

Klimawandel und mögliche Auswirkungen auf die deutsche Nordseeküste

*Horst Sterr
Institut für Chemie und Biologie des Meeres
Universität Oldenburg*

1. Klimaprognosen - Klimaszenarien

Als Klima bezeichnet man die längerfristige Zusammenfassung von Temperatur-, Wind- und Niederschlagsverhältnissen, d.h. Wetterereignissen, an einem Ort. In der Ausprägung der atmosphärischen Zustände spielen aber auch eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse auf dem Festland und in den Ozeanen, wie z.B. Verwitterung, Photosynthese oder Wärmetransport durch Meereströmungen, eine entscheidende Rolle. Wegen der Unmenge von möglichen „Wechselwirkungen und Rückkopplungen im System Boden - Wasser - Luft“ ist ein exaktes Verständnis des Klimas äußerst schwierig. Um die Effekte, die durch Änderungen eines der Antriebsparameter (etwa der Durchmischung der oberen Wasserschichten in den Ozeanen) hervorgerufen werden können, im Computermodell über 50 bis 100 Jahre zu simulieren, benötigen die leistungsfähigsten Computer der Welt mehrere Monate. Die Aussagen der Klimaexperten hinsichtlich künftiger Klimaänderungen sind daher bislang noch zurückhaltend, einerseits weil das Klimasystem so vielfältige Reaktionsmöglichkeiten in sich birgt, vor allem aber weil größte Unsicherheit darüber besteht, welche Maßnahmen zum globalen Klimaschutz in der Welt in absehbarer Zeit ergriffen oder unterlassen werden.

Trotzdem besteht unter den Klimaforschern weitgehende Übereinstimmung darüber, daß das globale Klimasystem durch die zunehmende Freisetzung von Treibhausgasen und Schadstoffen merkbar beeinflußt wird und erste Anzeichen davon jetzt schon spürbar sind. Das 1988 von der UN eingerichtete Expertengremium Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hat in mehreren Berichten die wissenschaftlichen Erkenntnisse darüber, wie sich - je nach Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen - das Klima bis zum Jahr 2100 verändern könnte, dokumentiert. Der zweite IPCC-Sachstandsbericht, der Ende 1995 vorgelegt und von der UNO angenommen wurde, zeichnet dabei folgendes Bild:

Nach dem "business-as-usual-Szenario", d.h. unverminderte Zunahme der Spurengase Kohlendioxid, Methan, Distickoxid, Ozon, Halokarbone u.a. in den nächsten Jahrzehnten, wird die Durchschnittstemperatur der Erde im Mittel um 2-3°C ansteigen. Das Tempo dieser Erwärmung, die in den höheren Breiten deutlicher ausgeprägt sein wird als in den Tropen, übertrifft bei weitem alle natürlichen Klimaschwankungen der letzten 10.000 Jahre (Holozän). Mit der Temperaturzunahme wären vermutlich auch höhere bzw. intensivere Niederschläge und eine Zunahme bei Häufigkeit und Stärke von Stürmen verknüpft. In den Küstenregionen muß dazu als Folge dieser Klimatrends mit einem mittleren Meeresspiegelanstieg von etwa 50 cm/Jhd. (bisher 20 cm/Jhd.) und einer Erhöhung der Extremwasserstände bei Sturmfluten gerechnet werden. Die Beschreibung der künftigen globalen Klimaentwicklung durch die verbesserten Klimamodelle wird überdies als deutlich zuverlässiger eingeschätzt als noch im ersten IPCC-Bericht von 1990 (IPCC 1995).

2. Die Bedeutung und Empfindlichkeit des Küstenraums

Setzt sich die von den IPCC-Experten bereits als deutlicher Trend eines anthropogenen Klimawandels gedeutete Entwicklung weiter fort, werden vor allem die Küstenzonen der Erde besonders davon betroffen sein. Weil diese die am dichtesten besiedelten und am intensivsten genutzten Gebiete der Welt sind (Städte, Schifffahrt, Fischerei, Aquakultur, Tourismus, Industrie etc.) und neben den Tropenwäldern die produktivsten Ökosysteme beherbergen, drohen den Küsten demnach auch im 21. Jhd. die größten Risiken durch den skizzierten Klimawandel. Dies gilt auch dann, wenn der Treibhauseffekt, bedingt durch politische Maßnahmen, weniger gravierend ausfallen sollte, wie dies in anderen IPCC-Szenarien berücksichtigt wird (Abb. 1). Das IPCC hat daher bereits 1990 eine Arbeitsgruppe aus Küstenexperten einberufen (Coastal Zone Management Subgroup), welche sich mit den Bedrohungen der Küsten durch den Klimawandel und möglichen Abhilfestrategien auseinandersetzt.

Speziell den Küstenräumen wird in Zusammenhang mit dem Klimawandel besondere Aufmerksamkeit geschenkt, da sie einerseits dem direkten Meereinfluß unmittelbar ausgesetzt sind (z.B. Hochwassergefährdung, Landverluste bei Sturmfluten etc.), andererseits durch ihre vielfältigen Funktionen von größter Bedeutung sind. Es steht zu befürchten, daß die für die ökologische Stabilität und die menschlichen Nutzungen bedeutsamen Regulations- und Produktionsfunktionen der Küstenlandschaften (vgl. Tab.1) durch die klimabedingten Entwicklungen tiefgreifend beeinträchtigt werden können.

In Deutschland ist 1991 im Rahmen einer neuen Forschungsrichtung, der Klimafolgenforschung, als erster Schwerpunkt ein interdisziplinäres Verbundvorhaben "Klimaänderung und Küste" gemeinsam vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) und den fünf norddeutschen Küstenländern beschlossen worden, mit dem die vermeintlichen - negativen oder auch positiven - Auswirkungen künftiger Klimaveränderungen auf die deutschen Nord- und Ostseeküsten untersucht und sinnvolle politisch-administrative Handlungsoptionen, d.h. Küstenmanagementstrategien, entwickelt werden sollen.

Im Zuge dieser Forschungsinitiative ist zu beachten, daß der deutsche Küstenraum nicht nur auf klimatisch bedingte Effekte sehr sensibel reagiert, sondern daß hier auch durch andere Umweltveränderungen, z.B. durch intensive Grundwassernutzung, Nähr- und Schadstoffeinträge, künstliche Vertiefung der Flußmündungen etc. das Natursystem bereits stark in seinem ökologischen Gleichgewicht betroffen bzw. gestört ist. Die Gefährdung bezieht sich also nicht nur auf die Anfälligkeit des küstennahen Lebensraums gegenüber Naturkatastrophen/Sturmfluten o.ä., sondern schließt die absehbare Verschärfung bereits bestehender Nutzungs- und Zielkonflikte (Landwirtschaft, Fischerei, Tourismus, Naturschutz, Küstenschutz etc.) und deren ökonomische Konsequenzen ebenso ein wie die Wahrscheinlichkeit dauerhafter tiefgreifender Veränderungen in den marinen und litoralen Ökosystemen (Schellnhuber & Sterr 1993; Lozán et al. 1994).

3. Szenarien für Klima- und Meeresspiegeländerungen in Norddeutschland

Grundsätzlich ist festzuhalten, daß das künftige Ausmaß und die Geschwindigkeit des erwarteten Klimawandels im globalen Rahmen derzeit nicht präzise vorhergesagt werden können und noch weniger die regionale Ausprägung dieses Wandels. Für die Wissenschaft besteht also hier das Problem, prognostische Aussagen zu vermeintlichen Auswirkungen auf zum Teil noch unsicheren Annahmen treffen zu müssen. Das oft geäußerte Argument, daß die verfügbare Datenbasis zur Beantwortung vieler Fragen noch nicht ausreicht, verliert jedoch an Bedeutung, wenn man die Klimafolgenforschung als vorsorgeorientiertes Handlungskonzept versteht: wir müssen frühzeitig die Empfindlichkeit des Natur- und Gesellschaftssystems (im Küstenraum) gegenüber spezifischen klimatischen Einflußgrößen analysieren bzw. begreifen, um rasch gegensteuern zu können, wenn Änderungstrends deutlich/er erkennbar werden. Wenn die vielfältigen Ausprägungen des Klimawandels erst einmal als

gesicherte Tatsachen feststehen, dürfte es für viele Anpassungs- und Schutzoptionen bereits zu spät sein (Enquete-Kommission 1993; IPCC 1995).

Die Wissenschaftler bedienen sich daher in dieser Frühphase der sog. Szenarien, d.h. sie treffen Annahmen, die sich auf klimastatistische Untersuchungen, auf Prognosen von hochkomplizierten Klimamodellen und umfangreiche Detailbeobachtungen gründen und daher den derzeit besten Kenntnisstand wiedergeben. Für den deutschen Küstenraum gelten aus dieser Sicht folgende Szenarienannahmen als plausibel:

Hinsichtlich des Temperaturhaushalts ist eine Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur um 1,5 bis 3,0 °C über die nächsten 100 Jahre zu erwarten; dabei werden vermutlich die Temperaturanstiege im Winterhalbjahr überproportional hoch sein.

Der bisherige Anstieg des Meeresspiegels (ca. 15-20 cm/Jhd.) (IPCC 1990; Kunz 1993) wird, bedingt durch den Treibhauseffekt, vermutlich deutlich beschleunigt. Nach den neuesten Berechnungen von IPCC wird dieser Anstieg bis zum Jahr 2100 zwischen 20 cm und 95 cm im globalen Mittel betragen, wobei der wahrscheinliche Trend mit 50 cm angegeben wird (IPCC 1995).

Regional, so z.B. in flachen Randmeeren wie der Nordsee, kann die Erhöhung des Meeresspiegels aber signifikant über dem mittleren globalen Wert liegen, weil hier der Effekt der thermischen Ausdehnung des Oberflächenwassers im Vergleich zu den Weltozeanen überproportional hoch ist; eine Beschleunigung um etwa das Dreifache des bisherigen Anstiegs gilt daher als realistisch (Lassen & Siefert 1991; Enquete-Kommission 1992).

Für die gemäßigten bis höheren Breiten, also auch den Nord- und Ostseeraum, ist mit einer Zunahme der Luftdruckgegensätze und damit auch der Starkwindereignisse - sowohl hinsichtlich Häufigkeit als auch Intensität - zu rechnen; dies betrifft vor allem die Westwindlagen, die für die deutsche Nordseeküste, insbesondere in der Deutschen Bucht und den Ästuaren von Ems, Weser, Elbe und Eider für Windstaueffekte und Extremwasserstände verantwortlich sind (Plate & Ihringer 1991).

Als Ergebnis der beiden letztgenannten Faktoren ist eine Verstärkung des Seegangs in den küstennahen Bereichen ebenso als wahrscheinlich anzunehmen wie ein höheres Auflaufen der Extremwasserstände an der Nordsee und z.T. auch an der Ostseeküste. Auswertungen von Pegelaufzeichnungen aus dem Nordseeküstenraum zeigen diesen Trend bereits deutlich an (Erchinger

1992). So brachte die Sturmflut vom 24. Januar 1994, die auch Teile Hamburgs überflutete, im Raum Dollart/Emsmündung die höchsten bisher jemals registrierten Wasserstände mit sich. Das bedeutet, daß die nach der Sturmflut von 1962 festgelegten Bemessungswasserstände für Deiche immer öfter erreicht bzw. überschritten werden.

Neben der Steigerung von Häufigkeit und Intensität der Extremereignisse nimmt an vielen Küstenabschnitten die hydrodynamische Gesamtbelastung zu durch

- Erhöhung des Tidenhubs, insbesondere in Buchten und Ästuaren,
- Abbau bzw. Erosion von seegangsdämpfenden Reliefstrukturen (Sandriffe, Außensände etc.),
- Vermehrung von Stau- oder Erosionseffekten durch Bauwerke.

Eine Änderung der festländischen Niederschlags- und Abflußverhältnisse, z.B. mehr Niederschlag im Winter als Regen, Zunahme sommerlicher Starkregenereignisse o.a., kann lokal/zeitweise zu einer doppelten, d.h. land- und meerseitigen, Überflutungsgefährdung und damit zu wesentlich erhöhter Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen führen (Kunz 1993). Eine solche Situation trat im Nordseeküstenraum in Februar/März 1994 auf.

Durch veränderte Niederschlagsverhältnisse bzw. Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee ist die Salinität (Salzgehalt) der Küstengewässer stärkeren Schwankungen als bisher unterworfen.

4. Die Nordseeküste als klimasensibler Raum

Die besondere Anfälligkeit dieses Raums resultiert einerseits aus seiner geologischen Struktur, d.h. dem flachen Relief und Aufbau aus weichen Meeresedimenten, und andererseits aus der Vielfalt seiner biologischen und sozioökonomischen Ressourcen (Lozán et al. 1994).

Aus den oben beschriebenen Erkenntnissen und Szenarien ergibt sich die Einschätzung, daß in den kommenden Jahrzehnten weitreichende Konsequenzen für die Hydrographie bzw. die morphologischen Prozesse der Küstenformung und -umgestaltung angenommen werden müssen. Damit sind aber auch gleichzeitig die natürlichen Ökosysteme bzw. Lebensräume, wie Watt, Salzwiesen und Dünen, sowie die menschlichen Nutzungen im Nordseeraum, z.B.

Tourismus, Fischerei, Schifffahrt etc., in erheblichem Umfang betroffen (Schellnhuber & Sterr, 1993). Aus Abb. 2 geht hervor, in welcher Form die Reaktionen des Natursystems das menschliche Leben und Handeln innerhalb der Küstenzone einzeln oder in Kombination tangieren werden.

Wie Abb. 3 zeigt, stehen die vom Klimawandel stimulierten Prozesse in zum Teil enger, sich gegenseitig verstärkender Wechselwirkung zueinander, was als Synergismuseffekt bezeichnet wird. Als wichtigste Prozesse und Wirkungen auf der physikalischen Ebene, die eine potentielle Gefährdung des Küstenraums erzeugen, sind demnach zu nennen: die Erhöhung der Wassertemperaturen, steigende mittlere und extreme Wasserstände sowie zunehmende Wellenhöhen bzw. küstennahe Seegangenergien auf der Meeresseite; und periodisch hohe Abflusssmengen aus Flußeinzugsgebieten, steigender Grundwasserspiegel sowie Vordringen von salzhaltigem Wasser landwärts der Küstenlinie. Aus diesen resultieren dann in unmittelbarer Konsequenz: die Wahrscheinlichkeit einer zunehmenden Überflutung tiefliegender Areale, fortschreitender Abtrag (Erosion) von Ufer und Meeresboden, nachhaltige Veränderung von Sedimentmenge und -beschaffenheit, v.a. im Küstenvorfeld und im Watt, sowie Boden- und Grundwasserversalzung. Diese Risikofaktoren beeinflussen schließlich mehr oder weniger intensiv alle wesentlichen Teilbereiche der Biosphäre und der Anthroposphäre (vgl. Abb. 3).

Für die Küstenbevölkerung und ihre Handlungssektoren (= Anthroposphäre) ergeben sich Gefährdungen oder Negativentwicklungen entweder aus den direkten geophysikalischen Impakts durch Sturmfluten, Landverluste, Bodenvernässung und/oder Bodenversalzung (z.B. im Bereich Landwirtschaft, Schifffahrt, Besiedlung u.a.) oder über die Anpassungsreaktionen im Artenspektrum bzw. in den Nahrungsketten der litoralen Ökosysteme (z.B. im Bereich Fischerei). Aber auch kombinierte Wirkungen können auftreten, deren Ausmaß und Bedeutung aber besonders schwer einzuschätzen sind. So ist es nahezu unmöglich zu prognostizieren, ob etwa der Fremdenverkehr von höheren Sommertemperaturen profitieren oder vielmehr unter möglichen Umweltbeeinträchtigungen, wie dem Verlust von Salzwiesen, dem Abwandern von Küstenvögeln etc. oder starker sommerlicher Algenentwicklung, leiden wird.

Vordergründig am stärksten betroffen ist naturgemäß der Komplex Küstenschutz, der als eine Art Schnittstelle zwischen Geosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre anzusehen ist und mit jedem dieser Teilbereiche interagiert. Weil vom Küstenschutz viele morphologische, biologische und sozioökonomische Prozeßabläufe beeinflußt werden oder abhängig sind, müssen die damit einhergehenden Eingriffe als sehr dominante Wirkungsmechanismen

angesehen werden. Nicht selten sind Küstenschutzbauten und andere wasserbauliche Maßnahmen sogar die direkten Auslöser für weitreichende morphologisch-biologische Systemanpassungen.

5. Mögliche Betroffenheit des Küstenraums und seiner Bewohner

Art und Umfang der möglichen Klimaimpakts entlang der Nordseeküste lassen sich am besten innerhalb einzelner Beispielräume bzw. Teilsysteme der Küstenregion beschreiben, wie dies im folgenden für die Bereiche Nordsee (mariner Bereich), Wattenmeer (intertidaler Bereich), Inseln, Festlandsküste und Binnenland (terrestrischer Bereich) versucht wird. Dabei können bis zu 40 - direkte und indirekte - Effekte des Klimawandels unterschieden werden (Sterr 1995; Tab. 2).

Nordsee

- (1) höhere Wassertemperaturen
- (2) beschleunigter Meeresspiegelanstieg
- (3) stärkere Luftdruckgegensätze, Winde
- (4) zunehmende Sturmfluthäufigkeit
- (5) verstärkter Seegang, höhere Wellen
- (6) Erhöhung des Tidenhubs
- (7) Beeinträchtigung der Schifffahrt
- (8) Steigerung der Planktonproduktion - > vermehrte Biomasse, Sauerstoffbedarf
- (9) Rückgang der Konsumenten- (Copepoden-)Population

Wattenmeer

- (10) seeseitige Erosion der Wattkante -> Reduzierung der Wattfläche
- (11) raschere Verlagerung der Außensände
- (12)+ stärkere Sedimentumlagerungen -> Erniedrigung der Wattfläche; Schlickerosion
- (13) Vertiefung, Verlängerung der Tiderinnen
- (14) Verlust von Seegras-/Salzwiesen
- (15) Veränderung der Bodenfauna, abnehmende Artenzahl
- (16) stärkere Wassertrübung -> geringere Primärproduktion
- (17) Abwandern von Vögeln und Fischen
- (18) Zunahme toxischer Substanzen, O₂ Mangel
- (19) Rückgang der Fisch- und Muschelbestände
- (20) Rückgang der naturräumlichen Attraktivität des Nationalparks

Inseln

- (21) I Verteilung des Vorstrandprofils -> Zunahme der Strand-, Kliff- und Dünenerosion
- (22) erhöhter Landverlust auf der Wattseite
- (23) Gefahr von Überflutungen, Insele durchbrüchen
- (24) mehr Sandvorspülungen, höhere Küstenschutz-Kosten
- (25) Gefährdung von Gebäuden, Infrastruktur
- (26) Verfall von Immobilienwerten
- (27) Versicherungsteuerung
- (28) Salzwasserintrusion, Trinkwasserverknappung
- (29) Konflikte zwischen Tourismus und Naturschutz

Festlandsküste

- (30) Verlust von Deichvorländern
- (31) zunehmende Deichbeschädigung durch Seegang
- (32) erhöhte Gefahr von Deichüberflutung
- (33) mehr Deichbaumaßnahmen, hohe Kosten
- (34) Ausbau der Entwässerungsanlagen, Siele

Binnenland

- (35) Überflutungsgefährdung großer Areale
- (36) höhere Kapitalverluste bei Extremereignissen
- (37) zunehmende Grundwasserversalzung
- (38) Veränderung der Landnutzungsstruktur
- (39) Umverteilung der wirtschaftlichen Lasten
- (40) Änderung der Küstenschutz-, Flächennutzungs- und Naturschutzplanung

Tab. 2: Potentielle Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Küstenraum

Im küstennahen Meeresraum könnten die Wassertemperaturen infolge der globalen Erwärmung in den nächsten 30-50 Jahren um 2°C oder mehr ansteigen (Impakt 1). Durch die zunehmende thermische Ausdehnung des Wasserkörpers sowie durch das weitere Abschmelzen von Eismassen in Gebirgen und in Grönland wird auch der Meeresspiegel dann wesentlich rascher als bisher steigen (Impakt 2; s.o.). Aus dem zunehmenden Temperaturgegensatz zwischen tropischen und polaren Breiten resultieren - wie in den letzten 10 Jahren bereits statistisch nachzuweisen ist - stärkere Luftdruckgegensätze im Bereich der gemäßigten Breiten (Impakt 3). Als kombinierte Folge von Impakt 2 und 3 ist zu erwarten, daß Sturmfluten nicht nur öfter, sondern auch

stärker eintreten werden. Dies bedeutet, daß ein zunehmender Anstieg der Sturmflutscheitelhöhen an den Küstenpegeln und überdies eine Erhöhung der - mittleren bzw. extremen - Wellenhöhen sowie des Tidenhubs wahrscheinlich wird (Impakt 4, 5, 6). Diese Faktoren bringen als Impakt 3. Ordnung die Intensivierung von Strömungen und Energieeinwirkungen auf den Meeresboden und damit eine erhöhte Mobilisierung der Sedimente mit sich (vgl. Impakt 12). Gleichzeitig kann die Verschärfung der Wind- und Seegangbedingungen zu einer Beeinträchtigung der Küstenschifffahrt oder einer vermehrten Gefährdung durch Havarien führen (Impakt 7), wie auch in den ersten Januartagen dieses Jahres (1995) bei mehreren Schiffsunglücken zu beobachten war.

In der marinen Biosphäre wiederum bedingen die höheren Wassertemperaturen eine vermehrte Produktion von Biomasse, also Plankton, Algen und anderen Mikroorganismen, deren Abbau eine zunehmende Sauerstoffzehrung in der Wassersäule und am Meeresboden zur Folge hat (Impakt 8). Dieser beeinträchtigt die Vermehrung der Konsumenten, insbesondere der Copepoden (Ruderfüßler) und stört damit das Gleichgewicht in der Nahrungskette der höheren Meeresfauna (Impakt 9). Hierdurch würde auch eine Dezimierung der nutzbaren Fischpopulationen wahrscheinlich (vgl. Impakt 19).

Das Wattenmeer ist als Laich-, Brut-, Aufwuchs- und Lebensraum für Fische, Muscheln, Vögel, Robben etc. von herausragender ökologischer aber auch ökonomischer Bedeutung. Seine Genese und Entwicklungsdynamik resultiert aus komplexen Wechselwirkungen zwischen Tideströmungen, Seegang, Sturmfluten sowie der dichten Besiedlung mit Lebewesen und Mikroorganismen. Derzeit erwarten viele Experten, daß dieses Ökosystem von den klimabedingten Veränderungen des hydrologischen Regimes umfassend betroffen sein wird (Reise 1993; IPCC 1995).

Rascherer Meeresspiegelanstieg und verstärkte Seegangs- und Strömungsprozesse bedingen von seewärts eine beschleunigte Erosion des Wattsockels. Landseitig eingegrenzt durch die Deichlinie der Festlandsküste ist eine dynamische Anpassung dieser amphibischen Zone an Transgressionsbedingungen - anders als im Laufe seiner 2000- bis 3000-jährigen Entstehungsgeschichte - heute nicht mehr möglich, so daß das Watt in seiner räumlichen Ausdehnung sukzessive beschnitten wird (Impakt 10). Ein damit unmittelbar verknüpftes Phänomen ist die steigende Wanderungsrate der nordfriesischen Außensände nach Osten (Impakt 11). Da diese eine wichtige Schutzfunktion für die landwärtigen Wattflächen haben, ergibt sich hieraus eine Verstärkung des "Einenkungstrends" (Reise 1993). Die Intensivierung der hydrodynamischen Prozesse und die Häufung der Sturmfluten führt aber gleichzeitig auch über die da-

von abhängigen Sedimentumlagerungen zur flächenhaften vertikalen Erosion, insbesondere zur Erniedrigung der Wattwasserscheiden (Impakt 12) sowie zur rascheren Vertiefung und Verlagerung der Priele und Seegats (Impakt 13). Stellenweise haben diese Prozesse bereits zu gefährlichen Ausräumungen im Randbereich der Inseln geführt (Sterr 1993 b).

Diese, sich teilweise gegenseitig verstärkenden Prozeßabläufe lassen langfristig eine nachhaltige Beschneidung und generelle Bedrohung des Ökosystems Wattenmeer erwarten. Auch der innere Randbereich des Watts, die Salzwiesen, die einen der wichtigsten Lebensräume für litorale Flora und Fauna außerhalb der Tropen darstellen, ist gleichermaßen von dieser negativen Entwicklung bedroht, da für sie bei steigenden Wasserständen kein Ausweichraum zur Verfügung steht (Prokosch 1991). Sie werden nach diesem Szenario durch Überflutung und/oder Erosion stark verkleinert werden (Impakt 14). Solche Verluste von Watt- und Salzwiesenflächen sind um so schlimmer einzuschätzen, wenn man deren wichtige Funktion als "Wellenbrecher" vor der Festlandsküste oder ihre biochemische Reinigungsfunktion (Aufnahme von Nähr- und Schadstoffen) zusätzlich berücksichtigt (vgl. Impakts 30, 31).

Andererseits werden Änderungen in der Überflutungsdauer sowie der Sedimentmobilität und -zusammensetzung (Impakt 16) vermutlich Verschiebungen im Artenspektrum der Bodenfauna zur Folge haben (mehr Arten aber geringere Produktionsleistung; Impakt 15), worunter sowohl die Fisch- wie auch die Vogelbestände leiden müßten. Ein Abwandern vieler höherer Lebensformen wäre die Konsequenz (Impakt 17). Zusätzlich könnten Fisch- und Muschelbestände auch unter der sprunghaften Vermehrung toxischer Substanzen und Algen leiden (Impakts 18, 19/. Es darf vermutet werden, daß durch diese Anpassungen des ökologischen Systems die Attraktivität des Naturraums bzw. des Nationalparks nachhaltig negativ beeinflusst werden wird (Impakt 20).

Die Inseln, die in ihrer exponierten Lage eine Art Wellenbrecherfunktion für die Festlandsküste erfüllen, werden aufgrund der erwarteten erhöhten (durchschnittlichen) Seegangswirkung und Sturmflutaktivität einer stark zunehmenden Erosion ausgesetzt sein. Da das anfallende Sediment von der stärkeren Brandung großräumig verfrachtet wird, werden die exponierten Küstenabschnitte auf der Westseite, also Dünen bzw. Kliffs und der davorliegende Strand zunehmend unter negativen Materialbilanzen leiden (Impakt 21). So gingen am Südende der Insel Sylt während einer Sturmflut im Februar 1992 binnen weniger Stunden mehrere Hektar Dünengebiet verloren. Andererseits stellen die beim Küstenabbruch entlang dieser Abschnitte anfallenden Sedi-

mente das Material dar, mit dem benachbarte Areale, insbesondere das landseitig angrenzende Wattenmeer "versorgt" und kontinuierlich aufgebaut werden. Sollte durch Buhnen oder andere feste Küstenschutzbauten die landwärtige Sedimentumlagerung eingeschränkt werden, so wäre z.B. das Wattenmeer einer zunehmenden Verstärkung der dort ablaufenden Prozeßdynamik unterworfen; die teilweise heute schon feststellbaren Trends zur flächenhaften Erosion (s.o.) würden damit dort noch erheblich gesteigert (Misdorp et al. 1990).

Bei fortschreitender Versteilung des Küstenprofils überfluten die Wellen dann immer häufiger den für den Tourismus wichtigen Strand und räumen ihn aus (Sterr 1993b). Diesem wachsenden Erosionstrend kann vorerst nur mit häufigeren Sandvorspülungen begegnet werden, für die schon jetzt pro Jahr viele Mio. DM an Kosten aufgewendet werden müssen (Impakt 24). Aber auch auf der landwärtigen Seite der Inseln, die an das Watt grenzen, muß wegen der unter 2. beschriebenen Vorgänge mit Landverlusten gerechnet werden (Impakt 22). An den schmalen Inselenden, z.B. von Sylt, Amrum oder Juist, besteht überdies bei extremen Sturmflutwasserständen die Gefahr von Durchbrüchen (Impakt 23); auch die künstlichen Dämme nach Sylt und Öland/Langeneß, die die Verbindungs- und Versorgungswege darstellen, könnten unter Umständen unterbrochen werden.

Wenn nicht auf der politisch-behördlichen Ebene über Änderungen der bisherigen Küstenschutzstrategie nachgedacht wird (s.u.), könnten längerfristig nachhaltige privat- und volkswirtschaftliche Schäden aus dem steigenden Gefährdungspotential erwachsen, entweder wegen direkter Verluste von Gebäuden etc. durch Inselabbrüche (Impakt 25) oder aus den marktwirtschaftlichen Reaktionen auf diese Gefährdung, z.B. innerhalb der Immobilien- oder der Versicherungsbranche (Impakt 26, 27).

Eine weitere Folgewirkung des Meeresspiegelanstiegs kann für die Süßwasserlinsen der Inseln in Form einer Verringerung und Verschlechterung des verfügbaren Grundwassers angenommen werden (Impakt 28), da aufsteigendes Meerwasser das Grundwasser verdrängt bzw. versalzt (Kunz 1993). Aus dem bisher schon lebhaften Diskurs der verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen zur ökologischen Qualität dieses Raums muß auf zunehmende Interessenskonflikte als Ergebnis der skizzierten Entwicklung geschlossen werden (Impakt 29).

Die Festlandsküste ist ebenfalls langfristig von den o.g. hydro- und morphodynamischen Reaktionen auf den Klimawandel nachhaltig betroffen. Durch

den Verlust von Deichvorländern und Salzwiesen (Impakt 30) erreicht das Wasser immer häufiger ungebremsst den Fuß der Deiche. Nach der Katastrophen-Sturmflut von 1962 wurden alle Festlandsdeiche an der Nordseeküste beträchtlich erhöht und verstärkt, so daß nach damaliger Einschätzung eine langfristige Absicherung gegen Sturmfluten gegeben war. Diese Sicherheit ist dreißig Jahre später nicht mehr im gleichen Maß gewährleistet, wie die Wellenauflaufhöhen und verschiedenen Deichbeschädigungen während der letzten größeren Sturmfluten seit 1975 zeigen (Impakt 31): die Orkanfluten von 1976, 1981, 1990 und 1992 haben an verschiedenen Abschnitten der Küste, etwa im Raum Elbe-Sylt, bereits neue Höchstmarken gesetzt (Erchinger 1992). Die den Deichplanungen zugrunde liegende sog. 100-jährige Sturmflut - eine errechnete Größe aus Tidewasserstand, plus Wind und Wellenaufaufeffekt - ist inzwischen in der Deutschen Bucht seit 1990 bereits mehr als 20 cm höher als sie noch 1980 war (Plate & Ihringer 1991). Auch eine Überflutung verschiedener Deichstrecken, die nach amtlicher Einschätzung gegenüber den bisherigen Bemessungswasserständen Fehlhöhen aufweisen, ist damit nicht mehr ausgeschlossen (Impakt 32).

Setzt sich die skizzierte Entwicklung weiter und in größerem Tempo fort, so dürfte die Gefährdung der Festlandsdeiche und die damit verbundenen Aufwendungen für Sicherungsmaßnahmen dadurch beträchtlich steigen (Impakt 33). Dabei ist aber zu bedenken, daß Maßnahmen wie z.B. Deicherhöhungen und -verstärkungen aus technischen oder ökologischen Gründen nicht in beliebigem Maß gesteigert werden können (Kunz 1993b).

Schließlich müssen voraussichtlich eine Reihe von bestehenden Anlagen zur Entwässerung (Siele etc.) aufgerüstet werden, da bei höheren Außenwasserständen, wenn das Gefälle der Flüsse und Gräben abnimmt, die erforderliche Schöpfleistung exponentiell ansteigen dürfte. Diese Wirkung könnte durch steigende Spitzenabflüsse von Landseite, wie sie aus Niederschlagsänderungen resultieren könnten, noch zusätzlich verschärft werden (Impakt 34).

Die festländischen Niederungsgebiete an der Nordsee - wie im übrigen auch an der Ostseeküste - sind angesichts der skizzierten Entwicklung, speziell in Bezug auf die (Extrem-) Wasserstände, in den kommenden Jahrzehnten in weit höherem Maß als bisher von Überflutungen bedroht (Impakt 35). Schon jetzt liegen große Bereiche entlang der Nordseeküste unterhalb des MThw-Niveaus, das in den letzten 100 Jahren um mehr als 20 cm angestiegen ist; ohne Bedeichung wären diese Flächen also bei einem normalen Ebbe-Flut-Zyklus täglich einige Stunden unter Wasser. Da im Zuge der touristischen und weiteren wirtschaftlichen Entwicklung der Sachwert innerhalb der überflu-

tungsgefährdeten Gebiete kontinuierlich angewachsen ist, so z.B. durch die Errichtung von Ferienzentren, Verkehrsanlagen etc., wird der bei einer neuen Katastrophenflut zu verzeichnende Gesamtschaden weit über den materiellen Schäden der Vergangenheit liegen /Impakt 36) (Sterr et al. 1995).

Zusätzlich zum Überflutungsrisiko bringen ansteigende Wasserstände auch die Gefahr der weiteren Versalzung von Oberflächen- und Grundwasser mit sich, insbesondere in den Marschgebieten unter NN und auf den Nordseeinseln (Impakt 37). Daraus ergibt sich in absehbarer Zeit vielleicht die Notwendigkeit, die bisherige landwirtschaftliche Nutzung solch salzwasserbeeinflussten Flächen aufzugeben (Impakt 38). Damit verbunden wäre wohl eine raumspezifische Anpassung bzw. Umverteilung der aus der Risikoentwicklung resultierenden wirtschaftlichen Kosten, die neben der Landwirtschaft auch die Versicherungswirtschaft und den Steuerzahler im Binnenland (über die steigenden Aufwendungen für Küstenschutz) massiv belasten (Impakt 39). Ein grundsätzliches Ergebnis der wachsenden Verletzbarkeit des Küstenraums gegenüber Klimaeinflüssen könnte, oder besser müßte, eine Anpassung der Gesellschaft an die neuen Entwicklungen sein, insbesondere auf der politisch-planerischen Ebene (Impakt 40).

6. Zusammenfassung und Ausblick

Wenngleich die oben dargestellten alarmierenden Trends vorerst auf Szenarien beruhen, ist daraus die Schlußfolgerung zu ziehen, daß die bisherigen Maßnahmen und Aufwendungen für sturmflutsicheren Küstenschutz an der Nordsee mit der wachsenden Gefährdung durch den Klimawandel kaum Schritt halten können. Zusätzlich zu den unmittelbaren Risiken für die Küstenbevölkerung wird es zu vielen weiterreichenden Folgen kommen. Hier ist v.a. die Bedrohung der Biotope zu nennen: Milieuveränderungen und Flächenverluste in vielen küstenspezifischen Lebensräumen (Wattenmeer, Bodden, Ästuare, Verlandungssäume, Dünengürtel) beeinflussen die Struktur und Funktion der litoralen Teilökosysteme (Prokosch 1991). Gesellschaftlich relevante Leistungen dieser Ökosysteme, wie Produktions- und Selbstreinigungsvermögen der Oberflächengewässer, natürliche Vielfalt, Anpassungsfähigkeit und ästhetischer Wert wären betroffen. Dies birgt gleichermaßen wirtschaftliche (Fischerei, Aquakultur, Attraktivität/Tourismus) und gesundheitliche Gefahren (Schadstoffbelastung, Infektionsanfälligkeit, Erholungswert) für die hier lebenden Menschen.

Des weiteren werden sich die bestehenden Nutzungs- und Schutzkonflikte bei der Planung und Durchführung von Maßnahmen zum Natur- und Biotop-

schutz, zur Wasserwirtschaft, zum Küstenschutz, zur Entwicklung von Tourismus und Verkehr wohl weiter verschärfen. Aufwendige Anpassungsstrategien könnten in den kommenden Jahrzehnten immense Mittel erfordern. Das gilt für neue Hochwasserschutzanlagen, für die Erosionsbekämpfung, für Deichverstärkungen und Rückverlegung von Siedlungen ebenso wie für die Reaktionen auf fast alle anderen Auswirkungen des globalen Wandels, z.B. auf dem Fischerei-, Agrar-, Verkehrs- oder Gesundheitssektor (IPCC 1994). So sieht Erchinger (1992) etwa im Raum Jade/Ems in den nächsten 10-15 Jahren noch Bedarf für Investitionen von mehr als 1 Mrd. DM für Deichverbesserungsmaßnahmen.

Ein Verlust von Naturräumen ist allerdings kaum durch den Einsatz finanzieller Mittel aufzuhalten, geschweige denn zu kompensieren. Vielmehr muß in diesem Zusammenhang vorurteilsfrei über alternative Ziele bzw. Strategien des Küstenschutzes nachgedacht werden, wie z.B. über die selektive Rückverlegung von Deichen und die Schaffung von weitläufigen Überflutungsräumen, die zu neuen ökologischen Nischen für Küstenflora und -fauna werden könnten (Reise et al. 1994).

Im ökonomischen Sektor stellt die Einbeziehung der Gefährdungsszenarien in die Kosten-Nutzen-Analysen der Versicherungswirtschaft für neue Bauprojekte entlang der Küste eine erste konkrete Reaktion auf die skizzierte Entwicklung dar (Stock 1994). Besonders schwierig dürfte aber auf der gesellschaftlichen Ebene in dieser Hinsicht die Entzerrung bzw. Harmonisierung der gegenläufigen Interessenslagen von Küstenschutz, Naturschutz und weiterer wirtschaftlicher Entwicklung bes. in den Bereichen Schifffahrt, Hafenwirtschaft und Tourismus sein (Abb. 4).

Die Bewältigung dieser Aufgaben kann nur mit Hilfe des integrierten Küstenmanagements (ICZM) über die bislang bestehenden sektoralen und administrativen Grenzen hinweg gelingen (Abb. 4). Auf internationaler Ebene sind v.a. durch die Bemühungen von IPCC diesbezüglich bereits weitreichende Lösungskonzepte entwickelt worden, die im November 1993 auf der World Coast Conference (WCC) in Noordwijk, NL, von Wissenschaftlern und Politikern aus ca. 100 Küstenländern diskutiert wurden (IPCC 1994/. Nun scheint es an der Zeit, daß auch in Deutschland rasch mit der Konkretisierung und Umsetzung solcher Konzepte begonnen wird.

Literatur:

Erchinger, H.F.: Sturmfluten, eine zunehmende Bedrohung der Küste als Folge von Klimaänderungen. HANSA Schifffahrt-Schiffbau-Hafen 129/12,1992,1381-1382.

Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" (Hrsg.): Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. 1992. Economica-Verlag.

Graßl, H. Scientific Update on Climate Change. In: Bijlsma et al. (Eds.) Proc. World Coast Conference, 1994

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, 1990, 364 S.

IPCC (Eds.): Preparing to Meet the Coastal Challenges of the 21st Century. World Coast Conference Report, Den Haag, 1994.

IPCC (Eds.): Second Assessment Report of Climate Change; Chap.9: Impacts of Climate Change on Coastal Zones and Small Islands. 1996

Kunz, H.: Klimaänderungen und ihre Folgen für Wasserhaushalt, Gewässernutzung und Gewässerschutz. In: Schellnhuber, H.-J. & Sterr, H. (Hrsg.) Klimaänderung und Küste. Springer, Heidelberg, 1993, 97-126

Kunz, H.: The impact of an increased sealevel rise on the German Wadden Sea.. Proc. Coastal Zone '93, 1993, 319-324.

Lozan, J., Rachor, E., Reise, K., von Westernhagen H. & Lenz, W. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer. Blackwell, Berlin, 1994, 387 S.

Plate, E. & Ihringer J.: Die Auswirkung von Klimaänderungen auf Sturmfluten. HANSA Schifffahrt-Schiffbau-Hafen 128, Vol. 19/20, 1991, 1174-1181.

Prokosch, P. et al. (Hrsg.): The Common Future of the Wadden Sea. WWF Technical Report, 1991.

Reise, K.: Die verschwommene Zukunft der Nordseewatten. In: Schellnhuber & Sterr (Hrsg): Klimaänderung und Küste. Springer, Heidelberg, 1993, 223-232

Reise, K. et al.: Wohin entwickelt sich das Wattenmeer? In: Lozán, J.L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer. Blackwell Verlag Berlin 1994; 5.343-348

Schellnhuber, H.-J. & Sterr, H. (Hrsg.): Klimaänderung und Küste. Springer Verlag, Heidelberg, 1993, 400 S.

Sterr, H.: Integriertes Küstenmanagement (ICZM) : Auseinandersetzung mit dem GLOBALEN WANDEL in Küstenregionen. Bausteine der Global Change Forschung. Global Change Prisma, 12/4, 1993, 8-13

Sterr, H., Ebenhö, W. & F. Simmering: Küsten im Klimawandel. Einblicke Nr. 22, S. 4-9, 1995, Oldenburg