

Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation und die Veränderlichkeit des Seegangs vor der deutschen Ostseeküste

Von MICHAEL KOLAX und PETER HUPFER

Zusammenfassung

Da der Seegang und die ihn kennzeichnenden Parameter von den Windverhältnissen in dem betreffenden Seegebiet abhängen, kommt es auch zu Veränderungen der mittleren Seegangseigenschaften, wenn die Zirkulation der Atmosphäre in Zusammenhang mit globalen Klimaschwankungen Modifikationen unterliegt. Veränderungen des Seegangsregimes in Küstennähe ziehen entsprechende Variationen des Energieeintrages in die ufernahe Flachwasserzone mit Konsequenzen für die Küstendynamik nach sich. In der Arbeit werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, die auf hochaufgelösten Seegangsmodellierungen der Ostsee mit dem Modell HYPAS über relativ lange Zeiträume basieren. Allerdings zeigen die auf der Basis des Klimamodells ECHAM3/LSG durchgeführten Seegangsberechnungen für den Kontrolllauf und das Szenario A (weitere starke CO₂-Emission) nur geringe, nicht signifikante Abnahmen der Seegangsbelastung im Fall einer CO₂-Verdoppelung.

Alternativ wurde über die Veränderung der monatlichen Häufigkeiten speziell entwickelter, seegangsspezifischer objektiver Wetterlagen für die Ostsee die Sensitivität des Seegangs gegenüber veränderten atmosphärischen Zirkulationsbedingungen simuliert. Im Ergebnis zeigen sich bei einer verstärkten Zonalzirkulation (häufigere und stärkere Westwinde) deutliche Veränderungen des Seegangsenergieeintrages entlang der deutschen Ostseeküste, die im Einzelnen von der Küstenkonfiguration abhängen. Damit kann festgestellt werden, dass der mittlere Seegang vor der deutschen Ostseeküste mit Zirkulationsschwankungen variiert. Die Ergebnisse der gegenwärtigen Klimamodellierungen deuten jedoch darauf hin, dass seegangswirksame Windfeldänderungen voraussichtlich nur gering ausfallen werden.

Summary

Waves and their significant parameters are mostly dependent on local wind conditions. Consequently, atmospheric circulation modifications due to climatic variations will influence the wave climate. Changes of the near-shore wave regime, in turn, lead to fluctuations of the energy input into the shallow water zone affecting coastal sediment dynamics. This paper describes two different approaches, both of them based on high resolution long term wave modelling in the Baltic Sea using the HYPAS model.

For the first approach, only a small insignificant decrease of wave loading is encountered for the case of doubling of the atmospheric CO₂ concentration according to scenario A (additional strong CO₂ emissions) based on data from the global general circulation model ECHAM3/LSG. Alternatively, the sensitivity of the sea state to a modification of the atmospheric circulation was simulated using the variation of monthly frequencies of specific wave-effective weather patterns (observed data) in the Baltic. As a result, increased zonal circulation (more frequent and stronger westerly winds) leads to a significant change in wave energy input along the German Baltic coast changing due to the coastal shape.

In conclusion, the average sea state in this area varies with circulation changes. The results of present climate modelling, however, indicate that changes of wave effective wind patterns will be insignificant in the case of doubling CO₂ concentration of the atmosphere.

Inhalt

1. Einführung	112
2. Vorgehensweise	113
2.1 Die Simulationsläufe	114
2.1.1 Seegangssimulationen auf der Basis von Klimamodelldaten	114
2.1.2 Seegangssimulation auf der Grundlage von Reanalyse-Daten	114
2.2 Auswertungsverfahren	115
2.3 Seegangsspezifische Wetterlagenklassen	115
3. Ergebnisse	118
3.1 Seegangsausprägung in einem Treibhausgasszenarium	119
3.2 Zur Sensitivität des Seegangsenergieeintrages an der deutsche Ostseeküste gegenüber Zirkulationsänderungen	119
4. Schlussfolgerungen	121
5. Schriftenverzeichnis	125

1. Einführung

Ziel dieser Untersuchung ist es, die Auswirkungen der in Zusammenhang mit Klimaschwankungen eintretenden Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation auf die mittleren Seegangsverhältnisse in der westlichen Ostsee zu untersuchen. Damit sollen erste Hinweise gegeben werden, ob in Zusammenhang mit dem erwarteten möglichen Klimawandel im 21. Jahrhundert der Wellenenergieeintrag in die ufernahe Flachwasserzone der deutschen Ostseeküste und damit verbunden die Abrasions- und Akkumulationsprozesse signifikante Veränderungen erfahren werden. Hinweise über den Zusammenhang zwischen atmosphärischer Zirkulation und Küstendynamik findet man u. a. bei HUPFER (1965, S. 171–179) für die Ostseeküste und bei VERHAGEN (1989, S. 109) für die niederländische Küste.

Gleichzeitig enthalten die Ergebnisse dieser Studie Angaben zu dem mittleren jährlichen Wellenenergieeintrag an zahlreichen Punkten im Seegebiet vor der deutschen Ostseeküste. Damit werden die im Verbundprojekt KLIBO durchgeführten Seegangsberechnungen ergänzt und erweitert (BÖRNGEN et al., in diesem Heft, BÖRNGEN et al., 1998).

Da Seegangsmessungen, sofern überhaupt verfügbar, immer nur auf einzelne Positionen und auf verhältnismäßig kurze Zeiträume beschränkt sind, besteht das Bedürfnis, die Seegangparameter für längere Zeiträume zuverlässig zu simulieren. In den letzten Jahrzehnten verstärkten sich daher die Bemühungen um die Modellierung des physikalischen Prozesses „Seegang“. Ziel dieser Arbeiten ist häufig die Vorhersage extremer Seegangereignisse und die Abgabe entsprechender Warnungen. Der Bedarf an Seegangsprognosen und die Notwendigkeit, die Wechselwirkungen zwischen wellenbewegter Meeresoberfläche und atmosphärischer Bodenschicht in den Atmosphärenmodellen besser zu berücksichtigen, hat dazu geführt, dass Wettervorhersagezentren wie das Europäische Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) die Seegangparameter nunmehr im Rahmen ihrer eigenen Modellkette berücksichtigen (ECMWF 1996/97, S. 9).

Die Untersuchung der Seegangsverhältnisse unter klimatologischen Aspekten hat im Rahmen der Klimafolgenforschung neues Gewicht erhalten. In älteren Arbeiten wurde zwar wiederholt versucht, die charakteristischen Grundzustände des Seegangs zu erfassen (für die Ostsee s. SHD 1979, S. 1 ff.). Solche Ansätze waren jedoch meist räumlich begrenzt und basierten auf stark vereinfachten Winddaten. Modernere Methoden nutzen Fernerkundungsverfahren (YOUNG u. HOLLAND, 1996, S. 1 ff.), deren zeitliche und räumliche Auflösungen

allerdings zu gering sind, um relativ kleinräumige Strukturen des Seegangs zu erfassen, wie sie in der Ostsee auftreten.

Im Rahmen dieser Untersuchung kommt ein auf numerischen Seegangssimulationen basierendes Verfahren zur Anwendung. Das ermöglicht Aussagen über die Reaktion des Seegangs auf veränderte atmosphärische Zirkulationsbedingungen. Einblicke in ein verändertes Klima sind mit Hilfe fortgeschrittener Klimamodelle möglich, die die Koppelung zwischen Atmosphäre und Ozean enthalten. Die Modelle werden meist mit Treibhausgasszenarien angetrieben, die durch bestimmte Annahmen zukünftiger Treibhausgasemissionen definiert sind. Neben dem Grad der Vollkommenheit eines Klimamodells bilden auch die herangezogenen Treibhausgasszenarien Ursachen für mögliche Fehleinschätzungen der zukünftigen Klimaentwicklung. Die erstgenannte Fehlerquelle wird durch die Erweiterung der Kenntnisse über das Klimasystem in Verbindung mit Fortschritten der Rechentechnik verringert. Hier wird das Seegangmodell HYPAS direkt von Daten des Klimamodells ECHAM3 (ROECKNER et al., 1992) angetrieben. Auf diese Weise simulierte Seegangsfelder spiegeln naturgemäß nur solche Veränderungen wider, die dem gewählten Szenarium entsprechen. Eine andere Möglichkeit, Wirkungen der atmosphärischen Zirkulation auf den Seegang zu erfassen, besteht in definierten, konsistenten Veränderungen der Klassenhäufigkeiten von Wetterlagenklassifikationen.

2. Vorgehensweise

Es wurden zwei Verfahren entwickelt und angewendet, die beide auf dem Seegangmodell HYPAS (GÜNTHER et al., 1979, S. 5227–5738) beruhen. Das Modell wurde für das gesamte Seegebiet der Ostsee aufgelegt. Hier werden jedoch nur die Ergebnisse der Untersuchungen für die westliche Ostsee vorgestellt.¹

Um die Seegangcharakteristiken vor der deutschen Ostseeküste zu analysieren, benötigt man möglichst lange Zeitreihen der Seegangparameter. Diese wurden aus Simulationsläufen mit dem Hybridmodell HYPAS (2. Generation) gewonnen. Dieses leistungsfähige Seegangmodell hat sich im Routinebetrieb bewährt.

Die Winddaten wurden Zeitscheibenrechnungen des Modells ECHAM3 in der Auflösung T106 (entspricht einer Auflösung von etwa 120 km in zonaler Richtung und von etwa 65 km in meridionaler Richtung in 54° Breite) für den Kontrolllauf (Simulation des gegenwärtigen Klimas ohne Veränderung äußerer Einflüsse) und für den Treibhausgasszenarium A-Lauf (weiterer starker Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre, „business as usual“) entnommen. Weitere Windfelddaten entstammen der ECMWF-Reanalyse für den Zeitraum 1981–1993 (ECMWF 1996, S. 7). Aus den Modelldaten wurde die Entscheidung getroffen, ob an einem Gitterpunkt Eis oder Wasser vorhanden ist. Um zu physikalisch konsistenten Datensätzen der Seegangparameter zu kommen, wurde für alle Simulationsläufe die gleiche Version des Seegangmodells und auch die gleiche Modellgeometrie verwendet. Das Berechnungsverfahren und einige Verteilungen der berechneten Seeganggrößen für die Ostsee sind in KOLAX (1996, S. 1–21) enthalten.

¹ Zur Leistungsfähigkeit dieses Modells siehe den Beitrag M. BÖRNGEN et al. „Seegangbelastung vor der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern“ in diesem Heft.

2.1 Die Simulationsläufe

Infolge der Einbeziehung der gesamten Fläche der Ostsee in die Modellierung bleiben künstliche Begrenzungen des Modellgebietes auf das Kattegat beschränkt. Das Modell HYPAS wurde in allen Läufen mit einer einheitlichen horizontalen Auflösung von ca. 16 km im gesamten Simulationsraum betrieben. Der Zeitschritt betrug 15 min. Das Modell HYPAS simuliert die Windsee in Abhängigkeit von der jeweiligen Windwirklänge (fetch) durch ein Flachwasserspektrum (BOUWS et al., 1985, S. 975–986). Die Behandlung der Dünung erfolgt auf der Grundlage einer einfachen Wellenausbreitungsgleichung. Die berechnete Seegangsendenergiedichte wird in 24 Richtungs- und 17 Frequenzintervalle geteilt. Bei Windrichtungs- oder Windgeschwindigkeitswechseln wird Seegangenergie zwischen Dünungs- und Windseeanteil ausgetauscht (GÜNTHER et al., 1981, S. 718). Aus allen Rechnungen wurden sowohl die integralen Seegangparameter, getrennt nach Windsee, Dünung und Gesamtseegang, als auch die Parameter, die für eine vollständige spektrale Information erforderlich sind, für alle Gitterpunkte archiviert. Die berechneten Zeitreihen stehen zur weiteren Seegangsanalyse für die gesamte Ostsee zur Verfügung.

2.1.1 Seegangssimulationen auf der Basis von Klimamodelldaten

Die immer noch relativ geringe Auflösung von Klimamodellen setzt bei der direkten Verwendung solcher Daten der Seegangssimulation rasch Grenzen. Für diese Berechnungen standen Ergebnisse von Klimamodellexperimenten in einer charakteristischen spektralen Auflösung T21 zur Verfügung. Im Modell ECHAM3/LSG_T21 entfallen auf die Ostsee somit nur zwei Gitterpunkte. Die Überbrückung des sich ergebenden Skalenunterschiedes ist für die Klimafolgenforschung im allgemeinen notwendig. Es sind daher verschiedene Downscaling-Verfahren entwickelt worden (z. B. FREY-BUNESS et al., 1994, S. 78–81). Hier wurde ein rein dynamisches Verfahren genutzt. Bei diesem wird ein hochauflösendes Atmosphärenmodell für einen kürzeren Zeitraum („Zeitscheibe“, bspw. 5 Jahre) mit den Daten des globalen gekoppelten Klimamodells betrieben. Weiterverwendet werden jedoch nur die Daten des Atmosphärenmodells. Die fünfjährigen Zeitscheibenrechnungen liegen für das Modell ECHAM3 in einer zeitlichen Auflösung von sechs Stunden und in der spektralen räumlichen Auflösung T106 vor. Der damit verbundene Gitterpunktabstand (s. o.) ist geeignet, das Modell HYPAS anzutreiben (dazu auch KOLAX, 1996, S. 1–7). Aussagen über mögliche zukünftige Veränderungen in den mittleren Seegangsverhältnissen der Ostsee findet man durch den Vergleich von zwei Simulationsläufen, die unterschiedliche Klimate (einschließlich Zirkulationen) beschreiben. Der eine dieser Modellläufe repräsentiert das gegenwärtige Klima (Kontrolllauf), während der andere Modelllauf auf einem Szenarium beruht. Für die HYPAS-Simulationen wurde das oben schon erwähnte IPCC-Szenarium A verwendet (s. HUPFER, 1996, S. 205). Die zugehörige ECHAM3-Zeitscheibenrechnung wurde zum Zeitpunkt der Verdoppelung des atmosphärischen CO_2 -Gehaltes initialisiert.

2.1.2 Seegangssimulation auf der Grundlage von Reanalyse-Daten

Für die wetterlagengestützte Sensitivitätsstudie werden möglichst lange Zeitreihen der Seegangsgößen im interessierenden Seegebiet benötigt. Ein aktueller, zugänglicher Daten-

satz, der den Anforderungen genügt, ist aus der Reanalyse des ECMWF für den Zeitraum 1979–1993 gebildet worden (ECMWF, 1996, S. 7). Dieser Datensatz ist in der spektralen Auflösung T106 verfügbar und weist die gleiche Gitterpunktsgeometrie wie das Modell ECHAM3 auf.

Die benötigten Bodenwindfelder wurden im Abstand von sechs Stunden den Analysen entnommen. Die Eisbedeckung wurde in diesem Fall bewußt vernachlässigt, um bei der nachfolgenden objektiven Wetterlagenklassifikation alle Gitterpunkte für jeden Zeitschritt, unabhängig von einer möglichen Vereisung der Nachbarpunkte, bearbeiten zu können. Für Untersuchungen anderer Zielstellung können die Anteile der Zeitreihe mit Eisbedeckung ohne großen Aufwand nachgerechnet werden.

2.2 Auswertungsverfahren

Die Auswertung der Zeitscheiben-Klimamodellläufe ist grundsätzlich nur statistisch möglich. Das liegt daran, dass in den Zeitscheibenrechnungen konkrete Zeitpunkte des Szenariumlafes und des Kontrolllaufes nicht sinnvoll miteinander verglichen werden können. Statistische Aussagen sind jedoch durch die relativ geringe Länge der Zeitscheiben und damit der Eingangsdatenreihen beschränkt. Grundsätzliche Aussagen aber, ob bei verändertem atmosphärischem Antrieb mit verstärkter oder verminderter Seegangaktivität gerechnet werden muss, sind möglich. Demgegenüber umfassen die ECMWF-Reanalysedaten den wesentlich größeren Zeitraum von 15 Jahren. Sie sind daher auch einer hinreichend stabilen Wetterlagenklassifikation zugänglich. Da auch in diesem Fall die Empfindlichkeit des Seegangs gegenüber Zirkulationsschwankungen untersucht werden soll, musste die Vorgehensweise dem Prozesscharakter der atmosphärischen Zirkulation Rechnung tragen. Dieser drückt sich u. a. durch die Korrelationen zwischen den monatlichen Häufigkeiten der Wetterlagen aus. Diese Zusammenhänge müssen demnach bei der Veränderung von Klassenhäufigkeiten erhalten bleiben. Man kann willkürliche, aber in sich konsistente Szenarien veränderter Zirkulationsverhältnisse dadurch erzeugen, dass man die Wechselwirkungen zwischen den Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Wetterlagen berücksichtigt. Das hier angewendete Verfahren ist von SCHUBERT (1994, S. 200) entwickelt worden.

Die Berechnung von Häufigkeitsverteilungen wesentlicher Seegangparameter wie signifikante Wellenhöhe, mittlere Periode und mittlere Ausbreitungsrichtung und der Vergleich dieser Verteilungen aus beiden Zeitscheibenrechnungen wurde für die gesamte Ostsee durchgeführt. Die Seegangsverhältnisse an der deutschen Ostseeküste standen jedoch im Zentrum der Auswertung. Basierend auf Zeitreihen der zweidimensionalen Seegangenergiedichtespektren wurden mittlere jährliche Seegangsenergieeinträge entlang der deutschen Küstenlinie berechnet (s. Tab. 1).

2.3 Seegangsspezifische Wetterlagenklassen

Die atmosphärische Zirkulation wurde schon wiederholt auf der Basis von Wetterlagenklassifikationen untersucht. Die älteren Ansätze dieser Vorgehensweise beruhen auf subjektiven Verfahren, von denen in Deutschland die Klassifikation von HESS und BREZOWSKY, die für Mitteleuropa 29 Wetterlagen enthält, am bekanntesten ist. Die tägliche Klassifikation wurde bis zum 1.1.1881 zurück vorgenommen. Der Wetterlagenkalender wird laufend ergänzt (GERSTENGARBE u. WERNER, 1993, S. 6–21). In einem ersten Versuch wurde

Tab. 1: Lage der Gitterpunkte, für die Seegangparameter berechnet wurden

Gitterpunkt Nr.	HYPAS Koordinate I	HYPAS Koordinate K	Bezeichnung der Lage	Geogr. Länge Grad Ost	Geogr. Breite Grad Nord
1	6	82	Geltinger Bucht	9,9	54,8
2	7	83	Seegebiet vor Eckernförde	10,1	54,6
3	6	84	Eckernförde	9,9	54,5
4	7	85	Kieler Förde	10,2	54,4
5	8	84	Kieler Bucht	10,4	54,5
6	9	85	Hohenwacher Bucht West	10,6	54,4
7	10	85	Hohenwacher Bucht Ost	10,8	54,4
8	11	84	Fehmarnsund	11,1	54,4
9	12	85	Mecklenburger Bucht Nord	11,3	54,3
10	12	86	Mecklenburger Bucht West	11,3	54,2
11	10	88	Travemünde	10,9	54,0
12	10	87	Neustädter Bucht	10,8	54,1
13	11	87	Lübecker Bucht	11,1	54,0
14	12	87	Wismar-Bucht	11,3	54,0
15	13	87	Halbinsel Wustrow	11,5	54,0
16	14	86	Seegebiet vor Kühlungsborn	11,8	54,2
17	15	86	Warnemünde	12,0	54,2
18	16	85	Seegebiet vor Fischland	12,3	54,3
19	17	84	Seegebiet vor Darßer Ort	12,5	54,5
20	18	84	Seegebiet vor Zingst	12,8	54,5
21	19	84	Seegebiet südöstlich von Hiddensee	13,0	54,4
22	19	83	Seegebiet westlich Hiddensee	13,0	54,6
23	20	82	Seegebiet nördlich Rügens	13,2	54,7
24	21	83	Tromper Wiek	13,5	54,6
25	22	84	Seegebiet östlich Rügens	13,7	54,4
26	23	85	Seegebiet südöstlich Rügens	13,9	54,3
27	22	86	östlicher Greifswalder Bodden	13,7	54,2
28	23	86	Seegebiet vor Karlshagen	13,9	54,1
29	24	87	Seegebiet vor Bansin	14,1	54,0
30	25	87	Pommersche Bucht	14,4	54,0
31	26	87	Seegebiet vor Insel Wolin	14,6	54,0

diese viel angewendete Klassifikation benutzt, um den Seegang der Ostsee wetterlagen-spezifisch zu erfassen. Es zeigte sich jedoch, dass diese Klasseneinteilung für die Ostsee und den sich dort entwickelnden Seegang nur ungenügend geeignet ist. So liegen die Werte der aus den Korrelationen der signifikanten Wellenhöhe und der Großwetterlagen resultierenden erklärten Varianz der Wellenhöhe durchgängig im statistisch nicht signifikanten Bereich. Im besonders interessierenden Gebiet der südlichen Ostsee (56° N, 9° E bis 54° N, 20° E) wird lediglich eine mittlere erklärte Varianz von 17 % erreicht. Die Ursache dafür liegt darin, dass die Klassifikation von HESS und BREZOWSKY für das Zentrum Mitteleuropas entwickelt wurde.

Daher wurde für die weiteren Untersuchungen eine seegangsspezifische Wetterlagenklassifikation entwickelt. Dieses objektive Verfahren verwendet den geostrophischen Wind in der Höhe der Druckfläche 850 hPa (etwa 1,5 km Höhe). Das Seegebiet der Ostsee wird für die Klassifikation unterteilt, wobei die einzelnen Teile des Meeres anhand eines eigenen Klassifikationsgitters eingeteilt werden. Für die verschiedenen Teile der Ostsee können sich

so für einen Tag unterschiedliche Wetterlagen ergeben. Aus der Verteilung der geopotentiellen Höhe der 850 hPa-Fläche wird der horizontale geostrophische Windvektor berechnet und über die Aufspaltung in Windgeschwindigkeit und Windrichtung in Klassen eingeteilt (Tab. 2). Auch dazu wurden die Daten der oben erwähnten Reanalyse des ECMWF benutzt. Die Größe des Klassifikationsgitters richtet sich nach der Windgeschwindigkeit. Entsprechend des im Zeitraum von 12 Stunden in Abhängigkeit von der jeweiligen Windgeschwindigkeit zurückgelegten Windweges wird um ein Zentralgebiet, das doppelt gewichtet wird, das Klassifikationsgitter mit einfacher Wichtung vergrößert. Das Zentralgebiet der Klassifikation reicht für den hier vorgestellten Klassifikationsraum „Südliche Ostsee und Kattegat“ von 56° N, 9° E bis 54° N, 20° E. Die Klasseneinteilung erfolgte zunächst in vier Windgeschwindigkeits- (≤ 5 m/s, $> 5,1$ m/s, > 11 m/s, > 17 m/s) und acht Windrichtungsklassen. (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

Tab. 2: Seegangsspezifische Wetterlagenklassifikation für die Ostsee

Klasse	Anströmrichtung	Windgeschwindigkeit	Relative Häufigkeit in %
1	N-NE	I	9,2
2	N-NE	II-IV	4,1
3	E-SE	II-IV	11,7
4	S-NW	I	11,7
5	S-SW	II	9,0
6	S-SW	III-IV	1,6
7	W	II	14,1
8	W	III	9,6
9	W	IV	5,1
10	NW	II	5,4
11	NW	III-IV	0,8
12	W-NW	III-IV 2 Tage	15,5
13	Nicht klassifizierfähig		2,2

Windgeschwindigkeitsklassen:

An mehr als 50 % der Gitterpunkte werden über-/unterschritten: Klasse I: ≤ 5 m/s; Klasse II: $> 5,1$ m/s; Klasse III: > 11 m/s; Klasse IV: > 17 m/s

Die Zugehörigkeit eines Tages zu einer Klasse wurde von einer Reihe von Homogenitätskriterien abhängig gemacht. Das Homogenitätskriterium für die Windgeschwindigkeit besagt, dass mindestens die Hälfte aller Gitterpunkte den jeweiligen Schwellenwert überschreiten muss (s. Tab. 2). Hinsichtlich der Strömungsrichtung müssen mindestens 50 % aller Gitterpunkte die Hauptrichtungen aufweisen. Ein weiteres Kriterium war bei der Klassenzusammenlegung der Verlust an erklärter Varianz, die natürlich bei größerer Klassenanzahl höher ist (ENKE u. SPEKAT, 1997, S. 195–207). Jedoch ist bei großer Klassenanzahl die Besetzung in einzelnen Klassen so gering, dass sich keine statistisch gesicherten Aussagen treffen lassen. Somit bildet die Zahl von 13 Klassen ein Optimum, das nicht zuletzt auch den Vorteil der größeren Übersichtlichkeit besitzt. Eine Besonderheit bildet die Klasse 12, die als einzige die Verhältnisse des Vortages mit berücksichtigt. Diese Klasse enthält alle Termine, an denen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen West- oder Nordwestwinde mit Geschwindigkeiten größer als Windgeschwindigkeitsklasse II (Tab. 2) herrschten. In Klasse 12 werden

somit Starkwindereignisse dieser Richtung mit entsprechend starken Seegangseignissen erfasst. Eine weitere Berücksichtigung der atmosphärischen Vorgeschichte ist in der relativ kleinen und weitgehend abgeschlossenen Ostsee mit ihrem geringen Dünungsanteil nicht notwendig. Da die mittleren Werte der wesentlichen Seegangparameter berechnet wurden, fällt als Nebenprodukt der Sensitivitätsstudie eine Seegangsklimatologie der Ostsee für verschiedene Wetterlagenklassen ab.

Die mittlere erklärte Varianz im Klassifikationsraum beträgt bei Anwendung dieses einfachen Klassifikationsverfahrens für die signifikante Wellenhöhe 53 %. Im gesamten Bereich der südlichen Ostsee werden ungeachtet der geringen Klassenanzahl ausreichend hohe, statistisch signifikante Werte der erklärten Varianz erreicht.

3. Ergebnisse

Aus den umfangreichen Ergebnissen werden hier die für die deutsche Ostseeküste wesentlichen vorgestellt, wozu insbesondere die Seegangsenergieeinträge auf die deutsche Küste (Abb. 1) dargestellt werden sollen. In Zusammenhang mit der wetterlagengestützten Untersuchung ist weiterhin von Interesse, welche atmosphärischen Bedingungen besonders starken Einfluß auf die Seegangaktivität haben.

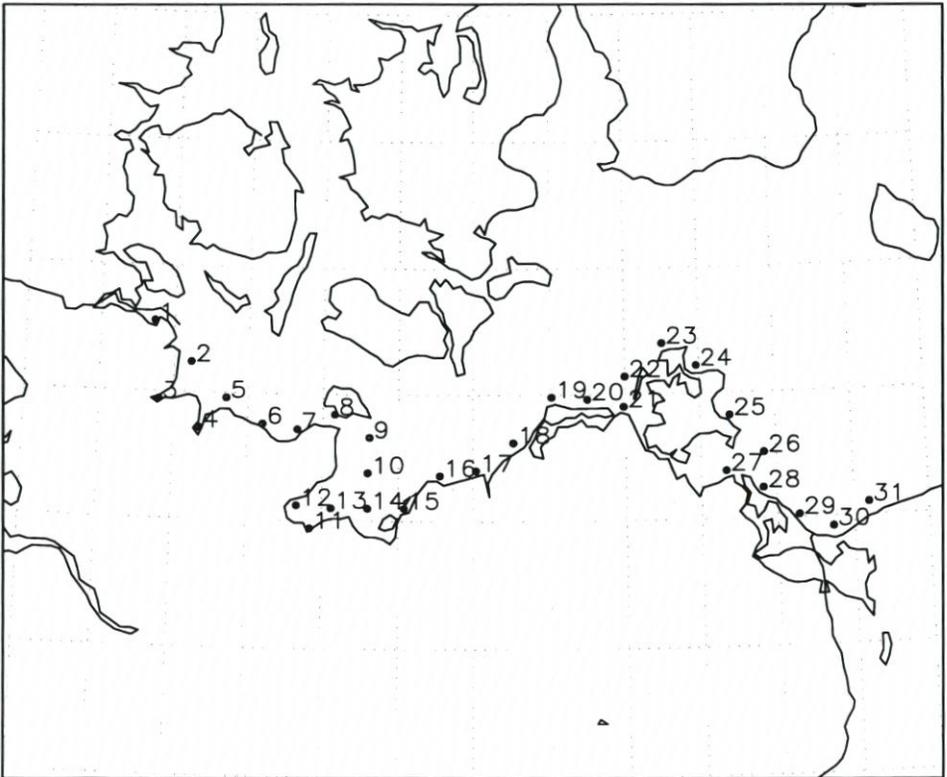


Abb. 1: Positionen in Küstennähe, für die Seegangsberechnungen durchgeführt wurden

3.1 Seegangsausprägung in einem Treibhausgasszenarium

Die Untersuchungen zeigen, dass im Falle einer CO₂-Verdoppelung und Treibhausgasemissionen gemäß des IPCC-Szenariums A im Vergleich mit dem Kontrolllauf (unverändertes Klima) nicht mit gesteigerter Seegangaktivität infolge etwa zahlreicher werdender Stürme gerechnet werden muss. Die berechneten Veränderungen sind eher klein und zeigen entlang der deutschen Ostseeküste im Jahresmittel abnehmende Intensität für den Szenarium A-Lauf (Abb. 2). Deutlich sind diese Abnahmen auf der Nord- und Ostseite der Insel Rügen

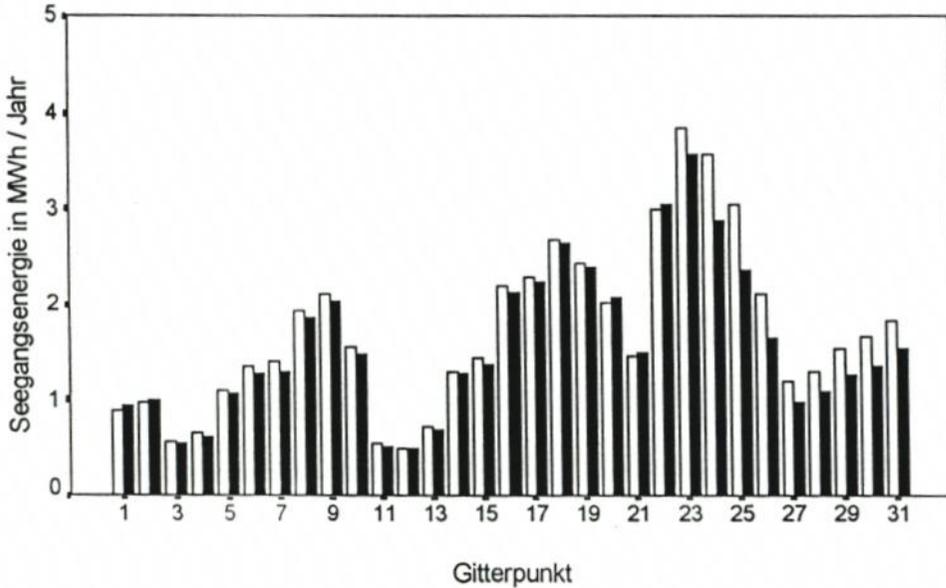


Abb. 2: Mittlere jährliche Seegangenergieverteilung an den Gitterpunkten im Bereich der deutschen Ostseeküste. Dargestellt sind die über alle Richtungen integrierten Werte für den Kontrolllauf (weiß) und den Szenarium A-Lauf (schwarz) für das Klimamodell ECHAM3

gen (ab Gitterpunkt 23, Tab. 1) zu erkennen. Die Darstellung zeigt aber auch die erhebliche räumliche Variabilität der Seegangenergie an den im Bereich der deutschen Küste liegenden Gitterpunkten. Das Hauptmaximum mit Werten von fast 4 MWh/Jahr liegt im Bereich der Arkonasee, Nebenmaxima im Seegebiet vor Fischland und Darß-Zingst (ca. 2,8) und in der Mecklenburger und Kieler Bucht (ca. 2,1). Minima der Seegangenergie werden für die Gitterpunkte im Bereich der Lübecker Bucht berechnet.

3.2 Zur Sensitivität des Seegangenergieeintrages an der deutschen Ostseeküste gegenüber Zirkulationsänderungen

Der generell bestehende Zusammenhang zwischen Zirkulation der Atmosphäre und Seegang ergibt sich bereits aus der Korrelation zwischen der mittleren monatlichen Wellenhöhe am Gitterpunkt 23 (Tab. 1) und den Monatsmittelwerten der ostseespezifischen Luft-

druckindizes (s. BAERENS, 1998, S. 73–78) für den Zeitraum 1979–1993. Die Pearson-Korrelationskoeffizienten betragen

$$\text{Wellenhöhe/Baltischer Zonalindex} \quad r = 0,62 (0,54)$$

$$\text{Wellenhöhe/Baltischer Nordostindex} \quad r = -0,63 (-0,63).$$

In Klammern stehen die verteilungsfreien Spearman-Korrelationskoeffizienten.

Veränderte atmosphärische Zirkulationsbedingungen werden im Folgenden durch veränderte Klassenhäufigkeiten der seegangsspezifischen Wetterlagen erzielt. Man erhält damit Szenarien veränderter Zirkulationsverhältnisse infolge zwar willkürlicher, aber plausibler Veränderungen einer Klassenhäufigkeit. So läßt sich eine Verstärkung der Zonalzirkulation zum Beispiel durch die Vergrößerung der Häufigkeit einer entsprechenden Klasse mit zonaler Anströmrichtung realisieren.

Durch entsprechende Veränderungen der Klassen kann untersucht werden, für welche Wetterlagenklasse der Seegangsenergieeintrag in Richtung auf die deutsche Ostseeküste zu besonders empfindlich reagiert. Als Maß für die Sensitivität wurde die gesamte, alle Ausbreitungsrichtungen des Seegangs umfassende Änderung des Betrages der Seegangsenergie für den Fall einer 15%igen Erhöhung der Belegung der Wetterlagenklasse 12 (Westlage) untersucht. Wie aus Abb. 3 zu erkennen ist, reagiert die Seegangsenergie besonders empfindlich auf Veränderungen der Besetzung der Klasse 12. Es zeigt sich also, dass der Seegang besonders bei anhaltenden Westlagen, d. h. bei einer verstärkten Zonalzirkulation, den ausgeprägtesten Veränderungen unterworfen ist. Im Folgenden werden weitere Auswirkungen einer derartigen Häufigkeitsänderung der Besetzung der Klasse 12 behandelt. In Abb. 4 ist die absolute Häufigkeitsverteilung aller Wetterlagenklassen für den Fall der 15%igen Vergrößerung der Häufigkeit des Auftretens der Wetterlagenklasse 12 dargestellt. Bei einer derartigen Zunahme von Westlagen verschiebt sich die Häufigkeitsverteilung etwas, wie aus dem Ver-

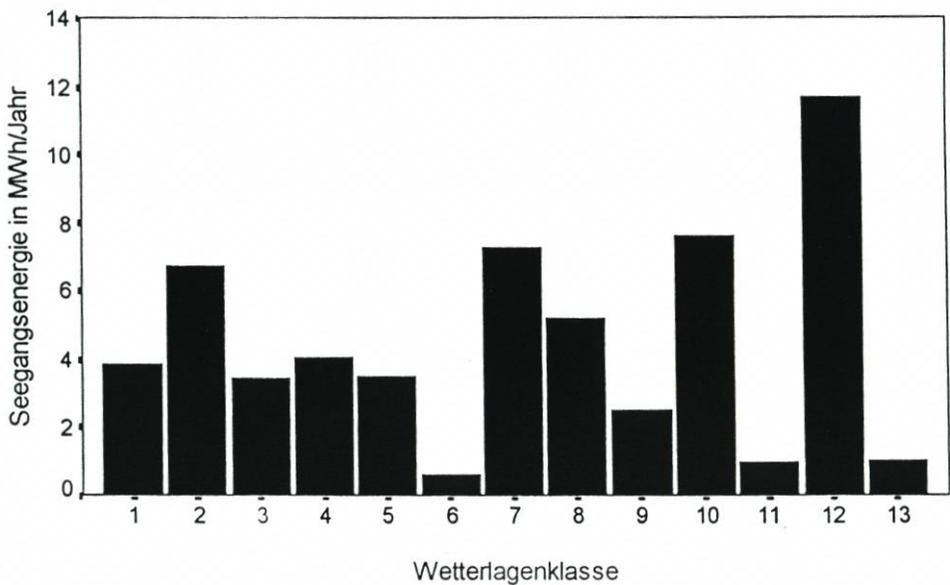


Abb. 3: Mittlere jährliche, über alle Richtungen und Berechnungspunkte vor der deutschen Ostseeküste integrierte Änderungsbeträge der Seegangsenergie bei Vergrößerung der Häufigkeit der Besetzung der Wetterlagenklasse 12 (West) um 15%. Ausgangspunkt sind die Berechnungen für den Zeitraum 1979–1993

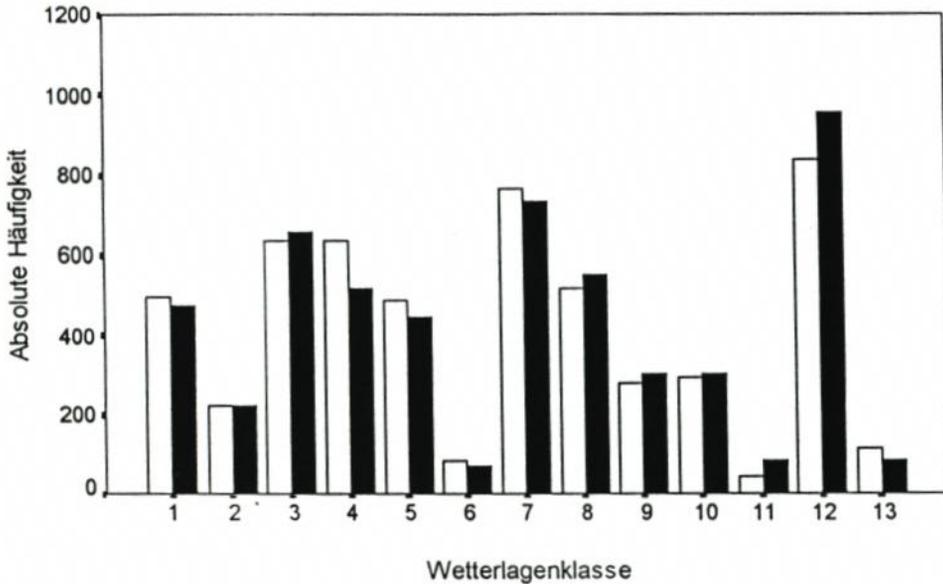


Abb. 4: Absolute Häufigkeit der seegangsspezifischen Wetterlagen bei der Vergrößerung der Häufigkeit der Besetzung der Wetterlagenklasse 12 (West) um 15 % für den Zeitraum 1979–1993 (Reanalyse, weiß) und Szenarium A-Lauf des Klimamodells ECHAM3 (schwarz)

gleich von Szenariumslauf und Beobachtung hervorgeht. Den mittleren Grundzustand der Seegangsenergiebelastung der deutschen Ostseeküste entsprechend der beobachteten Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen enthält Abb. 5. Deutlich zu erkennen sind die für unterschiedliche Küstenexpositionen variierenden Seegangsbelastungen. Bei einer 15%igen Zunahme der Belegung von Klasse 12 und den korrespondierenden Änderungen der anderen Klassen ist aus Abb. 6 zu erkennen, wie besonders nach Westen exponierte Küstenabschnitte höhere Seegangsbelastungen erfahren.

4. Schlussfolgerungen

Die hier vorgestellten Verfahrenswesen zeigen Möglichkeiten auf, zu Aussagen über die mittleren Seegangsverhältnisse im Seegebiet der Ostsee zu kommen, die entweder auf Beobachtungen oder auf Klimaszenarien beruhen.

Basierend auf den Ergebnissen von Klimamodellrechnungen, die auf der Grundlage unvermindert hoher Einträge von Treibhausgasen in die Atmosphäre auch in der Zukunft vorgenommen wurden, werden nur schwache Signale veränderter Seegangsaktivität im Raum der südlichen Ostsee gefunden. Es besteht sogar die Tendenz der Abnahme der Seegangsentwicklung. Die Ursache dafür liegt darin, dass auch die modernen Versionen der Hamburger ECHAM-Modelle für das „Treibhausklima“ des 21. Jahrhunderts nur geringe Änderungen der Zonalzirkulation im atlantisch-europäischen Raum vorhersagen. Die Nordatlantische Zirkulation (Luftdruckdifferenz zwischen Azoren und Island) weist nach den Modellrechnungen im 21. Jahrhundert statistisch kein anderes Verhalten als im 20. Jahrhundert auf (Abb. 7). Somit kann auf der Grundlage der sicher noch begrenzten Aussagefähig-

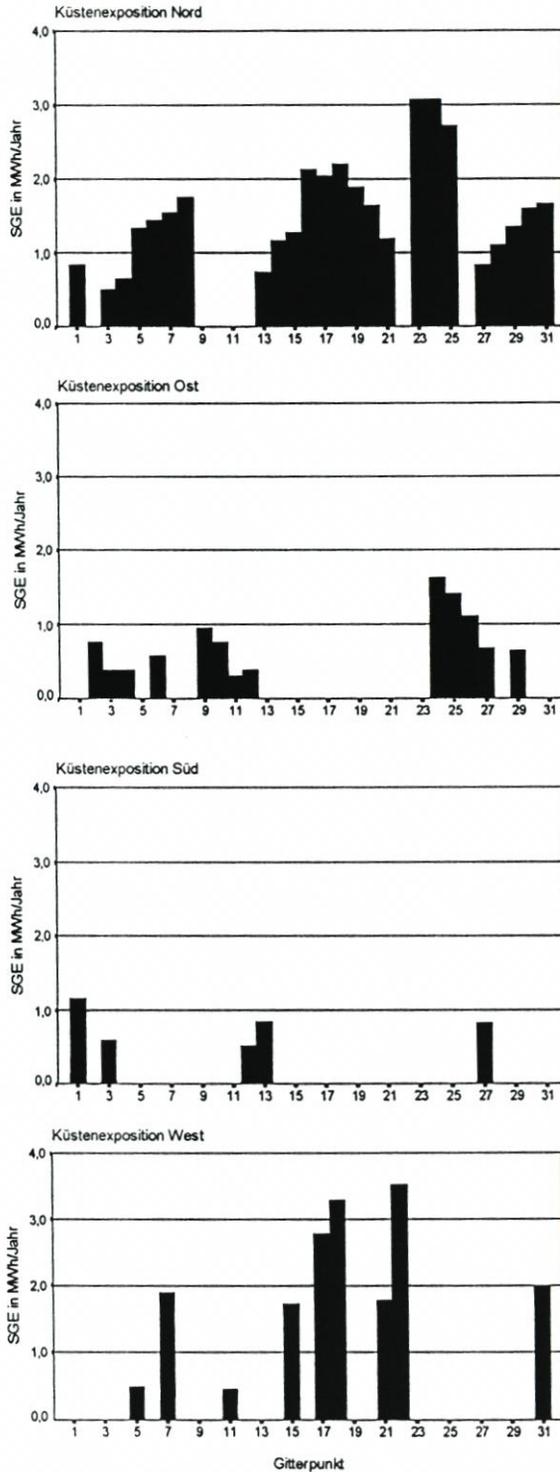


Abb. 5: Mittlerer jährlicher Seegangsenergieeintrag nach der beobachteten Häufigkeitsverteilung der seegangsspezifischen Wetterlagen (1979–1993). Dargestellt sind die uferwärts gerichteten Seegangsenergiekomponenten für unterschiedlich exponierte Küstenabschnitte

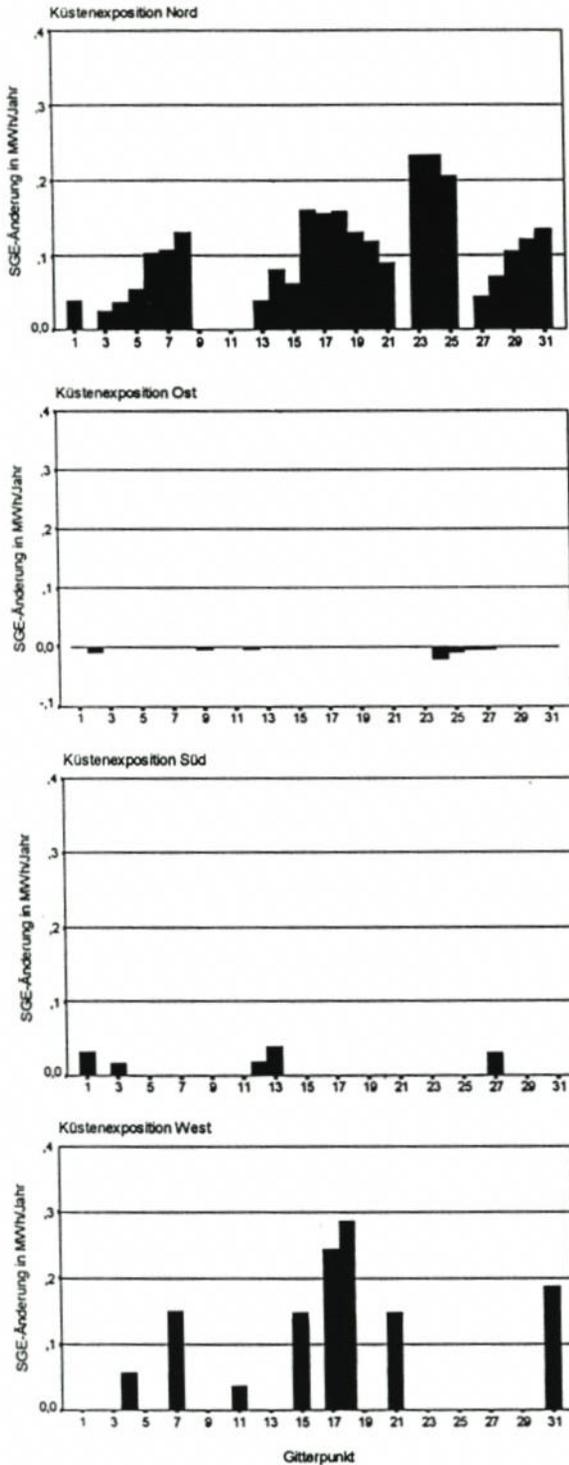


Abb. 6: Mittlere jährliche Veränderungen der Seegangsenergieeintrages im Fall einer verstärkten Zonalzirkulation (um 15 % erhöhte Belegung der Wetterlagenklasse 12). Dargestellt sind die uferwärts gerichteten Komponenten der Seegangsenergieänderung für unterschiedlich exponierte Küstenabschnitte

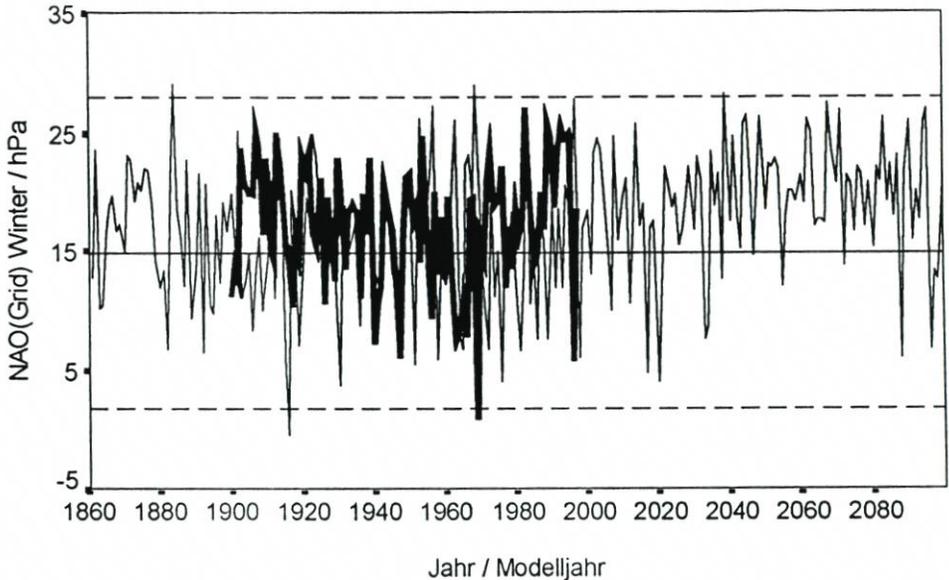


Abb. 7: Zeitreihe der Nordatlantischen Oszillation, berechnet aus Gitterpunktwerten des Luftdrucks „Azoren“ – „Island“ nach Beobachtungen (dicke Linie) und Ergebnissen der Modellierung mit ECHAM4/OPYC_T42 (dünne Linie). Die waagerechte ausgezogene Linie markiert den Mittelwert und die waagerechten gestrichelten Linien die doppelte positive und negative Standardabweichung des 100jährigen Kontrolllaufes, nach HUPFER et al. (1999)

keit der gegenwärtigen Klimamodelle kritisch geschlossen werden, dass die Küstendynamik im Bereich der deutschen Ostseeküste aus einem veränderten Eintrag von Wellenenergie in die ufernahe Flachwasserzone keine klimaschwankungsbedingte Veränderung erfahren dürfte.

Die hypothetische Veränderung der Häufigkeit von Westwetterlagen einer seegangsspezifischen Wetterlagenklassifikation zeigt andererseits, dass Zirkulationsänderungen die mittlere Wellenhöhe und den Seegangsenergieeintrag in die ufernahe Zone empfindlich beeinflussen können. Die Entwicklung objektiver seegangsspezifischer Wetterlagen ermöglicht es somit, mittlere Seegangsverhältnisse aus den wechselnden Zuständen der Atmosphäre abzuleiten. Dafür steht ein 15 Jahre (1979–1993) umfassender Datensatz auf der Basis der Reanalysen des EZMW und entsprechende Seegangsberechnungen mit dem Modell HYPAS für die Ostsee zur Verfügung.

Allgemein kann festgestellt werden, dass bei Fehlen von Seegangsmessreihen die Modellierung der Wellenparameter hinreichend detaillierte klimatologische Untersuchungen zur Langzeitentwicklung des Seegangs befriedigender räumlicher Auflösung erlaubt.

D a n k

Es wird dankbar gewürdigt, dass diese Untersuchung durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter der Vorhabensnummer 01LK9304/3 zwischen 1994 und 1997 gefördert wurde. Wir danken Herrn Dr. W. ROSENTHAL und seinen Mitarbeitern, Forschungszentrum Geesthacht, für die Überlassung des Modells

HYPAS. Dem Deutschen Wetterdienst und dem EZMWF danken wir für die Reanalysedaten und dem Deutschen Klimarechenzentrum Hamburg für die Klimamodelldaten und weitere Hilfe. In der gesamten Laufzeit der Untersuchung war die Zusammenarbeit zwischen den Bearbeitern der KLIBO-Themen hilfreich und sei hier anerkennend hervorgehoben.

5. Schriftenverzeichnis

- BAERENS, CHR.: Extremwasserstandereignisse an der deutschen Ostseeküste. Dissertation. Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin, 1998.
- BÖRNGEN, M.; SCHÖNFELDT, H.-J.; RIECHMANN, F.; PANIN, G. u. TETZLAFF, G.: Seegangs atlas. In: Wind- und Seegangs atlas für das Gebiet um Darß und Zingst, Wiss. Mitt. a. d. Inst. F. Meteorologie der Univ. Leipzig u. d. Inst. F. Troposphärenforschung e.V. Leipzig, Bd. 10, Leipzig, 1998.
- BOUWS, E.; GÜNTER, H.; ROSENTHAL, W. u. VINCENT, C. L.: Similarity of the wind wave spectrum for finite depth water. Part I: Spectral form. J. of Geophys. Res., Vol 90, No. C1, 1985.
- ECMWF: Operational implementation of the high resolution ocean wave model. ECMWF Newsletter, No. 74, Winter 1996/1997.
- ECMWF: The ECMWF Re-Analysis (ERA) Project. ECMWF Newsletter, No. 73, Autumn 1996.
- ENKE, W. u. SPEKAT, A.: Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression. Climate Res., Vol. 8, 1997.
- FREY-BUNESS, A.; HEIMANN, D. u. SAUSEN, R.: Regionalisierung globaler Klimasimulationen mit einem statistisch-dynamischen Verfahren. 3. Deutsche Klimatagung, Tagungsband der Vorträge und Poster. PIK Reports, Potsdam, No. 1, 1994.
- GERSTENGARBE, F.-W. u. WERNER, P. C.: Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowski 1881-1992. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, Nr. 113, 1993.
- GÜNTHER, H.; ROSENTHAL, W.; WEARE, T. J.; WORTHINGTON, B. A.; HASSELMANN, K. u. EWING, J. A.: A Hybrid Parametrical Wave Prediction Model. J. of Geophys. Res. Vol. 84, No. C9, 1979.
- GÜNTHER, H.; ROSENTHAL, W. u. DUNCKEL, M.: The Response of Surface Gravity Waves to Changing Wind Direction, J. of Phys. Oceanogr, Vol. 11, 1981.
- HUPFER, P.: Säkulare Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation und der verstärkte Rückgang der Flachküste zwischen Warnemünde und Hiddensee. Peterm. Geogr. Mitt., Band 109, 1965.
- HUPFER, P.: Unsere Umwelt: Das Klima. Globale und lokale Aspekte. Teubner, Stuttgart und Leipzig, 1996.
- HUPFER, P.; TINZ, B. u. STEINRÜCKE, J.: The North Atlantic Oscillation in the present climate and in a greenhouse gas scenario. In Vorber. 1999.
- KOLAX, M.: The Climate Impact on the Surface Wave Energy Distribution of the Baltic Sea. Part I: Conception and Case Study. Spezialarb. Arb. Klimaforschung d. Humboldt-Univ. zu Berlin, Nr. 11, 1996.
- ROECKNER, E.; ARPE, K.; BENGTTSSON, L.; BRINKOP, S.; DÜMENIL, L.; ESCH, M.; KIRK, E.; LUNKEIT, F.; PONATER, M.; ROCKEL, B.; SAUSEN, R.; SCHLESE, U.; SCHUBERT, S. u. WINDELBAND, M.: Simulation of the Present-Day Climate With the ECHAM-Model: Impact of Model Physics and Resolution, Report No. 93, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 1992.
- SCHUBERT, S.: A weather generator based on the European ‚Grosswetterlagen‘. Climate Res., Vol. 4, 1994.
- SEEHYDROGRAPHISCHER DIENST d. DDR: Atlas zur Ermittlung der Wellenhöhen in der südlichen Ostsee. SHD, Rostock, 1979.
- VERHAGEN, H. J.: Sand waves along the Dutch coast. Coastal Engineering, Vol. 13, 1989.
- YOUNG, I. R. u. HOLLAND, G. J.: Atlas of the Oceans: Wind and Wave Climate. Pergamon Press, Oxford, 1996.