

Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste

Von ULRICH FERK

Zusammenfassung

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand der Klimaforschung ist aufgrund der wachsenden Konzentration klimawirksamer Spurengase in der Erdatmosphäre mit einem zusätzlichen „Treibhauseffekt“ zu rechnen, der bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur der unteren Atmosphäre um ca. 3 K gegenüber heute bewirken wird. Infolge dieser Erwärmung wird eine Beschleunigung des globalen Meeresspiegelanstiegs erwartet. Für die Ökologie und die Sicherheit der deutschen Nordseeküste ist von entscheidender Bedeutung, in welcher Weise die vorgelagerten Watten auf eine solche Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs „reagieren“ werden. Insbesondere interessiert die Frage, ob das zukünftige Höhenwachstum des Wattes – wie bisher – mit dem Anstieg des Meeres Schritt halten kann. Die morphometrische Untersuchung von acht Watteinzugsgebieten (Gesamtfläche gut 630 km²) der niedersächsischen Nordseeküste ergibt, daß der derzeit noch bestehende hydrologisch-morphologische Gleichgewichtszustand des Wattenmeersystems durch einen beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels gestört werden wird, was zu morphologischen Veränderungen der Watten führen wird. So werden die einzelnen Watteinzugsgebiete aufgrund ihrer abweichenden Struktur zwar unterschiedlich auf eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs reagieren, grundsätzlich wird das Wachstum der Wathöhen aber nicht vollständig mit der beschleunigten Erhöhung des Meeresspiegels Schritt halten.

Summary

Based on current climate model results, growing atmospheric concentrations of greenhouse gases will result in an increase in global mean air temperature of about 3 K above the present value before the end of the next century. This additional warming of the lower atmosphere will lead to an acceleration in global mean sea level rise. It is of great importance for the safety and ecology of the low-lying German North Sea coast, how the tidal flats of the Wadden Sea will „react“ to such an acceleration in sea level rise. The main question to be answered is, whether the future rate of sedimentation of the tidal flat areas will still keep pace with the accelerated sea level rise. The morphometric analysis of eight tidal basins (total area: 630 km²) situated along the coast of Lower Saxony indicates, that there will be a change in the morphological development of the whole Wadden Sea system due to accelerated sea level rise. Although the morphological reaction to rising sea level will not be the same in every tidal basin, it is most likely, that the future amount of sedimentation will not be sufficient to compensate the rising sea level in the entire Wadden Sea of Lower Saxony.

Inhalt

1. Einleitung	136
2. Die anthropogene globale Klimaänderung	136
3. Das Problem des globalen Meeresspiegelanstiegs	138
4. Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste	139
4.1 Das Untersuchungsgebiet	140

4.2 Der morphologische Gleichgewichtszustand der Wattenzugsgebiete	144
4.3 Beeinflussung des Gleichgewichtszustandes durch einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg	146
4.4 Die morphologische Reaktion auf den gestörten Gleichgewichtszustand	147
4.5 Das Sedimentdefizit der Wattenzugsgebiete	149
5. Konsequenzen aus den ermittelten Ergebnissen	154
6. Schriftenverzeichnis	155

1. Einleitung

Es gibt nur wenige Umweltthemen, die in den letzten Jahren für derartig viel Diskussionsstoff gesorgt haben und die Öffentlichkeit so nachhaltig beschäftigt haben, wie der sogenannte „Treibhauseffekt“ und seine Folgen für das Leben auf der Erde. Als unmittelbare Folge der von Klimaforschern vorhergesagten Erwärmung der Erdatmosphäre wird in einer Vielzahl von Publikationen zumeist ein Ansteigen des globalen Meeresspiegels genannt. Obwohl das genaue Ausmaß der zukünftigen Klima- und Meeresspiegeländerungen bisher von niemandem vorhergesagt werden kann, sind Studien über mögliche weltweite Folgewirkungen von großer Wichtigkeit, um gegebenenfalls rechtzeitig auf unabwendbare Veränderungen der Umwelt reagieren zu können. Konkrete Aussagen über mögliche Folgen eines Anstiegs der Wasserstände für die deutschen Küsten sucht man bis heute allerdings nahezu vergeblich. Dies ist um so erstaunlicher, wenn man bedenkt, daß insbesondere die Nordseeküste von einer Landschaft geprägt ist, die aufgrund ihrer physisch-geographischen Beschaffenheit als außerordentlich gefährdet angesehen werden muß: dem Wattenmeer. Informationen über Konsequenzen eines Meeresspiegelanstiegs für das Wattenmeer sind daher sowohl vom Standpunkt des Natur- als auch des Küstenschutzes von großem Interesse. Zwei grundlegende Fragenkomplexe, die sich in diesem Zusammenhang ergeben und hier am Beispiel der niedersächsischen Wattenküste untersucht werden sollen, lauten:

- a) *Wie „reagiert“ das Wattenmeer auf einen Anstieg der Meeresspiegelhöhe? Wird das Höhenwachstum des Wattes mit dem Anstieg des Meeresspiegels Schritt halten können?*
- b) *Sind regionale Unterschiede in der morphologischen Entwicklung verschiedener Wattgebiete zu erwarten?*

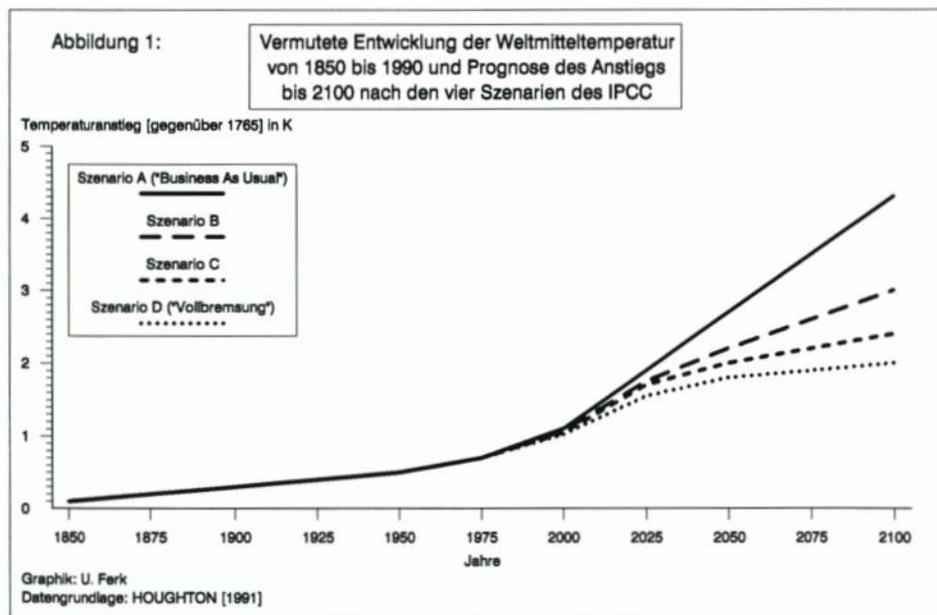
2. Die anthropogene globale Klimaänderung

Es besteht unter den Klimaforschern weitgehende Einigkeit darüber, daß die globale Mitteltemperatur der unteren Atmosphäre in den letzten 100 Jahren um einen Betrag von 0,3 bis 1 K angestiegen ist (HOUGHTON, 1991; SCHÖNWIESE, 1990). Auch wenn die natürliche Variabilität des Klimas keinen zweifelsfreien Beweis über den Zusammenhang zwischen den derzeit beobachteten Temperaturänderungen und den Spurenstoffkonzentrationen der jüngeren Vergangenheit zuläßt, steht diese Temperaturerhöhung auf jeden Fall im Einklang mit den Ergebnissen der Klimamodelle. Es ist somit sehr wahrscheinlich, daß zumindest ein Teil dieser Erwärmung bereits auf die „Treibhauswirkung“ anthropogen emittierter klimawirksamer Spurengase zurückzuführen ist (HOUGHTON, 1991).

Sich ein Bild von der zukünftigen Entwicklung der globalen Temperatur zu machen, ist ein schwieriges Unterfangen, da u. a. das Ausmaß der zukünftigen anthropogenen Spuren-

gasemissionen abgeschätzt werden muß. Alle Prognosen beruhen daher auf Szenarien, in denen verschiedene Möglichkeiten der zukünftigen weltweiten sozio-ökonomischen Entwicklung berücksichtigt werden. Die umfangreichsten Berechnungen hierzu stammen von einer Arbeitsgruppe des 1988 von der *World Meteorological Organization (WMO)* und des *United Nations Environment Programme (UNEP)* ins Leben gerufenen *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.

Der IPCC unterscheidet zwischen vier verschiedenen Zukunftsszenarien. Im Szenario A wird davon ausgegangen, daß die Entwicklung der Weltwirtschaft im gegenwärtigen Ausmaß fortschreitet („*Business As Usual*“), während die Szenarien B und C mäßige bis deutliche Eingriffe in den globalen Spurengasausstoß vorsehen. Szenario D, von einigen Autoren treffend als „Vollbremsung“ charakterisiert, beinhaltet den sofortigen und massiven Rückgang des Ausstoßes aller klimawirksamen Spurenstoffe. In Abb. 1 sind die auf Grundlage dieser Spurengasszenarien zu erwartenden Temperaturänderungen bis zum Jahre 2100 dargestellt.



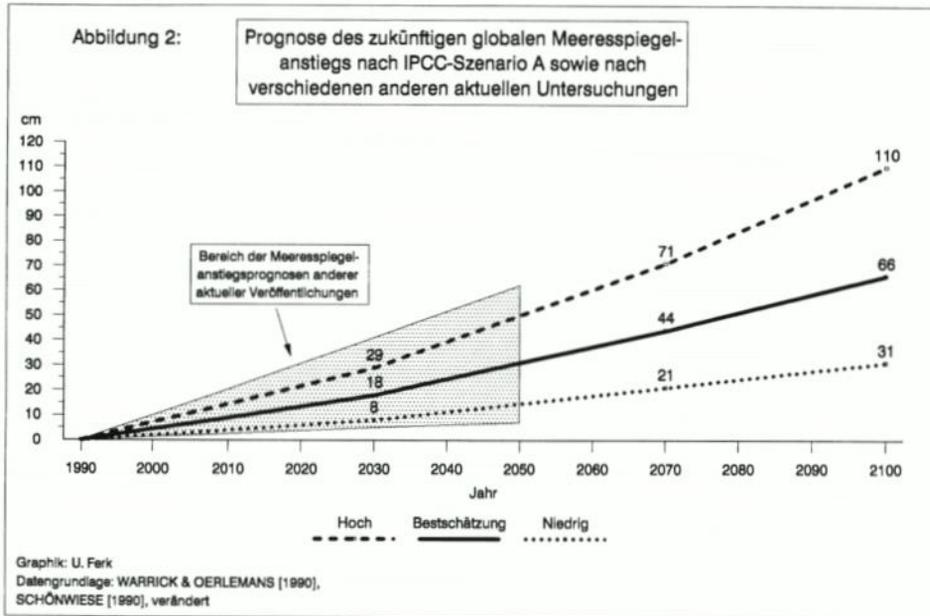
Die dargestellten Temperaturwerte entsprechen jeweils einer gemittelten „Bestschätzung“ für das jeweilige Szenario. Legt man beispielsweise für Szenario A die „hohe Schätzung“ zugrunde, wäre bis zum Jahr 2100 sogar mit einer Erhöhung der bodennahen Weltmitteltemperatur um 6,5 K zu rechnen. Solche Unsicherheiten deuten auf die Schwächen der Klimamodelle hin. Die Berücksichtigung des strömenden Ozeans, der diversen Rückkopplungsmechanismen des veränderten Klimas auf die natürlichen Quellen und Senken der einzelnen Spurenstoffe, aber auch die Modellierung des hydrologischen Kreislaufs bereiten nach wie vor große Schwierigkeiten (HOUGHTON, 1991; SCHÖNWIESE, 1990). Nach dem aktuellsten Stand des Wissens wird heute von einer globalen Temperaturerhöhung um rund 3 K in den nächsten 100 Jahren ausgegangen (DE RONDE, 1994).

3. Das Problem des globalen Meeresspiegelanstiegs

In den letzten Jahren wurden viele Versuche unternommen, die globale Entwicklung der Meeresspiegelhöhe während der letzten 100 Jahre anhand von Pegelauswertungen nachzuvollziehen. Fast alle von einer weiteren IPCC-Arbeitsgruppe analysierten Untersuchungen zu dieser Thematik zeigen eine Anstiegsrate zwischen 1 bis 2 mm pro Jahr, was also einem mittleren Anstieg von 10 bis 20 cm in 100 Jahren entspricht (WARRICK & OERLEMANS, 1990). Obwohl einige Fragezeichen hinsichtlich der exakten Bewertung der Erdkrustenbewegungen bestehen, gilt als derzeit allgemein akzeptierte Meinung, daß der globale Meeresspiegel seit Beginn der Wasserstandsbeobachtung tatsächlich um diesen Betrag angestiegen ist. Trotz einiger Hinweise gibt es bisher keine Beweise für eine Beschleunigung dieser Anstiegsrate in den letzten Jahrzehnten. Entsprechende Werte des Meeresspiegelanstiegs wurden anhand der MThw-Werte in den letzten Jahren auch für das niederländische, das südliche dänische und das deutsche Nordseeküstengebiet ermittelt (LASSEN, 1989). Ein gemäßigtes Ansteigen der Wasserstände ist für die Küsten der südlichen Nordsee ohnehin seit Jahrhunderten ein völlig normaler, längst bekannter und sogar grundlegender Prozeß, der die ausgewogenen Verhältnisse, die zum Erhalt von Küste, Inseln und Wattengebiet notwendig sind, erst herbeigeführt hat (LUCK, 1987). Bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang allerdings die unterschiedlichen Entwicklungen von MThw und MTnw in den letzten Jahrzehnten. An vielen Küstenabschnitten der südlichen Nordsee ist eine Beschleunigung des MThw-Anstiegs und ein stagnierender oder eher absinkender Trend des MTnw mit entsprechend ansteigenden mittleren Tidenhöhen zu beobachten. Für diese Entwicklungen gibt es bisher nur erste Erklärungsansätze (FÜHRBÖTER, 1989; GRASSL, 1991).

In bezug auf den globalen Meeresspiegelanstieg gilt als gesichert, daß der größte Teil des bisherigen Anstiegs einerseits durch die thermische Ausdehnung der Warmwassersphäre des Ozeans und andererseits durch verstärktes Abschmelzen von Gebirgsgletschern hervorgerufen wurde. Dem grönländischen und dem antarktischen Inlandeis werden dagegen eine gewisse Stabilität bescheinigt. Auch in der näheren Zukunft werden die thermische Ausdehnung des Meerwassers sowie das Abschmelzen von Gebirgsgletschern und kleineren Eiskappen die wichtigsten Faktoren für den Anstieg des Meeres sein, während die großen festländischen Eisschilde weiterhin als relativ stabil angesehen werden (WARRICK & OERLEMANS, 1990). Das trifft insbesondere auf die Antarktis zu, der für die Zukunft sogar eine den Meeresspiegel absenkende Wirkung zugesprochen wird. Die aktuellen Prognosen zur zukünftigen Meeresniveaumentwicklung sind daher im Vergleich zu den älteren recht moderat geworden. In Abb. 2 werden die auf IPCC-Szenario A basierenden Schätzungen des Meeresspiegelanstiegs bis zum Jahr 2100 dargestellt.

Demzufolge ist bis zum Jahr 2100 mit einem Anstieg des Meeres von 31 bis 110 cm zu rechnen, wobei die beste Schätzung gut 60 cm beträgt. In diesem Bereich liegen auch eine Reihe weiterer Untersuchungen zum Meeresspiegelanstieg (vgl. SCHÖNWIESE, 1990; STEWART et al., 1990), was durch den schraffierten Bereich in Abb. 2 angedeutet wird. Der IPCC-Bestschätzung entspricht eine zukünftige Anstiegsrate des mittleren Meeresniveaus von rund 6 mm pro Jahr, was ungefähr einer Vervielfachung des aktuellen säkularen Trends gleichkäme. Nach neuesten Untersuchungen wird der globale Meeresspiegelanstieg eher ein noch geringeres Maß aufweisen. So weist z. B. DE RONDE (1994) darauf hin, daß aufgrund der Verbesserung der Computermodelle in den letzten Jahren sowohl die prognostizierten Temperatur- als auch die Meeresspiegelerhöhungen z. T. deutlich nach unten korrigiert werden mußten. Grundsätzlich muß aber ohnehin betont werden, daß sich derartige Angaben auf den global gemittelten Anstieg des Meeresspiegels beziehen. Aufgrund der Überlagerung mit



regionalen geologischen und klimatologischen Prozessen wird sich diese Entwicklung auf lokaler Ebene verstärkt, abgeschwächt oder auch, wie beispielsweise an den sich hebenden Küsten Skandinaviens, überhaupt nicht bemerkbar machen. Im folgenden soll sich in bezug auf diese Arbeit am „Richtwert“ des Meeresspiegelanstiegs von 60 cm bis zum Ende des nächsten Jahrhunderts orientiert werden, wie es auch für die niederländische Küste von DE RONDE (1994) praktiziert wird.

4. Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs für die Wattgebiete der niedersächsischen Nordseeküste

Der vorhergesagte Wasserspiegelanstieg erscheint für das deutsche Nordseeküstengebiet zunächst einmal als wenig dramatisch, da zumindest die gesamte Festlandsküste mit Seedeichen und Schutzwerken ausgestattet ist, deren „Sicherheitsreserven“ einen Anstieg in der prognostizierten Größenordnung weitgehend problemlos auffangen würden. Da das Binnenland auf den ersten Blick nicht gefährdet sein wird, gilt es, das Augenmerk auf die zu erwartenden Prozesse vor der Deichlinie zu richten (KUNZ, 1991). Es besteht kein Zweifel darüber, daß die Vorländer sowie die Sandstrände und Dünengebiete der Außenküste bei einem beschleunigten Anstieg der Nordsee durch zunehmende Erosion deutlich stärker in Mitleidenschaft gezogen werden, und zwar unabhängig davon, ob im Zuge der Klimaänderung auch die Sturmfluthäufigkeit im Nordseeraum zunehmen wird. So führt nach HEKSTRA (1988) ein Meeresspiegelanstieg von 1 m an den sandigen Küsten von Belgien bis Dänemark zu einem Strandrückgang von 60 bis 80 m, wobei sich der Betrag bei Stränden mit sehr feinem Sand auch auf bis zu 200 m belaufen kann.

Die eigentliche Schlüsselrolle hinsichtlich der Auswirkungen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs kommt jedoch ohne Zweifel dem Wattenmeer zu. Neben seiner welt-

weit einzigartigen Bedeutung als Ökosystem hat das Watt auch eine große Wichtigkeit für den Küstenschutz, indem es – zusammen mit dem Vorland – bei Sturmfluten als natürlicher, großflächiger „Wellenbrecher“ für die zurückliegenden Deiche der Festlandsküste dient.

4.1. Das Untersuchungsgebiet

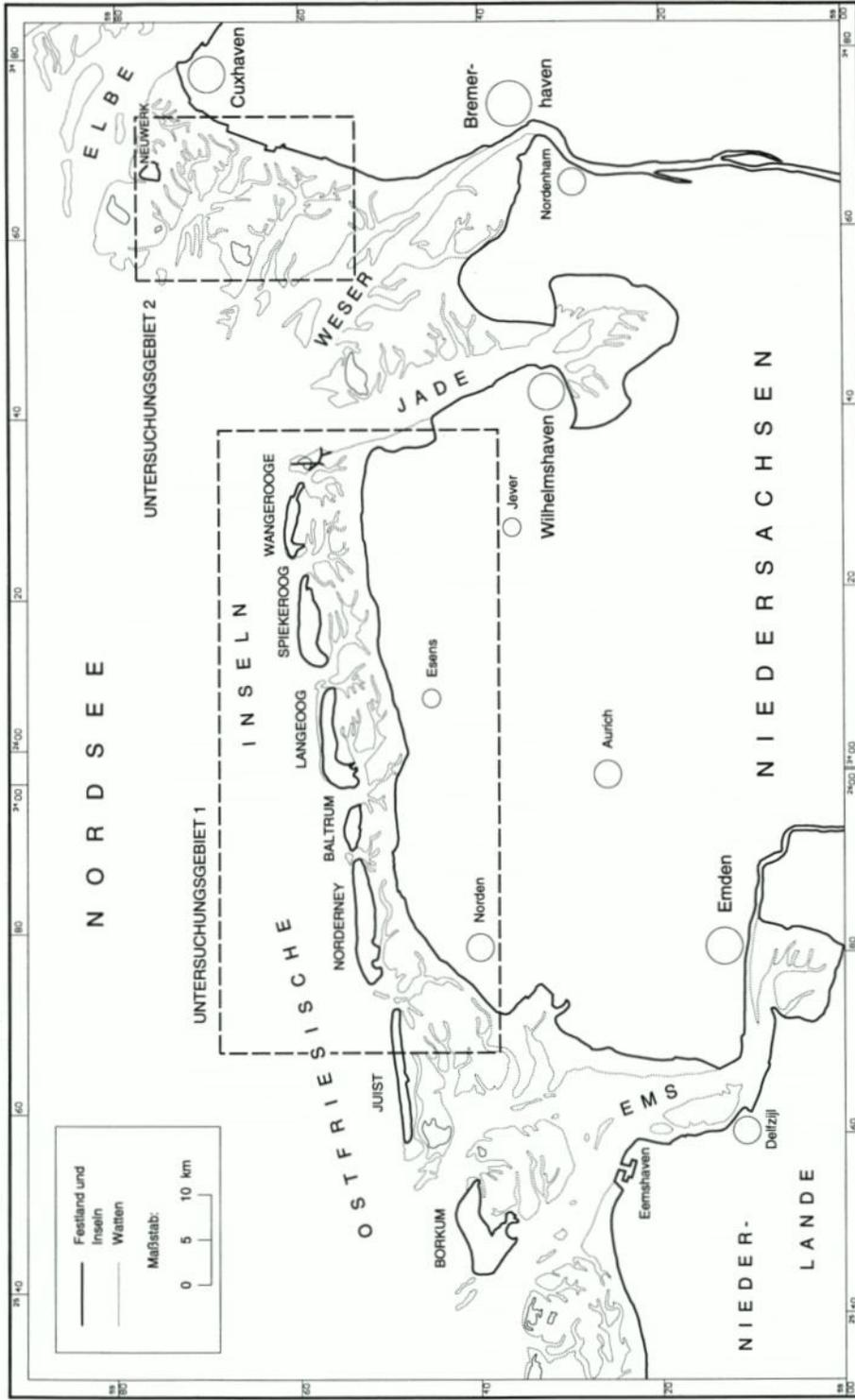
Das hier betrachtete Untersuchungsgebiet ist die niedersächsische Nordseeküste, wobei einige Gebiete aufgrund ihrer besonderen hydrologischen Verhältnisse allerdings ausgeklammert werden. Hierbei handelt es sich um die Buchten- und Ästuarwatten im Bereich von Ems, Jade, Weser und Elbe. Der Untersuchungsraum gliedert sich daher in zwei Teilbereiche auf, die in den Karten 1 bzw. 2a und 2b dargestellt sind. Das Untersuchungsgebiet 1 umfaßt den größten Teil der Wattgebiete südlich der Ostfriesischen Inseln, während das Untersuchungsgebiet 2 aus den offenen Watten zwischen der Elbe- und Wesermündung besteht. Die Watten des Untersuchungsgebietes 1 sind durch sechs Seegaten, die des Untersuchungsgebietes 2 nur durch zwei derartige Wattströme gekennzeichnet. In Anlehnung an die Flüsse des Festlandes läßt sich jedem Seegat ein Watteinzugsgebiet bzw. Tidebecken bestimmter Größe zuordnen. Während die Begrenzung dieser Watteinzugsgebiete am Festland oder an den Inseln die Linie des mittleren Tidehochwassers (= Uferlinie) darstellt, werden als die seitlichen Begrenzungen jeweils die topographischen Watthöhenscheiden aufgefaßt, die als die „Resultierenden“ der Wattwasserscheiden anzusehen sind. Als seewärtige Grenze der Tidebecken wird hier die kürzeste Verbindungslinie zwischen zwei benachbarten Inseln durch die Mündung des Seegats festgelegt. Die insgesamt gut 630 km² großen acht Watteinzugsgebiete sind mit ihren hydrologischen und morphometrischen Kennwerten in Tab. 1 aufgeführt¹.

Die Angabe von mittleren Wasserstandswerten für jedes Tidebecken ist etwas problematisch, da sich der Wasserspiegel eigentlich als geneigte Fläche präsentiert, die durch topographische Einflüsse auch noch eine zusätzliche Verformung erfährt. Trotzdem werden der Einfachheit halber für jedes Tidebecken die hydrologischen Daten von jeweils nur einem Pegel zugrunde gelegt, und zwar aus dem Gebiet der jeweiligen Seegatmündung. Da die Werte des MThw von der Außen- zur Innenküste hin ansteigen, die des MTnw jedoch absinken, ist davon auszugehen, daß – bezogen auf das gesamte Watteinzugsgebiet – die Werte für das MTnw etwas zu hoch und die für das MThw und damit auch für den mittleren Tidenhub jeweils etwas zu niedrig angesetzt sind (vgl. SIEFERT & LASSEN, 1985; LASSEN & SIEFERT, 1991).

Wie beschrieben, beziehen sich die in Tab. 1 angegebenen Größen der Watteinzugsgebiete auf die Fläche bis zur Uferlinie, also bis zur jeweiligen Mittelhochwasserlinie. Die Flächen bis zur Küstenlinie (Deich- bzw. Dünenfuß) sind zwischen 2,3 % (bei der Till) und 22,7 % (bei der Wichter Ee) größer, was auf die unterschiedlich hohen Anteile supralitoral Strand- bzw. Vorlandflächen der Watteinzugsgebiete hinweist. Aus Tab. 1 wird ersichtlich, daß sich die Watteinzugsgebiete nicht nur in ihrer Größe unterscheiden, sondern auch im Hinblick auf ihre morphologische Struktur. Der Anteil des Watts an der Gesamtfläche der Watteinzugsgebiete liegt zwar meist zwischen 75 und 83 %, aber es fällt auf, daß die drei größten Watteinzugsgebiete (Till, Robinsbalje und Norderneyer Seegat) vergleichsweise weniger Wattflächen haben, die Priele und Wattströme hier also einen verhältnismäßig großen Raum einnehmen. Andererseits weisen die kleinsten Watteinzugsgebiete, nämlich die der

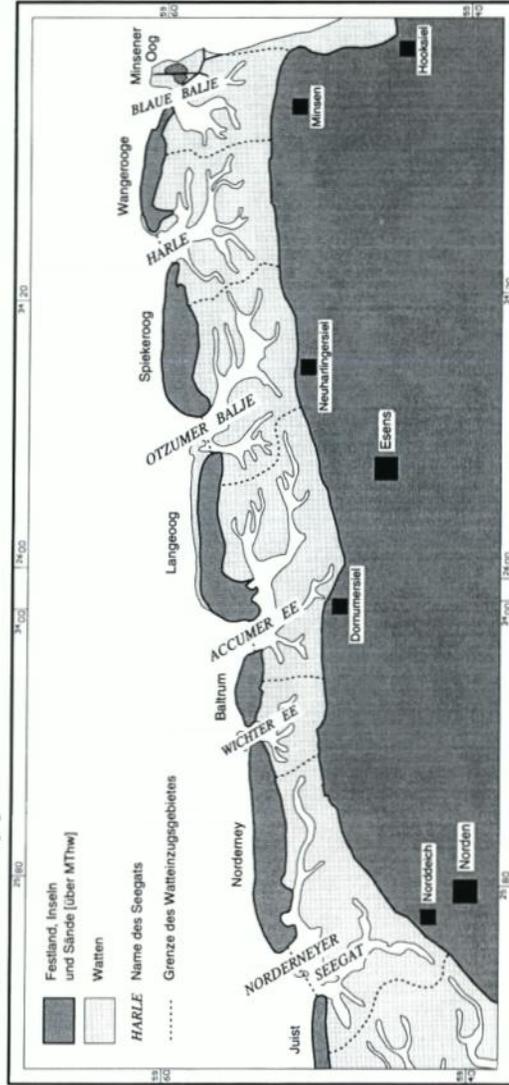
¹ Bis auf die Wasserstandsdaten wurden alle Werte mit Hilfe computerkartographischer Auswertungsverfahren aus der Deutschen Küstenkarte 1:25 000 (1. Ausgabe) ermittelt. Die dafür verwendeten Kartenblätter wurden in den Jahren 1974–1975 aufgenommen.

Karte 1: Lage der Untersuchungsgebiete

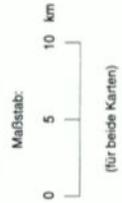
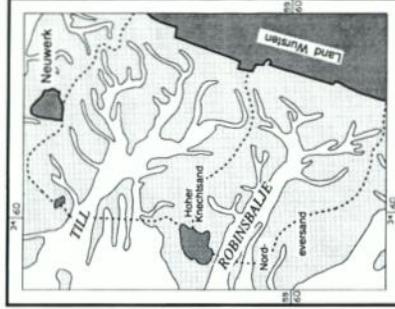


Kartengrundlage: Bezirkskarte Weser-Ems 1:200.000, Ausgabe 1987
Bearbeitung und Computerkartographie: U. Ferk

Karte 2a: Untersuchungsgebiet 1



Karte 2b: Untersuchungsgebiet 2



Kartengrundlage: Basiskarte Weser-Ems 1:200.000, Ausg. 1987
 Bearbeitung und Computerkartographie: U. Frenk

Tabelle 1: Hydrographische und morphographische Kennzeichen der acht Wattinzugsgebiete

Wattinzugsgebiet	MThw (1975-79)	MThw (1975-79)	MThb (1975-79)	MThw (1975-79)	Fläche (bis Uferlinie)	Anteil des Watts an Gesamtfläche	Tidewasservolumen (bei MThb)	Seegatquerschnitt (bei MThw)
Norderneyer Seegat	113	-131	244	-5	101,6	75,0	173	16.300
Wichter Ee	118	-130	248	-3	22,9	88,0	33	3.600
Accumer Ee	129	-138	267	-1	92,0	80,8	163	11.000
Ozumer Balje	126	-146	272	-6	74,3	81,0	131	11.400
Harle	134	-142	276	0	64,6	81,7	118	8.400
Blaue Balje	134	-156	290	-5	39,9	83,3	74	8.300
Robinsbalje	146	-172	318	-3	99,9	76,9	207	18.400
Till	143	-170	313	-4	136,6	76,1	279	29.400
	cm (NN)	cm (NN)	cm	cm (NN)	km ²	%	Mio. m ³	m ²

Quelle: Eigene Auswertungen sowie SIEFERT/LASSEN [1985]

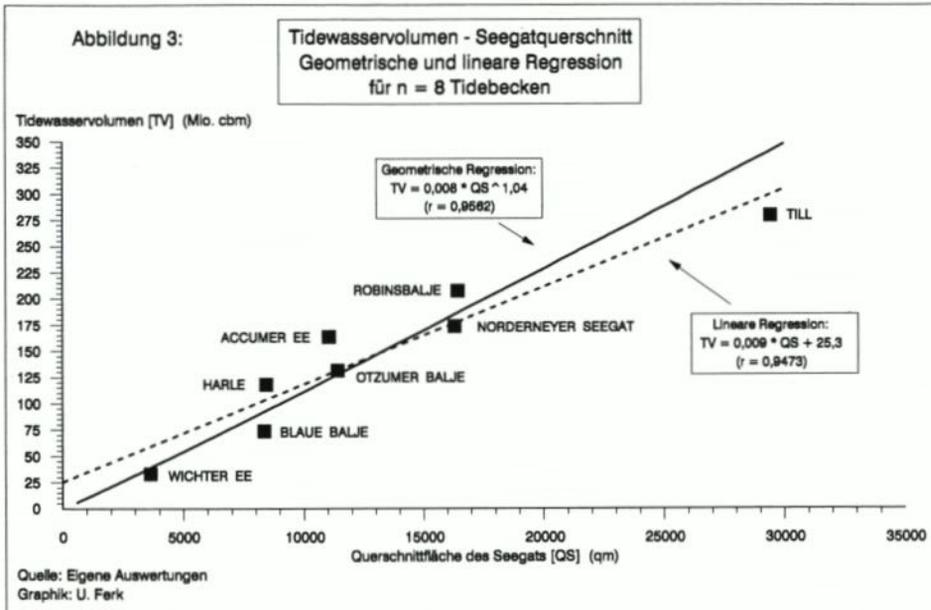
Wichter Ee und der Blauen Balje, mit 88 bzw. 83,3 % die weitaus größten Wattflächenanteile auf. Der Durchschnittswert der bei Niedrigwasser trockenfallenden Wattfläche aller acht untersuchten Watteinzugsgebiete beläuft sich auf 78,8 % und liegt damit höher als in anderen Küstenabschnitten. Nach KNOP (1961) liegt der Wattanteil im nordfriesischen Wattenmeer bei 68 %, was gut mit dem von JACOBSEN (1976) für das dänische Wattengebiet ermittelten Wert von 70 % übereinstimmt. Offenbar nehmen die Wattströme somit im dänischen und schleswig-holsteinischen Wattenmeer eine etwas größere Fläche ein als im niedersächsischen Teil. Es ist zu vermuten, daß hier die unterschiedliche Ausrichtung der Tidebecken zur Hauptwindrichtung und zur einlaufenden Tide eine gewisse Rolle spielt.

4.2. Der morphologische Gleichgewichtszustand der Watteinzugsgebiete

Von besonderer Bedeutung für die weiteren Ausführungen sind die letzten beiden Spalten der Tab. 1, nämlich die Daten der Tidewasservolumina² der Watteinzugsgebiete sowie die der Querschnittflächen der Seegaten. Nach MISDORP et al. (1990) werden die langfristigen morphologischen Vorgänge in Watteinzugsgebieten im wesentlichen vom Verhältnis zwischen diesen beiden Parametern gesteuert, die sich im ungestörten, natürlichen Zustand in einem „hydrologisch-morphologischen Gleichgewicht“ zueinander befinden. Unter „Gleichgewicht“ ist zu verstehen, daß es in jedem Watteinzugsgebiet ein festes Verhältnis gibt zwischen dem Querschnitt des Seegats und dem Gezeitenvolumen, das durch das Seegat in das Tidebecken einströmt. Wird dieses Gleichgewicht gestört, z. B. durch menschliche Eingriffe, werden im betroffenen Watteinzugsgebiet entsprechende Erosions- oder Sedimentationsvorgänge ausgelöst. Der Gleichgewichtszustand läßt sich in einem Streudiagramm durch eine Gleichgewichtslinie bzw. -kurve darstellen. Daß ein solches Gleichgewicht zwischen Durchflußquerschnitt und Tidewasservolumen tatsächlich besteht, wurde an verschiedenen Gezeitenküsten der Erde eindeutig nachgewiesen, z. B. für das niederländische Wattenmeer (MISDORP et al., 1990), für Teilbereiche des ostfriesischen Wattengebietes (WALTHER, 1972), für die Ästuarien der deutschen Nordseeküste (GIESE, 1971), aber auch für die der nordamerikanischen Küsten (BRUUN, 1978; NICHOLS & BIGGS, 1985). Für den deutschen Teil des Wattenmeeres sind in einer Reihe anderer Untersuchungen die gesetzmäßigen Abhängigkeiten zwischen einer Vielzahl ähnlicher morphologischer Kenngrößen bestimmt worden, wobei insbesondere die Arbeiten von RENGER und PARTENSKY (RENGER & PARTENSKY, 1975; RENGER, 1976; PARTENSKY, 1980) Erwähnung verdienen.

Der Zusammenhang zwischen Tidewasservolumen und Seegatquerschnitt, also der hier als maßgeblich angesehene Gleichgewichtszustand, wird von zwei mathematischen Regressionsfunktionen sinnvoll ausgedrückt, die sich sehr ähnlich sind und ungefähr gleich hohe Korrelationskoeffizienten liefern. Zum einen ist das die auch von RENGER und PARTENSKY ermittelte Potenzfunktion oder geometrische Funktion und zum anderen die u. a. von MISDORP et al. (1990) verwendete lineare Funktion. In der Abb. 3 wird zum Vergleich neben

² Beim Tidewasservolumen handelt es sich um diejenige Wassermenge, die während einer Tide durch das Seegat in das jeweilige Watteinzugsgebiet einströmt, vereinfacht gesagt also um den Rauminhalt eines Tidebeckens zwischen MTnw- und MThw-Niveau. Das Tidewasservolumen ist somit nicht identisch mit dem gesamten Fassungsvermögen eines Tidebeckens.



der geometrischen auch zusätzlich die lineare Regression berechnet, so daß zwei Gleichgewichtskurven bestimmt werden.

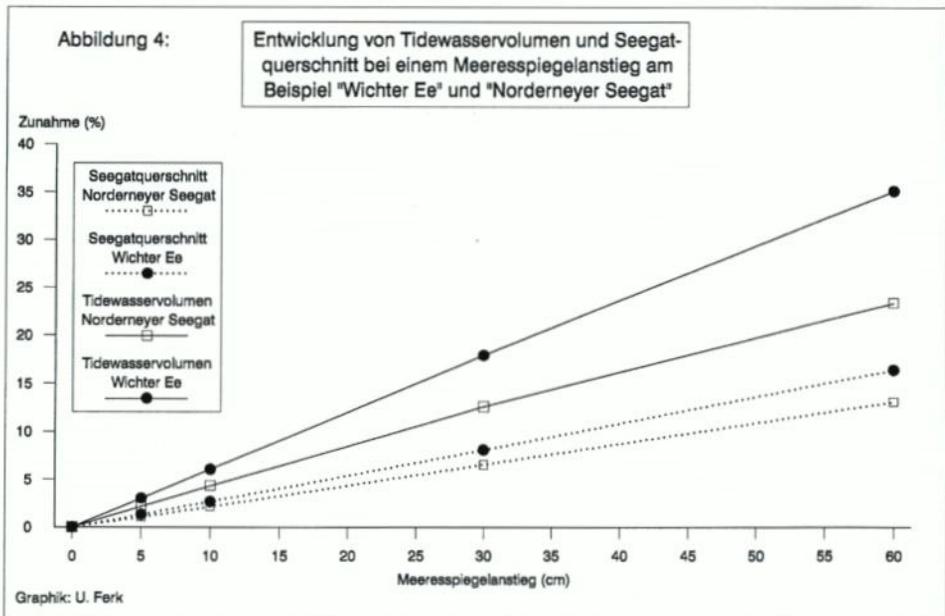
Das Bild der beiden Streudiagramme sowie die hohen Werte der Korrelationskoeffizienten von $r = 0,96$ für die geometrische und $r = 0,95$ für die lineare Regression demonstrieren deutlich die Abhängigkeit der Gleichgewichtsparameter voneinander. Faßt man allerdings nur die jeweiligen Anpassungskurven der Abb. 3 an sich als „Gleichgewichtszustand“ auf, so hätten – strenggenommen – alle oberhalb liegenden Tidebecken, z. B. Harle, Accumer Ee und Robinsbalje, ein im Verhältnis zum Seegatquerschnitt zu großes Tidewasservolumen, während es sich in den sich unterhalb der Kurven befindlichen Wateinzugsgebieten (z. B. Till und Blaue Balje) genau umgekehrt verhalten würde. Es ist jedoch nicht angebracht, diese kleinen Abweichungen von der Anpassungskurve als bestehende „Ungleichgewichte“ in den Wateinzugsgebieten zu interpretieren, da einige Vereinfachungen und Unwägbarkeiten das Bild zwangsläufig etwas beeinflussen. Als solche wären z. B. die mehr oder minder subjektive Abgrenzung der Wateinzugsgebiete oder die Festlegung der Wasserstandshöhen in den Tidebecken zu nennen, vor allem aber die Tatsache, daß Wateinzugsgebiete aufgrund des Wasseraustausches mit benachbarten Tidebecken durch Trift- und Restströmungen keine absolut abgeschlossenen Einheiten sind. Vor diesem Hintergrund läßt sich anhand von Abb. 3 feststellen, daß das für die Steuerung der langfristigen morphologischen Vorgänge maßgebliche Gleichgewicht zwischen Tidewasservolumen und Seegatquerschnitt in den Tidebecken des Untersuchungsgebietes tatsächlich besteht. Der Verlauf der Gleichgewichtskurve(n) stimmt im übrigen auch recht gut mit den von WALTHER (1972) und MISDORP et al. (1990) bestimmten Regressionsgeraden überein, obwohl letztere für weitaus größere Wateinzugsgebiete und in einem anderen Tidenhubbereich bestimmt wurde.

4.3. Beeinflussung des Gleichgewichtszustandes durch einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg

Es ist eindeutig, daß sich durch einen Anstieg des Meeresspiegels sowohl die Querschnittflächen der Seegaten als auch die Tidewassermengen der Wateinzugsgebiete vergrößern werden, wodurch das morphologisch-hydrologische Gleichgewicht gestört wird. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, in welcher Relation sich die Querschnittfläche im Vergleich zum Gezeitenvolumen verändert. Die Entwicklung dieses Verhältnisses ist wiederum zum großen Teil von den morphologischen Strukturen des jeweiligen Wateinzugsgebietes abhängig. So wird die Zunahme des Tidewasservolumens in einem Tidebecken mit eher geringen Wattflächen bei einem Ansteigen des Meeres verhältnismäßig schwächer sein als in einem Wateinzugsgebiet mit hohem Wattflächenanteil und umgekehrt. Bei einem Anstieg des Meeresspiegels sind somit zwei mögliche Fälle zu unterscheiden:

- Fall A: Die Zunahme des Tidewasservolumens ist im Verhältnis geringer als die Vergrößerung des Seegatquerschnitts.
- Fall B: Das Tidewasservolumen steigt im Verhältnis stärker an als die Querschnittfläche des Seegats.

Bevor darauf eingegangen wird, in welcher Weise die untersuchten Wateinzugsgebiete auf einen Meeresspiegelanstieg reagieren, ist auf einige vereinfachende Betrachtungen der morphologischen und hydrographischen Prozesse hinzuweisen, die im Hinblick auf die Durchführbarkeit der Berechnungen festgelegt werden (vgl. MILDORP et al., 1990). Erstens wird angenommen, daß der Tidenhub in Zukunft konstant bleiben wird, d. h., daß die in Tab. 1 festgelegten Werte sich nicht ändern werden. Zweitens wird davon ausgegangen, daß die „Reaktion“ der morphologischen Verhältnisse auf die veränderten Tidewasservolumina und Seegatquerschnitte mit einer zeitlichen Verzögerung einsetzt. Eine erste Phase beinhaltet nur den Anstieg des Meeresspiegels mit den entsprechenden Vergrößerungen des Gezei-



tenvolumens und des Querschnittes der Seegaten, während die morphologische Reaktion auf die veränderten Ausgangsbedingungen erst in einer zweiten Periode eintritt. In der Natur werden diese Prozesse gleichzeitig nebeneinander ablaufen. Schließlich wird der Meeresspiegelanstieg hier grundsätzlich als deutliche und rasche Beschleunigung des gegenwärtigen Anstiegsgeschehens aufgefaßt, da ein langsames Ansteigen des Wasserspiegels seit langem ein ganz normaler Vorgang im Untersuchungsgebiet ist.

Wie sich das Tidewasservolumen und der Seegatquerschnitt bei einem Ansteigen der Wasserstände um maximal 60 cm ändern, wird in Abb. 4 am Beispiel der Tidebecken des Norderneyer Seegats und der benachbarten Wichter Ee gezeigt.

In beiden Fällen ist die Zunahme des Gezeitenvolumens relativ größer als die Zunahme des Seegatquerschnittes. Beide Watteinzugsgebiete entwickeln sich also gemäß Fall B. Darüber hinaus zeigt sich aber auch, daß die Veränderung der Gleichgewichtsparameter in den Tidebecken unterschiedlich stark ausfällt. So ist die relative Zunahme der Tidewassermenge im Watteinzugsgebiet der Wichter Ee weitaus größer als im Gezeitenbecken des Norderneyer Seegats. Mit anderen Worten: Die Watteinzugsgebiete entwickeln sich zwar tendenziell in die gleiche Richtung, jedoch in unterschiedlich starker Ausprägung.

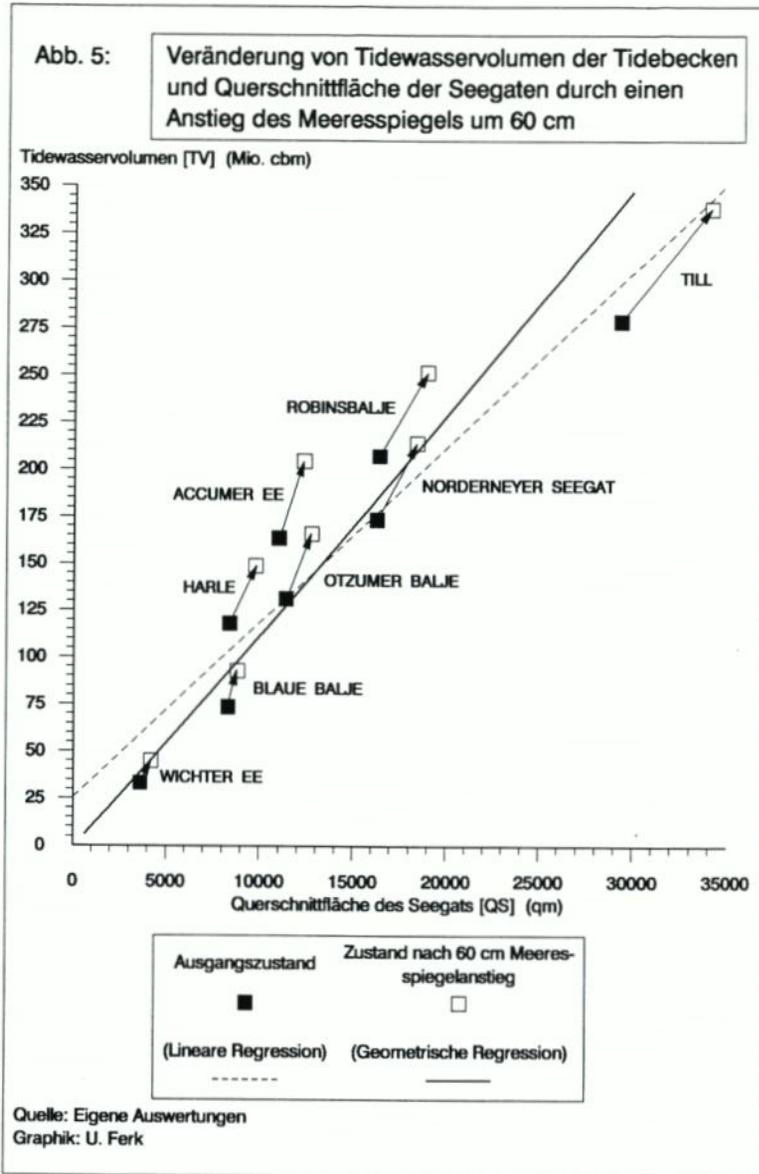
Die Entwicklung der Gleichgewichtsparameter aller acht Watteinzugsgebiete bei einem Meeresspiegelanstieg von 60 cm läßt sich mit Hilfe des Streudiagramms der Abb. 5 zum Ausdruck bringen. Aus dieser Darstellung lassen sich – in Verbindung mit den Ergebnissen einer Reihe genauerer Berechnungen – zwei ganz wesentliche Aussagen ableiten:

- Bei einem Anstieg des mittleren Meeresspiegels um 60 cm nimmt das Tidewasservolumen in allen untersuchten Watteinzugsgebieten relativ stärker zu als der Durchflußquerschnitt der Seegaten. In Abb. 5 wird dies durch die Richtung der Pfeile angezeigt.
- Das Ausmaß dieser Differenz ist in den Tidebecken unterschiedlich deutlich ausgeprägt, was in Abb. 5 durch den Anstiegswinkel der Pfeile symbolisiert wird. Überdurchschnittlich deutlich auf einen Meeresspiegelanstieg reagieren diejenigen Watteinzugsgebiete, die entweder einen sehr hohen Wattflächenanteil aufweisen, wie z. B. die Wichter Ee, und/oder deren Seegatmündungen durch massive Buhnenbauwerke eingengt sind, wie z. B. die Blaue Balje. Dementsprechend geraten die Watteinzugsgebiete, deren Seegatmündungen nicht durch Inseln oder gar Buhnen eingerahmt sind, wie Robinsbalje und Till, trotz nur geringfügig kleinerer Wattflächenanteile verhältnismäßig wenig aus dem oben definierten Gleichgewichtszustand³.

4.4. Die morphologische Reaktion auf den gestörten Gleichgewichtszustand

Die wichtigste Folgerung aus den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ergebnissen ist, daß bei einem beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels infolge der überproportionalen Zunahme des Gezeitenvolumens in allen Watteinzugsgebieten die Querschnittflächen der Seegaten zu klein im Verhältnis zum vergrößerten Tidewasservolumen werden. Aus dieser grundlegenden Feststellung ergeben sich weitreichende Folgen:

³ Die geringen Abweichungen der Wertepaare von der Gleichgewichtslinie sind – wie vereinbart – nicht als bestehende „Ungleichgewichte“ der Watteinzugsgebiete anzusehen. Daher darf z. B. die Entwicklung des Watteinzugsgebietes der Till hier nicht als ein etwaiges „Erreichen des linearen Gleichgewichtszustandes“ mißverstanden werden.



- Aufgrund der „relativen Verengung“ des Durchflußquerschnittes ist eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in den großen Tiderinnen zu erwarten.
- Konsequenterweise wird eine verstärkte Erosion der Seegaten und der größeren Baljen auftreten, die sich vertiefen und verbreitern werden. Infolgedessen kann es durch erhöhten Abbruch auch zu einer zunehmenden Gefährdung der West- und Ostenden der Barriere-Inseln kommen.
- Die Zunahme der Tideströmungen wird sich positiv auf die Sedimentation auf den Wattflächen auswirken. Die sich daraus ergebende Aufhöhung der Watten wird dazu

beitragen, daß das Tidewasservolumen wieder abnimmt, was – ebenso wie die Vertiefung der Wattströme – zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes führen wird.

- Außerhalb der Wateinzugsgebiete ist u. a. zu erwarten, daß durch die veränderten Tideströmungsverhältnisse auch die Lage der Riffbögen beeinflusst wird, was Auswirkungen auf die Sandversorgung der Inselstrände haben könnte.

Je größer die Differenz zwischen Tidewasservolumen- und Seegatquerschnittzunahme wird, desto stärker wird auch die morphologische Reaktion des Systems ausfallen. Insofern ist gerade in den kleineren Tidebecken mit hohen Wattflächenanteilen – wie der Wichter Ee und der Blauen Balje – eine gesteigerte Morphodynamik zu erwarten, während die großen Einzugsgebiete, z. B. die der Robinsbalje und der Till, bis zum Erreichen des neuen Gleichgewichtszustandes eine vergleichsweise ruhige Entwicklung durchmachen werden.

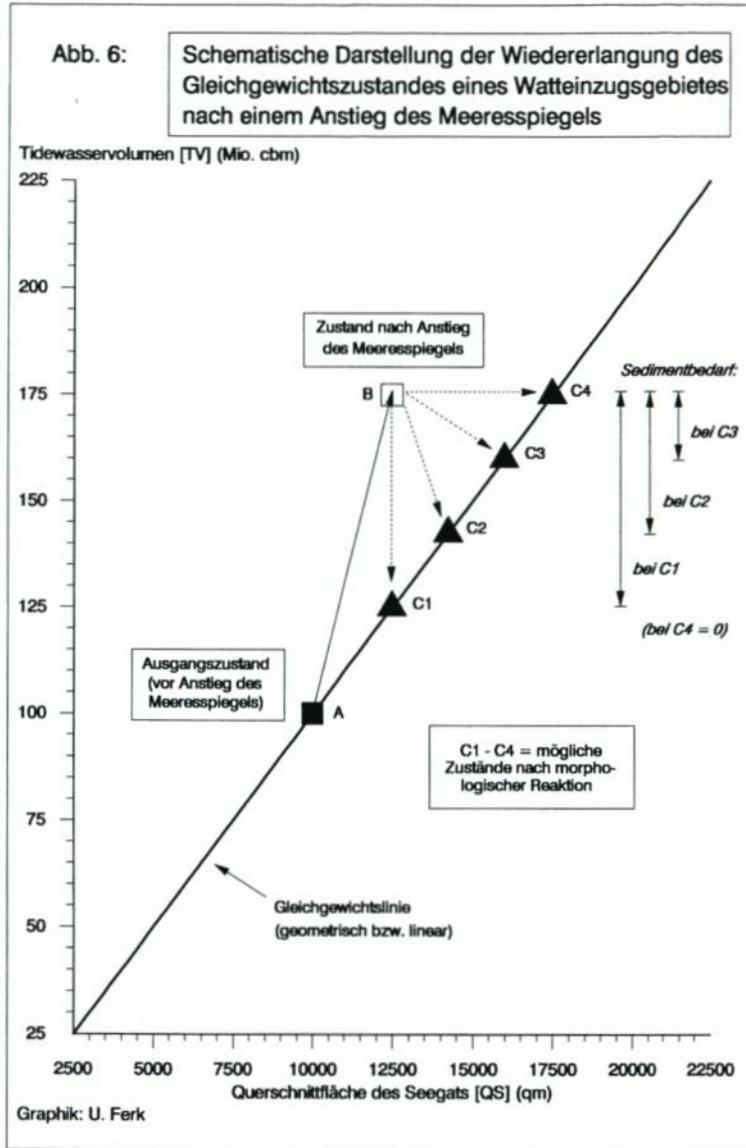
4.5. Das Sedimentdefizit der Wateinzugsgebiete

Das Prinzip der Entwicklung der untersuchten Wateinzugsgebiete bei einem Anstieg des Meeresspiegels läßt sich anhand des in Abb. 6 dargestellten Schemas rekapitulieren.

Die Entwicklung vom Ausgangspunkt „A“ zum Punkt „B“ symbolisiert die in allen Tidebecken zu verzeichnende überproportionale Zunahme der Tidewassermenge gegenüber dem Seegatquerschnitt (vgl. Abb. 5). Wie eingangs festgelegt wurde, setzt die morphologische Reaktion des Systems auf die veränderten Ausgangsbedingungen erst jetzt ein. Das bestehende Ungleichgewicht wird ausgeglichen, und zwar einerseits durch Erosion des Seegats und andererseits durch Sedimentation auf den Watten, durch welche das Tidewasservolumen abnimmt. Eine Schwierigkeit bei der Berechnung des Sedimentbedarfs der Wateinzugsgebiete ergibt sich aus dem Problem, vorherzusagen, auf welche Weise der Gleichgewichtszustand wiederhergestellt wird, da hierbei eine Vielzahl von hydrologischen und geologischen Einflußgrößen zu berücksichtigen sind. Die Punkte „C1“ bis „C4“ in der Abb. 6 stellen alternative Möglichkeiten der morphologischen Reaktion dar. Punkt „C1“ symbolisiert einen unrealistischen Extremfall, der dann eintritt, wenn die gesamte Wiederherstellung des Gleichgewichts durch die Sedimentation auf den Watten des Tidebeckens bewirkt wird, der Seegatquerschnitt sich also überhaupt nicht vergrößert. In diesem theoretischen Fall fällt das Sedimentdefizit, wie in der rechten Hälfte der Graphik dargestellt, natürlich am größten aus. Sollte – was ebenso unwahrscheinlich ist – das neue Gleichgewicht nur durch die Erosion des Seegats erlangt werden (Punkt „C4“), wäre der Sedimentbedarf gleich Null.

Da nicht vorhersagbar ist, in welchem Verhältnis sich die Ausweitung des Seegatquerschnitts zur Sedimentation auf den Wattflächen nach dem Anstieg des Meeres entwickeln wird, muß zur Quantifizierung des Sedimentbedarfs der einzelnen Wateinzugsgebiete vereinfachend festgelegt werden, daß die Wiedererlangung der Gleichgewichtszustände zu gleichen Teilen durch diese beiden Prozesse bewirkt wird. Zugrunde gelegt wird wiederum ein Meeresspiegelanstieg von 60 cm. Die Ergebnisse sind in der linken Hälfte der Tab. 2 zusammengefaßt.

Der auf das lineare Gleichgewicht bezogene Sedimentbedarf ist etwas größer als das Defizit gegenüber dem geometrischen Stabilitätszustand, was auf den höheren Korrelationskoeffizienten der geometrischen Regressionsfunktion zurückzuführen ist (vgl. Abb. 3). Aufgrund der Fülle von Unwägbarkeiten ist es allerdings angebracht, bei dieser Berechnung nicht mehr zwischen linearem und geometrischem Gleichgewicht zu unterscheiden, sondern im folgenden den gemittelten Sedimentbedarf zur Wiedererlangung des Gleichgewichtszu-



standes aus der mittleren Spalte der Tab. 2 heranzuziehen. Da diese Zahlen nicht besonders anschaulich sind, sind in der nächsten Spalte der Tab. 2 die benötigten absoluten Sedimentmengen im Verhältnis zur Größe der jeweiligen Wattenzugsgebiete angegeben.

Die Zahlen bestätigen die bisherigen Aussagen. Die relativ größten Sedimentdefizite treten in den kleineren Wattenzugsgebieten der ostfriesischen Küste auf, die sich aufgrund ihrer morphologischen Beschaffenheit bei einer Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs am stärksten vom Gleichgewichtszustand entfernen (vgl. Abb. 5). Andererseits benötigen die drei größten Wattenzugsgebiete verhältnismäßig geringe Mengen Sediment, um das Gleichgewicht wieder zu erlangen, wobei insbesondere das Einzugsgebiet der Till herausragt.

Tabelle 2: Abschätzung der in den Wattinzugsgebieten des Untersuchungsgebietes zur Wiedererlangung eines Gleichgewichtszustandes bzw. zum „Ausgleich“ des Meeresspiegelanstiegs benötigten Sedimentmengen nach einem Meeresspiegelanstieg von 60 cm

Wattinzugsgebiet	Sedimentbedarf gegenüber "geom. Gleichgewicht" (1)	Sedimentbedarf gegenüber "linearem Gleichgewicht" (2)	Aus (1) + (2) gemittelter Sedimentbedarf	Sedimentbedarf pro 1 km ² Fläche	Sedimentbedarf zum Ausgleich des Meeresspiegelanstiegs
Norderner See	7,8	10,4	9,1	0,09	61,0
Wichter See	2,5	3,1	2,8	0,12	13,7
Accumer See	12,9	14,4	13,7	0,15	55,2
Ozumer See	9,3	10,8	10,1	0,14	44,6
Harle	7,3	8,8	8,1	0,13	38,8
Blaue See	6,5	7,0	6,8	0,17	23,9
Robinssee	7,2	10,3	8,8	0,09	59,9
Till	1,1	7,5	4,3	0,03	82,0
Gesamt	54,6	72,3	63,7	-	379,1
	Mio. m ³	Mio. m ³	Mio. m ³	Mio. m ³ /km ²	Mio. m ³

Quelle: Eigene Auswertungen

Vor dem Hintergrund der bisherigen Ergebnisse lassen sich die acht untersuchten Watteinzugsgebiete aufgrund ihrer unterschiedlichen Reaktionen auf einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg grob in drei Gruppen einteilen (siehe Karte 3):

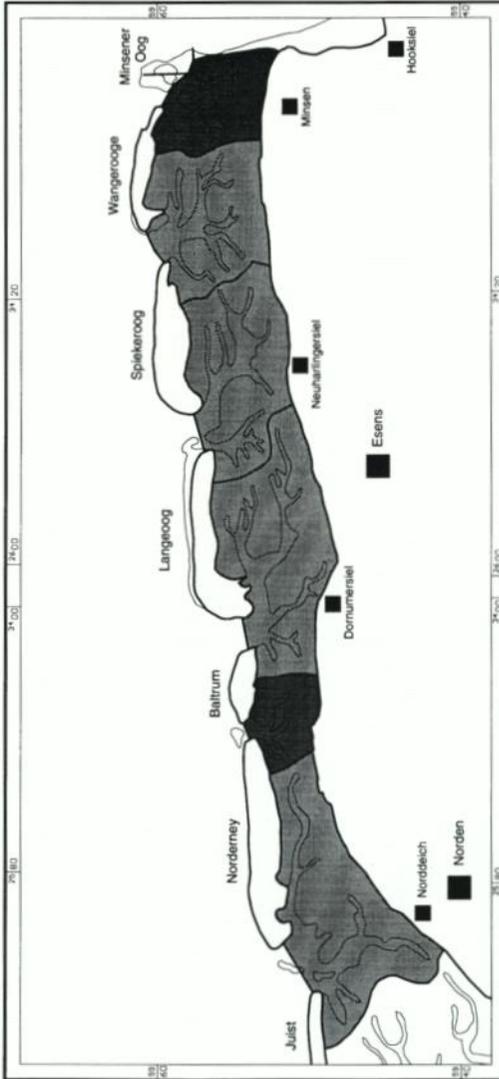
- Die erste Gruppe umfaßt die kleinen Watteinzugsgebiete der Wichter Ee und der Blauen Balje, in denen aufgrund des hohen Wattflächenanteils bei einer Beschleunigung des Wasserstandsanstiegs mit einer überdurchschnittlichen Erosion und Ausweitung der Hauptgezeitenrinnen und einer möglicherweise starken Sedimentation auf den Wattflächen gerechnet werden muß. Der Sedimentbedarf wird relativ hoch sein.
- Die zweite Gruppe stellt eine Zwischengruppe dar und beinhaltet jene Watteinzugsgebiete, in denen die Verhältnisse nicht so deutlich ausgeprägt sind wie in denen der ersten und der dritten Kategorie. Hierzu zählen die Einzugsgebiete des Norderneyer Seegats, der Accumer Ee, der Otzumer Balje und der Harle⁴.
- Die dritte Gruppe wird von den beiden Tidebecken des Untersuchungsgebietes 2 gebildet, nämlich denen der Robinsbalje und der Till. Diese Wattgebiete zeichnen sich durch eine ausgesprochen ruhige morphologische Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg aus, d.h. die Seegaten werden sich nur relativ schwach vertiefen und die Watten nur wenig anwachsen, womit der Sedimentbedarf vergleichsweise gering ausfallen wird. Dies wird zur Folge haben, daß die Wattflächen durch Seegang gefährdet sein werden und damit einer flächenhaften Erosion unterliegen werden.

Anknüpfend an Tab. 2 ist im Hinblick auf den Sedimenthaushalt der Watteinzugsgebiete auf einen wichtigen Sachverhalt aufmerksam zu machen. Es ist scharf zu trennen zwischen dem Sedimentbedarf zur Wiedererlangung des *Gleichgewichtszustandes* und dem Sedimentbedarf zum „Ausgleich“ des Meeresspiegelanstiegs. Dieses wird in der letzten Spalte von Tab. 2 verdeutlicht. Berechnet man den zum kompletten „Mitwachsen“ der Watten benötigten Sedimentbedarf bei einer Erhöhung des Meeresniveaus um 60 cm, ergibt sich für alle acht Watteinzugsgebiete, die zusammen eine Gesamtfläche von 631,8 km² aufweisen, ein Betrag von $379,1 \times 10^6$ m³. Gemäß Tab. 2 wird der maßgebliche „mittlere“ Gleichgewichtszustand dagegen bereits bei einer Gesamtsedimentation von nur $63,7 \times 10^6$ m³ erreicht. Die zur erneuten Stabilisierung des Systems benötigten Sedimentmengen sind somit weitaus geringer als man eigentlich annehmen würde. Ein vollständiges „Mitwachsen“ der Watten um den Betrag der Meeresspiegelzunahme wird somit gar nicht eintreten, und zwar selbst dann nicht, wenn ausreichende Sedimentmengen zur Verfügung stehen würden. Es kann aus dieser Feststellung gefolgert werden, daß nach einem beschleunigten Anstieg der Nordsee die Wassertiefe über den Watten auf jeden Fall größer werden wird, da die Watten der Tidebecken nach dem Erreichen des Gleichgewichtszustandes nicht über eine bestimmte Höhe hinauswachsen werden. Der Stabilitätszustand der Watteinzugsgebiete wird also bei einer insgesamt größeren Wassertiefe erreicht werden. Vereinfachend könnte man daher auf die eingangs gestellte Schlüsselfrage „Kann das Wachstum des Watts mit der beschleunigten Erhöhung des Meeresspiegels Schritt halten?“ in etwa antworten: Vom Sedimentangebot her könnte es eventuell vollständig mitwachsen, aufgrund der hydrologisch-morphologischen Randbedingungen wird es das aber nicht tun.

⁴ Zwar könnten die Otzumer Balje und die Accumer Ee, gemessen an ihrem relativen Sedimentbedarf, auch in der ersten Gruppe aufgeführt werden, während die Harle aufgrund einer eher schwachen morphologischen Reaktion auch in die dritte Gruppe übernommen werden könnte. Bei einer Zusammenfassung aller Kriterien erscheint diese Einteilung dennoch als sinnvoll.

Karte 3: Auswirkungen eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs auf die acht Wattenzugsgebiete des Untersuchungsgebietes

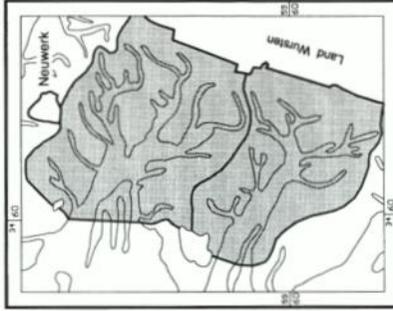
a) Untersuchungsgebiet 1



- I: lebhaft Morphodynamik (starke Seegatvertiefung, deutliche Sedimentation auf den Watten) / relativ hoher Sedimentbedarf
- II: durchschnittlich intensive Morphodynamik (Seegatvertiefung und Sedimentation auf den Watten) / mittlerer bis hoher Sedimentbedarf
- III: ruhige Morphodynamik (mäßige Seegatvertiefung, kaum Sedimentation auf den Watten) / relativ geringer Sedimentbedarf

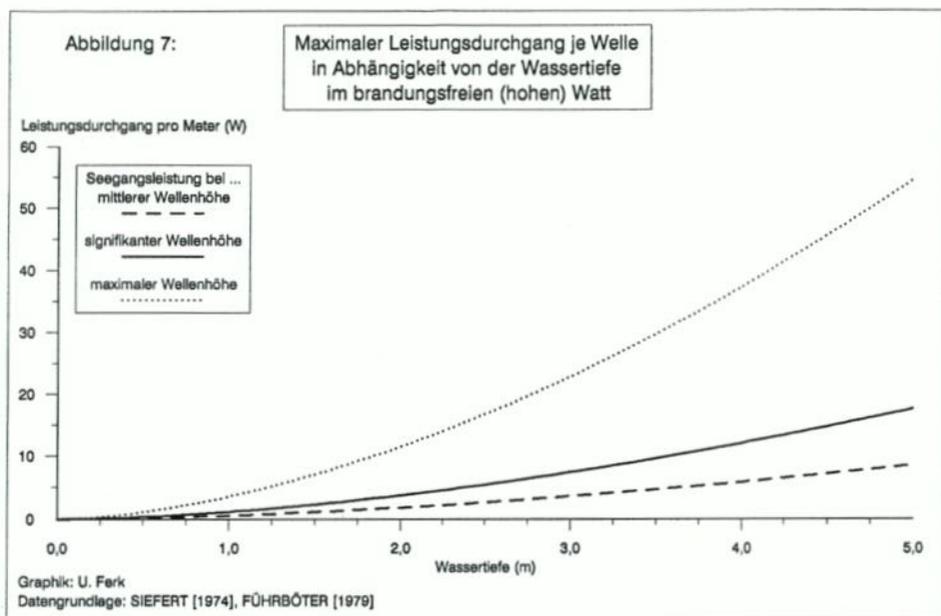
(Festland, Inseln und Sünde)

b) Untersuchungsgebiet 2



Maßstab:
0 5 10 km
(für beide Karten)

Kartengrundlage: Bezirkskarte Weser-Ems 1:200.000, Aug. 1967
Bearbeitung und Computerkartographie: U. Ferk



5. Konsequenzen aus den ermittelten Ergebnissen

Die Wasserhöhe über den Wattflächen wird bei Hochwasser also zunehmen und das Watt insgesamt für einen längeren Zeitraum mit Wasser bedeckt sein. Eine direkte Folge dieser Entwicklung ist die wachsende Belastung der Wattflächen durch Seegang, der einen „destruktiven“ Charakter hat und das Höhenwachstum des Wattes begrenzt.

Die Tiefe des Wassers über dem Watt ist – neben dem Wind – der ausschlaggebende Faktor für die Entwicklung des Seegangs, da der Einfluß der Wassertiefe auf die Wellenhöhen mit abnehmender Wassertiefe wächst (SIEFERT, 1974). In Flachwassergebieten wie dem Wattenmeer werden die maximal möglichen Wellenhöhen daher allein von der Wassertiefe begrenzt. Auf Grundlage der „linearen Wellentheorie“ läßt sich – in Verbindung mit den von SIEFERT (1974) gewonnenen Erkenntnissen über den Seegang in Wattgebieten sowie dem von FÜHRBÖTER (1979) ermittelten Ansatz zur Berechnung der Wellenenergie – somit die maximal mögliche „Wellenleistung“ in Abhängigkeit von der Wassertiefe auf dem Watt ermitteln. Dieser Sachverhalt ist in der Abb. 7 veranschaulicht. Diese Graphik verdeutlicht den überproportionalen Anstieg der Seegangsbelastung für das Watt bei einer Erhöhung der Wassertiefe. Angenommen, daß die Wassertiefe auf dem Watt bei Thw bei 1,50 m liegt, könnte bei einer Erhöhung um 50 cm auf 2 m (+ 33 %) die mögliche Wellenleistung um 63 % anwachsen. Eine unmittelbare Folge der größeren Wassertiefen und der daraus resultierenden Zunahme der Seegangsenegie im Wattenmeer ist daher die zunehmende Gefährdung der Wattes, die in Zukunft höchstwahrscheinlich verstärkten Erosionsprozessen ausgesetzt sein werden. Vergewärtigt man sich die Ergebnisse der vorherigen Abschnitte, wird dies insbesondere auf diejenigen Wattenzugsgebiete zutreffen, in denen die Sedimentation auf den Wattes aufgrund der schwachen morphologischen Reaktion auf den Meeresspiegelanstieg ohnehin gering ausfallen wird. Insofern ist damit zu rechnen, daß die Küstenschutzfunktion des Wattes

in Zukunft vor allem im Bereich der offenen Wattgebiete zwischen Elbe- und Wesermündung zurückgehen wird.

6. Schriftenverzeichnis

- BRUNN, P.: Stability of tidal Inlets. Theory and Engineering. Amsterdam, Oxford, New York 1978. (Developments in Geotechnical Engineering 23).
- DIECKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten der Deutschen Bucht. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 60, S. 133-361, 1985.
- FERK, U.: Wirkung von Meeresspiegeländerungen auf Wateinzugsgebiete. (Unveröffentlichte Diplomarbeit im Fach Geographie, Universität Hamburg, Juli 1992).
- FÜHRBÖTER, A.: Über Verweilzeiten und Wellenenergien bei Sturmfluten. In: Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 65, S. 1-29, 1979.
- FÜHRBÖTER, A.: Changes of the Tidal Water Levels at the German North Sea Coast. In: Helgoländer Meeresuntersuchungen, Band 43, Nr. 3/4, S. 325-332, 1989.
- GIESE, E.: Fahrwasserumbildungen in der Unter- und Außenelbe. In: Die Wasserwirtschaft, Band 61, Heft 3, S. 65-72, 1971.
- GRASSL, H.: Sea Level Rise. Short Review. In: The common Future of the Wadden Sea. Technical Report. Hrsg. v. P. Prokosch, S. Mielke u. D.M. Fleet. Husum, 1991. S. 79-86.
- HEKSTRA, G. P.: Prospects of Sea Level Rise and its Policy Consequences. (Unveröffentlichter Bericht zum Workshop „Controlling and Adapting to Greenhouse Warming“ in Washington, Juni 1988).
- HOUGHTON, J. T.: Scientific Assessment of Climate Change: Summary of the IPCC Working Group I Report. In: Climate Change: Science, Impacts and Policy. Proceedings of the Second World Climate Conference. Hrsg. v. J. Jäger und H.L. Ferguson. Cambridge, 1991, S. 23-45.
- JACOBSEN, N. K.: Das dänische Wattengebiet. In: Wattenmeer. Ein Naturraum der Niederlande, Deutschlands und Dänemarks. Hrsg. v. Landelijke Vereniging tot Behoud van de Wadendzee/Vereniging tot Behoud van Natuurmonumenten in Nederland. Deutsche Übersetzung. Neumünster, 1976, S. 91-101.
- KNOP, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegung und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten. Braunschweig, 1961.
- KUNZ, H.: Klimaänderungen, Meeresspiegelanstieg, Auswirkungen auf die niedersächsische Küste. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 72, 1991, S. 323-351.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des Meeresspiegels in der südöstlichen Nordsee. In: Die Küste, H. 50, 1989, S. 65-95.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee - säkularer Trend und Verhältnisse um 1980 (Schlußbericht eines KFKI-Projektes). Die Küste, H. 52, 1991, S. 85-137.
- LUCK, G.: Folgen des Meeresspiegelanstieges für Küsten und Wattengebiete. In: Umweltvorhersage Nordsee. Belastungen, Gütesituation und Maßnahmen. Hrsg. v. Niedersächsischen Umweltministerium. Hannover, 1987, S. 317-323.
- MISDORP, R. et al.: Climate Change, Sea Level Rise and morphological Developments in the Dutch Wadden Sea, a marine Wetland. In: Expected Effects of climatic Change on marine coastal Ecosystems. Hrsg. v. J. J. Beukema, W. J. Wolff und J. J. W. M. Brouns. Dordrecht, 1990, S. 123-131. (Developments in Hydrobiology 57).
- NICHOLS, M. M. u. BIGGS, R. B.: Estuaries. In: Coastal Sedimentary Environments. Hrsg. v. R. A. Davis, Jr. New York, Berlin, Heidelberg, Tokio, 1985, S. 77-186.
- PARTENSKY, H.-W.: Neue Erkenntnisse über das Stabilitätsverhalten und den Sedimenttransport in Watt-Prielsystemen. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 50, 1980, S. 59-74.
- RENGER, E.: Quantitative Analyse der Morphologie von Wateinzugsgebieten und Tidebecken. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der TU Hannover, Heft 43, 1976, S. 1-160.

- RENGER, E. u. PARTENSKY, H.-W.: Stabilitätskriterien für Tidebecken. *Die Küste*, H. 27, 1975, S. 63-73.
- RONDE, J. DE: Meeresspiegelanstieg. (Unveröffentlichter Vortrag zur Sondersitzung des Verwaltungsausschusses für den Hochwasserschutz „Klimaveränderungen und mögliche Folgen für die Sturmfluten“, Baubehörde Hamburg, Amt für Wasserwirtschaft, April 1994).
- SCHÖNWIESE, C.-D.: Anthropogene, klimawirksame Spurengase. Mengen, Wirkung, Folgen, Gegenmaßnahmen. Klimatologische Aspekte. Projektbericht im Auftrag der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Frankfurt/Main, 1990. (Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main, Nr. 87).
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. In: *Mitteilungen des Leichtweiß Instituts für Wasserbau der TU Braunschweig*, Heft 40, 1974, S. 1-243.
- SIEFERT, W. u. LASSEN, H.: Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelauswertungen. In: *Die Küste*, H. 42, 1985, S. 1-77.
- STEWART, R. W. et al.: Relative Sea-Level Change. A critical Evaluation. Paris, 1990. (Unesco Reports in Marine Science 54).
- WALTHER, F.: Zusammenhänge zwischen der Größe der ostfriesischen Seegaten mit ihren Wattgebieten sowie den Gezeiten und Strömungen. In: *Jahresbericht 1971 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz Norderney*, Band 23, S. 7-32.
- WARRICK, R. A. u. OERLEMANS, J.: Sea Level Rise. Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Hrsg. v. J. T. Houghton, G. J. Jenkins u. J. J. Ephraums. Cambridge, 1990, S. 257-281.