

Einsatzmöglichkeiten der numerischen Seegangsvorhersage

Heinz Günther

GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH

Einleitung

Die Aktivitäten des Menschen auf dem Meer aber auch auf Seen und an Küsten werden in vielen Bereichen durch den Seegang beeinflusst und behindert, da Seegang große Energiemengen speichern, über weite Entfernungen transportieren und im Küstenvorfeld oder an der Küstenlinie durch Wellenbrechung freisetzen kann. Insbesondere sind die Schifffahrt See- und Küstenbauwerke den Gewalten des Seegangs ausgesetzt. Daraus ergeben sich zwei wichtige Anwendungsbereiche der numerische Seegangsberechnung:

- die Prognose des Seeganges analog zur Wettervorhersage aus aktuellen oder vorhergesagten Windfeldern für alle aktiven Operationen auf See, z. B. für die Seeschifffahrt zur Routenplanung, für die Versorgung und den Betrieb von Ölplattformen.
- die Nachhersage (Hindcast) des Seegangs aus historischen Winddaten zum einen für spezielle Ereignisse (Gutachten) oder zur Erstellung von Klima- und Extremwertstatistiken, z. B. für die Bemessung von Bauwerken.

Neben diesen direkten Wirkungen des Seegangs haben die durch Seegang induzierten bzw. beeinflussten Prozesse in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Insbesondere gilt dies für alle Austauschprozesse mit der Atmosphäre. Energie-, Impulsfluß und der Gasaustausch sind abhängig vom Seegangszustand. Diesem Phänomen wird z.B. in Klimamodellen bei der Kopplung von Atmosphären- und Ozeanmodellen Rechnung getragen. In den Ozeanmodellen selbst ist Seegang ein Prozeß, der die Durchmischung der Deckschicht wesentlich mitgestaltet. Im flachen Wasser gibt zerfallender Seegang Energie und Impuls an die Strömung weiter. Typisch hierfür sind die seegangsinduzierten küstenparallelen Strömungen. Diese Strömungen und die Orbitalbewegung des Seeganges wirken auch auf den Seeboden. Wegen ihrer Stärke ist besonders die Orbitalbewegung der wesentliche Prozeß für die Erosion von Sedimenten. Dies bedeutet, daß Sedimenttransporte und die damit verbundenen Sedimentations- und Erosionszonen in Küstengewässern nur durch gekoppelte Modelle von Seegang und Strömung zu berechnen sind.

Ein weiteres Anwendungsgebiet das in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat, ist die Interpretation von Satellitenmessungen über See. Aktive Mikrowellenmeßgeräte wie z. B. das zur Windmessung benutzte

Scatterometer registrieren die Intensität des an den Zentimeterwellen des Seeganges rückgestreuten Radarsignals. Die Umsetzung der Rückstreuintensitäten in Windgeschwindigkeiten ist abhängig von den langen Seegangswellen, da diese die kurzen Wellen modulieren.

Durch die Fortschritte in der numerischen Seegangsvorhersage in den letzten 20 Jahren sind alle oben vorgestellten Bereiche ein Anwendungsgebiet der Modellierung geworden. Im folgenden werden zunächst die wesentlichen Grundlagen der Seegangsvorhersage kurz beschrieben. Danach wird an einigen Beispielen die Vorgehensweise und typische Ergebnisse diskutiert.

Grundlagen

Zur Berechnung von Seegang lassen sich zwei generelle Ansätze unterscheiden, die wie folgt charakterisiert werden können:

- deterministische Modelle beschreiben die Auslenkung der Seeoberfläche an jedem Ort zu jedem Zeitpunkt. Zur numerischen Behandlung der zugrundeliegenden Differentialgleichungen ist eine sehr feine Auflösung im Ort (einige Meter) und in der Zeit (einige Sekunden) erforderlich, da mehrere Gitterpunkte pro Wellenlänge und einige Zeitschritte pro Wellenperiode benötigt werden. Typische Anwendungsbereiche sind daher kleine Gebiete, z. B. Hafengebiete.
- statistische Modelle beschreiben den Seegang als Überlagerung von Elementarwellen und die prognostische Variable ist das zweidimensionale Seegangsspektrum, das die Energiedichteverteilung der Wellen über die Frequenz oder Periode und die Laufrichtung angibt. Diese Beschreibung impliziert, daß innerhalb einer Raumzeitbox, die einige Wellenlängen bzw. Wellenperioden enthält, der Seegang als statistisch homogen angenommen wird. Damit sind wesentlich gröbere Gitterauflösungen möglich. Dadurch ist Seegang auch in großen Meeresgebieten berechenbar.

Grundlage aller statistischen Seegangmodelle (Komen et al., 1994) ist die Transportgleichung für das Spektrum der Wirkungsdichte $n(t, \mathbf{x}, \mathbf{k})$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{x}n + \nabla_{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{k}n = s \quad (1)$$

wobei

$\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ der Ortsvektor und $\mathbf{k} = (k_1, k_2)$ der Wellenzahlvektor ist. Die Geschwindigkeiten sind gegeben durch

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= +\nabla_{\mathbf{k}}\Omega \\ \dot{\mathbf{k}} &= -\nabla_{\mathbf{x}}\Omega\end{aligned}\quad (2)$$

Die Kreisfrequenz Ω und die Frequenz f sind definiert durch die Dispersionsrelation,

$$\Omega = 2\pi f = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (4)$$

die abhängig ist von der Wassertiefe d und dem Strömungsvektor \mathbf{v} . Mit σ wird die relative Frequenz bezeichnet.

Die Quellfunktion s ist die Summe aus den verschiedenen Prozessen, die die lokale Änderung der Wirkungsdichte beschreiben.

$$s = s_{\text{in}} + s_{\text{dis}} + s_{\text{nl}} + s_{\text{bot}} \quad (5)$$

s_{in} beschreibt das Wachstum der Wirkungsdichte durch den Wind, s_{dis} die Dissipation im Wasserkörper und an der Seeoberfläche, s_{nl} die Umverteilung durch die nicht-lineare Wechselwirkung und s_{bot} die Dissipation am Boden. Standardformen für die verschiedenen Quellfunktionen sind bei Komen et. al., 1994 diskutiert.

Aus dem im Seegangmodell berechneten Spektrum der Wirkungsdichte lassen sich durch Transformation und Integration die Energiedichteverteilung und kennzeichnenden Seegangsrößen bestimmen. Für die praktische Anwendung sind dies im allgemeinen die signifikante Wellenhöhe, eine kennzeichnende Wellenperiode und die mittlere Seegangslaufrichtung. Angaben dieser Größen getrennt nach Windsee und für verschiedene Dünungssysteme sind möglich.

Im wesentlichen unterscheiden sich die modernen numerischen Seegangmodelle in der numerischen Behandlung der Transportgleichung (1) und in der Parametrisierung der Quellfunktionen insbesondere der nicht-linearen Wechselwirkung.

Bei GKSS werden verschiedene Modelle je nach Fragestellung und Anwendungsbereich eingesetzt:

Die Modelle HYPA (Günther et. al., 1979) für den tiefen Ozean und HYPAS (Günther et. al., 1984) für flache Meeresgebiete. HYPA und HYPAS sind Modelle der zweiten Generation, d.h. beide benutzen eine Parametrisierung der Quellfunktionen entsprechend der JONSWAP (Hasselmann et. al., 1973) bzw. TMA (Bouws, 1985) Ergebnisse. Dadurch sind die Anforderungen an

Rechenleistung wesentlich geringer als durch die explizite Behandlung der Quellfunktionen im WAM Modell (Komen et. al., 1994), Dieses Modell der dritten Generation wird zur Untersuchung von Klimaänderungen im Rahmen des WASA Projekts bei GKSS betrieben.

Das Refraktionsmodell REFRAC (Gayer et al 1996) wird für die Seegangsberechnung im Küstenvorfeld eingesetzt. Insbesondere werden mit diesem Modell die durch Boden- und Strömungsrefraktion beeinflussten Seegangenergiewege sehr genau bestimmt, so daß in topographisch komplizierten Gebieten, die eine hohe Auflösung erfordern, genaue Angaben an einzelnen Punkten erzielt werden können.

Vorgehensweise und Anwendungsbeispiele

Seegangsprognose

Die numerische Lösung der Transportgleichung erfolgt auf einem diskreten Gitter. Die Abbildung 1 aus Behrens und Schrader, 1994, zeigt beispielhaft die beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und beim Deutschen Wetterdienst (DWD) seit Juni 1992 benutzte Gitterkonfiguration für die operationelle Routinevorhersage des Seeganges. Das System umfaßt das Tiefwassermodell HYP A für den Nordatlantik (Auflösung 150km) und Flachwassermodelle HYPAS für den nordeuropäischen Schelf (Auflösung 30km) und die Ostsee (Auflösung 15.875km). Diese Modelle werden angetrieben durch Windfelder aus den atmosphärischen Modellen des Deutschen Wetterdienstes und liefern täglich 7-tägige Vorhersagen für den Nordatlantik und 3-tägige Vorhersagen für den nordeuropäischen Schelf und die Ostsee. Diese berechneten Seegangsdaten werden für die Aufgaben der Dienste z. B. für die Routenberatung in der Schifffahrt benutzt.

Dieses Modellsystem ist vielfältig verifiziert worden (Behrens und Schrader, 1994). Die Abbildung 2 zeigt Vergleiche von berechneten und gemessenen signifikanten Wellenhöhen an der Forschungsplattform Nordsee (siehe Abb. 1). Die Übereinstimmung ist recht gut. Die mittlere Abweichung, berechnet über ein Jahr betrug 15cm und die Standardabweichung weniger als 46 cm.

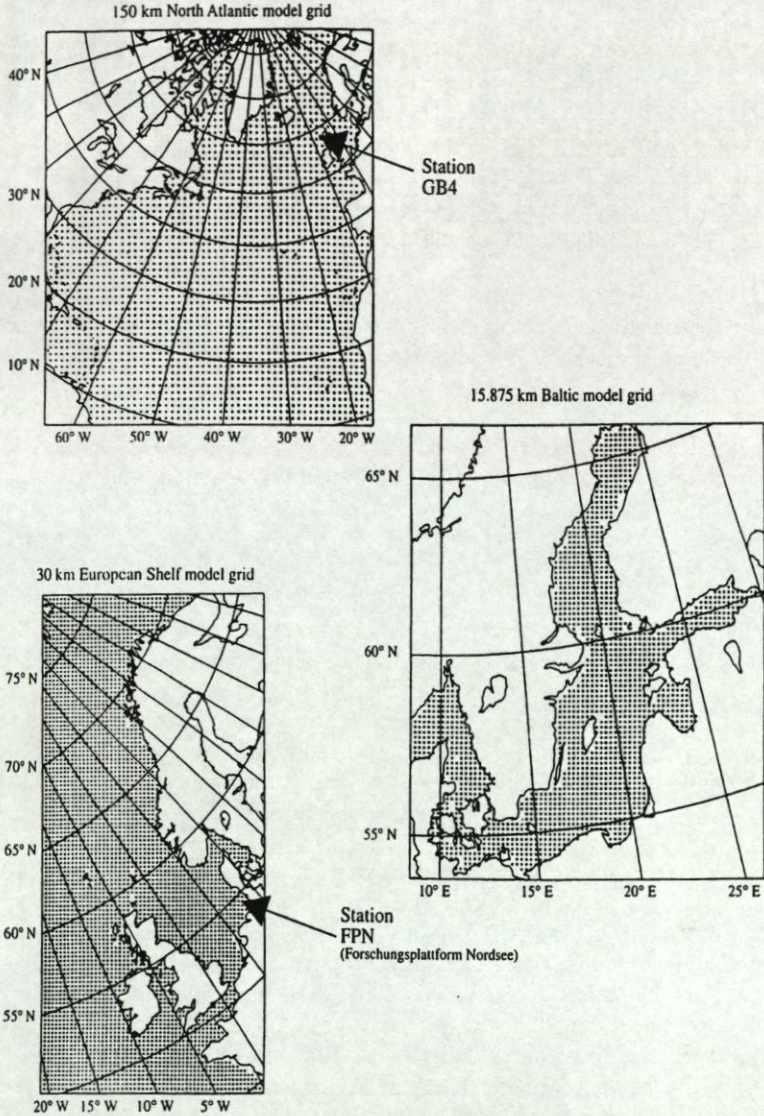


Abb. 1: Gitter des BHS-DWD Routinevorhersagesystems für Seegangsberechnungen

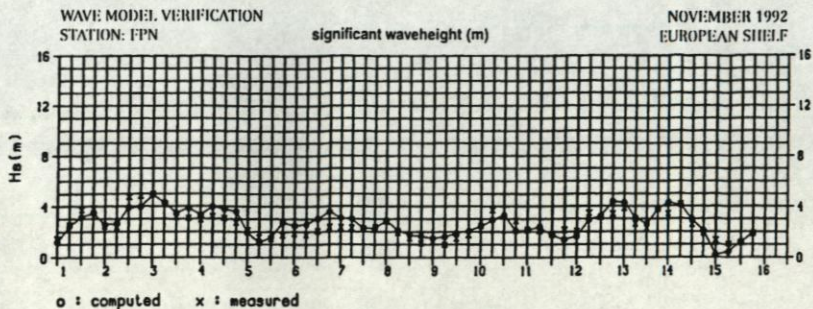


Abb. 2: Zeitserien der gemessenen und berechneten signifikanten Wellenhöhe an der Forschungsplattform Nordsee vom 1.- 16. November 1992. (aus Behrens und Schrader, 1994)

Diese Werte, speziell die mittlere Abweichung, konnten zwischenzeitlich verkleinert werden durch eine bessere Auflösung und Qualität der antreibenden Windfelder.

Seegangshindcast

Während die zum Antrieb eines Seegangmodells benötigten Windfelder heutzutage in hinreichender Qualität für Prognoserechnungen bei den Wetterdiensten auf den Computern zur Verfügung stehen, gilt dies nur eingeschränkt für Anwendungen mit historischen Windfeldern im sogenannten Hindcast, da digitale Windfelder in entsprechend hoher Auflösung in Raum (ca. 100 km) und Zeit (alle 3-6 Stunden) erst in den letzten Jahren durch Einführung der regionalen Wettermodelle erzeugt und gespeichert werden.

Das wesentliche Anwendungsziel des Seegangshindcasts ist es, Basisdaten für statistische Untersuchungen zu erzeugen, da Naturmessungen in den interessierenden Seegebieten oftmals gar nicht oder nicht über einen entsprechend langen Zeitraum, der statistisch signifikante Aussagen erlaubt, zur Verfügung stehen. Für klimatische Aussagen sind dies mindestens 5 Jahre, für Extremwertanalysen die stärksten Stürme aus den letzten 20-40 Jahren, für die antreibenden Windfelder ist es daher erforderlich, daß diese zeitlich konsistent sind. Dieses ist bei den Routinefeldern der Wetterdienste, wenn sie überhaupt zur Verfügung stehen, nur selten gegeben, da die Methoden der Windberechnung in den letzten Jahren stetig verbessert worden sind.

Im folgenden soll am Beispiel des Projektes "Erstellung einer Klimatologie und Extremwertanalyse für die Ostsee im Bereich der Warnemünder Hafeneinfahrt" (Gayer et. al., 1995) die typische Vorgehensweise eines Seegangshindcasts

beschrieben werden. Dies Projekt wurde von der GKSS für die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführt, mit dem Ziel Basisseegangdaten für die Bemessung der Bauwerke bei der Neugestaltung der Hafeneinfahrt zu berechnen. Z. B. wurden die Ergebnisse dieses Hindcasts von der BAW zur Ansteuerung ihres physikalischen Modelles des Hafens von Warnemünde benutzt.

Klimastatistiken

Zur Erzeugung von Klimastatistiken wurden mit dem Seegangsmodell HYPAS auf dem in Abbildung 1 gezeigten Ostseegitter der Seegang in den fünf Jahren 1988-1993 kontinuierlich nachgerechnet. Die Seegangsspektren und die daraus berechneten integralen Parameter (sig. Wellenhöhe, mittlere und kennzeichnende Wellenperiode und Seegangslaufrichtung) wurden an allen Gitterpunkten im deutschen Gebiet der Ostsee alle 3 Stunden abgespeichert. Das Modell wurde mit Windfeldern aus der Analyse des Amtes für Wehrgeophysik angetrieben. Diese Felder liegen alle 6 Stunden auf einem Gitter mit einer Auflösung von 127km vor und wurden auf das Seegangsgitter bilinear interpoliert. In der Zeit wurden diese Felder mit Hilfe eines Verfahrens das die Zugbewegungen der Tiefdruckgebiete berücksichtigt, auf die Modellzeitschrittweite von 15min interpoliert. Diese Windfelder werden auch vom Amt für Wehrgeophysik zum Antrieb ihres Seegangsmodells benutzt und zeichnen sich durch eine gute Konsistenz aus, da bei der Erstellung stets auf die Anforderungen einer guten Seegangsvorhersage geachtet worden ist.

Zur Verifikation des Systems Windfelder, Seegangsberechnungen, wurden Vergleiche mit Bojenmessungen bei Zingst und vor Warnemünde durchgeführt. Die Tabelle 1 zeigt die Statistik des Vergleiches der berechneten und gemessenen signifikanten Wellenhöhen (H_s) bei Warnemünde in den Monaten Februar und März 1993.

Monat 1993	Anzahl	Modell			Boje			Boje - Modell				
		x_{Max} (m)	x_q (m)	S_x (m)	y_{Max} (m)	y_q (m)	S_y (m)	d_{max} (m)	d_q (m)	S_d (m)	Cor	Scat %
2	99	2,00	0,69	0,53	2,11	0,79	0,52	0,79	0,10	0,29	0,84	42
3	176	1,90	0,73	0,54	1,71	0,66	0,33	0,79	-0,07	0,35	0,77	49
gesamt	275	2,00	0,72	0,54	2,11	0,71	0,40	0,79	-0,01	0,33	0,80	46

Tab. 1: Statistik des Vergleiches der berechneten und gemessenen sig. Wellenhöhen bei Warnemünde in den Monaten Februar und März 1993.

Die maximal gemessene Wellenhöhe (y_{max}) in diesen beiden Monaten liegt mit 2.11m 11cm über dem errechneten Wert (x_{max}). Während die Mittelwerte (x_q und y_q) sich in den einzelnen Monaten um $d_q = 10\text{cm}$ bzw um $d_q = -7\text{cm}$

unterscheiden, ist der Unterschied über den gesamten Zeitraum mit -1cm verschwindend gering. Die Streuung der Messungen (S_Y) und Rechnungen (S_X) um ihre Mittelwerte beträgt etwa 53cm. Eine Ausnahme bilden die Messungen im März mit einer Streuung von 33cm. Die Standardabweichungen zwischen Messung und Modell sind mit $S_d = 29$ cm im Februar, 35cm im März und 33cm im gesamten Zeitraum kleiner als die Streuungen der einzelnen Datensätze. Der Streuindex (Scat) von 46%, der die Standardabweichung mit dem Mittelwert der Messungen skaliert, und die Korrelation (Cor) von 0.80 sind bei dieser Größenordnung der Wellenhöhen zu akzeptieren. Auch nach internationalen Maßstäben (Standardabweichungen (S_d) kleiner 50cm bei signifikanten Wellenhöhen unter 5m und nahezu keine systematische Abweichung (d_q) wurde eine sehr gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung an der Station Warnemünde erreicht. Analoge Vergleichsstatistiken wurden an der Station Zingst erreicht.

Die so erzeugten Zeitreihen, bestehend aus 14521 Werten, wurden an ausgewählten Gitterpunkten zu Klimastatistiken verarbeitet. Die Tabelle 2 zeigt die gemeinsame Verteilung der signifikante Wellenhöhe (H_s) und TM2 Periode (T_{m2}) am Gitterpunkt Warnemünde Hafen. Die größte Wellenhöhe betrug 3.8m - 4,0m und hatte eine Periode zwischen 8,8s und 9,2s. Die längste Periode lag zwischen 9.2s und 9.6s und entsprach einer Wellenhöhe von 3.0m - 3,2m. Beide Ereignisse wurden genau einmal festgestellt. Mit 3681 Ereignissen traten Perioden zwischen 2.8s und 3.2s am häufigsten auf. Diese entsprachen Wellenhöhen kleiner als 0.8m, wobei die größte Anzahl kleiner als 0.4m war. Perioden kleiner als 2.8s und Wellenhöhen unter 0,1m wurden vom Modell nicht aufgelöst. Diese Situation wurde 1195 mal beobachtet und ist in der kleinsten Wellenhöhen- und Periodenklasse angegeben.

Die gemeinsame Verteilung zeigt zwei Gruppierungen der Einträge. Eine Gruppe ist durch einen Anstieg der Wellenhöhen bei längeren Perioden gekennzeichnet. Dies ist ein typisches Merkmal für Seegang, der dem Einfluß des Windes unterliegt. Die zweite Gruppe zeigt, daß bei kleinen Wellenhöhen auch lange Perioden auftreten. Diese Gruppe entspricht Dünungsereignissen.

		TM2 Periode (s)																								
		2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6	8,0	8,4	8,8	9,2	9,6	10,0	Σ	≥		
sig. Wellenhöhe (m)	≥																									
	5,0																								50	
	4,8																								48	
	4,6																								46	
	4,4																								44	
	4,2																								42	
	4,0												1												140	
	3,8																								38	
	3,6												7	1												836
	3,4											2	4	1												734
	3,2											8	9	2												1932
	3,0											54	10													6430
	2,8											10	37	7												5428
	2,6											156	82	15												25326
	2,4											34	213	34												28224
2,2											5	246	153	8											41222	
2,0											1	17	188	48	1										25520	
1,8											17	531	447	31											102618	
1,6											7	159	587	37											79016	
1,4											92	737	100												92914	
1,2											24	669	347												104012	
1,0											1	730	651												138210	
0,8											167	1083	901	14	1										216908	
0,6											578	586	135	10	2	3									131406	
0,4											816	535	113	59	25	17	2								156804	
0,2											1572	797	254	132	67	63	17	17	12	4	8	3	1	1	294802	
Σ		1572	2358	2459	2035	1569	1352	1279	971	623	232	61	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14521	
Σ		2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0	6,4	6,8	7,2	7,6	8,0	8,4	8,8	9,2	9,6	10,0	Σ	≥		

Tab. 2: Verteilung der signifikanten Wellenhöhe gegen die TM2 Periode. Angegeben sind die Anzahl der Ereignisse am Gitterpunkt Warnemünde Hafen, die in den berechneten 5 Jahren auftraten.

Entsprechende Diagramme wurden nicht nur für den gesamten Zeitraum von 5 Jahren, sondern auch getrennt nach den Jahreszeiten erstellt. Neben dem hier diskutierten Klimadiagramm Wellehöhe - Wellenperiode wurden auch die in Tabelle 3 angegebenen Verteilungen ausgewertet.

Nr.	y-Achse	x-Achse
1	sig. Wellenhöhe	Peakperiode
2	sig. Wellenhöhe	TM2 Periode
3	sig. Wellenhöhe	Windgeschwindigkeit
4	sig. Wellenhöhe	Seegangsrichtung
5	Windgeschwindigkeit	Windrichtung
6	sig. Wellenhöhe(WMO)	Windgeschwindigkeit (WMO)
7	sig. Wellenhöhe	Dauer
8	Windgeschwindigkeit	Dauer

Tab. 3: Erstellte Diagramme

Extremwertanalyse

Für eine Extremwertanalyse, z. B. die Abschätzung der größten zu erwartenden Wellenhöhe in 100 Jahren ist der oben beschriebene Datensatz nicht geeignet, da er nur wenige Stürme enthält. Typischerweise werden für diese Extrapolation die Daten von den 20-30 höchsten Wellenereignissen aus einem Zeitraum von 20-40 Jahren benötigt, um zu signifikanten Abschätzungen zu gelangen. Da eine Berechnung des Seeganges und insbesondere die Erstellung der erforderlichen Windfelder über solch einen Zeitraum sehr aufwendig ist, wird die Berechnung auf vorher ausgewählte Stürme beschränkt, die für das betrachtete Seegebiet relevant sind.

In dem hier dargestellten Projekt wurden zur Identifizierung die Windmessungen der Meteorologischen Station Warnemünde des DWD von 1954 bis 1993 benutzt. Es wurden 402 Sturmereignisse (Windgeschwindigkeiten größer als 15m/s für länger als eine Stunde) festgestellt. Da für die Hafeneinfahrt von Warnemünde nur Stürme aus nördlichen Richtungen ein Risiko darstellen, wurden die stärksten 39 Stürme aus diesem Richtungsbereich für den Hindcast ausgewählt.

Da digitale Windfelder nicht zur Verfügung standen, wurden die Druckfelder aus den Analysekarten des Seewetteramtes Hamburg digitalisiert und mit einem Grenzschichtmodell die Windfelder berechnet. Abbildung 3 zeigt ein digitalisiertes Druckfeld und Abbildung 4 das daraus berechnete Windfeld. Im Mittel wurden für jeden Sturm 17 Karten bearbeitet. Dies entspricht einer Berechnungsdauer von 4 Tagen pro Sturm und enthält somit die Wachstums- und

Zerfallsphase für den Seegang. Aus diesen Windfeldern wurde mit dem HYPAS Modell wie bei dem 5 Jahreshindcast der Seegang berechnet. Die Ausgabe erfolgte jedoch stündlich, um die maximale Wellenhöhe in jedem Sturm zu bestimmen.

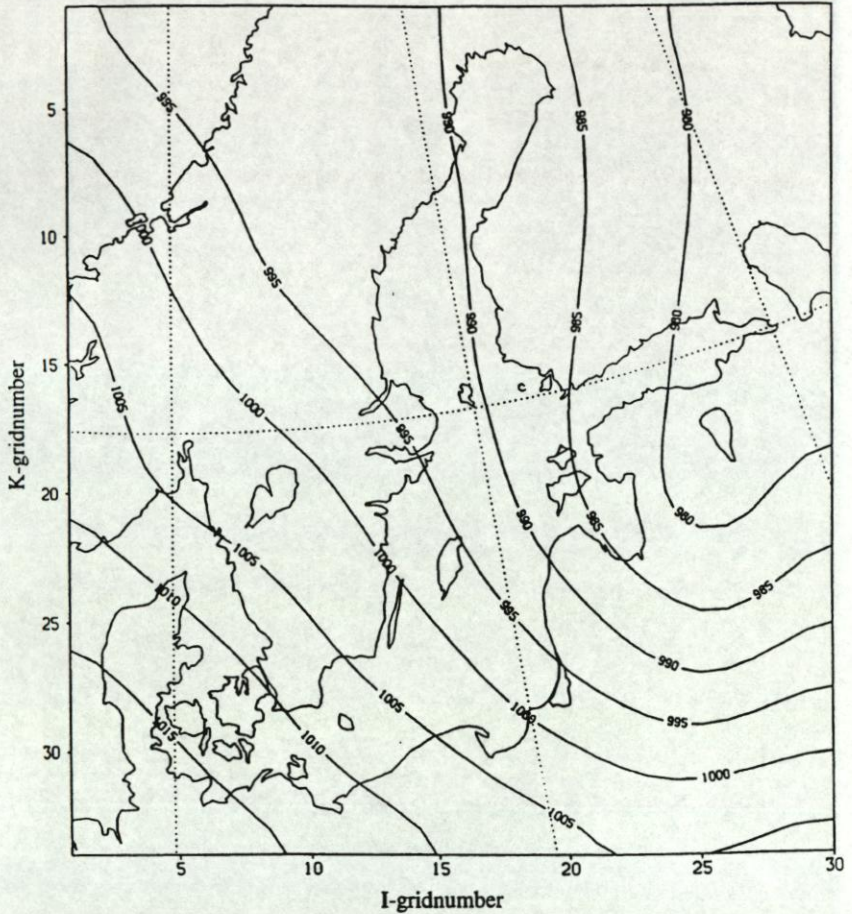


Abb. 3: Isobaren des digitalisierten und auf das Seegangmodellgebiet interpolierten Druckfeldes am 23. November 1973 um 12:00 Uhr.

CONTOURS OF WINDSPEED AND WIND VECTORS

731123 120000

→ 10 M/S
→ 20 M/S

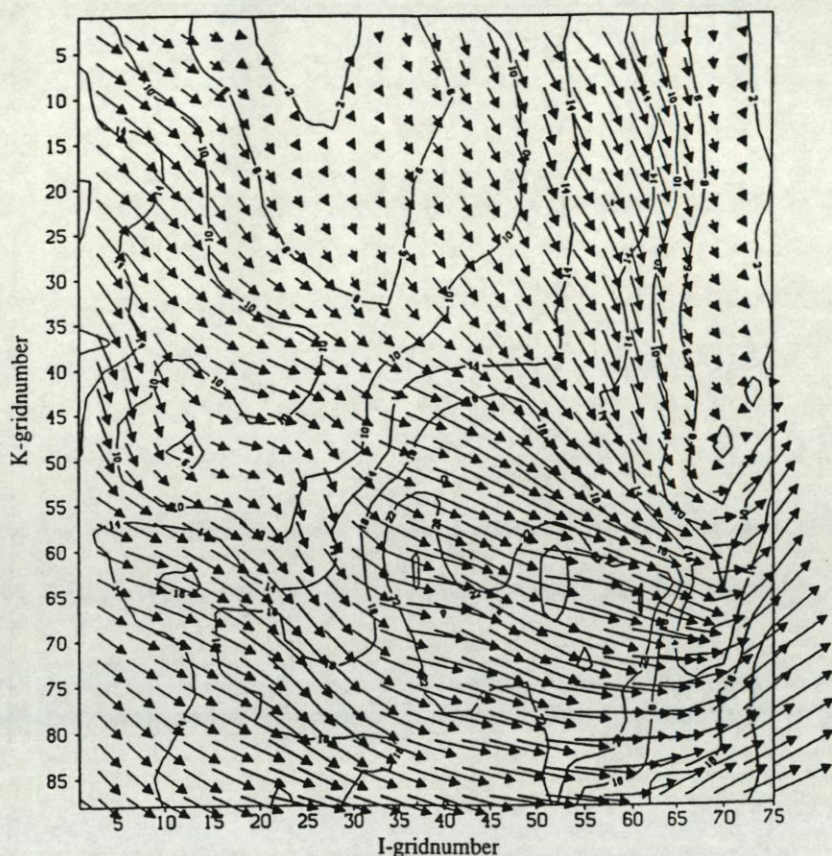


Abb. 4: Linien gleicher Windgeschwindigkeit und Windvektoren des Windfeldes am 23. November 1973 um 12:00 Uhr berechnet aus dem Druckfeld in Abb. 2. Zur besseren Übersicht sind die indvektoren nur an jedem 3. Seegangsmodellgitterpunkt dargestellt.

Um die extremen signifikanten Wellenhöhen zu erfassen, wurden für die Analysen die 20 höchsten Ereignisse benutzt. Diese sind in Abbildung 5 am Gitterpunkt Warnemünde Hafen dargestellt zusammen mit der Peakperiode, dem Richtungssektor aus dem der Seegang einläuft und der Sturmnummer. Die

Abbildung zeigt, daß signifikante Wellenhöhen bis 3.6m erreicht wurden, im Sturm 180 (Dezember 1957) aus dem Richtungssektor NNO mit einer Peakperiode von 10.1s und im Sturm 3 (Januar 1968) mit einer Peakperiode von 9.0s aus Nord.

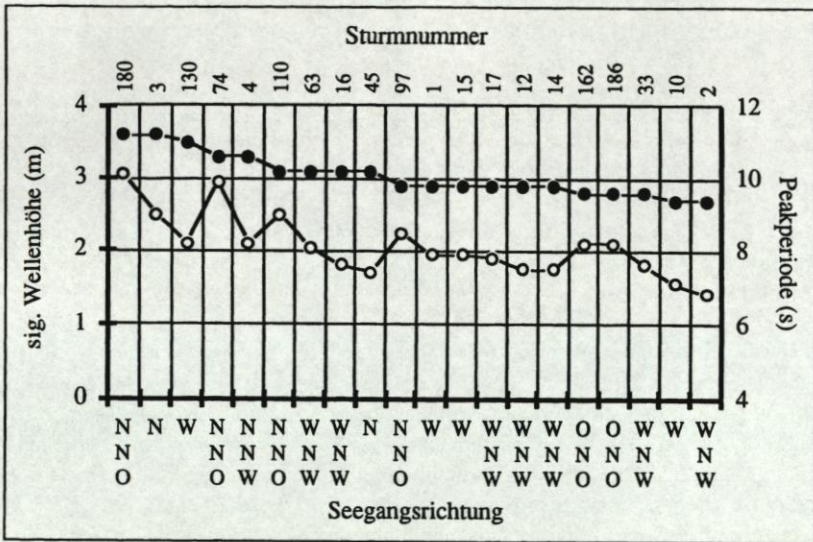


Abb. 5: Maximale signifikante Sturmwellenhöhen (•) am Gitterpunkt Warnemünde Hafen und die zugehörige Peakperiode (o) und Seegangsrichtung. Gezeigt sind die 20 höchsten Ereignisse in absteigender Reihenfolge.

Aus diesen Daten wurde dann der Erwartungswert der maximalen signifikanten Wellenhöhe für 10, 25, 50 und 100 Jahre aus verschiedene Extremwertverteilungen extrapoliert. Die Tabelle 4 faßt die erzielten Ergebnisse für den Gitterpunkt Warnemünde Hafen zusammen. Angegeben sind die verschiedenen Jahreswellen und deren Unsicherheitsintervalle. Die Weibull-Verteilung zeigt die größten Unsicherheitsintervalle (0.52m bei der 100-Jahreswelle von 3.49m). Die Gumbei-Verteilung liefert die kleinsten Fehlergrenzen mit 0.29m bei einer 100-Jahreswelle von 3.90m. Den größten Schätzwert (3.99 m) für die 100-Jahreswelle ergibt sich aus der Frechet-Verteilung mit einem Fehlerintervall von 0.36m.

Name	10 Jahreswelle				25 Jahreswelle				50 Jahreswelle				100 Jahreswelle			
	Hs (m)	HI (m)	Hr (m)	Δ (m)	Hs (m)	HI (m)	Hr (m)	Δ (m)	Hs (m)	HI (m)	Hr (m)	Δ (m)	Hs (m)	HI (m)	Hr (m)	Δ (m)
FRECHET	3,34	3,22	3,47	0,25	3,58	3,44	3,72	0,28	3,78	3,62	3,94	0,32	3,99	3,82	4,18	0,36
GUMBEL	3,35	3,22	3,47	0,25	3,56	3,43	3,69	0,26	3,73	3,60	3,87	0,27	3,90	3,76	4,05	0,29
LOG-NORMAL	3,33	3,17	3,50	0,33	3,49	3,31	3,68	0,36	3,60	3,41	3,80	0,38	3,70	3,51	3,91	0,41
NORMAL	3,34	3,17	3,51	0,34	3,48	3,30	3,66	0,35	3,58	3,40	3,76	0,36	3,66	3,48	3,85	0,37
WEIBULL	3,30	3,07	3,54	0,47	3,39	3,15	3,65	0,49	3,45	3,20	3,71	0,51	3,49	3,24	3,77	0,52

Tab. 4: Die für verschiedene Extremwertverteilungen am Gitterpunkt Warnemünde Hafen extrapolierten 10, 25, 50 und 100 Jahreswellen (H_s). HI ist der untere Wert und Hr der obere Wert des Unsicherheitsintervalls. Die Breite des Intervalls ist Δ .

Zusammenfassung

An zwei Beispielen wurden die Einsatzmöglichkeiten von numerischen Seegangsmoellen dargestellt. Es wurde die Seegangsprognose vorgestellt, die für die Routenberatung und Planung aller Aktivitäten auf See eingesetzt wird. Weiterhin wurde der Seegangshindcast und seine Auswertung zu einer Seegangstatistik diskutiert. Da hinreichende Naturmessungen meist nicht zur Verfügung stehen, ist diese Methode für viele Bemessungen, z. B. von Ölplattformen, zu einem Standardverfahren geworden.

Zunehmend an Bedeutung gewinnt die numerische Seegangsberechnung in den letzten Jahren als Teil der gekoppelten Modellierung im Küstenbereich. Insbesondere die Modellierung der Erosion und Deposition von Sediment ist nur mit einer detaillierten Seegangsberechnung möglich.

Literatur

- Behrens, A, und D, Schrader, 1994: The Wave Forecast System of the "Deutscher Wetterdienst" and the "Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: A Verification Using ERS-1 Altimeter and Scatterometer Data. Dt. Hydrogr. Z., 46, pp. 131-149.
- Bouws, E., H. Günther, W. Rosenthal, C.L, Vincent 1985: Similarity of the Wind Wave Spectrum in Finite Depth Water. Part 1: Spectral Form, J. Geophys. Res., 90, No. C1, 975-986.

- Gayer, G., H. Günther, N. Winkel, 1995: Wave Climatology and Extreme Value Analysis for the Baltic Sea Area off the Warnemünde Harbour Entrance. Dt. Hydrogr. Z., 47, 109-129.
- Gayer, G., H. Günther, N. Winkel, 1956: Ein Seegangsmodell zur Berechnung von Boden- und Strömungsrefraktion. In Vorbereitung
- Günther, H., W. Rosenthal, T.J. Weare, B.A. Worthington, K. Hasselmann, J.A. Ewing, 1979: A Hybrid Parametrical Wave Prediction Model. J. Geophys. Res., 84, No. C9, 5727-5738.
- Günther, H., G.J. Komen, W. Rosenthal, 1984: A semi-operational comparison of two parametrical wave prediction models. Dt. Hydrogr. Z., 37, 89-106,
- Hasselmann, K.; T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Seil, and H. Walden (1973): Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Dtsch. Hydrogr. Z., Suppl. A 8 (12).
- Komen, G.J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P.A.E.M. Janssen, 1994: Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 560 pages.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. H. Günther
GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Postfach 1160
D-21494 Geesthacht