

Schriftenreihe der
Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste e. V.



SDN

Klimaänderung und Küste

SDN-Kolloquium
1995

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Horst Sterr <i>Klimawandel und mögliche Auswirkungen auf die deutsche Nordseeküste</i>	9
Karsten Reise <i>Wattökologische Folgen bei Änderung von Klima und Küste</i>	31
Dietrich Mossakowski <i>Auswirkungen von Klimaänderungen auf Salzwiesen und ihre Fauna</i>	46
Peter Petersen <i>Meeresspiegelanstieg und Küstenschutz</i>	61
Alexander Bartholomä und Burghard W. Flemming <i>Zur Sedimentdynamik in den ostfriesischen Rückseitenwatten und den Veränderungen durch natürliche und anthropogene Einflüsse</i>	70
Ingmar Schmidt und Paul Bergweiler <i>Bund-Länder-Projekt „Klimaänderung und Küste“</i>	90
Anschriften der Verfasser	102

Herausgeber:
Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste e. V.
Neumühlenstr. 1a
26316 Varel

Druck:
Clausen & Bosse, Leck

Schriftenreihe der Schutzgemeinschaft Deutsche Nordseeküste e. V.
Heft Nr. 1, 1996
ISSN 0943-9522

Vorwort

Die langfristigen Veränderungen des Klimas sind in aller Munde. Jeder weiß, dass sich das Klima insbesondere durch den Eintrag verschiedenster Substanzen in die Atmosphäre langfristig verändern wird, aber keiner weiß genau wie. Die Bevölkerung glaubt schon heute, nach milden Wintern und steigenden Sommertemperaturen die Veränderungen des Klimas spüren zu können. Jedoch versichern Fachleute immer wieder, daß die Sache so einfach nicht ist. Über die möglichen Konsequenzen von Klimaveränderungen für unsere Küstenlandschaft hat man sich in der Öffentlichkeit bisher allerdings wenige Gedanken gemacht. Dabei sind, folgt man den von Wissenschaftlern entworfenen Szenarien, schwerwiegende Veränderungen zu erwarten. Zu ihnen gehören nicht nur eine Erhöhung der Wasserstände, sondern auch eine Intensivierung der Winde mit periodisch hohen Windstärken. Dies wiederum hat Konsequenzen für die Morphologie der Küste. Hieraus ergeben sich Fragen wie: Wie lange werden unsere Deiche sicher sein? Welche Maßnahmen müssen ergriffen werden, um auch langfristig die Deichsicherheit garantieren zu können? Muß man möglicherweise unkonventionelle Wege gehen, um den Schutz der Küstenlandschaft zu verstärken? Veränderungen der Temperaturen im Küstenmeer werden einen tiefgreifenden Einfluss auf das gesamte ökologische Gefüge haben. Heute reicht die Phantasie kaum aus, sich vorzustellen, was alles passieren wird. Man erwartet, daß temperaturempfindliche Arten, die in der Nordsee ihre südliche Verbreitungsgrenze haben, weiter nach Norden gedrängt werden und dass wärmeliebende Arten weiter nach Norden vordringen werden. Schon heute kann man in den Fängen Fische aus südlicheren Gefilden erkennen. Sämtliche biologischen Vorgänge werden intensiviert, d.h. es wird auch die Wirkung von Schadstoffen in einer nicht vorhersagbaren Weise verstärkt. Die Besiedlung der Küstenmeere und der Küstenvorländer wird sich grundlegend verändern. Das gilt nicht nur für Pflanzen, sondern auch für Tiere. Nicht alle diese Erscheinungen sind unbedingt negativ zu bewerten. Ein durch neue Bedingungen verändertes Ökosystem wird auch überlebensfähig sein. Die Frage ist, ob wir diese durch den Menschen bedingten Veränderungen akzeptieren wollen. Zurückzuführen sind sie - das sei an dieser Stelle eindringlich wiederholt - auf Aktivitäten des Menschen durch den Eintrag von klimaverändernden Substanzen in die Atmosphäre. Angesichts des zu erwartenden Anstiegs des Meeresspiegels fehlt der Küstenbevölkerung jedes Verständnis dafür, dass Maßnahmen zur

Bekämpfung der Freisetzung klimaverändernder Substanzen so zögerlich umgesetzt werden. Selbst wenn man sich heute auf eine Null-Immission der in Frage kommenden Gase einigen könnte, wären gewisse Veränderungen des Klimas gar nicht mehr zu verhindern. Während des von der SDN veranstalteten Kolloquiums im Forschungsinstitut TERRAMARE in Wilhelmshaven konnte erneut ein immer wieder auftretendes Phänomen beobachtet werden. Es wird ein Umweltschaden festgestellt, und es fließen enorme Mengen von Geldern in die wissenschaftliche Bearbeitung dieses Schadens. Es werden Modelle und Prognosen entwickelt, und nach ungefähr einem Jahrzehnt glaubt man, genug darüber zu wissen. Auf der anderen Seite wird aufgrund ökonomischer Vorteile darum gefeilscht, wie lange denn Klimakiller noch freigesetzt werden dürfen. Offensichtlich machen sich die heute Verantwortlichen keine Gedanken darüber, wie hoch die Kosten sein werden, die in einem Jahrhundert für die Beseitigung der durch den Menschen bedingten Klimaveränderungen hervorgerufenen Zerstörungen der Umwelt sein werden.

Priv. Doz. Dr. Volkert Dethlefsen
Cuxhaven

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 Meeresströmungen, 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 der Häufigkeit und Stärke von Stürmen verknüpft. In den Küstenregionen muss dazu als Folge dieser Klimatrends mit einem mittleren Meeresspiegelanstieg von etwa 50 cm/Jh. (bisher 20 cm/Jh.) 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. Jh. 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 Meereseinfluss unmittelbar ausgesetzt sind (z.B. Hochwassergefährdung,

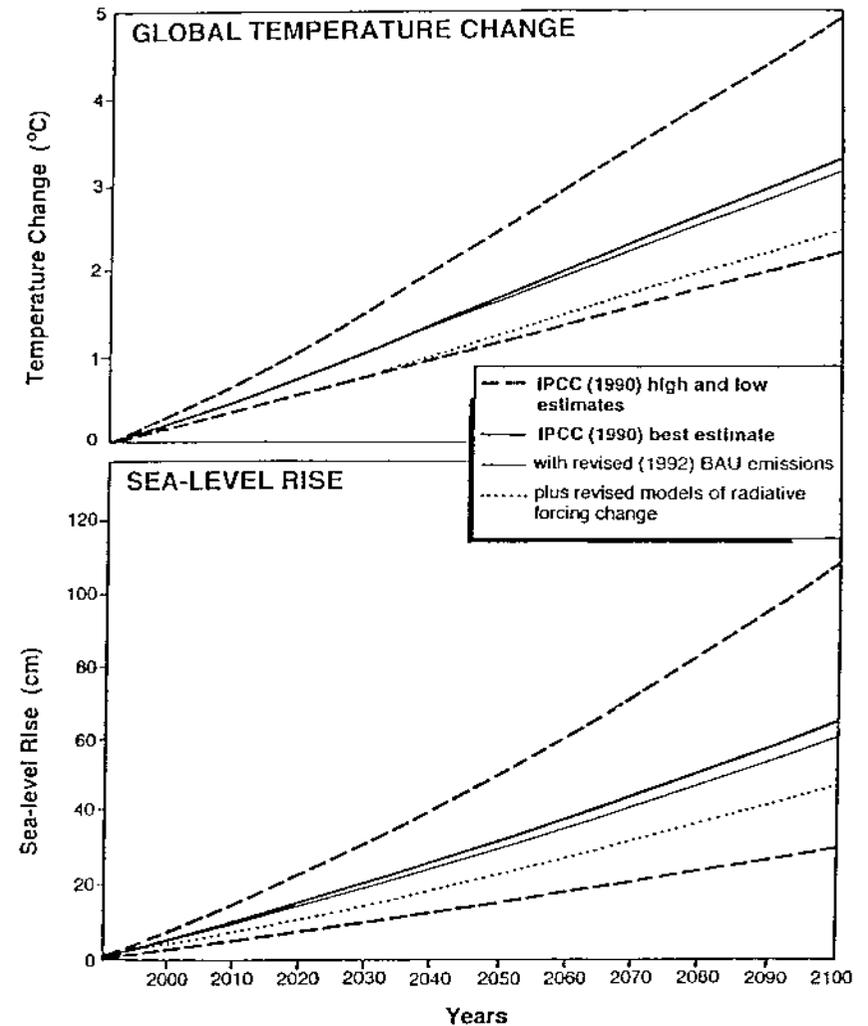


Abb. 1. Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) für den Klimawandel im 21. Jahrhundert. Die gestrichelten Linien geben die Schwankungsbreite der Schätzung von 1990 an, die dünnen Linien die neueren Berechnungen für das "business-as-usual" Szenario (BAU), wobei die gepunktete Linie den neuen Modellrechnungen entspricht.

Regulationsfunktionen	Produktions- und Nutzungsfunktionen	Informationsfunktionen
<ul style="list-style-type: none"> - Regulation der lokalen Energie- und Stoffbilanz - Regulation der chemischen Zusammensetzung von Wasser und Sediment - Regulation des Wasseraustausches zwischen Land und Meer - Speicherung bzw. Verteilung von Nährstoffen und organischer Substanz - Regulation der biotischen Nahrungsnetze - Nähr- und Schadstoff-Filterung - Erhaltung von Lebens- und Aufwuchsräumen - Erhaltung der Artenvielfalt 	<ul style="list-style-type: none"> - Produktion von Trink- und Brauchwasser - Produktion pflanzlicher und tierischer Nahrung - Produktion von Rohstoffen, Baumaterial etc. - Produktion biologisch-genetischer Ressourcen - Raum- und Ressourcenangebot für menschliches Leben und Wohnen <ul style="list-style-type: none"> - Fischerei und Aquakultur - Energienutzung - Tourismus und Erholung - Naturschutz 	<ul style="list-style-type: none"> - ästhetische Information - historisch-kulturelle Information - erzieherische und wissenschaftliche Funktion

Tab. 1. Übersicht über die wichtigsten Funktionen der Küstenzone und Küstengewässer.

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 und 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/Jh.) (IPCC 1990, KUNZ 1993b) 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 und 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 und 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 der sommerlichen Starkregeneignisse 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 Meeressedimenten, 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 und STERR 1993). Aus Abbildung 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 Abbildung 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 Abflussmengen 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).

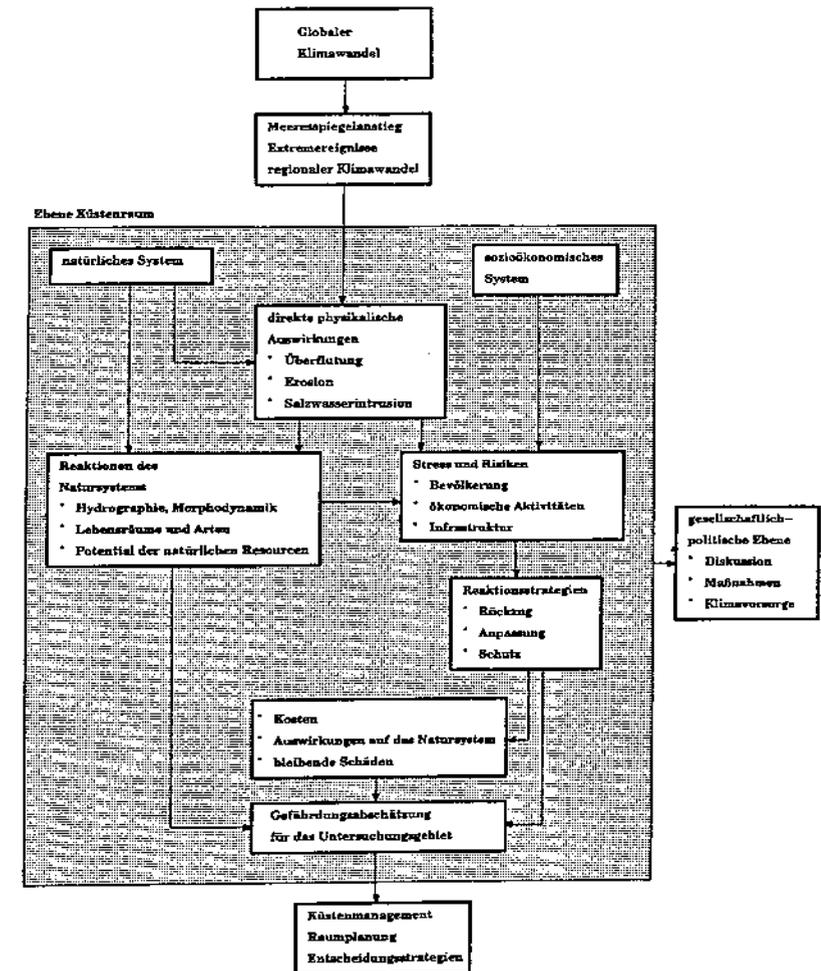


Abb. 2. Klimabedingte Gefährdung des Küstenraums und deren Konsequenzen.

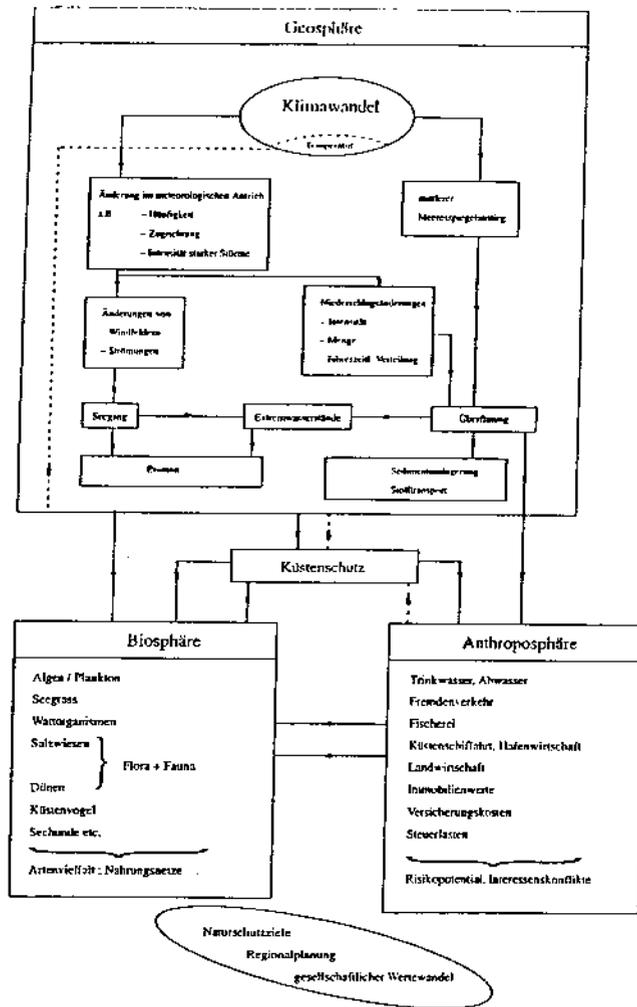


Abb. 3. Wirkungspfade und Betroffenheiten, wie sie durch Klimawandel zwischen der Geosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre im Küstenraum ausgelöst werden (können).

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, Festlandküste 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) Versteilung des Vorstrandprofils -> Zunahme der Strand-, Kliff- und Dünenerosion
- (22) erhöhter Landverlust auf der Wattseite
- (23) Gefahr von Überflutungen, Inseldurchbrüchen
- (24) mehr Sandvorspülungen, höhere Küstenschutz-Kosten
- (25) Gefährdung von Gebäuden, Infrastruktur
- (26) Verfall von Immobilienwerten
- (27) Versicherungsverteuerung
- (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 (Impakts 4, 5, 6). Diese Faktoren bringen als Impakt 3. Ordnung die Intensivierung von Strömungen und Energiecinwirkungen auf den Meeresboden und damit eine erhöhte Mobilisierung der Sedimente mit sich (vgl. Impakt 12). Gleichzeitig kann die Verschärfung der Wind- und Seegangsbedingungen zu einer Beeinträchtigung der Küstenschifffahrt oder einer vermehrten Gefährdung

durch Havarien führen (Impakt 7), wie auch in den ersten Tagen des Januar 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 Tidenströmungen, 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 "Einengungstrends" (REISE 1993). Die Intensivierung der hydrodynamischen Prozesse und die Häufung der Sturmfluten führt aber gleichzeitig auch über die davon 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).

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 umso 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 Süden 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 Sedimente 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 Millionen 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 1993a,b). 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 ungebrems 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 Wellenauflaufeffekt - ist inzwischen in der Deutschen Bucht seit 1990 bereits mehr als 20 cm höher als sie noch 1980 war (PLATE und 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 überflutungsgefährdeten 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 salzwasser-beeinflussten 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, Dünergürtel) 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 Biotopschutz, 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 bis 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.

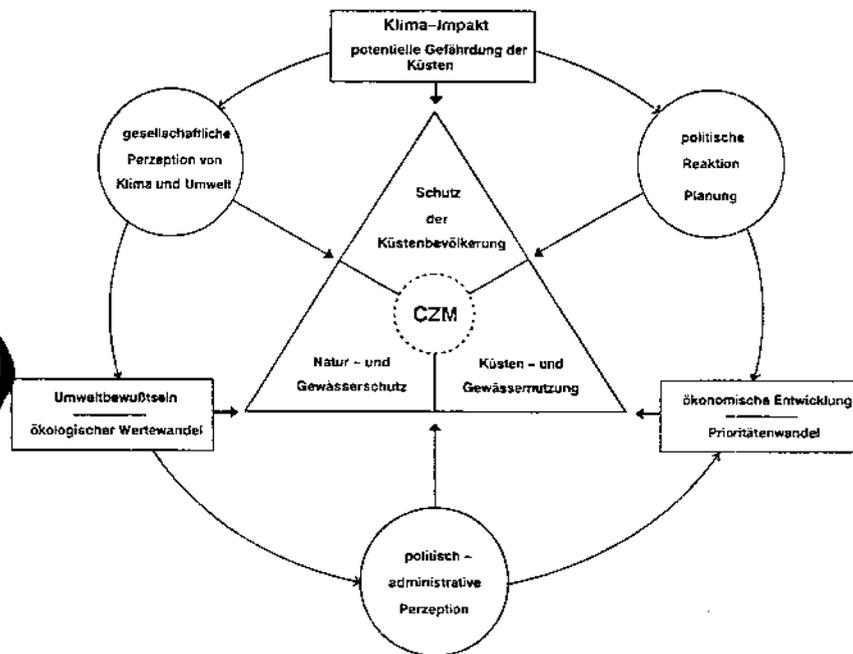


Abb. 4. Ziele und Strukturen, die in einem zukunftsorientierten Küstengebietmanagement (CZM) berücksichtigt werden müssen.

Literatur

ERCHINGER, H.F, 1992. 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.), 1992. Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. 1992.- Economica-Verlag.

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

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 1990. Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. - Cambridge University Press, 364 S.

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

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

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

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

LOZÁN, J., RACHOR, E., REISE, K., VON WESTERNHAGEN, H. & LENZ, W. (Hrsg.), 1994. Warnsignale aus dem Wattenmeer. - Blackwell, Berlin, 387 S.

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

PROKOSCH, P., MIELKE, S. & FLEET, D. (Hrsg.), 1991. The Common Future of the Wadden Sea. - WWF Technical Report, Husum, 454 S.

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

REISE, K., LOZÁN, J.L., RACHOR, E. & VON WESTERNHAGEN, H., 1994. Wohin entwickelt sich das Wattenmeer? In: Lozán, J.L. (Hrsg.): Warnsignale aus dem Wattenmeer. - Blackwell Verlag Berlin, S. 343-348.

SCHELLNHUBER, H.-J. & STERR, H. (Hrsg.), 1993. Klimaänderung und Küste. - Springer Verlag, Heidelberg, 400 S.

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

STERR, H., EBENHÖH, W. & SIMMERING, F., 1995. Küsten im Klimawandel. - Einblicke Nr. 22, Oldenburg, S. 4-9.

Wattökologische Folgen bei Änderungen von Klima und Küste

*Karsten Reise
Wattenmeerstation Sylt der
Biologischen Anstalt Helgoland, List*

1. Einleitung

Flache Gezeitenküsten wie das Wattenmeer sind gegenüber einem Klimawandel besonders sensibel. Die Wassermasse ist relativ klein und der atmosphärische Einfluß groß. Daher bleibt die ausgleichende Wirkung des Meeres mit seiner hohen Wärmekapazität gering. Mit einer Klimaerwärmung ist ein Meeresspiegelanstieg verbunden. Dabei gilt: je flacher eine Küste, desto weitreichender die Folgen. Bei Überflutung werden limnisch-terrestrische Biotope in brackig-marine Biotope umgewandelt.

Der Klimawandel ist nur eine der vom Menschen verursachten, global wirksamen Umweltveränderungen - nicht die am besten verstandene, nicht die gegenwärtig bedeutendste und wahrscheinlich auch nicht die dauerhafteste (VITOUSEK 1994). Deswegen ist es wenig sinnvoll, den Klimawandel isoliert zu betrachten, sondern nur im Zusammenhang mit den anderen Veränderungen an der Wattenmeerküste.

Im Wattenmeer stößt der Klimawandel auf keine stabilen Verhältnisse. Die Zunahme der Sturmfluthöhen seit dem 16. Jahrhundert wird von RHODE (1992) aus historischen Quellen auf 28,5 cm in 100 Jahren geschätzt und nach Pegelaufzeichnungen ist das Tidehochwasser um 25 cm in den letzten 100 Jahren gestiegen (FÜHRBÖTER und JENSEN 1985, JENSEN et al. 1988). Höhere Wasserstände bewirken tiefere Gezeitenrinnen, Lageveränderungen der Inseln und eine landwärts wandernde Uferlinie. Letzteres wurde durch Deiche nicht nur abgewendet, sondern durch Verlandungsförderungen und Eindeichungen sogar in eine seewärts vorgeschobene Uferlinie umgekehrt (KRAMER 1992a). Die besiedelten Teile der Inseln werden in ihrer gegenwärtigen Position gehalten (KELLEKAT 1992, KRAMER 1992b). Wo

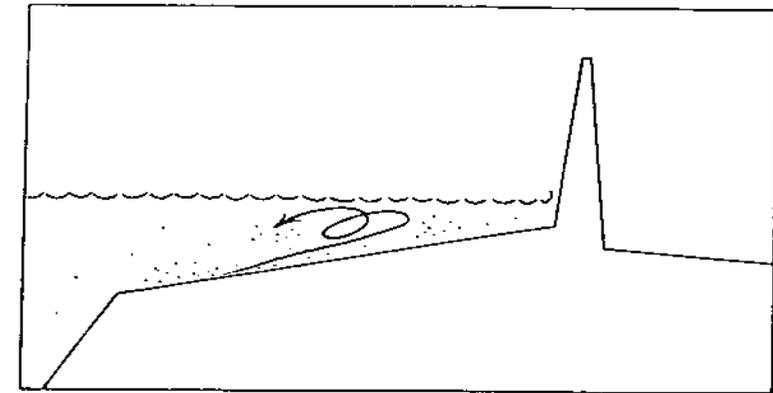
Gezeitenrinnen zu Seehäfen führen, werden sie zunehmend ausgebaggert (FARKE 1994). Als Folge solcher Küstengestaltung klaffen natürlicher Sollwert und vom Menschen aufrecht erhaltener Istzustand weit auseinander. Morphologie und Hydrodynamik der Wattenmeerküste sind aus dem Gleichgewicht. Doch dies ist nur ein Aspekt.

Die Zahl der an der Wattenmeerküste lebenden und Erholung suchenden Menschen hat sprunghaft zugenommen. Die Nährstoffeinträge haben sich erhöht und dies verschob die ökologischen Produktionsverhältnisse. Populationen befischter Arten nahmen ab, während geschützte Vögel zunehmen konnten. Eingeschleppte Exoten haben sich in den Lebensgemeinschaften des Wattenmeeres fest etabliert.

Auf diese Situation an der Küste trifft nun, den Prognosen zufolge, ein beschleunigt ansteigender Meeresspiegel durch die vom Menschen ausgelöste Klimaerwärmung (SCHELLNHUBER und STERR 1993). Welche Wirkungen sind auf die ökosystemaren Prozesse und auf die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften zu erwarten? Eine Antwort wird im Kontext der übrigen Veränderungen gesucht. Diese werden in einem ersten Abschnitt zur modernen Küstenarchitektur und in einem zweiten Abschnitt zu weiteren Veränderungen dargelegt. Im dritten Abschnitt werden in dieses Veränderungsgeschehen die möglichen Folgen einer Klimaerwärmung integriert. Im letzten Abschnitt wird umsichtig überlegt, welche regionalen Maßnahmen sinnvoll wären, um unerwünschte Klimafolgen an der Küste zu mildern oder abzuwenden.

2. Veränderungen durch die moderne Küstenarchitektur

Die Umgestaltung der Küste zur besseren Nutzung durch Landwirtschaft, Schifffahrt und Tourismus sowie zur höheren Sicherheit der Bewohner hat weitreichende, ökosystemare Folgen gehabt (Abb. 1). Die Eindeichungsrate überflügelte die natürliche Verlandungsrate (DIJKEMA 1987). Dies führte zu dem heutigen Defizit an Salzwiesen und Buchten. Potentielle Überschwemmungsräume wurden vom Wattenmeer abgedeicht und Brackröhrichte verschwanden. Aus der Verkleinerung der Wattflächen bei gleichzeitig ansteigenden Wasserständen und vertieften Fahrinnen folgt für das Watt vor den Deichen ein erhöhter Energieeintrag pro Flächeneinheit, verbunden mit stärkeren Turbulenzen und Sedimentumlagerungen (siehe auch KJERFVE



	Moderne Küstenarchitektur	Hypertrophierung
Brackröhricht	-	
Salzwiese	-	±
Schlickbuchten	-	
Wattfläche	-	
Sedimentation	-	
Trübung	+	+
Primärproduktion	-	+
Bodenfauna	-	+
Fische und Vögel	-	+
Biodiversität	-	±

Abb. 1. Abnehmende (-) und zunehmende Tendenzen (+) ökologischer Komponenten im Wattenmeer unter dem Einfluß der durch Eindeichungen und Entwässerungen umgestalteten Küste und der vom Menschen verursachten Nährstoffeinträge. Die Hypertrophierung kompensiert einige der Folgen der modernen Küstenarchitektur. Der Pfeil symbolisiert zunehmende Turbulenzen, weil der steigende Meeresspiegel auf eine vorgeschobene Deichlinie trifft.

et al. 1994, RAFFAELLI 1992). Dadurch nehmen die Schlickwatten ab und feine Partikel bleiben länger in der Schwebe, was zu trüberem Wasser führt. Der seewärtige Gradient von feinen zu gröberen Sedimenten wurde durch die Eindeichungen landseitig abgeschnitten (FLEMMING und NYANDWI 1994).

Dadurch ist das heutige Wattenmeer in einigen Bereichen ärmer an sedimentierbaren Partikeln geworden. Zumindest aber in den verbliebenen Buchten werden wahrscheinlich Salzwiesen und Watten dennoch durch Sedimentation mit dem ansteigenden Meeresspiegel mitwachsen können (BAKKER et al. 1993, STENGEL und ZIELKE 1994).

Auf biologischer Ebene bedeutet dies eine Abnahme der Primärproduktion wegen schlechterer Lichtverhältnisse, instabilerer Sedimente und weniger Schlickwatten. Dieser Produktionsverlust pflanzt sich über die Konsumenten in der Wattbodenfauna fort bis zu den Fischen und Vögeln. Für Fische bedeutet die Entbuchtung der Küstenlinie mit nur noch wenigen, hoch liegenden Schlickwatten eine Beeinträchtigung der Kinderstubenfunktion.

Diese insgesamt negativen Folgen der modernen Küstenarchitektur auf die wattökologischen Verhältnisse werden in ihrer Tendenz durch die Hypertrophierung kompensiert; Flächen- und Biotopverluste ausgenommen. Die erhöhten Nährstoffeinträge steigern die Primärproduktion wo das Licht noch ausreichend ist. Dieser Effekt pflanzt sich über die Konsumenten in der Wattbodenfauna zu den Fischen und Vögeln fort. Eine solche Kompensation durch verschiedene Einwirkungen von außen darf nicht mit ökologischer Stabilität verwechselt werden, denn die beruht auf internen Rückkopplungen (REISE 1995). Weitere Faktoren, wie Fischerei, Jagd und Schadstoffe, verstärken die negativen Folgen moderner Küstenarchitektur, während Naturschutz und das Einschleppen von Exoten die Anzahl der Organismen und die Biodiversität steigern.

3. Veränderte Populationen im Wattenmeer

Durch die diversen Einwirkungen des Menschen auf die Ökologie des Wattenmeeres wurden einige Organismenarten gefördert und andere benachteiligt oder geschädigt (Tab. 1). Die Ursachen sind in einigen Fällen umstritten, da sich meist mehrere Faktoren gleichzeitig änderten, so dass Kombinati-

onswirkungen möglich sind. Ein Hauptfaktor ist die Hypertrophierung. Die durch den Menschen erhöhten Nährstoffeinträge in das Küstenwasser haben Planktonblüten verstärkt, auf den Wattböden ein Massenwachstum von Grünalgen ausgelöst und in einigen Wattgebieten zu höherer Individuenzahl und Biomasse der Wattbodenfauna geführt (REISE 1994a). Diesen Steigerungen stehen Verluste an Seegraswiesen entgegen, deren Entwicklung durch epiphytische Algen gestört wird, vielleicht auch durch dichtere Wattwurmsiedlungen, die beide wiederum durch die Hypertrophierung begünstigt

Objekt	Effekt	Ursache
Phaeocystis (Phytoplankton), Grünalgen	Zunahme	Hypertrophierung
Seegras	Abnahme	Hypertrophierung
Bodenfauna	Zunahme	Hypertrophierung
Rotalgen	Abnahme	Trüberes Wasser
Schnecken, Muscheln	Defekte	Organozinnverbindungen
Austernbänke	verschwunden	Raubbau
Eulitorale Miesmuschelbänke	Abnahme	Raubbau
Sublitorale Miesmuscheln	Zunahme	Muschelkulturen
Epifauna der Rinnen	Abnahme	Schleppnetzfisherei
Stör, Lachs	verschwunden	Flußfisherei
Nagelrochen	verschwunden	Nordseefisherei
Grundel, Zwergzunge	Abnahme	Beifang der Krabbenfisherei
Seestichling, Schlangennadel	Abnahme	Seegrasabnahme
Meerärsche	Zuwanderung	Klima
Ringelgans, Weißwangengans, Brandente, Kormoran	Zunahme	Jagdverbot
Eiderente, Säbelschnäbler, Austernfischer, Brandseeschwalbe	Zunahme	Brutvogelschutz, Hypertrophierung
Zwergseeschwalbe, Seeregenpfeifer	Abnahme	Badebetrieb im Brutgebiet
Lachmöwe, Sturmmöwe	Zuwanderung	Hypertrophierung ?
Heringsmöwe	Zuwanderung	Fischereiabfälle
Exoten	Zunahme	Schiffsverkehr, Marikultur, Anpflanzung

Tab. 1. Historische Veränderungen in den Populationen der Lebensgemeinschaften im Wattenmeer, zusammengestellt aus Angaben in FLEET et al. 1994, LOZÁN et al. 1994, REISE 1990, 1994a, RÖSNER et al. 1994.

sind (PHILIPPART 1994, 1995). Durch Überproduktion ausgelöster Sauerstoffmangel trat im Wattenmeer bisher nur kleinflächig auf, da der tidale Wasseraustausch kompensierend wirkt (HÖPNER und MICHAELIS 1994). Die fischereiliche Nutzung des Wattenmeeres führte zur Zerstörung der natürlichen Austernbänke und zur Umstrukturierung der Miesmuschelbestände, schädigte die Epifauna der Gezeitenrinnen durch über den Grund geschleppte Netze und dezimierte die Fischbestände (LOZÁN et al. 1994, MICHAELIS und REISE 1994, REISE 1994a). Letzteres geschah nur zum Teil durch die Fischerei im Wattenmeer, sondern mehr noch durch den Fang von Wanderfischen in den Flüssen (z.B. Stör und Lachs) oder durch den Fang in der Nordsee (z.B. Nagelrochen). Eine deutliche Populationszunahme erfuhr nur die Meeräsche (*Mugil chelo*), die in flachen Buchten Mikroalgen von Schlickböden abweidet.

Vogelpopulationen profitierten vom Naturschutz. Dies gilt für Durchzügler, wie Ringelgans, Weißwangengans und Kormoran (RÖSNER et al. 1994), ebenso wie für die Brutvögel Eiderente und Brandente, Austernfischer und Säbelschnäbler, Brandseeschwalben und Möwenarten (FLEET et al. 1994). Einigen dieser Arten halfen auch das bessere Nahrungsangebot durch die Hypertrophierung, die Fischereiabfälle (Möwen) und eingedeichte Watten, die ohne landwirtschaftliche Nutzung blieben (Säbelschnäbler).

Zahlreiche Arten wurden von anderen Küsten her eingeschleppt und etablierten sich (REISE 1990, 1994). Mit dem Schiffsverkehr kamen die Planktonalge *Odontella sinensis* und die Wollhandkrabbe *Eriocheir sinensis* aus China, die Sandklaffmuschel *Mya arenaria* und die Schwertmuschel *Ensis americana* aus Nordamerika und die Seepocke *Elminius modestus* aus Australien. Durch Austernkulturen kamen die Auster *Crassostrea gigas*, die Bohrmuschel *Petricola pholadiformis*, die Schnecke *Crepidula fornicata*, der Tang *Sargassum muticum* und die Planktonalgen *Coscinodiscus wailesii* und *Thalassiosira punctigera*. Angepflanzt wurde das Schlickgras *Spartina anglica* und breitete sich dann aus, ebenso wie *Rosa rugosa* und der Sanddorn *Hippophae rhamnoides* und viele andere Pflanzen in den Dünen.

Abgesehen vom Vogelschutz, bewirkten alle diese Veränderungen in der Tendenz eine Abnahme habitatspezifischer, langsam reproduzierender Arten und eine Zunahme opportunistischer, schnell wachsender und kolonisierender Arten. Diese Verschiebung in den Anpassungsformen hat Implikationen

für die Reaktionen auf künftige Veränderungen. Die bisherige Störungsgeschichte hat die Lebensgemeinschaften robuster gemacht.

4. Klimaerwärmung und Meeresspiegelanstieg

Zunächst sei der hypothetische Fall einer Erwärmung ohne Meeresspiegelanstieg betrachtet (Tab. 2). Die Primärproduktion würde sich voraussichtlich erhöhen, da Salzwiesenpflanzen wie das eingeführte Schlickgras in wärmeren Sommern besser wachsen würden (REISE 1994b). In Kombination mit der Hypertrophierung kann es nun aber auf den Watten bei erhöhter Algenproduktion zu Sauerstoffdefiziten kommen. Die durch Freisetzung von Schwefelwasserstoff verursachten schwarzen Flecken im sommerlichen Wattboden dehnen sich dann zum Nachteil der Bodenfauna aus. Deren Biomasse verringert sich, wenn die episodisch auftretenden, strengen Winter ausbleiben. Sie entkoppeln im Wattboden Räuber und Beute und ermöglichen dadurch im jeweils nachfolgenden Sommer das Heranwachsen starker Jahrgänge, insbesondere von Muscheln (BEUKEMA 1992, REISE 1985). Treten diese Entkopplungen nicht mehr auf, sinkt somit auch das Nahrungsangebot für Fische und Vögel. Die Biodiversität würde bei einer Erwärmung ansteigen. Sie ist generell höher an den südlicher gelegenen Küsten mit 2 oder 4°C höherem Temperaturdurchschnitt (VOOYS 1990). Die dort vorhandenen Arten würden zuwandern.

Die generelle Erwärmung wird nun allerdings zwangsläufig mit höheren Wasserständen verbunden sein. In dieser Kombination kommt es zu anderen ökologischen Konsequenzen, weil sich die negativen Auswirkungen der modernen Küstenarchitektur nun verstärken (Tab. 2). Der Energieeintrag pro Wattfläche erhöht sich jetzt schneller und damit auch der Abbruch an Salzwiesenkanten. Schlickwattflächen werden kleiner und durch die stärkeren Turbulenzen nimmt die Sedimentstabilität ab und die Wassertrübung weiter zu. Wo sich die Erwärmung auf die Primärproduktion steigernd auswirkte, werden die Pflanzen nun von der verstärkten Hydrodynamik entwurzelt. Die Bodenfauna, ohnehin in ihrer Gesamtheit nicht von der Erwärmung profitierend, wird nun zusätzlich durch instabilere Sedimente und weitere Schlickwattverluste beeinträchtigt. Für Fische und Vögel nimmt die Nahrung somit verstärkt ab. Die Artenzusammensetzung wird sich mehr und mehr der einer exponierten Küste mit steilem Gefälle von der Hoch- zur Niedrigwas-

serlinie nähern. Solche Küsten sind artenärmer als buchtenreiche mit flachem Gradienten.

Entscheidend für diese insgesamt negative Prognose ist die zunehmende Diskrepanz zwischen der vom Menschen neu festgelegten Küstenlinie und dem natürlichen Sollwert, den eine Ausgleichsküste anstrebt. Durch die historische Entwicklung entstand eine Küstenform, die zwar bei der

	Moderne Küstenform	Hypertrophierung	Erwärmung ohne Meeresspiegelanstieg	Erwärmung mit Meeresspiegelanstieg
Primärproduktion	-	+	+	-
Bodenfauna	-	+	-	-
Fische und Vögel	-	+	-	-
Biodiversität	-	±	+	-

Tab.2. Reaktionstendenzen im Ökosystem Wattenmeer auf die vom Menschen umgestaltete Küste, auf erhöhte Nährstoffeinträge und auf eine klimatische Erwärmung ohne und mit Meeresspiegelanstieg.

prognostizierten Wasserstandszunahme (Verdopplung der bisherigen Rate) weiterhin gehalten werden kann (PETERSEN, dieser Band), aber die nachteiligen Wirkungen auf die ökologische Vielfalt im ungeschützten Wattbereich werden sich verschärfen. Damit wird die Klimaänderung im Wattenmeer insbesondere zu einem ökologischen Problem.

5. Von einer Konfrontation zur Verständigung mit dem ansteigenden Meer

Globale Maßnahmen zur Abwendung vom Menschen verursachter Klimaänderungen können nur sehr langfristig wirksam werden. Regionale Maßnahmen zur Abwehr unerwünschter Folgen sind daher zu überlegen. Bei den gegenwärtigen und den zu erwartenden ökologischen Veränderungen im Wattenmeer nimmt die moderne Küstenarchitektur eine Schlüsselrolle ein. Folglich ist nach einer neuen Küstenform zu suchen, die einen Erhalt oder sogar eine Wiedergewinnung von Biotopen und Lebensgemeinschaften trotz schneller ansteigendem Meeresspiegel ermöglicht (s.a. REISE et al. 1994a).

An einer intensiv genutzten und dicht besiedelten Küste sind solchen Überlegungen enge Grenzen gesetzt. Änderungen der Küstenlandschaft sind nur dort möglich, wo Kõge unbesiedelt blieben oder wo Veränderungen wirt-

schaftlich attraktivere Nutzungen versprechen als die bisherigen, so dass sich die Einwohner dafür entscheiden würden. Das im folgenden skizzierte Modell (Abb. 2) ist daher nur in kleinen Schritten umsetzbar. Außerdem müssen mit solchen Veränderungen erst Erfahrungen gesammelt werden, ehe sie ausgedehnt werden können.

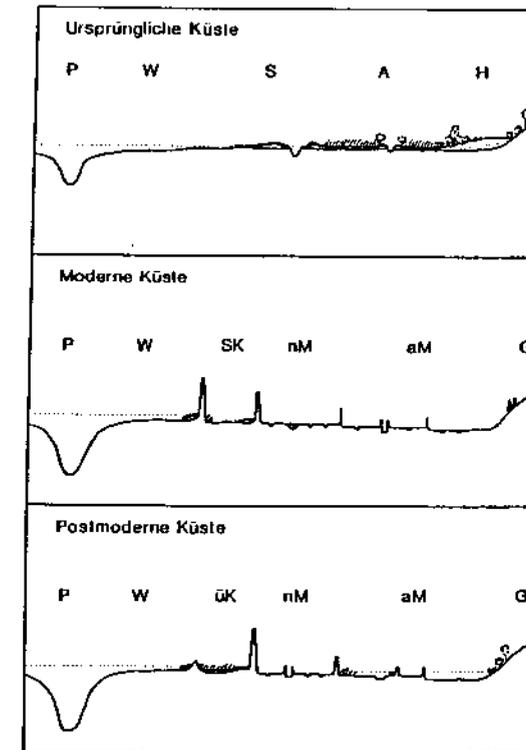


Abb. 2. Schema der Wattenmeerküste vor Beginn der Bedeichung mit Priel (P), Watt (W), ausgedehnten Salzweiden (S), Brackröhricht (B), Auwald (A) und Hochmoor (H) als Wasserspeicher am Geestrand (G) [oben], im heutigen Zustand mit Deichen, Speicherkoog (SK), entwässertem neuer (nM) und alter Marsch (aM) [Mitte] und mit einem Entwurf zur künftigen Gestaltung mit Überflutungskoog (ÜK) und zum Teil nicht mehr entwässertem alter Marsch [unten]. Marsch und Moorboden dunkel, Hochwasserlinie punktiert.

Die Idee besteht darin, die heute abrupte Grenze zwischen entwässerter Marsch und dem Meer wieder fließender zu gestalten und mehr Wasser in der Landschaft zu speichern. Dadurch kann einerseits die Abgabe der Sturmflutenergie auf eine größere Fläche verteilt werden und andererseits wächst eine landschaftliche Vielfalt heran, die in wirtschaftlichen Gewinn umgemünzt werden kann.

Wo heute unbesiedelte Speicherbecken mit einem hohen Seedeich an das Wattenmeer grenzen, sollte bei Sturmfluten ein Eindringen des Meerwassers über einen abgeflachten Deich ermöglicht werden. Das übergeschwappte Sturmflutwasser wird anschließend nur langsam wieder dem Meer zurückgegeben. Mitgeführte Schwebstoffe können vorher sedimentieren. So entstehen binnendeichs Salzwiesen und Brackröhrichte, die durch Sedimentation mit dem ansteigenden Meeresspiegel hochwachsen.

Eine solche Umwandlung bisheriger Speicherbecken hat zur Konsequenz, daß dort die zweite Deichlinie zum Schutzdeich verstärkt werden muss. Eine andere Konsequenz ist, daß die Funktion als Speicher für nicht ins Meer abfließendes Oberflächenwasser ausfällt. Dies führt in den ältesten, weiter binnenlands gelegenen Kögen zu Überschwemmungen. Das Niveau dieser Köge liegt unter dem heutigen Meeresspiegel. Sie entstanden zu einer Zeit als der Meeresspiegel etwa einen Meter tiefer lag als heute und außerdem traten durch die Entwässerung Bodensackungen auf (KRAMER 1992c). So würden Seen entstehen, wo jetzt das Weidevieh gras. Je nach örtlichen Gegebenheiten müssten für die bewohnten Bereiche zusätzliche Dämme errichtet oder die Häuser auf Warften mit erhöhter Zuwegung gesetzt werden. In der Marsch entstünde so ein abwechslungsreiches Mosaik aus Seen, Bruchwäldern, Wiesen und bewohnten Bereichen, das touristisch so attraktiv zu gestalten wäre, dass landwirtschaftliche Verluste mehr als kompensiert werden.

Für das Wattenmeer vor den Deichen haben diese Veränderungen den Vorteil, daß bei Sturmfluten ein Teil der Wassermassen in die Köge mit niedrigem Außendeich eindringen kann und so eine graduelle Energieabgabe möglich wird. Das aufgewühlte Sediment wird mit dem Ebbwasser nicht ausschließlich in die Nordsee hinausgetragen, sondern bleibt zum Teil in den überfluteten Kögen zurück. In diesen Kögen entstehen Überschwemmungs-

biotope mit entsprechender biologischer Vielfalt, die der Küste durch Eindeichungen und Entwässerungen verloren gegangen sind.

Die möglichst kurze, oft buchtenlos vorgeschobene und schar liegende Deichlinie führt zu einer Konfrontation zwischen Land und Meer. Sie bewirkt zusammen mit der Meeresspiegelerhöhung eine Aufsteilung des Gradienten zwischen Deich und tiefen Gezeitenrinnen sowie einen höheren, hydrodynamischen Energieeintrag pro verbliebener Wattfläche. Durch ein Zulassen von Überschwemmungen könnte die Küste mit der Meeresspiegelerhöhung auf natürlichem Wege mitwachsen, könnte sich also anpassen und ihre Biotopvielfalt dabei erhalten.

Dieses Modell ist aber nur eine sinnvolle Option, wenn die Hypertrophierung nicht mehr so zur Geltung kommt wie bisher. In den neu geschaffenen Überschwemmungsgebieten könnte es sonst zu Sauerstoffdefiziten kommen, verbunden mit der Entwicklung toxischer Bakterien (z.B. Botulismus bei Wasservögeln) und Flagellaten (ELBRÄCHTER 1994, HAGGE 1994). Auch die Biodiversität würde in diesen hypertrophen Stillwasserzonen sinken. Wenn es gelingt, gleichzeitig mit der Renaturierung der Küstenform auch die Nährstoffeinträge zu drosseln, dann können sich durchaus auch positive Effekte für die ökologische Entwicklung an der Küste bei einer klimatischen Erwärmung ergeben.

6. Zusammenfassung

Die ökologischen Folgen einer Klimaerwärmung mit ansteigendem Meeresspiegel können nur im Zusammenhang mit den anderen Veränderungen an der Wattenmeerküste prognostiziert werden. Die quantitativen Relationen im Ökosystem und die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften sind in erheblichem Umfang vom Menschen durch Deichbau und Entwässerungen, Hypertrophierung, Fischerei, eingeschleppte Exoten und Naturschutz beeinflusst. Ein Schlüsselfaktor ist die moderne Küstenform. Sie unterliegt zunehmender Diskrepanz zwischen dem durch Eindeichungen gesetzten Istwert und dem natürlichen Sollwert einer Ausgleichsküste. Bei schneller ansteigendem Meeresspiegel führt dies zu Erosionen im Wattbereich. Die Folge ist eine ökologische Verarmung des bisher vielfältigen Wattenmeeres. Zur Kompensation wird vorgeschlagen, die abrupte Grenze zwischen entwässerter Marsch und dem Meer wieder fließender zu gestalten. Dadurch kann

einerseits die Sturmflutenergie über eine größere Fläche verteilt werden, andererseits wächst im Überschwemmungsbereich eine landschaftliche Biotopvielfalt heran, die für die wirtschaftliche Entwicklung der Region eine Chance bedeuten kann.

Literatur

BAKKER, J.P., LEEUW, J. de, DIJKEMA, K.S., LEENDERTSE, P.C., PRINS, H.H.T. & ROZEMA, J., 1993. Salt marshes along the coast of The Netherlands. - *Hydrobiologia* 265: 73-95.

BEUKEMA, J.J., 1992. Expected changes in the Wadden Sea benthos in a warmer world: lessons from periods with mild winters. - *Neth. J. Sea Res.* 30: 73-79.

DIJKEMA, K.S., 1987. Changes in salt-marsh area in the Netherland Wadden Sea after 1600. - In: Huiskers, A.H.L., Blom, C.W.P.M., Rozema, J. (Eds.). *Vegetation between Land and Sea*: 42-49, Junk, Dordrecht.

ELBRÄCHTER, M., 1994. Phytoplankton und toxische Algen im Wattenmeer. - In: Lozán, J.L., E. Rachor, K. Reise, H. von Westernhagen, W. Lenz (Hrsg.). *Warnsignale aus dem Wattenmeer*: 81-86, Blackwell, Berlin.

FARKE, H., 1994. Eingriffe durch Baggerarbeiten. - In: Lozán, J.L., E. Rachor, K. Reise, H. von Westernhagen, W. Lenz (Hrsg.). *Warnsignale aus dem Wattenmeer*: 60-64, Blackwell, Berlin.

FLEET, D.M., FRIKKE, J., SÜDBECK, P. & VOGEL, R.L., 1994. Breeding birds in the Wadden Sea 1991. Wadden Sea Ecosystem No.1. Common Wadden Sea Secretariat & Trilateral Monitoring and Assessment Group, Wilhelmshaven.

FLEMMING, B.W. & NYANDWI, N., 1994. Land reclamation as a cause of fine-grained sediment depletion in backbarrier tidal flats (southern North Sea). - *Neth. J. Aquat. Ecol.* 28: 299-307.

FÜHRBÖTER, A. & JENSEN, J., 1985. Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. - *Die Küste* 42: 78-100.

HAGGE, A., 1994. Ökologische Rolle der Brackwasserseen, Speicherbecken und Ersatzwatten. - In: Lozán, J.L., E. Rachor, K. Reise, H. von Westernhagen, W. Lenz (Hrsg.). *Warnsignale aus dem Wattenmeer*: 205-211, Blackwell, Berlin.

HÖPNER, T. & MICHAELIS, H., 1994. Sogenannte 'Schwarze Flecken' ein Eutrophierungssymptom des Wattenmeeres. - In: Lozán, J.L., E. Rachor, K. Reise, H. von Westernhagen, W. Lenz (Hrsg.). *Warnsignale aus dem Wattenmeer*: 153-158, Blackwell, Berlin.

JENSEN, J., MÜGGE, H-E. & VISSCHER, G., 1988. Untersuchungen zur Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht. - *Die Küste* 47: 135-161.

KELLEKAT, D., 1992. Coastal erosion and protection measures at the German North Sea coast. - *J. Coast. Res.* 8: 699-711.

KJERFVE, B., MICHENER, W.K. & GARDNER, L.R., 1994. Impacts of climate change in estuary and delta environments. - In: Pernetta, J., R. Lee-mans, D. Elder, S. Humphrey (Eds.). *Impacts of Climate Change on Ecosystems and Species: Marine and Coastal Ecosystems*: 31-43, IUCN, Gland, Switzerland.

KRAMER, J., 1992a. Entwicklung der Deichbautechnik an der Nordseeküste. - In: Kramer, J., H. Rohde. (Hrsg.). *Historischer Küstenschutz*: 63-109, Wittwer, Stuttgart.

KRAMER, J., 1992b. Schutz der sandigen Küsten. - In: Kramer, J., H. Rohde (Hrsg.). *Historischer Küstenschutz*: 139-182, Wittwer, Stuttgart.

KRAMER, J., 1992. Binnenentwässerung und Sielbau im Küstengebiet der Nordsee. - In: Kramer, J., H. Rohde (Hrsg.). *Historischer Küstenschutz*: 111-138, Wittwer, Stuttgart.

LOZÁN, J.L., BRECKLING, P., FONDS, M., VEER, H. van de, WITTE, J.IJ., 1994. Über die Bedeutung des Wattenmeeres für die Fischfauna und deren regionale Veränderung. - In: (Hrsg.). *Warnsignale aus dem Wattenmeer*: 226-233, Blackwell, Berlin.

- MICHAELIS, H. & REISE, K., 1994. Langfristige Veränderungen des Zoo-benthos im Wattenmeer. - In: (Hrsg.). Warnsignale aus dem Wattenmeer: 106-116, Blackwell, Berlin.
- PHILIPPART, C.J.M., 1994. Interactions between *Arenicola marina* and *Zostera noltii* on a tidal flat in the Wadden Sea. - Mar. Ecol. Prog. Ser. 111: 251-257.
- PHILIPPART, C.J.M., 1995. Effect of periphyton grazing by *Hydrobia ulvae* on the growth of *Zostera noltii* on a tidal flat in the Dutch Wadden Sea. - Mar. Biol. 122: 431-437.
- RAFFAELLI, D., 1992. Conservation of Scottish estuaries. - Proc. Royal Soc. Edinburgh 100B: 55-76.
- REISE, K., 1985. Predator control in marine tidal sediments. - In: GIBBS, P.E. (Edt.). Proc. 19th Eur. Mar. Biol. Symp.: 311-321, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- REISE, K., 1990. Historische Veränderungen in der Ökologie des Wattenmeeres. - Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, N382: 35-50, Westdeutscher Verlag.
- REISE, K., 1994a. Changing life under the tides of the Wadden Sea during the 20th century. - Ophelia Suppl. 6: 117-125.
- REISE, K., 1994b. Das Schlickgras *Spartina anglica*: die Invasion einer neuen Art. - In: Lozán, J.L. et al. (Hrsg.). Warnsignale aus dem Wattenmeer: 211-214, Blackwell, Berlin.
- REISE, K., 1995. Predictive ecosystem research in the Wadden Sea. - Helgoländer Meeresunters. 49: 495-505.
- REISE, K., LOZÁN, J.L., RACHOR, E., von WESTERNHAGEN, H., 1994. Ausblick: wohin entwickelt sich das Wattenmeer? - In: Lozán, J.L., E. Rachor, K. Reise, H. von Westernhagen, W. Lenz (Hrsg.). Warnsignale aus dem Wattenmeer: 343-348, Blackwell, Berlin.
- RHODE, H., 1992. Entwicklung der hydrologischen Verhältnisse im deutschen Küstengebiet. - In: Kramer, J. H. Rhode (Hrsg.). Historischer Küstenschutz: 39-62, Wittwer, Stuttgart.
- RÖSNER, H.-U., ROOMEN, M. van, SÜDBECK, P. & RASMUSSEN, L.M., 1994. Migratory waterbirds in the Wadden Sea 1992/93. - Wadden Sea Ecosystem No. 2. Common Wadden Sea Secretariat & Trilateral Monitoring and Assessment Group, Wilhelmshaven.
- SCHELLNHUBER, H.-J. & STERR, H., (Edts.) 1993. Klimaänderung und Küste: Einblick ins Treibhaus. - Springer, Berlin.
- STENGEL, T. & ZIELKE, W., 1994. Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. - Die Küste 56: 93-117.
- VITOUSEK, P.M., 1994. Beyond global warming: ecology and global change. - Ecology 75: 1861-1876.
- VOOYS, C.G.N. de, 1990. Expected biological effects of long-term changes in temperatures on benthic ecosystems in coastal waters around the Netherlands. - In: Beukema, J.J., Wolf, W.J., Brouns, J.W.M. (Edts.). Expected Effects of Climatic Change on Marine Coastal Ecosystems: 77-82, Kluwer, Dordrecht.

Auswirkungen von Klimaänderungen auf Salzwiesen und ihre Fauna

*Dietrich Mossakowski
Institut für Ökologie und Evolutionsbiologie
Universität Bremen*

1. Einleitung

Die Salzwiesen der Küsten sind ein einzigartiger Lebensraum, sie bilden den Übergang vom Meer zum Land (HEYDEMANN 1967). Ihre Besiedlung durch Tiere ist außerordentlich artenreich, es tritt eine Fülle von hochspezialisierten Arten auf, die nur hier existieren können, obwohl Überflutung und Salzgehalt extreme Anforderungen stellen.

Aus den derzeit diskutierten Klimaänderungsszenarien ergeben sich für die Salzwiesen besonders zwei Faktorengruppen, die Veränderungen in der Komposition der Fauna bewirken werden: 1. die vorausgesagte Erhöhung der Temperatur, die küstenunabhängig erfolgt und 2. der Anstieg des Meeresspiegels, mit dem eine Reihe von Einflüssen eng gekoppelt wirken: Zunahme des Tidenhubs, der Extremereignisse (Sturmfluten) und der Erosion. Dagegen wird der Salzgehalt wie schon bisher bewirken, dass nur Arten in den Salzwiesen siedeln können, die ihn wenigstens tolerieren.

Wenn man etwas über die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Fauna aussagen will, ergeben sich eine Reihe von Problemen: Können Einwirkungen des Menschen auf die Natur von den natürlicherweise ablaufenden Prozessen unterschieden werden? Wie sind kurzfristige und langfristige Populationsschwankungen von klimabedingten Veränderungen zu trennen? Wie wirken sich die Veränderungen auf niedriger Ebene in der Hierarchie biologischer Systeme für das gesamte System aus?

Veränderungen in Ökosystemen können auf unterschiedlichen Ebenen betrachtet werden. Eine Verschiebung in der Häufigkeit einer wichtigen Art, die selbst nur einen sehr geringen Stoffumsatz haben mag, kann erhebliche Veränderungen für das gesamte System auslösen. Eine Analyse der

Veränderungen in der Besiedlung von Salzwiesen durch Tiere kann daher nicht nur in dem Versuch einer Beschreibung auf der Ökosystemebene bestehen, da die Verhältnisse hier viel zu kompliziert sind, um ohne Kenntnis der Veränderungen bei konkreten Arten und Populationen fundierte Aussagen über zukünftige Entwicklungen abzuleiten.

Da die Salzwiesen früher großflächig eingedeicht und die modernen Deiche weit ins ehemalige Vorland hinaus gebaut wurden, sind die heutzutage bestehenden Flächen nur als Restbestand zu bezeichnen. Der größte Flächenanteil der in unserem Bereich existierenden Salzwiesen wurde bisher beweidet, was zu der "typischen" Golfrasen-Struktur führt. Nur sehr begrenzte Flächen weisen eine Vegetation und Artenzusammensetzung auf, wie sie ohne menschliche Eingriffe als natürliche Salzwiesen großflächig z.B. in der Ho-Bucht der Halbinsel Skallingen existieren.

Die Voraussagen über die zukünftigen Temperaturänderungen schwanken, überwiegend wird mit einer Zunahme der Temperaturen infolge des Treibhauseffektes gerechnet. Dass der Meeresspiegel ansteigt, ist ein säkulares Ereignis (ERCHINGER et al. 1994), diskutiert wird das künftige Ausmaß und der Anteil, der durch die anthropogenen Klimaveränderungen zustande kommt. Erosion von Salzwiesen ist an manchen Stellen offensichtlich, teilweise wachsen die Salzwiesen schneller auf als der Meeresspiegel ansteigt (ERCHINGER et al. 1994). Interessant erscheint in diesem Zusammenhang die Beobachtung am Neßmerheller: 1930 stieg das Gelände allmählich zum Deich hin an, 1984 existierte an dieser Stelle eine ca. 1,50 m hohe Abbruchkante (ERCHINGER et al. 1994). Bei vorgelagertem niedrigen Watt und ohne Lahnungen erfolgte der stärkste Abbruch in einem bis zu 2,5 m breiten Streifen pro Jahr.

Die Anzahl der Extremereignisse nimmt zu: An der Wurster Küste bei Arensch traten in den 60er Jahren eine, in den 70er zwei, in den 80er eine, dagegen von 1990 bis 1995 schon fünf Sturmfluten auf, die den Sommerdeich überfluteten (SCHRÖDTER 1993).

Die in meiner Arbeitsgruppe laufenden Untersuchungen werden an der Wurster Küste in enger Kooperation mit den Vegetationskundlern um Prof. H. Cordes durchgeführt. Zunächst konzentrierten sich die Untersuchungen auf die Salzwiesen des Ästuarbereichs bei Weddewarden (HILDEBRANDT 1990), ab 1991 werden zwei Teilgebiete weiter im Norden untersucht: - bei

Arensch die Salzwiesen des Vorlandes vor dem Sommerdeich und der Binnengroden mit verschiedenen, mehr oder minder stark ausgesüßten Vegetationseinheiten. Das Vorland wurde begrüppt und mit Schafen beweidet. Teilflächen sind seit kurzem aus der Nutzung genommen; - bei Cappel Salzwiesen im Vorland als Referenzfläche, die 60 Jahre alt ist und nicht begrüppt und nicht beweidet wurde und wird.

Wir bearbeiten die Avifauna und verschiedene Arthropodengruppen, die zahlreiche Arten hochgradiger Spezialisten der Salzwiesen enthalten. In meinen Ausführungen werden Laufkäfer als Beispiel eine besondere Rolle spielen. LINDROTH (1949) hat in seiner epochalen Bearbeitung gezeigt, dass Carabiden in ihrer Verbreitung und Verteilung besonders von abiotischen Faktoren, insbesondere von Temperatur und Feuchtigkeit, abhängen. Das lässt sie besonders geeignet erscheinen für die Beantwortung der anstehenden Fragen.

Im folgenden sollen vier Gesichtspunkte behandelt werden:

1. Der historische Aspekt: Es sollen nur relativ kurzfristige Änderungen berücksichtigt werden, d.h. solche, die in Jahren bzw. Jahrzehnten ablaufen. Längerfristige Klimaschwankungen wie das eiszeitliche und postglaziale Auf und Ab der Temperatur mit Meeresspiegelschwankungen von über 100 m werden hier nicht berücksichtigt. Sie zeigen uns, dass das Auftreten von Klimaänderungen "normal" ist.

2. Welche Faktoren wirken und wie können sie voneinander isoliert werden?

3. Was ist für die Fauna prognostizierbar?

4. Wo besteht der dringlichste Forschungsbedarf?

2. Historischer Aspekt: Welche Effekte auf Populationen und Arten lassen sich nachweisen, die durch Klimaänderungen der letzten Jahrzehnte interpretiert werden können?

Es ist eine triviale Feststellung: Veränderungen der Lebensräume, der Vegetation und Fauna sind überall dort zu beobachten, wo man regelmäßig und genauer hinschaut. Eine Veränderung als Klimafolge zu interpretieren, ist eine ganz andere Sache. In der Regel werden Biologen für die vielfältigen

Veränderungen in der Natur zunächst die Hypothese aufstellen, dass sie durch unmittelbare Einwirkung des Menschen zustande gekommen sind, d. h. durch die Veränderung und Zerstörung der Lebensräume. Und diese Hypothese wird meistens auch bestätigt werden.

Ein eindeutiges Beispiel dafür bietet der Laufkäfer *Carabus nodulosus* (früher: *C. variolosus*), ein Bewohner von Bitterschaumkraut-Quellfluren auf Schwemmkegeln an Hängen (GRIES et al. 1973). Die Art hatte früher ihr nördlichstes Vorkommen in den Harburger Bergen vor den Toren Hamburgs. Heute ist kaum mehr vorstellbar, dass die Art dort einmal gesiedelt hat, die Drainage der Wälder erweist sich als sehr wirkungsvoll.

Klimaveränderungen können zur Ausbreitung, zum Verschwinden einer Art oder zur Verlagerung ihres Areals führen. Dabei treten unterschiedliche Reaktionsmuster von Populationen und Arten auf. Es ist z. B. zu erwarten, dass wärmeliebende Arten ihr südlich gelegenes Areal nach Norden ausweiten, wenn die Temperaturen in der Saison steigen, in der die Arten aktiv sind. Kälteliebende Arten werden gleichzeitig verschwinden.

Diese Prozesse können aber im einzelnen unterschiedlich bewirkt sein und unterschiedlich ablaufen:

Arealausweitung durch Besiedlung neuentstandener Lebensräume

Die Besiedlung neuer Lebensräume hängt von der Ausbreitungsfähigkeit der Arten ab, die für viele Salzwiesen-Arten von den meisten Autoren als groß eingeschätzt wird. Das beruht aber für viele Arten auf Annahmen, oder es liegen nur Einschätzungen des potentiellen Ausbreitungsvermögens vor (DEN BOER 1970, DESENDER et al. 1984). Aussagen zum tatsächlichen Ausbreitungserfolg betreffen besonders die flugfähigen Arten der Carabiden (HEYDEMANN 1967, MEYER 1973, 1980, MOOK 1971), von Spinnen ist der Flug am Faden bekannt. Dass eine potentiell gute Ausbreitungsfähigkeit wenig aussagt über das Ausmaß, in dem sie genutzt wird, zeigte TISCHLER (1985). Er fand bei phytophagen Käfern in Salzwiesen, dass trotz guter Flugfähigkeit nur ein Bruchteil (< 1%) der Tiere wanderte und das nur über eine relativ geringe Distanz.

Die tatsächliche Ausbreitungsfähigkeit von nur an Salzstellen auftretenden Carabiden konnten GERSDORF und KUNTZE (1948) belegen: Im niedersächsischen Binnenland entstanden durch Ablagerung von Abraum

neue Salzstellen an Orten, die vorher salzfrei und nicht in unmittelbarer Nähe anderer Binnenlandsalzstellen gelegen waren. Binnen weniger Jahre waren diese Plätze von spezifischen Salzstellen-Arten besiedelt.

Neben der aktiven Migration spielt für die großräumige Dispersion nach HEYDEMANN (1967) bei vielen Arten Verdriftung eine Rolle.

Klimabedingte Arealausweitung

Seit einigen Jahren wird an verschiedenen Spinnen und Insekten beobachtet, dass sie ihr Areal in Mitteleuropa nach Norden ausweiten. Es handelt sich dabei um wärmeliebende, südeuropäische Arten.

Argiope bruennichi, die Zebra spinne, ist heute im südlichen und mittleren Deutschland verbreitet und häufig. Sie erreicht inzwischen auch Nordrhein-Westfalen (BUSSMANN und FELDMANN 1995),

die Wanze *Graphosoma italicum* tritt seit 1992 zahlreicher in Sachsen auf,

die Libelle *Hemianax ephippiger* ist eine Art, die aus Nordafrika nach Südfrankreich verdriftet wird. In der Camargue kann man frisch geschlüpfte Tiere fangen und nur dort gelingt es der Art, die zweite Generation im Jahr in Europa erfolgreich abzuschließen (PETERS 1987). Diese Art hat in den letzten Jahren nachweislich in Sachsen gebrütet (KLAUSNITZER mdl.).

Diesen Beispielen ist gemein, dass es sich jeweils um auffällige Arten handelt, deren Auftreten mit großer Sicherheit bemerkt worden wäre, wenn sie früher vorhanden gewesen wären. Bei der Mehrzahl der Arten wissen wir dagegen fast nichts über derartige Prozesse. Das gilt auch für viele Salzwiesen-Insekten.

Arealverlust durch lokales Aussterben

Als Beispiel für den klimatisch bedingten Rückgang einer Art in einem größeren Gebiet, kann nach GRIES et al. (1973) eine Art der Gattung *Carabus* gelten: Während dieses Jahrhunderts ist *Carabus intricatus*, ein blaugefärbter Großlaufkäfer, im atlantischen Bereich von Nord- und Westdeutschland zurückgegangen. Diese Art kam in Westfalen im 19. Jahrhundert in fast allen gebirgigen und hügeligen Gegenden vor, seit Beginn des 20. Jahrhunderts ging sie überall zurück. Seit 1950 sind nur vier

Funde aus Westfalen bekannt, eine Nachsuche nach dieser mehr südlich verbreiteten, wärmeliebenden Art blieb erfolglos.

Das korreliert eng mit der Zunahme des atlantischen Charakters des Klimas in Nordwestdeutschland. RINGLEB (1940) beschrieb, dass die Sommertemperaturen ab- und die Wintertemperaturen zunahmten, beginnend vor der Jahrhundertwende.

Klimaeinfluß oder Fluktuation

Für zahlreiche Carabiden-Arten hat DEN BOER (1977) in einer Langzeitstudie nachgewiesen, dass die Bestände mit der Witterung korreliert schwanken. Folgt die Witterung im Mittel einem Klimatrend, sind daher tendenzielle Veränderungen der Populationen zu erwarten. Hiervon müssen populationsdynamische Prozesse unterschieden werden, die nicht auf Klimawirkungen beruhen (z. B. langfristige Zyklen der Populationsgröße). Die Unterscheidung ist im konkreten Fall jedoch schwierig.

Bei dem Carabiden *Bembidion aeneum* ist eine sehr starke Zunahme in der Häufigkeit beobachtet worden, die am Beispiel unserer Fänge an der Wurster Küste (Tab. 1) belegt sei.

Untersuchungsjahr	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
Fallentage	2117	1470	0	2520	4419	5800	5713
<i>Bembidion aeneum</i>	6	202	-	862	1072	2763	4679

Tab. 1. Zunahme der Häufigkeit von *Bembidion aeneum* im Vorland von Weddewarden (Ästuarwiesen, Wurster Küste, nördlich Bremerhaven. (Nach MOSSAKOWSKI 1991).

Bemerkenswert ist, dass diese Art auch im Binnenland stark zunahm und dabei ihr Biotopspektrum erweiterte (HANDKE 1992). In der Zwischenzeit sind die Bestände im Bremer Raum wieder zurückgegangen (DÜLGE 1996), was ebenfalls für die Wurster Küste für die meisten Standorte zutrifft (FRÄMBS 1995). Hier kann die Abnahme der Fangzahlen dieser Art teilweise durch die Veränderung der Lebensräume bedingt sein, denn

zunehmende Höhe des Grasbewuchses korreliert mit dem Rückgang der Anzahlen (FRÄMBS 1995).

3. Welche Faktoren wirken und wie können sie voneinander isoliert werden?

Für die terrestrisch lebenden Salzwiesentiere sind insbesondere Salzgehalt, Überflutung, Temperatur und Vegetationsstruktur (Bewirtschaftung) als Faktoren wichtig. Die Veränderungen des Klimas werden sich hauptsächlich auf

- die Temperaturen, die nach den angenommenen Szenarien generell zunehmen sollen und

- den Meeresspiegel auswirken, der ebenfalls steigen wird und dessen Anstieg einen küstenspezifischen Komplex von Veränderungen nach sich ziehen wird: die Zunahme in der Höhe der Fluten, die Zunahme des Tidenhubs und die Zunahme von Extremereignissen (Sturmfluten).

Zum Einfluss der Bewirtschaftung auf die Fauna liegen Untersuchungen vor (IRMLER und HEYDEMANN 1987, OLBRICH 1995), umfangreiche Laborexperimente zu Temperatur und Überflutung führte HEYDEMANN (1967) durch, dagegen versuchte LOHSE (1987) durch die Analyse von Felddaten, die wirkenden Faktoren zu trennen. Die Möglichkeiten zur Trennung unterschiedlicher Einflussgrößen werden an Carabiden von MÜLLER-MOTZFELD (1995) ausführlich dargestellt. Im folgenden sollen zwei Gesichtspunkte behandelt werden: Die Temperaturwirkungen und die Bedeutung der Extremereignisse.

Temperaturanstieg

Die Kenntnis physiologischer Reaktionen bietet die entscheidende Voraussetzung zur kausalen Interpretation z. B. der Verschiebung einer Verbreitungsgrenze, die durch das Aussterben lokaler Populationen entsteht. Solange keine Analyse der Kausalität vorliegt, muss man sich mit HENGEVELD (1990) bewusst sein, dass es sich nur um Indizien handelt.

Die Wirkung von Klimaveränderungen kann besonders gut an der Reaktion auf die Temperatur beschrieben werden. Dabei ergibt sich sofort die Frage, was heißt Temperatur? Organismen reagieren ja kaum auf Mittelwerte

abstrakter Klimagrößen. Es ist wichtig, die Reaktionen von Warmblütlern und Wechselwarmen getrennt zu betrachten. An 51 nordamerikanischen Singvogelarten konnte ROOT (1988) zeigen, dass die Nordgrenzen der Verbreitung durch die Minimaltemperaturen des Januars bedingt sind. Sie lag von Art zu Art unterschiedlich, aber die Stoffwechselrate lag an dieser Grenze jeweils beim 2,5-fachen der basalen Rate.

Im Gegensatz zu diesen Warmblütlern werden für Wechselwarme allgemein die niedrigen Temperaturen des Sommers als für die Verbreitung begrenzend angesehen. Das erschloss für Carabiden bereits LINDROTH (1949). Experimentelle Untersuchungen führte RYKENA (1987) an Eidechsen durch, die fand, dass deren Eizeitigungs-Temperaturen sehr gut mit den sommerlichen Temperaturen an der Nordgrenze der Verbreitung übereinstimmen.

Wendet man diese Befunde auf das oben geschilderte Beispiel von *C. intricatus* an, liegt der Schluss nahe, dass die sommerlich niedrigeren Temperaturen im atlantischen Bereich den Grund für den Rückgang dieser Art darstellen können. Andererseits ist für verschiedene Carabiden bekannt (THIELE 1977), dass sie zur Eireifung Kälteperioden während der Winterruhe benötigen, diese können bei *Carabus*-Arten erstaunlich lang sein (MALAUSA 1977: 5 Monate bei 5 °C für *C. intricatus*). Das heißt, während der Aktivitätsphase der Imagines braucht diese Art relativ hohe Temperaturen, für das Vorkommen ist aber ebenso wichtig, welche Temperaturen während der Überwinterung der Tiere herrschen. Die Art wird am Nordrand ihres Verbreitungsgebietes daher nicht von einem allgemeinen Temperaturanstieg profitieren, da hier für das Vorkommen kältere, längere Winter der entscheidende Faktor sind. Mit diesem Beispiel soll gezeigt werden, dass entscheidend für eine Prognose über die Auswirkungen des erwarteten Temperaturanstiegs die Kenntnis der genauen Wirkungsmechanismen ist.

Bei Salzwiesentieren ist nicht einmal die Kausalität der Salzbindung geklärt. Man kann nur sagen, dass diese Arten an Salz-Habitat gebunden sind, ob die Habitatbindung ursächlich auf den Salzfaktor zurückzuführen ist, bleibt für die meisten Arten weitgehend ungeklärt.

Extreme Überflutungen

Am Beispiel der Überflutungen lässt sich zeigen, dass experimentelle Labordaten allein für eine Aussage über die Wirkung von Klimänderungen nicht ausreichen. HEYDEMANN (1967) konnte zeigen, dass Salzwiesenarten z. T. erstaunlich lange Überflutungszeiten im Labor überleben konnten. Diese Fähigkeit können diese Tiere bei Überschwemmung ihres Lebensraumes nutzen, sofern sie nicht verdriftet werden. Erste Erfahrungen bei Sturmfluten zeigen, dass viele Salzwiesenarten verdriftet und in nicht unerheblichen Anzahlen fernab von der Salzwiese durch den Wellenschlag verfrachtet werden (FRÄMBS 1995).

4. Was ist für die Fauna prognostizierbar?

Neben den direkten Wirkungen der veränderten Klimabedingungen auf die Fauna sind indirekte durch die Pflanzenwelt zu erwarten: Veränderungen der Häufigkeit von Pflanzenarten und der Artenzusammensetzung der Salzwiesen werden die Struktur des Lebensraumes für Tiere umgestalten. Dominanzverschiebungen und Veränderungen im Arteninventar der Zoozönosen können wiederum zu erheblichen Auswirkungen auf das Gefüge des gesamten Ökosystems führen.

In den anders strukturierten Salzwiesen der nordamerikanischen Küsten lebt eine häufige Zikade der Gattung *Porkolesia*. Trotz eigener geringer Biomasse und eines niedrigen Energieflusses durch diese Tiere wird das Wachstum der *Spartina*-Bestände durch das Saugen der Zikade stark beeinflusst (POMEROY und WIEGERT 1981). Die Nutzung der pflanzlichen Biomasse durch herbivore Tiere kann bis zu 90 % (MATTSON und ADDY 1975) betragen. Eine Verschiebung in der Häufigkeit einer solchen Art kann die Struktur des ganzen Lebensraumes nachhaltig beeinflussen. Vor dem Hintergrund unseres sehr begrenzten Wissens und der Komplexität der Ökosysteme bleibt die Möglichkeit für Voraussagen eng begrenzt.

Eine Temperaturerhöhung kann zu erheblichen Veränderungen der Zoozönose führen. Neben Arten, deren Toleranz sehr breit ausgebildet ist und die daher eher wenig Reaktion erwarten lassen, ist potentiell bei Spezies mit niedriger Vorzugstemperatur ein Zurückweichen, bei wärmeliebenden Formen eine Ausweitung ihrer Populationsgröße und ihres Areals zu erwarten. Da Populationsgrößen nur schwierig und mit großem Aufwand zu messen sind, ist es sinnvoll, zunächst die Areale der Arten zu betrachten.

Aussagen zu denkbaren Arealverschiebungen als Folge der Temperaturerhöhung sind für Tiere des Salzwiesenbereiches bisher nur in Einzelfällen möglich: Der südwestlich verbreitete, wärmeliebende Laufkäfer *Notiophilus substriatus* wird sich nach Norden ausbreiten, er erreicht in Schleswig-Holstein die Nordgrenze seiner Verbreitung und kann dort nach HEYDEMANN (1962) nur auf den exponierten Deichflächen leben. Weiter südlich im Bereich von Bremen lebt er auch noch relativ deichnah, aber auch im Binnenland. In Holland tritt diese Art bereits weiter verbreitet auf.

Auch wenn die Prognose, dass *Notiophilus substriatus* sein Areal nach Norden ausweiten wird, relativ leicht zu treffen ist, bleibt die Frage, welche Lebensräume dabei besiedelt werden, wesentlich schwerer zu beantworten. Die Verschiebung des Areals nach Norden muss nicht bedeuten, dass die betrachtete Art ihre Lebensansprüche dort im gleichen Biotop realisiert finden wird (Kühnelt'sches Prinzip der regionalen Stenotopie). Vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass Prognosen im Detail viel umfassendere Kenntnisse voraussetzen, als sie selbst für als gut untersucht geltende Organismen wie Carabiden vorliegen.

Wie schwer es fällt, sich von der Vorstellung einer simplen Verschiebung zu verabschieden, zeigt die Betrachtung der Verhältnisse während der Eiszeiten. NETTMANN (1995) wies eindrucksvoll daraufhin, wie aus einer Veränderung der Areale verschiedener Arten eine grundlegende Umstrukturierung des Lebensraumes bewirkt wird und dass eine eiszeitliche Kältesteppe schwer vorstellbar ist, in der tatsächlich Leoparden Moschusochsen jagen und Hyänen Rentiere verfolgen.

5. Forschungsbedarf

Gibt es die Fauna der Salzwiese?

Die Artenzusammensetzung ist qualitativ unterschiedlich entlang der Nord- und Ostseeküste. Die bekannten Unterschiede im Salzgehalt, im Überflutungsgeschehen und im Klima können als Freilandexperiment genutzt werden, um ihren Einfluss auf die Verteilung der Tiere zu analysieren. Dazu ist eine quantitative Beschreibung der Salzwiesen-Fauna unterschiedlicher Regionen mit identischer Methodik notwendig, die bisher fehlt. Selbst die Zonierung zwischen Watt und Deich ist hinsichtlich der Fauna noch sehr unzureichend bekannt!

Die Carabiden-Fauna der Salzwiesen der Wurster Küste setzt sich zu 98 % aus Arten zusammen, die in ihren Anpassungen extrem an Salzbiotope gebunden sind. Ein Vergleich der Besiedlung von Außengroden und salzwasserbeeinflussten, aber im Sommer nicht überfluteten Bereichen hinter dem Sommerdeich zeigt, dass bestimmte Arten wie *Bembidion iricolor*, die nur in Salzbiotopen auftreten, gegen sommerliche Überflutungen intolerant sind (OLBRICH 1995). Signifikante Differenzen zwischen Flächen vergleichbarer Vegetation, aber unterschiedlicher Beweidung wurden bei Carabiden nicht gefunden.

Konsequenz hinsichtlich der Klimafolgen:

Bei steigendem Meeresspiegel - und wer zweifelt daran, dass er steigt! - werden zunächst die Salzwiesen überflutet. Es ist anzunehmen, dass Unterschiede in den Sedimentationsbedingungen innerhalb dieses Abschnitts der Wurster Küste keine große Rolle spielen, da beide Gebiete in einem Bereich mit geringer Verlandungsneigung liegen (STEPHAN 1985, Aufwachs beiderseits des Cappeler Tiefs 25 cm in 20 Jahren). Will man die frühzeitige Überflutung durch Aufgabe der Nutzung vermeiden und eine naturnahe Salzwiese entwickeln, ist allerdings zu bedenken, dass dies nicht allein durch Beenden der Schafbeweidung erreichbar ist. Statt der Begrüppung muss eine natürliche hydrologische Dynamik zugelassen werden, statt der Schafbeweidung wird von manchen Autoren eine extensive Rinderbeweidung befürwortet, um eine artenreichere Salzwiese zu erhalten (BAKKER 1993, KINDER 1995), die erst längerfristig in einen natürlichen Zustand ohne Nutzung zurückgeführt werden kann.

Ausbreitungsvermögen

Die Mehrzahl der Untersuchungen benutzt das potentielle Ausbreitungsvermögen der Arten, wichtig für Voraussagen ist aber die Kenntnis der tatsächlichen Verhältnisse. Im lokalen Maßstab kann das durch Markierungsexperimente untersucht werden, für großräumigere Aussagen können genetische Marker (Enzym- und DNA-Varianten) sehr gut eingesetzt werden, um Fragen der Populationsabgrenzung (Metapopulationen) zu beurteilen, die von besonderem Naturschutzinteresse sind. Außerdem können mit diesen Daten zurückliegende Ausbreitungsvorgänge rekonstruiert werden.

Wie schon angedeutet wurde, bedarf es vertiefter Kenntnisse der Biologie von spezifischen Arten, ihrer Populationsökologie und Ökophysiologie, um

kausale Wirkungen zu klären und auf dieser Grundlage die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Fauna abschätzen zu können.

Schaffung von Ersatzflächen für Salzwiesen

Ein wichtiger Aspekt, der verstärkt untersucht werden muss, ist die Rückverlagerung bzw. Öffnung von Deichen, um neue Flächen für Salzwiesen zu gewinnen, wie das bereits an verschiedenen Stellen der Nord- und Ostsee erfolgt: Holland: Lauwerszee; Niedersachsen: Wurster Küste bei Spieka; Schleswig-Holstein: Stakendorf, Beltringharder Koog; Mecklenburg-Vorpommern: Karrendorfer Wiesen. Nur durch solche Maßnahmen und ihre begleitende wissenschaftliche Untersuchung können fundierte Vorschläge für ein zukünftiges Management mit dem Ziel der Erhaltung dieser Lebensräume ausgearbeitet werden, die eine Abstimmung der verschiedenen Ansprüche der Gesellschaft an die Salzwiesen (Küstenschutz, Naturschutz, Nutzung, Fremdenverkehr) ermöglicht.

Literatur

- BAKKER, J.P., 1993. Strategies for grazing management on salt marshes. - Wadden Sea Newsletter, 1-2.
- BUSSMANN, M. & FELDMANN, R., 1995. Aktueller Nachweis thermophiler Tierarten in Westfalen und angrenzenden Gebieten. - Natur und Heimat 55: 107-118.
- DEN BOER, P.J., 1970. On the significance of dispersal power for populations of carabid beetles (Coleoptera, Carabidae). - Oecologia (Berl.) 4: 1-28.
- DEN BOER, P.J., 1977. Dispersal power and survival. Carabids in a cultivated countryside. - Miscellaneous papers, Wageningen 14, 190pp.
- DESENDER, K., MALFAIT, J.P. & VANEESCHOUTTE, M. 1984. Allometry and evolution of hind wing development in macropterous carabid beetles. - In: den Boer PJ et al. (Edts.) Carabid Beetles. Fischer, Stuttgart, 101-112.
- DILKEMA, K.S., 1992. Sea level rise and management of salt marshes. - Wadden Sea Newsletter 1992 (2): 7-10.

DÜLGE, R., 1996. Laufkäferuntersuchungen (Coleoptera: Carabidae) im Bremer Grünland - ein Überblick. - Bremer Beiträge für Naturkunde und Naturschutz 1: 75-81.

ERCHINGER, H.F., COLDEWEY, H.G., FRANK, U., MANZENRIEDER, H., MEYER, C., SCHULZE, M. & STEINKE, W., 1994. Erosionsfestigkeit von Hellern. - KFKI-Forschungsbericht, Norden.

FRÄMBS, H., 1995. Laufkäfer (Carabiden). - In: Kinder M, Främbs H, Bach L et al. 1995: Salzwiesenprojekt Wurster Küste. Abschlußbericht zu den wissenschaftlichen Begleituntersuchungen 1992-1995.

GERSDORF, E. & KUNTZE, K., 1948. Künstliche Salzstellen um Hannover als Fundorte halobionter und halophiler Carabiden. - Beitr. Naturkd. Niedersachsens 4: 15-18.

GRIES, B., MOSSAKOWSKI, D. & WEBER, F., 1973. Coleoptera Westfalica: Familia Carabidae, Genera Cychrus, Carabus und Calosoma. - Abh. Landesmus. Naturkd. Münster 35: 1-80.

HANDKE, K., 1992. Zur Ausbreitung von *Bembidion aeneum* Germ (Col., Carabidae) in der Bremer Wesermarsch. - Z. Ökol. Naturschutz 1: 72-74.

HILDEBRANDT, J., 1990. Terrestrische Tiergemeinschaften der Salzwiesen im Ästuarbereich. - Diss. Universität Bremen. 290 pp.

HEYDEMANN, B., 1962. Der Einfluß des Deichbaus an der Nordseeküste auf Larven und Imagines von Carabiden und Staphyliniden. - Ber. Wandervers. Dt. Ent. 9: 237-274.

HEYDEMANN, B., 1967. Die biologische Grenze Land - Meer im Bereich der Salzwiesen. - Steiner, Wiesbaden. 200 pp.

HENGEVELD, R., 1990. Dynamic Biogeography. - Cambridge University Press. 249pp.

IRMLER, U. & HEYDEMANN, B., 1987. Die ökologische Problematik der Beweidung von Salzwiesen an der niedersächsischen Küste am Beispiel der Leybucht. - Beih. Natursch. Landsch.pfl. Niedersachsen 15.

KINDER, S., 1995. Vergleichende vegetationskundliche Untersuchungen an beweideten und unbeweideten Salzwiesen im Außengroden der Wurster Küste. - Diplomarbeit Universität Bremen. 159pp.

LINDROTH, CH., 1949. Die fennoskandischen Carabiden. III. Allgemeiner Teil. - Göteborgs kungl. vetensk. Vitterh.-Samh. Handl. B4, 3: 1-911.

LOHSE, G.A., 1987. Ökologische Faktoren, die das Vorkommen von Küstenkäfern bestimmen. - Mitt. dtsh. Ges. allg. angew. Ent. 5: 66-68.

MALAUSSA, J.C., 1977. Etude écophysologique de la diapause hivernale chez les adultes de *Chaetocarabus intricatus* L. (Coleoptera, Carabidae). - Ann. Zool. Ecol. Animal. 9: 637-647.

MATTSON, W.J. & ADDY, N. D., 1975. Phytophagous insects as regulators of forest primary production. - Science 190: 515-521.

MEIJER, J., 1973. Die Besiedlung des neuen Lauwerszceepolders durch Laufkäfer (Carabidae) und Spinnen (Araneae). - Faun.-ökol. Mitt. 4: 169-184.

MEIJER, J., 1980. The development of some elements of the arthropod fauna of a new polder. - Oecologia (Berl.) 45: 220-235.

MOOK, J.H., 1971. Observations on the colonization of the new Ijsselmeerpolders by animals. - In: den Boer PJ (Ed.): Dispersal and dispersal power of carabid beetles. - Misc. papers (Wageningen) 8: 13-31.

MOSSAKOWSKI, D., 1991. Zur Verbreitung der Laufkäfer (Carabidae) im Lande Bremen. - Abh. naturwiss. Ver. Bremen 41:543-639.

MÜLLER-MOTZFELD, G., 1995. Klimatisch bedingter Faunenwechsel am Beispiel der Laufkäfer (Coleoptera: Carabidae). - Angew. Landschaftsökol. 4: 135-154.

NETTMANN, H. K., 1995. Klimawandel und Fauna in Mitteleuropa: Beispiele aus dem Wirbeltierbereich und Aufgaben des Naturschutzes. - *Angew. Landschaftsökol.* 4:155-164.

OLBRICH, B., 1995. Überflutung, Salzgehalt und Beweidung als Faktoren für Carabiden im Gradienten des Vorlandes der Wurster Küste. - Diplomarbeit Universität Bremen. 80pp.

PETERS, G., 1987. Die Edellibellen Europas. - Neue Brehm Bücherei 585. A. Ziemsen, Wittenberg Lutherstadt. 140pp.

POMEROY, L.R. & WIEGERT, R. G., 1981. The Ecology of a Salt Marsh. - *Ecological Studies* 28. Springer, New York.

RINGLEB, F., 1940. Klimaschwankungen in Nordwestdeutschland (seit 1835). - *Arb. geogr. Komm.* 3, Coppenrath, Münster.

ROOT, T., 1988. Environmental factors associated with avian distributional boundaries. - *J. Biogeogr.* 15: 489-505.

RYKENA, S., 1987. Egg incubation time and northern distribution boundary in green lizard species (*Lacerta s.str.*). - *Proc. 4th Ord. Gen. Meeting Societas Europaea Herpetologica.* (van Geldern J.J., Strijbosch H. & Bergers P.J.M., Edts.) 339-342.

SCHRÖDTER, P., 1993. Salzwiesenprojekt Wurster Küste. - Rahmenentwurf zur Regelung wasserwirtschaftlicher Belange, Heft 1, 39 pp. u. Anlagen.

STEPHAN, H.J., 1985. Zur Vorlandentwicklung an der Wurster Küste. - *Jahresber. Forschungsstelle Küste, Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft* 36: 11-28.

THIELE, H.U., 1977. Carabid beetles in their environments. - Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 369 pp.

TISCHLER, T., 1985. Freilandexperimentelle Untersuchungen zur Ökologie und Biologie phytophager Käfer (Coleoptera: Chrysomelidae, Curculionidae) im Litoral der Nordseeküste. - *Faun.-ökol. Mitt. Suppl.* 6: 1-180.

Meeresspiegelanstieg und Küstenschutz

Peter Petersen
Kuratorium für Küsteningenieurwesen,
Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel

1. Begriffe

Unter Meeresspiegelanstieg ist zunächst der Anstieg des mittleren Meeresspiegels zu verstehen. Dieser ist an der Ostsee das über eine bestimmte Zeit errechnete arithmetische Mittel der um 12.00 Uhr abgelesenen Wasserstände, an der Nordsee das Tidemittelwasser, das ist der Wasserstand der waagerechten Schwerlinie der Tidekurve, nicht zu verwechseln mit dem Tidehalbwasser, dem Wasserstand bei halbem Tidehub. Für den Küstenschutz sind Veränderungen des mittleren Tidehochwassers, des mittleren Tideniedrigwassers und des mittleren Tidehubs, ferner der Höhe und Häufigkeit extremer Hochwasserstände von Interesse. Ferner sind, mit dem Meeresspiegelanstieg im Zusammenhang stehend, Seegang und Wellenaufbau von Bedeutung (Begriffe siehe DIN 4049).

Unter Küstenschutz wird der Schutz des Küstengebietes gegen unerwünschte natürliche Einwirkungen verstanden. Dabei ist Küstenschutz kein Selbstzweck, sondern auf Schutz von menschlichem Eigentum und Nutzen wie auch auf Schutz der Natur gerichtetes Handeln.

2. Empfindlichkeit der Küste

Die Empfindlichkeit der Küste wird einerseits geprägt durch ihre natürlichen Erscheinungsformen und vom Menschen zielgerichtet geschaffene Bauwerke, andererseits durch den subjektiv wie objektiv begründbaren Wert der Küste. Während im einem Extrem ein vom Meer und von Wind aufgebauter Außensand flexibel auf Belastungen reagieren kann und darf, kann im anderen Extrem eine Hochwasserschutzmauer unter der Belastung spontan versagen mit der Folge plötzlich auftretender erheblicher Schäden. Dementsprechend differenziert sind Wirkungen eines Meeresspiegelanstiegs zu beobachten und zu bewerten und Folgerungen für menschliches Handeln zu ziehen. Zur Zeit wird für die gesamte deutsche Küste im Rahmen einer

Aktion des IPCC eine Studie über die Empfindlichkeit der Küste erstellt. Daneben erarbeiten die Küstenländer mit unterschiedlicher Intensität Kataster über die Küstenschutzanlagen sowie Art und Nutzung der geschützten Gebiete. Diese Arbeiten können als Grundlage für langfristig angelegte Küstenschutzkonzepte dienen.

3. Belastung der Küste

3.1 Wasserstände

Da sich der mittlere Meeresspiegel an Tideküsten nur durch zeitaufwendige Auswertung der gesamten Tidekurve, also von 705 Tidekurven je Pegel und Jahr, ermitteln lässt, befassen sich vergleichsweise wenige Arbeiten mit dessen Entwicklung in der Deutschen Bucht. Weltweit wurde in verschiedenen Veröffentlichungen ein globaler eustatischer Meeresspiegelanstieg von ca. 0,12 cm je Jahr seit 1880 angegeben. Etwa derselbe Wert wurde für Pegel der Deutschen Bucht, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Landsenkungen, sowie für den Pegel Travemünde an der Ostsee ermittelt (JENSEN und TÖPPE 1986).

Prognosen der künftigen Entwicklung des Meeresspiegels führten in jüngerer Zeit zu deutlich niedrigeren Werten als noch vor etwa einem Jahrzehnt. Ein beim deutschen Klima-Rechenzentrum in Hamburg eingesetztes gekoppeltes Atmosphären-Ozean-Modell (veröffentlicht 1991) führte zu folgenden Ergebnissen:

- Szenario A ("business as usual"): 16 cm bis 2085
- Szenario D (starke Emissionsreduzierung): 6 cm bis 2085

Unberücksichtigt blieb hierbei ein etwaiger Beitrag der Gletscher Grönlands und der Antarktis, der gegebenenfalls mit 50 % des gesamten Meeresspiegelanstiegs anzusetzen sei. Zu addieren ist der bisherige als nicht anthropogen beeinflusst angesehene Anstieg von 12 cm/Jahrhundert. Die Prognose würde dann ohne Gletschereinfluss auf 28 bzw. 18 cm, mit Gletschereinfluss auf 42 bzw. 27 cm lauten. Andere Institute geben Werte von z. B. 31 bis 66 (100) cm an.

Trenddarstellungen für MThw und MTnw weisen eine divergierende Entwicklung etwa seit 1950 und damit einhergehend einen deutlichen Anstieg des MThb aus. TÖPPE (1993) gibt folgende Werte an:

- MThw-Anstieg: 23 cm/Jahrhundert
- MTnw-Anstieg: 9 cm/Jahrhundert
- MThb-Anstieg: 12 cm/Jahrhundert

Aus physikalischen Gründen kann sich jedoch die Divergenz von MThw und MTnw nicht unendlich fortsetzen. Über kurze Zeiträume sich abzeichnende Trends müssen im Zusammenhang mit astronomisch bedingten Periodizitäten gesehen werden und klingen seit etwa 1985 wieder ab.

Eine Betrachtung der Mittelwerte für Sommer, Winter und ganzes Jahr des Ostseepegels Travemünde der Jahre 1986 bis 1994 zeigt, dass offenbar Wettereinflüsse Änderungen der mittleren Wasserstände in der Größenordnung von einem Dezimeter bewirken, so dass auch hier von kurzfristigen Trendaussagen Abstand zu nehmen ist.

TÖPPE (1993) hat in einer vom BMFT geförderten "Analyse der mittleren Tidewasserstände an der deutschen Nordseeküste" nachgewiesen, dass die astronomischen Tiden und der Windstau maßgeblich den Gang der Tidewasserstände bestimmen. Eine von den Einflüssen der Nodaltide, der Perigäumstide, des Luftdrucks und des Windstaus befreite Ganglinie weist eine lange Schwingung mit einer Amplitude von 25 bis 30 cm auf, die durchaus zu der von LIESE und LUCK (1978) beschriebenen 74-jährigen Schwingung mit einer Amplitude von 38 cm paßt.

Eine Erhöhung der für den Hochwasserschutz besonders wichtigen extremen Wasserstände konnte in den letzten Jahrzehnten weder an der Nordsee noch an der Ostsee beobachtet werden, wohl aber eine Häufung hoher Wasserstände an der Nordsee. Eine Darstellung der Verweilzeiten von Wasserständen über NN+ 2,0 Meter am Pegel List macht diesen Trend deutlich. Auch wenn, um die Sturmtätigkeit zu erfassen, der säkulare Meeresspiegelanstieg berücksichtigt wird, wird der Trend zwar gemildert, ist jedoch nach wie vor deutlich. Eine Beziehung zur seit etwa 1950 gestiegenen mittleren Windgeschwindigkeit ist nicht eindeutig. Die häufigste Windrichtung drehte nach 1950 nach Südwest, weshalb die Verhältnisse an der niedersächsischen Küste anders sein können.

Von STENGEL und ZIELKE (1994) vorgenommene Simulationen zeigen, dass aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs sowohl relativ niedrigere als auch höhere Sturmflut-Scheitelwasserstände zu erwarten sind, wobei die maximale Erhöhung für Hamburg mit 20 % des Meeresspiegelanstiegs ermittelt wurde.

3.2 Seegang

Für eine statistische Auswertung geeignete langjährige, d. h. 50 bis 100 Jahre zurückreichende Seegangsmessungen liegen nicht vor. Da aber hohe Wasserstände durch Sturm erzeugt und damit von Seegang begleitet sind, kann geschlossen werden, dass generell die Seegangsintensität zumindest in der Deutschen Bucht zugenommen hat.

3.3 Strömung

Auch langjährige statistisch auswertbare Strömungsmessungen sind nicht verfügbar. Eine Zunahme des Seegangs führt zu einer Zunahme oder längeren Dauer der Brandungsströmung. Größere Amplituden der Tidekurve, sowohl durch befristeten Windstau als auch durch Erhöhung des Tidechubs, führen zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten, insbesondere in den Rinnen aber auch auf dem Watt. Der Einfluss eines Anstiegs des Tidemittelwassers auf die Strömung ist differenziert zu betrachten. Je nach Relief des Wattenzugsgebietes kann er zu einer Erhöhung wie auch zu einer Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit führen.

3.4 Regen, Temperatur

Mit Klimaänderungen können auch im Küstengebiet Änderungen der Intensität und jahreszeitlichen Verteilung des Regens sowie der Temperatur einhergehen. Regenintensität und Temperatur sind direkt oder indirekt von Einfluss auf die Mikro- und Makroflora und Fauna des Wattenmeeres und insofern auch auf das Erosionsverhalten. Für etwaige Prognosen verwendbare Forschungsergebnisse hierzu sind nicht bekannt.

Lang anhaltende Trockenperioden im Sommer können zu vermehrten Rissen im bindigen Abdeckboden der Deiche führen. Diese können dadurch anfälliger gegen Druckschläge werden, während die Durchfeuchtung des Abdeckbodens stärker von der einbaubedingten Struktur abhängig ist, wie RICHWIEN und WEISSMANN (1995) im Bericht aus einem Forschungsvorhaben über Wellenüberlauf darlegen.

4. Reaktionen der Küsten

4.1 Sandige Küsten

An Kliffs bewirkt ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels einen vermehrten Küstenabbruch und Quertransport. Hierdurch wird die Rückverlagerung der Kliffkante beschleunigt, ein Vorgang, der jedoch begrenzt ist, da sich das natürliche Profil auf höherem Niveau im allgemeinen wieder einstellen wird.

Häufigere Hochwasserstände (höhere Verweilzeiten) führen jedoch dauerhaft zu einem vermehrten Quertransport, eine Wirkung, die zum Teil durch Aufhöhung des trockenen und des Unterwasserstrandes egalisiert wird, zum Teil jedoch durch küstenparallelen Materialtransport zu einem dauerhaften Verlust und damit einem anhaltend stärkeren Kliffrückgang führt.

An Außensänden ist mit einer schnelleren Rückverlagerung, einer geringfügigen Verkleinerung und mit einer dem Meeresspiegelanstieg entsprechenden Aufhöhung zu rechnen (HOFSTEDDE 1993). Von Bedeutung dürfte hier allerdings die Materialzufuhr sein. Mangelt es etwa im Leebereich einer Nehrung an transportier- und sedimentierbarem Material, z. B.: weil der natürliche Sandtransport durch Uferlängswerke, Buhnen oder Molen unterbrochen wurde, so können Haken und Nehrungen unter Umständen dem Meeresspiegelanstieg in der Höhe nicht folgen und werden kleiner werden oder durchbrechen.

4.2 Deiche, Hochwasserschutzbauten

Da Deiche zur Abwehr von extremen Hochwässern gebaut werden, hat eine Erhöhung mittlerer Tidewasserstände auf ihren Bestand, außer vielleicht lokal bei einem aus den Vorland aufwachsenden Deichfuß, keinen Einfluss.

Ein Anstieg von extremen Wasserständen und/oder der Verweilzeiten kann infolge von Durchnässung des Abdeckbodens lokal zu Schäden führen.

Schwallbrecher im Scheitelbereich werden eventuell die Deichhaut stärker beanspruchen, Überschwappen von Wellen wird häufiger sein. Eine größere Häufung von Extremwasserständen würde insbesondere die noch nicht verstärkten Ostseedeiche gefährden, weil hier die Verweilzeiten je Sturmereignis ohnehin wesentlich länger sind. Kenntnisse über eine Häufung solcher Ereignisse liegen jedoch bisher nicht vor.

4.3 Wattenmeer

Von einem Anstieg der mittleren Wasserstände sowie vermehrtem Seegang sind generalisiert folgende Wirkungen zu erwarten: Die Vorlandhöhe wird überwiegend dem Meeresspiegelanstieg folgen können. Das Watt wird jedoch, vor allem infolge gesteigerter Seegangsaktivität in exponierten Lagen, dieser Entwicklung nicht oder nicht so schnell folgen. Infolgedessen wird es auch zu einer Aufsteilung im Übergangsbereich zum Vorland und zu Kantenerosion am Vorland kommen. Diese Entwicklung ist jedoch nicht überall, insbesondere nicht bei ausgedehnten flachen Watten zu erwarten. Die Entwicklung der Rinnen wird je nach Watterelief und Tidekurve unterschiedlich verlaufen.

5. Belastbarkeit der Küsten

Seedeiche an der Nordseeküste, die entsprechend den Küstenschutzfachplänen verstärkt sind, dürften den zusätzlichen Belastungen infolge eines Meeresspiegelanstiegs in prognostizierter Höhe gewachsen sein, wenn sie, wie in Schleswig-Holstein, eine flache Außenböschung mit einer Neigung von 1:8 in Höhe des Bemessungswasserstandes aufweisen. Bei diesem Profil ist eine ausreichende Reserve für den Wellenauflauf vorhanden. Andere Seedeiche sollten entsprechend verstärkt werden.

Eine Überprüfung und ggf. Anpassung von Profil und Kronenhöhe ist bei Tidestromdeichen erforderlich, einerseits weil hier das Maß für den Wellenauflauf geringer ist, andererseits weil in Ästuaren und Tideströmen die Extremwasserstände bei einem steigenden Meeresspiegel stärker ansteigen werden. Ein verstärkter Rückgang von Kliffs wird vielfach hinnehmbar sein, oder aber es ist, wenn der Rückgang nicht toleriert werden kann, mehr oder häufiger Sand vorzuspülen. Soweit nicht ausreichend Sand, der möglichst nicht aus dem Wattenmeer genommen werden sollte, verfügbar ist, ist mit einer Kostenerhöhung zu rechnen. Eine Besonderheit können durch Deckwerke gesicherte exponierte Küstenabschnitte darstellen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Ein Rückgang oder eine Verlagerung der Sände wird vorläufig hinzunehmen sein, da aufgrund der bisher prognostizierten Meeresspiegeländerung eine plötzlich einsetzende katastrophale Entwicklung nicht zu erwarten ist. Die Grenzen der Belastbarkeit können jedoch bei Nehrungen erreicht werden, wenn diesen eine Hochwasserschutzfunktion zukommt.

Hinsichtlich der Belastbarkeit der Watten besteht die größte Unsicherheit. Seegangsbedingte Korngrößenveränderungen auf der Wattoberfläche können zu einer Änderung des Erosionsverhaltens führen. Eine wesentliche Unsicherheit bei allen Prognosen besteht hinsichtlich der Verfügbarkeit von sedimentierbarem Material, das erforderlich ist, damit das Watt einem Meeresspiegelanstieg in der Höhe folgen kann. Soweit dieses Material aus dem System selbst stammen muss, sind lokal Materialdefizite und entsprechende Abtragungen zu erwarten.

6. Planungen, Untersuchungen, Forschungen

Eine Überprüfung der Sicherheit der Deiche wird mittelfristig auch unter Risikoaspekten durchzuführen sein, nicht zuletzt deshalb, weil die Frage nach der höchstmöglichen Sturmflut nach wie vor unbeantwortet ist. Zur Erleichterung der Deichunterhaltung bzw. zur Verminderung von Deichverstärkungskosten und zugleich im Interesse des Naturschutzes kommt an besonderen Stellen, vorrangig im Bereich der Ostsee, eine Rückverlagerung der Hochwasserschutzlinie in Frage. An der Nordseeküste und an den Stromdeichen wird der Existenz bzw. der Erschaffung einer zweiten Deichlinie besondere Aufmerksamkeit zu widmen sein, um das Sturmflutrisiko einzugrenzen.

Im Zusammenhang mit dem Rückgang von Kliffs werden längerfristig heutige Regelungen hinsichtlich der Nutzung der Flächen landwärts der Kliffkante zu überprüfen sein. Hierfür werden Risikoanalysen und Nutzen-Kosten-Betrachtungen heranzuziehen sein. Das Vorland soll, heute als Salzwiese wertvoller Bestandteil der Nationalparks, in seinem Bestand erhalten bleiben. Mit naturschonenden Maßnahmen, wie Lahnungsbau an der Vorlandkante, soll dieses Ziel erreicht werden. Grundsätzlich wäre die Bildung von Buchten im Wattenmeer, wie sie im nordfriesischen Wattenmeer durch Dammbauten zu Inseln und Halligen zum Teil verwirklicht wurden, nützlich für den Aufbau und Erhalt eines in der Höhe abgestuften Wattenmeeres. Etwa noch denkbare Dammbauten, die einen erheblichen Eingriff in das sensible Wattenmeer bedeuten würden, wären jedoch nur nach sorgfältigsten Vorarbeiten zu verantworten. Einer sicheren Prognose bedürfen vor allem das etwa veränderte Verhalten der Wattinnen sowie die Herkunft des in neu geschaffenen Buchten sedimentierenden Materials, das möglicherweise an empfindlichen Stellen im seewärtigen Bereich des Wattenmeeres fehlen würde. Auf die Entwicklung der

Außensände wird, solange durch ihren Rückgang nicht eine Gefahr für genutztes Land entsteht, kein Einfluss genommen werden. Die etwaige Gefährdung von Nehrungen mit besonderer Schutzfunktion bedarf lokaler Untersuchungen und Abwägungen.

Die in der letzten Zeit gelegentlich im Zusammenhang mit der Diskussion über die Zukunft des Wattenmeeres erhobene Forderung, Deiche zurückzuverlagern, sollte von intuitiver Argumentation befreit werden. Die Forderung, dass eine große Zahl von Menschen ihr Eigentum, ihre Existenzgrundlage und ihr Heimatempfinden aufgeben sollen, um der Natur mehr Raum zu geben, ist nicht nur aus rechtlichen und ethischen Gründen, sondern auch aus fachlichen Gründen zu hinterfragen. Im Hinblick auf die Entwicklung des Wattenmeeres wäre konkret darzulegen, welcher Missstand herrscht und welche nachvollziehbaren Argumente dafür vorliegen, dass dieser durch eine Deichrückverlagerung zu beseitigen wäre. Die dokumentierte Entwicklung des Wattenmeeres und des Vorlandes in den vergangenen Jahrzehnten und Jahrhunderten läßt nicht ohne weiteres den Schluss zu, dass eine landwärtige Öffnung des Wattenmeeres generell positive Entwicklungen für den Bestand des Wattenmeeres einleiten würde. Nachfolgend sind einige aktuelle Forschungsvorhaben des Küsteningenieurwesens mit Bezug zu Klimafolgen aufgelistet:

- Wadden Sea Development (deutsch-niederländisches Projekt/KFKI).
- Modelluntersuchungen zur morphologischen Stabilität des Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg (KFKI).
- Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wasserstände und die Windverhältnisse an den deutschen Küsten (BMBF/BEO).
- Auswirkungen von Klimaänderungen auf Sturmflutentwicklung und Extremwasserstände in der Nordsee (BMBF/BEO).
- Verbundprojekt Klimaauswirkung und Boddenlandschaft (AUG).
- Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste (KFKI).

- Windstauanalysen zur Änderung des Sturmflutklimas in Nord- und Ostsee (KFKI).
- Einfluss von Steiluferabbrüchen auf die Prozessdynamik angrenzender Flachwasserbereiche (KFKI).
- Sedimentverteilung als Indikator für strukturelle Veränderungen des Watts (KFKI).
- Materialinventur an der deutschen Nordseeküste (KFKI).
- Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht (KFKI, geplant).
- Bemessung auf Seegang, Wirkung von Wellenüberlauf (KFKI).

Literatur

HOFSTEDÉ, J., 1993. Morphologische Entwicklung der nordfriesischen Außensände. - Ber. Landesamtes f. Wasserhaushalt Küsten.

JENSEN, J. & TÖPPE, A., 1986. Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. - DGM 30, H. 4.

LIESE, L., 1978. Verfahren zum Nachweis von Veränderungen der Tidehochwasserstände. - DGM 22, H5.

RICHWIEN, W. & WEISSMANN, R., 1995. Zur Standsicherheit von Deichinnenböschungen bei Wellenüberlauf. - Forschungsbericht, unveröffentlicht.

STENGEL, T. & ZIELKE, W., 1994. Der Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht. - Die Küste, H. 56.

TÖPPE, A., 1993. Zur Analyse des Meeresspiegelanstieges aus langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen an der deutschen Nordseeküste. - Mitt. LWI der TU Braunschweig, H. 120.

Zur Sedimentdynamik in den ostfriesischen Rückseitenwatten und den Veränderungen durch natürliche und anthropogene Einflüsse

Alexander Bartholomä und Burghard W. Flemming
Forschungsinstitut Senckenberg,
Abt. für Meeresforschung, Wilhelmshaven

1. Einleitung

Die Sedimentdynamik in den ostfriesischen Rückseitenwatten steht in Wechselbeziehung mit der Wattenmorphologie sowie hydrodynamischen und physikalischen Kräften. Unter dem Begriff Sedimentdynamik werden Transport-, Ablagerungs- und Remobilisierungsprozesse von Sedimenten zusammengefasst. Nach einem Einblick in die Sedimentverteilung soll hier versucht werden, den Einfluss natürlicher und anthropogener Einflüsse aufzuzeigen und daraus resultierende Veränderungen in der Sedimentverteilung darzustellen. Sicherlich ist eine eindeutige Trennung dieser Einflüsse nur schwer möglich, jedoch zeigen einige der im Laufe der letzten 1000 Jahre durch den Menschen vorgenommenen physischen Eingriffe deutliche Veränderungen im Sedimentationsgeschehen auf.

2. Eigenschaften und Verteilung der Wattsedimente

Um die Sedimentationsprozesse in den Rückseitenwatten zu verstehen, ist es notwendig, sich mit der Qualität der Sedimente, den morphologischen Einheiten und den Ablagerungsprozessen vertraut zu machen.

2.1 Die Qualität der Sedimente

Aus einer Anzahl von mehreren Tausend Proben, die flächendeckend den Bereich der Rückseitenwatten von Spiekeroog und Langcoog über die letzten Jahre abdecken, lässt sich sehr gut die Verteilung und Verlagerung der Oberflächensedimente dokumentieren (FLEMMING und DAVIS 1994, FLEMMING und NYANDWI 1994, FLEMMING und ZIEGLER 1995).

Die Sedimente des Wattenmeeres bestehen in ihren gröberen Fraktionen (0.063 mm - 0.250 mm) fast ausschließlich aus Quarzsanden, in den feineren

Fraktionen werden diese zunehmend durch Tonminerale und karbonatische Anteile ergänzt, während schließlich die kleinsten Partikel überwiegend aus Tonmineralien bestehen können. Das Korngrößenspektrum der Partikel reicht von 250 μm (= 0.25 mm) bis < 1 μm (0.001 mm).

In der Sedimentologie werden die Korngrößen in bestimmte Klassen, auch als Fraktionen bezeichnet, eingeteilt. International gebräuchlich ist dabei die PHI-Einteilung, eine lineare Intervallskala, die zu den Millimeterwerten in einem logarithmischen Verhältnis steht. Daraus resultieren die scheinbar unregelmäßigen Intervallklassen auf der Millimeterskala. In dieser Arbeit werden die Wattsedimente in 0.5 Phi-Klassenintervallen dargestellt (Tab. 1).

PHI	μm	mm	Bezeichnung
1.0-1.5	500-350	0.500-0.350	größerer Mittelsand
1.5-2.0	350-250	0.350-0.250	feinerer Mittelsand
2.0-2.5	250-177	0.250-0.177	größerer Feinsand
2.5-3.0	177-125	0.177-0.125	feinerer Feinsand
3.0-3.5	125-88	0.125-0.088	größerer sehr feiner Sand
3.5-4.0	88-63	0.088-0.063	feinerer sehr feiner Sand
> 4.0	< 63	< 0.063	Schlick (Silt & Ton)

Tab. 1. Korngrößen-Klassen in PHI-, mm- und μm -Werten sowie die Sedimentbezeichnung.

Die Korngrößen wurden nicht, wie noch weit verbreitet, über ein mechanisches Siebverfahren, sondern über Sinkgeschwindigkeitsmessungen ermittelt (z.B. FLEMMING und THUM 1978, BREZINA 1979). Die Vorteile dieser Methode liegen in der höheren Auflösung der Messintervalle und im Messprinzip. Im Gegensatz zu mechanischen Verfahren besteht zwischen den Sinkgeschwindigkeiten und den Sedimentationsprozessen eine direkte hydrodynamische Beziehung.

2.1.1 Sinkgeschwindigkeiten

Bei dieser Methode werden die Sedimentproben in eine Sedimentationsröhre eingebracht, die aus einer mit Wasser gefüllten Glasröhre mit definierter Länge besteht (Abb. 1). Am unteren Ende der Röhre befindet sich ein Messsystem, meist eine Induktionswaage, die mit zunehmender Auflast auf der Waage ein höheres Spannungssignal abgibt. Gemessen wird die zeitgekoppelte Spannungszunahme, aus der die logarithmischen

Sinkgeschwindigkeiten (PSI-Werte = $-\log_2$ [cm/s]) berechnet werden. Dabei fallen größere Partikel schneller und haben daher höhere Sinkgeschwindigkeiten. Auf einen weltweit gebräuchlichen Standard normiert (24 °C Wassertemperatur, die Quarzdichte von 2.65 g/cm³ und der Formfaktor für glatte Glaskugeln = 1.18), werden anschließend die Korngrößen berechnet (Abb. 2).

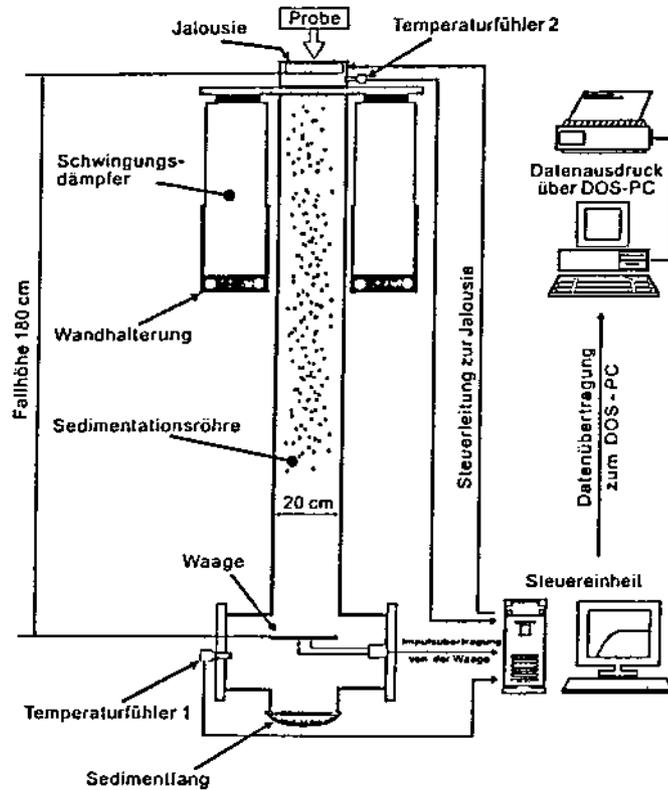


Abb. 1. Funktionsschema der Sedimentationsröhre.

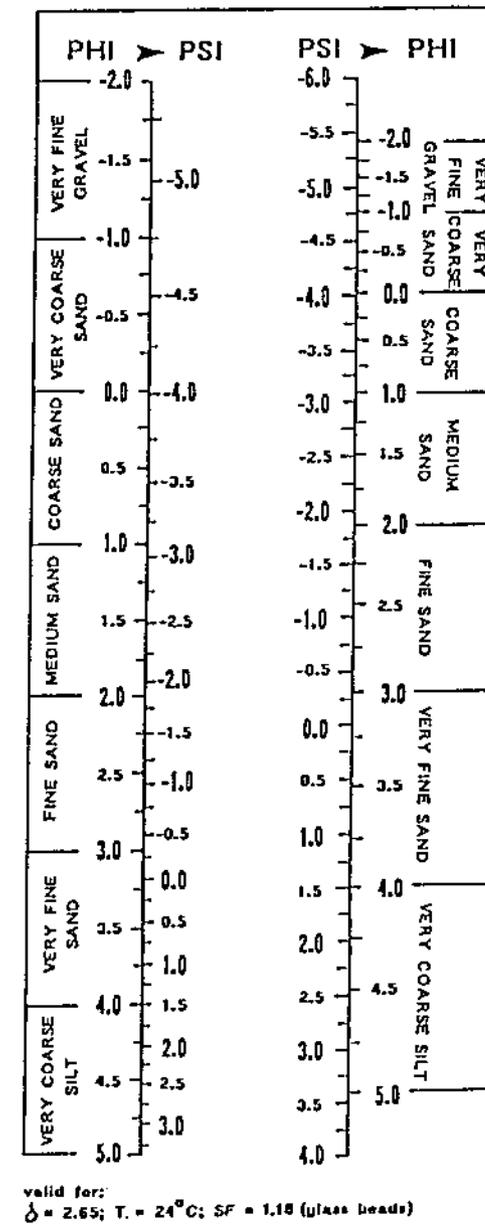


Abb. 2. Sinkgeschwindigkeiten (PSI) und Korngrößen (PHI) der Sand- und Siltfraktionen.

2.2 Sedimentverteilung

Aus den so abgeleiteten Korngrößen ergibt sich für die Mittelwerte der einzelnen Sedimentverteilungen im ostfriesischen Rückseitenwatt eine deutliche Zonierung einzelner 0.5 Phi Korngrößenklassen (Abb. 3). Die Korngröße nimmt dabei von Norden nach Süden, also von den Inseln zum Deich hin ab. Dieses Verteilungsmuster reflektiert den nach Süden hin abnehmenden Energiegradienten des Ablagerungsraumes.

Der Vorinselbereich, die Inseln selbst sowie ein Teil des Inselrückseitenwattes bestehen in ihren Oberflächensedimenten überwiegend aus Mittelsand (Abb. 4). Im Zentralteil der Rückseitenwatten dominieren die Fraktionen des Feinsandes. Das südliche Rückseitenwatt sowie der Vordeichbereich setzt sich aus sehr feinen Sanden zusammen. Zwischen den einzelnen Fraktionen können schmale Bänder gemischter Fraktionen auftreten (Abb. 4). Betrachtet man die Verteilung der einzelnen Korngrößenfraktionen im Rückseitenwatt in Form ihrer Gewichtsprozentanteile, so tritt die Zonierung noch deutlicher in Erscheinung (Abb. 5). Bei genauerer Betrachtung fällt ein ausgeprägtes Defizit der Fraktion des sehr feinen Sandes ($3.5-4.0 \text{ phi}/88\mu\text{m} - 63\mu\text{m}$) im Vordeichbereich auf (Abb. 5-d). Mit nur etwa 10 Gew.% (Gewichtsprozent) ist diese Fraktion gegenüber dem normalen Verteilungsmuster mit bis zu 70 Gew.% deutlich unterrepräsentiert. Dagegen sind die in der Korngröße kleineren Schlickfraktionen ($< 4.0 \text{ phi}/< 63\mu\text{m}$) mit bis zu 50 Gew.% überraschenderweise wieder deutlich stärker vertreten (Abb. 5-e).

Wenn die Korngrößenzonierung der Wattensedimente einen zur Küstenlinie abnehmenden Energiegradienten widerspiegelt, dann deutet die Diskontinuität in der Korngrößenabfolge auf eine Störung in der kontinuierlichen Energieabnahme und den damit verbundenen Sedimentationsbedingungen hin. Das Sedimentdefizit im sehr feinen Sand kann nur über ein für die Sedimentation dieser Fraktionen zu hohes Energieniveau im deichnahen Watt erklärt werden. In zunächst scheinbarem Widerspruch zu dieser Interpretation steht der höhere Schlickanteil, der aufgrund seiner noch kleineren Bestandteile erst recht nicht sedimentiert werden dürfte. Da der Schlick aber aus Kollektiv-Partikel-Aggregaten zusammensetzt ist (z.B. Flocken und Kotpillen), die sedimentdynamisch größeren Partikeln entsprechen, sedimentieren sie in den Ablagerungsräumen größerer Fraktionen. Deutlich wird dies u.a. auch an den bis 10 Gew.% hohen Schlickgehalten an der Südseite der Inseln, an

denen laut Energiegradient diese feinsten Partikel nicht auftreten dürften. Bei Schlicken sind hydrodynamisch somit die Aggregatzustände und nicht die Ausgangskorngrößen ausschlaggebend.

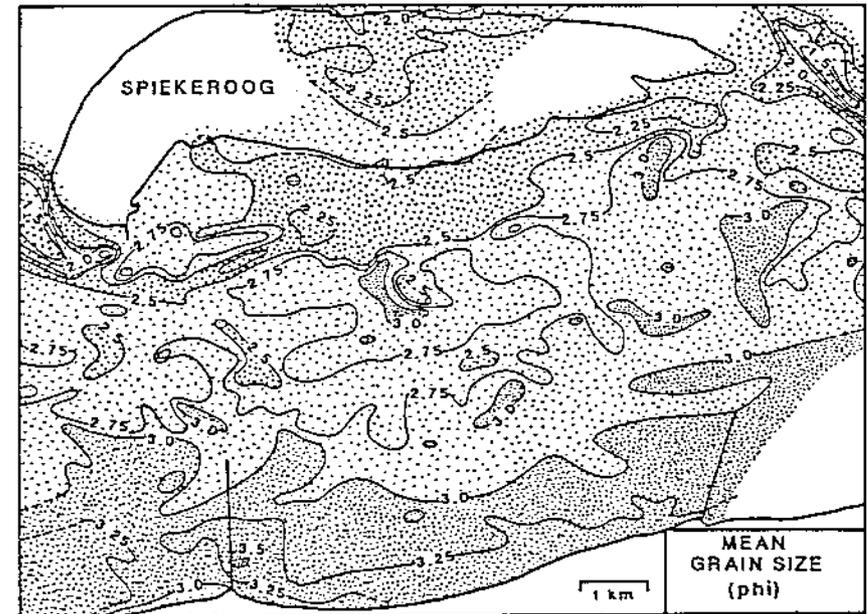


Abb. 3. Verteilung der Korngrößenmittelwerte in 0.5 Phi-Intervallen im Rückseitenwatt von Spiekeroog - mit zunehmendem Phi-Wert nimmt die Korngröße ab (Nach FLEMMING & ZIEGLER 1995).

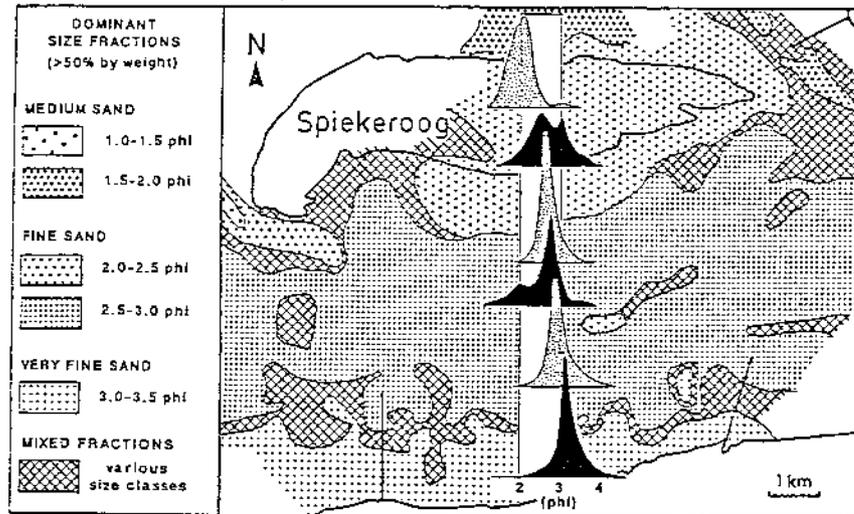


Abb. 4. Verteilung der Korngrößenklassen mit mehr als 50 Gew.% im Spiekerooger Rückseitenwatt (Nach FLEMMING & ZIEGLER 1995).

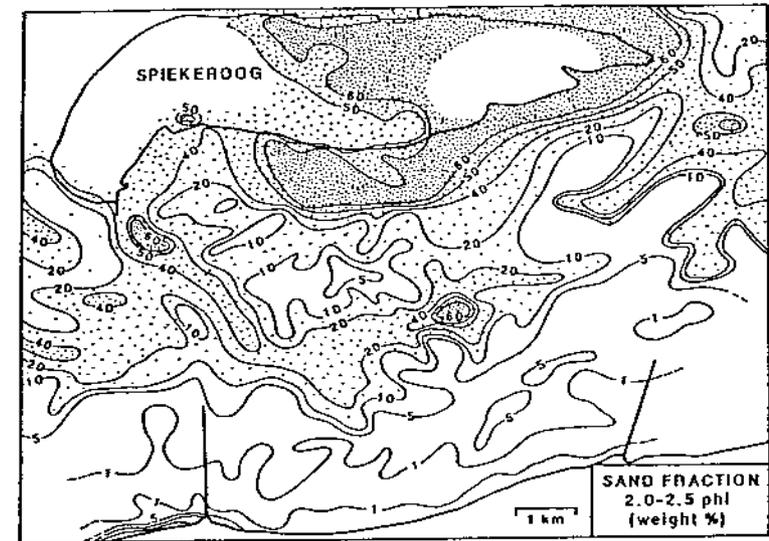


Abb. 5a. Verteilung der Sand-Fraktion 2.0 - 2.5 Phi (250 - 177 μ m) in Gew.% im Spiekerooger Rückseitenwatt (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).

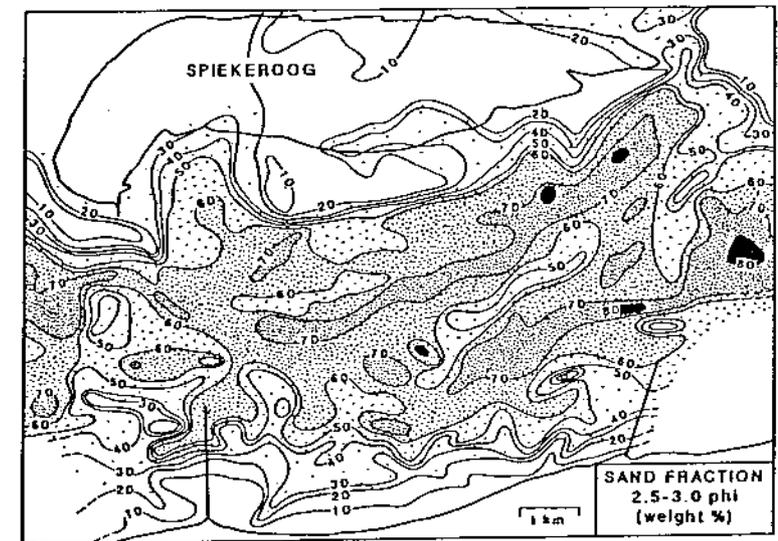


Abb. 5b. Verteilung der Sand-Fraktion 2.5 - 3.0 Phi (177 - 125 μ m) in Gew.% im Spiekerooger Rückseitenwatt (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).

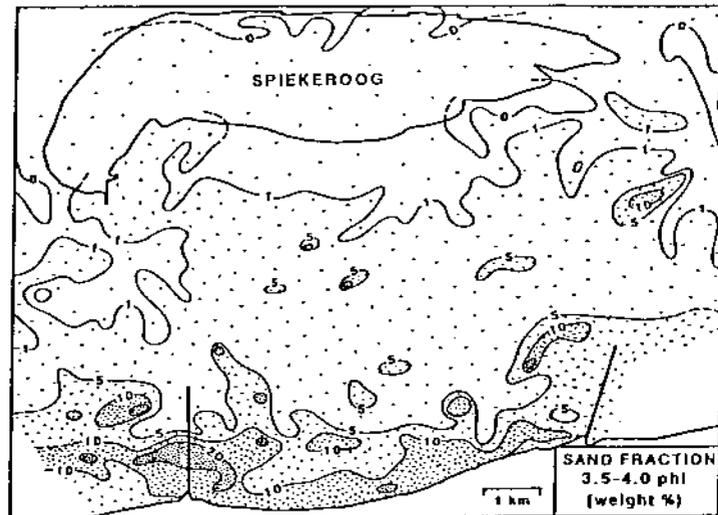
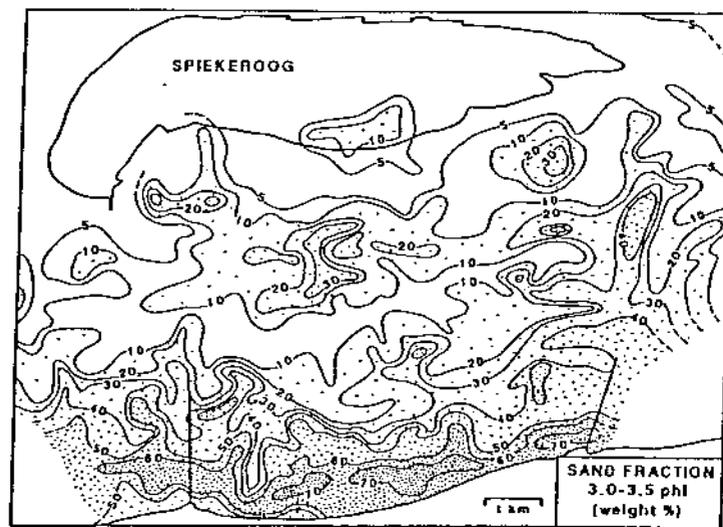


Abb. 5c. Verteilung der Sand-Fraktion 3.0 - 3.5 Phi (125 - 88 μm) in Gew.% im Spiekerooger Rückseitenwatt (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).
 Abb. 5d. Verteilung der Sand-Fraktion 3.5 - 4.0 Phi (88 - 63 μm) in Gew.% im Spiekerooger Rückseitenwatt (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).

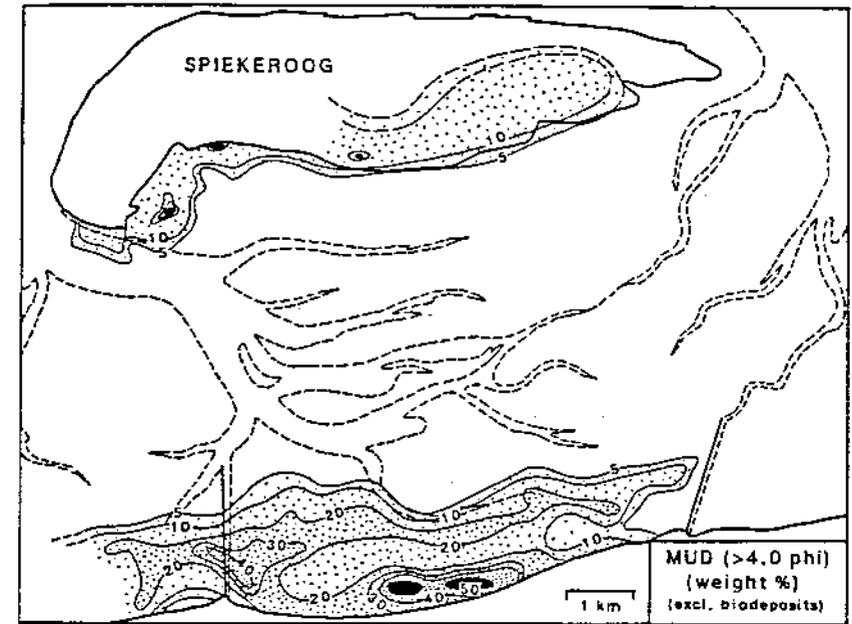


Abb. 5e. Verteilung der Schlick-Fraktion > 4.0 Phi (< 63 μm) in Gew.% im Spiekerooger Rückseitenwatt nach Abzug des biosedimentären Anteiles (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).

3. Physikalische Randbedingungen

Maßgeblich für die Morphologie und die damit in Wechselwirkung stehenden Sedimentverteilungen ist einerseits die Ausdehnung und Beschaffenheit des Einzugsgebietes und andererseits die Gruppe der physikalischen Kenngrößen.

Die Größe des Wateinzugsgebiets richtet sich grundsätzlich nach dem Tidenwasserdurchsatz.

Die physikalischen Kenngrößen setzen sich aus Parametern, wie Wind, Wellen, Tidestrom, und saisonalen Ereignissen, wie Eisgang im Winter und Wassertemperaturschwankungen, zusammen.

Die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Randbedingungen, der Morphologie und den Sedimentpartikeln bestimmt letztendlich die Sedimentationsbedingungen an jedem beliebigen Punkt im Watt.

4. Natürliche Veränderungen

Bei natürlichen Veränderungen sind kurzfristige und langfristige Ereignisse zu unterscheiden. Saisonale Effekte, wie Eisgang oder Stürme führen zu kurzfristigen Umlagerungen der Sedimente und damit auch zu Veränderungen in der Morphologie. Das System Wattenmeer reagiert auf diese Prozesse elastisch. Nach Abklingen der erhöhten Energieeinträge wird überwiegend die Ausgangssituation in der Sedimentverteilung und Morphologie wiederhergestellt. Lokal jedoch können nach solchen Ereignissen deutliche Veränderungen auftreten, die das System im Laufe der Zeit wieder "begradigt".

Langfristig wirkende Prozesse dagegen, z.B. eine Erhöhung des Energieeintrages, führen zu dauerhaften Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung und -verteilung und daraus resultierend auch in der Morphologie. Durch Erhöhung des Meeresspiegels, in der Erdgeschichte als Transgression an vielen Beispielen dokumentiert (z.B. WILGUS et al. 1988), und/oder durch Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit und daraus resultierendem Seegang verschieben sich Morphologie und Sedimentationszonen dem Energiegradienten folgend langsam nach Süden

(Abb. 6). Das im Inselwatt fehlende Sediment wird dann mit Material aus der Insel und dem oberen Inselsockel ergänzt, was eine landwärtige Verlagerung der Insel zur Folge hat. Die Sedimentationszone mit den feinkörnigsten Sedimenten am südlichen Rand der Sedimentabfolge würde sich normalerweise landeinwärts verlagern, wäre da nicht der Deich im Wege.

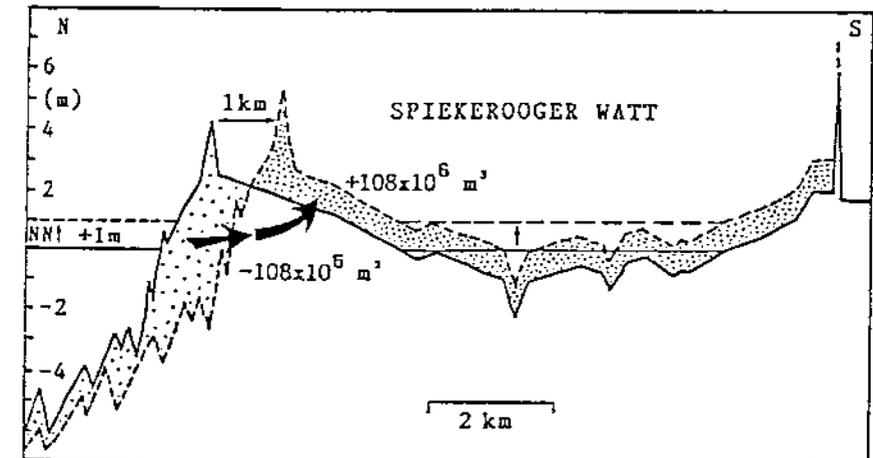


Abb. 6. Modell der Inselwanderung infolge der durch den Meeresspiegelanstieg erfolgten Sedimentverlagerung (Nach FLEMMING & DAVIS 1994).

5. Anthropogene Veränderungen

Neben den durch den Menschen indirekt bewirkten natürlichen Veränderungen in den Rückseitenwatten sind auch direkte Einflüsse zu beobachten. Dem mit steigendem Meeresspiegel sich nach Süden verlagernden Sedimentgürtel wirkten die durch den Menschen in den letzten 1000 Jahren durchgeführte Landgewinnung entgegen (Abb. 7). Die im Zuge aktiver Landgewinnung angelegten Deiche führten im Laufe der Jahrhunderte zur Verkleinerungen der Wateinzugsgebiete. Folge war eine massive Reduzierung der Tidenvolumina, und die daraus resultierende Verringerung des Ebbstromes führte zum Längenwachstum der meisten Inseln, wie das Beispiel der Insel Spiekeroog in der Folge der Eindeichung der Harlebucht zeigt (Abb. 8). Die starke, ostwärts gerichtete Verlagerung der Wattwasserscheide führte, entgegen dem generellen Trend, zu einer Vergrößerung des Oztumer Einzugsgebietes. Der damit verbundene Anstieg des Ebbstromvolumens führte zu einer Vertiefung des Oztumer Seegatts und der Hauptprielrinne.

6. Folgeprozesse - Ein Modell

Betrachtet man die heutige Deichlinie als unverrückbare Küstenlinie, sind durch sie die natürlichen Reaktionsmechanismen der Sedimentverteilung, z.B. die postulierte Südverschiebung des Wattensystems durch erhöhte Energieeinträge, stark eingeschränkt. Erste Anzeichen der "Bewegungsunfähigkeit" dokumentieren sich in dem bereits erwähnten Defizit der sehr feinen Sande im Vordeichbereich. Durch die festliegende Deichlinie einerseits und die Zunahme der Transportenergie im Rückseitenwatt andererseits entsteht in der Vordeichzone ein höheres Energieniveau, das eine Ablagerung der dort ursprünglich sedimentierten Korngrößen nur noch bedingt zulässt und im weiteren völlig unterbindet (Abb. 9). Das Modell am Beispiel Spiekeroog zeigt deutlich, dass schon heute mit einer Entfernung von gut 8 km zwischen Insel und Deich bereits die Hälfte der ursprünglichen räumlichen Ausdehnung der vollständigen Sedimentabfolge fehlt. Erhöht sich nun der Meeresspiegel, so wird sich das Sedimentdefizit nicht mehr nur auf die feinen Fraktionen beschränken. Dieser Prozess kann durch eine gleichzeitige Zunahme in den Sturmhäufigkeiten noch beschleunigt werden. Soweit es möglich ist, wird das System seine Sedimentationszonen verlagern, was die Vergrößerung der mittleren Korngröße im Rückseitenwatt zur Folge haben wird (Abb. 10).

Zukünftig wird damit auch die klassische Dreiteilung von Sand-, Misch- und Schlickwatt (SINDOWSKI 1973, REINECK und SIEFERT 1980) entfallen, weil am Ende der Entwicklung fast ausschließlich Sandwatten existieren werden. Die Veränderung der Sedimentzusammensetzung wird nicht nur einen erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung der Faungemeinschaften haben, sondern einige Komponenten ganz eliminieren - eine Perspektive, die inzwischen von vielen Wissenschaftlern mit Sorge verfolgt wird (z.B. EXO 1994). Ein Vergleich der Sedimentzonen im Rückseitenwatt von Spiekeroog mit denen von Baltrum, wo die Breite des Wats auf 5 km reduziert ist, macht die verstärkte Dezimierung der feinkörnigen Sedimente besonders deutlich (Abb. 11).

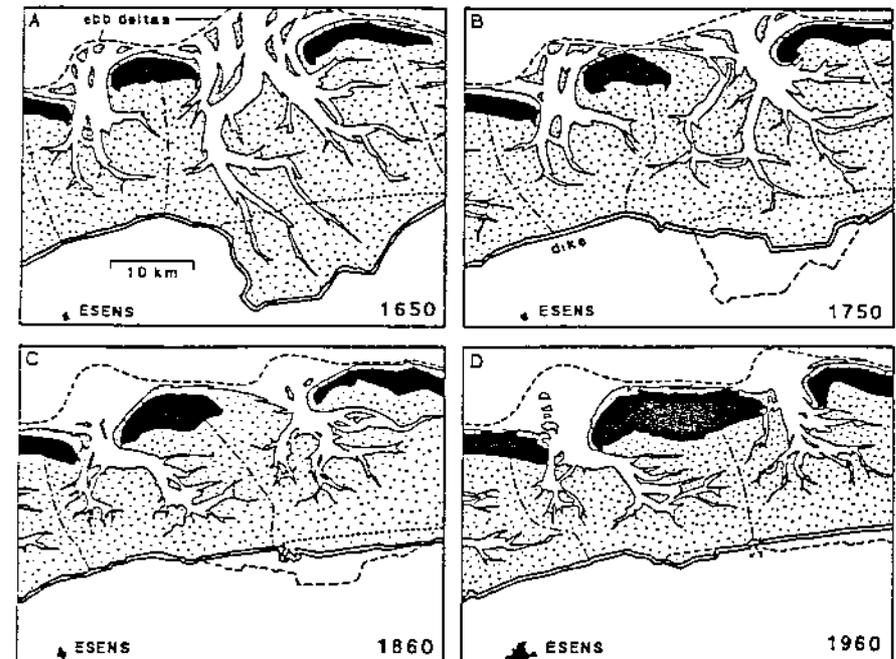


Abb. 7. Geographische Veränderungen des Rückseitenwatts von Spiekeroog und Wangeroog durch die Landgewinnungsmaßnahmen der letzten 1000 Jahre (Nach FLEMMING 1991).

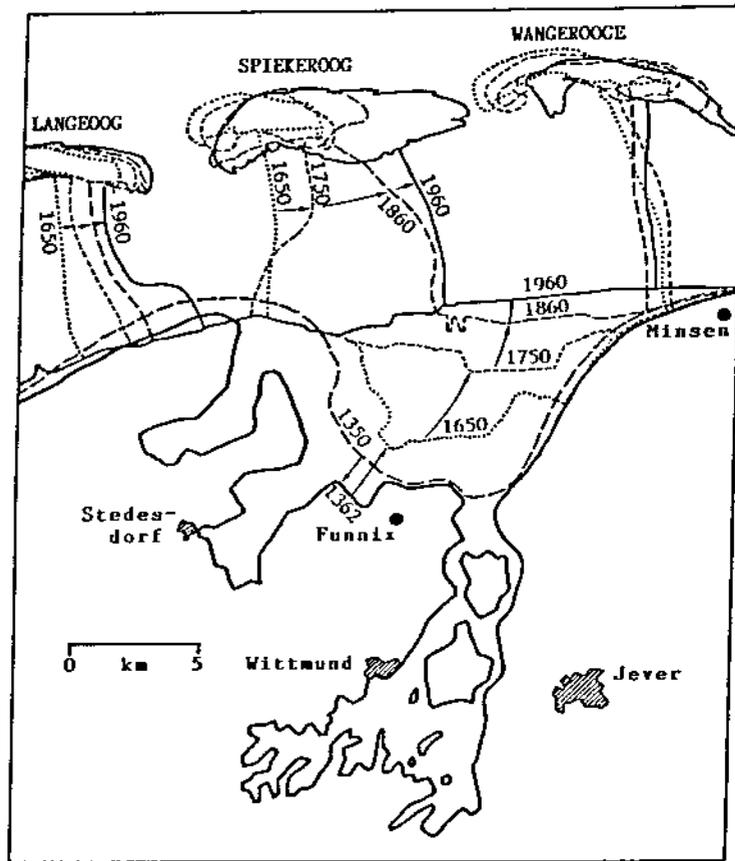


Abb. 8. Die Eindeichung der Harlebucht und ihre Auswirkung auf die morphologischen Veränderungen der östlichen Ostfriesischen Inseln (Mod. nach HOMEIER & LUCK 1969)

Bei weiterhin steigendem Meeresspiegel werden sich die Sedimentdefizite nicht nur auf die südlichen Randzonen beschränken, sondern sich auf das gesamte Rückseitenwatt einschließlich der Inseln ausdehnen. Die Ursache liegt dabei in den Küstenschutzmaßnahmen auf bzw. an den Inseln, die ein Mitwandern verhindern oder zumindest verzögern und damit die Sediment-spenderfunktion der Inseln unterbinden bzw. einschränken.

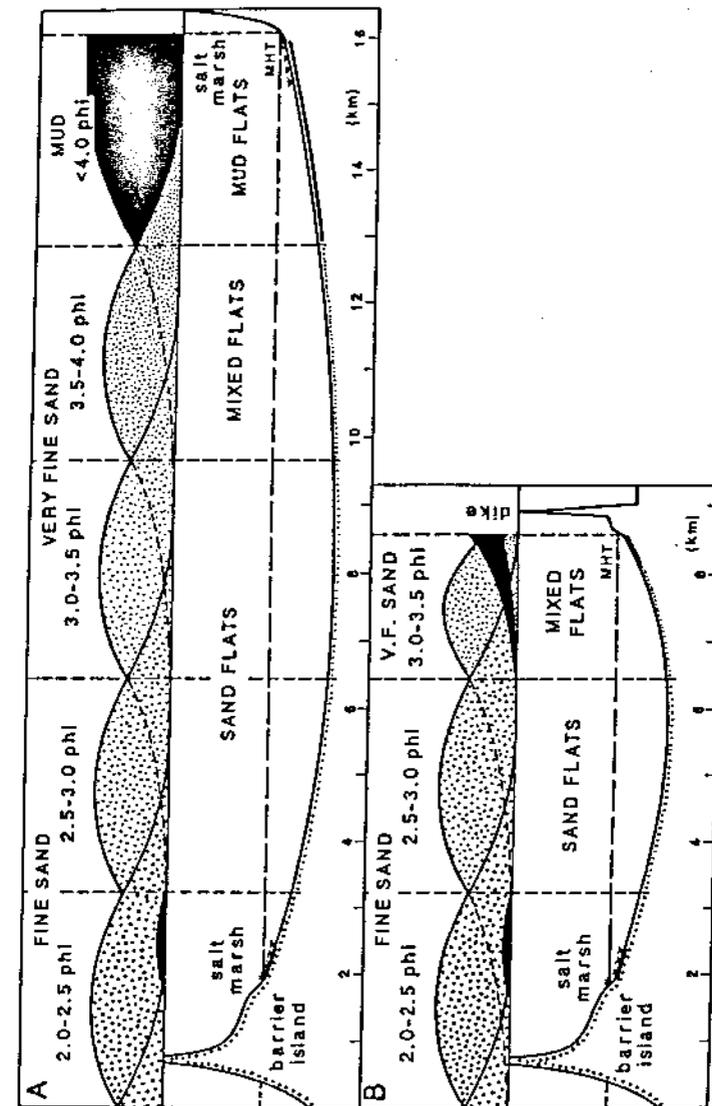


Abb. 9. A: Modell einer ungestörten Sedimentabfolge im Rückseitenwatt mit einer küstenwärtsgerichteten Korngrößenabnahme. B: Aktuelle Sedimentabfolge hinter Spiekeroog mit deutlichem Sedimentdefizit in den Feinfraktionen (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).

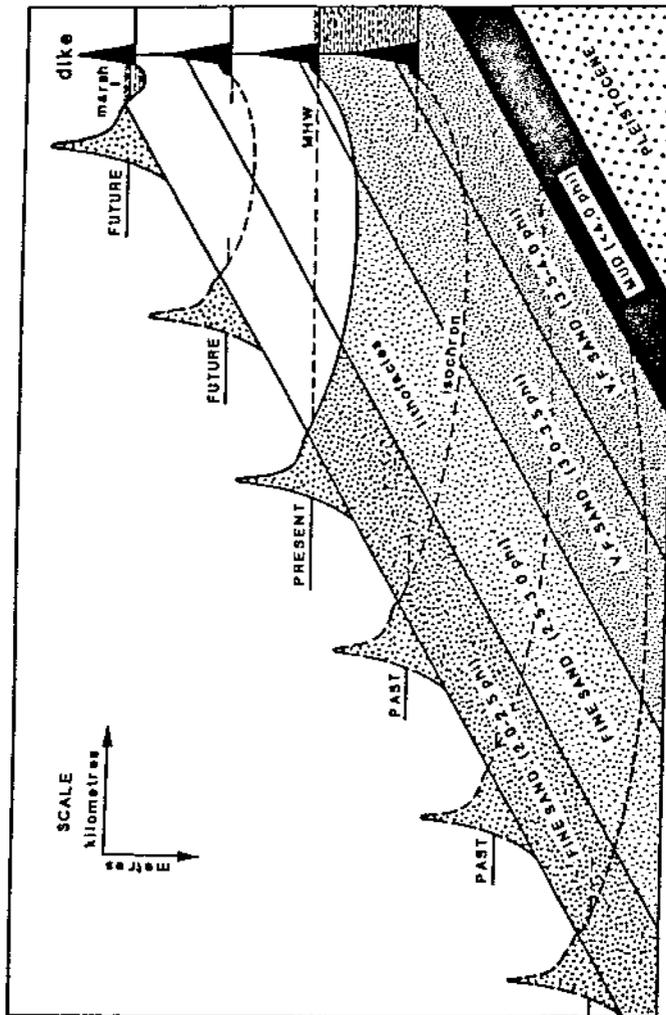


Abb. 10. Zweidimensionales Transgressionsmodell eines Rückseitenwatts - Durch den Meeresspiegelanstieg verlagert sich die Insel küstenwärts. Der Deich als feststehendes Element wirkt dieser Entwicklung entgegen. Das führt zu einer Verkleinerung des Rückseitenwatts und einer Abnahme im Korngrößenspektrum sowie einer relativen Vergrößerung seiner Sedimente (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).

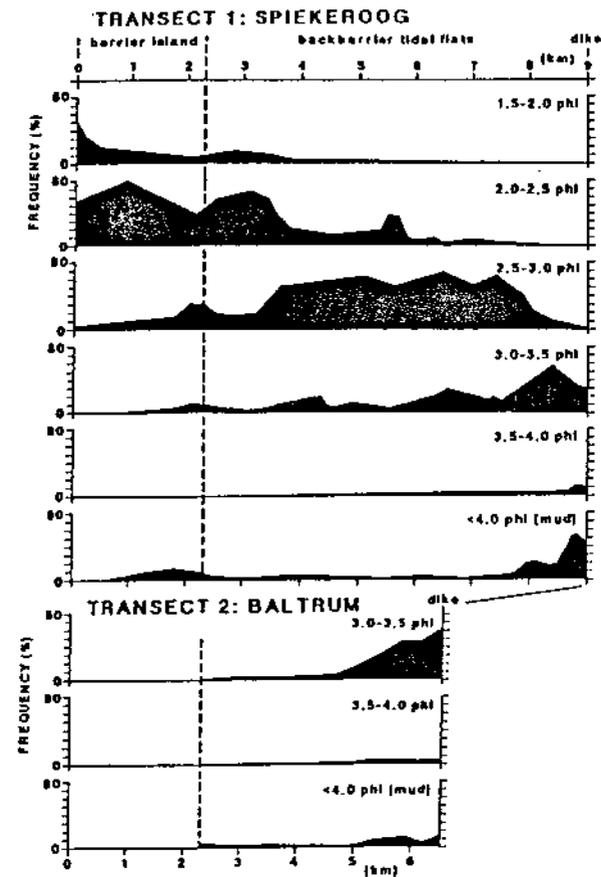


Abb. 11. Vergleich der räumlichen Ausdehnung der einzelnen Korngrößensklassen (0.5 Phi-Intervalle) zwischen Insel und Küste am Beispiel Spiekeroog (1) und Baltrum (2) (Nach FLEMMING & NYANDWI 1994).

7. Ausblicke und Konsequenzen

In welchem Zeitrahmen sich die Wattenregion in ihrer Sedimentzusammensetzung verändert und wie hoch das Sedimentdefizit pro Zeiteinheit letztendlich sein wird, ist schwer abzuschätzen. Eine Reihe von Puffermechanismen, beispielsweise die temperaturabhängige Sinkgeschwin-

digkeit, könnte bei einer Erhöhung der durchschnittlichen Wassertemperatur der Nordsee durch den "Treibhaus-Effekt", vor allem in den Wintermonaten, der Remobilisation von Sedimenten und deren Verweildauer in der Wassersäule entgegenwirken.

Dennoch wird es erforderlich sein, eine Reihe der derzeitigen Küstenschutzmaßnahmen auf ihre zukünftige Funktion hin zu überdenken und sich mit dem Gedanken vertraut zu machen, den Menschen in größerer Einstimmigkeit mit dem Ökosystem Wattenmeer leben zu lassen. Hier ist die vorgeschlagene Renaturierung von Salzwiesen in den Nordfriesischen Watten nur eine Möglichkeit (REISE 1995). Im Falle der Ostfriesischen Inseln wäre es sinnvoll, die natürliche Verlagerung so wenig wie möglich einzuschränken und, statt eines massiven Insel-schutzes durch Festlegung, die Ortschaften auf den Inseln gleichermaßen mit den Inseln "wandern" zu lassen.

Literatur

BREZINA, J., 1979. Particle size and settling rate distributions of sand-sized materials. - PARTEC, 2. Europ. Symp. on Particle Characterisation, Paper Session 1, 1-21.

EXO, K.-M., 1994. Das Wattenmeer- Unverzichtbarer Lebensraum für Millionen Küstenvögel. - Schriftenreihe SDN 8, 8-46.

FLEMMING, B.W., 1991. Holozäne Entwicklung, Morphologie und fazielle Gliederung der Ostfriesischen Insel Spiekeroog (südliche Nordsee). - Senckenberg am Meer, Ber. 91/3, 51 S.

FLEMMING, B.W. & DAVIS, R.A. Jr., 1994. Holocene evolution, morphodynamics and sedimentology of the Spiekeroog barrier island system (southern North Sea). - Senckenberg. marit. 24, 117-156.

FLEMMING, B.W. & NYANDWI, N., 1994. Land reclamation as a cause of fine-grained sediment depletion in backbarrier tidal flats. - Neth. J. Aquat. Res. 28, 299-307.

FLEMMING, B.W. & THUM, A., 1978. The settling tube - a hydraulic method of grain size analysis of sands. - Kieler Meeresforsch. Sonderheft 4, 82-95.

FLEMMING, B.W. & ZIEGLER, K., 1995. High - resolution grain size distribution patterns and textural trends in the backbarrier environment of Spiekeroog island. - Senckenberg. marit. 26, 1-24.

HOHMEIER, H. & LUCK, G., 1969. Das Historische Kartenwerk 1:50000 der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung als Ergebnis historisch-topographischer Untersuchungen und Grundlage zur kausalen Deutung der Hydrovorgänge im Küstengebiet. - Göttingen.

REINECK, H.-E. & SIEFERT, W., 1980. Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. - Die Küste 35, 26-51.

REISE, K., 1995. Predictive ecosystem research in the Wadden Sea. - Helgoländer Meeresunters. 49, 495-505.

SINDOWSKI, K.-H., 1973. Das ostfriesische Küstengebiet: Inseln, Wattenmeer und Marschen. - Samml. geol. Führer 57, Borntraeger, Berlin, 162 S..

WILGUS, CH.K., HASTINGS, B.S., KENDALL, C.G.S., POSAMENTIER, H W., ROSS, C.A. & VAN WAGONER, J.C., 1988. Sea-level changes: an integrated approach. - Soc. Econ. Pal. Min., Spec. Pub. 42, 1- 407.

Bund-Länder-Projekt "Klimaänderung und Küste"

*Ingmar Schmidt und Paul Bergweiler
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
Projekträgerchaften für das Bundesministerium für
Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
- Umweltsystemforschung -, Bonn*

1. Warum Klimawirkungsforschung?

Als Folge menschlichen Wirtschaftens, insbesondere der Nutzung fossiler Energieträger, ist die Atmosphäre der Erde in diesem Jahrhundert deutlich verändert worden. Neben der Reduktion der stratosphärischen Ozonschicht sind insbesondere die steigenden Konzentrationen von Kohlendioxid, Stickoxiden, Methan und troposphärischem Ozon messbare Signale des menschlichen Einflusses. Fast alle Experten prognostizieren in der Folge Änderungen des globalen Klimas. Die reine Prognose der Phänomene, wie "Treibhauseffekt" oder "Reduktion der stratosphärischen Ozonschicht", ist jedoch für politische Handlungsempfehlungen kaum nutzbar, weil die Folgen für den Lebensbereich der Menschen sehr unterschiedlich interpretiert werden können.

Es gilt daher, potentiell gefährdete Bereiche zu identifizieren, die Risiken abzuschätzen und geeignete Begegnungsstrategien zu entwerfen. Die Kenntnis der Gefährdungspotentiale ist erforderlich, um den notwendigen Aufwand zur Anpassung gegenüber einer Strategie der Vermeidung abwägen zu können.

Als Klima wird die Gesamtheit aller Wetterzustände über einen längeren Zeitraum an einem gegebenen Ort bezeichnet. Natürliche Lebensgemeinschaften und menschliche Kulturen haben sich hier dem jeweiligen Klima angepasst. Das örtliche Klima spiegelt sich daher z.B. in der Zusammensetzung der vorkommenden Tier- und Pflanzenarten, der Bauweise von Siedlungen und der Landnutzung wider. Prägend für den Charakter von Regionen sind vor allem Art und Häufigkeit von extremen

Wetterlagen wie Stürme, Starkniederschläge, Trockenheit oder Temperaturextreme. Gerade diese Charakteristika des regionalen Klimas sind jedoch derzeit nur mit großen Unsicherheiten vorhersagbar. Trotzdem ist es sowohl für das Erkennen potentiell betroffener Regionen oder Wirtschaftssektoren, wie auch für die Zeitplanung der notwendigen Forschungsaktivitäten erforderlich, schon jetzt Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen dem Klima und den von ihm beeinflussten Systemen zu untersuchen.

Um zu Aussagen über die zu erwartenden Entwicklungen zu gelangen, müssen die Modelle für die zu untersuchenden Regionen entwickelt werden. Für die Zuverlässigkeit ist die richtige Auswahl und Wichtung der wesentlichen Einflussparameter von entscheidender Bedeutung. Es kann erwartet werden, dass aus den Forschungsergebnissen dieser - eher vorbereitenden - Forschung schon Orientierungswissen über Empfindlichkeit bzw. Stabilität von Systemen gegenüber Klimaänderungen abgeleitet werden kann, auch wenn noch keine belastbaren Aussagen über die regionale Klimaentwicklung vorliegen.

2. Wie muss Klimawirkungsforschung erfolgen ?

Eine wichtige Voraussetzung dazu ist die Entwicklung geeigneter Methoden und Werkzeuge, um von den eher naturwissenschaftlich erfassbaren Primärwirkungen bis hin zu wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen Prognosemodelle zu erstellen. Es müssen gemeinsame Schnittstellen zwischen den Disziplinen erarbeitet werden, die hierzu Beiträge leisten können. Dazu gehört insbesondere die Kopplung der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen, die für die verschiedenen Wissenschaftsbereiche charakterisiert sind. Vom Menschen erlebte Klimafolgen sind multifaktorielle Phänomene, die sich sowohl aus der eher naturwissenschaftlich beschreibbaren Wirkung des Klimas selbst (z. B. Hitzestress) wie auch aus den eher sozioökonomisch beschreibbaren Folgen (z.B. Verteuerung von Agrarprodukten) ergeben. Darüber hinaus werden sich auch aus den politischen Begegnungsstrategien Auswirkungen für den einzelnen ergeben, die möglicherweise als wesentlich gravierender empfunden werden (z.B. Benzinpreiserhöhung). Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die Vielzahl der Einzelwirkungen nur bedingt zu einer Gesamtwirkung zusammengefasst werden können, da es zu zahlreichen Synergismen (z.B. geringere Wasserverfügbarkeit/erhöhter Wasserbedarf)

und Kompensationen (z.B. höhere Energieeffizienz, geringerer Heizenergiebedarf) kommen kann. Es wird daher erwartet, dass in realen Referenzsystemen gerade diese Wechselwirkungen zu erwarten sind.

Abbildung 1 zeigt die wesentlichen Zusammenhänge in einem Beziehungsgeflecht. Die treibende Kraft sind langfristige Klimaveränderungen. Diese fallen zuerst durch extreme Wetterereignisse auf.

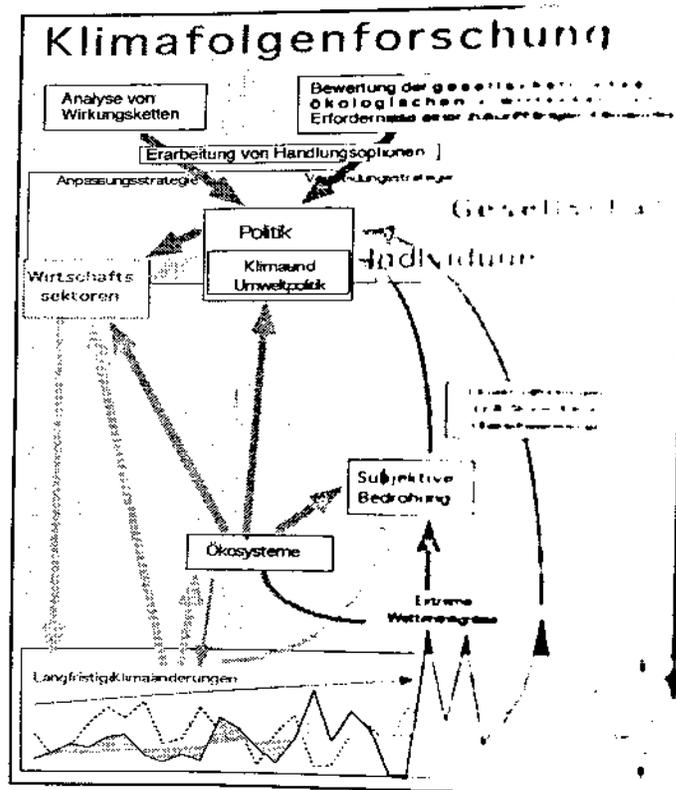


Abb. 1. Wirkung des Klimas auf unterschiedliche Komponenten des Klimasystems.

... zum Beispiel eine Abnahme des durchschnittlichen
... in einer längeren Dauer von regenfreien Perioden im
... werden. Überschreitet die Dauer einer regenfreien Periode
... eines Ökosystems, vertrocknet es. Es kommt damit zu
... des Ökosystems. Handelt es sich um ein landwirtschaftlich
... Ökosystem, können damit ganze Wirtschaftssektoren betroffen
...

... ist aber nicht die einzige. Eine lange Trockenperiode
... auch eine Verknappung der Trinkwasservorräte direkt auf die
... Meteorologische Extremereignisse werden oft auch
... von den objektiven Wirkungen als Bedrohung angesehen. Alle
... nicht verkürzt dargestellten Wirkungsketten beeinflussen
... und machen Entscheidungen notwendig. Da die
... Systeme (Ökosysteme, Wirtschaft und Gesellschaft) sehr
... und können wissenschaftlich fundierte Handlungsoptionen nur
... von Wirkungsketten erarbeitet werden. Genau an dieser
... das Bund-Länder-Projekt "Klimaänderung und Küste" ein.

**1. Welche Regionen sind für Klimawirkungsforschung besonders
geeignet?**

... Nord- und Ostseeküste ist als erste Region ausgewählt worden,
... von Bund und den fünf deutschen Küstenländern finanzierten
... Erfahrungen in diesem neuen, hochkomplexen
... zu sammeln. Der Küstenraum ist sowohl bei Änderungen
... selbst wie auch bei potentiellen Änderungen des
... durch Klimaänderungen besonders betroffen, darüber hinaus
... durch andere Umweltveränderungen (z. B. durch
...)

... Küstenraum bietet aufgrund seiner guten Forschungslandschaft
... Methoden zur Erarbeitung von Handlungsoptionen zu
... auch in anderen gefährdeten Regionen der Welt angewendet
...

und Kompensationen (z.B. höhere Energiekosten/geringerer Heizenergiebedarf) kommen kann. Es wird daher unumgänglich sein, an realen Referenzsystemen gerade diese Wechselwirkungen zu studieren.

Abbildung 1 zeigt die wesentlichen Zusammenhänge in diesem Beziehungsgeflecht. Die treibende Kraft sind langfristige Klimaänderungen. Diese fallen zuerst durch extreme Wetterereignisse auf.

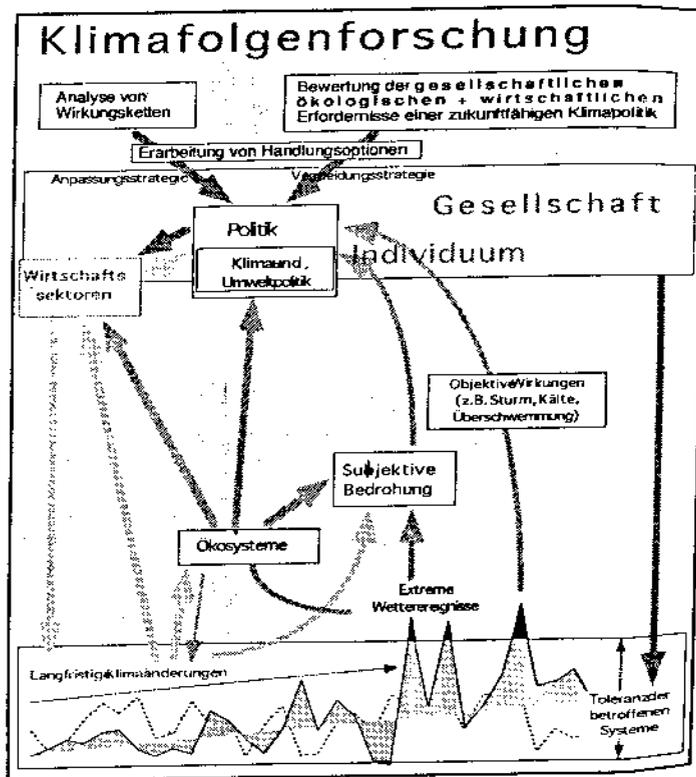


Abb. 1. Wirkung des Klimas auf unterschiedliche Komponenten des Systems.

So würde zum Beispiel eine Abnahme des durchschnittlichen Sommerniederschlags in einer längeren Dauer von regenfreien Perioden im Sommer sichtbar werden. Überschreitet die Dauer einer regenfreien Periode die Toleranzgrenze eines Ökosystems, vertrocknet es. Es kommt damit zu einer Schädigung des Ökosystems. Handelt es sich um ein landwirtschaftlich bedeutendes Ökosystem, können damit ganze Wirtschaftssektoren betroffen sein.

Diese Wirkungskette ist aber nicht die einzige. Eine lange Trockenperiode kann auch durch eine Verknappung der Trinkwasservorräte direkt auf die Gesellschaft wirken. Meteorologische Extremereignisse werden oft auch unabhängig von den objektiven Wirkungen als Bedrohung angesehen. Alle diese hier nur sehr verkürzt dargestellten Wirkungsketten beeinflussen politikrelevante Felder und machen Entscheidungen notwendig. Da die betroffenen Systeme (Ökosysteme, Wirtschaft und Gesellschaft) sehr komplex sind, können wissenschaftlich fundierte Handlungsoptionen nur über die Analyse von Wirkungsketten erarbeitet werden. Genau an dieser Stelle setzt das Bund-Länder-Projekt "Klimaänderung und Küste" ein.

3. Welche Regionen sind für Klimawirkungsforschung besonders geeignet?

Die deutsche Nord- und Ostseeküste ist als erste Region ausgewählt worden, um in einem vom Bund und den fünf deutschen Küstenländern finanzierten Verbundprojekt Erfahrungen in diesem neuen, hochkomplexen Forschungsgebiet zu sammeln. Der Küstenraum ist sowohl bei Änderungen der Wetterereignisse selbst wie auch bei potentiellen Änderungen des Meeresspiegels durch Klimaänderungen besonders betroffen, darüber hinaus ist seine Sensibilität durch andere Umweltveränderungen (z. B. durch Grundwassernutzung) gesteigert.

Der deutsche Küstenraum bietet aufgrund seiner guten Forschungslandschaft die Möglichkeit, Methoden zur Erarbeitung von Handlungsoptionen zu entwickeln, die auch in anderen gefährdeten Regionen der Welt angewendet werden können.

4. Welche Ziele verfolgt das Bund-Länder-Projekt "Klimaänderung und Küste"?

Neben den Wirkungen des Klimas selbst können auch Anpassungen des hydrologischen, morphologischen und biologischen Regimes an neue klimatische Verhältnisse Risiken für die im Küstenraum lebenden Menschen erzeugen.

Nach Deichbrüchen oder Überspülung von Schutzanlagen entlang der Nordseeküste, der Elbe und der Weser wären Sachverluste in Marschen, Halligen und Kögen, im Stadtgebiet von Hamburg und im Raum Bremen möglich, Menschen wären gefährdet. Eine Überflutung von Niederungen an der Ostseeküste beträfe dort fast alle größeren Städte.

Durch Verkleinerung der Düneninseln, Verlust von Außensänden, Erniedrigung der Wattflächen, Reduzierung der Salzwiesenareale, Rückverlagerung oder Durchbruch von Nehrungshaken sind Landverluste an der Nordsee und großflächige Uferlinienverschiebungen entlang der ungeschützten Ostseeküste möglich. In jedem Fall bedeutet der Verlust der Schutzfunktionen dieser Gebiete in Kombination mit erhöhten Belastungen durch Seegang und Hochwasser wachsende Risiken und zusätzliche Kosten im Küstenmanagement.

Die Grundwasservorräte in den tiefliegenden Küstenräumen und auf den Inseln könnten durch vordringendes Meerwasser versalzen. Die Entwässerung der tiefliegenden Gebiete würde beeinträchtigt; dies hätte Auswirkungen auf den Gütezustand der Gewässer. Die Brackwassergrenze könnte sich landwärts verschieben.

Veränderung der Lebensbedingungen und Flächenverluste in vielen küstenspezifischen Lebensräumen (Wattenmeer, Bodden, Verlandungssäume, Düncngürtel) beeinflussen die Struktur und Funktion vieler Ökosysteme. Wichtige Leistungen, wie Produktions- und Reinigungskapazitäten, natürliche Vielfalt, Anpassungsfähigkeit und ästhetischer Wert, wären betroffen. Dies birgt gleichermaßen ökonomische (Fischerei, Aquakultur, Attraktivität/ Tourismus) und gesundheitliche Risiken (Schadstoffbelastung, Infektionsanfälligkeit, Erholungswert) für die Gesellschaft.

Bei der Planung und Durchführung von Maßnahmen zum Natur- und Biotopschutz, zur Wasserwirtschaft, zum Küstenschutz, zur Entwicklung von Tourismus und Verkehr könnten sich die bestehenden Nutzungs- und Schutzkonflikte verschärfen. Sobald sich aber ernsthafte Gefahren einstellen, wird nach aller Erfahrung auch die Bereitschaft zur Lösung der Probleme steigen.

Aufwendige Anpassungsstrategien erfordern immense Mittel. Das gilt für neue Hochwasserschutzanlagen, für die Erosionsbekämpfung, für Deichverstärkungen oder Rückverlegung von Siedlungen in den kommenden Jahrzehnten ebenso wie für die Reaktionen auf fast alle anderen Auswirkungen des globalen Wandels, z.B. auf dem Fischerei-, Agrar-, Verkehrs- oder Gesundheitssektor. Ein Verlust von Naturräumen ist nur bedingt durch den Einsatz finanzieller Mittel aufzuhalten.

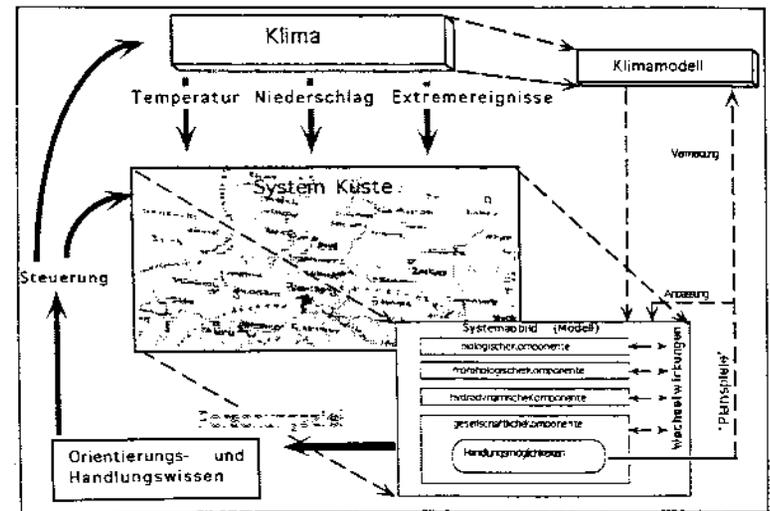


Abb. 2. Forschungsansätze und -ziele im Bund-Länder-Projekt "Klimaänderung und Küste".

5. Welche Forschung soll im Bund-Länder-Projekt "Klimaänderung und Küste" gefördert werden ?

Wissenschaftlich fundierte Handlungsoptionen können nur entwickelt werden, wenn die Wechselwirkungen von natürlichen und gesellschaftlichen Systemen erfasst werden. Die dem Projekt "Klimaänderung und Küste" zugrunde liegenden Überlegungen sind in Abbildung 2 zusammengefasst. Das System Küste ist in eine hydrodynamische, eine morphologische, eine ökologische und eine gesellschaftliche Komponente aufgeteilt, die aber in engen Wechselbeziehungen stehen. Das Forschungsziel, die Entwicklung von Orientierungs- und Handlungswissen, ist nur über ein Verständnis des Systems "Küste" zu erreichen.

Diese Aufgabe stellt große Anforderungen an die interdisziplinäre Zusammenarbeit unterschiedlichster Wissenschaftszweige und zwingt so die Wissenschaft dazu, Neuland zu betreten und neuartige, dem Problem angemessene Methoden zu entwickeln.

Die Forschungsaufgaben sind in Basisstudien, Fallstudien und managementorientierte Studien gegliedert:

Basisstudien dienen dem Systemverständnis. Sie sollen nur durchgeführt werden, wenn ihre Ergebnisse für das Verständnis der küstenspezifischen Strukturen und Prozesse unbedingt erforderlich, jedoch nicht anderweitig zu erhalten sind.

Fallstudien sollen besonders klimasensible Räume wie Wattenmeer, Nordseeinseln, Ästuare und Boddenlandschaft querschnittorientiert untersuchen, d.h. in Form interdisziplinärer Verbundvorhaben unter Vorgabe von Klimaänderungsszenarien.

Management-relevante Studien sollen die Wirkungen von tatsächlichen Klimafolgen oder von plausibel erscheinenden Impaktszenarien auf die vom Menschen dominierten Räume mit ihren unterschiedlichen Nutzungen erfassen. Sinnvolle Reaktionen sollen aufgezeigt und bewertet werden.

Die Forschungsfelder wurden in einer Forschungsrahmenkonzeption zusammengestellt und bewertet. Daraus ist dann der Forschungsleitplan entstanden, der Aufschluss über die Prioritäten und die zeitliche Reihenfolge

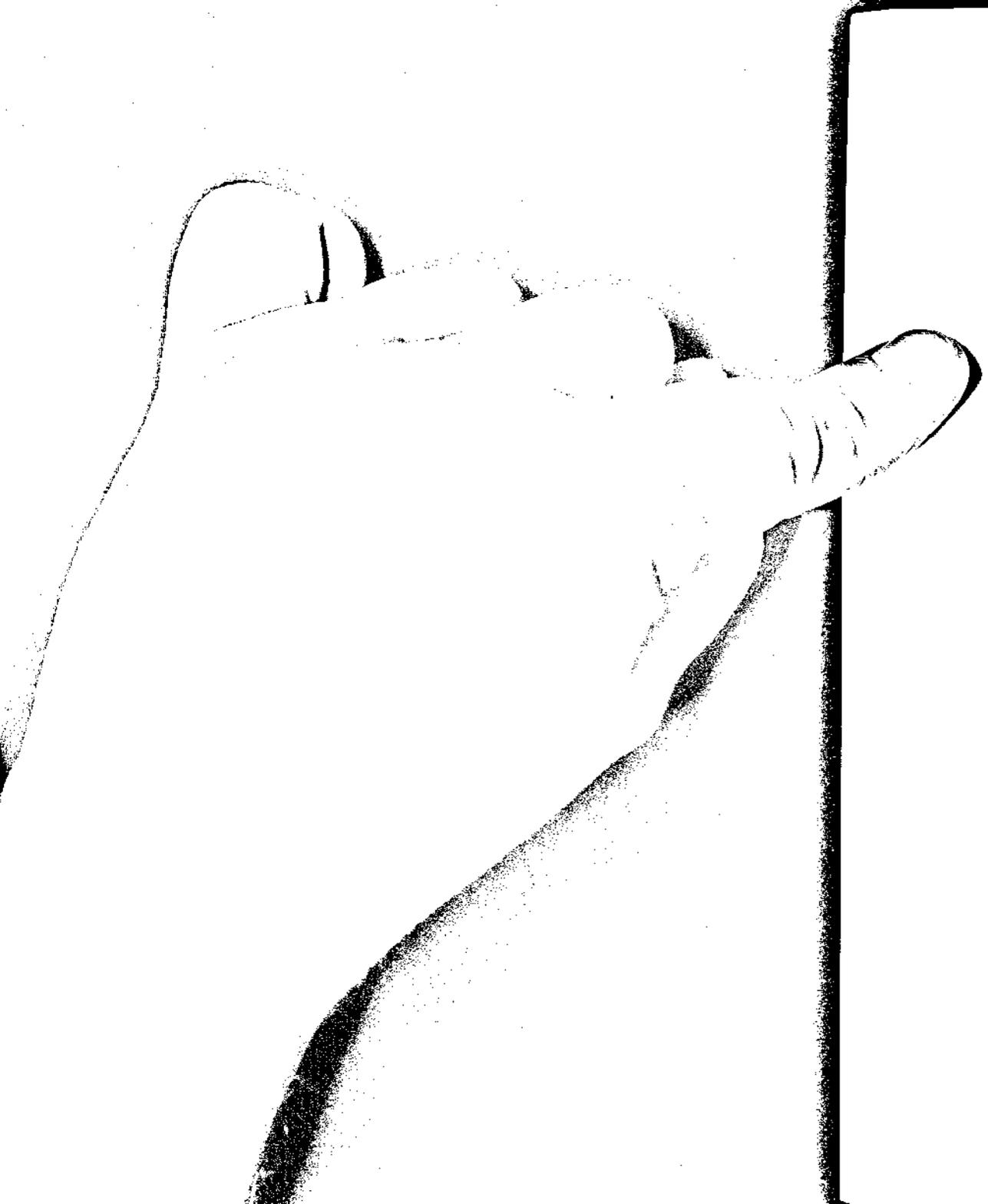
der Themenschwerpunkte gibt. Die Themen mit höchster Priorität wurden ausgeschrieben. Aus den eingegangenen Skizzen wurden dann vom Wissenschaftlichen Koordinatorenkollegium Vorschläge für Verbundvorhaben erarbeitet.

Die Interessen der Anwender (insbesondere Landesverwaltungen) sind von entscheidender Bedeutung für einen Erfolg des Projekts. Daher ist mit dem Behördenbeirat ein Gremium geschaffen worden, in dem Vertreter der Umwelt- und Wissenschaftsministerien die Möglichkeit haben, Einfluss auf die Ziele und Ausrichtungen des Projekts zu nehmen. Eine Auswahl der wichtigsten Verbundvorhaben möge die konkreten Forschungsziele verdeutlichen. Dabei werden zuerst diejenigen Verbundvorhaben aufgeführt, deren Ziel es ist, die Sensibilität von Räumen oder Ökosystemen gegenüber möglichen Klimaänderungen zu untersuchen.

Als Pilotprojekt hat das Verbundvorhaben "KLIBO" (Klimaänderung und Bodden) schon begonnen. Wichtigstes Ziel ist hier die Gefährdung der Boddenregion durch veränderte Wasserstände und Strömungen zu untersuchen. So sollen vergangene Veränderungen der Küstenlinien in Zusammenhang mit meteorologischen Ereignissen gebracht werden. Gleichzeitig wird versucht, Veränderungen der Küstenlinien mit Computern zu modellieren. Die Ergebnisse dieses Vorhabens werden insbesondere für Entscheidungen zur Planung des Küstenschutzes in dieser Region benötigt.

Im Rahmen der Fallstudie Sylt soll auf einer breiten wissenschaftlichen Basis eine Synthese der bisherigen auf Sylt bezogenen Forschung vorgenommen werden. Eine vorausschauende Betrachtung und Bewertung der Gefährdungen soll die Grundlage für die Entwicklung eines praxisbezogenen Küsten-Managements für Sylt sein. Die guten Datengrundlagen und das Forschungsdesign machen es möglich, auf Primärerhebungen im naturwissenschaftlichen Bereich fast gänzlich zu verzichten. Ergebnis dieser Fallstudie sollen wissenschaftliche Handlungsoptionen als Elemente eines küstenbezogenen Managements sein, die für politische Entscheidungen in der Region von Bedeutung sind. Gleichzeitig erwarten wir wesentliche Erkenntnisse über das Zusammenspiel der naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Randbedingungen.

In der Fallstudie Weserästuar wird ein charakteristischer Teilraum der deutschen Nordseeküste untersucht. Er soll stellvertretend für die vier



Ästuarie an der Deutschen Bucht (Ems, Weser, Elbe, Eider) unter Einbeziehung seines Umlandes bezüglich seiner Sensibilität gegenüber Klimafolgen untersucht werden. Ziel ist es, für einen solchen küstentypischen Naturraum querschnittsorientiert seine Klimasensibilitäten hinsichtlich der hydrographischen, morphologischen, ökologischen und sozioökonomischen Eigenschaften sowie deren Wechselwirkungen und Rückkopplungen zu analysieren. Mögliche Reaktionen dieser Systeme sollen aufgrund von Klimaszenarien prognostiziert werden. Die vorsorgliche Entwicklung von Reaktions- und Vermeidungsoptionen bildet den Abschluss der Fallstudie "Weserästuar".

Einen besonders sensiblen Raum stellt die Wattregion dar. Eine Zunahme der Intensität und Häufigkeit von Sturmlagen wird die Umlagerungsprozesse im unmittelbaren Küstenvorfeld beschleunigen, wobei insbesondere die biologisch dichtbesiedelten, nähr- und schadstoffreichen feinen Sedimentfraktionen betroffen sind. Gegenwärtig zeichnen sich im schleswig-holsteinischen Wattenmeer signifikante Erosionserscheinungen ab. Es soll die Bedeutung klimabedingter Änderungen des Energieeintrags für Umlagerungs- und Transportprozesse im Wattenmeer und Küstenvorfeld, die Auswirkungen auf pelagische und benthische Lebensgemeinschaften sowie die erosionsbedingte Schad- und Nährstoff-Freisetzung aus dem Sediment untersucht werden.

Im Mittelpunkt des Verbundvorhabens "Salzwiesen und Dünen" steht die Untersuchung der unmittelbar von Klimaänderungen betroffenen Salzwiesen- und Dünenflora und -fauna. Beides sind extreme und besonders dynamische Lebensräume mit hochgradig sensiblen, spezialisierten Lebensgemeinschaften. Veränderungen dieser Küstenökosysteme sind von großer Bedeutung für den Naturhaushalt und menschliche Nutzungen.

Einer der wichtigen Wirtschaftssektoren in dieser Region ist der Tourismus. Im Zuge eines kleineren Verbundvorhabens zu dieser Fragestellung sollen vier Fragen beantwortet werden:

- Wie sehen potentielle Entwicklungspfade des Tourismus aus?
- In welchen Regionen und Produktsektoren und wie stark wird der Küstentourismus von Klimaänderungen betroffen sein und welche Spielräume hat er für Anpassungsstrategien?

- Welche Anpassungsstrategien sind für die unterschiedlichen Gruppen von Entscheidungsträgern möglich?
- Welche Informationen benötigen die Entscheidungsträger für vorsorgende Anpassung, wann müssen diese in welcher Form zur Verfügung stehen, wie sind sie zu vermitteln?

Diese Verbundvorhaben benötigen Eingangsinformationen zu Klima- und Planungsprozessen und aus den Ergebnissen müssen Handlungsoptionen abgeleitet werden. Eine zweite Gruppe von Vorhaben hat den Schwerpunkt in diesen Bereichen.

Die Ergebnisse der Klimaforschung sollen im Rahmen eines Vorhabens am Max-Planck-Institut für Meteorologie entsprechend den spezifischen Anforderungen des Programms "Klimaänderung und Küste" aufbereitet werden. Dabei sollen Klimaänderungsszenarien für den norddeutschen Küstenraum erarbeitet werden.

Im Rahmen zweier Pilotvorhaben werden die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Sturmentwicklung, Extremwasserstände und Tidedynamik in der Nordsee untersucht. Dabei steht insbesondere die Kopplung von Klimamodellen mit hydrodynamischen Modellen im Vordergrund. Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wasserstand, Strömungen und Seegang der Ostsee werden in einem Verbundvorhaben untersucht. Hier sind die wesentlichen Ziele:

1. Die Erstellung einer konsistenten Datenbasis basierend auf Ergebnissen eines Simulationsmodells zu längerperiodischen Wasserstandsänderungen der Ostsee zur weiteren Auswertung und Bewertung im Rahmen des Verbundvorhabens.
2. Die Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche klimarelevante Trends.

Das umfangreiche bestehende Wissen über bewährte Strategien, Maßnahmen und Techniken zum Schutz des Küstengebietes und die Wechselwirkungen zwischen Küstenschutzbauwerken und maritimer Umwelt soll in einem Vorhaben wissenschaftlich fundiert aufgearbeitet und als Grundlage für innovative Ansätze und Entwicklungen genutzt werden. Ein weiteres Vorhaben soll sich mit der Nutzung von Geographischen Informationssystemen (GIS) für planungsrelevante Ergebnisse beschäftigen.

Unter anderem ist die Weiterentwicklung von Analysemethoden und -kriterien zur Bewertung von (maritimen) Nutzungen, die Aus- bzw. Bewertung von Informationen und Daten zum Zweck der Formulierung planungsrelevanter Ziele sowie die Analyse und Darstellung der Konfliktkonfigurationen im Beziehungsrahmen Sozioökonomie und Naturschutz vorgesehen.

Im Wissenschaftlichen Sekretariat wird die Zusammenführung bzw. Integration von Inhalten und Daten aus interdisziplinären Verbundvorhaben im Zentrum stehen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen aktiv zur Entwicklung von Küstenmanagementkonzepten angewendet werden. Zusammen mit einem Vorhaben zur Entwicklung des GIS und einem Synthesevorhaben am Potsdam Institut für Klimawirkungsforschung sollen die Ergebnisse der verschiedenen Vorhaben im Bund-Länder-Projekt "Klimaänderung und Küste" frühzeitig zusammengefasst und synthetisiert werden. Durch Anlage und Verwaltung des GIS soll eine einheitliche Datenbasis für das Projekt entwickelt und gepflegt werden.

6. Ausblick

Am Beispiel der norddeutschen Küstenlandschaft wird deutlich, dass ein Zusammenwirken vieler Faktoren zu berücksichtigen ist, wenn man potentielle Wirkungen eines veränderten Klimas abschätzen will. Das Potsdam Institut für Klimawirkungsforschung nimmt - auch für zukünftige Themenschwerpunkte - eine zentrale Rolle bei der wissenschaftlichen Ausgestaltung dieser komplexen Forschungsaufgabe ein. Wichtigste Aufgabe des PIK ist die Zusammenschau der relevanten Forschungsergebnisse und ihre Abbildung in integrierten Modellen. Das bedeutet auch, dass die Definition der Forschungsdefizite im wesentlichen durch den Top-Down-Ansatz erfolgt und daher mit der Weiterentwicklung der - problemorientiert konzipierten - Modelle fortgeschrieben werden muss. Zukünftige Schwerpunkte der Klimawirkungsforschung werden sich daher nicht nur an potentiell gefährdeten Regionen, wie Küste oder Alpen, sondern auch an klimasensiblen Prozessen und Wirtschaftssektoren orientieren. Paläoklimatische Untersuchungen belegen, dass deutliche Klimaänderungen durchaus innerhalb weniger Jahre stattfinden können. Aber selbst bei einer langsamen und gleichmäßigen Änderung des regionalen Klimas kann das auf der Wirkungsseite, d.h. für einzelne Räume oder Wirtschaftssektoren, abrupte Zustandsänderungen bedeuten. Langfristiges Ziel der

Klimawirkungsforschung ist es, diese im Vorfeld zu erkennen, um negative Folgen für Mensch, Gesellschaft und Umwelt zu vermeiden.

Literatur

Forschungsleitplan "Klimaänderung und Küste"

SCHELLNHUBER, H.-J. & STERR, H. (Hrsg.) 1993. Klimaänderung und Küste. - Springer, Berlin.

Anschriften der Verfasser

Priv.-Doz. Dr. Gerd Liebezeit
Forschungszentrum TERRAMARE
Schleusenstr. 1
26382 Wilhelmshaven

Dr. habil. Horst Sterr
Institut für Chemie und Biologie
des Meeres
Universität Oldenburg
Postfach 2503
26111 Oldenburg

Prof. Dr. Karsten Reise
Biologische Anstalt Helgoland
Wattenmeerstation Sylt
25992 List

Prof. Dr. Dietrich Mossakowski
Fachbereich Biologie
Universität Bremen
Postfach 33 04 40
28334 Bremen

Peter Petersen
Landesamt für Wasserhaushalt
und Küsten
Saarbrückenstr. 38
24114 Kiel

Dr. Alexander Bartholomä
Senckenberg-Institut
Schleusenstr. 39A
26382 Wilhelmshaven

Prof. Dr. Burghard W. Flemming
Senckenberg-Institut
Schleustr. 39A
26382 Wilhelmshaven

Dr. Ingmar Schmidt
Deutsche Forschungsanstalt
für Luft- und Raumfahrt
Godesberger Allee 117
53175 Bonn

Dr. Paul Bergweiler
Deutsche Forschungsanstalt
für Luft- und Raumfahrt
Godesberger Allee 117
53175 Bonn