

Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Gezeiten und Sturmfluten in der Deutschen Bucht

Von TORSTEN STENGEL und WERNER ZIELKE

Zusammenfassung

Zwei die Tidedynamik in der Deutschen Bucht betreffende Phänomene werden derzeit intensiv diskutiert. Zum einen haben sich das Tidehochwasser und der Tidehub in den letzten 40 Jahren signifikant erhöht, zum anderen wird aufgrund von zu erwartenden Klimaänderungen für die nächsten 100 Jahre ein Anstieg des Meeresspiegels erwartet, der stärker ist als der bisher beobachtete.

Bei dem Versuch, das erstgenannte Phänomen zu erklären, ist zu berücksichtigen, daß meteorologische, ozeanographische, tektonische, morphologische und anthropogene Faktoren unterschiedlich starke Einflüsse auf die Tidedynamik haben. Mit Hilfe von hydrodynamisch-numerischen Modellen ist es möglich, diese zu untersuchen, so daß ein besseres Verständnis der komplexen, zeitlich und lokal variablen Abläufe ermöglicht wird. Insbesondere ist die Frage zu beantworten, ob ein Meeresspiegelanstieg für die jüngsten Änderungen eine Rolle gespielt hat.

Bezüglich der Abschätzungen der Folgen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidewasserstände und die Sturmflutscheitelwerte in der Deutschen Bucht und dem Elbeästuar ergeben die Untersuchungen, daß in Küstennähe mit teilweise deutlichen Änderungen der Tidedynamik (Tidehub, Strömungsgeschwindigkeiten und tideinduzierte Restströme) zu rechnen ist. Die Ergebnisse zeigen beispielsweise, daß sich an einigen Küstenstationen der Tidehub um einen Wert erhöht, der mehr als 30 % des betrachteten Meeresspiegelanstiegs beträgt, wobei in der Elbe noch stärkere Erhöhungen zu erwarten sind.

Eine wichtige Komponente des Küstenschutzes stellen die Watten dar. Um den zukünftigen Einfluß der Watten auf die Tidedynamik abzuschätzen, werden zum einen Untersuchungen durchgeführt, die das Wachsen der Watten mit dem Meeresspiegel berücksichtigen, zum anderen wird von einer unveränderten Höhenlage der Watten ausgegangen. Zu der Frage, ob die Watten mit dem Meeresspiegel mitwachsen, geben die herausgearbeiteten Ergebnisse erste Hinweise, daß dies teilweise der Fall sein könnte.

Für die Untersuchungen des Einflusses eines Meeresspiegelanstiegs auf das Sturmflutverhalten werden historisch abgelaufene Sturmfluten herangezogen. Dabei zeigt sich, daß in Abhängigkeit von der jeweiligen Sturmflut Änderungen auftreten können, jedoch ist nicht damit zu rechnen, daß die Sturmflutscheitelwerte in der Deutschen Bucht wesentlich stärker ansteigen als der Meeresspiegel. In der Elbe allerdings zeigen die Simulationen während einiger Sturmfluten einen deutlich stärkeren Anstieg der Scheitelwerte.

Summary

Two phenomena relating to changes in the tidal dynamics of the German Bight are presently under discussion. The first concerns the significant increase in the tidal range and high water level within the past 40 years. The second is the predicted increase in the rate of mean sea level rise as a result of expected climate changes.

To explain the first phenomenon one has to consider that meteorological, oceanographical, tectonic, morphological and anthropogenic factors have different influences on the tidal dynamics. Such aspects can be examined using hydrodynamic-numerical models to get a better understanding of the complex dynamics in time and space. Especially the question if a rise in mean sea level is responsible for the recent changes has to be answered.

The investigations show that a mean sea level rise will result in significant changes in the tidal dynamics (tidal range, flow velocities and tidally-induced residual currents), in the German Bight and the Elbe Estuary especially close to the coastline. For example, the tidal range at some coastal

gauges will increase by more than 30% of the mean sea level rise. A greater increase can be expected in the Elbe Estuary.

The inter-tidal areas are an important component of coastal protection. In order to estimate their future influence on the tidal dynamics, computations were done considering a possible increase of the inter-tidal area associated with an increased mean sea level. Of course, the question whether the inter-tidal areas will increase in height cannot be definitely answered. The results, however, give first indications of such possible trends.

The calculations of the influence of a mean sea level rise on the behaviour of storm surges are restricted to historical events. Although changes were detected with each particular storm tide, it is unlikely that the increase in peak water levels in the German Bight will be significantly greater than the rise in the m.s.l. This does not necessarily apply to the Elbe Estuary where peak water levels may rise to a greater extent for certain types of storm tides.

Inhalt

1. Einleitung	94
2. Beschreibung der numerischen Modelle	97
3. Rezente Änderungen der Tidedynamik	98
3.1 Analyse der Pegelzeitreihe Cuxhaven	98
3.2 Erklärungen der jüngsten Änderungen	99
4. Untersuchungen der Folgen eines Meeresspiegelanstiegs	102
4.1 Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf mittlere Tiden	103
4.1.1 Annahmen	103
4.1.2 Auswirkungen auf die Wasserstände	104
4.1.3 Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeiten	109
4.2 Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Sturmfluten	111
5. Schlußbemerkungen	115
6. Schriftenverzeichnis	116

1. Einleitung

Die Tidedynamik in der Deutschen Bucht hat sich während der letzten Jahrzehnte signifikant verändert. Dies macht sich durch einen besonders starken Anstieg des Tidehochwassers (Thw) und des Tidehubs (Thb) bemerkbar, während sich das Tideniedrigwasser (Tnw) nur unwesentlich veränderte (JENSEN et al., 1991 [9]). Dafür gibt es bisher noch keine eindeutigen Erklärungen.

Aus Abbildung 1 wird nicht nur deutlich, wie sehr sich das Thw und der Thb im Zeitraum 1953 bis 1989 erhöhten, sondern es wird auch die örtliche Variabilität offensichtlich. Änderungen des Thbs gehen einher mit Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten, die wiederum auf das Sedimentations- und Erosionsverhalten wirken. Daher ist der Trend des Thbs ein wichtiger Indikator für die Entwicklung der Tidedynamik.

Zahlreiche Faktoren meteorologischen, ozeanographischen, tektonischen, morphologischen und anthropogenen Ursprungs haben unterschiedliche Einflüsse, die mit Hilfe von hydrodynamisch-numerischen Modellen untersucht und quantifiziert werden können (STENGEL, 1994 [19]). Dadurch ist ein besseres Verständnis der komplexen, zeitlich und lokal variablen Abläufe möglich, und es können nicht nur Erklärungen für vergangene Änderungen gefunden werden, sondern auch zukünftige Entwicklungen sind leichter abschätzbar.

In den nächsten 100 Jahren ist aufgrund der zu erwartenden Klimaänderungen mit einem

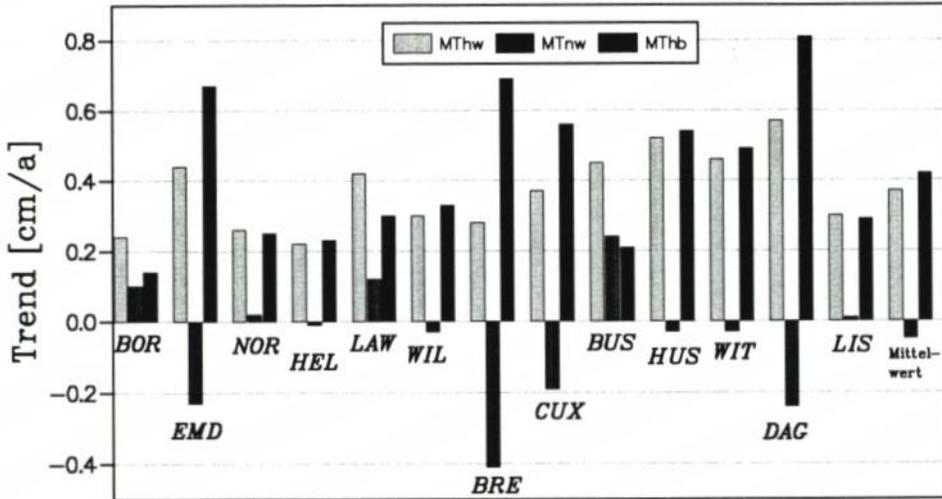


Abb. 1: Thw-, Tnw- und Thb-Trends [cm/a] zwischen 1953 und 1989 an einigen Pegeln in der Deutschen Bucht (Daten aus JENSEN ET AL., 1991 [9]). Die Lage der Pegelstationen ist Abbildung 2 zu entnehmen

Meeresspiegelanstieg zu rechnen, der wahrscheinlich bei 50–60 cm liegt (STATE OF THE ART REPORT, 1993 [18]). Genaue Angaben über den Betrag sind jedoch aufgrund der Unsicherheiten der Klimamodelle und der Randbedingungen (u. a. zu erwartende Treibhausgaskonzentrationen) nicht möglich, so daß vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) eine Bandbreite von 10 bis 110 cm angegeben wird (IPCC, 1992 [8]). Abbildung 3 zeigt exemplarisch einige prognostizierte Meeresspiegel- und Temperaturkurven.

Beispielsweise ergeben Szenarienrechnungen des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg [11] alleine aufgrund der thermischen Ausdehnung des Wassers (weitere Faktoren sind u. a. das Abschmelzen landgebundener Gletscher) einen globalen Meeresspiegelanstieg von 16 cm, wobei für Nordwesteuropa ein Anstieg von 25 cm vorhergesagt wird. Dabei wird davon ausgegangen, daß sich die Treibhausgaskonzentrationen in den nächsten 100 Jahren in dem Maße erhöhen werden, wie dies bisher der Fall war.

Der aktuelle Stand der Forschung bezüglich eines prognostizierten Meeresspiegelanstiegs ist u. a. bei STENGEL, 1994 [19], zusammengefaßt.

Bedingt durch einen Meeresspiegelanstieg werden die Küstenschutzbauwerke und die Küstenvorfelder stärker belastet, da sich die Regionen der Gezeitendissipation und -erosion auf die Küste zu verlagern. Bei Änderungen der Tidedynamik im ungünstigen Sinne ist mit verstärkten Erosionen einiger Küstenabschnitte zu rechnen. Eine mögliche Erhöhung des Tidehubs vergrößert den Energieeintrag in die Ästuarie und erhöht dort die Strömungsgeschwindigkeiten. Daher sind die zu erwartenden Änderungen der Normaltiden (zeitlicher Verlauf der Wasserstände, Tidehub und Strömungsgeschwindigkeiten), die Tendenzen für zukünftig zu erwartende Entwicklungen aufzeigen, von besonderem Interesse.

Für den Küstenschutz ist es von großer Wichtigkeit, den Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf das Sturmflutverhalten in der Deutschen Bucht abzuschätzen. Da über zukünftig zu erwartende Starkwindereignisse noch keine Kenntnisse vorliegen, werden in der vorliegenden Arbeit historische Sturmfluten herangezogen, so daß zumindest Aussagen darüber möglich sind, wie sich bei gleichbleibender Meteorologie die Scheitelhochwasserwerte ändern können, wenn der Meeresspiegel ansteigt.

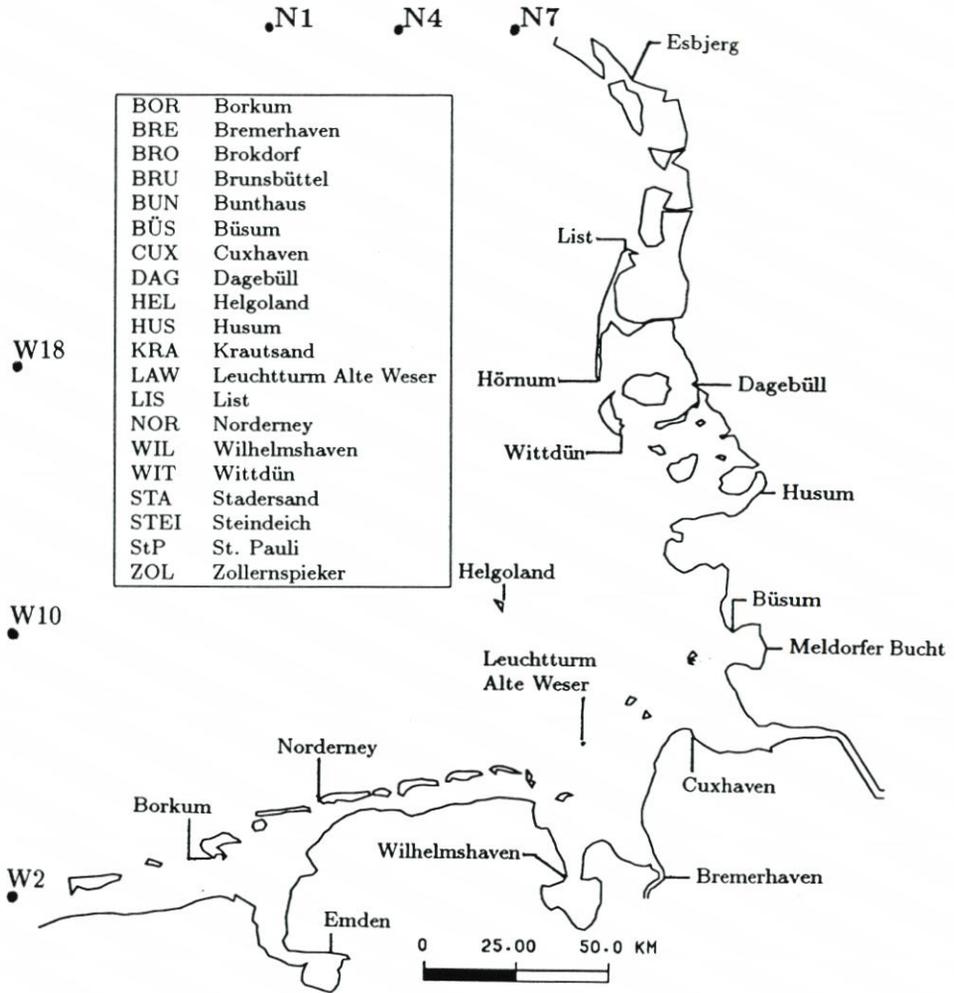


Abb. 2: Lage der im Aufsatz erwähnten Pegel und Abkürzungen

Mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer Simulationsmodelle ist es zum einen möglich, den Einfluß unterschiedlicher Faktoren auf die Tidedynamik zu quantifizieren und einige Erklärungen für die jüngsten Änderungen zu finden. Zum anderen lassen sich Prognosen über die Folgen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik durchführen, vorausgesetzt die notwendigen Eingabedaten, d. h. die Wasserstandsverläufe an den Modellrändern, sind bekannt. Dies ist im vorliegenden Fall dann nicht gegeben, wenn sich die Tidedynamik in der Nordsee durch einen Meeresspiegelanstieg ändert. Die Untersuchungen wurden deshalb mit mehreren geschichteten („nested“) Modellen durchgeführt (Abb. 4). Ein großskaliges Modell, das sich über den Schelfrand hinaus erstreckt und deshalb auch bei einem Meeresspiegelanstieg mit astronomischen Tiden gesteuert werden kann, beschreibt das Gesamt tidegeschehen in der Nordsee und liefert die Eingabedaten für ein kleinskaliges Modell, das die detaillierte Beschreibung der Vorgänge im Küstenbereich der Deutschen Bucht erlaubt. Dieses wiederum liefert die Randbedingungen für hochauflösende Ästuarmodelle.

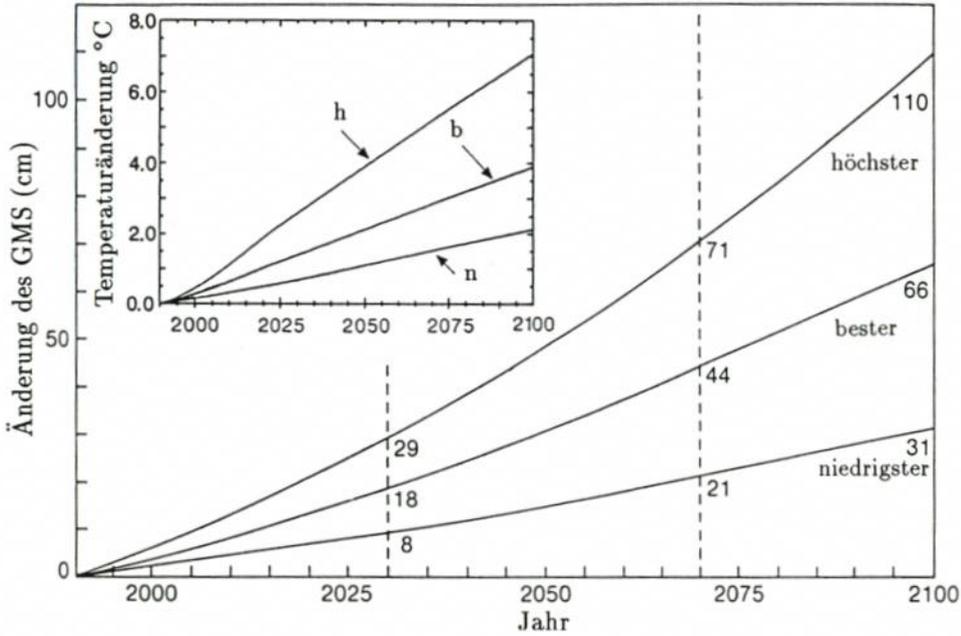


Abb. 3: Geschätzte globale Temperaturerhöhung (oben links) und Anstieg des globalen Meeresspiegels (GMS) bis zum Jahre 2100 unter Einbeziehung von Szenario A (zukünftige Erhöhung der Treibhausgas-konzentrationen wie bisher) – Quelle: WARRICK und OERLEMANS, 1991 [25]

2. Beschreibung der numerischen Modelle

Als großskaliges Modell wurde das Continental Shelf Model (CSM) verwendet, das von Delft Hydraulics und Rijkswaterstaat, NL, entwickelt wurde (GERRITSEN und BIJLSMA, 1988

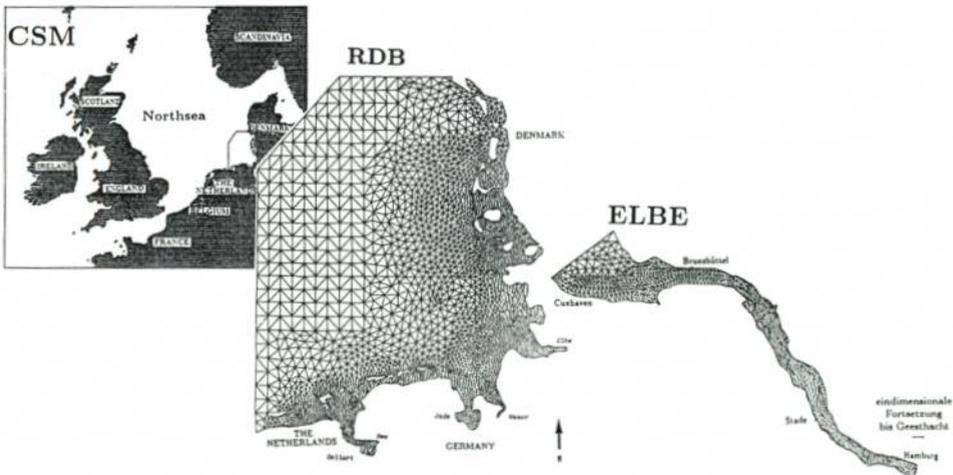


Abb. 4: Die Modelle CSM, RDB und ELBE

[5] sowie VERBOOM et al., 1992 [24]) und die tiefengemittelten Flachwassergleichungen in Kugelkoordinaten mittels des Finite-Differenzen-Verfahrens löst. Es hat eine Auflösung von $1/12$ Breiten- bzw. $1/8$ Längengrad und erstreckt sich zwischen 48°N – 62°N und 12°W – 13°E (Abb. 4). An den offenen Rändern wird das CSM mit Wasserständen, berechnet aus sechs Partialtiden (O_1 , K_1 , M_2 , S_2 , N_2 , K_2), gesteuert.

Simulationen, die für Normaltidezyklen und für Sturmfluten durchgeführt wurden, zeigen, daß das CSM für Stationen im „off-shore“-Bereich der Deutschen Bucht gute Ergebnisse liefert (die Abweichungen der Tidehoch- bzw. Niedrigwasser liegen im Bereich von max. 1–2 Dezimeter).

Näheres zur Eichung und Verifikation des Modells für das Gebiet der Deutschen Bucht ist in [20] und [19] beschrieben.

Um den küstennahen Bereich der Deutschen Bucht mit seiner komplexen Küstenmorphologie und Bodentopographie detaillierter untersuchen zu können, wurde ein hochauflösendes Finite-Element-Modell der Deutschen Bucht (Regionalmodell Deutsche Bucht, RDB) mit einem Gitterabstand zwischen 800 m und 9 km erstellt (Abb. 4). Die Lösungen der tiefengemittelten Flachwassergleichungen werden mittels eines expliziten Finite-Element-Verfahrens berechnet, das in der Lage ist, das Trockenfallen und Überfluten der küstennahen Wattgebiete zu berechnen. Am seeseitigen Rand wird das Modell mit Wasserständen, berechnet mit Hilfe des CSM, gesteuert. Die Simulationsergebnisse zeigen, daß auch für Stationen, die von Prielen und Watten umgeben sind, die Tidedynamik gut wiedergegeben wird.

Eine genaue Beschreibung bezüglich des numerischen Verfahrens und der Eichung des Modells ist in [14] und [19] nachzulesen.

Um Aussagen über den Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf das Tideverhalten in den Ästuaren machen zu können, wurde exemplarisch das Elbe-Ästuar gewählt. Das Modell „ELBE“ basiert auf dem gleichen numerischen Verfahren wie das RDB. Das Modellgebiet setzt sich aus einem ein- und einem zweidimensionalen Teilstück zusammen. Der zweidimensionale Abschnitt erstreckt sich von Cuxhaven bis Hamburg (Abb. 4). Die variablen Dreiecksmaschen (Gitterabstand zw. 250 m und 1 km) ermöglichen eine relativ genaue Erfassung der Elbetopographie, insbesondere des Fahrwasserbereichs und der Deichlinie. Das Gebiet des Hamburger Hafens sowie der Oberlauf bis Geesthacht wurden eindimensional erfaßt, wobei der Hamburger Hafen in vereinfachter Form diskretisiert worden ist.

Am seeseitigen Rand wird das Modell mit Wasserständen, berechnet aus den RDB-Simulationen, gesteuert. Am Oberlauf wird mit entsprechenden Abflußwerten bei Neu-Darchau gesteuert. Die Simulationsergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Detaillierte Informationen zum Elbe-Modell können in [22] und [19] nachgelesen werden.

3. Rezente Änderungen der Tidedynamik

3.1 Analyse der Pegelzeitreihe Cuxhaven

Die Meeresspiegelschwankungen der letzten Jahrhunderte können durch Pegelaufzeichnungen rekonstruiert werden. Bei den Analysen fällt auf, daß sich das Thw und der Thb in den letzten Jahrzehnten deutlich gegenüber dem vorherigen Zeitraum erhöht haben (JENSEN et. al., 1991 [9]), wobei, wie Abbildung 1 bereits zeigte, signifikante lokale Unterschiede festzustellen sind.

Für die Änderungen der Wasserstände während der letzten 150 Jahre wird exemplarisch der Pegel Cuxhaven herangezogen. Bei der Betrachtung von nur einem Pegelstandort spielen natürlich lokale Effekte (Baumaßnahmen, Verlagerungen von Prielen, Lage des Pegels) eine besondere Rolle, doch verhalten sich, wie u. a. Untersuchungen von JENSEN et. al., 1991 [9], zeigten, die Thws und Thbs an anderen Stationen ähnlich bezüglich der Trends. Das für die Analysen verwendete Datenmaterial wurde im Rahmen des KFKI-Forschungsprojektes „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ [9] erstellt und den Autoren dankenswerterweise für eigene Analysen zur Verfügung gestellt.

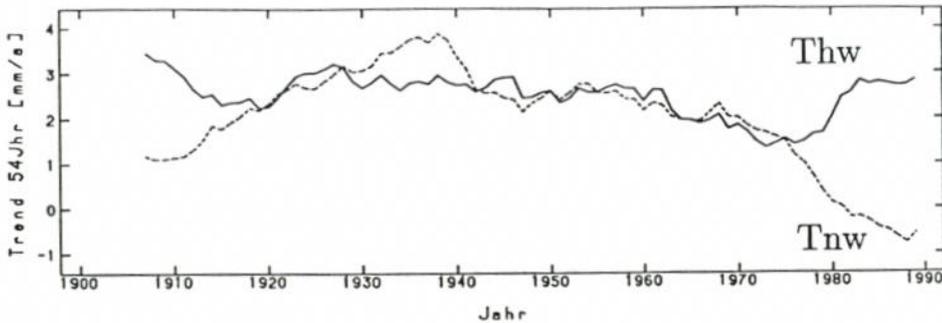


Abb. 5: Entwicklung der linearen Trends [mm/a] (ermittelt aus 54-jährigen Zeitfenstern) von Thw (durchgezogen) und Tnw (gestrichelt) am Pegel Cuxhaven. Der zu einem bestimmten Jahr gehörende Trend wurde aus der Änderung während der vorherigen 54 Jahre ermittelt. (Die Daten stammen aus dem KFKI-Forschungsprojekt „Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht“ [9])

Aus Abbildung 5 wird die starke Erhöhung des Tidehubs am Pegel Cuxhaven in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts besonders offensichtlich. Hier sind die aus 54-jährigen Zeitfenstern (drei Nodaltiden) ermittelten Trends von Thw und Tnw über die Zeit aufgetragen. Seit etwa 1975 (d. h. ab Zeitfenster 1922/1975) haben sich die Trends von Tnw und Thw deutlich unterschiedlich verhalten, was zu einem signifikanten Anstieg des Thb-Trends (und damit zu einer Erhöhung des Thbs) führte. Es wird auch ersichtlich, daß zu Beginn dieses Jahrhunderts ähnlich starke Variationen der Trends auftraten.

3.2 Erklärungen der jüngsten Änderungen

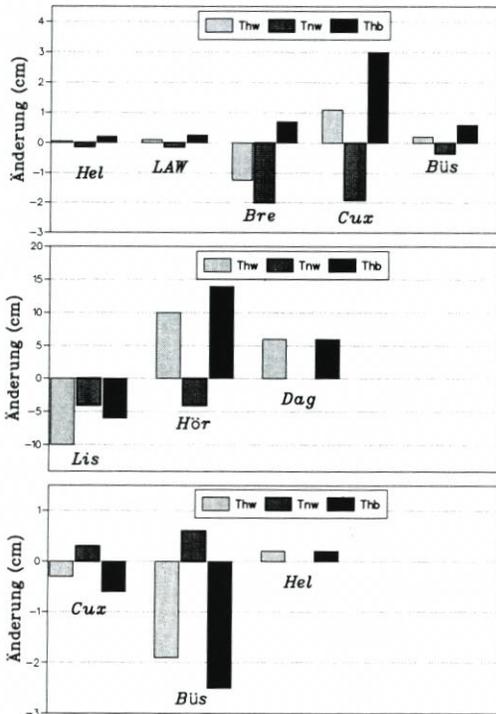
Für die Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht können unterschiedliche Faktoren wie Landsenkungen/Meeresspiegelanstieg, meteorologische Ursachen, großräumige Veränderungen der Strömungsverhältnisse, Salinitätsänderungen, morphologische Änderungen oder anthropogene Eingriffe eine Rolle gespielt haben.

Analysen von STENGEL, 1994 [19], zeigen, daß die Tidedynamik in der Deutschen Bucht äußerst sensibel auf Änderungen unterschiedlicher Einflußfaktoren reagiert. Die oben genannten Einflußgrößen bewirken lokal unterschiedliche Änderungen und können sich regional abgeschwächt auswirken (z. B. Ausbaumaßnahmen in Tideflüssen). Untersuchungen bezüglich des Einflusses verschiedener Windrichtungen auf die Wasserstände zeigen deutlich, daß es Windrichtungsbereiche gibt (zwischen 180° und 210° bzw. 300° und 360°), in denen geringe Variationen relativ starke Änderungen der Tidehoch- und -niedrigwasser bewirken. Lokal und regional gegenläufige Trends von Tidehoch- und -niedrigwasser und damit

deutliche Erhöhungen des Tidehubs ergeben sich dann, wenn entweder großräumige (z. B. bezüglich der Strömungsverhältnisse und damit der Wasserstandsverläufe am Schelfrand) oder morphologische (u. a. verlagerte Küstenlinien oder Ausbaumaßnahmen) Änderungen auftreten.

Als Beispiel der untersuchten Einflußgrößen wird auf Abbildung 6 verwiesen. Hier wird der Einfluß unterschiedlicher „modellierter“ Baumaßnahmen auf das Thw, Tnw und den Thb an einigen Pegelstationen in der Deutschen Bucht aufgezeigt. Untersucht wurden die Einflüsse des Baus des Hindenburgdamms, der Eindeichung der Meldorfer Bucht und die von Flußvertiefungen. Diese „numerischen“ Eingriffe können zumindest im Fall der Flußvertiefungen nicht mit den realen verglichen werden, da das angewandte Modell (RDB) für diese Untersuchungen (z. B. Vertiefungen von nur kleinen Flußabschnitten) zu grobauflösend ist. Bei der Simulation von Flußvertiefungen wurde die Topographie so verändert, daß beispielsweise im Gebiet der Elbemündung alle Tiefen von vorher 11,5 auf 14 m erhöht wurden. Die somit simulierten „Vertiefungen“ der Ästuar sind aufgrund der Auflösung des RDB großflächiger als die tatsächlich durchgeführten. Der Trend, den die Ergebnisse widerspiegeln, ist jedoch als realistisch einzustufen und bestätigt u. a. die Aussagen von ANNUTSCH, 1991 [1] und KUNZ, 1993 [12], die eine Auswirkung einer sehr starken Elbevertiefung auf die Tidedynamik bei Cuxhaven und noch weiter seewärts vermuten.

Im folgenden werden Erklärungen der jüngsten Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht, bei denen insbesondere ein Anstieg des Thb-Trends zu verzeichnen ist, herausgearbeitet.



Modellierte Vertiefung der Weser von 8 auf 10 m und der Elbe von 11,5 auf 14 m

Einfluss des Hindenburg-Damms (nach [7])

Eindeichung der Meldorfer Bucht

Abb. 6: Änderungen des Thws, Tnws und Thbs aufgrund modellierter Baumaßnahmen (siehe Text), aus STENDEL, 1994 [19]

Bei den durchgeführten Untersuchungen wird von einem Meeresspiegelanstieg ausgegangen, der bei 10 cm liegt. JENSEN ET AL., 1992 [10], errechneten für den Zeitraum zwischen 1955 und 1991 aus Pegelaufzeichnungen von 13 Standorten in der Deutschen Bucht einen Anstieg des Tidemittelwassers (entspricht in etwa dem mittleren Meeresspiegel) von ca. 7,5 cm. Werden nur Pegel berücksichtigt, die weniger stark von anthropogenen Änderungen beeinflusst sind (Ausschluß der Ästuarpegel Cuxhaven, Bremerhaven und Emden), erhält man einen Wert von ca. 9 cm, so daß obige Annahme eines Anstiegs von 10 cm gerechtfertigt erscheint.

Zur Berücksichtigung des meteorologischen Trends werden die Auswertungen von TÖPPE, 1993 [23], herangezogen. TÖPPE ermittelte aus den Druckdaten im Dreieck Borkum-Hamburg-Fanö den geostrophischen Wind und konnte daraus die Windgeschwindigkeit und -richtung für das Gebiet der Deutschen Bucht berechnen. Durch Auswertung des linearen Trends ergibt sich, daß in den letzten 40 Jahren die mittlere Windgeschwindigkeit von ca. 5 m/s auf ca. 4 m/s gesunken ist, wobei der Wind von etwa 235° nach etwa 225° drehte.

Abbildung 7 vergleicht die Änderungen des Thbs an Pegelstationen in der Deutschen Bucht, die aus den linearen Trends für den Zeitraum 1955 bis 1991 (JENSEN ET AL., 1992 [10]) durch Multiplikation mit 37 ermittelt wurden (Meßwerte), mit den Simulationen. Die so gewonnenen ‚gemessenen‘ Werte stellen mit Sicherheit nicht die genauen Änderungen dar, da kein exakt linearer Zusammenhang zwischen Zeit- und Thb-Kurve besteht. Jedoch können sie als relativ gute Abschätzungen angesehen werden.

Es wird deutlich, daß die beobachteten Änderungen des Tidehubs alleine durch einen Meeresspiegelanstieg verbunden mit meteorologischen Änderungen (Simulation I in Abbildung 7) nicht erklärt werden können.

Anthropogene Eingriffe wie Fahrwasservertiefungen und Eindeichungen haben nicht nur einen lokalen Einfluß auf die Tidedynamik, sondern wirken abgeschwächt auch regional. Werden die seit den fünfziger Jahren durchgeführten Ausbaumaßnahmen in den Tideflüssen Elbe und Weser zusammen mit einem Meeresspiegelanstieg von 10 cm und den oben beschriebenen meteorologischen Änderungen bei den Simulationen berücksichtigt (Abbildung 7, Simulation II), stimmen die berechneten Änderungen des Tidehubs zumindest für die an den Ästuaren gelegenen Stationen (Bremerhaven und Cuxhaven) bereits besser mit den Beobachtungen überein, jedoch sind immer noch große Abweichungen vorhanden.

Nach FLOHN, 1989 [3], hat die Oberflächentemperatur der tropischen Ozeane in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Dadurch könnten großräumige Änderungen der Strömungsmuster aufgetreten sein. Diese angenommenen großräumigen Änderungen werden dadurch berücksichtigt, daß die Amplituden der Wasserstände am Schelfrand um 5 % erhöht werden. Bei Berücksichtigung der somit simulierten großräumigen Änderungen kombiniert mit einem Meeresspiegelanstieg von 10 cm, meteorologischen Änderungen und den Ausbaumaßnahmen in den Tideflüssen Weser und Elbe (Abbildung 7, Simulation III) können für einige Pegel in der Deutschen Bucht (Bor, Nor, Hel, LAW und Cux) die beobachteten Änderungen in den letzten 37 Jahren annähernd erklärt werden.

An den Ästuarpegeln Emden und Bremerhaven sowie an den nordfriesischen Pegeln (Büs, Hus, Wit und Dag) traten in den vergangenen Jahrzehnten besonders starke Änderungen des Tidehubs auf, die darauf hinweisen, daß hier lokale Effekte eine besondere Rolle spielen. Zu nennen sind für den Bereich der Weser Einflüsse von Bühnenbauten oder eventuell aufgetretene Änderungen im Flußverlauf. Auch sind nicht alle Ausbaumaßnahmen bei den Simulationen berücksichtigt worden (beispielsweise wurden die in der Ems durchgeführten Flußvertiefungen aufgrund der zu groben Auflösung des Modells in diesem Gebiet nicht simuliert).

Im Gebiet der nordfriesischen Inseln finden morphologische Änderungen statt (zu

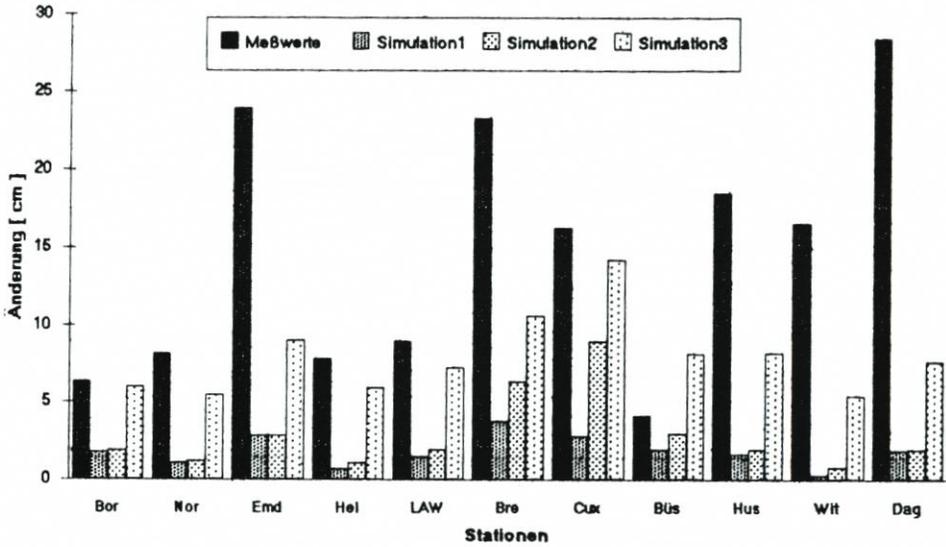


Abb. 7: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Änderungen des Thbs während der letzten 37 Jahre. Messungen: aus JENSEN ET AL., 1992 [10] (siehe Text) – Simulation I: Berücksichtigung des Meeresspiegelanstiegs und der Meteorologie – Simulation II: wie Simulation I plus Einfluß von Flußvertiefungen – Simulation III: wie Simulation II plus großräumige Einflußfaktoren (siehe Text)

nennen sind Änderungen der Höhenlagen der Watten sowie Verlagerungen der Sande und anthropogene Einflüsse), die bei den Simulationen nicht berücksichtigt wurden. Die ständigen topographischen Änderungen nördlich und südlich des Hindenburgdammes, der beschleunigte Küstenrückgang westlich von Sylt sowie die starke Verlandung im Gebiet um Husum sind weitere Beispiele für den Wandel der Morphologie in Nordfriesland.

Die starken Abweichungen zwischen Simulation und Beobachtung im nordfriesischen Raum deuten daher darauf hin, daß gerade die oben beschriebenen Änderungen der Küsten- und Wattenmorphologie den starken Anstieg des Tidehubs in diesem Gebiet verursacht haben könnten. Um diese Problematik jedoch genauer untersuchen zu können, müssen feiner auflösende Lokalm Modelle verwendet werden.

4. Untersuchungen der Folgen eines Meeresspiegelanstiegs

Mit Hilfe der oben beschriebenen hydrodynamisch-numerischen Modelle werden im folgenden die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die mittlere Tidedynamik (Wasserstände und tiefengemittelte Geschwindigkeiten) und auf das Sturmflutverhalten in der Deutschen Bucht abgeschätzt. Dabei wird ein Meeresspiegelanstieg betrachtet, der zwischen 25 und 100 cm und somit im Bereich der prognostizierten Änderungen entsprechend Abbildung 3 liegt.

4.1 Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf mittlere Tiden

Unter mittlerer Tide wird im folgenden eine Tide verstanden, deren Verlauf unabhängig von meteorologischen Einflüssen ist, d. h., die antreibenden Kräfte auf die betrachteten Systeme (Nordsee/Deutsche Bucht/Elbe) sind lediglich die über die offenen Ränder gezeitenbedingten veränderlichen Wasserstände bzw. Durchflüsse.

Zur Ergebnisdarstellung werden in der Regel mindestens zwei Tage, d. h. vier Tideperioden, herangezogen, um auch den Einfluß der täglichen Ungleichheit ausreichend zu berücksichtigen. Diese verursacht in der Deutschen Bucht Abweichungen aufeinander folgender Tidehoch- bzw. -niedrigwasser von 10 bis 30 cm.

4.1.1 Annahmen

Bei den Simulationen wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- a) Das Tidegeschehen an den offenen Rändern des CSM ändert sich nicht, wenn der Meeresspiegel ansteigt. Das CSM wird folglich an den offenen Rändern mit Wasserständen, wie sie zum jetzigen Zeitpunkt herrschen, gesteuert. Diese werden jedoch um einen konstanten Betrag (den zu simulierenden Meeresspiegelanstieg) erhöht. Diese Annahme scheint zunächst gerechtfertigt, da die Wassertiefen am offenen Rand des CSM mehr als 1000 m betragen, so daß sich ein Meeresspiegelanstieg von einem Meter (maximal betrachteter Wert) kaum bemerkbar macht. Wie jedoch Untersuchungen von MIKOLAJEWICZ, 1990 [13], und vom DKRZ, 1991 [11], ergaben, werden Klimaänderungen einen regional unterschiedlichen Anstieg des Meeresspiegels verursachen. Dies ist mit Änderungen des ozeanischen Zirkulationsmusters zu erklären, wodurch insbesondere im Nordatlantik zum einen ein höherer Meeresspiegelanstieg als der globale zu erwarten ist; zum anderen ist auch mit einem veränderten zeitlichen Verlauf der Tidekurven zu rechnen. Ziel dieser Untersuchungen ist es jedoch, speziell die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs zu untersuchen.
- b) Die Küstenmorphologie und die Form der Inseln bleiben unverändert, wenn sich die Tidedynamik, bedingt durch einen Meeresspiegelanstieg, ändert. Wenn die Inseln und Küstenlinien nicht durch höhere Deiche oder andere Küstenschutzbaumaßnahmen gesichert werden, ist davon auszugehen, daß durch einen Anstieg des Meeresspiegels zumindest die Form und die Lage einiger Inseln in einem stärkeren Maße als bisher verändert werden. Dies hat wiederum Einfluß auf die lokale und regionale Tidedynamik, ist jedoch bei den Simulationen eines Meeresspiegelanstiegs nicht berücksichtigt worden. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit eines Meeresspiegelanstiegs werden sich auch die Wattgebiete verlagern. Dabei bleibt offen, ob sie in dem Maße ansteigen wie der Meeresspiegel. Abschätzungen von DE RONDE und DE RUIJTER, 1987 [15], ergaben für das niederländische Wattengebiet, daß ca. 75 % des Wattenmeeres den 2,5fachen Zeitraum eines Meeresspiegelanstiegs benötigen, um sich morphologisch anzupassen. Bei den Untersuchungen von de Ronde und de Ruijter wurde von einem Meeresspiegelanstieg von fünf Metern innerhalb von 200 Jahren ausgegangen. Da neuere Meeresspiegelprognosen erheblich geringere Zuwachsraten postulieren, kann davon ausgegangen werden, daß die Wattgebiete zumindest regional mit einem Meeresspiegelanstieg schritthalten und somit erhalten bleiben. Untersuchungen von SIEFERT, 1990 [17], bezüglich der Änderungen der Wathö-

hen im Gebiet zwischen Cuxhaven und Neuwerk ergaben, daß diese sich in den vergangenen 35 Jahren kaum verändert haben, obwohl sich im gleichen Zeitraum das MThw erhöhte. Siefert schließt daraus, daß die Watten wahrscheinlich nicht mit dem Meeresspiegel ansteigen. Jedoch können diese Aussagen nicht verallgemeinert werden. Beispielsweise wurde in der Region südlich von Mellum der durchschnittliche Meeresspiegelanstieg von 23 ± 9 cm/Jh während der letzten vier bis sechs Jahrhunderte von einer gleichgroßen Wattaufhöhung kompensiert (HOFSTEDE, 1991 [6]).

Bei den durchgeführten Simulationen eines Meeresspiegelanstiegs wird daher sowohl ein Mitwachsen als auch eine Stagnation der Watthöhen berücksichtigt.

c) Die meteorologischen Bedingungen ändern sich nicht.

Klimaänderungen sind auch verbunden mit Änderungen von Starkwindereignissen. Dies kann sowohl die Intensität der Sturmereignisse als auch deren Häufigkeit betreffen. Da jedoch diesbezüglich noch keine fundierten Kenntnisse vorliegen, werden für die Untersuchungen von Extremereignissen lediglich in der jüngsten Vergangenheit aufgetretene Sturmfluten herangezogen (Kapitel 4.2).

4.1.2 Auswirkungen auf die Wasserstände

Die unter obigen Annahmen durchgeführten Simulationen zeigen, daß sich in großen Teilen der Nordsee die Tidedynamik nur unwesentlich verändern wird (mit Ausnahme von Phasenverschiebungen, die aufgrund der erhöhten Wellengeschwindigkeit auftreten), wenn der mittlere Meeresspiegel bis zu einem Meter ansteigt. Jedoch sind im Bereich der Deutschen Bucht signifikante Änderungen zu erwarten. Dabei treten starke regionale Unterschiede auf. Insbesondere im südöstlichen Teil zwischen Jade und Eider sowie im Bereich der nordfriesischen Inseln ist mit einem bemerkenswerten Anstieg des Tidehubs zu rechnen (Abb. 8 und 9). Erklärungen hierfür sind sich verändernde Überlagerungen von Tidewellen, damit verbunden eine Verschiebung der nordöstlich gelegenen Amphidromie sowie die Abnahme des umgekehrt proportional zur Wassertiefe abhängigen Terms der Dissipation durch Bodenreibung, die sich besonders in flachen Gebieten bemerkbar macht.

Aus Abbildung 8 erkennt man deutlich die Phasenverschiebung zwischen der heutigen und der aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs zu erwartenden Tidewelle. Bedingt durch veränderte Wechselwirkungen zwischen einlaufender Tide und der Topographie ändert sich auch die Form der Tidekurven. Die Erhöhung des Tidehubs bei Cuxhaven pflanzt sich in die Elbe hinein fort und wird dort sogar verstärkt. Diese Zunahme im Elbegebiet findet nicht aufgrund des erhöhten Eingangssignals (hier: Pegel Cuxhaven) statt – ein erhöhtes Eingangssignal pflanzt sich in die Elbe hinein abgeschwächt fort (STENGEL und ZIELKE, 1992 [21]) – sondern ist bedingt durch den Anstieg des Meeresspiegels, der ja auch in der Elbe vorhanden ist und die Dissipation der Tidewellenenergie durch Bodenreibung verringert. Ein erhöhter Meeresspiegel bewirkt des weiteren, daß das Verhältnis zwischen Tidewellenlänge und Ästuarlänge und damit das Eigenschwingungsverhalten verändert wird.

Abbildung 9 zeigt zum einen die lokale Abhängigkeit des Anstiegs des Tidehubs; zum anderen ergeben die Simulationen, daß sich der Tidehub annähernd linear mit dem Meeresspiegel ändert, wenn dieser zwischen 25 und 100 cm ansteigt.

Aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs und der damit veränderten Tidedynamik werden sich die Watten regional unterschiedlich entwickeln. Im folgenden wird lediglich auf die Rolle des Mitwachsens der Watten mit dem Meeresspiegel eingegangen. Abbildung 10 zeigt für einige Stationen in der Deutschen Bucht die Änderungen des Thbs und vergleicht die

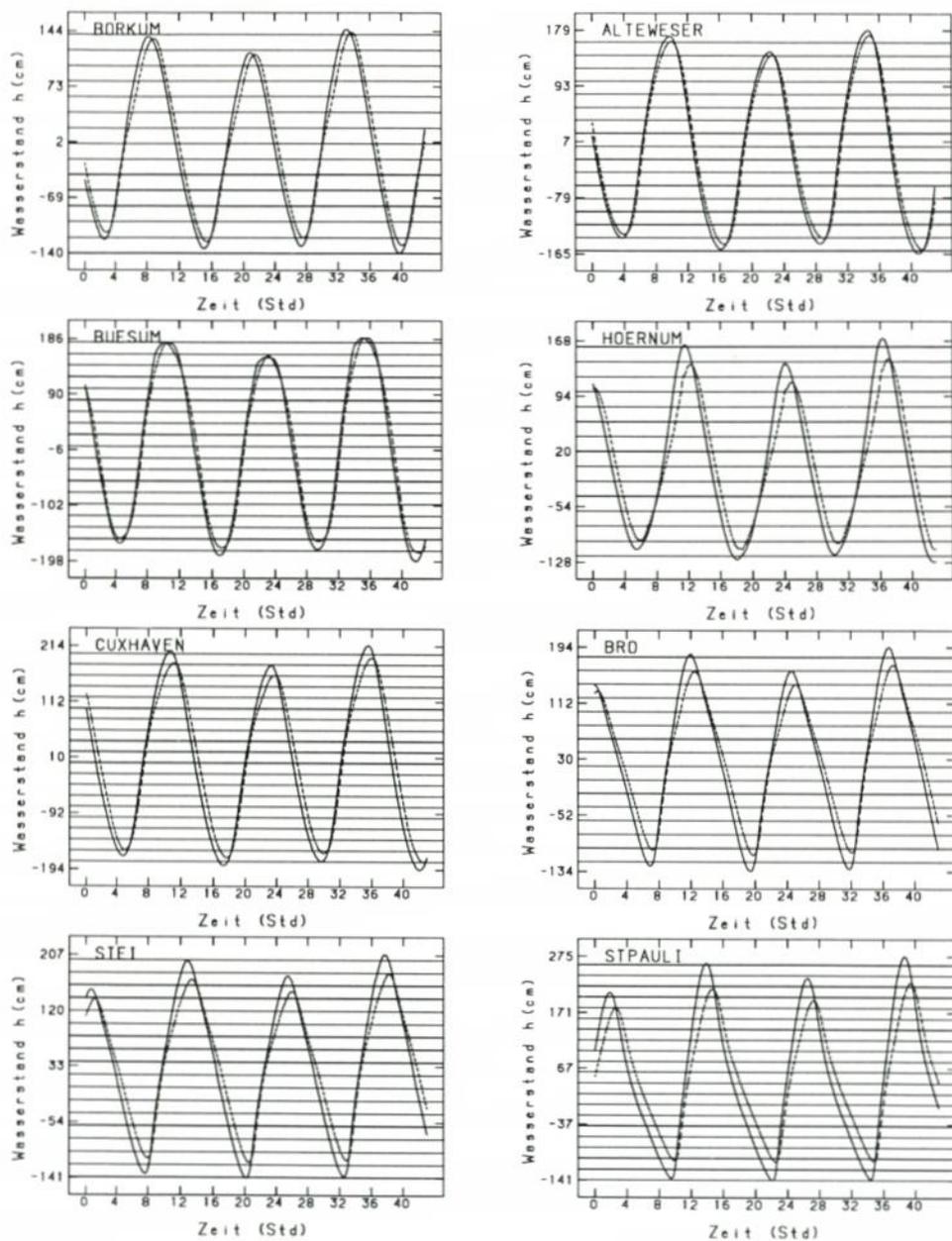


Abb. 8: Mit Hilfe der Modelle RDB und ELBE unter heutigen Verhältnissen (gestrichelt) und bei einem Meeresspiegelanstieg von einem Meter (durchgezogen, wobei der Meeresspiegelanstieg bereits abgezogen wurde) berechnete Wasserstände an einigen Stationen in der Deutschen Bucht und der Elbe

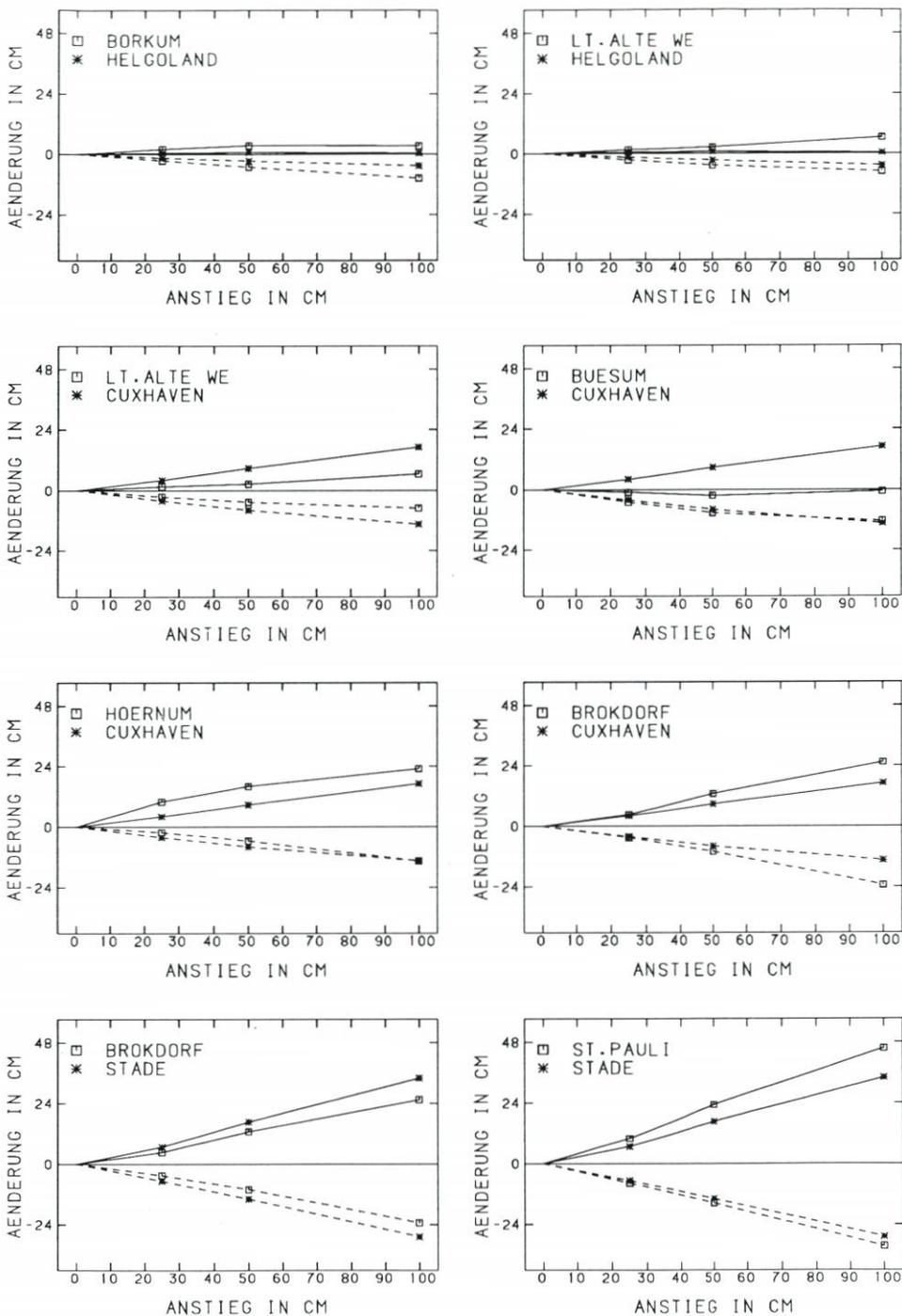


Abb. 9: Mit Hilfe der Modelle RDB und ELBE berechnete Änderungen des Thws (durchgezogene Linien) und des Tnws (gestrichelte Linien) an einigen Pegelstationen in der Deutschen Bucht und der Elbe in Abhängigkeit vom Meeresspiegelanstieg (der Meeresspiegelanstieg wurde jeweils abgezogen)

Simulationsergebnisse eines Meeresspiegelanstiegs von 50 cm, der auch die Watten einschließt (Fall I: die Höhe der Watten bleibt unverändert), mit denen, bei denen die Watten im gleichen Maße wie der Meeresspiegel ansteigen (Fall II: hier blieb die Bathymetrie für Gebiete, deren Tiefen geringer als 2 m sind, unverändert, während die restlichen Gebiete um den entsprechenden Meeresspiegelanstieg vertieft wurden). Die Ergebnisse zeigen, daß meistens damit zu rechnen ist, daß bei einem Anwachsen der Watten mit dem Meeresspiegel der Tidehub nicht so stark ansteigt wie dies sonst der Fall wäre. Dabei ist aufgrund der komplexen Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht kein einheitlicher Trend zu verzeichnen (Beispiel: bei Cux wird aufgrund eines MS-Anstiegs von 50 cm eine Erhöhung des Thbs von ca. 16 cm berechnet; steigen die Watten mit dem Meeresspiegel an, beträgt die Erhöhung 11 cm, bei Borkum hingegen ändert sich der Thb-Anstieg von ca. 8 auf 7 cm).

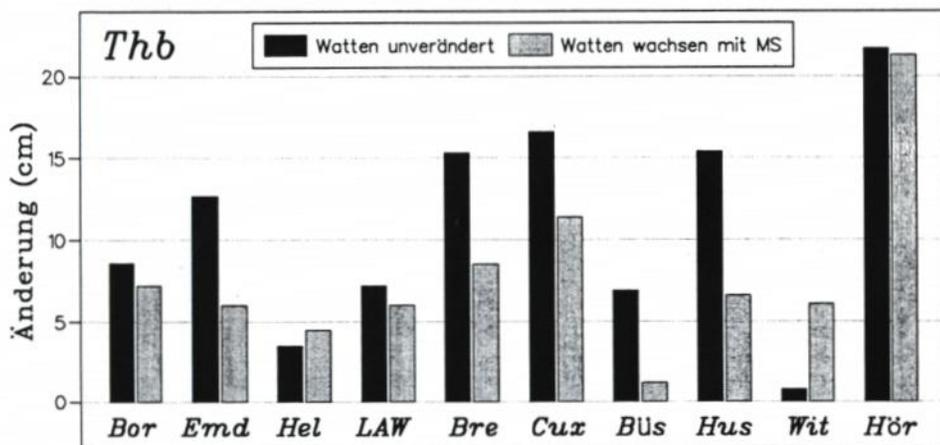


Abb. 10: Mit Hilfe des Modells RDB berechnete Änderungen des Thbs an Pegelstationen in der Deutschen Bucht aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs von 50 cm, wobei zum einen mit zum anderen ohne Wachsen der Watten gerechnet wurde

Wachsen die Watten mit dem Meeresspiegel, ändern sich die Tiefenverhältnisse zwischen Watt- und den restlichen Gebieten (Erhöhung der Böschungsneigung), was zu veränderten Teilreflexionen der Tidewelle in diesen Bereichen führt. Dies wirkt sich auch außerhalb der Flachwassergebiete auf die Tidedynamik aus, so daß sich der Tidehub auch an Stationen, die kaum oder gar nicht von Wattgebieten umgeben sind (z. B. Helgoland), ändert.

Hier spiegelt sich die komplexe Dynamik in der Deutschen Bucht wider, und es zeigt sich, wie sensibel die Tidedynamik auf morphologische Änderungen reagiert (hier: Veränderung der Tiefenverhältnisse zwischen Flachwassergebieten und Watten). Auf der anderen Seite wird deutlich, wie wichtig die Wattgebiete als natürliche Dämpfer der einlaufenden Tide (Dissipation der Tidewellenenergie) einzustufen sind.

Bei den aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs simulierten Änderungen des Thws und Tnws in der Elbe (Abb. 9) fällt auf, daß das Tnw sich weniger verändert als das Thw. Dies ist insofern erstaunlich, da Untersuchungen und Beobachtungen der Auswirkungen von Fahrwasservertiefungen in der Elbe ergaben, daß das Tnw stärker beeinflusst wird als das Thw (z. B. SIEFERT, 1982 [16], ZIELKE und THEUNERT, 1983 [26] und FLÜGGE, 1993 [4]). Eine Erklärung hierfür ist folgende: Bedingt durch die Fahrwasservertiefung ist die prozentuale Wasserstandszunahme während Tnw größer als während Thw und damit auch die prozentuale

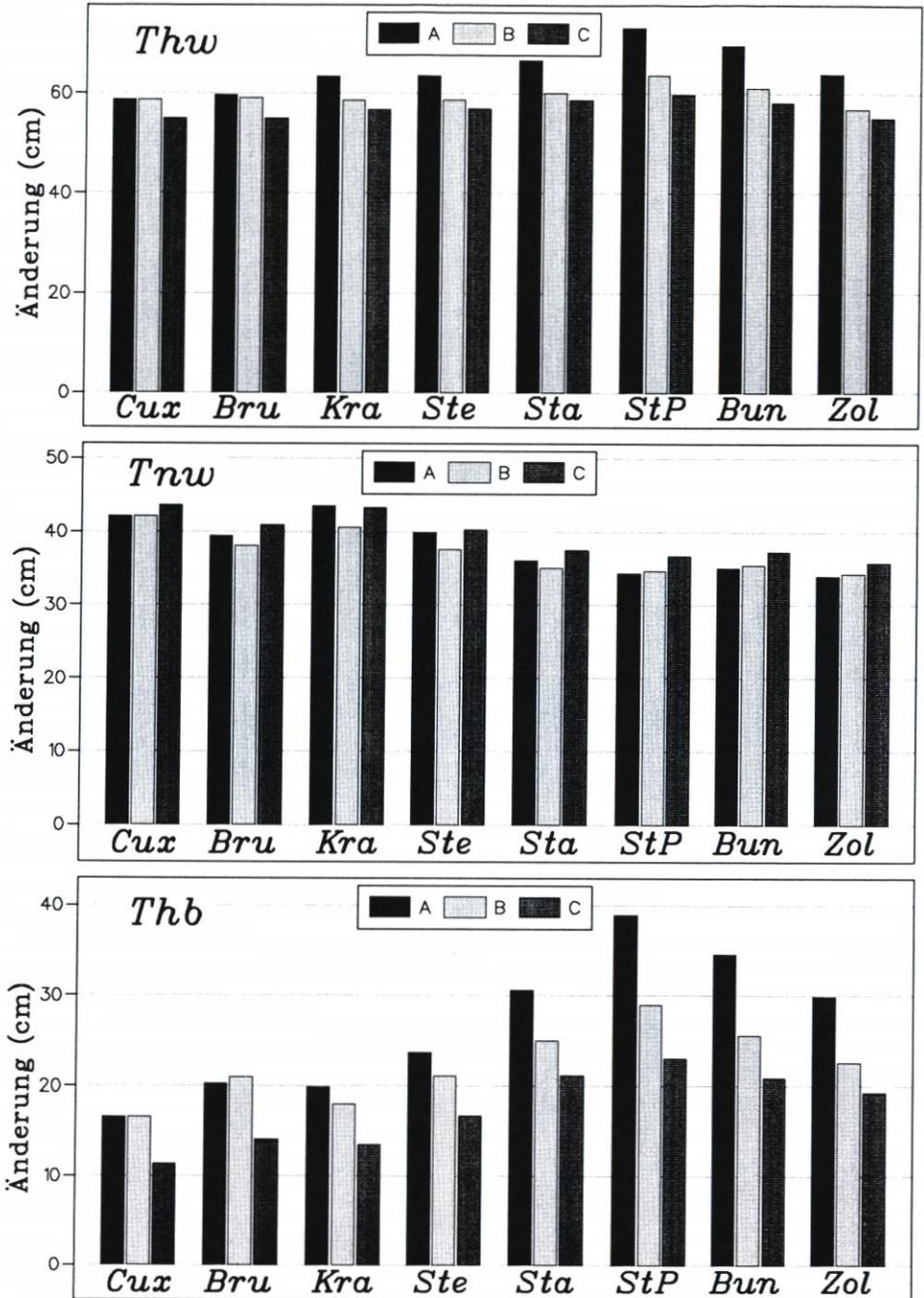


Abb. 11: Änderungen des Thws (oben), Tnws (Mitte) und Thbs (unten) an einigen Pegelstationen in der Elbe aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs von 50 cm. – A: Watten bleiben unverändert – B: Watten wachsen nur in der Elbe mit dem Meeresspiegel – C: Watten wachsen in der Deutschen Bucht und der Elbe mit dem Meeresspiegel

Abnahme der Dissipation durch Bodenreibung während dieser Tidephase, wodurch die Tidewellenenergie weniger stark abgedämpft wird.

Ein globaler Meeresspiegelanstieg beeinflusst nicht nur einen Teil des Ästuars (Fahrwasser), sondern den gesamten Bereich. Das bedeutet, daß auch ehemalige Wattgebiete teilweise zu Flachwassergebieten werden. Bei Ebbe waren diese Gebiete vorher nicht benetzt und trugen somit auch nicht zur Energiedissipation bei. Dies ist nun nicht mehr der Fall, und so kann der oben beschriebene Effekt der stärkeren Verringerung der Dissipation bei Ebbe durch die Erhöhung der Gesamtfläche (d. h. eine Zunahme der Energiedissipation in einigen Wattgebieten) kompensiert werden, wenn großräumige Gebiete betroffen sind. Bei Hochwasser stehen alle Gebiete unter Wasser, so daß eine Erhöhung des Meeresspiegels generell während dieser Tidephase zu einer Verringerung der Energiedissipation durch Bodenreibung führt.

Wenn für die Elbe angenommen wird, daß die Wattgebiete in dem Maße ansteigen wie der Meeresspiegel, ändert sich auch hier wiederum das Tideverhalten gegenüber dem sonstigen Fall (Abb. 11). Die Änderungen des Tidehubs sind dann insbesondere im Raum Stade/Hamburg um bis zu 40 % kleiner. Dies ist hauptsächlich auf eine Verringerung des Tidehochwassers zurückzuführen. Auch ändert sich dann, bezogen auf das aktuelle NN, das T_{nw} stärker als das T_{hw} , wie es theoretisch zu erwarten ist.

4.1.3 Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeiten

Änderungen des Tidehubs sind verbunden mit Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten. Da die angewandten Modelle zweidimensional sind, können nur Aussagen über die tiefengemittelten Geschwindigkeiten gemacht werden. Die Ergebnisse geben jedoch wichtige Hinweise über mögliche Veränderungen der Strömungsmuster und damit verbunden über veränderte Erosions- und Sedimentationsvorgänge.

Abbildung 12 vergleicht die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund eines Anstiegs des Meeresspiegels um 100 cm mit denen unter heutigen Bedingungen. Die Ebb- und Flutdauern ändern sich, und die Maxima der Strömungsgeschwindigkeiten erhöhen oder erniedrigen sich in Abhängigkeit von der Tidephase und dem Ort. Da gerade die Extremwerte der Geschwindigkeiten für die Transportraten eine entscheidende Größe darstellen (beispielsweise sind nach HOLZ et al., 1990 [7], die Sedimenttransportmengen südlich von Sylt proportional zur dritten Potenz der Geschwindigkeit), kann davon ausgegangen werden, daß an einigen Stationen mit erhöhten Erosions- bzw. Sedimentationsraten zu rechnen ist.

Zur Abschätzung großräumiger Änderungen können über mehrere Tideperioden gemittelte Durchflußraten dienen. Sie liefern erste Anhaltspunkte für die Bestimmung der Bewegungstendenz morphologischer Veränderungen. In Abbildung 13 werden die bei einem Meeresspiegelanstieg von 100 cm berechneten mittleren Durchflußraten (diese wurden durch Integration der Durchflußwerte über zwei Tideperioden ermittelt) mit denen unter heutigen Verhältnissen verglichen. Wegen der komplexen Topographie ist die Reststromverteilung in den einzelnen Gebieten räumlich variabel. Aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs verändern sich teilweise die Richtungen der Reststromvektoren geringfügig; zum anderen erhöhen oder erniedrigen sich die Beträge, so daß auch diese Darstellung wieder auf Änderungen der Sedimentations- und Erosionsmuster hinweist. In der Regel ist mit einer leichten Zunahme der derzeitigen Bewegungstendenzen zu rechnen. Es wird beispielsweise ersichtlich, daß sich an der Südspitze Sylts (Abb. 13, oben links) die tidegemittelten Durchflußraten, die Richtung Süden weisen, erhöhen, wenn der Meeresspiegel ansteigt. Daher ist damit zu rechnen, daß sich der derzeitige Trend einer Küstenerosion in diesem Gebiet verstärkt.

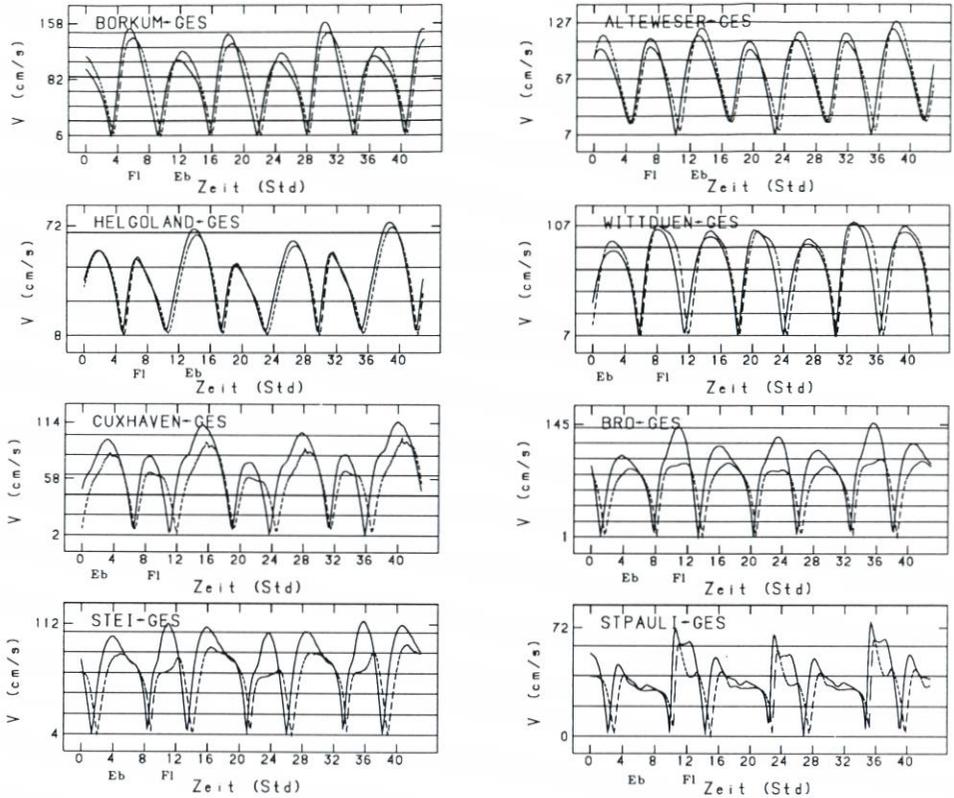


Abb. 12: Mit Hilfe der Modelle RDB und ELBE unter heutigen Verhältnissen (gestrichelt) und bei einem Meeresspiegelanstieg von 100 cm berechnete (durchgezogen) tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten an einigen Stationen in der Deutschen Bucht und der Elbe

Da an vielen Stationen die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten zunehmen, während die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten abnehmen (Abb. 12), ist davon auszugehen, daß der landeinwärts gerichtete Transport anwächst. Diese Annahme wird durch die Änderungen der tidegemittelten Durchflüsse (\approx mittlere Wassertransporte) unterstützt (Abb. 13). Die Ergebnisse sind daher ein Hinweis dafür, daß bei einer Erhöhung des Meeresspiegels damit zu rechnen ist, daß die Wattgebiete ebenfalls ansteigen. Über die Anstiegsgeschwindigkeiten können mit diesen Modellen keine Aussagen gemacht werden.

Die aufgezeigten Ergebnisse können aufgrund der örtlichen Auflösung des RDB nur erste Anhaltspunkte bezüglich der Fragestellung des Mitwachsens der Watten liefern. Da insbesondere im südöstlichen Bereich der Deutschen Bucht sowie im nordfriesischen Raum aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs mit signifikanten Änderungen der Gezeitendynamik zu rechnen ist, sollten für diese Gebiete feiner auflösende Modelle angewandt werden, wobei eine Kopplung zwischen Tide-Wellen- und Transportmodellen durchgeführt werden muß, um die Problematik des Wattwachstums genauer untersuchen zu können.

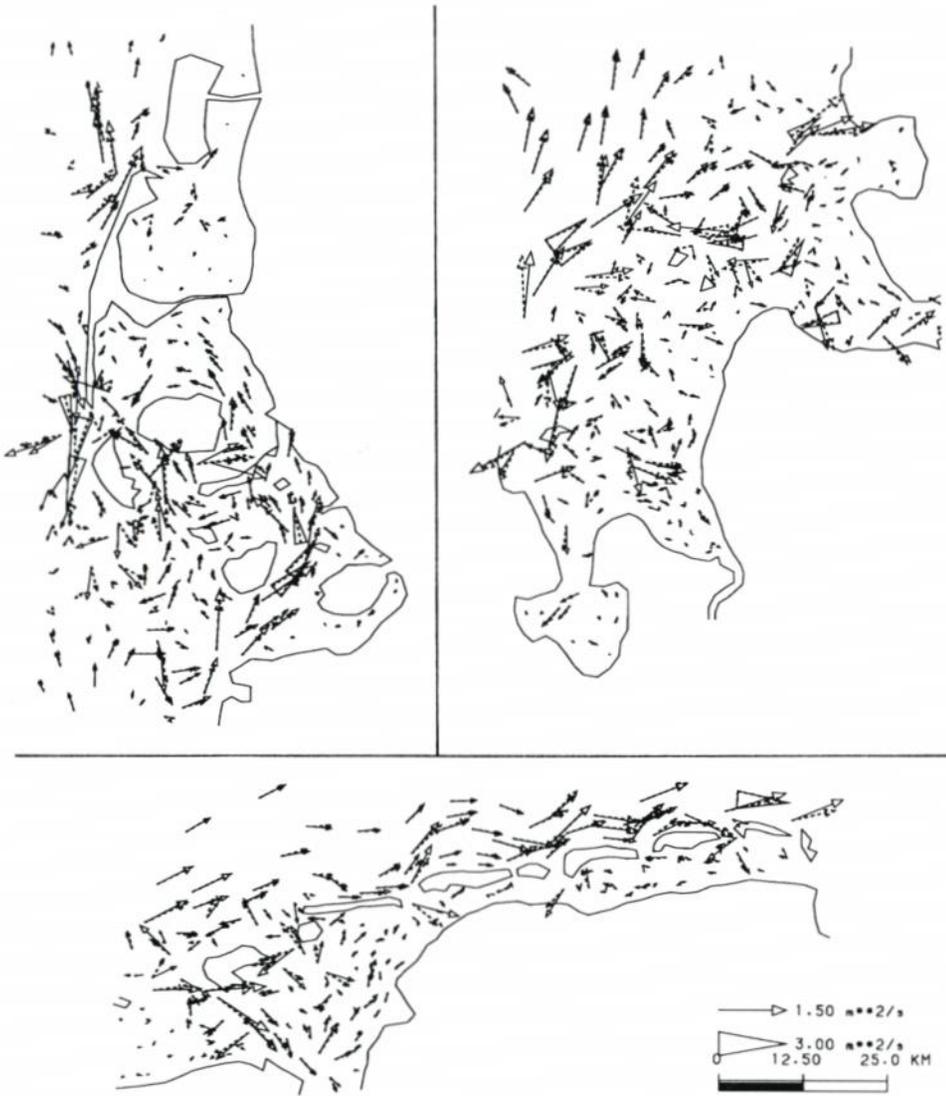


Abb. 13: Mit Hilfe des Modells RDB berechnete mittlere Durchflüsse unter heutigen Verhältnissen (gestrichelte Pfeile) und aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs von 100 cm (durchgezogene Pfeile) – oben links: Nordfriesische Inseln – oben rechts: Küstenbereiche zwischen Jade und Eider – unten: Ostfriesische Inseln

4.2 Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs auf Sturmfluten

Sturmfluten werden auch in Zukunft eine ernstzunehmende Gefahr darstellen, insbesondere wenn man bedenkt, daß durch die prognostizierten Klimaänderungen ihre Frequenz und Intensität zunehmen können. Für den Küstenschutz ist es von großer Bedeutung, die Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Sturmflutabläufe und hier insbesondere auf die Scheitelhochwasserstände abschätzen zu können.

Bei den folgenden Untersuchungen werden historische Sturmfluten herangezogen. Diese lassen sich in unterschiedliche Sturmfluttypen unterteilen, die sich hinsichtlich der Zugbahnen der Sturmtiefs und der zeitlichen Verläufe der Windgeschwindigkeiten voneinander unterscheiden. Dadurch können Aussagen über ein breites Spektrum von Sturmfluten gemacht werden. Ausgewählt wurden Sturmfluten, die in der Deutschen Bucht und der Elbe die bis zum Jahre 1993 höchsten Wasserstände verursachten.

In Abbildung 14 und Tabelle 1 werden die Simulationsergebnisse eines Meeresspiegelanstiegs von einem Meter mit den Simulationen unter gegenwärtigen Bedingungen verglichen.

Tabelle 1. Mit Hilfe der Modelle RDB und ELBE berechnete Änderungen der Scheitelhochwasserwerte [cm] nach Abzug des Meeresspiegelanstiegs, untersucht für verschiedene Sturmfluten bei einem Anstieg des Meeresspiegels von einem Meter

Sturmflut	Bor	Hel	Hus	Wit	Cux	Bro	StP
3. 1. 76	-8	-8	-7	-5	-14	-9	-9
21. 1. 76	0	+6	+2	+9	+6	+8	+21
24. 11. 81	+1	+4	+0	+5	+6	+10	+9
26. 1. 90	-4	0	-27	-12	-8	-7	0

Bei den Sturmfluten des sogenannten Jütland-Typs (03. 01. 76, 26. 01. 90) nehmen die höchsten Scheitelwasserstände relativ zum Meeresspiegel ab, wenn dieser ansteigt. In der Elbe und hier insbesondere zwischen Brokdorf und Hamburg ist die Abnahme jedoch nicht so stark wie im Mündungsgebiet.

Bei den untersuchten Sturmfluten vom sogenannten Skandinavien- und Skagerrak-Typ (21./22. 1. 76 bzw. 24. 11. 81) ist damit zu rechnen, daß die Scheitelhochwasserwerte in der Deutschen Bucht geringfügig und in der Elbe bedeutend stärker ansteigen als der Meeresspiegel. Die Simulation der Sturmflut vom 20./21. 01. 76 ergab beispielsweise bei Cuxhaven einen um 106 cm (100+6 cm) und bei Hamburg einen um 121 cm (100+21 cm) höheren Scheitelwert (bezogen auf das heutige Niveau), wenn der Meeresspiegel um einen Meter ansteigt.

Die Erhöhungen der Scheitelwerte während einiger Sturmfluten sind zunächst überraschend, da im allgemeinen davon ausgegangen wird, daß sich die Windstauwerte bei zunehmender Wassertiefe erniedrigen.

Um eine Erklärung für das Ansteigen der Scheitelhochwasserwerte während einiger Sturmfluten zu finden, wird der durch den lokalen Wind in der Deutschen Bucht verursachte Anteil des Windstaus untersucht. Bei der Ermittlung dieses lokalen Windstaus wird das RDB an den seeseitigen Rändern mit Wasserständen der CSM-Ergebnisse der einzelnen Sturmflutsimulationen gesteuert, wobei das RDB mit und ohne Windfeld betrieben wird. Die Differenz beider Simulationen ergibt den nur durch den Wind über der Deutschen Bucht erzeugten Windstau. Aus Tabelle 2 wird der lokale Windstau zu Zeiten des höchsten Wasserstandes ersichtlich. (Die Maxima der lokalen Windstauwerte werden bei den untersuchten Sturmfluten nicht während des höchsten Tidehochwassers erreicht.)

Die Ergebnisse zeigen, daß sich die „lokalen“ Windstauwerte der einzelnen Sturmfluten stark voneinander unterscheiden. So war dieser während der Sturmfluten des Jütland-Typs viel stärker ausgeprägt als während der Sturmfluten des Skandinavien- bzw. Skagerrak-Typs. Für die sehr hohen Wasserstände in der Deutschen Bucht sind folglich im ersteren Fall die

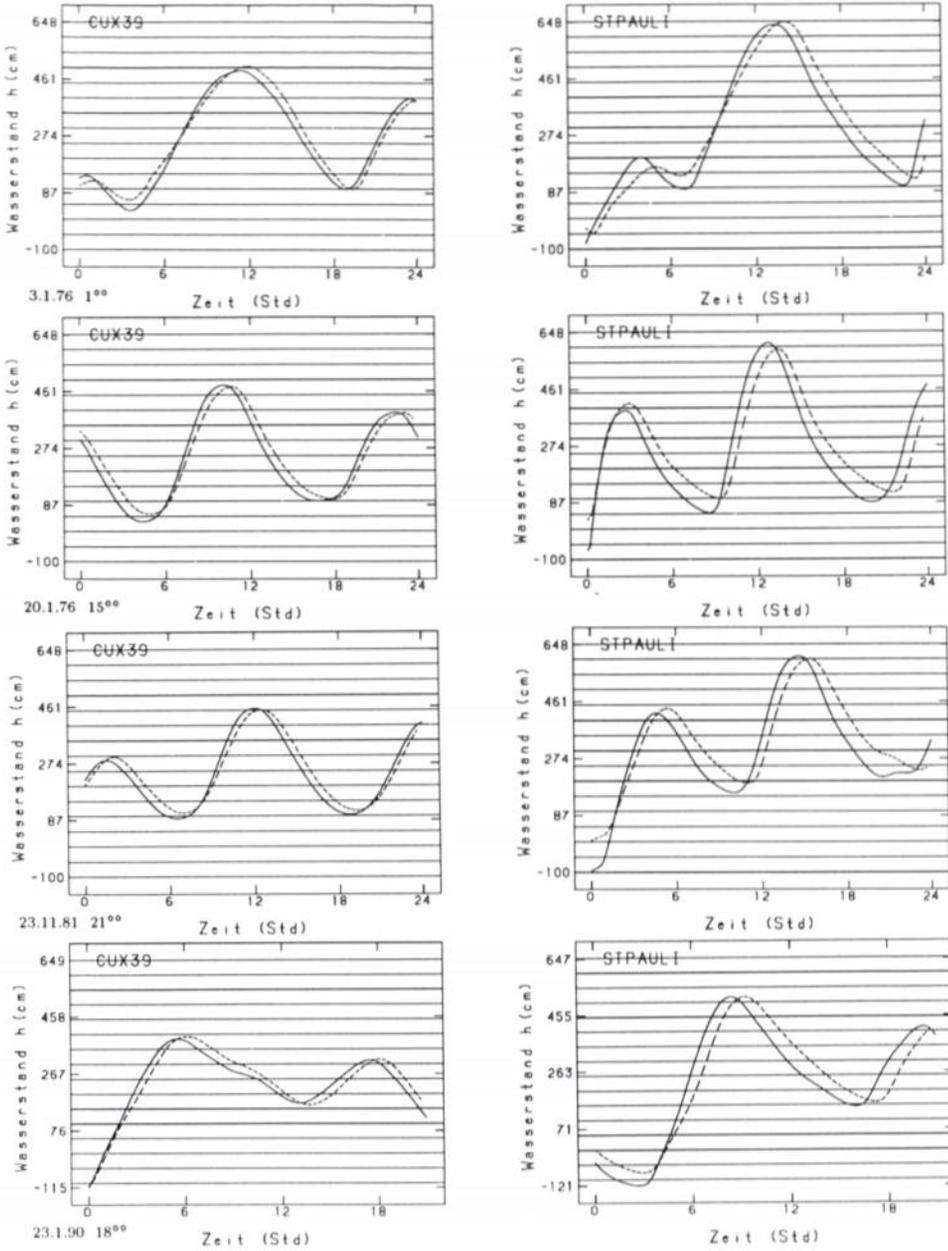


Abb. 14: Mit Hilfe der Modelle RDB und ELBE berechnete zeitliche Änderungen der Wasserstände an den Stationen Cuxhaven und St. Pauli; durchgezogene Linien: Simulationsergebnisse bei einem Anstieg des Meeresspiegels von einem Meter (der Meeresspiegelanstieg ist bereits abgezogen); gestrichelte Linien: Simulationsergebnisse unter gegenwärtigen Bedingungen

Tabelle 2. Durch den Wind über der Deutschen Bucht erzeugte Windstauhöhen [cm] während Zeiten höchster Wasserstände an den Pegeln Borkum, Helgoland, Cuxhaven und Büsum entsprechend den Ergebnissen des Modells RDB

Sturmflut	Bor	Hel	Cux	Büs
3. 1. 76	60	83	124	142
21./22. 1. 76	2	14	37	54
24. 11. 81	39	56	75	96
26. 1. 90	33	99	164	240

lokalen Winde entscheidend, während bei den anderen Fällen der lokale Windstau nicht so ausgeprägt ist, sondern der großräumige Anstau eine entscheidende Rolle spielt.

Der Unterschied der untersuchten Sturmfluttypen wird auch offensichtlich, wenn man die Wasserstände an den seeseitigen Rändern der Deutschen Bucht betrachtet. In Tabelle 3 werden die berechneten Scheitelhochwasserwerte an einigen Knoten des seeseitigen Randes des RDB während der beiden Sturmfluten im Januar '76 miteinander verglichen. Es ist zu erkennen, daß während der Sturmflut vom 21./22. 01. 76 die Wasserstände am Rand um ca. 40 cm höher lagen (→ großräumiger Einfluß) als am 03. 01. 76, obwohl während der Sturmflut Anfang Januar '76 höhere Wasserstände in der Deutschen Bucht auftraten. Der Einfluß eines Meeresspiegelanstiegs von einem Meter auf die Amplitude des Randsignals ist nur gering (3–5 cm), da der Großteil der Nordsee so tief ist, daß dieser Anstieg nur eine untergeordnete Rolle spielt (Kapitel 4.1.2).

Tabelle 3. Höchste Wasserstände (cm) an einigen Knoten des seeseitigen Randes des RDB (vergleiche Abbildung 2) während der Januar-Sturmfluten 1976 bei heutigem und einem um einen Meter erhöhten Meeresspiegel (der Meeresspiegelanstieg wurde bereits abgezogen)

Sturmflut	Anstieg	W2	W18	N1	N7
3. 1. 76	0 m	280	156	175	225
	1 m	277	153	170	220
21./22. 1. 76	0 m	320	192	215	256
	1 m	315	189	213	255

Für die durch einen Meeresspiegelanstieg bedingten Änderungen der Höhen der Scheitelhochwasserstände in der Deutschen Bucht sind daher zwei Faktoren maßgebend. Zum einen wird eine in die Deutsche Bucht einlaufende Tide- bzw. Sturmflut in Richtung Südost verstärkt. Diese Verstärkung nimmt bei einem Anstieg des Meeresspiegels zu (Kapitel 4.1.2). Zum anderen ist mit einer Abnahme des Windstaus aufgrund einer Erhöhung der Ruhewasserstände (d. h. des Meeresspiegels) zu rechnen. Sturmfluten, bei denen der lokale Windstau eine untergeordnete Rolle spielt (in der Regel Sturmfluten des Skandinavien- bzw. Skagerrak-Typs), sind durch die Verstärkung des Randsignals (einlaufende Sturmflut in die Deutsche Bucht) geprägt, so daß damit zu rechnen ist, daß die Scheitelhochwasserstände stärker ansteigen als der Meeresspiegel. Umgekehrt ist während Sturmfluten mit stark lokalem Windstau, wie das in der Regel bei Sturmfluten des Jütland-Typs der Fall ist, mit einem relativ zum Meeresspiegelanstieg geringeren Ansteigen der Scheitelhochwasserwerte zu rechnen.

Da im Bereich des Elbeästuars der lokale Windstau immer eine untergeordnete Rolle spielt (hier treten lokale Windstauwerte von maximal 60–80 cm in St. Pauli auf), überwiegt die verstärkende Wirkung eines Meeresspiegelanstiegs auf die Amplitude der Sturmflut, so daß sich die Scheitelhochwasserstände während Sturmfluten des Jütland-Typs kaum verändern (obwohl das Eingangssignal bei Cuxhaven abgeschwächt ist). Während Sturmfluten des Skandinavien- bzw. Skagerrak-Typs ist damit zu rechnen, daß die Scheitelhochwasserwerte teilweise deutlich stärker ansteigen als der Meeresspiegel.

Diese Erkenntnisse haben wichtige Folgen für den Küstenschutz. Die Berechnungen der Bemessungswasserstände müssen nicht nur den Meeresspiegelanstieg berücksichtigen, sondern auch ein daraus resultierendes zusätzliches Ansteigen der Scheitelhochwasserstände, wie es bei Sturmfluten des Skandinavien- bzw. Skagerrak-Typs unter gleichen meteorologischen Bedingungen zu erwarten ist. Für den derzeitigen Bemessungswasserstand der Elbe wurde dies bereits berücksichtigt (Länderarbeitsgruppe, 1988 [2]). Der zusätzliche Anstieg der Scheitelhochwasserwerte kann bei St. Pauli bis zu 20 % des Meeresspiegelanstiegs betragen (Abbildung 14 und Tabelle 1).

5. Schlußbemerkungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Tidedynamik in der Deutschen Bucht äußerst sensibel auf Änderungen unterschiedlicher Einflußfaktoren reagiert.

Die starken Erhöhungen des Tidehubs in den letzten vier Jahrzehnten sind nicht nur durch einen Anstieg des Meeresspiegels und der nur unwesentlich veränderten Windverhältnisse zu erklären. Ausbaumaßnahmen in den Tideflüssen, die in diesem Zeitraum durchgeführt wurden, und (eventuell klimatologisch bedingte) Änderungen der Wasserstandsverhältnisse am Schelfrand können kombiniert mit einem Meeresspiegelanstieg an einigen Pegelstationen die beobachteten Erhöhungen erklären. Zumindest im nordfriesischen Raum müssen jedoch noch andere Effekte für die starke Zunahme des Tidehubs verantwortlich sein. Es ist wahrscheinlich, daß hier regionale morphologische Änderungen, die jedoch aufgrund des für diese Fragestellung zu grob aufgelösten Modells nicht berücksichtigt werden konnten, einen entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung der Tidedynamik haben.

Aufgrund eines Meeresspiegelanstiegs ist besonders in Küstennähe je nach Betrag des Anstiegs mit teilweise deutlichen Änderungen der Tidedynamik zu rechnen. Für die Gebiete zwischen Jade und Eider sowie die nordfriesischen Inseln zeigen die Untersuchungen, daß sich hier der Tidehub signifikant erhöhen wird (bis zu 30 % des Meeresspiegelanstiegs).

Die Tidehuberhöhungen bei Cuxhaven pflanzen sich in die Elbe hinein fort und verstärken sich dort, wenn der Meeresspiegel ansteigt (für den Pegel St. Pauli ergeben die Simulationen beispielsweise eine Erhöhung des Thbs, der bei 60 % des Meeresspiegelanstiegs liegt). Mit dem Tidehub erhöhen sich auch die Strömungsgeschwindigkeiten in der Elbe, so daß mit verstärkten Erosionen zu rechnen ist.

Sollten die Watten mit dem Meeresspiegel ansteigen, ist mit geringeren Zuwachsraten des Tidehubs zu rechnen, da dann die Watten als natürliche Dämpfer der einlaufenden Tide erhalten bleiben.

Die Simulationen des Einflusses eines Meeresspiegelanstiegs auf die Wasserstände historischer Sturmfluten zeigen ein in Abhängigkeit vom Sturmfluttyp unterschiedliches Verhalten. Werden hohe Sturmflutwasserstände in der Deutschen Bucht besonders durch lokale Windfelder geprägt (in der Regel Sturmfluten des Jütland-Typs), ist mit einer Abnahme der Scheitelhochwasserstände bezüglich dem entsprechenden NN zu rechnen, wenn der Meeresspiegel

ansteigt. Spielt der lokale Windstau für die hohen Wasserstände eine untergeordnete Rolle (in der Regel während Sturmfluten des Skagerrak- bzw. Skandinavien-Typs), ist damit zu rechnen, daß die Scheitelwasserstände geringfügig stärker ansteigen als der Meeresspiegel. Da in der Elbe der Einfluß des lokalen Windstaus gering ist, kann davon ausgegangen werden, daß die Scheitelhochwasserstände hier stärker ansteigen als der Meeresspiegel, insbesondere wenn bei Cuxhaven bereits höhere Werte auftreten.

Die Ergebnisse der Untersuchungen stellen einen ersten Beitrag im Rahmen des Bund-Ländervorhabens „Klimaänderung und Küste“ dar. Um in die Problemstellung tiefer einzusteigen, müssen numerische Modelle angewandt werden, die morphologische Änderungen simulieren, so daß die morphologische Reaktion berücksichtigt werden kann. Diese Problemstellung ist äußerst komplex. Daher können nur Teilgebiete, die besonders stark von einem Meeresspiegelanstieg betroffen sind, detaillierter betrachtet werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen auf, welche Gebiete mit Vorrang zu untersuchen sind. Mit Hilfe gekoppelter Strömungs-, Wellen- und Transportmodelle sind dann auch lokal genauere Aussagen bezüglich eines möglichen Mitwachsens der Watten möglich.

Für die Abschätzung zukünftiger Wasserstandsänderungen ist die Kenntnis des zu erwartenden Klimas (hier: mittlere Windverhältnisse, Anzahl und Intensität von Sturmfluten) von entscheidender Bedeutung. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, daß die Wasserstände nicht nur sensibel auf Windgeschwindigkeitsänderungen, sondern in gewissen Bereichen auch äußerst empfindlich auf Windrichtungsänderungen reagieren. Daher müssen zukünftige Arbeiten auch meteorologische Szenarien einschließen, um die notwendigen Randbedingungen für die Strömungs- und Wellenmodelle zu erhalten.

D a n k s a g u n g

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie (Förderungskennzeichen: MTK05001) gefördert.

6. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- [1] ANNUTSCH, R.: Persönliche Kommunikation, 1991.
- [2] Bericht einer Länderarbeitsgruppe BEMESSUNGSWASSERSTÄNDE ENTLANG DER ELBE. Die Küste, Heft 47, 1988.
- [3] FLOHN, H.: Wo bleibt das Erwärmungssignal? Die Geowissenschaften, Nr. 2, 1989.
- [4] FLÜGGE, G.: Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe: Wasserbauliche Untersuchungen und erste Ergebnisse. HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, Nr. 4, 1993.
- [5] GERRITSEN, H. and BIJLSMA, A. C.: Modelling of tidal and winddriven flow: The Dutch Continental Shelf Model. Computer Modelling in Ocean Engineering, Rotterdam, Balkema, pages 331-338, 1988.
- [6] HOFSTEDE, J.: Hydro- und Morphodynamik im Tidebereich der Deutschen Bucht. Berliner Geographische Studien, 31, 1991.
- [7] HOLZ, K.-P., PLÜSS, A. und SALAMUN, T.: Mathematisches Modell Sylt. 5. Zwischenbericht (unveröffentlicht), Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, 1990.
- [8] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea. Report of the Coastal Zone Management Subgroup, 1992.
- [9] JENSEN, J., MÜGGE, H.-E., SCHÖNFELD, W. und VISSCHER, G.: Abschlußbericht zum KFKI-Forschungsprojekt: Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht, 1991.

- [10] JENSEN, J., MÜGGE, H.-E. und SCHÖNFELD, W.: Analyse der Wasserstandsentwicklung und Tidedynamik in der Deutschen Bucht. Die Küste, Heft 53, 1992.
- [11] Klimaszenarien-Rechnungen. Die CO₂-Szenarien. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Mai 1991.
- [12] KUNZ, H.: Klimaänderungen und ihre Folgen für Wasserhaushalt, Gewässernutzung und Gewässerschutz. In Schellnhuber, H.-J. und Sterr, H., editor, Klimaänderung und Küste: Einblick ins Treibhaus. Springer-Verlag, 1993.
- [13] MIKOLAJEWICZ, U., SANTER, B. and MAIER-REIMER, E.: Ocean Response to Greenhouse Warming. Max Planck-Institut für Meteorologie, Report No. 49, 1990.
- [14] NITSCHKE, G.: Explizite Finite-Element-Modelle und ihre Naturanwendung auf Strömungsprobleme in Tidegebieten. Bericht des Instituts für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, 19, 1985.
- [15] RONDE, J. G. de und RUIJTER, P. M. de: Die Auswirkungen eines verstärkten Meeresspiegelanstiegs auf die Niederlande. Die Küste, Heft 45, 1987.
- [16] SIEFERT, W.: Bemerkenswerte Veränderungen der Wasserstände in den deutschen Tideflüssen. Die Küste, Heft 37, 1982.
- [17] SIEFERT, W.: Sea-Level Changes and Tidal Flat Characteristics. In Expected Effects of Climatic Change on Marine Coastal Ecosystems. Kluwer Academic, 1990.
- [18] State of the art report. Sea Level Changes and their Consequences for Hydrology and Water Management. International Workshop: SEACHANGE '93, a contribution to the UNESCO-IHP project H-2-2, The Hague, NL, 1993.
- [19] STENGEL, T.: Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs. Bericht des Instituts für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Nr. 38, 1994.
- [20] STENGEL, T. and ZIELKE, W.: Dynamic Reaction of the North Sea to Storm Tides under Present Conditions and Following a Rise in Mean Sea Level. International Workshop: Storm Surges, River Flow and Combined Effects; a contribution to the UNESCO-IHP project H-2-2, Hamburg, 1991.
- [21] STENGEL, T. und ZIELKE, W.: Simulation von Wasserstandsänderungen an der deutschen Nordseeküste und in Ästuaren. Zwischenbericht zum BMFT – Förderungsvorhaben MTK 0500 1, 1992.
- [22] THEUNERT, F.: Zum lokalen Windstau in Ästuaren bei Sturmfluten – Numerische Untersuchungen am Beispiel der Unterelbe. Bericht des Instituts für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Nr. 15, 1985.
- [23] TÖPPE, A.: Zur Analyse des Meeresspiegels aus langjährigen Wasserstandsaufzeichnungen an der deutschen Nordseeküste. Leichtweiß Institut, 120, 1993.
- [24] VERBOOM, G. K., RONDE, J. G. de and DIJK, R. P. van: A fine grid tidal flow and storm surge model of the North Sea. Cont. Shelf Res., 12(No. 2/3): 213–233, 1992.
- [25] WARRICK, R. A. and OERLEMANS, J.: Sea Level Rise. In HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J. and EPHRAUMS, J. J., editor, Climate Change – The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press; 2. Auflage, 1991.
- [26] ZIELKE, W. und THEUNERT, F.: Tidedynamik in Ästuaren und ihre Veränderung durch bauliche Maßnahmen. Technischer Bericht des Instituts für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, 1983.