „eingesparte“ Emissionen sollten bei der Festlegung und Durchsetzung von Emissionsreduktionszielen also nur zum Teil als tatsächlich vermiedene Emissionen angerechnet werden. Hierfür kommen verschiedene Ansätze auf internationaler Ebene (UNFCCC usw.) oder zunächst auch nur für die europäische Klimaschutzpolitik in Betracht. Der Beirat stellt im Folgenden einige Instrumente vor, die auf solch eine mittelbare Begrenzung der gespeicherten CO₂-Menge abzielen. Dabei geht es darum, einen Überblick über mögliche Herangehensweisen zu vermitteln, die außer für die Speicherung unter dem Meer auch für die Sequestrierung im Allgemeinen wichtig sind. Eine abschließende Bewertung der

Instrumente kann hier nicht erfolgen. Dazu fehlt es zum einen an der politischen Entscheidung, welche Begrenzungsziele angestrebt werden; zum anderen besteht in vielen Punkten noch erheblicher Forschungsbedarf (Bode und Jung, 2005; IPCC, 2005).

- *Anrechnung auf Gesamtemissionen*: Sequestriertes CO₂ würde nur zum Teil als vermiedene Emissionen anerkannt. Der Prozentsatz des CO₂, der als „praktisch“ emittiert gelten würde und entsprechend in den nationalen Berichten ausgewiesen werden müsste, wäre politisch festzulegen. Seine Höhe sollte zumindest jedoch nicht nur die Leckagewahrscheinlichkeit widerspiegeln, sondern spürbar darüber hinausgehen, um die ökologischen Folgewirkungen des Entweichens für das Meer angemessen zu berücksichtigen.
- *Abschläge bei den flexiblen Mechanismen*: Emissionsrechte, die aus der Sequestrierung stammen, dürften lediglich mit einem substanziellen Abschlag gehandelt werden. Somit würde der Erwerb eines Zertifikats, dem eine Tonne sequestriertes CO₂ zu Grunde liegt, nur zum Ausstoß von weniger als einer Tonne CO₂ berechtigen. CDM-Gutschriften aus Sequestrierungsaktivitäten in Entwicklungsländern sollten im Prinzip genauso behandelt werden. CDM-Gutschriften könnten zudem auch für die Speicherung von „importiertem“ CO₂ aus Entwicklungsländern gewährt werden, zumal solche Kooperationen die globalen CO₂-Emissionen in die Atmosphäre faktisch verringern würden, auch wenn sie den derzeitigen CDM-Kriterien nicht genügen (Kap. 5.3.3.2) und daher möglicherweise ein höherer Abschlag gerechtfertigt wäre. Welcher Abschlagsatz im Einzelfall sinnvoll ist, hängt wiederum zu einem guten Teil von der klimapolitischen Bewertung des Leckagerisikos und den Folgewirkungen für die Meeresökologie ab. Dazu herrscht deutlicher Forschungsbedarf.
- *„Traditional Action“*: Die Staaten würden vereinbaren, dass sie jeweils einen bestimmten Teil ihrer Emissionsreduktionsverpflichtung ohne Zuhilfenahme von CO₂-Speicherung unter dem Meer bzw. ohne Sequestrierung im Allgemeinen erfüllen. Dies wäre ein analoges Vorgehen zum Konzept der „domestic action“.

HAFTUNGSMCHANISMEN

Während Staaten bei der Anwendung der oben genannten Instrumente zur Begrenzung der CO₂-Sequestrierung implizit selbst die Entscheidung treffen, wie hoch sie das Entweichungsrisiko und Folgeschäden einschätzen, setzen Haftungsmechanismen alternativ oder ergänzend auf den Marktmechanismus. Ein wirksames Haftungssystem für sequestriertes

CO₂ bedeutet, dass transparent und glaubwürdig geregelt sein muss, wer für entwichenes CO₂ haftet und Entschädigung leisten muss, sei es durch nachträgliche Anrechnung auf die Gesamtemissionen, den nachträglichen Erwerb von Emissionsrechten oder Strafzahlungen, die in den Klima- und Meereschutz fließen. Solange der Betreiber existiert, mag es vergleichsweise unproblematisch sein, ihn haftbar zu machen. Die Langfristigkeit des Klimaschutzes erfordert jedoch, dass die Haftung auch auf lange Sicht geklärt und sichergestellt wird. Nicht zuletzt die Diskussion über die Sanierung von Altlasten auf nationaler Ebene zeigt, dass oft der Staat die finanziellen Folgen tragen muss. Dies gilt auch im Fall privater Betreiber, insbesondere wenn kein privater Rechtsnachfolger bereitsteht oder dieser nicht über die Mittel zur Schadensbegleichung verfügt.

Als marktwirtschaftliche Lösung wird das Instrument der „carbon sequestration bonds“ diskutiert (Edenhofer et al., 2005). Hierbei hinterlegt der Betreiber, der CO₂ sequestriert bzw. speichert, bei einer Behörde ein Pfand in Höhe der sequestrierten CO₂-Menge multipliziert mit dem CO₂-Zertifikatspreis (Edenhofer, 2003). Die Behörde – dies könnte etwa die vom Beirat bereits vorgeschlagene Klimazentralbank sein (WBGU, 2003b) – verzinst den Nennwert dieses Pfands, z. B. zu dem für langfristige Wertpapiere üblichen Marktzins. Der Nennwert wird von der Behörde in dem Maß abgewertet, wie CO₂ tatsächlich aus den jeweiligen Deponien entweicht. Mit den freigewordenen Mitteln könnten Maßnahmen zur Emissionsvermeidung finanziert, z. B. die Förderung erneuerbarer Energien, oder sogar Emissionsrechte gekauft und stillgelegt werden. Speziell bei Leckagen aus marinen Speicherorten ließe sich auch die Finanzierung von Meeresschutzmaßnahmen aus diesen Mitteln begründen. Durch den dann niedrigeren Nennwert sinken entsprechend die Zinszahlungen. Hier wird also vorab kein fester Abschlag festgelegt, sondern der zeitlich steigende Abschlag folgt der tatsächlich entwichenen CO₂-Menge. Die Idee ist, dass der Betreiber versucht, das Recht an dem Pfand, also die Zinseinnahmen, als „bond“ auf Finanzmärkten zu verkaufen. Dies gelingt nur, wenn er potenziellen Käufern einen Abschlag auf den Nennwert einräumt, der diesen hoch genug erscheint, das Risiko der Abwertung durch die Behörde zu kompensieren. Im Zuge des Handels würde der jeweilige Kurswert neben den Abwertungen des Nennwerts widerspiegeln, wie hoch das zukünftige Entweichungsrisiko vom Kapitalmarkt eingestuft wird. Das Konzept der „carbon sequestration bonds“ stellt einen sehr interessanten und innovativen Ansatz zur Risikobewertung und Haftungsregelung dar, der weiteren Forschungsaufwand verdient.

5.4 Handlungsempfehlungen: CO₂-Speicherung regulieren

5.4.1 Einbringung von CO₂ in das Meer verbieten

Der Beirat lehnt die Einbringung von CO₂ in das Meer, d. h. in die Wassersäule und auf den Meeresboden, strikt ab. Dies ist keine nachhaltige Option, weil der Ozean im permanenten Austausch mit der Atmosphäre steht, so dass die Langzeitfolgen der CO₂-Emissionen für künftige Generationen nicht vermieden werden. Gegen die Deponierung des Treibhausgases im Wasser spricht außerdem die Gefahr, dass die Ökosysteme unter einem höheren CO₂-Gehalt des Wassers spürbar leiden werden (IPCC, 2005; Pörtner, 2005). Zudem sind CO₂-Seen auf dem Meeresboden nur schwer von der internationalen Staatengemeinschaft zu kontrollieren, und ein langfristiges Entweichen in die Atmosphäre kann nicht ausgeschlossen werden. Der Beirat empfiehlt daher ein allumfassendes CO₂-Einbringungsverbot in das Meer, unbeschrieben des territorialen Status der Gewässer.

Das London-Übereinkommen von 1972 über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen sowie das noch nicht in Kraft getretene London-Protokoll (Kap. 5.3.3.1) verbieten grundsätzlich die Einbringung von CO₂ in die See, enthalten aber eine wichtige, nach dem Gesagten strikt abzulehnende Ausnahme: Beide Verträge ermöglichen in ihrer aktuellen Fassung die Einbringung von CO₂, das bei der Gewinnung von Erdöl oder Erdgas anfällt, sofern die entsprechenden Verarbeitungsprozesse auf See stattfinden. Das bereits implizit bestehende Verbot der Einbringung von CO₂, das bei der Verarbeitung an Land entsteht, sollte daher ausdrücklich auch auf jenes CO₂ ausgedehnt werden, das bei der Exploration und Verarbeitung von Meeresbodenschätzen auf See abgeschieden wird. Ergänzend kommt eine entsprechende Vereinbarung im Umfeld der Klimarahmenkonvention in Betracht, etwa um auch jene Staaten zu erfassen, die das London-Protokoll nicht ratifizieren.

5.4.2 Speicherung von CO₂ im Meeresboden begrenzen

Die CO₂-Deponierung im Meeresboden birgt deutlich weniger Gefahren als die Einbringung in die Wassersäule oder auf den Meeresboden. Daher und

angesichts des nahezu unvermeidlichen Anstiegs des Energieverbrauchs besonders in Schwellen- und Entwicklungsländern hält es der WBGU für vertretbar, die Einlagerung in geologischen Formationen im Meeresboden für eine Übergangszeit als ergänzende Option zu nachhaltigeren Emissionsvermeidungsstrategien zu nutzen.

Entsprechend empfiehlt der WBGU die Frage der Vereinbarkeit der CO₂-Einlagerung unter dem Meeresboden mit dem Londoner Abkommen bzw. dem Londoner Protokoll in den entsprechenden Vertragsgremien so zu klären, dass eine CO₂-Sequestrierung in geologischen Formationen unter dem Meer unbesehen des Ortes der Verarbeitungsprozesse zulässig ist. Sollte eine konsensuale Auslegung der rechtlichen Vorgaben im Sinne einer Zulässigkeit dieser CO₂-Deponierung unter dem Meeresboden nicht möglich sein, ist eine Modifikation des London-Protokolls bzw. seine Ergänzung ins Auge zu fassen. Der WBGU plädiert zugleich dafür, solche Aktivitäten im Vorhinein nur für einen befristeten Zeitraum, etwa von mehreren Jahrzehnten, zuzulassen.

Solch eine Auslegung bzw. Ergänzung des Seevölkerrechts setzt allerdings die Festlegung und Einhaltung universeller technischer Mindeststandards voraus. Diese müssen sowohl für den marinen Transport, die Injektion und Einlagerung des CO₂ als auch für die Beschaffenheit und Überwachung geologischer Deponien erarbeitet werden. So lange die Probleme bei der Messung des entweichenden CO₂ fortbestehen, rät der WBGU zu besonders strengen Anforderungen an geologische Speicherorte. Nach seiner Auffassung bietet sich auch hier die London-Konvention bzw. das London-Protokoll als Rahmen zur Festlegung der Standards an, bekräftigt durch umfassendere Regelungen zu Sequestrierungsaktivitäten im Kontext der Klimarahmenkonvention.

Dabei spielen die IPCC-Richtlinien, an denen sich die Aufstellung der nationalen Emissionsinventare orientiert und die zur Überarbeitung anstehen, eine wichtige Rolle. Der WBGU schließt sich der Auffassung der IPCC-Studie (2005) an, dass die bestehende Rahmenordnung einschließlich der flexiblen Mechanismen grundsätzlich auch auf sequestriertes CO₂ angewendet werden kann. Der WBGU hält dies zwar nicht generell, aber zumindest für den Fall der CO₂-Deponierung in überprüften geologischen Formationen im Meeresboden auch für sinnvoll. Allerdings empfiehlt der WBGU beim Einbezug sequestrierten CO₂ in den Inventaren und den flexiblen Kioto-Mechanismen dem Leckagerisiko Rechnung zu tragen. Dies kann beispielsweise durch Abschläge beim Emissionshandel oder bei CDM-Gutschriften und durch Haftungsregelungen geschehen.

5.5 Forschungsempfehlungen

RISIKEN BEI DER NUTZUNG GEOLOGISCHER FORMATIONEN ZUR CO₂-SPEICHERUNG

Bei der marinen CO₂-Einlagerung in tiefe geologische Formationen muss die langfristige Sicherheit der Einlagerung weiter erforscht werden. Dazu sollten auch Verfahren zum Monitoring weiterentwickelt werden. Zudem sollen die möglichen Wirkungen von CO₂-Leckagen auf Meeresökosysteme und -organismen untersucht werden.

Auch die langfristigen Auswirkungen der Einlagerung auf das atmosphärische CO₂-Niveau sollten untersucht werden, vor allem die Anforderungen an einen Speicherort, um auch langfristig eine stabile atmosphärische CO₂-Konzentrationen auf niedrigem Niveau zu ermöglichen. Dazu ist ein verbessertes Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs über Zeiträume von Jahrtausenden erforderlich.

RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die völkerrechtlichen Rahmenbedingungen für die Zulässigkeit der CO₂-Speicherung in Formationen tief im Meeresboden sind umfassend zu untersuchen. Zu berücksichtigen ist nicht nur das Londoner Abkommen mit dem Protokoll von 1996; vielmehr sind auch die Beziehungen zu sonstigen völkerrechtlichen Regelwerken – insbesondere der Klimarahmenkonvention und des Kioto-Protokolls sowie des Seerechtsübereinkommens – zu analysieren.

REGULIERUNG DER CO₂-SPEICHERUNG IM MEERESBODEN

Es muss in naher Zukunft eindeutig geklärt werden, wie die Einlagerung von CO₂ im Meeresboden (und übrigens auch an an Land) als Klimaschutzmaßnahme im internationalen Klimaschutzregime anerkannt wird. Dabei besteht gesellschafts- und wirtschaftswissenschaftlicher Forschungsbedarf bezüglich der flexiblen Mechanismen und insbesondere hinsichtlich der Frage, welche Instrumente für eine Begrenzung der Sequestrierung sowohl effektiv und effizient als auch völkerrechtlich und politisch durchsetzungsfähig sind.

ERNEUERBARE ENERGIEN AUS DEM MEER

Über die Potenziale erneuerbarer Energien der Meere, wie z. B. der Offshore-Windenergie, Wellenenergie, Salzgradientenenergie, Meereswärmenutzung und anderer, bestehen zum Teil noch sehr große Unsicherheiten. Zur Ermittlung der nachhaltigen globalen Potenziale besteht noch erheblicher Forschungsbedarf bei den Methoden und den zu berücksichtigenden Auswirkungen.

Im Meeresboden lagern Kohlenstoffmengen in Form von Methanhydraten, die in ihrer Größenordnung mit den weltweiten Kohlevorräten vergleichbar sind. Durch den Klimawandel sowie durch den Meeresbergbau können von diesen Methanhydraten Risiken ausgehen. Es bestehen jedoch noch erhebliche Unsicherheiten und Wissenslücken, so dass nur eine vorläufige Bewertung dieser Risiken möglich ist.

6.1

Vorkommen von Methanhydraten

Gashydrate – wie z. B. Methanhydrate – sind Feststoffe, die in ihrem aus Wassermolekülen bestehenden Kristallgitter Gasmoleküle einschließen. Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und eben auch Methan haben eine geeignete Größe, um in einen solchen Hydratkäfig eingeschlossen zu werden. Methanhydrate sehen aus wie schmutziges Eis und sind brennbar. Sie speichern große Mengen Methan auf kleinstem Raum: Beim Übergang in die Gasphase nimmt das Volumen um das 170-fache zu.

Sie sind nur unter geeigneten Druck- und Temperaturbedingungen stabil. Je höher die Umgebungstemperatur, desto höher muss der Druck sein, damit sich das Methanhydrat nicht auflöst. Derartige Bedingungen herrschen typischerweise am Meeresboden ab rund 500 m Meerestiefe, in der Arktis bereits etwas näher zur Meeresoberfläche. Hier kann sich Methanhydrat im Sediment bilden, wenn durch die Zersetzung von abgelagertem organischem Kohlenstoff ausreichende Mengen Methan entstehen. Der Kohlenstoff der Methanhydrate stammt also letztlich aus der biologischen Produktion des Ozeans, indem abgestorbene Biomasse sedimentiert und am Meeresboden bakteriell zersetzt wird („biogenes“ Methan). Die Bildung von Methanhydraten dauert sehr lange, so dass sie nicht als eine erneuerbare Energiequelle gelten können: Die derzeitigen Vorkommen sind wahrscheinlich im Laufe mehrerer Millionen Jahren entstanden (Davie und Buffett, 2001). Eine zweite, kleinere Hydratquelle sind leckende Erdgasvorkommen („thermogenes“ Me-

than), aus denen Methanblasen durch die Sedimente aufsteigen und bei günstigen Bedingungen (d. h. in der Hydrat-Stabilitätszone in den kühleren, oberen Sedimentschichten) mit Wasser Hydrate bilden. Ein Beispiel hierfür findet sich im Golf von Mexiko.

Da aufgrund der Erdwärme die Temperatur im Sediment mit zunehmender Sedimenttiefe rasch ansteigt – um rund 30°C pro km – aber der ebenfalls zunehmende Druck den Temperaturanstieg nicht kompensieren kann, sind Methanhydrate im Meeresediment nur bis zu einer bestimmten Sedimenttiefe stabil. Unterhalb der Grenze dieser meist einige 100 m dicken Stabilitätszone kann Methan wieder gasförmig im Sediment vorkommen.

Der Nachweis von Methanhydraten, direkt durch Bohrungen oder indirekt durch seismische Verfahren, ist schwierig. Während die bisher durchgeführten Bohrungen keine flächenmäßige Kartierung der Vorkommen erlauben, kann durch Seismik nur die untere Grenze der Stabilitätszone identifiziert werden. Auf dieser Basis lassen sich keine Aussagen über die Methanvorkommen im Sediment treffen, weil der Volumenanteil der Hydrate unbekannt bleibt. Diese Messprobleme führen dazu, dass die globalen Methanhydratvorkommen mit Hilfe von Modellen geschätzt werden müssen. Ging man in den 1990er Jahren noch von rund 10.000 Gt C in Form von Methanhydraten aus (das entspräche rund dem Doppelten aller fossiler Energieträger; Rogner 1997), nennen aktuellere Schätzungen einen wesentlich geringeren Wert (500–3.000 Gt C; Buffett und Archer, 2004; Milkov, 2004). Klaua und Sandler (2005) vermuten die größten Hydratvorkommen in den Tiefseebecken und nicht an den Kontinentalrändern. Sie kommen daher auf eine wesentlich höhere Schätzung von insgesamt 78.000 Gt, die aber auf unrealistischen Annahmen über die Sedimentationsraten von organischem Kohlenstoff in der Tiefsee beruht. Der WBGU hält die Schätzung von 500–3.000 Gt für vertrauenswürdig. Noch einmal soviel Methan ist gasförmig unterhalb der Hydrate vorhanden (Archer, 2005). Dazu einige Vergleichszahlen: Ende 2004 beliefen sich die nachgewiesenen Kohle- und Erdgasreserven auf 900 bzw. 92 Gt C (BP, 2005);

in der Atmosphäre befinden sich 805 Gt C, davon 210 Gt aus anthropogenen Emissionen.

6.2 Methanfreisetzung durch Eingriffe des Menschen

Die Stabilität der Methanhydratvorkommen kann einerseits durch die globale Klimaerwärmung beeinflusst werden, andererseits bestehen Risiken einer unbeabsichtigten Methanfreisetzung beim Abbau von Erdöl, Erdgas und in Zukunft möglicherweise auch von Methanhydrat selbst.

6.2.1 Reaktion auf Druck- und Temperaturänderungen

Druck- und Temperaturänderungen in der Hydrat-schicht führen zu einer Veränderung der Stabilitätszone, d. h. dem Tiefenbereich im Sediment, in dem Methanhydrat stabil ist. Höherer Druck stabilisiert die Methanhydrate, während eine Erwärmung die Stabilitätszone reduziert. Dabei werden die Methanhydrate meist von unten her aufgetaut (Abb. 6.1-1). Abbildung 6.1-1a zeigt in einem Phasendiagramm die Stabilitätszone im Ozean und in den darunter liegenden Sedimenten. Die rote Kurve gibt die Temperatur an: Im Ozean nimmt sie mit zunehmender Tiefe ab, im Sediment aufgrund der Erdwärme wieder zu. Die schwarze Kurve markiert die durch die jeweiligen Druckbedingungen bestimmte Temperatur, unterhalb derer Methanhydrate stabil sind. Das bedeutet: Methanhydrate können im Sediment nur in dem Tiefenbereich vorliegen, wo die Temperatur (rot) unterhalb der Stabilitätstemperatur (schwarz) liegt. Der Schnittpunkt der roten und schwarzen

Kurve im Sediment bildet damit die untere Grenze der Stabilitätszone.

Erwärmt sich der Ozean um 3°C , verschiebt sich die rote Temperaturkurve um den entsprechenden Betrag nach rechts (Abb. 6.1-1b). Der neue Schnittpunkt von Temperatur- und Stabilitätstemperaturkurve markiert die neue untere Grenze der Stabilitätszone, welche nach oben gewandert ist. Die Menge gasförmigen Methans unterhalb der Hydratschicht hat sich um den entsprechenden Betrag vergrößert.

In Abbildung 6.1-1c ist angenommen, dass sich der Ozean rasch um 8°C erwärmt, so dass die Temperaturkurve vollständig rechts der Stabilitätstemperaturkurve liegt und Hydrate damit in keiner Tiefe mehr stabil sind. Während sich bei einem Anstieg der Meerestemperatur um 3°C zunächst die gesamte Sedimentschicht bis an die untere Grenze der Stabilitätszone erwärmen muss bis sich dort Methanhydrat überhaupt auflöst, beginnt die Destabilisierung der Hydrate bei dem Beispiel mit einem Anstieg um 8°C bereits am Meeresboden und damit bevor sich die gesamte Sedimentschicht entsprechend erwärmt. Im Zuge des Temperaturanstiegs lösen sich die Methanhydrate von oben her vollständig auf.

6.2.2 Wirkung des Klimawandels auf Methanhydrate

Die globale Klimaerwärmung führt sowohl zu Temperaturänderungen im Ozean als auch zu Veränderungen des Meeresspiegels und damit zu Druckveränderungen auf dem Meeresboden. Abbildung 6.1-2 gibt einen Überblick, welche Effekte dies auf die Methanhydratvorkommen haben könnte.

In pessimistischen IPCC-Szenarien steigt die mittlere Meeresoberflächentemperatur bis Ende dieses

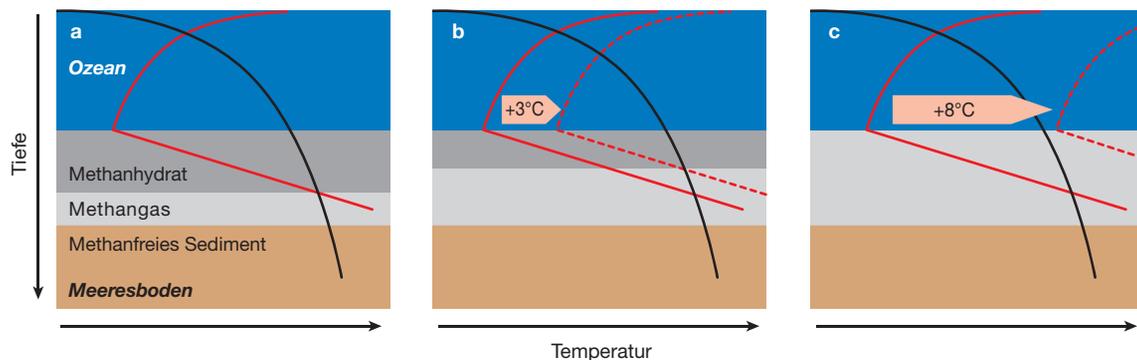
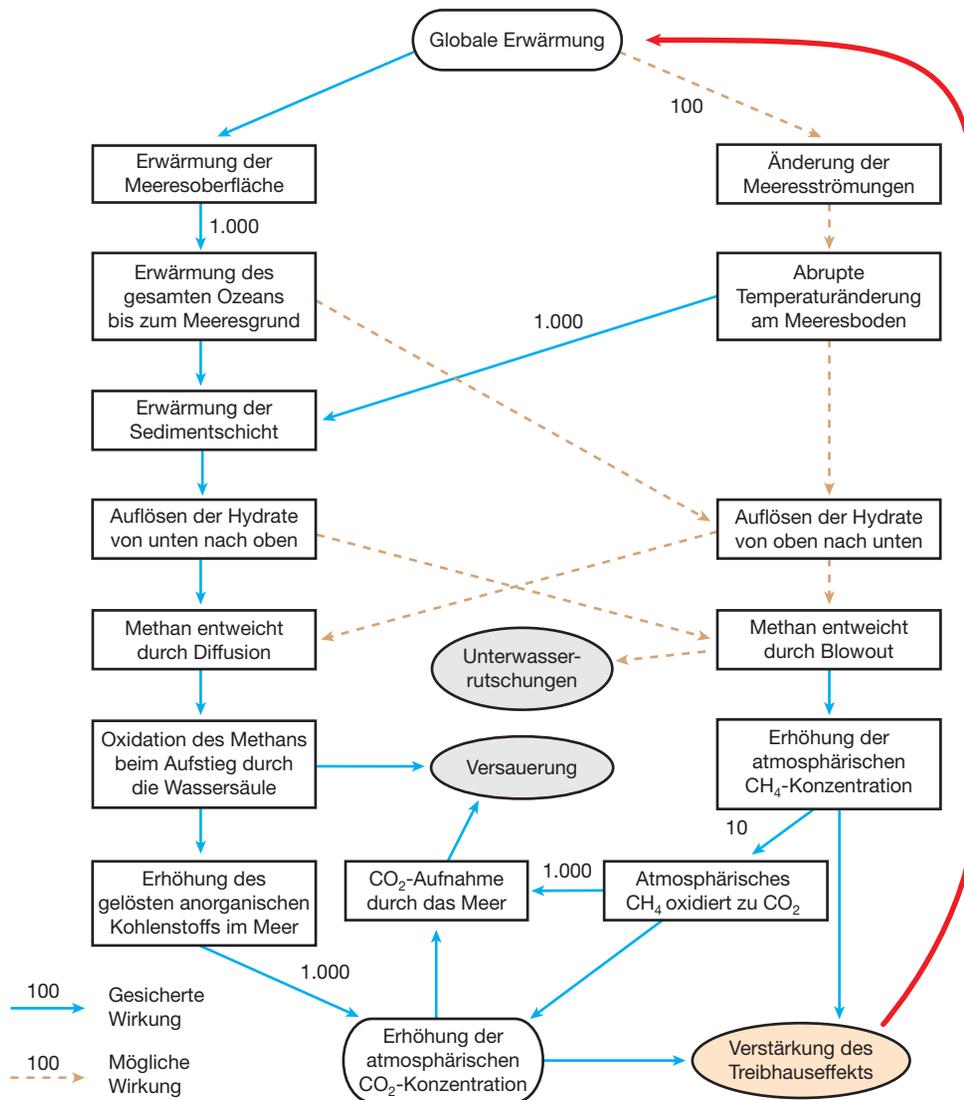


Abbildung 6.1-1

Änderung der Methanhydratschicht bei Erwärmung. Die schwarze Kurve beschreibt die Stabilitätstemperatur in Abhängigkeit von der Tiefe. Die rote Kurve zeigt die tatsächliche Temperatur an; rot gestrichelt sind schematische Temperaturprofile nach einer Erwärmung um 3°C (Stabilitätszone von Hydraten wird von unten her dünner) bzw. 8°C (Stabilitätszone verschwindet ganz) gezeigt.

Quelle: WBGU

**Abbildung 6.1-2**

Ursachen und Folgen der Methanhydratdestabilisierung. Die Mechanismen werden im Text besprochen. Zahlen oberhalb der Pfeile bezeichnen die jeweiligen Zeitskalen des Prozesses in Jahren (keine Angabe = unmittelbarer Effekt).

Quelle: WBGU

Jahrhunderts um 5°C über das vorindustrielle Niveau. Regional, z. B. in der Arktis, könnte dieser Wert sogar bis zu 10°C betragen. Die hohen Breitengrade sind von globaler Bedeutung, weil hier der Ursprung der kalten Wassermassen ist, die weltweit die Tiefsee ausfüllen. Aufgrund der stabilen Temperaturschichtung und der langsamen Vermischung des Ozeans wird diese Erwärmung in der Regel nur langsam im Laufe von einigen Jahrhunderten bis zum Meeresboden vordringen. Ähnliche Zeiträume sind notwendig, um die Sedimentschicht bis in mehrere 100 m Tiefe durchzuwärmen. Nur unter besonderen lokalen Bedingungen – bei Hydratvorkommen in geringer Meerestiefe und in gut durchmischten

Meeresgebieten – könnten Hydrate durch die Erwärmung auch kurzfristig (innerhalb dieses Jahrhunderts) instabil werden. Ein Entweichen von Hydraten in größerem (d. h. für das Klima spürbaren) Umfang ist also keine akute sondern eine langfristige Gefahr. Über Jahrhunderte könnte es zu einer verstärkenden Rückkopplung der globalen Erwärmung kommen, deren Eindämmung auf Dauer erschwert wird.

Relativ rasche und starke lokale Temperaturänderungen können sich ergeben, wenn sich Meeresströmungen ändern, eine Gefahr, die vor allem für den nördlichen Atlantik diskutiert wird (Kap. 2.1.3). Die Konsequenzen für die Temperatur am Meeresboden

scheinen stark davon abzuhängen, wie sich die Zirkulation verändert (Mignot et al., eingereicht) und können deshalb kaum vorhergesagt werden. Simulationen zeigen jedoch, dass nach einem Abbruch der Tiefenwasserbildung im Nordmeer die Bodentemperatur in einigen Gebieten des Nordatlantiks rasch um mehr als 7°C steigen könnte. Veränderungen in dieser Größenordnung könnten dann auch vorhandene Hydratvorkommen destabilisieren.

Ein weiterer Aspekt ist der Anstieg des Meeresspiegels, der durch Erhöhung des Drucks am Meeresboden Hydratvorkommen prinzipiell stabilisieren kann. Hier ist nur der durch schmelzende Landeis-massen verursachte Anteil relevant, da thermische Expansion den Druck nicht erhöht. Der Effekt ist allerdings sehr gering: In Meerestiefen von 400 m führt eine Erhöhung des Drucks um 0,04 MPa (was einem Meeresspiegelanstieg von 4 m entspricht) nur zu einer Erhöhung der Destabilisierungstemperatur um weniger als 0,1°C. Der langfristige Meeresspiegelanstieg kann den Effekt der langfristigen Erwärmung auf die Hydratstabilität also nicht kompensieren. Das gleiche gilt für kurzfristige relative Änderungen des Meeresspiegels als Ergebnis von Strömungsänderungen (Levermann et al., 2005), welche die Folgen der durch sie verursachten abrupten Temperaturänderungen auch nicht kompensieren könnten.

Reduziert sich die Stabilitätszone der Methanhydrate, bildet sich Methangas unterhalb der Hydratschicht. Dieses Gas kann entweder dank kleiner Kanäle oder durchlässiger Sedimentschichten die Hydratschicht durchdringen und aus dem Meeresboden entweichen oder aber die Hydratschicht sprengen, falls sich hinreichend viel Gas unterhalb einer immer dünner werdenden Hydratschicht sammelt. In einem solchen Ausbruch („blowout“) werden schlagartig große Mengen Methangas freigesetzt. Da freigesprengte Methanhydratbrocken leichter sind als Wasser, steigen sie an die Oberfläche und lösen sich dort auf.

Die Menge Methangas, die über einen dieser Mechanismen in Zukunft aus den Hydratschichten entweichen wird, lässt sich derzeit nur grob abschätzen, da Stabilität und Durchlässigkeit von Sedimentschichten von den sehr unterschiedlichen lokalen Gegebenheiten abhängen.

6.2.3

Abbau von Methanhydraten

Methanhydrate stellen fossile Energieträger dar und können daher für eine wirtschaftliche Nutzung interessant sein. Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung hängt dabei wesentlich von der vorliegenden Me-

thankonzentration der Hydrate ab. Die wenigen praktischen Erfahrungen, die mit der Förderung von Methan aus Hydratvorkommen gesammelt wurden, stammen aus dem Gasfeld Messoyakha (Sibirien) und dem Forschungsprojekt Mallik (Alaska). Das russische Messoyakha-Gasfeld ist ein Vorkommen unter Permafrost, das bereits in den 1960er Jahren entdeckt wurde. Hier waren nicht nur die Abbaukosten außerordentlich hoch, sondern es wird bisweilen bezweifelt, ob das hier gewonnene Methan in den 1970er Jahren tatsächlich, wie behauptet, aus Hydratvorkommen gefördert wurde (EIA, 1998; Schindler und Zittel, 2000a). Mallik 2002 ist ein Bohrprojekt an der arktischen Küste Kanadas, wo die Methankonzentration der Hydrate ähnlich hoch eingestuft wird wie etwa in japanischen Küstengewässern. Das Projekt umfasste Gashydrat-Produktionstests und ist Teil eines internationalen Forschungsverbunds, an dem sowohl Staaten (u. a. USA, Japan, Indien und Deutschland) als auch Unternehmen beteiligt sind.

Der Abbau von Methanhydraten wäre prinzipiell auch auf Hoher See möglich. Es gilt als technisch machbar, in Wassertiefen bis zu 4 km in den Meeresboden zu bohren. Die technische und insbesondere die wirtschaftliche Praktikabilität potenzieller Abbauverfahren ist Gegenstand der Forschung, bei der vor allem Japan und die USA eine wichtige Rolle spielen. Das japanische Programm zum Methanhydratabbau (National Methane Hydrate Exploitation Program, MH21) verfolgt neben anderen Aspekten der Methanhydratforschung ausdrücklich das ehrgeizige Ziel, bereits 2007 mit Produktionstests in japanischen Gewässern zu beginnen und strebt an, bis 2012 über Technologien für die kommerzielle Großförderung zu verfügen (MH21, 2005). Die Finanzierung des US-amerikanischen Methanhydratforschungsprogramms (Methane Hydrate Research and Development Act of 2000) wurde 2005 durch den Energy Policy Act bis 2010 verlängert. Ein kommerzieller Abbau von Methanhydraten in US-amerikanischen Gewässern wird ab 2015 und der großskalige Abbau ab ca. 2020 für möglich gehalten (DOE-NETL, 2005; Ray, 2005).

Diese Erwartungen passen zu der Einschätzung, dass in einigen Regionen der Methanhydratabbau binnen der nächsten 5–10 Jahre wirtschaftlich machbar sein wird, während es 30–50 Jahre dauern könnte, bis ein weltweiter, massenhafter Abbau möglich ist (Methane Hydrate Advisory Committee, 2002; Collett, 2005). Die Methanhydratförderung in Permafrostgebieten an Land könnte schneller industrielle Dimensionen annehmen als eine Förderung im Meer (Johnson, 2004). Das liegt daran, dass die Erfassung und Bewertung der förderungswürdigen Vorkommen an Land gegenüber jenen im Meer weiter voran-

geschritten ist. Zudem gibt es bereits Erfahrungen zu Förder- sowie Produktionstechniken an Land (Forschungsbohrung Mallik, Gasfeld Messoyakha). Auch die im Vergleich zum Meer günstigen Förderbedingungen sprechen für den Abbau zunächst an Land. In Kombination mit Größen- und Lerneffekten könnten sich dann Kostenvorteile ergeben. Insgesamt bedeutet das einen Startvorteil der Methanhydratförderung an Land gegenüber jener im Meer. Allerdings wird die prognostizierte technologische Machbarkeit kritisch hinterfragt sowie das ökonomische und energiestrategische Potenzial dieser Art der Energiegewinnung als deutlich überschätzt angenommen (Schindler und Zittel, 2000b).

Insgesamt ist die gezielte Forschung zur Förderung mariner Methanhydrate bisher auf wenige Pilotvorhaben beschränkt. Sie dürfte in diesem Jahrzehnt voraussichtlich noch nicht über das Stadium der Machbarkeitsforschung hinauskommen.

6.3 Mögliche Folgen der Methanfreisetzung

Die Konsequenzen einer Freisetzung von Methangas aus Hydraten hängen vom Mechanismus – Ausbreitung („diffusion“) oder Ausbruch („blowout“) – sowie der Zeitskala der Freisetzung ab.

Wenn Methangas durch die Hydratschicht diffundiert und langsam in kleinen Bläschen aus dem Meeresboden entweicht, dann wird wahrscheinlich beim Aufstieg ein großer Teil in der Wassersäule gelöst. Eine neue Arbeit zeigt allerdings, dass Methanbläschen unter Umständen auch in die oberen Wasserschichten aufsteigen und in die Atmosphäre entweichen könnten (Sauter et al., 2006). Gelöstes Methan hat im Ozean eine Lebensdauer von rund 50 Jahren, bevor es zu H_2O und CO_2 oxidiert. Daher würde auch ein Großteil des gelösten Methans an die Atmosphäre abgegeben, bevor es oxidiert. Der oxidierte Rest erhöht erstens im Ozean die Konzentration gelösten anorganischen Kohlenstoffs, was zu einer weiteren Versauerung beiträgt (Kap. 4.1). Zweitens kommt es in gleichem Maße zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration. Zum Vergleich: Um die gesamten, im Ozean enthaltenen $2 \cdot 10^{17}$ mol Sauerstoff aufzubauchen, müsste dieser mit 1.000 Gt Methan reagieren (Archer, 2005). Drittens stellt sich langfristig im Laufe von rund 1.000 Jahren ein neues Kohlenstoffgleichgewicht zwischen Atmosphäre und Ozean ein, und ungefähr ein Fünftel des in den Ozean eingetragenen Kohlenstoffs wird in die Atmosphäre abgegeben. Die atmosphärische CO_2 -Konzentration steigt und der Treibhauseffekt wird verstärkt. Dieser Effekt tritt langfristig also auf jeden Fall ein: Er ist unabhängig davon, ob Methan direkt

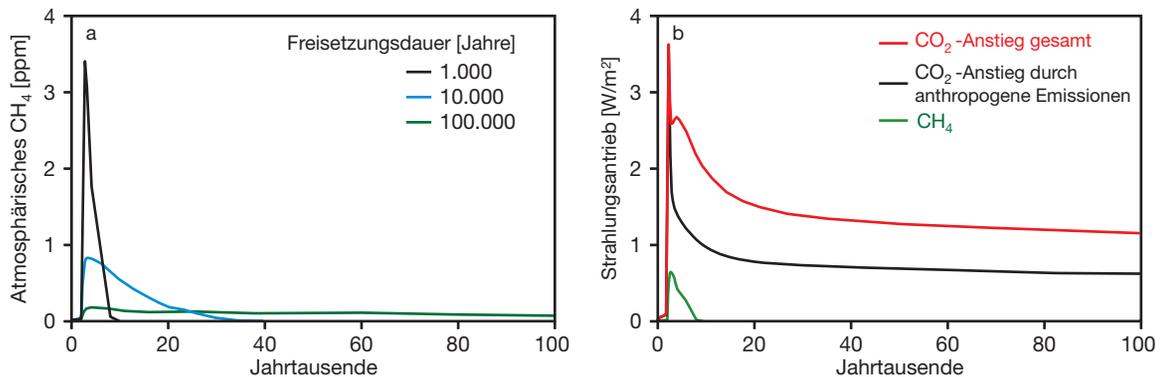
in die Atmosphäre entweicht, dort zu CO_2 oxidiert und zu vier Fünftel allmählich vom Ozean aufgenommen wird, oder ob es zunächst im Ozean gelöst, dort oxidiert und zu einem Fünftel in die Atmosphäre abgegeben wird.

Wenn Methan schlagartig in großen Mengen freigesetzt wird, dann wird es größtenteils die Wasseroberfläche erreichen und die Methankonzentration in der Atmosphäre abrupt erhöhen. Da Methan wegen seiner viel geringeren Konzentration und damit weitestgehend ungesättigten Absorptionsbanden ein wesentlich wirksameres Treibhausgas ist als CO_2 (pro Molekül rund 25-fach stärker), ist der Effekt bereits vergleichsweise geringer Mengen Methan bedeutend. Allerdings oxidiert das atmosphärische Methan rasch (mit einer mittleren Lebensdauer von 8 Jahren) zu CO_2 , welches aber aufgrund seiner langen Lebensdauer in der Atmosphäre akkumuliert wird, so dass langfristig das entwichene Methan nach der Oxidation zu CO_2 sogar eine größere Wirkung auf das Klima entfaltet als zuvor.

Abbildung 6.2-1 zeigt, wie im Lauf der nächsten Jahrtausende anthropogene CO_2 -Emissionen zu Methanemissionen aus den Hydratvorkommen führen könnten. Angenommen wird, dass insgesamt 1.000 Gt CO_2 emittiert werden. Aus Abbildung 6.2-1a ist ersichtlich, wie stark dadurch die atmosphärische Methankonzentration steigen könnte, wobei die Unsicherheit über die Zeitskala dieser Freisetzung durch drei unterschiedliche Annahmen berücksichtigt wurde.

Abbildung 6.2-1b veranschaulicht die klimatischen Konsequenzen der Methanemissionen im 1.000 Gt CO_2 -Szenario für den Fall einer Freisetzung innerhalb von 1.000 Jahren. Dies geschieht sowohl direkt durch Erhöhung der atmosphärischen Methankonzentration (grün), als auch langfristig durch Erhöhung der CO_2 -Konzentration (rot). Während die direkte Methanwirkung geringer ist als die der ursprünglichen anthropogenen CO_2 -Emission, führt die spätere Erhöhung der CO_2 -Konzentration durch die Oxidation des Methans langfristig zu einer annähernden Verdopplung des Treibhauseffekts.

Methanausbrüche bergen auch noch weitere Gefahren. Sie können Kontinentalhänge destabilisieren und große Unterwasserrutschungen auslösen, bei denen dann möglicherweise weitere Hydrate aufgerissen werden. Spuren solcher Rutschungen finden sich auf dem Meeresboden. So wurden mit der Storegga-Rutschung vor der Küste Norwegens vor rund 8.000 Jahren im Durchschnitt 250 m des Kontinentalhanges auf einer Breite von 100 km abgetragen (Archer, 2005). Dieses Ereignis löste einen Tsunami aus, der einen Hochlauf von wenigstens 25 m auf den Shetland-Inseln und von wenigstens 5 m entlang der britischen Küste erreichte (Smith et al., 2004). Die

**Abbildung 6.2-1**

Atmosphärische Methankonzentration für ein Szenario mit einer Gesamtmenge von 1.000 Gt anthropogener CO₂-Emissionen (a). Die Kurven beschreiben die daraus folgende Methanfreisetzung über unterschiedliche Zeiträume (1, 10 und 100 Jahrtausende). Klimawirksamer Strahlungsantrieb für den Fall der kürzesten Freisetzungsdauer von 1.000 Jahren (b). Dieser setzt sich zusammen aus dem Antrieb durch das Methan selbst (grün; es oxidiert allmählich zu CO₂ und verschwindet daher), dem vom Menschen emittierten CO₂ (schwarz), und dem CO₂ aus der Oxidation des Methan. Die letzteren beiden ergeben zusammen den Strahlungsantrieb durch den gesamten Anstieg des CO₂ (rot).

Quelle: Archer und Buffet, 2005

bei der Rutschung freigesetzte Methanmenge wird auf 0,8 Gt Kohlenstoff geschätzt (Archer, 2005). Wenn diese Menge Methan direkt in die Atmosphäre gelangt, ergibt sich ein Strahlungsantrieb von 0,2 W pro m² (zum Vergleich: Der Strahlungsantrieb durch anthropogene Treibhausgase beträgt heute 2,7 W pro m²). Dieses Beispiel illustriert, dass eine abrupte Methanfreisetzung selbst bei einer großen, katastrophalen Hangabratschung nur verhältnismäßig geringe Folgen für das Klima hat.

6.4

Handlungsempfehlungen: Freisetzung von Methan verhindern

Der anthropogene Klimawandel kann durch Erwärmung des Meerwassers zu einer Destabilisierung von Methanhydratvorkommen am Meeresboden führen. Dabei ist die Gefahr einer raschen Freisetzung größerer, klimarelevanter Mengen innerhalb dieses Jahrhunderts nach gegenwärtigem Wissensstand jedoch sehr gering. Wesentlich bedeutsamer ist die Wahrscheinlichkeit einer chronischen Methanfreisetzung über viele Jahrhunderte bis Jahrtausende aufgrund des langsamen Eindringens der globalen Erwärmung in die tieferen Ozeanschichten und Sedimente. Die Konsequenzen menschlichen Handelns wirken hier nicht nur über Jahrhunderte, sondern könnten das Klima der Erde über Zehntausende von Jahren beeinflussen.

Als Handlungsempfehlung ergibt sich einmal mehr die Begrenzung der globalen Erwärmung, weil der Klimawandel durch die Methanfreisetzung aus Hydraten langfristig noch verstärkt werden könnte.

Dieser Rückkopplungseffekt birgt die Gefahr, dass die Menschheit die Kontrolle über die Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre verliert, da ein Ausgasen von Methan vom Meeresboden nicht steuer- oder begrenztbar wäre.

Dennoch besteht bezüglich der marinen Methanhydratvorkommen bereits heute ein institutioneller Handlungsbedarf. Zum einen betrifft dies den gezielten Abbau der marinen Methanhydrate, zum anderen die unbeabsichtigte Freisetzung von Methan, zu welcher es beim Meeresbergbau kommen könnte.

Theoretisch könnte die Förderung von Methan aus Hydraten deren unbeabsichtigte Freisetzung in die Umwelt auslösen, schlimmstenfalls in Form plötzlicher Ausbrüche. Dieses Risiko ist noch wenig erforscht (Archer, 2005). Eine „Leckage“ von Methan in die Umwelt beim Abbau würde den Treibhauseffekt unnötig verstärken. Im schlimmsten Fall könnte gar eine Hangabratschung verursacht werden, die einen Tsunami auslösen könnte.

Die mit dem Abbau verbundenen Risiken sind je nach den geologischen Gegebenheiten sehr unterschiedlich. Daher müssen diese Risiken des Methanabbaus im Einzelfall sorgfältig geprüft werden. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung und Monitoring nach universellen Standards sind in jedem Fall erforderlich.

Für Methanhydratvorkommen wie auch für andere Ressourcen am Meeresboden außerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszonen ist die internationale Meeresbodenbehörde (Seabed Authority), eine Institution des Internationalen Seerechtsübereinkommens (UNCLOS), zuständig. Die Behörde erteilt Abbaulizenzen und überwacht die Abbauvorhaben. Ihre Richtlinien zur Exploration von Tiefsee-

bodenschätzen aus dem Jahr 2000 enthalten verschiedene Umweltaspekte. Hier ist ein Ansatzpunkt, um konkrete Standards für den Abbau mariner Methanhydrate auf Hoher See zu vereinbaren. Nach Auffassung des WBGU ist es darüber hinaus erforderlich, das Überwachungssystem zu verbessern und zu erweitern. Dabei ist von Bedeutung, dass bisher „nur“ rund 150 Staaten das UNCLOS ratifiziert haben, und hiervon lediglich etwa 120 Staaten die Regelungen zum Umgang mit Meeresbodenschätzen (nicht gezeichnet haben z. B. Iran und USA). Es ist auszuloten, in welchem Rahmen mehr Länder für die Einhaltung universeller Standards beim Hydratabbau gewonnen werden können. Außerdem bedarf es völkerrechtlich bindender Vereinbarungen für den Abbau von Methanhydraten innerhalb der Meeresbereiche, die den territorialen Hoheitsrechten der Küstenstaaten unterliegen (Kasten 2.6-1). Dies gilt vor dem Hintergrund, dass das oben angesprochene japanische Pilotvorhaben ebenso wie auch amerikanische Überlegungen auf die zukünftige kommerzielle Methanföderung aus Hydratvorkommen in nationalen Küstengewässern abzielen.

Die Gefahr der Freisetzung von Methanhydraten besteht grundsätzlich auch bei anderen Aktivitäten des Meeresbergbaus. Würde Methan beim Abbau von Rohstoffen destabilisiert und ungewollt freigesetzt, so ließen sich diese Emissionen kaum messen und entsprechend nicht oder nur unzureichend auf die Emissionsinventare eines Landes anrechnen. Die gültigen IPCC-Richtlinien von 1996 für die Aufstellung nationaler Emissionsinventare gehen nicht auf Methan ein, das auf See unbeabsichtigt emittiert wird. Der WBGU empfiehlt daher, bei der anstehenden Überarbeitung der Richtlinien im Jahr 2006 diese Lücke trotz der Messschwierigkeiten zu schließen. Zumindest sollte aber eine Berichtspflicht über solche Methanfreisetzungen eingeführt werden.

ten ist, dass durch die globale Erwärmung Hydrate destabilisiert werden könnten.

Während die Forschung über die langfristige Stabilität mariner Methanhydrate und Klimaschutzimplikationen weiter verstärkt werden sollte, sieht der WBGU keinen Bedarf für eine staatliche Subventionierung anwendungsbezogener Forschung zum Abbau mariner Methanhydrate. Eine öffentliche Förderung solcher Vorhaben erscheint nicht sinnvoll, weil der Abbau erhebliche Risiken birgt und Methanhydrate keine nachhaltige Energiequelle darstellen.

Allerdings bedarf es gezielter naturwissenschaftlicher Forschung, wenn geeignete Standards für den Abbau von marinen Methanhydraten definiert werden müssen. Naturwissenschaftliche Untersuchungen sollte durch sozial- und rechtswissenschaftliche Forschung über Möglichkeiten zur weltweiten Implementierung solcher Standards ergänzt werden.

6.5

Forschungsempfehlungen

Da die Abschätzung der Risiken einer Methanfreisetzung noch mit großen Unsicherheiten und Wissenslücken verbunden ist, besteht erheblicher Forschungsbedarf. Dabei sollten zunächst die Methanvorkommen weiter kartiert und mengenmäßig abgeschätzt werden. Der Schwerpunkt sollte dabei nicht auf möglichen abbaubaren Vorkommen liegen, sondern vor allem auf Vorkommen, die möglicherweise durch den Klimawandel destabilisiert werden sowie auf der Gefahr von Hangabrutschungen. Weiterhin sollte durch Modellstudien untersucht werden, in welchen Regionen der Ozeane das Risiko am Größ-

Meeresumwelt durch Klimaschutz bewahren

Die Zukunft der marinen Umwelt wird entscheidend davon abhängen, ob sich die menschengemachte Störung des Klimasystems auf ein tolerierbares Maß begrenzen lässt. Der WBGU empfiehlt deshalb, die globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen bis 2050 gegenüber 1990 in etwa zu halbieren. Wegen der geophysikalischen Verzögerungseffekte wird die Klimaschutzpolitik der nächsten Jahrzehnte den Zustand der Meere in den kommenden Jahrtausenden bestimmen. Anpassungsmaßnahmen können nur dann erfolgreich sein, wenn die gegenwärtige Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs und die zunehmende Versauerung der Meere gestoppt werden können.

Als Beitrag zur Operationalisierung einer nachhaltigen Entwicklung hat der WBGU in früheren Gutachten eine Klimaschutzleitplanke formuliert: Zur Vermeidung gefährlicher Klimaänderungen müssen der mittlere globale Anstieg der bodennahen Lufttemperatur auf höchstens 2°C gegenüber dem vorindustriellen Wert und die Temperaturänderungsrate auf maximal 0,2°C pro Jahrzehnt beschränkt werden. Dieses Gutachten zeigt, dass diese Leitplanke auch aus Gründen des Meeresschutzes eingehalten werden muss.

Widerstandsfähigkeit der Meeresökosysteme nachhaltig stärken

Fischbestände und Korallenriffe werden ihre Produktivität und Vielfalt nur dann bewahren können, wenn weltweit für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Meeresressourcen gesorgt wird. Angesichts der wachsenden direkten und indirekten Belastungen durch die anthropogenen Treibhausgasemissionen kommt dem „ökosystemaren Ansatz“ für Schutz und Nutzung der marinen Umwelt immer größere Bedeutung zu. Dazu müssen die international bereits vereinbarte Einrichtung von Meeresschutzgebieten energisch vorangetrieben und die Regelungslücke

auf der Hohen See durch ein entsprechendes Abkommen im Rahmen des Seerechtsübereinkommens (UNCLOS) geschlossen werden.

Für den Schutz der Meeresökosysteme und die Stärkung ihrer Widerstandsfähigkeit schlägt der WBGU folgende Leitplanke vor: Mindestens 20–30% der Fläche mariner Ökosysteme sollten für ein ökologisch repräsentatives und effektiv betriebenes Schutzgebietssystem ausgewiesen werden.

Meeresspiegelanstieg begrenzen und Strategien des Küstenzonenmanagements neu ausrichten

Die bisherigen Ansätze für Schutz und Nutzung der Küstengebiete werden dem klimagetriebenen Meeresspiegelanstieg und der zunehmenden Zerstörungskraft von Hurrikanen nicht mehr gerecht. Neuartige Kombinationen von Maßnahmen (Portfolio-Strategien) werden benötigt, wobei die Optionen Schutzgewährung, qualifizierter Rückzug und Akkommodation gegeneinander abzuwägen sind. Dabei sollten insbesondere die Belange von Küsten- und Naturschutz besser verknüpft und die von Anpassungs- oder Umsiedlungsmaßnahmen betroffene Bevölkerung in die Planung und Umsetzung einbezogen werden. Dazu empfiehlt der WBGU die Schaffung integrierender Institutionen, welche alle wesentlichen Kompetenzen bündeln sollen.

Um schwere Schäden und Verluste zu verhindern und die Anpassungsfähigkeit von Küstenökosystemen und Infrastruktur nicht zu überfordern, schlägt der WBGU folgende Leitplanke für den Meeresspiegelanstieg vor: Der absolute Meeresspiegelanstieg sollte dauerhaft nicht mehr als 1 m betragen, und die Anstiegsgeschwindigkeit sollte stets unter 5 cm pro Jahrzehnt bleiben.

Innovative völkerrechtliche Instrumente für den Umgang mit „Meeresflüchtlingen“ vereinbaren

Bisher besteht für keine Nation die völkerrechtliche Pflicht zur Aufnahme von Migranten, deren Lebens-

umfeld durch klimaverursachte Überflutung verloren gegangen ist. Langfristig wird die Staatengemeinschaft das Problem der „Meeresflüchtlinge“ aber nicht ignorieren können und deshalb entsprechende Instrumente zur gesicherten Aufnahme der Betroffenen in geeigneten, möglichst ihrer Präferenz entsprechenden Gebieten entwickeln müssen. Sinnvoll ist eine faire Lastenverteilung, bei der sich die Staaten nach Maßgabe ihrer Treibhausgasemissionen verbindlich verpflichten, für diese Menschen Verantwortung zu übernehmen. Zur Vorbereitung der politischen Entscheidungsfindung sollten entsprechende juristische und sozialwissenschaftliche Studien durchgeführt werden.

Versauerung der Meere rechtzeitig stoppen

Die Meere haben bisher rund ein Drittel der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen, was bereits zu einer signifikanten Versauerung (Absenkung des pH-Werts) des Meerwassers geführt hat. Diese Emissionen beeinflussen somit die Meeresumwelt direkt – ohne den Umweg über den Klimawandel. Eine ungebremste Fortsetzung des Trends wird zu einer Meeresversauerung führen, die in den letzten Jahrtausenden ohne Beispiel und über Jahrtausende unumkehrbar ist. Die Folgen für die marinen Ökosysteme lassen sich zwar nicht exakt prognostizieren, aber es sind einschneidende Veränderungen im Nahrungsnetz denkbar, da die Kalkbildung von Meeresorganismen behindert oder teilweise sogar unterbunden werden kann. Der WBGU empfiehlt, zu diesem Thema international abgestimmte Forschungs- und Monitoringprogramme zu unterstützen. Darüber hinaus ist in den Verhandlungen über zukünftige Verpflichtungen zur Klimarahmenkonvention die besondere Rolle des CO₂ gegenüber anderen Treibhausgasen zu berücksichtigen und neben einer Stabilisierung der Treibhausgase insgesamt auch ausdrücklich eine Stabilisierung der CO₂-Konzentrationen anzustreben.

Zum Schutz der Meere vor Versauerung schlägt der WBGU folgende Leitplanke vor: Um zu verhindern, dass die Kalkbildung der Meeresorganismen gestört wird und dadurch das Risiko besteht, dass die marinen Nahrungsnetze umstrukturiert werden, sollte der pH-Wert der obersten Meeresschicht in keinem größeren Ozeangebiet (d. h. auch nicht im globalen Mittel) um mehr als 0,2 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Wert absinken.

- ACIA – Arctic Climate Impact Assessment (2005): Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R. und Rockström, J. (2005): Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science* 309, 1036–1039.
- Agardy, T., Bridgewater, P., Crosby, M. P., Day, J., Dayton, P. K., Kenchington, R., Laffoley, D., McConney, P., Murray, P. A., Parks, J. E. und Peau, L. (2003): Dangerous targets? Unresolved issues and ideological clashes around marine protected areas. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems* 13 (4), 353–367.
- Ahmed, S., Mbasis, J., Moko, D. und Ngonzi, A. (2005): Health is wealth: how low-income people finance health care. *Journal of International Development* 17, 383–396.
- Alheit, J., Möllmann, C., Dutz, J., Kornilovs, G., Loewe, P., Mohrholz, V. und Wasmund, N. (2005): Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES Journal of Marine Science* 62, 1205–1215.
- Archer, D. (2005): Destabilization of Methane Hydrates: A Risk Analysis. Externe Expertise für das WBGU-Sondergutachten „Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006_ex01.pdf. Berlin: WBGU.
- Archer, D. (2006): *Global Warming – Understanding the Forecast*. Oxford, UK: Blackwell Publishers.
- Archer, D. und Buffett, B. (2005): Time-dependent response of the global ocean clathrate reservoir to climatic and anthropogenic forcing. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6 (3), 13.
- Athreye, V. und Roth, J. (2005): CGAP Working Group on Microinsurance. Good and Bad Practices. Case Study No. 14. New Delhi: Tata-AIG Life Insurance Company Ltd.
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E. A. und Rothery, P. (2004): Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432, 100–103.
- Attrill, M. J. und Power, M. (2002): Climatic influence on a marine fish assemblage. *Nature* 417, 275–278.
- Baker, A. C., Craig, J., Starger, T., McClanahan, R. und Glynn, P. W. (2004): Corals' adaptive response to climate change. *Nature* 430, 741.
- Balmford, A., Gravestock, P., Hockley, N., McClean, C. J. und Roberts, C. M. (2004): The worldwide costs of marine protected areas. *PNAS* 101 (1073), 9694–9697.
- Barber, R. (2001): Upwelling ecosystems. In: Steele, J. H., Thorpe, S. A. und Turekian, K. K. (Hrsg.): *Encyclopedia of Ocean Sciences*. London: Academic Press, 3128–3135.
- Barlow, P. M. (2003): *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. Circular 1262. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Barnett, J. und Adger, W. N. (2003): Climate dangers and atoll countries. *Climatic Change* 61, 321–337.
- Barrett, P. (2003): Palaeoclimatology – cooling a continent. *Nature* 421, 221–223.
- Barry, J. P., Buck, K. R., Lovera, C. F., Kuhn, L., Whaling, P. J., Peltzer, E. T., Walz, P. und Brewer, P. G. (2004): Effects of direct ocean CO₂ injection on deep-sea meiofauna. *Journal of Oceanography* 60, 759–766.
- Baumgartner, T. R., Soutar, A. und Ferreira-Bartrina, V. (1992): Reconstruction of the history of pacific sardine and northern anchovy populations over the past two millennia from sediments of the Santa Barbara Basin, California. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (ColCofi)* 33, 24–40.
- BBK – Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2006): *Schutz kritischer Infrastrukturen*. Internet: <http://www.bbk.bund.de> (gelesen am 15. Februar 2006). Berlin: BBK.
- Beare, D. J., Burns, F., Greig, A., Jones, E. G., Peach, K., Kienzle, M., McKenzie, E. und Reid, D. G. (2004): Long-term increases in prevalence of North Sea fishes having southern biogeographic affinities. *Marine Ecology Progress Series* 284, 269–278.
- Beaugrand, G., Reid, P. C., Ibanez, F., Lindley, J. A. und Edwards, M. (2002): Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science* 296, 1692–1695.
- Beaugrand, G. und Reid, P. C. (2003): Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Global Change Biology* 9, 801–817.
- Beaugrand, G., Brander, K. M., Lindley, J. A., Souissi, S. und Reid, P. C. (2003): Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature* 426, 661–664.
- Beaugrand, G. (2004): The North Sea regime shift: evidence, causes, mechanisms and consequences. *Progress in Oceanography* 60, 245–262.
- Bellona Foundation (2005): *CO₂ for EOR on the Norwegian Shelf – the Environment and Economic Growth Hand in Hand*. Oslo: Bellona Foundation.
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C. und Nystrom, M. (2004): Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429, 827–833.
- Bertrand, A., Segura, M., Gutiérrez, M. und Vásquez, L. (2004): From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. *Fish and Fisheries*, 296–316.
- Beyerlin, U. (2000): *Umweltvölkerrecht*. München: Beck.
- Bijlsma, L., Ehler, C. N., Klein, R. J. T., Kulshrestha, S. M., McLean, R. F., Mimura, N., Nicholls, R. J., Nurse, L. A., Perez Nieto, H., Stakhiv, E. Z., Turner, R. K. und Warrick, R. A. (1996): Coastal zones and small islands. In: Watson, R. T., Zinyowera, M. C. und Moss, R. H. (Hrsg.): *Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 289–324.

- Blindheim, J., Toresen, R. und Loeng, H. (2001): Fremtidige klimatiske endringer og betydningen for fiskeressursene. Havets Miljø 2001. Fisken og Havet 2, 73–78.
- Bloomfield, J., Smith, M. und Thompson, N. (1999): Hot Nights in the City. Washington, DC: Environmental Fund.
- Bode, S., Isensee, J., Krause, K. und Michaelowa, A. (2002): Climate policy: analysis of ecological, technical and economic implications for international maritime transport. *International Journal of Maritime Economics* 4, 164–184.
- Bode, S. und Jung, M. (2005): Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS) – Liability for Non-Permanence Under the UNFCCC. Hamburg: Hamburgisches Welt-Wirtschafts-Archiv (HWWA).
- Boersma, D., Ogden, J., Branch, G., Bustamante, R., Campagna, C., Harris, G. und Pikitch, E. K. (2004): Lines on the water: ocean-use planning in large marine ecosystems. In: Glover, L. K. und Earle, S. A. (Hrsg.): *Defying Ocean's End. An Agenda for Action*. Washington, DC: Island Press, 123–138.
- Bohnsack, J. A. (1998): Application of marine reserves to reef fisheries management. *Australian Journal of Ecology* 23, 298–304.
- Bohnsack, J. A., Causey, B., Crosby, M. P., Griffis, R. B., Hixon, M. A., Hourigan, T. F., Koltes, K. H., Maragos, J. E., Simons, A. und Tilmant, J. T. (2002): A Rationale for Minimum 20–30% No-Take Protection. Paper Presented to the 9th International Coral Reef Symposium. Bali, Indonesien 23.–27. Oktober 2000. Bali: Konferenzsekretariat.
- Bopp, L., Monfray, P., Aumont, O., Dufresne, J.-L., Le Treut, H., Madec, G., Terray, L. und Orr, J. C. (2001): Potential impact of climate change on marine export production. *Global Biogeochemical Cycles* 15 (1), 81–99.
- Boyd, E., Clarke, J., Gray, G., Hodge, G. B., Hurlston, L.-A., Nicholson-Cole, S. A., Tompkins, E. L., Trotz, N. und Varlack, L. (2005): *Surviving Climate Change in Small Islands: A Guidebook*. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research.
- BP – British Petroleum (2005): *Putting Energy in the Spotlight. BP Statistical Review of World Energy*. London: BP.
- Brander, K. M. (2005): Assessment of Possible Impacts of Climate Change on Fisheries. Externe Expertise für das WBGU-Sondergutachten „Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_sg2006_ex02.pdf. Berlin: WBGU.
- Broecker, W. (1987): Unpleasant surprises in the greenhouse? *Nature* 328, 123.
- Brooks, N., Nicholls, R. und Hall, J. M. (2006): *Sea Level Rise: Coastal Impacts and Responses*. Externe Expertise für das WBGU-Sondergutachten „Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006_ex03.pdf. Berlin: WBGU.
- Brown, W. und Churchill, C. F. (1999): *Providing Insurance to Low-Income Households. Part 1: A Primer on Insurance Principles and Products*. Bethesda, MD: Microenterprises Best Practices.
- Brown, W. und Churchill, C. F. (2000): *Providing Insurance to Low-Income Households. Part 2: Initial Lessons from Micro-Insurance Experiments for the Poor*. Bethesda, MD: Microenterprises Best Practices.
- Bruneau, M., Chang, S., Eguchi, R., Lee, G., O'Rourke, T., Reinhorn, A., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. und von Winterfeldt, D. (2003): A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *EERI Spectra Journal* 19, 733–752.
- Bruun, P. (1962): Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbours Division ASCE* (88), 117–130.
- Bryden, H. L., Longworth, H. R. und Cunningham, S. A. (2005): Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N. *Nature* 438, 655–665.
- Buddemeier, R. W., Kleypas, J. A. und Aronson, R. B. (2004): *Coral Reefs and Global Climate Change: Potential Contributions of Climate Change to Stresses on Coral Reef Ecosystems*. Arlington: Pew Center on Global Climate Change.
- Buffett, B. und Archer, D. (2004): Global inventory of methane clathrate: sensitivity to changes in the deep ocean. *Earth and Planetary Science Letters* 227 (3-4), 185–199.
- Bundesregierung (2006): *Integriertes Küstenzonenmanagement in Deutschland. Nationale Strategie für ein integriertes Küstenzonenmanagement*. Berlin: Bundesregierung.
- Burgess, K. und Townend, I. (2004): *The Impact of Climate Change Upon Coastal Defence Structures*. Proceedings of the 39th Defra Flood and Coastal Management Conference. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), 14.
- Burns, W. C. (1997): Global warming – the United Nations Framework Convention on Climate Change and the future of small island states. *Dickinson Journal of Environmental Law and Policy* 6, 147–188.
- Burton, I. und Dore, M. H. I. (2000): *The Costs of Adaptation to Climate Change in Canada: A Stratified Estimate by Sectors and Regions. First Deliverable: A Review of the Literature on the Costs of Adaptation to Climate Change*. Internet: <http://adaptation.rncan.gc.ca/app/filerepository/E74BFBF66A704A778C4D1AD4A8C4BFC2.pdf> (gelesen am 19. Januar 2006). Ottawa, Ontario: Natural Resources Canada.
- Burton, I. und Lim, B. (2001): *Adaptation Policy Framework. Draft Report*. New York: United Nations Development Programme (UNDP).
- Burton, I., Huq, S., Lim, B., Pilifosova, O. und Schipper, E. L. (2002): From impacts assessment to adaptation priorities; the shaping of adaptation policy. *Climate Policy* 2, 145–159.
- Caldeira, K., Jain, A. K. und Hoffert, M. I. (2003): Climate sensitivity uncertainty and the need for energy without CO₂ emission. *Science* 299, 2052–2054.
- Caldeira, K., Akai, M., Brewer, P., Chen, B., Haugan, P., Iwama, T., Johnston, P., Kheshgi, H. S., Q., L., Ohsumi, T., Pörtner, H. O., Sabine, C., Shirayama, Y. und Thomson, J. (2005): Chapter 6: Ocean Storage. In: *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 4–41.
- Caldeira, K. und Wickett, M. E. (2005): Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *Journal of Geophysical Research – Oceans* 110, C09S04, doi: 10.1029/2004JC002671.
- Carlton, J. (2005): Is Global Warming Killing Polar Bears? Internet: <http://reference.aol.com/article?id=20051216151609990001> (gelesen am 20. März 2006). Washington, DC: The Wall Street Journal via AP.
- Cazenave, A. und Nerem, R. (2004): Present-day sea level change: observations and causes. *Reviews of Geophysics* 42 (3), 139–150.
- CBD – Convention on Biological Diversity (2003): *Integration of Outcome-Oriented Targets Into the Programmes of Work of the Convention, Taking into Account the 2010 Biodiversity Target, the Global Strategy for Plant Conservation, and Relevant Targets set by the World Summit on Sustainable Development*. UN-Dokument UNEP/CBD/COP/7/20/Add.5. Montreal: CBD-Sekretariat.
- CBD – Convention on Biological Diversity (2004a): *Protected Areas (Articles 8 (a) to (e))*. Decision VII/28. UN-Dokument UNEP/CBD/COP/7/21. Montreal: CBD-Sekretariat.

- CBD – Convention on Biological Diversity (2004b): Marine and Coastal Biological Diversity. Decision VII/5. UN-Dokument UNEP/CBD/COP/7/21. Montreal: CBD-Sekretariat.
- CBD – Convention on Biological Diversity (2005a): Ad Hoc Open-ended Working Group on Protected Areas: The International Legal Regime of the High Seas and Seabed Beyond the Limits of National Jurisdiction and Options for Cooperation for the Establishment of Marine Protected Areas in Marine Areas Beyond the Limits of National Jurisdiction. UN-Dokument UNEP/CBD/WG-PA/INF/2. Montreal: CBD-Sekretariat.
- CBD – Convention on Biological Diversity (2005b): Ad Hoc Open-ended Working Group on Protected Areas: Options for Cooperation for the Establishment of Marine Protected Areas in Marine Areas Beyond the Limits of National Jurisdiction. UN-Dokument UNEP/CBD/WG-PA/1/2. Montreal: CBD-Sekretariat.
- Chape, S., Harrison, J., Spalding, M. und Lysenko, I. (2005): Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 360, 443–455.
- Church, J. A., White, N. J. und Arblaster, J. M. (2005): Significant decadal-scale impact of volcanic eruptions on sea level and ocean heat content. *Nature* 438, 74–77.
- Church, J. A. und White, N. J. (2006): A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 33 (1), doi:10.1029/2005GL024826.
- Chylek, P. und Lohmann, U. (2005): Ratio of the Greenland to global temperature change: comparison of observations and climate modeling results. *Geophysical Research Letters* 32, L14705, doi:10.1029/2005GL023552.
- CIA – Central Intelligence Agency (2005): The World Factbook 2005. Internet: <http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/> (gelesen am 8. März 2006). Washington, DC: CIA.
- Clark, P. U., McCabe, A. M., Mix, A. C. und Weaver, A. J. (2004): Rapid rise of sea level 19,000 years ago and its global implications. *Science* 304, 1141–1144.
- Clarke, T. (2001): Taming Africa's killer lake. *Nature* 406, 554–555.
- Claussen, M., Ganopolski, A., Brovkin, V., Gerstengarbe, F.-W. und Werner, P. C. (2003): Simulated global-scale response of the climate system to Dansgaard/Öeschger and Heinrich events. *Climate Dynamics* 21 (5-6), 361–370.
- Cohen, J. E., Small, C., Mellinger, A., Gallup, J. und Sachs, J. D. (1997): Estimates of coastal population. *Science* 278, 1211–1212.
- Cohen, M. C. L. und Lara, R. J. (2003): Temporal changes of mangrove vegetation boundaries in Amazonia: application of GIS and remote sensing techniques. *Wetlands Ecology and Management* 11, 223–231.
- Cohen, M., McCord, M. J. und Sebstad, J. (2005): Reducing vulnerability: demand for and supply of microinsurance in East Africa. *Journal of International Development* 17, 319–325.
- Collett, T. S. (2005): Natural Gas Hydrates: Resource of the 21st Century? Internet: http://emd.aapg.org/technical_areas/gas_hydrates/resource_toc.cfm (gelesen am 22. November 2005). Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists (AAPG).
- CSD – Commission on Sustainable Development (2004): Review of Progress in the Implementation of the Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing States. Report of the Secretary-General. UN-Dokument E/CN.17/2004/8. New York: CSD.
- CSLF – Carbon Sequestration Leadership Forum (2005): CO₂ Capture and Storage Summary of Norway. Paper presented by O. S. Haraldsen (Director General, Ministry of Petroleum and Energy) at the 1st International Workshop on CSLF Projects, Berlin, 27.–29. September 2005. Washington, DC: CSLF.
- Curry, R. und Mauritzen, C. (2005): Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science* 308, 1772–1774.
- Czisch, G. (2005): Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung. Kostenoptimierte Variationen zur Versorgung Europas und seiner Nachbarn mit Strom aus erneuerbaren Energien. Dissertation. Kassel: Universität Kassel.
- Dahdouh-Guebas, F., Jayatissa, L. P., Di Nitto, D., Bosire, J. O., Lo Seen, D. und Koedam, N. (2005): How effective were mangroves as a defence against the recent tsunami? *Current Biology* 15, 1337–1338.
- Danielsen, F., Sørensen, M. K., Olwig, M. F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N. D., Hiraishi, T., Karunakaran, V. M., Rasmussen, M. S., Hansen, L. B., Quarto, A. und Suryadiputra, N. (2005): The Asian Tsunami: a protective role for coastal vegetation. *Science* 310, 643.
- Darwin, R. F. und Tol, R. S. J. (2001): Estimates of the economic effects of sea level rise. *Environmental and Resource Economics* 19, 113–119.
- Daschkeit, A. und Schottes, P. (Hrsg.) (2002): Klimafolgen für Mensch und Küste: am Beispiel der Nordseeinsel Sylt. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Davie, M. und Buffett, B. (2001): A numerical model for the formation of gas hydrate below the seafloor. *Journal of Geophysical Research* 106 (B1), 185–199.
- del Ninno, C., Dorosh, P. A., Smith, L. C. und Roy, D. K. (2001): The 1998 Floods in Bangladesh: Disaster Impacts, Household Coping Strategies, and Response. Research Report 122. Washington, DC: International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Deutsche BP (2005): BP plant Kraftwerk mit 90% weniger Emissionen. Pressemitteilung vom 06. Juli 2005. Internet: <http://www.deutschebp.de/genericarticle.do?categoryId=2010149&contentId=7007117> (gelesen am 3. April 2006). Bochum: Deutsche BP.
- DINAS-COAST Consortium (2004): DIVA 1.0. CD-Rom. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK).
- DOE-NETL – U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory (2005): Program Facts – Methane Hydrates. Internet: <http://www.netl.doe.gov/scngo> (gelesen am 24. Februar 2006). Tulsa, OK: NETL.
- Donner, S. D., Skirving, W. J., Little, C. M., Oppenheimer, M. und Hoegh-Guldberg, O. (2005): Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Global Change Biology* 11, 2251–2265.
- Dowdeswell, J. A. (2006): Atmospheric science – the Greenland ice sheet and global sea-level rise. *Science* 311, 963–964.
- Dowsett, H. J., Thompson, R. S., Barron, J. A., Cronin, T. M., Ishman, S. E., Poore, R. Z., Willard, D. A. und Holtz jr., T. R. (1994): Joint investigations of the middle pliocene climate I: PRISM paleoenvironmental reconstructions. *Global and Planetary Change* 9, 169–195.
- DRM – World Institute for Disaster Risk Management (2006): Disaster Management for Critical Infrastructure. Internet: <http://www.drmonline.net/projects/infrastructure.htm> (gelesen am 19. Januar 2006). Alexandria, VA: DRM.
- Edenhofer, O. (2003): Wege zu einer nachhaltigen Klima- und Energiepolitik. *Aus Politik und Zeitgeschichte* 27, 18–26.
- Edenhofer, O., Held, H. und Bauer, N. (2005): A regulatory framework for carbon capturing and sequestration within the Post-Kyoto process. In: Rubin, E. S., Keith, D. W. und Gilbo, C. F. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Volume 1: Peer-Reviewed Paper and Plenary Presentations, IEA Green-

- house Gas Programme. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- Edwards, M. und Richardson, J. (2004): Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430, 881–884.
- EEA – European Environment Agency (2005): Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Europe. Paris: EEA.
- EIA – Energy Information Administration (1998): Natural Gas 1998: Issues and Trends. Washington, DC: EIA.
- Ellison, J. C. und Stoddart, D. R. (1991): Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: holocene analogues and implications. *Journal of Coastal Research* 7, 151–165.
- El-Raey, M., Dewidar, K. R. und El-Hattab, M. (1999): Adaptation to the impacts of sea-level rise in Egypt. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 4, 343–361.
- Elsner, W., Otte, C. und Yu, I. (2005): Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM): Teilprojekt 5 – Endbericht. Klimawandel und regionale Wirtschaft. Vermögensschäden und Einkommensverluste durch extreme Klimaereignisse sowie Kosten-Nutzen-Analysen von Schutzmaßnahmen. Am Beispiel der nordwestdeutschen Küstenregion. Bremen: Universität Bremen.
- Emanuel, K. (2005): Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436, 686–688.
- Emerton, L. (1999): Economic Tools for the Management of Marine Protected Areas in Eastern Africa. Biodiversity Economics for Eastern Africa. Gland: The World Conservation Union (IUCN).
- Engel, A., Thomas, S., Riebesell, U., Rochelle-Newall, E. und Zondervan, I. (2004): Polysaccharide aggregation as a potential sink of marine dissolved organic carbon. *Nature* 428, 929–932.
- Epiney, A. (1995): Das „Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbeeinträchtigungen“: Relikt oder konkretisierungsfähige Grundnorm? *Archiv des Völkerrechts* 33, 309–360.
- EU-Kommission (2005): Thematische Strategie für den Schutz und die Erhaltung der Meeresumwelt. Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament. EU-Dokument KOM(2005)504 vom 24.10.2005. Brüssel: EU-Kommission.
- Fairbanks, R. G. (1989): A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342, 637–642.
- Falkowski, P. G., Laws, E. A., Baber, R. T. und Murray, J. W. (2003): Phytoplankton and their role in primary, new, and export production. In: Fasham, M. J. R. (Hrsg.): *Ocean Biogeochemistry: The Role of the Ocean Carbon Cycle in Global Change*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 99–121.
- Fankhauser, S. (1995): *Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse*. London: Earthscan.
- Fankhauser, S. (1998): *The Costs of Adaptation to Climate Change*. GEF Working Paper 16. Washington, DC: Global Environment Facility (GEF).
- FAO – Food and Agriculture Organisation (1995): *Code of Conduct for Responsible Fisheries*. Rom: FAO.
- FAO – Food and Agriculture Organisation (2000): *The State of World Fisheries and Aquaculture 2000*. Rom: FAO.
- FAO – Food and Agriculture Organisation (2001): *International Plan of Action to Prevent, Deter and Eliminate Illegal, Unreported and Unregulated Fishing*. Rom: FAO.
- FAO – Food and Agriculture Organisation (2002): *The State of World Fisheries and Aquaculture 2002*. Rom: FAO.
- FAO – Food and Agriculture Organisation (2003): *Fisheries Management 2: The Ecosystem Approach to Fisheries*. FAO Technical Report Nr. 4 (Suppl. 2). Rom: FAO.
- FAO – Food and Agriculture Organisation (2004): *The State of World Fisheries and Aquaculture 2004*. Rom: FAO.
- Fasham, M. J. R. (Hrsg.) (2003): *Ocean Biogeochemistry: The Role of the Ocean Carbon Cycle in Global Change*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Feely, R., Sabine, C., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J. und Millero, F. J. (2004): Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science* 305, 362–366.
- Fernando, H. J. S. und McCulley, J. L. (2005): Coral poaching worsens tsunami destruction in Sri Lanka. *EOS* 86, 301–304.
- Fiedler, P. C. (2002): Environmental change in the eastern tropical Pacific Ocean: review of ENSO and decadal variability. *Marine Ecology Progress Series* 244, 265–283.
- Field, D. B., Baumgartner, T. R., Charles, C. D., Ferreira-Bartrina, V. und Ohman, M. D. (2006): Planktonic foraminifera of the California current reflect 20th-century warming. *Science* 311, 63–66.
- Forcada, J., Trathan, P. N., Reid, K. und Murphy, E. J. (2005): The effects of global climate variability in pup production of Antarctic fur seals. *Ecology* 86, 2408–2417.
- Frank, K. T., Petrie, B., Choi, J. S. und Leggett, W. C. (2005): Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science* 308, 1621–1623.
- Freeman, P. K., Keen, M. und Mani, M. (2003): *Dealing with Increased Risk of Natural Disasters: Challenges and Options*. Washington, DC: International Monetary Fund (IMF).
- Freeth, S. J. (1987): Life (and death) in Lake Nyos. *Nature* 329, 491.
- Freiwald, A., Fosså, J. H., Grehan, A., Koslow, T. und Roberts, J. M. (2004): *Cold-water Coral Reefs*. Cambridge, UK: UNEP-WCMC.
- Friends of the Earth (2005): *A Citizen's Guide to Climate Refugees*. Internet: <http://www.foe.org.au/download/CitizensGuide.pdf> (gelesen am 15. Februar 2006). Washington, DC: Friends of the Earth.
- Fujita, R., Bonzon, K., Wilen, J., Solow, A., Arnason, R., Cannon, J. und Polasky, S. (2004): Rationality or chaos? Global fisheries at the crossroads. In: Glover, L. K. und Earle, S. A. (Hrsg.): *Defying Ocean's End. An Agenda for Action*. Washington, DC: Island Press, 139–149.
- Gattuso, J.-P., Allemande, D. und Frankignoulle, M. (1999): Photosynthesis and calcification at cellular, organismal and community levels in coral reefs. A review of interactions and control by carbonate chemistry. *American Zoologist* 39, 160–183.
- GCIM – Global Commission on International Migration (2005): *Migration in an Interconnected World: New Directions for Action*. Genf: GCIM.
- GEF – Global Environment Facility (Hrsg.) (2005a): *Producing Results for the Global Environment. Annual Report 2004*. Washington, DC: GEF.
- GEF – Global Environment Facility (2005b): *GEF Global Action on Climate Change. GEF Support for Adaptation to Climate Change*. Washington, DC: GEF.
- Gell, F. R. und Roberts, C. M. (2003): Benefits beyond boundaries: the fishery effects of marine reserves. *TRENDS in Ecology and Evolution* 18 (9), 448–455.

- Gerber, L. R., Hyrenbach, K. D. und Zacharias, M. A. (2005): Do the largest protected areas conserve whales or whalers? *Science* 307, 525–526.
- GESAMP – Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (2001): *A Sea of Troubles*. The Hague: GESAMP.
- Gianni, M. und Simpson, W. (2005): *The Changing Nature of High Seas Fishing: How Flags of Convenience Provide Cover for Illegal, Unreported and Unregulated Fishing*. Sidney, London, Gland: Australian Department of Agriculture Fisheries and Forestry, International Transport Workers' Federation, WWF International.
- Gillett, N. P., Graf, H. F. und Osborn, T. J. (2003): Climate change and the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G. und Visbeck, M. (Hrsg.): *North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. Washington, DC: American Geophysical Union, 193–209.
- GLOBEC – Global Ocean Ecosystem Dynamics (1999): *Implementation Plan*. IGBP Report Nr. 47. GLOBEC Report Nr. 13. Stockholm: IGBP-Sekretariat.
- Gloor, M., Gruber, N., Sarmiento, J., Sabine, C. L., Feely, R. A. und Rödenbeck, C. (2003): A first estimate of present and preindustrial air-sea CO₂ flux patterns based on ocean interior carbon measurements and models. *Geophysical Research Letters* 30 (1), 10-11–10-14.
- Gommes, R., du Guerny, J., Nachtergaele, F. und Brinkman, R. (1998): *Potential Impacts of Sea-Level Rise on Population and Agriculture*. FAO SD-Dimensions. Internet: <http://www.fao.org/sd/eidirect/EIre0045.htm> (gelesen am 22. Februar 2006). Rom: FAO.
- Gorina-Ysern, M., Gjerde, K. und Orbach, M. (2004): Ocean governance: a new ethos through a World Ocean Public Trust. In: Glover, L. K., Earle, S. A. und Kelleher, G. (Hrsg.): *Defying Ocean's End. An Agenda for Action*. Washington, DC: Island Press, 197–212.
- Gornitz, V., Couch, S. und Hartig, E. K. (2002): Impacts of sea level rise in the New York City metropolitan area. *Global and Planetary Changes* 32, 61–88.
- Greenblatt, J. B. und Sarmiento, J. L. (2004): Variability and climate feedback mechanisms in ocean uptake of CO₂. In: Field, C. B. und Raupach, M. R. (Hrsg.): *SCOPE 62: The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*. Washington, DC: Island Press, 257–275.
- Gregg, W. W., Conkright, M. E., Ginoux, P., O'Reilly, J. E. und Casey, N. W. (2003): Ocean primary production and climate: global decadal changes. *Geophysical Research Letters* 30, 1809.
- Gregory, J. M., Huybrechts, P. und Raper, S. C. B. (2004): Threatened loss of the Greenland ice-sheet. *Nature* 428, 616.
- Grimsditch, G. D. und Salm, R. V. (2005): *Coral Reef Resilience and Resistance to Bleaching*. Gland: The World Conservation Union (IUCN).
- Gruber, N., Friedlingstein, P., Field, C. B., Valentini, R., Heimann, M., Richey, J. E., Romero Lankao, P., Schulze, E.-D. und Chen-Tung, A. C. (2004): The vulnerability of the carbon cycle in the 21st century: an assessment of carbon-climate-human interactions. In: Field, C. B. und Raupach, M. R. (Hrsg.): *The Global Carbon Cycle*. Washington, DC: Island Press, 45–77.
- Guinotte, J., Buddemeier, R. W. und Kleypas, J. (2003): Future coral reef habitat marginality: temporal and spatial effects of climate change in the Pacific basin. *Coral Reefs* 22, 551–558.
- Hadley Centre (2003): *Global Sea Ice Coverage and Sea Surface Temperature Data (1856–Present)*. Internet: <http://badc.nerc.ac.uk/data/gisst> (gelesen am 10. Februar 2006). Chilton, Oxfordshire: Meteorological Office – Hadley Centre.
- Hall, J. W., Meadowcroft, I. C., Lee, E. M. und van Gelder, P. H. A. J. M. (2002): Stochastic simulation of episodic soft coastal cliff recession. *Coastal Engineering* 46, 159–174.
- Hall, J. M., Sayers, P. B., Walkden, M. J. A. und Panzeri, M. (2005): Impacts of climate change on coastal flood risk in England and Wales: 2030–2100. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 69, 343–365.
- Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G. A. und Tausnev, N. (2005): Earth's energy imbalance: confirmation and implications. *Science* 308, 1431–1435.
- Hare, S. R. und Mantua, N. J. (2000): Empirical evidence for Northeast Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography* 47 (2-4), 99–102.
- Haugan, P. und Drange, S. (1996): Effects of CO₂ on the ocean environment. *Energy Conversion and Management* 37, 1019–1022.
- Hilborn, R. (2003): Marine reserves: the best option for our oceans? *Frontiers in Ecology and the Environment* 1 (9), 497–498.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999): Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine Freshwater Resources* 50, 839–866.
- Hoegh-Guldberg, O. (2005): Low coral cover in a high-CO₂ world. *Journal of Geophysical Research* 110, C09S06, doi:10.1029/2004JC002528.
- Hohmann, H. (2001): *Weltweiter Schutz der Meeresumwelt unter besonderer Berücksichtigung des Schutzes von Nord- und Ostsee (einschließlich des Wattenmeeres)*. In: *Gesellschaft für Umweltrecht (Hrsg.): Umweltrecht im Wandel*. Berlin: Erich Schmidt, 99–128.
- Hoyos, C. D., Agudelo, P. A., Webster, P. J. und Curry, J. A. (2006): Deconvolution of the factors contributing to the increase in global hurricane intensity. *Science* 312, 94–97.
- Hsieh, C.-H., Glaser, S. M., Lucas, A. J. und Sugihara, G. (2005): Distinguishing random environmental fluctuations from ecological catastrophes for the North Pacific Ocean. *Nature* 435, 336–340.
- Hughes, T. P., Baird, A. H., Bellwood, D. R., Card, M., Connolly, S. R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., Lough, J., Marshall, P., Nystrom, M., Palumbi, S. R., Pandolfi, J. M., Rosen, B. und Roughgarden, J. (2003): Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science* 301, 929–933.
- Huisman, J., Nga, N., Thi, P., Karl, D. M. und Sommeijer, B. (2006): Reduced mixing generates oscillations and chaos in the oceanic deep chlorophyll maximum. *Nature* 439, 322–325.
- Huntley, B., Green, R. E., Collingham, Y. C., Hill, J. K., Willis, S. G., Bartlein, P. J., Cramer, W., Hagemeyer, W. J. M. und Thomas, C. J. (2004): The performance of models relating species geographical distributions to climate is independent of trophic level. *Ecology Letters* 7, 417–426.
- IEA – International Energy Agency (2002): *CO₂ Emissions From Fuel Combustion 1971–2000*. Paris: IEA.
- IEA – International Energy Agency (2004): *Prospects for CO₂ Capture and Storage*. Paris: IEA.
- IEA – International Energy Agency (2005): *Legal Aspects of Storing CO₂*. Paris: IEA.
- IMBER – Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research (2005): *Science Plan and Implementation Strategy*. IGBP Report No. 52. Internet: http://www.jhu.edu/scor/IMBER/IMBER_SPIS_Final.pdf (gelesen am 3. Februar 2006). Stockholm: IGBP-Sekretariat.

- IMO – International Maritime Organization (2004): Report of the Twenty-Seventh Meeting of the Scientific Group. London: IMO.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1990): Potential Impacts of Climate Change. Report of Working Group II to IPCC. Genf: World Meteorological Organization (WMO) und United Nations Environment Programme (UNEP).
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001a): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001b): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2005): Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- ISciences (2003): SRTM30 Enhanced Global Map Data. Elevation/Slope/Aspect. Ann Arbor, MI: ISciences.
- IUCN – The World Conservation Union (1988): Resolution 17.38 of the 17th General Assembly of the IUCN. Gland, Cambridge: IUCN.
- IUCN – The World Conservation Union (1994): Guidelines for Protected Areas. Gland: IUCN.
- Jackson, J. B. C., Kirby, M. X., Berger, W. H., Bjorndal, K. A., Botsford, L. W., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R. G., Erlandson, J., Estes, J. A., Hughes, T. P., Kidwell, S., Lange, C. B., Lenihan, H. S., Pandolfi, J. M., Peterson, C. H., Steneck, R. S., Tegner, M. J. und Warner, R. R. (2001): Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science* 293, 629–638.
- Jensen, A. S. (1939): Concerning a change of climate during recent decades in the Arctic and Subarctic regions, from Greenland in the west to Eurasia in the east, and contemporary biological and geophysical changes. *Biologiske Meddelelser. Kongelige Danske Videnskabers Selskab XIV*, 75ff.
- Jesus, J. L. (2003): Rocks, new-born islands, sea level rise and maritime space. In: Frowein, J. A., Scharioth, K., Winkelmann, I. und Wolfrum, R. (Hrsg.): *Verhandeln für den Frieden. Negotiating for Peace. Liber Amicorum Tono Eitel*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 579–603.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J. J., Boyd, P. W., Duce, R. A., Hunter, K. A., Kawahata, H., Kubilay, N., LaRoche, J., Liss, P. S., Mahowald, N., Prospero, J. M., Ridgwell, A. J., Tegen, I. und Torres, R. (2005): Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science* 308, 67–71.
- Jimenez, J. A. und Sanchez-Arcilla, A. (1997): Physical impacts of climatic change on deltaic coastal systems (II): driving terms. *Climatic Change* 35, 95–118.
- Johannessen, O. M., Khvorostovsky, K., Miles, M. W. und Bobylev, L. P. (2005): Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland. *Science* 310, 1013–1016.
- Johnson, A. H. (2004): Brief des „Methane Hydrate Advisory Committee“ an das US-Energieministerium vom 22.11.2004. Washington, DC: Methane Hydrate Advisory Committee.
- Joughin, I., Abdalati, W. und Fahnestock, M. (2004): Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbrae glacier. *Nature* 432, 608–610.
- Kelleher, G. (Hrsg.) (1999): Guidelines for Marine Protected Areas. Best Practice Protected Area Guidelines Series No. 3. Gland: World Commission on Protected Areas of IUCN.
- Kellersmann, B. (2000): Die gemeinsame, aber differenzierte Verantwortlichkeit von Industriestaaten und Entwicklungsländern für den Schutz der globalen Umwelt. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- King, J. R. (2005): Report of the Study Group on Fisheries and Ecosystem Responses to Recent Regime Shifts. PICES Scientific Report No. 28. Sidney, BC, Kanada: North Pacific Marine Science Organization (PICES).
- Klauda, J. und Sandler, S. I. (2005): Global distribution of methane hydrate in ocean sediment. *Energy & Fuels* 19 (2), 459–470.
- Klein, R. J. T., Nicholls, R. J. und Mimura, N. (1999): Coastal adaptation to climate change: can the IPCC Technical Guidelines be applied? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 4 (3-4), 239–252.
- Klein, R. J. T., Nicholls, R. J. und Thomalla, F. (2002): The resilience of coastal megacities to weather-related hazards: a review. In: Kreimer, A., Arnold, M. und Carlin, A. (Hrsg.): *Proceedings of The Future of Disaster Risk: Building Safer Cities*. Washington, DC: World Bank, 111–137.
- Kleypas, J., Buddemeier, R. H., Archer, D., Gattuso, J.-P., Langdon, C. und Opdyke, B. N. (1999): Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* 284, 118–120.
- Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Eakin, C. M., Gattuso, J.-P., Guinotte, J., Hoegh-Guldberg, O., Iglesias-Prieto, R., Jokieli, P. L., Langdon, C., Skirving, W. und Strong, A. E. (2005): Comment on „Coral reef calcification and climate change: the effect of ocean warming“. *Geophysical Research Letters* 32, L08601.
- Kling, G. W., Clark, M. A., Compton, H. R., Devine, J. D., Evans, W. C., Humphrey, A. M., Koenigsberg, E. J., Lockwood, J. P., Tuttle, M. L. und Wagner, G. N. (1987): The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa. *Science* 236, 169–175.
- Klyashtorin, L. (2001): Climate change and long-term fluctuations of commercial catches. The possibility of forecasting. Rom: FAO.
- Knutson, T. R. und Tuleya, R. E. (2004): Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation. *Journal of Climatology* 17, 3477–3495.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2005a): Grünbuch über ein Programm für den Schutz kritischer Infrastrukturen. KOM(2005) 576 engültig. Brüssel: Europäische Gemeinschaft (EG).
- Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2005b): Thematische Strategie für den Schutz und die Erhaltung der Meeresumwelt. Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament. KOM(2005)504 engültig. SEC(2005)1290. Brüssel: Europäische Gemeinschaft (EG).
- Kropp, J., Eisenack, K. und Scheffran, J. (2005): Marine overexploitation: a syndrome of global change. In: Sonak, S. (Hrsg.): *Multiple Dimensions of Global Environmental Change*. New Delhi: Teri Press, im Druck.
- Kullenberg, G. (2001): Contributions of marine and coastal area research and observations towards sustainable development of large coastal cities. *Ocean & Coastal Management* 44, 283–291.
- Kundzewicz, Z. W. und Schellnhuber, H.-J. (2004): Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards* 31, 111–128.
- Lambeck, K., Anzidei, M., Antonioli, F., Benini, A. und Esposito, A. (2004): Sea level in Roman times in the central Mediterranean and implications for recent change. *Earth and Planetary Science Letters* 224, 563–575.

- Leatherman, S. P. (2001): *Sea Level Rise: History and Consequences*. San Diego: Academic Press.
- Lehodey, P., Chai, F. und Hampton, J. (2003): Modelling climate-related variability of tuna populations from a coupled ocean biogeochemical-populations dynamics model. *Fisheries Oceanography* 12, 483–494.
- Levermann, A., Griesel, A., Hofmann, M., Montoya, M. und Rahmstorf, S. (2005): Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 24 (4), 347–354.
- Levitus, S., Antonov, J. und Boyer, T. P. (2005): Warming of the world ocean, 1955–2003. *Geophysical Research Letters* 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Lindsay, R. W. und Zhang, J. (2005): The thinning of Arctic sea ice, 1988–2003: have we passed a tipping point? *Journal of Climate* 18, 4879–4894.
- Linnerooth-Bayer, J. und Mechler, R. (2005): The Potential Benefits and Limitations of Micro-Insurance as a Risk Transfer Mechanism for Developing Countries. Viewpoint for International Day for Disaster Reduction. Internet: <http://www.microinsurancecentre.org> (gelesen am 29. November 2005). MicroInsurance Centre.
- Lough, J. M. und Barnes, D. J. (2000): Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 245, 225–243.
- Lowe, J. A., Gregory, J. M. und Flather, R. A. (2001): Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models. *Climate Dynamics* 18, 179–188.
- Lubchenko, J., Palumbi, S. R., Gaines, S. D. und Andelman, S. J. (2003): Plugging a hole in the ocean: the emerging science of marine reserves. *Ecological Applications* 13 (1), S3–S7.
- MA – Millennium Ecosystem Assessment (2005a): *Ecosystems and Human Well-Being: Summary for Decision-Makers*. Washington, DC: Island Press.
- MA – Millennium Ecosystem Assessment (2005b): *Ecosystems and Human Well-Being. Volume I: Current State and Trends*. Washington, DC: Island Press.
- Mai, S., Elsner, A., Meyer, V. und Zimmermann, C. (2004): Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM): Teilprojekt 2 – Endbericht. Klimawandel und Küstenschutz. Hannover: Franzius Institut, Universität Hannover.
- Maslowski, W., Clement, J., Laxon, S. und Jakacki, J. (2005): The rate of change of the Arctic sea ice cover: 1979–2003 model results. *Geophysical Research Abstracts* 7, 10380.
- McMichael, A. J., Campbell-Lendrum, D., Kovats, S., Edwards, S., Wilkinson, P., Wilson, T., Nicholls, R. J., Hales, S., Tanser, F., Le Sueur, D., Schlesinger, M. und Andronova, N. (2004): Climate change. In: Ezzati, M., Lopez, A. D., Rodgers, A. und Murray, C. J. L. (Hrsg.): *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease due to Selected Major Risk Factors*. Genf: World Health Organisation (WHO), 1543–1649.
- McNeil, B. I., Matera, R. J. und Barnes, D. J. (2004): Coral reef calcification and climate change: the effect of ocean warming. *Geophysical Research Letters* 31, L22309, doi:10.1029/2004GL021541.
- Meier, H. E. M., Döscher, R. und Halkka, A. (2004): Simulated distributions of Baltic sea-ice in warming climate and consequences for the winter habitat of the Baltic ringed seal. *Ambio* 33 (4-5), 249–256.
- Meinshausen, M. (2006): What does a 2°C target mean for greenhouse gas concentrations? A brief analysis based on multi-gas emission pathways and several climate sensitivity uncertainty estimates. In: Schellnhuber, H.-J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley, T. und Yohe, G. (Hrsg.): *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 265–279.
- Met Office (2006): *Catarina Hits Brazil. South Atlantic Hurricane Breaks all the Rules*. Internet: <http://www.metoffice.com/sec2/sec2cyclone/atarina.html> (gelesen am 14. Februar 2006). Exeter, Devon, UK: Met Office.
- Methane Hydrate Advisory Committee (2002): *Report of the Methane Hydrate Advisory Committee on Methane Hydrate Issues and Opportunities – Including Assessment of Uncertainty of the Impact of Methane Hydrate on Global Climate Change, Dezember 2002*. Internet: http://www.fe.doe.gov/programs/oilgas/hydrates/Methane_Hydrates_Advisory_Committee.html (gelesen am 24. Februar 2006). Washington, DC: U.S. Department of Energy (DOE).
- MH21 – Research Consortium for Methane Hydrate Resources in Japan (2005): *Background and Organization*. Internet: <http://www.mh21japan.gr.jp/english/mh21-2.html> (gelesen am 15. Februar 2006). Chiba: MH21.
- Mignot, J. A., Ganopolski, A. und Levermann, A. (eingereicht): Atlantic subsurface temperature response to a shut-down of the overturning circulation. *Journal of Climate*.
- Milazzo, M. (1998): *Subsidies in World Fisheries – A Reexamination*. World Bank Technical Paper 406. Fisheries Series. Washington, DC: World Bank.
- Milkov, A. V. (2004): Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? *Earth-Science Reviews* 66 (3-4), 183–197.
- Mirza, M. M. Q., Warrick, R. A. und Ericksen, N. J. (2003): The implications of climate change on floods of the Ganges, Brahmaputra und Meghna rivers in Bangladesh. *Climatic Change* 57, 287–318.
- Monnett, C., Gleason, J. und Rotterman, L. (2005): Bericht auf der 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals. San Diego, USA: Konferenzsekretariat.
- Montaggioni, L. F. (2005): History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: development patterns and controlling factors. *Earth-Science Reviews* 71, 1–75.
- Morling, P. (2004): The economics of marine protected areas in the High Seas. *The George Wright Forum* 21 (4), 49–61.
- MPI für Meteorologie (2005): *Klimawandel so rasant wie noch nie*. Pressemitteilung Nr. B62/C29/2005(146) vom 29.9.2005. Hamburg: MPI für Meteorologie.
- Mumby, P. J., Dahlgren, C. P., Harborne, A. R., Kappel, C. V., Micheli, F., Brumbaugh, D. R., Holmes, C. E., Mendes, J. M., Broad, K., Sanchirico, J. N., Buch, K., Box, S., Stoffle, R. W. und Gill, A. B. (2006): Fishing, trophic cascades, and the process of grazing on coral reefs. *Science* 311, 98–101.
- Murray, S. N., Ambrose, R. F., Bohnsack, J. A., Botsford, L. W., Carr, M. H., Davis, G. E., Dayton, P. K., Gotshall, D., Gunderson, D. R., Hixon, M. A., Lubchenko, J., Mangel, M., MacCall, A., McArdle, D. A., Ogden, J. C., Roughgarden, J., Starr, R. M., Tegner, M. J. und Yoklavich, M. M. (1999): No-take reserve networks: sustaining fisheries populations and marine ecosystems. *Fisheries* 24 (1), 11–25.
- Münchener Rück (1997): *Überschwemmung und Versicherung*. Internet: <http://www.munichre.com> (gelesen am 16. März 2006). München: Münchener Rück.
- Münchener Rück (2005a): *Wetterkatastrophen und Klimawandel. Sind wir noch zu retten?* München: Münchener Rück.
- Münchener Rück (2005b): *Mikroversicherung wichtige Einrichtung zur Armutsbekämpfung*. Internet: <http://www.epo.de> (gelesen am 29. November 2005). München: Münchener Rück Stiftung.

- NASA – National Aeronautics and Space Administration (2005): Arctic Sea Ice Continues to Decline, Arctic Temperatures Continue to Rise in 2005. Internet: http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/arcticice_decline.html (gelesen am 13. März 2006). Washington, DC: NASA Headquarters.
- Nicholls, R. J. (1995): Coastal megacities and climate change. *GeoJournal* 37 (3), 369–379.
- Nicholls, J. R. (2003): Case Study on Sea-Level Rise Impacts. OECD Workshop on the Benefits of Climate Policy: Improving Information for Policy Makers. Dokument ENV/EPOC/GSP(2003)9/FINAL. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD).
- Nicholls, R. J. (2004): Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14, 69–86.
- Nicholls, R. J., Tol, R. S. J. und Vafeidis, A. T. (2005): Global Estimates of the Impact of a Collapse of the West Antarctic Ice Sheet: An Application of FUND. Working Paper FNU-78. Hamburg: Universität Hamburg, Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften.
- Nicholls, R. J., Townend, I. und Cooper, N. (2006): Coastal engineering and management. In: Thorne, C. R., Evans, E. P. und Penning-Rowsell, E. C. (Hrsg.): *Future Flood and Coastal Erosion Risks in the UK*. London: Thomas Telford.
- NOAA-ESRL – Global Monitoring Division (2006): Interactive Atmospheric Data Visualization. Mauna Loa, Hawaii, United States. Internet: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/> (gelesen am 20. März 2006). Boulder, CO: NOAA.
- NODC – National Oceanographic Data Center (2001): *World Ocean Database 2001*. Silver Spring, MD: NODC.
- Nosengo, N. (2003): Save our city! *Nature* 424, 608–609.
- NRC – National Research Council (2001): *Marine Protected Areas: Tools for Sustaining Ocean Ecosystems*. Committee on the Evaluation, Design, and Monitoring of Marine Reserves and Protected Areas in the United States, Ocean Studies Board, National Research Council. Washington, DC: NRC.
- NSIDC – National Snow and Ice Data Center (2002): Larsen B Ice Shelf Collapses in Antarctica. Internet: <http://nsidc.org/iceshelves/larsenb2002/> (gelesen am 24. Januar 2006). Boulder, CO: NSIDC.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2002): *Aid Targeting the Objectives of the Rio Conventions 1998–2000. A Contribution by the DAC Secretariat for the Information of Participants at the World Summit for Sustainable Development in Johannesburg in August 2002*. Paris: OECD.
- Oppenheimer, M. und Alley, R. B. (2004): The West Antarctic ice sheet and long term climate policy – An editorial comment. *Climatic Change* 64 (1–2), 1–10.
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R. M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R. G., Plattner, G.-K., Rodgers, K. B., Sabine, C. L., Sarmiento, J. L., Schlitzer, R., Slater, R. D., Totterdell, I. J., Weirig, M.-F., Yamanaka, Y. und Yool, A. (2005): Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681–686.
- OSPAR – Oslo Paris Commission (2003): *Joint Ministerial Meeting of the Helsinki and OSPAR Commissions (JMM), Bremen 25–26 June 2003. Declaration of the Joint Ministerial Meeting of the Helsinki and OSPAR Commissions*. Bremen: OSPAR.
- Palumbi, S. R. (2003): *Marine Reserves: A Tool for Ecosystem Management and Conservation*. Washington, DC: Pew Oceans Commission.
- Pandolfi, J. M., Bradbury, R. H., Sala, E., Hughes, T. P., Bjorndal, K. A., Cooke, R. G., McArdle, D., McClenachan, L., Newman, M. J. H., Paredes, G., Warner, R. R. und Jackson, J. B. C. (2003): Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science* 301, 955–958.
- Parker, D. E., Folland, C. K. und Jackson, M. (1995): Marine surface temperature: observed variations and data requirements. *Climate Change* 31, 559–600.
- Parmesan, C. und Yohe, G. (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421, 37–42.
- Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D. H., Holloway, T. und Foley, J. A. (2005): Impact of regional climate change on human health. *Nature* 438, 310–317.
- Pauly, D., Christensen, V., Guenette, S., Pitcher, T. J., Sumaila, U. R., Walters, C. J., Watson, R. und Zeller, D. (2002): Towards sustainability in world fisheries. *Nature* 418, 689–695.
- Peltier, W. R. (2004): Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ice-5G (VM2) model and grace. *Annual Review Of Earth And Planetary Sciences* 32, 111–149.
- Perry, A. L., Low, P. J., Ellis, J. R. und Reynolds, J. D. (2005): Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308, 1912–1915.
- PICES – North Pacific Marine Science Organization (2004): *Marine Ecosystems of the North Pacific*. PICES Scientific Report No. 1. Sidney, Kanada: PICES.
- Pikitch, E. K., Santora, C., Babcock, E. A., Bakun, A., Bonfil, R., Conover, D. O., Dayton, P. K., Doukakis, P., Fluharty, D. L., Heneman, B., Houde, E. D., Link, J., Livingston, P. A., Mangel, M., McAllister, M. K., Pope, J. und Sainsbury, K. J. (2004): Ecosystem-based fishery management. *Science* 305, 346–347.
- Platzöder, R. (2001): The United Nations Convention on the Law of the Sea and Marine Protected Areas on the High Seas. In: Thiel, H. und Koslow, J. A. (Hrsg.): *Managing Risks to Biodiversity and the Environment on the High Sea, Including Tools Such as Marine Protected Areas – Scientific Requirements and Legal Aspects*. Bonn: German Federal Agency for Nature Conservation, 137–142.
- Ploetz, C. (2003): Sequestrierung von CO₂: Technologien, Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen. Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_ex07.pdf. Berlin: WBGU.
- Polovina, J. J. (2005): Climate variation, regime shifts, and implications for sustainable fisheries. *Bulletin of Marine Science* 76 (2), 233–244.
- Pörtner, O. H., Langenbuch, M. und Reipschläger, A. (2004): Biological impact of elevated ocean CO₂ concentrations: lessons from animal physiology and Earth history. *Journal of Oceanography* 60, 705–718.
- Pörtner, H. O. (2005): Auswirkungen von CO₂-Eintrag und Temperaturerhöhung auf die marine Biosphäre. Externe Expertise für das WBGU-Sondergutachten „Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“. Internet: http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006_ex04.pdf. Berlin: WBGU.
- Proelß, A. (2004): *Meeresschutz im Völker- und Europarecht. Das Beispiel des Nordostatlantiks*. Berlin: Duncker & Humblot.
- Rahmstorf, S. (2000): The thermohaline ocean circulation: a system with dangerous thresholds? An editorial comment. *Climatic Change* 46, 247–256.

- Rahmstorf, S. (2002): Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 207–214.
- Raper, S. C. B. und Braithwaite, R. J. (2006): Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature* 439, 311–313.
- Raven, J., Caldeira, K., Elderfield, H., Hoegh-Guldberg, O., Liss, P. S., Riebesell, U., Shepherd, J., Turley, C. und Watson, A. J. (2005): Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. Policy Document 12/05. London: The Royal Society.
- Ray, P. K. (2005): Quantitative assessment of marine gas hydrates underway at mms. *The National Energy Technology Laboratory Methane Hydrate Newsletter (Winter)*, 5–7.
- Reaka-Kudla, M. L. (1997): The global biodiversity of coral reefs: a comparison with rainforests. In: Reaka-Kudla, M. L., Wilson, D. E. und Wilson, E. O. (Hrsg.): *Biodiversity II: Understanding and Protecting Our Natural Resources*. Washington, DC: Joseph Henry/National Academy Press, 83–108.
- Reid, P. C., Holliday, N. P. und Smyth, T. J. (2001): Pulses in the eastern margin current and warmer water off the north west European shelf linked to North Sea ecosystem changes. *Marine Ecology Progress Series* 215, 283–287.
- Richardson, A. J. und Schoeman, D. S. (2004): Climate impact on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. *Science* 305, 1609–1612.
- Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P. D., Zeebe, R. E. und Morel, F. F. M. (2000): Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature* 407, 364–367.
- Riebesell, U. (2004): Effects of CO₂ enrichment on marine phytoplankton. *Journal of Oceanography* 60, 719–729.
- Rignot, E. und Jacobs, S. (2002): Rapid bottom melting widespread near Antarctic ice sheet grounding lines. *Science* 296, 2020–2023.
- Rignot, E., Vaughan, D. G., Schmeltz, M., Dupont, T. und MacAyeal, D. (2002): Acceleration of Pine Island and Thwaites Glaciers, West Antarctica. *Annals Of Glaciology* 34, 189–194.
- Rignot, E., Casassa, G., Gogineni, P., Krabill, W., Rivera, A. und Thomas, R. (2004): Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. *Geophysical Research Letters* 31, L18401, doi:10.1029/2004GL020697.
- Rignot, E. und Kanagaratnam, P. (2006): Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science* 311, 986–990.
- Rodrigues, A. S. L., Andelman, S. J., Bakarr, M. I., Boitani, L., Brooks, T. M., Cowling, R. M., Fishpool, L. D. C., da Fonseca, G. A. B., Gaston, K. J., Hoffman, M., Long, J. S., Marquet, P. A., Pilgrim, J. D., Pressey, R. L., Schipper, J., Sechrest, W., Stuart, S. N., Underhill, L. G., Waller, R. W., Watts, M. E. J. und Yan, X. (2004): Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity. *Nature* 428, 641–643.
- Rogner, H.-H. (1997): An assessment of world hydrocarbon resources. *Annual Review of Energy and the Environment* 22, 217–262.
- Rosenzweig, C. und Solecki, W. D. (Hrsg.) (2001): *Climate Change and a Global City: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. Metro East Coast. Report for the U.S. Global Change Research Program. National Assessment of the Potential Consequences of Climate Variability and Change for the United States. New York: Columbia Earth Institute.
- Rost, B. und Sültemeyer, D. (2003): Carbon acquisition of bloom-forming marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography* 48 (1), 55–67.
- Rothrock, D. D., Yu, Y. und Maykut, G. A. (1999): Thinning of the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters* 26, 3469–3472.
- Rowan, B. (2004): Thermal adaptation in reef coral symbionts. *Nature* 430, 742.
- Royal Commission on Environmental Pollution (2004): *Turning the Tide: Addressing the Impact of Fisheries on the Marine Environment*. Twenty-fifth Report. London: Royal Commission on Environmental Pollution.
- Ruddiman, W. F. (2000): *Earth's Climate: Past and Future*. New York: Freeman.
- Sabine, C. S., Heimann, M., Artaxo, P., Bakker, C.-T., Chen, A., Field, C. B., Gruber, N., LeQuere, C., Prinn, R. G., Richey, J. E., Romero-Lankao, Sathaye, P. J. und Valentini, R. (2003): Current status and past trends of the carbon cycle. In: Field, C. B. und Raupach, M. R. (Hrsg.): *Toward CO₂ Stabilization: Issues, Strategies, and Consequences*. Washington, DC: Island Press, 17–44.
- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., Wanninkhof, R., Wong, C. S., Wallace, D. W. R., Tilbrook, B., Millero, F. J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T. und Rios, A. F. (2004): The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305, 367–371.
- Sands, P. (2003): *Principles of International Environmental Law*. Second Edition. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Sarmiento, J. L., Gruber, N., Brzezinski, M. A. und Dunne, J. P. (2003): High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature* 427, 56–60.
- Sarmiento, J. L., Slater, R., Barber, R., Bopp, L., Doney, S. C., Hirst, A. C., Kleypas, J., Matear, R., Mikolajewicz, U., Monfray, P., Soldatov, V., Spall, S. A. und Stouffer, R. J. (2004): Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochemical Cycles* 18, GB3003, doi:10.29/2003GB002134.
- Sauter, E. J., Muyakshin, S. I., Charlou, J.-L., Schlüter, M., Boettius, A., Jerosch, K., Damm, E., Foucher, J.-P. und Klages, M. (2006): Methane discharge from a deep-sea submarine mud volcano into the upper water column by gas hydrate-coated methane bubbles. *Earth and Planetary Science Letters* 243 (3-4), 354–365.
- Scambos, T. A., Bohlander, J. A., Shuman, C. A. und Skvarca, P. (2004): Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. *Geophysical Research Letters* 31 (18), L18402.
- Schallenberg, M., Hall, C. J. und Burns, C. W. (2003): Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Marine Ecology Progress Series* 251, 181–189.
- Scharroo, R., Smith, W. H. F. und Lillibridge, J. F. (2005): Satellite altimetry and the intensification of Hurricane Katrina. *Eos* 86, 366–367.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folkes, C. und Walker, B. H. (2001): Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413, 591–596.
- Schelling, T. C. (1992): Some economics of global warming. *American Economic Review* 82 (1), 1–14.
- Schellnhuber, H. J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley, T. und Yohe, G. (2006): *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Schindler, J. und Zittel, W. (2000a): Fossile Energiereserven (nur Erdöl und Erdgas) und mögliche Versorgungsempässe aus Europäischer Perspektive. Endbericht. Ottobrunn: LB-Systemtechnik GmbH.
- Schindler, J. und Zittel, W. (2000b): Öffentliche Anhörung von Sachverständigen (17.10.2000) durch die Enquête-Kommis-

- sion des Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ zum Thema „Weltweite Entwicklung der Energienachfrage und der Ressourcenverfügbarkeit“. Schriftliche Stellungnahme zu ausgewählten Fragen der Kommission. Ottobrunn: LB-Systemtechnik GmbH.
- Schlesinger, W. H. (1997): Biogeochemistry. An Analysis of Global Change. San Diego, London, Boston: Academic Press.
- Schmittner, A. (2005): Decline of the marine ecosystem caused by a reduction in the Atlantic overturning circulation. *Nature* 434, 628–633.
- Schwartz, P. und Randall, D. (2003): An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security. A report commissioned by the U.S. Defense Department. Internet: http://www.ems.org/climate/pentagon_climatechange.pdf (gelesen am 13. Februar 2006). Washington, DC: Pentagon.
- Sea Wind Europe (2003): A Realistic Vision for the Development of Offshore Wind Power to 2020. Studie von Garrad Hassan und anderen im Auftrag von Greenpeace International. Internet: <http://www.greenpeace.org/raw/content/usa/press/reports/sea-wind-europe.pdf> (gelesen am 8. März 2006). Amsterdam: Greenpeace International.
- SEEDS – Sustainable Environment & Ecological Development Society (2005): Strengthening the Resilience of Local Community in Coastal Areas to Water Related Natural Disasters. Integrating Risk Reduction in Recovery. New Delhi: SEEDS.
- Shah, T., Molden, D., Sakthivadivel, R. und Seckler, D. (2000): The Global Groundwater Situation: Overview of Opportunities and Challenges. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Sherif, M. M. und Singh, V. P. (1999): Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Processes* 13, 1277–1287.
- Shirayama, Y. und Thornton, H. (2005): Effect of increased atmospheric CO₂ on shallow water marine benthos. *Journal of Geophysical Research* 110, C09S08.
- Siddique, A. K., Baqui, A. H., Eusof, A. und Zaman, K. (1991): 1988 floods in Bangladesh – pattern of illness and causes of death. *Journal of Diarrhoeal Diseases Research* 9 (4), 310–314.
- Siegfriedsen, S., Lehnhoff, M. und Prehn, A. (2003): Primary markets for offshore wind energy outside the European Union. *Wind Engineering* 27 (5), 419–430.
- Skjoldal, H. R. (Hrsg.) (2004): The Norwegian Sea Ecosystem. Trondheim: Tapir Academic Press.
- Skjoldal, H. R. und Sætre, R. (2004): Climate and ecosystem variability. In: Skjoldal, H. R. (Hrsg.): The Norwegian Sea Ecosystem. Trondheim: Tapir Academic Press, 507–534.
- Slade, N. T. (2001): Environmental concerns of small islands. *Environmental Policy and Law* 31 (3), 157–158.
- Small, C. und Nicholls, R. J. (2003): A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research* 19, 584–599.
- Smetacek, V. und Nicol, S. (2005): Polar ocean ecosystems in a changing world. *Nature* 437, 362–368.
- Smith, J. B. und Lazo, J. K. (2001): A summary of climate change impact assessments from the US Country Studies Programme. *Climatic Change* 50, 1–29.
- Smith, D. E., Shi, S., Brooks, C. L., Cullingford, R. A., Dawson, A. G., Dawson, S., Firth, C. R., Foster, I. D. L., Fretwell, P. T., Haggart, B. A., Holloway, L. K. und Long, D. (2004): The holocene storegga slide Tsunami in the United Kingdom. *Quaternary Science Reviews* 23 (23-24), 2291–2321.
- Snedaker, S., Meeder, J., Ross, M. und Ford, R. (1994): Discussion of Ellison, Joanna C. and Stoddart, David R., 1991: Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: holocene analogues and implications. *Journal of Coastal Research* 10 (2), 497–498.
- SOLAS – Surface-Ocean Lower-Atmosphere Study (2004): Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report 50. Stockholm: IGBP-Sekretariat.
- Soto, C. G. (2002): The potential impacts of global climate change on marine protected areas. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 11, 181–195.
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen (2004): Meeresumweltschutz für Nord- und Ostsee. Sondergutachten. Berlin: SRU.
- Stanley, D. J. und Warne, A. G. (1998): Nile delta in its destruction phase. *Journal of Coastal Research* 14 (3), 794–825.
- Statoil (2005): CO₂ Capture and Underground Storage. Vortrag von Herrn Olav Kaarstad, gehalten für den WBGU in Stavanger, Norwegen, am 12.10.2005. Stavanger: Statoil.
- Steele, J. H. (1998): Regime shifts in marine ecosystems. *Ecological Applications* 8 (1 Supplement), S33–S36.
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P. D., Jäger, J., Matson, P. A., Moore III, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.-J., Turner II, B. L. und Wasson, R. J. (2004): Global Change and the Earth System. A Planet Under Pressure. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Steffen, K. und Huff, R. (2005): Greenland Melt Extent 2005. Internet: <http://cires.colorado.edu/science/groups/steffen/greenland/melt2005/> (gelesen am 8. März 2006). Boulder, CO: Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES).
- Stive, M. J. F. (2004): How important is global warming for coastal erosion? *Climatic Change* 64, 27–39.
- Stommel, H. (1961): Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus* 13, 224–230.
- Stone, C. D. (2004): Common but differentiated responsibilities in international law. *American Journal of International Law* 98, 276–302.
- Stone, D. A. und Allen, M. R. (2005): The end-to-end attribution problem: from emissions to impacts. *Climatic Change* 71, 303–318.
- Strong, A. E., Kearns, E. J. und Gjovig, K. K. (2000): Sea surface temperature signals from satellites: an update. *Geophysical Research Letters* 27, 1667–1670.
- SwissRe – Schweizerische Rückversicherungs-Gesellschaft (1998): Überschwemmungen: Ein versicherbares Risiko? Internet: [http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLU/WWIN-4V2BKW/\\$FILE/floods.Paras.002.File.pdf](http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLU/WWIN-4V2BKW/$FILE/floods.Paras.002.File.pdf) (gelesen am 8. März 2006). Zürich: SwissRe.
- Tamburri, M. N., Peltzer, E. T., Friederich, G. E., Aya, I., Yamane, K. und Brewer, P. G. (2000): A field study of the effects of CO₂ ocean disposal on mobile deep-sea animals. *Marine Chemistry* 72, 95–101.
- Titus, J. G. (1990): Greenhouse effect, sea level rise, and land use. *Land Use Policy* 7 (2), 138–153.
- Titus, J. G., Park, R. A., Leatherman, S. P., Weggel, J. R., Greene, M. S., Mausel, P. W., Brown, S., Gaunt, G., Trehan, M. und Yohe, G. (1991): Greenhouse effect and sea level rise: the cost of holding back the sea. *Coastal Management* 19, 171–204.
- Turley, C., Blackford, J. C., Widdicombe, S., Lowe, D., Nightingale, P. D. und Rees, A. P. (2006): Reviewing the impact of increased atmospheric CO₂ on oceanic pH and the marine ecosystem. In: Schellnhuber, H. J., Cramer, W., Nakicenovic, N., Wigley, T. und Yohe, G. (Hrsg.): Avoiding Dangerous Cli-

- mate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 65–70.
- Turner, R. K., Subak, S. und Adger, W. N. (1996): Pressures, trends, and impacts in coastal zones: interactions between socioeconomic and natural systems. *Environmental Management* 20 (2), 159–173.
- Tyler, P. A. (2003): Disposal in the deep sea: analogue of nature or faux ami? *Environmental Conservation* 30, 26–39.
- Tyrell, T., Holligan, P. M. und Mobley, C. D. (1999): Optical impacts of oceanic coccolithophore blooms. *Journal of Geophysical Research* 104 (C2), 3223–3241.
- UN – United Nations (Hrsg.) (2004): *Human Settlements on the Coast*. UN Atlas of the Oceans. New York: UN.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2002): *GEO – Global Environment Outlook 3. Past, Present and Future Perspectives*. London: Earthscan.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2005): *Pacific Island Villagers First Climate Change „Refugees“*. UNEP News Release. Nairobi: UNEP.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (1972): *Übereinkommen zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt*. Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft, Kultur und Kommunikation. Deutsche Übersetzung aus dem Bundesgesetzblatt, Jahrgang 1977, Teil II, Nr. 10. Internet: http://www.unesco.de/c_bibliothek/info-welterbekonvention.pdf (gelesen am 8. März 2006). Paris, New York: UNESCO.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (2006): *World Heritage List. Results by Country*. Internet: <http://whc.unesco.org/en/list/> (gelesen am 27. März 2006). Paris, New York: UNESCO.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (1992): *Framework Convention on Climate Change*. New York: United Nations (UN).
- UNGA – United Nations General Assembly (2004): *Oceans and the Law of the Sea*. UNGA-Resolution 59/24. New York: United Nations (UN).
- UN ISDR – United Nations Interagency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (2005a): *International Strategy for Disaster Reduction. Draft Resolution Submitted by the Vice-Chairman of the Committee, Mr. Stefano Toscano (Switzerland), on the Basis of Informal Consultations Held on Draft Resolution A/C.2/60/L.25*. Genf: UN ISDR.
- UN ISDR – United Nations Interagency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (2005b): *Natural Disasters and Vulnerability. Draft Resolution Submitted by the Vice-Chairman of the Committee, Mr. Stefano Toscano (Switzerland), on the Basis of Informal Consultations Held on Draft Resolution A/C.2/60/L.27*. Genf: UN ISDR.
- UN ISDR – United Nations Interagency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction (2005c): *Progress Report: Worldwide Survey of Early Warning Systems. A Briefing Prepared for the EOSG by the ISDR Secretariat, 31 July 2005*. Genf: UN ISDR.
- Velicogna, I. und Wahr, J. (eingereicht): *Measurements of time-variable gravity show mass loss in Antarctica*. Science.
- Veron, J. E. N. (1986): *Corals of Austrakia and the Indo-Pacific*. London, Sidney: Angus and Robertson.
- Viridin, J. und Schorr, J. (2001): *Hard Facts, Hidden Problems: A Review of Current Data on Fishing Subsidies*. Brüssel: World Wildlife Fund.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J. C., McManus, J. F., Lambeck, K., Ballbon, E. und Labracherie, M. (2002): *Sea-level and deep water temperature changes derived from benthonic foraminifera isotopic records*. *Quaternary Science Reviews* 21, 295–305.
- Walsh, N. P. (2003): *St Petersburg races to halt floods*. St. Petersburg: The Guardian (29.07.2003).
- Warner, R. (2001): *Marine protected areas beyond national jurisdiction: existing legal principles and a future international framework*. In: Haward, M. (Hrsg.): *Integrated Oceans Management: Issues in Implementing Australia's Oceans Policy*. Hobart: Cooperative Research Centre for Antarctica and the Southern Ocean, 55–76.
- Watson, A. J. und Orr, J. C. (2003): *Carbon dioxide fluxes in the global ocean*. In: Fasham, M. J. R. (Hrsg.): *Ocean Biogeochemistry. The IGBP Series*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 123–143.
- Wavenet (2003): *Results from the Work of the European Thematic Network on Wave Energy*. Internet: [http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet_FullReport\(11.1\).pdf](http://www.wave-energy.net/Library/WaveNet_FullReport(11.1).pdf) (gelesen am 27. Mai 2005). Brüssel: Wavenet – European Wave Energy Thematic Network.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1995): *Szenario zur Ableitung globaler CO₂-Reduktionsziele und Umsetzungsstrategien. Stellungnahme zur 1. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Berlin*. Sondergutachten. Bremerhaven: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2000): *Welt im Wandel: Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre. Hauptgutachten 1999*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2002): *Entgelte für die Nutzung globaler Gemeinschaftsgüter*. Sondergutachten. Berlin: WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2003a): *Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Hauptgutachten 2003*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2003b): *Über Kioto hinaus denken – Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert*. Sondergutachten. Berlin: WBGU.
- WCDR – World Conference on Disaster Reduction (2005): *Hyogo Framework for Action 2005–2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*. Extract From the Final Report of the World Conference on Disaster Reduction (Dokument A/CONF.206/6). Kioto: International Strategy for Disaster Reduction (ISDR).
- Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A. und Chang, H.-R. (2005): *Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment*. *Science* 309, 1844–1846.
- WHO – World Health Organisation (2002): *Flooding: Health Effects and Preventive Measures*. Fact Sheet 05/02. Kopenhagen, Rom: WHO.
- Wilkinson, C. (2004): *Status of Coral Reefs of the World 2004*. Townsville: Australian Institute of Marine Sciences.
- Willis, J. K., Roemmich, D. und Cornuelle, B. (2004): *Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermocline expansion on global scales*. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 109, C12036, doi:10.1029/2003JC002260.
- Winguth, A., Mikolajewicz, U., Gröger, M., Maier-Reimer, E., Schurgers, G. und Vizcaino, M. (2005): *Centennial-scale interactions between the carbon cycle and anthropogenic climate change using a dynamic Earth system model*. *Geophysical Research Letters* 32, doi:10.1029/2005GL023681.

- Wolfrum, R. (2000): International environmental law: purposes, principles and means of ensuring compliance. In: Morrison, F. L. und Wolfrum, R. (Hrsg.): *International, Regional and National Environmental Law*. Den Haag, London, Boston: Kluwer Law International, 3–70.
- Wood, L. J., Fish, L., Laughren, J. und Pauly, D. (2005): A Global Review Of Marine Protected Areas. Abstract for the First International Marine Protected Areas Congress (Geelong, Australien 23.–28. Oktober 2005).
- Woodroffe, C. D., Nicholls, R. J., Saito, Y., Chen, Z. und Goodbred, S. L. (2006): Landscape variability and the response of Asian megadeltas to environmental change. In: Harvey, N. (Hrsg.): *Global Change Implications for Coasts in the Asia-Pacific Region*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- World Bank (Hrsg.) (2004): *Saving Fish and Fishers. Toward Sustainable and Equitable Governance of the Global Fishing Sector*. Washington, DC: World Bank.
- Worm, B. und Myers, R. A. (2003): Meta-analysis of cod–shrimp interactions reveals top-down control in oceanic food webs. *Ecology* 84 (1), 162–173.
- Worm, B. und Myers, R. A. (2004): Managing fisheries in a changing climate. *Nature* 429, 15.
- WPC – World Parks Congress (2003a): *Recommendations of the Vth IUCN World Parks Congress*. 8–17 September 2003, Durban. Gland: The World Conservation Union (IUCN).
- WPC – World Parks Congress (2003b): *Message of the Vth IUCN World Parks Congress to the Convention on Biological Diversity*. Gland: The World Conservation Union (IUCN).
- WRI – World Resources Institute (2001): *Pilot Analysis of Global Ecosystems. Coastal Ecosystems*. Washington DC: WRI.
- WSSD – World Summit on Sustainable Development (2002): *Plan of Implementation*. Johannesburg, New York: WSSD.
- Yeung, Y. (2001): Coastal mega-cities in Asia: transformation, sustainability and management. *Ocean & Coastal Management* 44, 319–333.
- Yohe, G., Neumann, J. und Marshall, P. (1999): The economic damage induced by sea-level rise in the United States. In: Mendelsohn, R. und Neumann, J. E. (Hrsg.): *The Impact of Climate Change on the United States Economy*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 178–208.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. und Billups, K. (2001): Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 ma to present. *Science* 292, 686–693.
- Zhang, K., Douglas, B. C. und Leatherman, S. P. (2004): Global warming and coastal erosion. *Climatic Change* 64, 41–58.
- Zickfeld, K., Levermann, A., Keith, D. W., Kuhlbrodt, T., Morgan, M. G. und Rahmstorf, S. (eingereicht): Experts' view on risk of future ocean circulation changes. *Climatic Change*.
- Zondervan, I., Zeebe, R. E., Rost, B. und Riebesell, U. (2001): Decreasing marine biogenic calcification: a negative feedback on rising atmospheric CO₂. *Global Biogeochemical Cycles* 15 (2), 507–516.
- Zwally, H. J., Abdalati, W., Herring, T., Larson, K., Saba, J. und Steffen, K. (2002): Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow. *Science* 297, 218–222.
- Zwally, H. J. G., Mario, B., Jun, L., Cornejo, H. G., Beckley, M. A., Brenner, A. C., Saba, J. L. und Donghui, Y. (2005): Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992–2002. *Journal of Glaciology* 51 (175), 509–527.

