

# Seegangsbelastung vor der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern – Grundlagen des Seegangs atlas für die Gewässer vor dem Darß und Zingst

Von MICHAEL BÖRNGEN, HANS-JÜRGEN SCHÖNFELDT, FRANK RIECHMANN  
und GERD TETZLAFF

## Zusammenfassung

Die Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns wird in ihrer Morphologie wesentlich durch den Seegang der Ostsee geprägt. Ständig zahlreicher werdende meteorologische und ozeanologische Eingangsdaten, die sowohl aus Messungen als auch aus großräumigen Modellen (z. B. HYPAS) gewonnen werden, erlauben die Bestimmung relevanter Seegangparameter für den unmittelbaren Küstenstreifen und das vorgelagerte Ostseegebiet. In einem diese Region erfassenden Seegangs atlas werden nach statistischen Analysen und Modellrechnungen (Verwendung des Strahlenmodells nach WOLF, 1993) die Parameter Wellenhöhe, -periode und -richtung gemäß der heutigen Bathymetrie in Abhängigkeit von den herrschenden Windverhältnissen dargestellt.

## Summary

*The morphology of the outer Baltic Sea coast of Mecklenburg-Vorpommern is dominated by waves. An increasing set of meteorological and oceanographic data from field investigations and global numerical model exercises (e. g. HYPAS) is the basis for the definition of sea state parameters for the nearshore and coastal region. In a wave atlas describing this region parameters such as wave height, wave period and wave direction due to water depth and wind conditions are presented on the basis of both statistical analysis and model calculations (e. g. the ray model of WOLF, 1993).*

## Inhalt

1. Einführung .....	127
2. Untersuchungsgebiet .....	129
3. Eingangsdaten .....	129
3.1 Windreihen .....	129
3.2 Seegangsreihen .....	132
4. Methoden .....	136
4.1 Statistische Analysen .....	136
4.2 Seegangsmodellierung .....	136
5. Ergebnisse der Seegangsanalyse – der Seegangs atlas .....	139
5.1 Seegangstatistik .....	142
5.2 Seegangsmodellierung .....	143
6. Schlussbemerkungen .....	146
7. Schriftenverzeichnis .....	146

## 1. Einführung

Die Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns wird in ihrer Morphologie wesentlich durch Wind und Seegang und die daraus hervorgehenden Strömungssysteme geprägt. Seit Beginn der wirtschaftlichen Nutzung dieses Ostseeraumes durch Fischerei, Seeverkehr und

Hafenwirtschaft sowie Landwirtschaft und Tourismus hat auch der Mensch prägend in die Gestaltung des Küstenverlaufs eingegriffen.

Die Auseinandersetzung mit den von der See auf das Festland einwirkenden Kräften hat im Laufe der Geschichte zu einer Vielzahl von Küstenschutzmaßnahmen geführt. Viele dieser Vorkehrungen wurden in der Vergangenheit nach empirischen Kriterien ausgewählt und fanden ihre Begründung in langjährigen Beobachtungen der abrasiven Wirkung des Seegangs an besonders exponierten Küstenabschnitten. Heute ist das experimentelle und theoretische Instrumentarium soweit entwickelt, dass die Beschreibung des Seegangsgeschehens mittels hydronumerischer Modelle möglich ist.

Im Hinblick auf die Klimaveränderung und den prognostizierten Anstieg des Meeresspiegels gewinnt das Verständnis der Seegangsbelastung zunehmende Bedeutung. So ist es wichtig, den Kenntnisstand über den Seegang und seine Wirkung auf die Küste zu erhöhen, auch unter dem Aspekt verringerter anthropogener Einflüsse im Bereich des Nationalparks „Vorpommersche Boddenlandschaft“ und unter Wahrung berechtigter Interessen von wirtschaftlicher Nutzung und Umweltschutz. Ein ständig dichter werdendes Netz verfügbarer meteorologischer und ozeanologischer Eingangsdaten, die sowohl aus Messungen als auch aus großräumigen Modellen (z. B. HYPAS = **HY**brid **PA**rametrical **S**hallow **W**ater **W**ave Model) gewonnen werden, erlauben es, die für den unmittelbaren Küstenstreifen und das vorgelagerte Ostseegebiet relevanten Seegangsparameter zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in Form eines Seegangsatlas (BÖRNGEN et al., 1998, S. 19–134) präsentiert. Darin werden für den interessierenden Teilbereich der westlichen Ostsee die Parameter signifikante Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung gemäß der heutigen Bathymetrie in Abhängigkeit von den herrschenden Windverhältnissen dargestellt. Ähnlich dem Windatlas des Instituts für Meteorologie (HINNEBURG et al., 1997, S. 1–164) ist der Seegangsatlas eine systematisch geordnete und hinsichtlich Windrichtung und -geschwindigkeit vollständige Sammlung der entsprechenden Zustände charakteristischer Wellenparameter. Durch die Verknüpfung von Wind und Seegang ist es möglich, direkt aus prognostizierten Klimaveränderungen (Windveränderungen) auf die Änderung der Seegangsbelastung zu schließen. Werdegang und Inhalt des Seegangsatlas, speziell theoretische Grundlagen, Datenquellen und Berechnungsmethoden, sollen hier kurz vorgestellt werden.

Detaillierte Vorstellungen über die Seegangsparameter im Untersuchungsgebiet existieren spätestens seit Vorliegen des von SCHMAGER erarbeiteten Wellenatlas (Seehydrographischer Dienst der DDR [SHD]: Atlas zur Ermittlung der Wellenhöhe in der südlichen Ostsee. – Rostock, 1979). Dieses Kartenwerk kam besonders den Bedürfnissen der Seefahrt entgegen. Der neue Seegangsatlas beschränkt sich dagegen auf eine Teilfläche und soll in erster Linie helfen, die klimabedingten Abtragungs-, Transport- und Sedimentationsprozesse im Küstengebiet Fischland–Darß–Zingst aufzuklären.

Bei Benutzung des Seegangsatlas ist zu beachten, dass hier der Wind in 10 m Höhe Verwendung fand. Die Windgeschwindigkeit wird meist in Beaufort (Bft) angegeben, da zu Beginn der Untersuchungen vom Wellenatlas nach SCHMAGER ausgegangen wurde und ein späterer Vergleich mit diesem gewährleistet werden sollte. Die Umrechnung zwischen Bft und m/s erfolgte nach der zwölfteiligen Petersen-Skala der Deutschen Seewarte (s. z. B. DIETRICH et al., 1975, S. 345). In Tab. 1 können die einander entsprechenden Werte abgelesen werden. Die Klasse „Windstille“ wurde der Stärke von 1 Bft zugerechnet.

Die meisten Rechnungen erfolgten mit Mathematica® (WOLFRAM, 1991). Mit diesem Programm wurden auch fast alle Abbildungen des Seegangsatlas gezeichnet.

## 2. Untersuchungsgebiet

Das zu bearbeitende Gebiet erstreckt sich von der Warnowmündung im Westen bis zur Insel Hiddensee im Osten und von der Ostseeküste bei Warnemünde im Süden bis ca.  $54^{\circ} 45'$  nach Norden. Diese Fläche hat eine Ausdehnung von  $89 \times 60 \text{ km}^2$ . Für Modellierungsaufgaben wurde sie mit einer horizontalen Gitterauflösung von 250 m digitalisiert, so dass sich ein Netz von  $356 \times 240$  äquidistanten Gitterpunkten ergibt. Für das vertikale Digitalisierungsraaster wurde eine Auflösung von 10 cm gewählt. Die Digitalisierung erfolgte auf der Grundlage von Seevermessungskarten mit einem Maßstab von 1:10 000 (küstennah z. T. auch 1:5000 und 1:2000), die freundlicherweise vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock zur Verfügung gestellt wurden.

Bei Mittelwasser liegt die durchschnittliche Tiefe zwischen 15 und 20 m, am nordöstlichen Modellrand vor der Halbinsel Wittow wird die größte im Untersuchungsgebiet vorkommende Tiefe mit ca. 35 m erreicht. Einfluss auf den Seegang haben die Untiefen Gedser Rev im Nordwesten, Kadetbank nordwestlich vor Darßer Ort, Plantagenetgrund nördlich von Zingst und ganz besonders die Prerowbank mit einer Wassertiefe von nur 3,5 m.

Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich auf die äußeren Seegewässer. Die Vorpommersche Boddenkette und die Westrügenschens Bodden finden keine Berücksichtigung.

## 3. Eingangsdaten

Für die Untersuchung der Seegangsbelastung wurden sowohl Beobachtungs- als auch Modellreihen herangezogen.

Zu den Beobachtungswerten zählen die mehrjährigen Windzeitreihen der Stationen Boltenhagen und Barth (s. 3.1) sowie die Messwerte der GKSS-Wellenreiterboje (kurz: Boje) im Bereich der Darßer Schwelle (s. 3.2).

Die modellierten Wind- und Seegangswerte entstammen dem Reanalysis-Datensatz des ECMWF bzw. dem HYPAS-Modell. Bei Letzterem handelt es sich um ein großräumiges spektrales und windgetriebenes Seegangmodell (s. z. B. GÜNTHER, ROSENTHAL, 1983; GÜNTHER et al., 1984, S. 89–106). Es wurde am Institut für Physik der GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH entwickelt und wird beim BSH im Auftrag des DWD für die gesamte Ostsee betrieben (vgl. KOLAX und HUPFER, in diesem Heft). Insgesamt wurden 15 HYPAS-Gitterpunkte aus dem Ostseebereich westlich und nördlich von Darß-Zingst ausgewählt. Lage und Bezeichnung der Gitterpunkte sind aus den Abb. 1a bzw. 1b zu entnehmen. Die verwendeten Modellreihen mit einem Zeitinkrement von 3 Stunden umfassen den Zeitraum 1.1.1981/31.12.1993.

### 3.1 Windreihen

Zur Charakterisierung der Windverhältnisse im Untersuchungsgebiet standen zur Verfügung:

- die an den 15 HYPAS-Gitterpunkten modellierten Werte für Windgeschwindigkeit und -richtung (Reanalysis-Datensatz des ECMWF) des Zeitraums 1.1.1981/31.12.1993 (Zeitinkrement 3 Stunden);
- die von der DWD-Niederlassung Hamburg, Geschäftsfeld Seeschifffahrt, erhaltenen Zeitreihen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung von Boltenhagen des Zeitraums



Abb. 1a: Bereich der westlichen Ostsee mit den hier benutzten HYPAS-Gitterpunkten (•) und der Position der GKSS-Wellenreiterboje (x). Die Station Boltenhagen liegt südöstlich des Kartenausschnittes

		1782	1882	1982
			(Boje)	
	1683	1783	1883	1983
1584	1684	1784	1884	1984
1585	1685			
1586				

Abb. 1b: Bezeichnung der benutzten HYPAS-Gitterpunkte

1.1.1973/1.4.1994 (Zeitinkrement 1 Stunde). Diese 18 m über Grund bzw. 33 m über NN gewonnenen Reihen wurden nach Korrektur auf 10 m Höhe und Normierung auf Seeroberflächeneigenschaft geliefert;

- die Windgeschwindigkeits- und Windrichtungszeitreihen von Barth des Zeitraums 1.1.1981/1.4.1994 (Zeitinkrement 1 Stunde). Diese über dem Land (Stationshöhe 7 m) gewonnenen Reihen wurden mit Hilfe des Windatlas nach HINNEBURG et al. (1997, S. 1–164) durch Ermittlung je einer Regressionsbeziehung (Fit) für die Geschwindigkeit und die Richtung auf die Verhältnisse an der Bojenposition umgerechnet.

In Abb. 2 sind die Verteilungen der Windwerte des Zeitraum 1981/93 auf die 12 Klassen der Windgeschwindigkeit dargestellt, wobei über sämtliche Windrichtungen gemittelt wurde. Prinzipiell ist bei allen Windreihen eine ähnliche Verteilung festzustellen. Im Durchschnitt sind Windgeschwindigkeiten um 4 Bft (5,5–7,9 m/s) vorherrschend. Jedoch sind die Verteilungen der gemessenen Reihen gegenüber denen der modellierten Reihe deutlich in Richtung höherer Windgeschwindigkeiten verschoben. Wie nähere Untersuchungen gezeigt haben (BÖRNGEN et al., 1998, S. 19–134), betrifft dieser Sachverhalt fast alle Windrichtungen.

Aufgrund der genannten Abweichungen wurden die modellierten Windwerte zu weiteren Untersuchungen nicht mehr herangezogen. Da die Station Boltenhagen zu weit außerhalb des HYPAS-Modellgebiets liegt, kam auch diese Windzeitreihe nicht in Frage. Zur Herstellung des Seegangsatlas diente die mittels Windatlas (HINNEBURG et al., 1997, S. 1–164) auf Bojenposition transformierte Barther Windreihe.

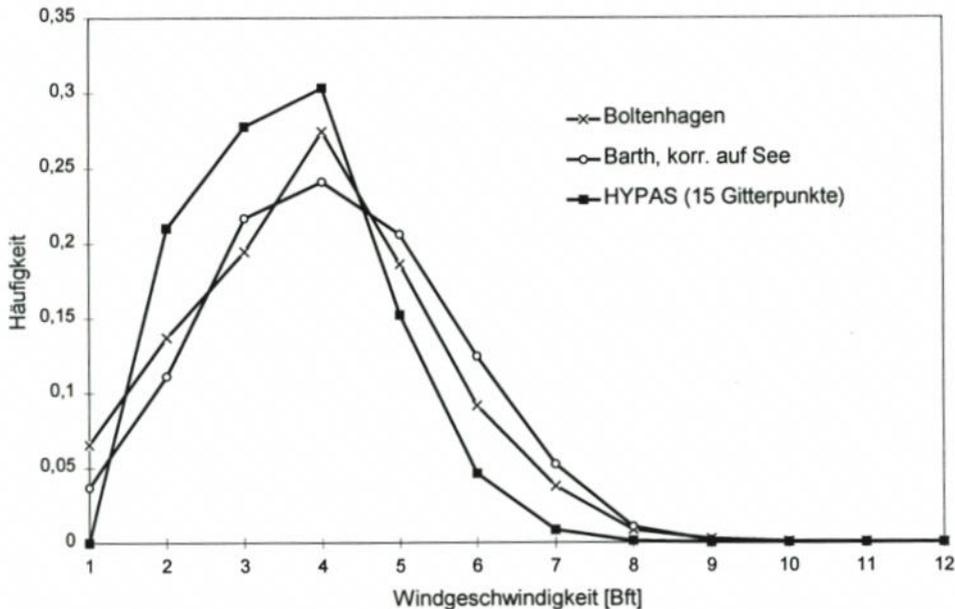


Abb. 2: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung der untersuchten Windreihen (Messungen bei Boltenhagen und Barth, Modellierung an den HYPAS-Gitterpunkten) für den Zeitraum 1981/93. Es wurde hierbei über alle Windrichtungen gemittelt

### 3.2 Seegangsreihen

Messwerte des Seegangs liefert seit 1991 eine Wellenreiterboje der GKSS, die zwischen den Gitterpunkten Nr. 1782, 1783, 1882 und 1883, ca. 30 km nördlich vor Zingst ( $54^{\circ}42'N$ ,  $12^{\circ}40'E$ ) verankert ist. Sie sendet neben der signifikanten Wellenhöhe und weiteren Seegangparametern auch vollständige Seegangsspektren. Die Signale der Boje werden an der Außenstelle Zingst des Instituts für Meteorologie der Universität Leipzig empfangen und gespeichert.

Das HYPAS-Modell liefert Zeitreihen der Seegangsspektren mittels der modellierten Windfelder in einem 15-km-Raster mit einer zeitlichen Diskretisierung von drei Stunden. Jeder dieser Datensätze enthält – neben Windgeschwindigkeit und Windrichtung – die signifikante Wellenhöhe, die Hauptrichtung des Seeganges sowie die Periode des Wellenpeaks. Die für den Seegangsatlas verwendeten HYPAS-Modelldaten wurden von KOLAX und HUPFER (vgl. KOLAX und HUPFER, in diesem Heft) aufbereitet.

Eine Trennung des Seegangs in Windsee und Dünung bzw. eine spektrale Bearbeitung wurde nicht vorgenommen, weil das Strahlenmodell (s. 4.2.) in vorhergehenden Untersuchungen nicht mit Spektraldaten sondern mit der signifikanten Wellenhöhe parametrisiert wurde. Die Betrachtung dieser Größe hat außerdem den Vorteil der Vergleichbarkeit der Daten mit dem Seegangsatlas nach SCHMAGER. Eine spektrale Betrachtung erschwert die Erarbeitung eines (einem Sedimenttransportatlas als Voraussetzung dienenden) Seegangsatlas durch Vergrößerung der Zahl der unabhängigen Variablen bei gleicher Anzahl der Messdaten.

Die Abb. 3a und 3b zeigen Richtungsverteilungen der signifikanten Wellenhöhe der Wellenreiterboje und des HYPAS-Modells. Die Modelldaten wurden aus dem HYPAS-Gitternetz linear auf die Position der Boje interpoliert, um eine möglichst genaue Übereinstimmung von Modell- und Messdaten zu erzielen.

Im Einzelnen weisen beide Abb. eine Häufung der Seegangsanteile aus den Richtungen Südwest und Nordost aus, wobei diese beiden Richtungsschwerpunkte bei den Messwerten der Boje stärker ausgeprägt sind als bei den Modelldaten. Unterschiede in den Anteilen der Wellenhöhe sind kaum signifikant, d. h. Wellenhöhen von 40 bis ca. 160 cm herrschen in allen Richtungen vor, während Wellenhöhen größer als 200 cm die Ausnahme sind und nur mit geringem Anteil vorkommen. Das gilt sowohl für die Boje als auch für die Modelldaten.

Die in Abb. 4a dargestellte statistische Analyse soll die Unterschiede zwischen Modell und Messung nochmals illustrieren. Verglichen werden hierbei die berechneten bzw. registrierten Werte der Wellenhöhe innerhalb des in beiden Zeitreihen (HYPAS und Boje) vorhandenen Zeitbereichs Januar 1993 bis November 1995 unter Einbeziehung aller Windrichtungs-Windgeschwindigkeits-Klassen.

Die Korrelation zwischen den die Bojenposition umgebenden HYPAS-Punkten (Abb. 4a, oben) zeigt erwartungsgemäß eine enge Bindung und einen fast linearen Verlauf. Dagegen ist der Zusammenhang zwischen den HYPAS-Punkten einerseits und der Boje andererseits weniger streng (Abb. 4a, unten). Die Streuung ist größer, und die Beziehung ist nicht linear. Die berechneten Wellenhöhen fallen gegenüber den gemessenen im Bereich niedriger Wellenhöhen geringer aus, im Fall ausgeprägter Wellenhöhen dagegen größer.

Für die Wellenparameter Periode und Richtung liegen gleichartige Analysen mit tendenziell ähnlichen Ergebnissen vor. Auch die berechneten Wellenperioden werden bei niedrigen Werten unterschätzt und bei größeren überschätzt. Abweichungen werden ebenso bei der Wellenbewegungsrichtung erhalten. Es gibt eine systematische Überschätzung bis zu 50 ... 100 Grad für Wellen aus westlichen Richtungen und systematische Unterschätzungen der östlichen Wellenrichtungen.

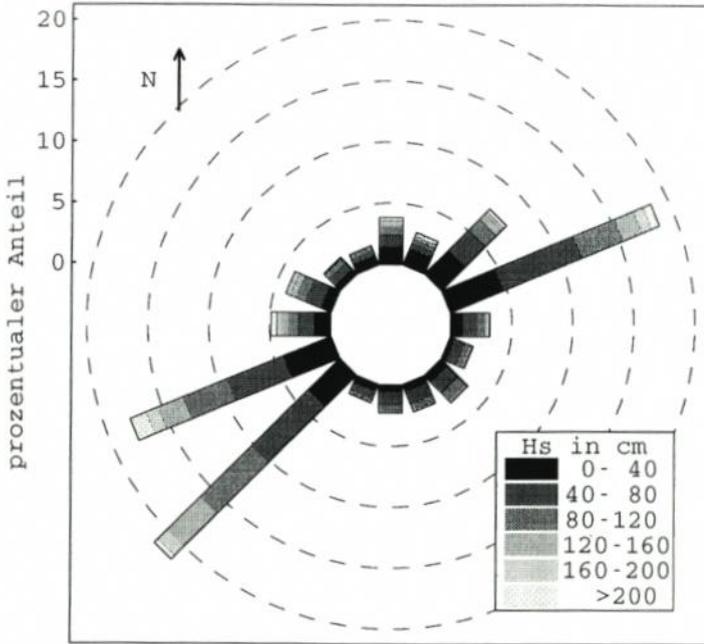


Abb. 3a: Richtungsverteilung der signifikanten Wellenhöhe, gemessen von der Wellenreiterboje im Zeitraum von 2/91 bis 11/95

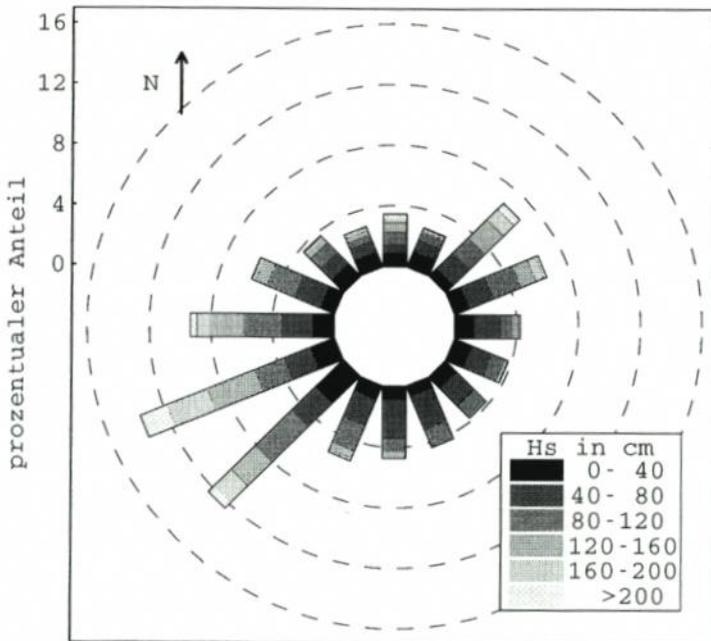


Abb. 3b: Richtungsverteilung der signifikanten Wellenhöhe, HYPAS-Modellwerte an der Position der Wellenreiterboje im Zeitraum von 1/93 bis 11/95

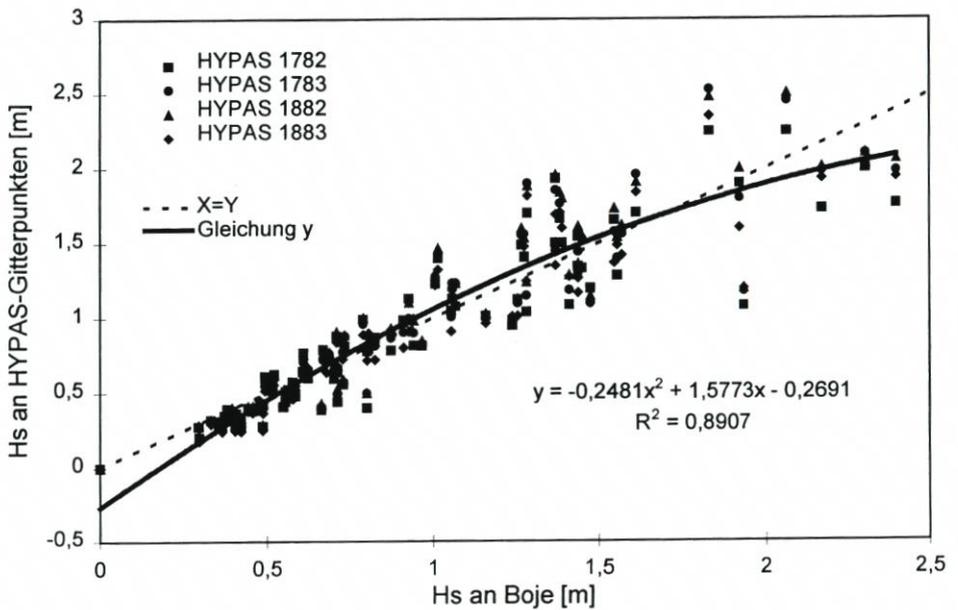
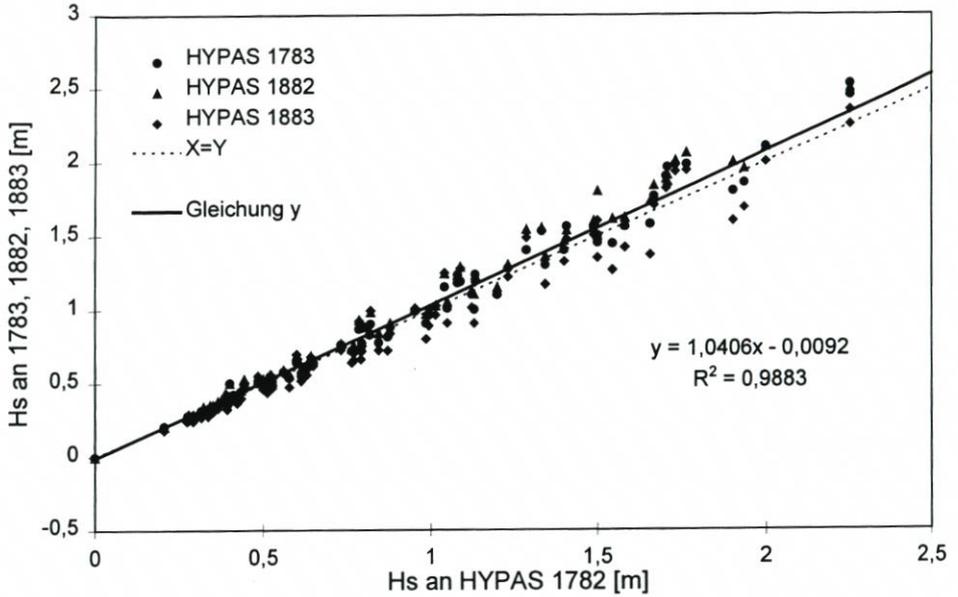


Abb. 4a: Signifikante Wellenhöhe (Hs) nach Messungen an der Wellenreiterboje und nach Berechnungen mit dem Modell HYPAS an ausgewählten Gitterpunkten

Es war daher notwendig, Korrekturfaktoren für Wellenhöhe und Wellenperiode sowie Korrekturglieder für die Wellenrichtung zur Anpassung der theoretischen HYPAS-Werte an die gemessenen Bojenwerte zu ermitteln. Dabei hat sich gezeigt, dass die Korrekturen bei Wellenhöhe und -richtung nur in Abhängigkeit von der Windrichtung und bei der Wellenperiode in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit anzubringen sind. Die erhaltenen Korrekturwerte sind in Tab. 1 aufgelistet; Abb. 4b zeigt deren Wirksamkeit. Sie gelten für alle 15 Positionen, da keine bessere Möglichkeit der unbedingt erforderlichen Korrektur der HYPAS-Werte besteht.

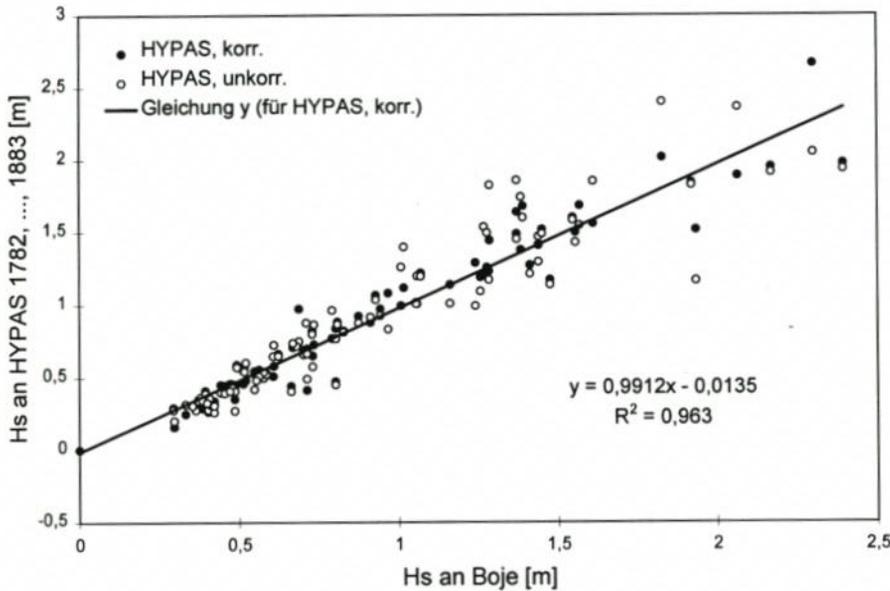


Abb. 4b: Signifikante Wellenhöhe (Hs) an Wellenreiterboje und HYPAS-Gitterpunkten (gemittelt über HYPAS 1782, 1783, 1882 und 1883) vor und nach der Korrektur

Tab. 1: Korrekturfaktoren bzw. Korrekturglieder, die an die Wellenparameter der HYPAS-Gitterpunkte in Abhängigkeit von den Windverhältnissen anzubringen sind

Windrichtung [°]	Korrekturfaktor Wellenhöhe	Korrekturglied Wellenrichtung [°]	Windgeschwindigkeit [Bft]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Korrekturfaktor Wellenperiode
0	1,30	-6,60	1	0- 1,5	1,20
30	1,13	-10,29	2	1,6- 3,3	1,00
60	1,09	-16,91	3	3,4- 5,4	0,91
90	1,01	-8,79	4	5,5- 7,9	0,84
120	0,96	-15,37	5	8,0-10,7	0,81
150	1,03	-27,69	6	10,8-13,8	0,78
180	0,80	-29,86	7	13,9-17,1	0,77
210	0,79	-13,82	8	17,2-20,7	0,76
240	0,84	-11,73	9	20,8-24,4	0,75
270	1,02	-22,73	10	24,5-28,4	0,75
300	1,05	-21,92	11	28,5-32,6	0,75
330	1,05	-8,33	12	32,7-36,9	0,75

## 4. Methoden

## 4.1 Statistische Analysen

Eine statistische Analyse (Klassenbildung) liegt Teilen des Seegangsatlas zugrunde. Hierfür wurden die korrigierten HYPAS-Wellenparameter den zum jeweiligen Zeitpunkt herrschenden Windrichtungs-Windgeschwindigkeits-Verhältnissen zugeordnet. Das Ergebnis dieser Statistik ist vorrangig im Teil A des Seegangsatlas dargestellt. Angegeben ist auch die Standardabweichung der Wellenparameter innerhalb der jeweiligen Klasse.

## 4.2 Seegangmodellierung

Das Seegangmodell HYPAS liefert Informationen mit einer räumlichen Auflösung von mehreren Kilometern. Für eine differenzierte (kleinräumige) Aussage ist ein Downscaling erforderlich. Hierzu wurde für die Modellierung des Seegangs das Strahlenmodell nach WOLF (1993) verwendet. Das Modell wurde vor allem mit Messungen an der Außenstelle Zingst verglichen und lieferte befriedigende Ergebnisse (RIECHMANN, 1997).

Die Grundlage dieses stationären Seegangmodells bildet die Energietransfergleichung im Frequenz-Richtungs-Raum ( $f$ - $\Theta$ -Raum) in der Form, wie sie z. B. bei SOBEY (1986, S. 149–172) oder YOUNG (1988, S. 5113–5129) zu finden ist:

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t} (CC_g E) + C_g \cos\Theta \frac{\partial}{\partial x} (CC_g E) + C_g \sin\Theta \frac{\partial}{\partial y} (CC_g E) + \frac{C_g}{C} \left[ \sin\Theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos\Theta \frac{\partial C}{\partial y} \right] \frac{\partial}{\partial \Theta} (CC_g E) = CC_g S$$

Dabei haben die einzelnen Größen folgende Bedeutung:

- $E(f, \Theta, x, y, t)$  – spektrale Energiedichte im  $f$ - $\Theta$ -Raum
- $C(x, y, f)$  – Phasengeschwindigkeit der Wellen
- $C_g(x, y, f)$  – Gruppengeschwindigkeit der Wellen
- $S(f, \Theta, x, y, t)$  – Quellterm für Energieeintrag, Energietransfer und Energieabgabe

Im Einzelnen werden auf der rechten Seite von Gleichung (1) folgende Quellen und Senken der Wellenenergie berücksichtigt: Windanregung, Bodenreibung, Shoaling (Aufsteilen der Wellen im Flachwasser) und Whitecapping (Brechen der Wellen auf offener See). Außerdem wird der durch Refraktion bewirkte Energieaustausch innerhalb des Wellenspektrums berücksichtigt. Das Brechen der Wellen findet in diesem Modellansatz keine Berücksichtigung, was aber zu keiner Einschränkung führt, da der Seegang nur auf der 5-Meter-Tiefenlinie benötigt wird.

Weitere Grundlagen sind das Brechungsgesetz von SNELLIUS

$$(2) \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{C_1}{C_2}$$

sowie die Dispersionsbeziehung aus der linearen Wellentheorie

$$(3) \quad C = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kD}$$

- C – Phasengeschwindigkeit  
 $\omega$  – Kreisfrequenz  
 k – Wellenzahl ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – Wellenlänge)  
 g – Erdbeschleunigung  
 D – Wassertiefe

Das eigentliche hydronumerische Modell ist in der hier behandelten Form von WOLF (1993) entwickelt, getestet und ausführlich erläutert worden, deshalb sei hier nur eine verkürzte Beschreibung wiedergegeben.

Für ein gegebenes Untersuchungsgebiet werden in einem ersten Berechnungsschritt die Gruppen- und die Phasengeschwindigkeiten für jeden Gitterpunkt ermittelt. Im Folgenden wird dann für jede Frequenz in einem Winkelbereich von ca.  $180^\circ$  mit einer Diskretisierung von  $5^\circ$  (größere oder kleinere Diskretisierungen sind möglich) ein Strahlengitter berechnet, das vom Untersuchungspunkt ausgeht und bis an die Modellränder reicht. Entlang dieser Strahlen erfolgt im eigentlichen Modellierungsprozess die numerische Lösung der Grundgleichung mittels eines Runge-Kutta-Verfahrens 4. Ordnung, so dass abschließend im Punkt des Interesses wieder ein vollständiges Seegangsspektrum durch Überlagerung der aus allen Richtungen zusammenlaufenden Komponenten generiert werden kann. In Abb. 5 ist das Ablaufschema des Strahlenmodells dargestellt.

Frühere Untersuchungen zeigen die starke Abhängigkeit des Strahlenverlaufs von der Frequenz und der Tiefe des Gebietes. So wurde erkannt, dass bei niedriger Wellenfrequenz die Strahlen im Winkelbereich nahe  $0^\circ$  bzw. nahe  $180^\circ$  gar nicht den Modellrand erreichen. Längs dieser Strahlen wird also auch keine Energie in Richtung Untersuchungspunkt propagiert.

An den Modellrändern wird der Seegang aus den HYPAS-Punkten eingegeben (down-scaling). Durch die statistische Bearbeitung liegen hier keine Informationen über das Spektrum vor, sondern nur Werte für signifikante Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung. In einem ersten Programmschritt wird mittels der im JONSWAP-Experiment vorgeschlagenen Approximation (HASSELMANN, S. u. HASSELMANN, K., 1985, S. 1369-1377; HASSELMANN et al., 1985, S. 1378-1391; WAMDI Group, 1988, S. 1775-1810) ein eindimensionales Seegangsspektrum gewonnen.

$$(4) \quad E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-4} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right] \exp\left\{\ln \gamma \exp\left[-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right]\right\}$$

- $f_p$  – Peakfrequenz  
 $\alpha$  – Phillips-Konstante  
 $\gamma$  – Spektralformparameter  
 (= 1 für „Pierson-Moskowitz“-Spektrum)  
 $\sigma$  – Streuung

Durch die Beschränkung der Lösung der Energietransfergleichung auf die Wellenorthogonalen und letzten Endes auf ein Seegangsspektrum in nur einem Punkt, verringert sich

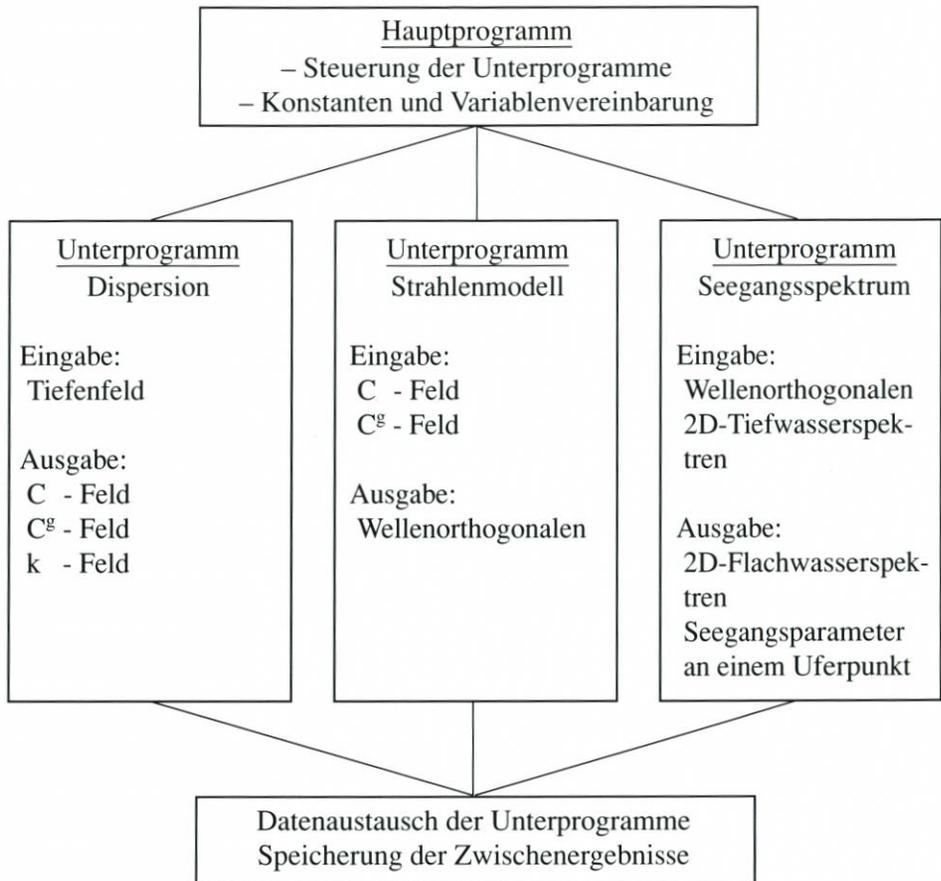


Abb. 5: Ablaufschema des Strahlenmodells

der numerische Aufwand und damit der Zeit- und Speicheraufwand für dieses Modell beträchtlich. Auf diese Weise wird es möglich, mit relativ bescheidener Rechentechnik viele unterschiedliche Anregungsfälle zu modellieren oder Jahresreihen von Seegangssparametern, die in diskrete Einzelereignisse zerlegt werden, zu bearbeiten. Das Modell bietet auch Vorteile bei der Berücksichtigung der Refraktion.

Als Eingangsdaten für die Randpunkte wurde in dieser Arbeit, wie bereits erwähnt, der Seegang an den entsprechenden HYPAS-Punkten verwendet und ein Downscaling der Seegangsstatistik der offenen Ostsee auf die 5-m-Tiefenlinie entlang der Küste mit Hilfe des Strahlenmodells durchgeführt. Für die Beurteilung der mit dem Strahlenmodell gewonnenen Werte muss also stets beachtet werden, dass schon der Modellinput in Form der HYPAS-Parameter beträchtlich von den Messwerten der Boje abweichen kann, so dass auch für die Seegangsmessungen am Strand mit solchen Abweichungen gerechnet werden muss. Es ist also für die Validation des Modells wichtig, solche Fälle auszuwählen, bei denen die HYPAS-Parameter mit denen der Boje gut übereinstimmen. Nur dann kann erwartet werden, dass auch die In-Shore-Messungen mit den Modellergebnissen übereinstimmen. Durch die Korrektur der HYPAS-Daten (vgl. 3.2) wurde dieser Problematik im gewissen Umfange Rechnung getragen.

Ein Mangel des Strahlenmodells besteht darin, dass für jeden Modellpunkt jedesmal das gesamte Strahlennetz generiert werden muss. Dieser Aufwand schließt Berechnungen für ein ganzes Gebiet mit diesem Modell aus. Für die beabsichtigte Ermittlung der Wellenhöhe auf einer küstennahen Linie waren entsprechende Programmodifikationen notwendig.

Die bisherigen Erfahrungen mit dem Strahlenmodell haben gezeigt, dass der regionale Wind im Modell eine untergeordnete Rolle spielt, er trägt mit weniger als 5 % zum Seegang am Strand bei. Dominant für die Ausbildung des Seegangsfeldes ist vielmehr der vorherrschende Wind im 15-km-HYPAS-Raster der Ostsee unter Beachtung der richtungsabhängigen Streichlängen und der Einwirkzeit. Diese Windverhältnisse bestimmen mittels des Seegangsfeldes in der offenen Ostsee auch weitgehend den küstennahen Seegang.

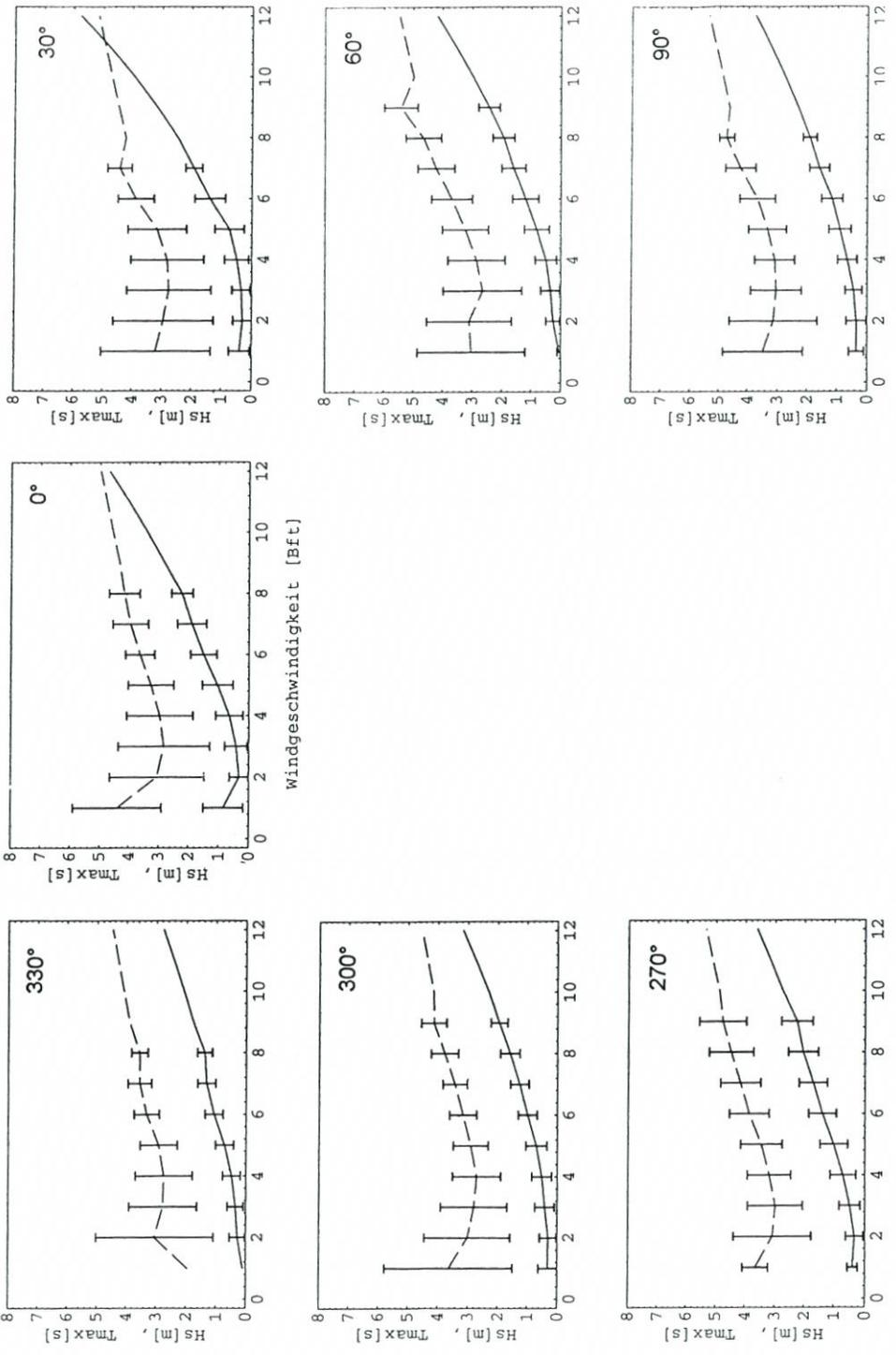
Wie bereits weiter oben ausgeführt, wird das Wellenbrechen im Modellansatz nicht berücksichtigt, was bei starker Seegangsangregung, d. h. beim Einsetzen des Wellenbrechens im Strandbereich, zu unrealistisch hohen Werten der signifikanten Wellenhöhe führt. Einen Ausweg bietet das Scaling-Verfahren nach KITAIGORODSKIJ (KITAIGORODSKIJ et al., 1975, S. 410–420; KITAIGORODSKIJ, 1983, S. 816–827), das deshalb hier verwendet wurde. Auf der Basis von Ähnlichkeitsbetrachtungen wird mit dieser Methode die Wellenhöhe auf kleinere Werte normiert. Die Modellwellenhöhen und -richtungen beziehen sich auf die 5-m-Tiefenlinie. Dies hat den Vorteil, dass in der Anwendung LITPACK die Sedimenttrift aus der Wellenhöhe und Wellenrichtung auf der 5-m-Tiefenlinie berechnet werden kann (Wellenbrechung wird durch LITPACK modelliert; s. STEPHAN und SCHÖNFELDT, in diesem Heft).

## 5. Ergebnisse der Seegangsanalyse – der Seegangsatlas

Dem Beispiel des Windatlas (HINNEBURG et al., 1997, S. 1–164) folgend, werden auch die Aussagen zur Seegangsbelastung graphisch, also in Form eines Seegangsatlas (s. BÖRNGEN et al., 1998, S. 19–134), dargeboten. Den Inhalt des Atlas soll Tab. 2 vermitteln.

Tab. 2: Inhalt des Seegangsatlas

	Teil A (Seegangsstatistik)	Teil B (Seegangsmodellierung)
geographische Punkte:		
• 15 HYPAS-Punkte	*	*
• Küstenlinie (5-m-Linie)		*
Wellenparameter:		
• Wellenhöhe	*	*
• Wellenperiode	*	
• Wellenrichtung		*
Windverhältnisse		
• Windrichtung (in 30°-Schritten)	*	(ohne 150-210°)
• Windgeschwindigkeit (nach der zwölfteiligen Petersen-Skala der Deutschen Seewarte)	*	(2-10 Bft)



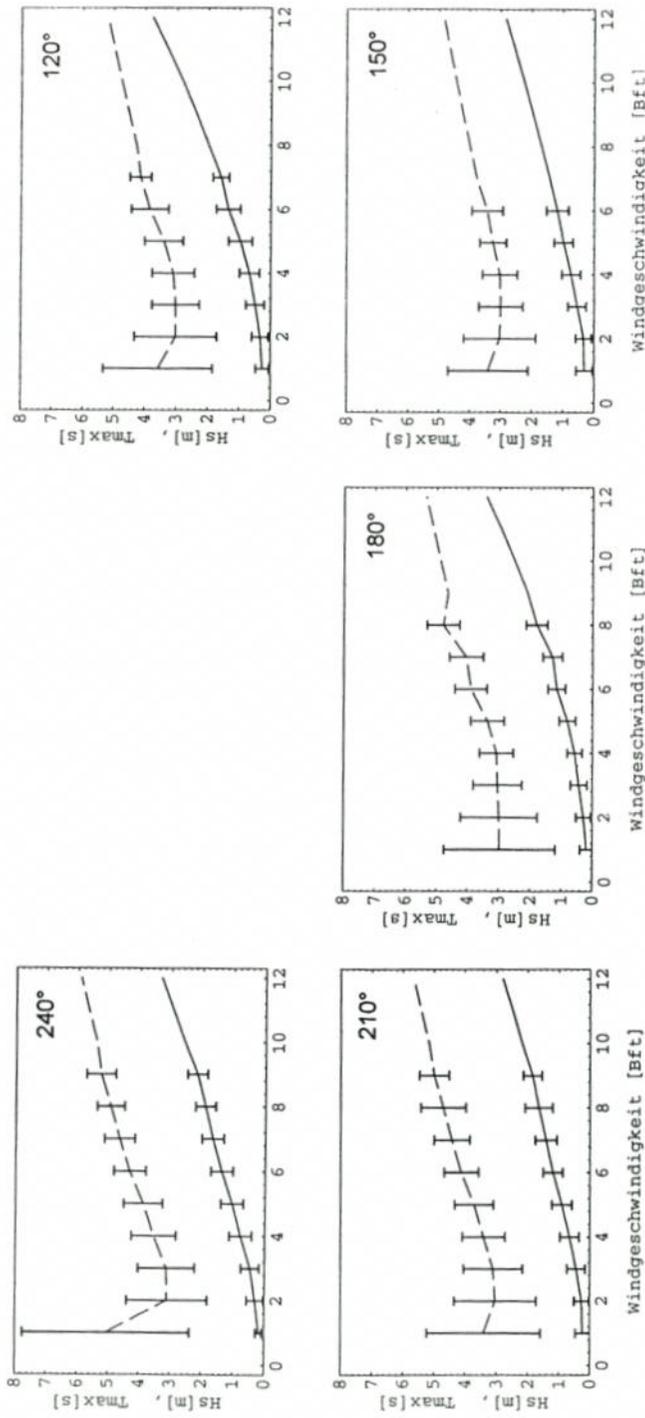


Abb. 6: Abhängigkeit von signifikanter Wellenhöhe (—) und Wellenperiode (- - -) von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe am HYPAS-Gitterpunkt 1783 (54°37'48"N 12°31'12"E) für die Windrichtungen von 0° bis 330°

### 5.1 Seegangsstatistik

Im Teil A des Seegangsatlas sind an 15 HYPAS-Gitterpunkten in der westlichen Ostsee die charakteristischen Parameter Wellenhöhe und Wellenperiode entsprechend der heutigen Bathymetrie in Abhängigkeit von den möglichen Windverhältnissen dargestellt.

Ausgangspunkt war die Verteilung der mittels Windatlas (HINNEBURG et al., 1997, S. 1–164) auf See umgerechneten Barther Windwerte hinsichtlich Windrichtung (in 30-Grad-Schritten) und Windgeschwindigkeit (Beaufort-Skala nach der zwölfteiligen Petersen-Skala der Deutschen Seewarte). Damit sind 144 Klassen verschiedener Windrichtungs-Windgeschwindigkeits-Beziehungen möglich. Die Wellenparameter aus der HYPAS-Datensammlung wurden zunächst auf Bojenverhältnisse korrigiert und dann der zum jeweiligen Zeitpunkt herrschenden Windklasse zugeordnet.

Das Ergebnis dieser statistischen Analyse wird im Teil A des Seegangsatlas gezeigt. Angegeben ist hier auch die Standardabweichung der Wellenparameter innerhalb der jeweiligen Klasse. Stellvertretend für alle bearbeiteten HYPAS-Punkte zeigt Abb. 6 die Verhältnisse für die Position 1783.

Für Windgeschwindigkeiten von 2 bis 10 Bft und Windrichtungen des Sektors 240 bis 120° sind die signifikanten Wellenhöhen unter Beachtung der Wellenrichtung im Teil B des Seegangsatlas auch kartographisch dargestellt (vgl. Abb. 8).

Nicht alle Windklassen sind belegt, manche nur mit wenigen Ereignissen. In diesen Fällen (Anzahl der Ereignisse  $\leq 3$ ) wurden die Wellenparameter über eine Regressionsrechnung (Fit) ermittelt; die Berechnung der Standardabweichung entfiel.

In den Abb. ist der charakteristische Anstieg der Wellenhöhe und der Wellenperiode mit der Windgeschwindigkeit zu erkennen. (Extrapolierte) Höchstwerte von 6,13 m bzw. 6,2 s werden am HYPAS-Punkt 1982 erreicht. Dagegen erreicht die Wellenhöhe am küstennahen HYPAS-Punkt 1984 nur einen Wert von 3,76 m.

Im Vergleich zum Seegangsatlas von SCHMAGER (SHD, 1979) weist der vorliegende Atlas für die Wellenhöhe auf den ersten Blick systematisch niedrigere Werte auf. Dieser Umstand ist zunächst darauf zurückzuführen, dass hier die signifikante Wellenhöhe benutzt wurde, während SCHMAGER die „Wellenhöhe an der Untergrenze der 3 % höchsten Wellen“ darstellt. In Abb. 7 wird dies durch den bei SCHMAGER angegebenen Umrechnungsfaktor von durchschnittlich 0,77 berücksichtigt. Die noch verbleibende Differenz zwischen Wellenhöhe bei Augenschätzung des Seegangs und der berechneten Wellenhöhe entsteht durch die Voraussetzungen im Schmagerschen Wellenatlas (Stationarität, homogenes Windfeld, neutrale Schichtung). In diesem Atlas wird dazu bemerkt, dass die angegebenen Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet tatsächlich in nur 40 bis 50 % der Fälle erreicht werden.

In den mitunter hohen Werten bei 1 Bft spiegelt sich die Tatsache wider, dass ein Wind von 1 Bft eine geraume Zeit wirken muss (Windwirkdauer), bis sich der entsprechende Seegang eingestellt hat. Da die sehr geringen Windgeschwindigkeiten relativ selten sind, hat der Seegang kaum Zeit, sich darauf einzustellen. Es ist somit die Nachwirkung einer häufiger auftretenden höheren Windgeschwindigkeit und die nicht strenge Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Wellenhöhe zu sehen (DIETRICH et al., 1975, S. 350).

Bei der Wellenrichtung wurden Werte, denen weniger als sechs Ereignisse zugrunde liegen, durch den Mittelwert ersetzt. Für den HYPAS-Gitterpunkt 1684 wurden die Differenzen zwischen der Windrichtung und der angeregten Wellenrichtung ermittelt. Es existieren Abweichungen in dem Sinne, dass im Winkelbereich von 200 bis 240° (SW) die Wellenrichtung einen größeren Winkel aufweist als die Windrichtung. Das bedeutet eine leichte Dre-

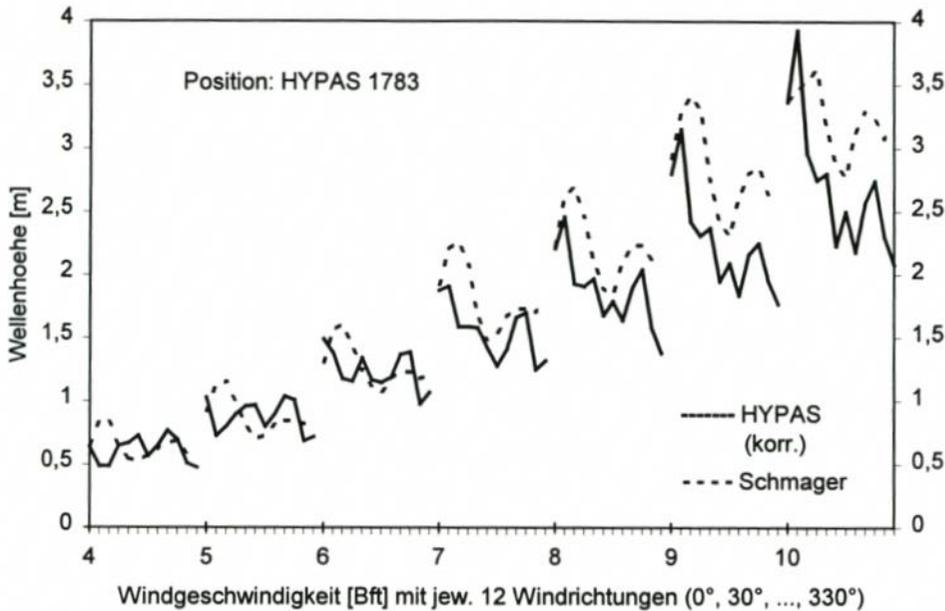


Abb. 7: Vergleich des vorliegenden Seegangs atlas mit dem von SCHMAGER (SHD 1979, S. 1-115) an der Position des zentralen HYPAS-Gitterpunkts 1783. Dargestellt ist die signifikante Wellenhöhe für die Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe von 4 bis 10 Bft und die Windrichtungen von 0°, 30°, ..., 330°

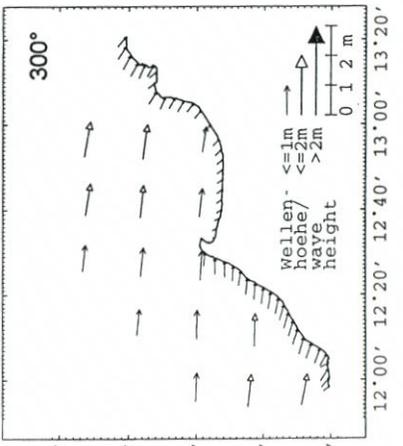
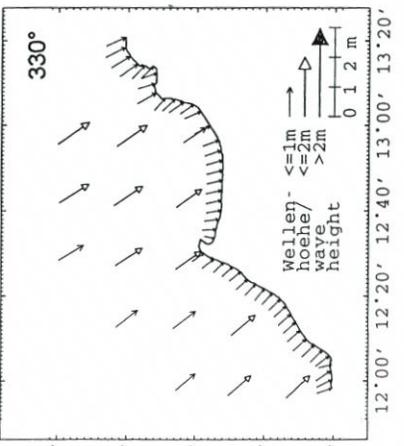
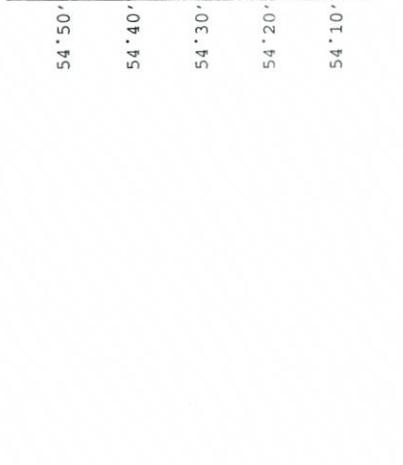
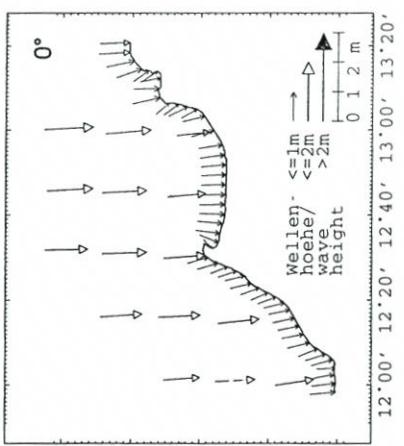
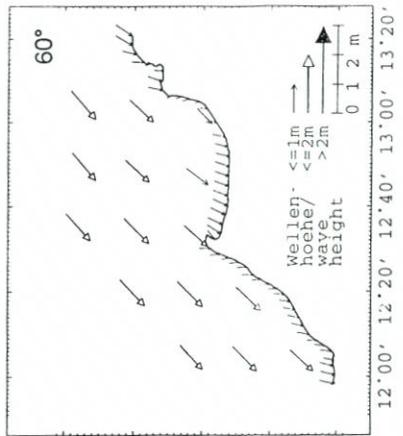
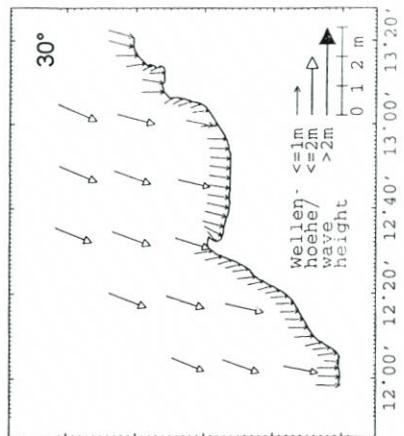
hung im Uhrzeigersinn. Bei den übrigen Winkeln ist eine Abweichung um durchschnittlich 10° (mit großer Streuung) in die Gegenrichtung festzustellen (vgl. Abb. 8).

## 5.2 Seegangmodellierung

Eine wesentliche Aufgabe des Seegangs atlas soll sein, Seegangsdaten zur Bestimmung der Sedimentbilanzen im küstennahen Raum bereitzustellen. Diese Seegangsdaten wurden mit Hilfe des Strahlenmodells für viele Punkte auf einer ausgewählten Tiefenlinie berechnet. Für jeden dieser Punkte muss demzufolge ein vollständiges Gitternetz erzeugt werden, das die Grundlage für die eigentliche Berechnung des Seeganges bildet. Programmtechnisch wurde deshalb das benötigte Strahlennetz für jeden ausgewählten Punkt auf der Tiefenlinie mit dem gleichen Dateinamen vor jeder Modellrechnung (mit allen Anregungsrichtungen und Windstärken) neu erzeugt. So war es möglich, trotz begrenzter Speicherkapazität eine Vielzahl von Modellpunkten nacheinander zu bearbeiten.

Die Figuren in Abb. 8 zeigen Berechnungen für unterschiedliche Anregungsrichtungen und Windstärken. Die Pfeilart und -länge ist ein Maß für die signifikante Wellenhöhe entsprechend dem angegebenen Maßstab, gleichzeitig wird die Richtung des auf die Küste einwirkenden Seeganges angegeben. Zur besseren Übersicht ist nur jeder zehnte Punkt dargestellt. Die Rechnungen wurden für alle Windstärken von 2 bis 10 Bft und die für einen Sedimenttransport relevanten Anregungsrichtungen zwischen 240 und 120° durchgeführt, so dass sich insgesamt 81 Fälle ergeben.

Die Grafiken enthalten ferner die Wellenhöhen an den 15 HYPAS-Punkten des Untersuchungsgebietes.



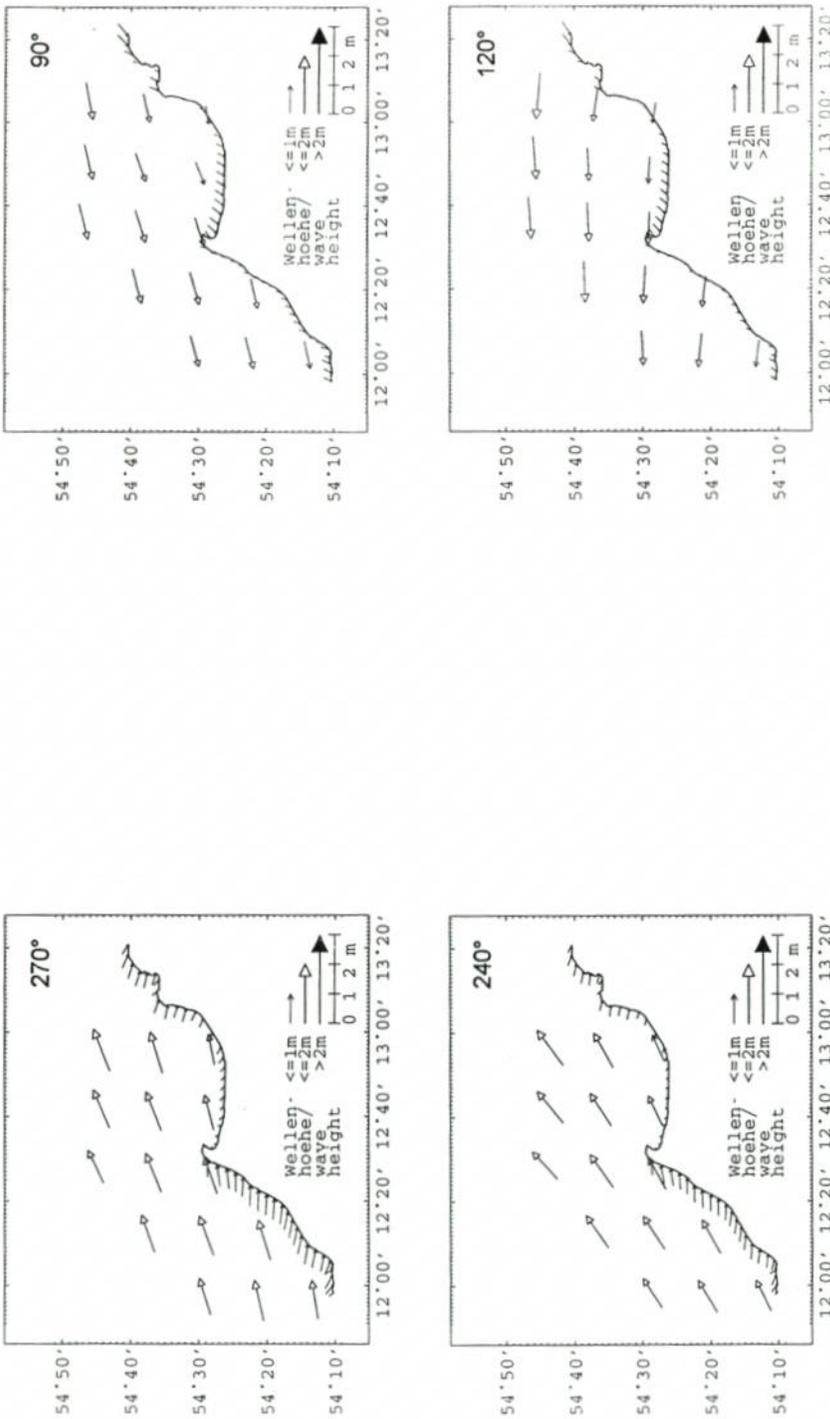


Abb. 8: Wellenhöhe und -richtung entlang der 5-m-Tiefenlinie zwischen Warnowmündung und Halbinsel Wittow nach dem Strahlenmodell von WOLF (1993) und an den HYPAS-Punkten nach statistischer Analyse. Die Wellenhöhe und -richtung darstellenden Pfeile zeigen auf die Tiefenlinie bzw. auf die HYPAS-Punkte. Die zugrunde gelegte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe beträgt 6 Bft bzw. 12,3 m/s; der jeweilige Richtungswinkel ist in der Figur angegeben. Die Ordinate enthält die geographische Breite (N) und die Abszisse die geographische Länge (E).

Die Darstellungen geben recht eindrucksvoll die Seegangbelastung im Bereich der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern wieder. Die höchsten signifikanten Wellenhöhen werden für die Anregungsrichtungen NW über N bis NE erreicht. Westlich des Darß werden auch bei anregendem Seegang aus Richtung Westen große Wellenhöhen vorgefunden. Die Bucht östlich vom Darßer Ort liegt dagegen fast ständig im Schutz der sie umgebenden Landmassen, dort treten nur bei Seegangsrichtungen aus Nordost und Ost größere Wellenhöhen auf.

## 6. Schlussbemerkungen

Die vorliegenden, in einem Seegangs atlas mündenden Untersuchungen analysieren das Verhalten relevanter Seegangparameter im unmittelbaren Küstenstreifen vor Darß und Zingst und im vorgelagerten Ostseegebiet in Abhängigkeit von den herrschenden Windverhältnissen. Dies ist Voraussetzung zur Aufklärung der Abtragungs-, Transport- und Sedimentationsprozesse in dem betreffenden Küstengebiet (s. STEPHAN und SCHÖNFELDT, in diesem Heft). Über diesen ursprünglichen Zweck hinaus können aber auch Bereiche wie Fischerei, Seevermessung oder Segelsport von der differenzierten Beschreibung des Seegangs profitieren.

Wenn aus Klimamodellen vergleichbar hochaufgelöste Winddaten entnommen werden (s. u. a. KOLAX und HUPFER, in diesem Heft), ist es schließlich mit Hilfe der hier entwickelten Beziehungen möglich, die Auswirkungen auf den Seegang und die zugehörigen Strömungssysteme und damit auf die veränderten Materialtransportprozesse in der ufernahen Zone abzuschätzen.

Der Seegangs atlas (BÖRNGEN et al., 1998) kann vom Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, Stephanstraße 3, 04103 Leipzig bezogen werden. Bei Bedarf können auch die für den Atlas berechneten Daten angefordert werden.

## Dank

Die Forschungen zur *Seegangsbelastung vor der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern* sind Bestandteil des vom Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie im Rahmen des Bund-Länder-Programms *Klimaänderung und Küste* geförderten Verbundprojektes Klimawirkung und Boddenlandschaft (KLIBO, Fkz 01LK9403).

## 7. Schriftenverzeichnis

- 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, Teil II. – Wissensch. Mitt. a. d. Inst. f. Meteorol. d. Univ. Leipzig u. d. Inst. f. Troposphärenforsch., Bd. 10, 1998.
- DIETRICH, G.; KALLE, K.; KRAUSS, W. u. SIEDLER, G.: Allgemeine Meereskunde. Eine Einführung in die Ozeanographie. – Berlin, Stuttgart, 1975.
- GÜNTHER, H. u. ROSENTHAL, W.: Shallow water surface wave model based on the Texel-Marsen-Arsloe (TMA) wave spectrum. – Proceedings of the 20<sup>th</sup> Congress of the International Association of Hydraulic Research (IAHR), Moskau, 1983.
- GÜNTHER, H.; KOMEN, G. J. u. ROSENTHAL, W.: A Semi-Operational Comparison of Two Parametrical Wave Prediction Models. – Dt. Hydrogr. Z., Bd. 37, 1984.
- HASSELMANN, S. u. HASSELMANN, K.: Computations and Parameterizations of the Nonlinear

- Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part I: A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral. – *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 15, 1985.
- HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K.; ALLENDER, J. H. u. BARNETT, T. P.: Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part II: Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models. – *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 15, 1985.
- HINNEBURG, D.; RAABE, A. u. TETZLAFF, G.: Wind- und Seegangsatlas für das Gebiet um Darß und Zingst, Teil 1: Windatlas. – *Wissensch. Mitt. a. d. Inst. f. Meteorol. d. Univ. Leipzig u. d. Inst. f. Troposphärenforsch.*, Bd. 5, Leipzig, 1997.
- KITAIGORODSKIJ, S. A.; KRASITSKIY, V. P. u. ZASLAVSKIY, M. M.: On Phillips' Theory of Equilibrium Range in Spectra of Wind-Generated Gravity Waves. – *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 5, 1975.
- KITAIGORODSKIJ, S. A.: On the Theories of the Equilibrium Range in the Spectrum of Wind-Generated Gravity Waves. – *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 13, 1983.
- KOLAX, M. u. HUPFER, P.: Schwankungen der atmosphärischen Zirkulation und die Veränderlichkeit des Seegangs vor der deutschen Ostseeküste. – *Die Küste*, vorliegendes Heft.
- RIECHMANN, F.: Seegangsbelastung vor der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommern. – *KLIBO-Jahresbericht 1996*, BMBF-Projekt 01LK9403, Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 1997.
- Seehydrographischer Dienst der DDR [SHD]: Atlas zur Ermittlung der Wellenhöhe in der südlichen Ostsee. – Rostock, 1979.
- SOBEY, R. J.: Wind Wave Prediction. – *Annual Rev. Fluid Mech.*, Vol. 16, 1986.
- STEPHAN, M. u. SCHÖNFELDT, H.-J.: Küstenentwicklungsmodell zur langfristigen Berechnung des Sedimenttransports in Abhängigkeit von Windverteilung und welleninduziertem Brandungsstrom an der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns zwischen Warnemünde und Hiddensee. – *Die Küste*, vorliegendes Heft.
- WAMDI Group\*: The WAM Model, a Third-Generation Ocean Wave Prediction Model. – *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 18, 1988.
- \* HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K.; JANSSEN, P. A. E. M.; KOMEN, G. J.; BERTOTTI, L.; LIONELLO, P.; GUILLAUME, A.; CARDONE, V. C.; GREENWOOD, J. A.; REISTAD, M.; ZAMBRESKY, L. u. EWING, J. A.
- WOLF, TH.: Modellierung von Seegang und welleninduzierter Uferparallelströmung an der Nordküste der Halbinsel Zingst. – *Dissertation A*, Universität Leipzig, FB Physik, 1993.
- WOLFRAM, ST.: *Mathematica. A System for Doing Mathematics by Computer.* – Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Redwood City CA., 1991.
- YOUNG, I. R.: A Shallow Water Spectral Wave Model. – *J. Geophys. Res.*, Vol. 93, 1988.