



Einfluß von Steiluferabbrüchen an der Ostsee  
auf die Prozeßdynamik angrenzender  
Flachwasserbereiche  
**Teilprojekt Hydrodynamik**

**Abschlußbericht**

Wismar, Juli 2000

№ 34044 Lit.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Durchführung der Seegangsmessungen</b>	<b>5</b>
2.1	Ziel der Messungen . . . . .	5
2.2	Auswahl der Meßgeräte . . . . .	5
2.3	Geräteaufbau und Meßprinzip . . . . .	6
2.4	Auswahl der Meßorte . . . . .	7
2.5	Meßdurchführung . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Statistische Bewertung der Seegangsdaten</b>	<b>14</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	14
3.2	Datengrundlage . . . . .	14
3.3	Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen . . . . .	15
3.4	Schließung von Datenlücken und Extrapolation der gemessenen Seegangsdaten	25
3.5	Mittleres Seegangsklima . . . . .	29
3.6	Extreme Seegangereignisse . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Energieflußuntersuchungen / Sedimenttransportkapazitäten</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>Weitere Untersuchungen</b>	<b>52</b>
5.1	Örtliche Wasserstände . . . . .	53
5.2	Strömungsgeschwindigkeiten . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Schrifttum</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>64</b>

# 1 Einführung und Zielsetzung

Große Bereiche der deutschen Ostseeküste sind durch Steilküsten und insbesondere durch den Wechsel von aktiven Kliffs und angrenzenden Anlandungszonen gekennzeichnet. Diese Steilküsten haben eine große Bedeutung für den Sedimenttransportprozeß und damit für die Stabilität der Strandabschnitte. Wesentliche Einflußgrößen für die morphologischen Veränderungen und die Sedimentbewegung sind die angreifenden hydrodynamischen Kräfte, vor allem Wellen, Strömungen und Wasserstandsänderungen.

Das Institut für Wasserbau der Universität Rostock (IWR) bearbeitete gemeinsam mit dem Geologisch-Paläontologischen Institut und Museum der Universität Kiel (GPI, neu: Institut für Geowissenschaften), dem Amt für Land- und Wasserwirtschaft Kiel (neu: Amt für ländliche Räume Kiel, ALR) und dem Landesamt für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein (LANU) das vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) über einen Zeitraum von drei Jahren (11.1998 - 09.1999) geförderte Forschungsprojekt *Einfluß von Steiluferabbrüchen an der Ostsee auf die Prozeßdynamik angrenzender Flachwasserbereiche*. Wesentliches Ziel des Projektes war es, den Zusammenhang zwischen den angreifenden Kräften, dem Kliffrückgang und der Strandentwicklung in angrenzenden Bereichen auf der Basis von Messungen und unter Zuhilfenahme von theoretischen Verfahren zu bestimmen.

Zu diesem Zweck wurden an Land und im Vorstrandbereich neben geologischen und sedimentologischen Untersuchungen auch umfangreiche Vermessungen vorgenommen. Im Küstenvorfeld wurden Richtungsseegangs- und Strömungsmessungen durchgeführt. Wasserstandsdaten wurden vom WSA (Wasser- und Schiffsamt) Lübeck zur Verfügung gestellt. In diesem Bericht sind die Ergebnisse der Seegangsmessungen und der weiteren vom IWR projektbegleitend durchgeführten Untersuchungen zusammenfassend dargestellt. Die Kenntnis der Zwischenberichte des Instituts für Wasserbau (IWR 1996, 1997, 1998, 1999) wird hierbei vorausgesetzt.

Hauptaufgabe des IWR in diesem Projekt war die Ermittlung der in den 3 untersuchten Projektgebieten *Schönhagen, Heiligenhafen* und *Brodten* (Abb. 1) im tieferen Wasser auftretenden hydrodynamischen Kräfte und deren Veränderung beim Einlaufen in die flachen Vorstrandbereiche.

Hierzu wurden von Mai 1996 bis einschließlich April 1999 Richtungsseegangsmessungen an drei jeweils für die Untersuchungsgebiete repräsentativen Meßpositionen durchgeführt. Wesentliches Ziel dieser Messungen ist die Ermittlung der örtlichen Seegangsverhältnisse unter Berücksichtigung von möglichen Wasserständen und der lokalen Windsituation. Dies beinhaltet neben mittleren Seegangsbedingungen auch die saisonale Veränderlichkeit der Wellenparameter einschließlich extremer Ereignisse und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit sowie die Berücksichtigung möglicher örtlicher Dünnungseinflüsse im Seegang.

Neben den örtlichen Seegangsbedingungen hat auch der Wasserstand einen bedeutenden Einfluß auf die morphologische Entwicklung von Steilufern und angrenzenden Flachwasserge-



Abbildung 1: Projektgebiete Schönhagen, Heiligenhafen und Brodten

bieten. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die gemeinsame Wirkung von Wasserstand und Seegang und somit die gemeinsame Häufigkeit und Eintrittswahrscheinlichkeit der beiden hydrodynamischen Parameter wichtig.

Weitere Untersuchungen der örtlichen Seegangsverhältnisse z.B. zur möglichen Parametrisierung, zum Einfluß von Wellengruppen oder zur Anpassung von Seegangsspektren an normierte Spektren wurden im Rahmen der Projektbearbeitung erfolgreich durchgeführt und sind implizit in den weiteren Auswertungen berücksichtigt, werden aber in diesem Abschlußbericht nicht im einzelnen dargestellt.

Basierend auf den gemessenen Seegangsdaten wurden ferner die Veränderungen des Seegangs beim Einlaufen in flacheres Wasser mit Hilfe numerischer Modellierung untersucht und die hieraus resultierenden Sedimenttransportkapazitäten abgeschätzt. Daneben wurden auf der Grundlage der Seegangsuntersuchungen mögliche Strömungsgeschwindigkeiten nach theoretischen Verfahren berechnet und als Eingangsdaten für die weiteren morphologischen und sedimentologischen Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Die im Teilprojekt Hydrodynamik gemessenen und erzeugten Daten wurden den anderen Projektpartnern in digitaler Form zur Verfügung gestellt. Unter anderem wurden für die 3 Projektgebiete die Seegangs- und Wasserstandsdaten sowie der resultierende Energieeintrag für die jeweilige Bojenposition als Stunden- und als Tagesmittel ermittelt und für die weitere Projektbearbeitung als Excel-Datei verteilt.

## 2 Durchführung der Seegangsmessungen

### 2.1 Ziel der Messungen

Bei der Bearbeitung der Problematik der Sedimentumlagerungen in Steilufer- und angrenzenden Flachwasserbereichen stellt der Seegang ein wesentliches Belastungselement dar. Für die Abschätzung der resultierenden Sedimenttransporte nach Betrag und Richtung wird neben den Wellenhöhen und -periodenparametern auch die Richtungsinformation benötigt. Durch die Wahl eines geeigneten Meßortes muß außerdem sichergestellt sein, daß die gesammelten Daten die räumliche Seegangcharakteristik ausreichend genau wiedergeben und, daß diese für den untersuchten Küstenabschnitt repräsentativ sind.

Da jede Messung durch ihre zeitliche Begrenzung nur eine Teilmenge der möglichen Ereignisse wiedergeben kann, muß auf statistischem Wege eine Bewertung der gemessenen Seegangsdaten erfolgen.

### 2.2 Auswahl der Meßgeräte

Die am Markt erhältlichen Meßgeräte sind für unterschiedliche Einsatzzwecke konzipiert und verwenden unterschiedlichste Meßverfahren.

Im Rahmen dieses Projektes kam es im wesentlichen darauf an, den Seegang in seiner Dreidimensionalität zu erfassen. Weiterhin mußte ein Meßsystem gewählt werden, das mit verhältnismäßig geringem Aufwand mobil eingesetzt werden kann und dabei möglichst robust ist, um vor allem im Winter möglichst geringe Ausfallzeiten zu haben.

Aus diesem Grund schieden Meßsysteme aus, die einen Meßpfehl erforderlich machen wie beispielsweise Wellendrähte und Druckmeßdosen. Zum Einsatz kamen Wellenmeßbojen des Typs 'Directional Waverider' vom Hersteller Datawell BV aus den Niederlanden (Foto in Abb. 2), mit denen das IWR in früheren Meßkampagnen bereits gute Erfahrungen gesammelt hat und die ferner von verschiedenen anderen Betreibern an der deutschen Nord- und Ostseeküste erfolgreich eingesetzt werden.

Das gewählte Meßsystem kann in etwa zwanzig Minuten vom Deck eines Tonnenlegers oder eines anderen Schiffes mit leichtem Hebezeug ausgelegt oder geborgen werden. Abhängig vom Schiffstyp und der Erfahrung der Mannschaft ist dies allerdings nur bei Wellenhöhen bis zu etwa einem Meter möglich. Durch die kurzen Bergezeiten ist es möglich, die Wellenmeßbojen erst kurz vor Auftreten einer Eisbedeckung zu bergen und anschließend schnell wieder auszulegen, so daß die Ausfallzeiten im Winter minimiert werden können.

Im Projekt war zunächst der Einsatz von 3 Meßsystemen für die 3 Projektgebiete in Erwägung gezogen worden, aus Kostengründen konnten jedoch nur 2 Seegangsmessbojen beschafft werden. Diese wurden während der Projektlaufzeit in den 3 Projektgebieten betrieben. Es wur-



Abbildung 2: Richtungswellenmeßboje Typ Directional Waverider

de erwartet, daß trotz des fehlenden Meßsystems die Seegangsverhältnisse in den gewählten Projektgebieten ausreichend genau wiedergegeben werden können. Möglich wurde dies durch die vergleichsweise einfache Morphologie vor Schönhagen und Brodten sowie die klaren Randbedingungen des Windfeldes. Hierdurch ist gewährleistet, daß Seegangsmessungen über einen Zeitraum von ein bis zwei Jahren in Kombination mit theoretischen Verfahren zur Schließung von Meßlücken und zur Extrapolation der Meßdaten ausreichen, um die Seegangskarakteristik mit hoher statistischer Signifikanz zu ermitteln. Dagegen mußte in Heiligenhafen bedingt durch die Abdeckung durch Fehmarn über die gesamte Projektdauer gemessen werden, um zu aussagefähigen Ergebnissen zu kommen. Die eingesetzte Methodik zur Schließung von Datenlücken und zur Extrapolation der Meßdaten auf längere Zeiträume ist im einzelnen in Kap. 3.3 und 3.4 dargestellt.

### 2.3 Geräteaufbau und Meßprinzip

Die Meßgeräte sind als kugelförmige Bojen mit einem Durchmesser von rd. 0,90 m ausgebildet. Im Bojenkörper sind die Batterien zur Stromversorgung untergebracht. Die vom Hersteller getestete und vorgeschriebene Vertäuung besteht aus Grundgewicht, einer Leine und einer elastischen Gummileine zur Bewegungsdämpfung (Abb. 3).

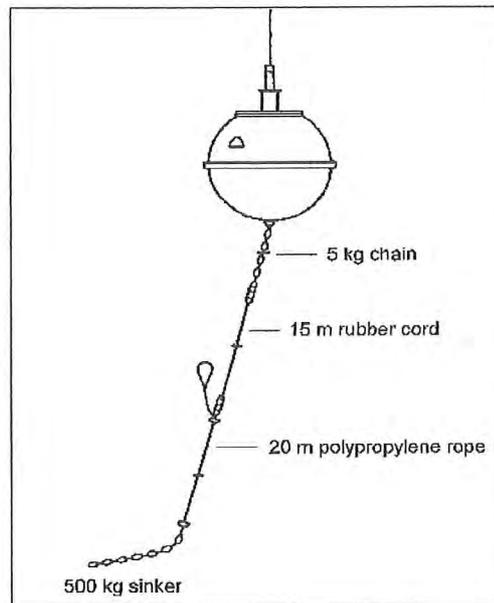


Abbildung 3: Prinzipskizze der Bojenvertäuung

Die Meßbojen ermitteln die erforderlichen Seegangparameter auf der Grundlage von Beschleunigungsmessungen mit drei aufeinander senkrecht stehenden Beschleunigungsaufnehmern. Die Meßwerte werden durch zweifache Integration nach der Zeit in Auslenkungen umgerechnet und mit Hilfe eines eingebauten Kompasses nordkompensiert. Aus den Zeitreihen der Auslenkungen Hoch, Nord und Ost wird durch Fourieranalysen und Bildung mehrerer Kreuzspektren das Richtungsseegangsspektrum (Abb. 4) und hieraus resultierend die spektralen Seegangparameter (u.a. signifikante Wellenhöhe  $H_{m0}$ , Peak-Periode  $T_p$ , mittlere Periode  $T_{02}$ , mittlere Wellenanlaufrichtung  $\Theta_m$ ) berechnet. Die Methodik der Auswertung von Richtungsseegangsmessungen mit Meßbojen ist im einzelnen beschrieben z.B. bei SCHADE (1991) oder bei HORRIKAWA (1988).

Die Übertragung der Meßwerte erfolgt per Telemetrie an eine Landstation, die aus einem Empfänger und einem Meßrechner zur Datenerfassung und -speicherung besteht.

## 2.4 Auswahl der Meßborte

Die Erfassung der Eingangsdaten zur Ermittlung des Wellenklimas (d.h. der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Seegangs in einem Projektgebiet) sollte möglichst unter Tiefwasserbedingungen erfolgen, um für einen großen Abschnitt der Projektgebiete repräsentative Aussagen zu ermöglichen. Ausgehend von den für den jeweils untersuchten Küstenabschnitt ermittelten Wellenverhältnissen werden mit Hilfe von theoretischen Ansätzen aus den gemessenen Seegangereignissen die für die untersuchten Prozesse wesentlichen Parameter bestimmt.

Für die Auswahl der Meßpositionen sind verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen, wie beispielsweise die Verformung der Wellen beim Einlaufen in flaches Wasser insbesondere durch Wellenbrechen. Deshalb wurde für mittlere Seegangsverhältnisse eine Mindestwasser-

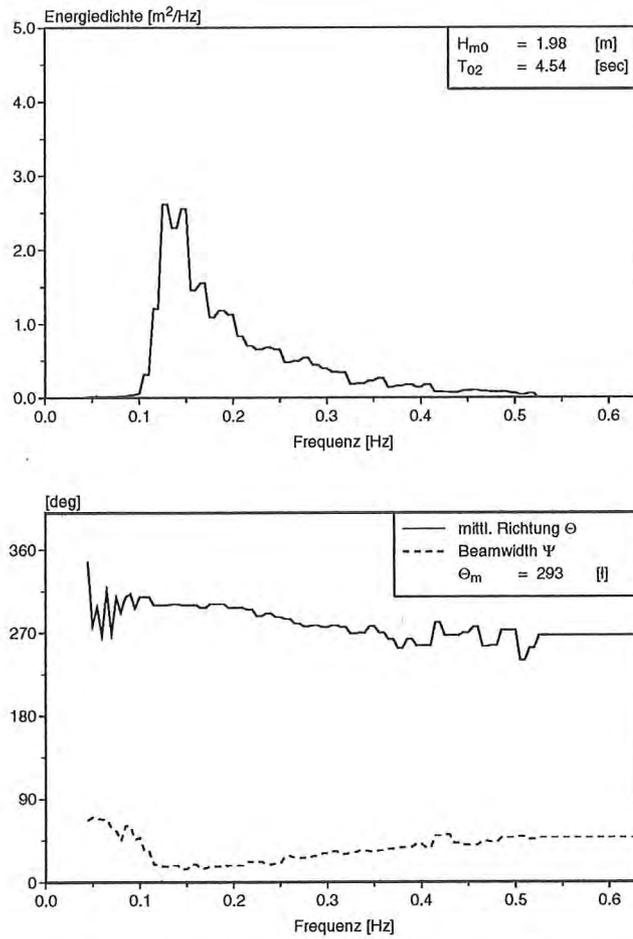


Abbildung 4: Beispiel: Richtungswellenspektrum aus dem Projektgebiet Heiligenhafen

tiefe von 8 m festgelegt. Außerdem mußten Positionen außerhalb des Hauptfahrwassers und außerhalb von Sperr- und Warngeländen gefunden werden.

Die Einsatzorte der Bojen wurden unter Berücksichtigung der vorgenannten Verfahrensweisen und Randbedingungen an der 10 m - Tiefenlinie vor den untersuchten Strandabschnitten festgelegt (vgl. Anlagen 1-3). Anschließend wurden für die Einsatzdauer die notwendigen schifffahrtspolizeilichen Genehmigungen und die Genehmigung zum Betreiben einer Versuchsfunkanlage eingeholt.

Die Landstationen wurden jeweils in der nächstgelegenen DLRG-Station eingerichtet. In Abb. 5 ist ein Empfangscontainer mit Empfänger und Meßrechner dargestellt.

## 2.5 Meßdurchführung

### Vorbereitung der Meßgeräte

Die Bojen wurden nach ihrer Lieferung gemeinsam mit dem Empfänger und dem Meßrechner einem Funktionstest unterzogen. Anschließend erhielten die Bojen den vorgeschriebenen Farbaufbau mit einem Antifoulinganstrich gegen Muschelbefall im Unterwasserbereich und ei-

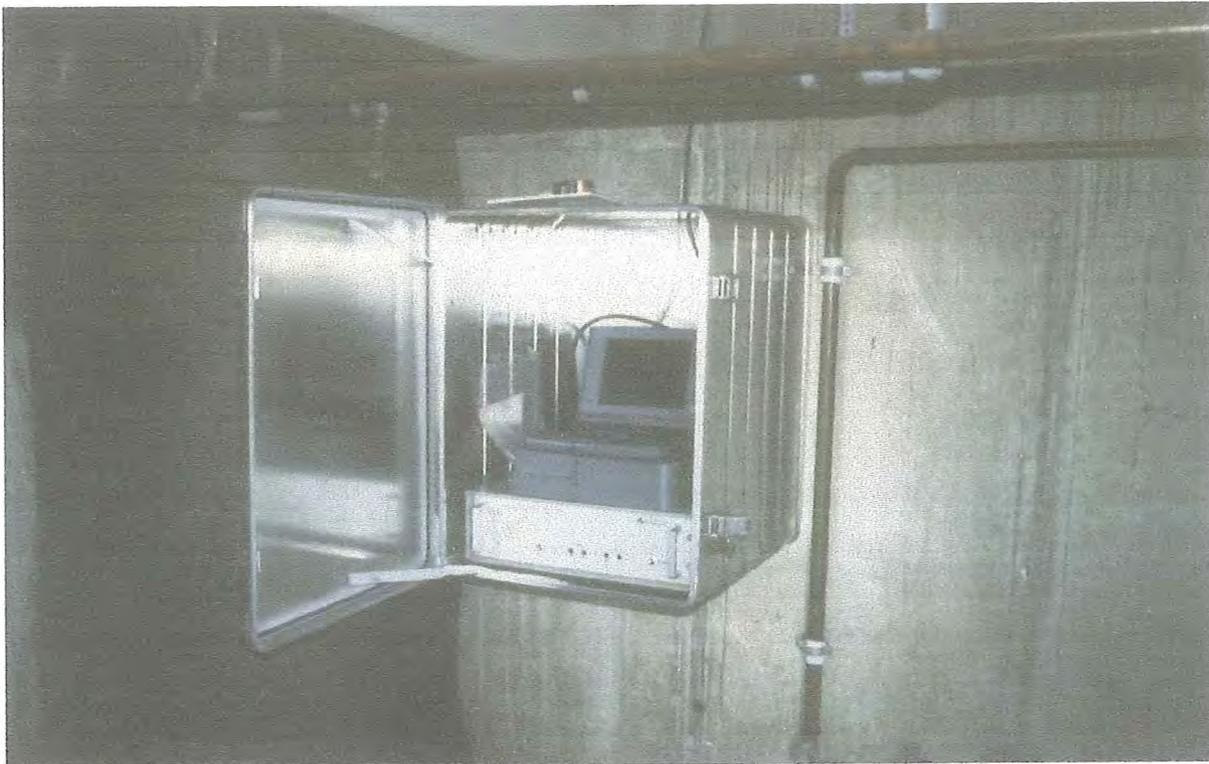


Abbildung 5: Meßcontainer in der Garage der DLRG-Station Heiligenhafen

ner signalgelben Beschichtung im Überwasserbereich. Entsprechend den schiffahrtpolizeilichen Aufgaben wurden die Bojen als Meßgeräte gekennzeichnet.

#### **Einsatzdauer**

Die erste Boje wurde in Heiligenhafen Anfang Mai 1996 erstmals ausgelegt und endgültig nach drei Jahren im April 1999 wieder eingeholt. Die zweite Boje wurde zunächst von Juli 1996 bis Oktober 1997 vor Schönhagen betrieben. Nach einer Überholung wurden mit dieser Boje anschließend von Dezember 1997 bis Juli 1999 Messungen vor dem Brodtener Ufer durchgeführt.

Die Zuverlässigkeit des seewärtigen Teils der Systeme ist generell als gut zu bezeichnen. Im gesamten Zeitraum wurde jede Boje nur je einmal vertrieben, in beiden Fällen läßt das Bruchbild der Vertäuung den Schluß zu, daß eine Berührung mit einer Schiffsschraube mit entsprechender (Vor)schädigung stattfand bzw. stattgefunden hatte, so daß spätestens beim nächsten Starkwindereignis ein endgültiger Bruch der Vertäuung mit anschließendem Verdriften der Boje eintrat. Weiterhin trat einmal eine Meßunterbrechung ein, als beim Auslegen einer Boje nach einer Wartung das Schiff in die Verankerung gedrückt wurde und diese kappte.

Störungsanfälliger waren dagegen zu Beginn des Projektzeitraums die Landstationen. Wesentliche Probleme traten hier mit dem ersten Meßrechner auf (Software/Hardware- Inkompatibilität), die nach Austausch des Rechnersystems behoben waren. Weitere Störungen traten vor allem durch Stromunterbrechungen auf, die teilweise durch die Wachmannschaften in den DLRG-Stationen verursacht wurden. Um solche Unterbrechungen möglichst zu unterbinden wurde die Stromversorgung – wo möglich – direkt in den Meßcontainer integriert. Ferner wur-

Tage		Datensätze	
1052	Gesamtmeßdauer	25248	100%
60	Eisgang	-1440	-6%
49	Bojenwartung/Schlechtwetter	-1176	-5%
89	Testbetrieb	-2136	-8%
	erfaßbare Datensätze	20496	81%
	erfaßte Datensätze	19382	95%
	Gesamtmeßdauer ohne Testbetrieb	23112	100%
	erfaßte Datensätze	19382	84%

Tabelle 1: Einsatz und Ausfallzeiten Heiligenhafens

den zur Fernüberwachung der Systeme Modems installiert, über die die Meß- und Empfangsrechner täglich einmal den aktuellen Systemstatus bei dem zentralen Überwachungsrechner im IWR meldeten. Durch die Fernübertragung des Systemstatus war es dann auch einfach möglich, nach Sturmereignissen zu kontrollieren, ob die Systeme noch ordnungsgemäß funktionieren.

Neben Hardware-Störungen der Meßrechner infolge Verschleiß durch jahrelangen Dauerbetrieb fiel das Meßsystem in Brodten auch einmal infolge eines durch Tierbiß zerstörten Antennenkabels aus.

### Datenaufzeichnung

Die Meßwerte wurden kontinuierlich für jeweils eine halbe Stunde pro Stunde aufgezeichnet. Aufbauend auf diesen 30-min-Datensätzen werden Wellenparameter der spektrale und der Zeitreihendarstellung des Seegangs ermittelt.

### Zuverlässigkeit

Bezogen auf die Gesamtmeßdauer liegt die Datenerfassungsrate zwischen 78-84%. Etwa 10% resultieren aus witterungsbedingten Unterbrechungen (Eisgang, Boje verdriftet, zu viel Seegang für Wartungsarbeiten); die Darstellung des Bojeneinsatzes und der Störungsdauern kann im einzelnen den Zwischenberichten entnommen werden.

Unter Berücksichtigung von Ausfallzeiten infolge Eisgangs und längeren Meßunterbrechungen (ab 1 Woche) ergeben sich Datenerfassungsraten von 95-99% (vgl. Tab. 1, Tab. 2 und Tab. 3).

### Auswertung

Ausgehend vom natürlichen Erscheinungsbild des Seegangs und der Vorstellung, daß Seegang als Folge unregelmäßiger Wellen bzw. als Überlagerung einzelner regelmäßiger Sinuskomponenten aufgefaßt werden kann, wird der Seegang im Zeitbereich bzw. nach Fourier-Transformation im Spektralbereich analysiert und in unterschiedlichen Stufen der Vereinfachung auf signifikante Parameter reduziert.

Tage		Datensätze	
442	Gesamtmeßdauer	10608	100%
62	Eisgang	-1488	-14%
43	Stromausfall	-1032	-10%
28	Stromausfall	-672	-6%
	erfaßbare Datensätze	7416	70%
	erfaßte Datensätze	7121	96%
1052	Gesamtmeßdauer ohne Stromausfälle	9120	86%
	erfaßte Datensätze	7121	78%

Tabelle 2: Einsatz und Ausfallzeiten Schönhagen

Tage		Datensätze	
593	Gesamtmeßdauer	14232	100%
27	Bojenvertäuung repariert	-648	-5%
36	Antenne defekt	-864	-6%
24	Stromausfall	-576	-4%
	erfaßbare Datensätze	12144	85%
	erfaßte Datensätze	11983	99%
1052	Gesamtmeßdauer ohne Testbetrieb	14232	100%
	erfaßte Datensätze	11983	84%

Tabelle 3: Einsatz und Ausfallzeiten Heiligenhafen

Für die Auswertung im Zeitbereich werden die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen an einem Punkt über die Zeit betrachtet. Die Auslenkungen der Wasserspiegeloberfläche sind in guter Näherung normalverteilt (vgl. MASSEL 1996, DEAN, DALRYMPLE 1984) und werden üblicherweise mit sog. Nulldurchgangsverfahren in einzelne Wellen mit zugehöriger Höhe ( $H_i$ ) und Periode ( $T_i$ ) eingeteilt. Alle Wellen ( $H_i$ ,  $T_i$ ) einer Messung werden statistisch analysiert und auf signifikante Parameter reduziert (vgl. Abb. 6).

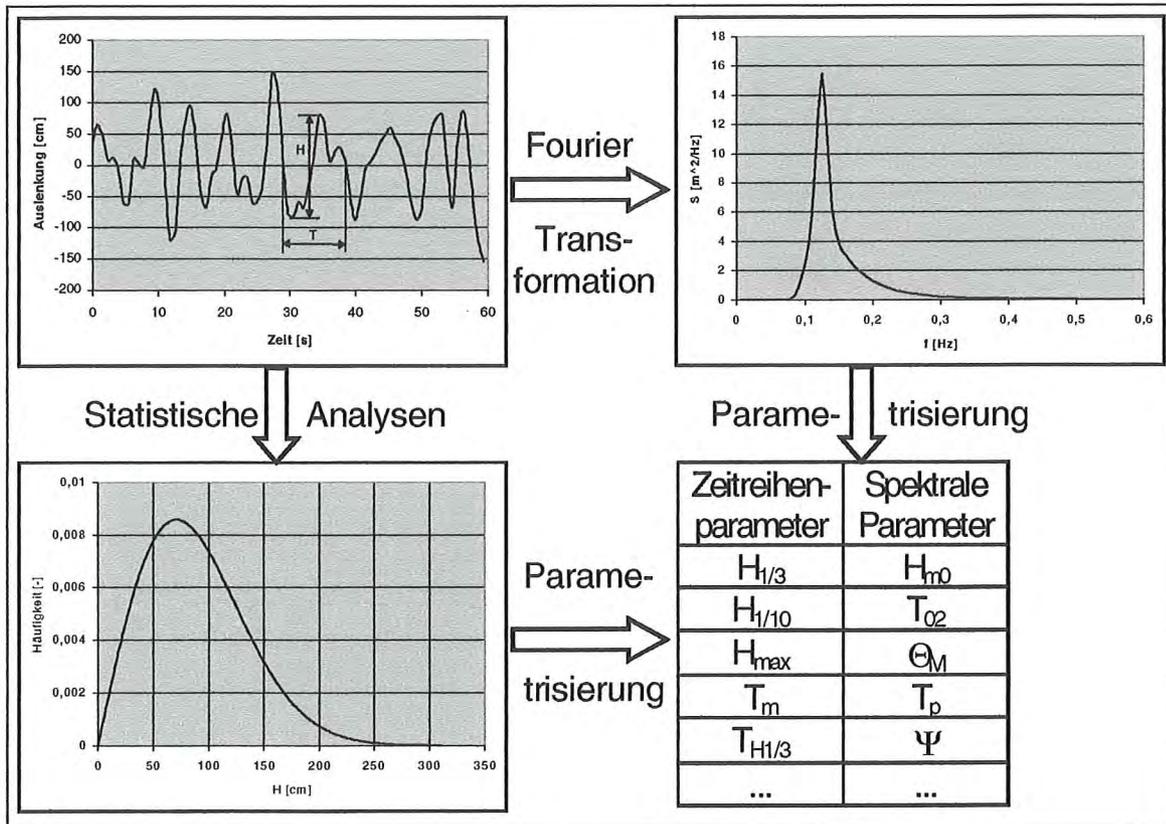


Abbildung 6: Zur Auswertung von gemessenen Seegangsdaten im Zeitbereich und im Frequenzbereich

Im Zeitbereich wird die Variabilität des Seegangs durch Häufigkeitsanalysen ermittelt. In Abb. 6 ist beispielhaft die Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen dargestellt. Die Wellenhöhenverteilung entspricht im tiefen Wasser der RAYLEIGH-Verteilung (LONGUET-HIGGINS 1952). Die maximale Wellenhöhe ( $H_{max}$ ) ist abhängig von der Anzahl der Wellen in einer Messung.

Der Übergang vom Zeitbereich in den Frequenzbereich wird mittels einer Fourier-Transformation der Daten durchgeführt (Abb. 6). Grundlegende Voraussetzung für die Durchführung einer Fourier-Transformation ist die Periodizität der zugrunde liegenden Zeitreihe (d.h.  $f(t) = f(t+\tau)$ ). Um zu verhindern, daß aus der Unstetigkeit zwischen zwei periodischen Blöcken Verfälschungen im Seegangsspektrum resultieren, wird der Übergang häufig mit einer 'tapering'-Funktion (vgl. SCHADE 1991) und anschließendem Energieausgleich verstetigt.

Nach der Fourier-Transformation der Daten liegen die Seegangsinformationen in spektraler Form mit zugehöriger Phasenlage vor. Hieraus wird das Energiedichtespektrum des Seegangs

berechnet (vgl. Abb. 6). Standardisierte Norm-Seeegangsspektren sind z.B. das JONSWAP-Spektrum (HASSELMANN, K. et al. 1973) oder das PIERSON - MOSKOWITZ (PM)-Spektrum (PIERSON, MOSKOWITZ 1964). Aus dem Energiedichtespektrum werden dann in verschiedenen Stufen der Vereinfachung signifikante Parameter berechnet.

Die Vielzahl möglicher signifikanter Seegangparameter wurde von der International Association of Hydraulic Research (IAHR) in der 'List of Sea State Parameters' (IAHR 1986) zusammengefaßt. Die im Rahmen der Projektbearbeitung am häufigsten verwendeten Seegangparameter sind:

- $H_{m0}$  : signifikante Wellenhöhe  $H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}$
- $T_{02}$  : mittlere Wellenperiode  $T_{02} = \sqrt{m_0/m_2}$
- $T_p$  : Peakperiode
- $\Theta_m$  : mittlere Wellenanlaufrichtung  $1/m_0 \int S(f) \cdot \Theta_m(f) \cdot df$
- mit :  $m_n = \int S(f) \cdot f^n \cdot df$

## 3 Statistische Bewertung der Seegangsdaten

### 3.1 Allgemeines

Für die Bewertung von Sedimenttransportprozessen werden Seegangsdaten über einen längeren Zeitraum benötigt, um das Seegangsklima innerhalb des Projektgebiets beschreiben und langzeitstatistisch bewerten zu können. Die langzeitstatistische Bewertung von Seegangsdaten geht über die Ermittlung von extremen Wellenhöhen oder mittleren Wellenhöhen hinaus. Zunächst ist es notwendig, die verfügbaren Daten einer eingehenden Plausibilitätsanalyse zu unterziehen und eine angemessene Datenbasis für die weitergehenden statistischen Bewertungen zu schaffen. Hierzu erfolgt die Anbindung der kurzzeitig gemessenen Seegangsdaten an langfristig verfügbare Winddaten sowie die Extrapolation der Meßdaten auf längere Zeiträume.

Auf einer angemessenen Datenbasis erfolgt die Ermittlung des Seegangsverhältnisse in den Projektgebieten. Hierin sind zugehörige Eintrittswahrscheinlichkeiten mittlerer und extremer Seegangseignisse, statistische Abhängigkeiten und Verteilungen der Seegangparameter untereinander sowie ggf. auftretende im statistischen Sinne unabhängige zugehörige Parameter (Wasserstände, Strömungen, Dünungseinflüsse, etc.) enthalten.

### 3.2 Datengrundlage

Neben den im Rahmen des Forschungsvorhabens gemessenen Seegangsdaten (vgl. Kap. 2) der Richtungswellenmeßbojen und der Flachwassermeßgeräte werden für weiterführende Auswertungen zusätzliche hydrographische und meteorologische Daten benötigt.

Für die Bewertung des Abbruchverhaltens der Steilufer sind neben der einlaufenden Seegangenergie die wechselnden Wasserstände von großer Bedeutung. Vom Wasser- und Schiffsamt Lübeck (WSA - Lübeck) wurden für die Auswertungen Wasserstandsdaten der Meßstationen Travemünde, Schleimünde, Leuchtturm Kiel und Heiligenhafen aus dem Projektzeitraum in digitaler Form zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden vom IWR für ausgewählte Zeiträume die Wasserstände an den entsprechenden Pegeln digitalisiert.

Zur Einbindung der vergleichsweise kurzzeitig durchgeführten Seegangsmessungen in das mittelfristige bzw. langfristige Seegangsgeschehen stehen Winddaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung. Im einzelnen wurden die in Tab. 4 zusammengefaßten Winddaten für die Untersuchungen verwendet. Für Plausibilitätsuntersuchungen und zum Vergleich der Ergebnisse wurden weiterhin Winddaten von Windstationen in Flensburg und Kiel sowie Winddaten der Feuerschiffe Kiel und Fehmarnbelt verwendet.

DWD-Nr.	Stationsname	Zeitraum
FF03802	Olpenitz	10.1981 - lfd.
FF03835	Westermarkelsdorf	07.1957 - lfd.
FF03877	Lübeck	01.1951 - 02.1985
FF03879	Travemuende	01.1971 - lfd.

Tabelle 4: Winddaten für Seegangsklimauntersuchungen

### 3.3 Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen

Die Eingangsdaten für eine langzeitstatistische Bewertung des Seegangs sollten für den jeweils betrachteten Zeitraum immer vollständig und mit konstanter zeitlicher Auflösung verfügbar sein. Wellendaten aus Seegangsmessungen weisen aber häufig Meßlücken auf, die verschiedene Ursachen haben können. Sie können beispielsweise aus Geräteausfall, Fehlern während der Datenübertragung oder Störungen des Meßzyklus durch Eisbedeckung im Seegebiet oder Schiffsverkehr resultieren (vgl. auch Hinweise in Kap. 2).

Grundsätzlich ist eine Vielzahl von theoretischen Ansätzen für die Berechnung des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen dem Windfeld und dem resultierendem Wellenfeld verfügbar. Die Auswahl des jeweils am besten geeigneten Ansatzes hängt von der erforderlichen Genauigkeit, bereits verfügbaren Eingangsdaten und – allgemein – von der Zielsetzung der jeweiligen Untersuchungen ab.

In der Ingenieurpraxis werden für die Ermittlung von Seegangsdaten für Bemessungsaufgaben oder für die Bewertung von Sedimenttransportprozessen häufig parametrische Seegangsvorhersageverfahren (SPM 1984 oder die JONSWAP - Seegangsvorhersage vgl. z.B. RICHTER (1981) oder EAK (1993)) angewendet, da hierbei die Anforderungen an die Eingangsdaten vergleichsweise moderat sind. Häufig werden lediglich die Windgeschwindigkeit, die Windwirklänge, die Windwirkdauer und mittlere Wassertiefen im Windfeld benötigt.

In der Ozeanographie werden zunehmend numerische Verfahren (z.B. das HYPAS - Modell der GKSS) zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen den meteorologischen Randbedingungen und dem resultierenden Seegang verwendet. Die Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung der Eingangsdaten für die Anwendung numerischer Methoden zur Seegangsvorhersage sind häufig ungleich höher. Es müssen beispielsweise flächenhafte Informationen der Morphologie und des Windes verfügbar sein. Trotz aller Fortschritte auf dem Gebiet der numerischen Simulation des Seegangs werden insbesondere die im flacheren Wasser und in stark gegliederten Seegebieten auftretenden nichtlinearen Abhängigkeiten der Wellen vom Wind und der Morphologie nicht ausreichend genau abgebildet.

Im folgenden werden die Grundzüge der Ermittlung des Zusammenhangs zwischen dem örtlichen Wind und dem gemessenen Seegang mit statistischen Methoden zusammengefaßt. Die Untersuchungen zur Ermittlung der Wind-Wellen-Korrelationen wurden für alle 3 Projektgebiete

durchgeführt. Die Untersuchungsschritte und Ergebnisse der Korrelationsrechnungen werden in diesem Bericht beispielhaft jeweils an einem ausgewählten Projektgebiet dargestellt. Datenbasis für die Ermittlung der statistischen Beziehungen zwischen den örtlichen Windverhältnissen und den resultierenden Wellenparametern sind in Kap. 3.2 zusammengefaßt.

Die grundsätzliche Vorgehensweise für die Ermittlung der Wind-Wellen-Korrelationen und die relevanten Einflußfaktoren sind in Abb. 7 schematisch dargestellt.

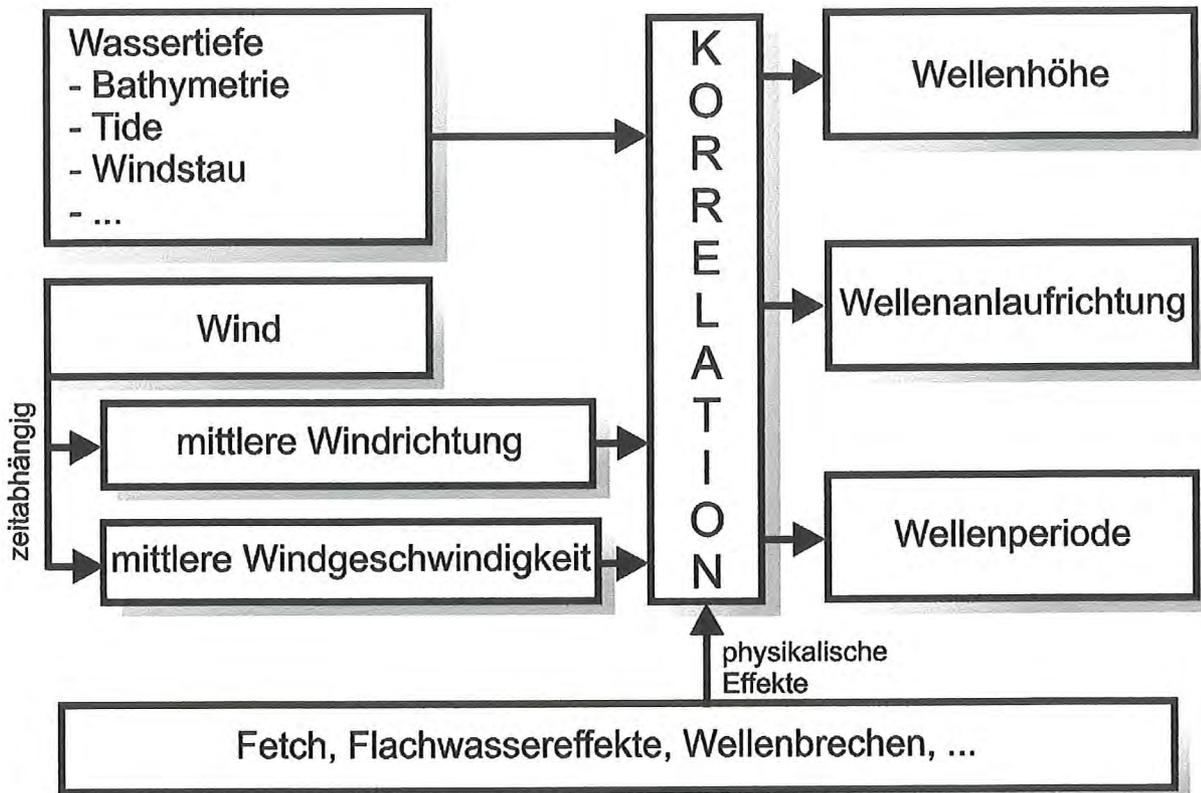


Abbildung 7: Zur Ermittlung der statistischen Beziehung zwischen Wind- und Wellendaten (schematisch, WITTE et al. 1999)

### Wellenhöhen

Als Grundlage für die Berechnung der statistischen Abhängigkeiten zwischen der örtlichen Windgeschwindigkeit und der resultierenden Wellenhöhe werden die Daten in Klassen gleicher Windrichtung eingeteilt. Für jede Klasse werden die gemessenen signifikanten Wellenhöhen ( $H_{m0}$ ) in Abhängigkeit von der gemessenen mittleren Windgeschwindigkeit ( $U$ ) aufgetragen. Ein Beispiel für die Auswahl der Daten und den statistischen Zusammenhang ist in Abb. 8 dargestellt. Die nichtlineare Abhängigkeit zwischen der Windgeschwindigkeit und der signifikanten Wellenhöhe ist deutlich zu erkennen. Die gewählte Ausgleichsfunktion wurde auf der Basis der Minimierung der Summenquadrate der Abweichungen zwischen der Ausgleichsfunktion und Datenbasis an die Meßdaten angepaßt.

Zur Optimierung der Wind-Wellen-Korrelationen ist es notwendig, den Einfluß der mathematischen Ansatzfunktion, der Klassenbreite der Windrichtungsklassen, des Zeitversatzes zwischen Wind- und Wellenmessung und des Zeitraums über den die Winddaten gemittelt wer-

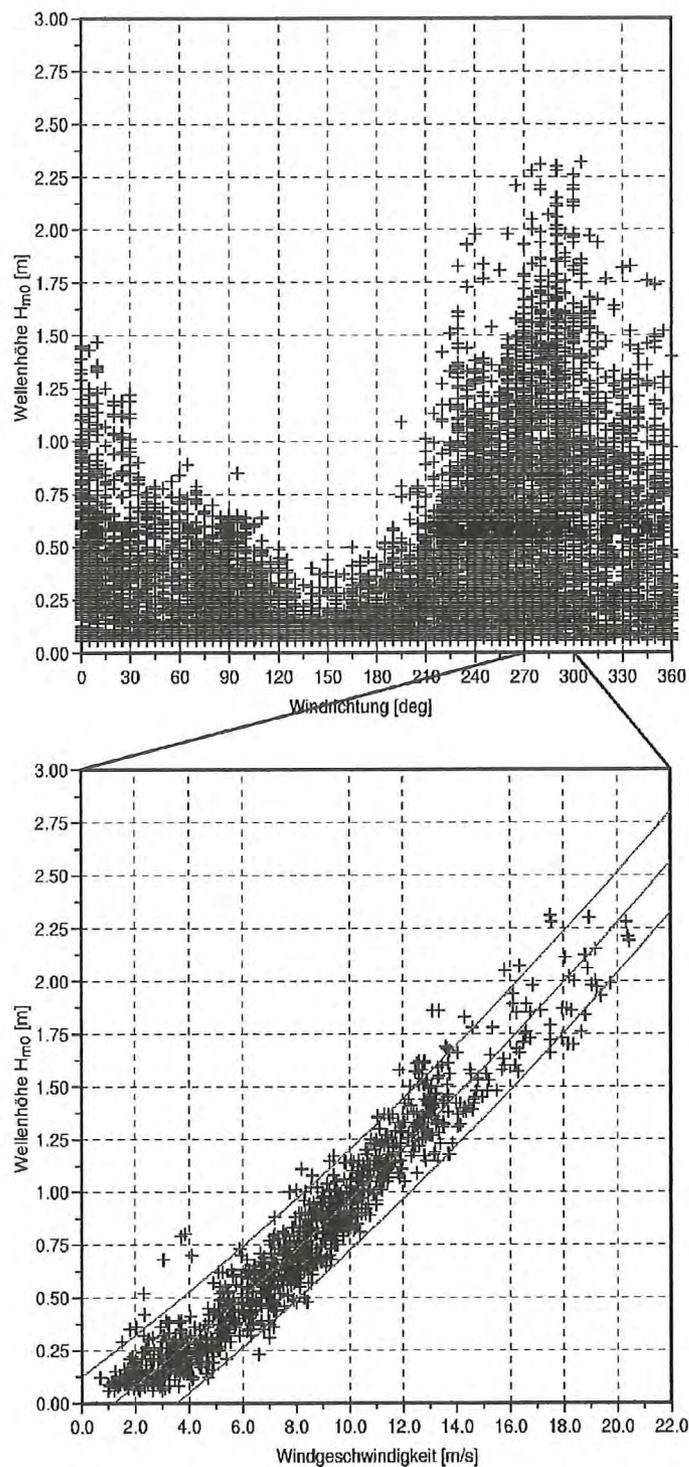


Abbildung 8: Gemessene signifikante Wellenhöhen in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit im Projektgebiet Heiligenhafen und Korrelationsfunktion mit zugehörigem 90% Konfidenzintervall Beispiel Windrichtungsklasse  $270^\circ < \Theta_{\text{Wind}} \leq 300^\circ$  (vgl. FRÖHLE, FITTSCHEN 1999)

den müssen, hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Güte der statistischen Wind-Wellen-Korrelationen zu untersuchen. Als Kriterium für die Beurteilung der Güte der Korrelationsrech-

nungen werden der mittlere Betrag der Differenz zwischen gemessener und berechneter Wellenhöhe und die Streubreite der zugehörigen Konfidenzintervalle sowie Korrelationskoeffizient und Steigung der Ausgleichsgeraden zwischen gemessener und berechneter Wellenhöhe herangezogen.

Für die Projektgebiete an der schleswig-holsteinischen Ostseeküste ergab sich die bestmögliche Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Wellenhöhen unter Anwendung eines Polynoms 2. Ordnung. Die optimale Klassenbreite der Windrichtungen beträgt  $30^\circ$ . Als bestmögliche Windparameter ergaben sich die Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten und der Windrichtungen, die aus den Parametern berechnet wurden, die 2h und 1h vor der Wellenmessung aufgezeichnet worden sind. Eine Verbesserung der Ergebnisse ergab sich ferner, wenn die Korrelationsparameter für ein gleitendes Richtungsfenster ermittelt wurden.

Das Ergebnis der statistischen Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen für die Wellenhöhen ist in Abb. 9 beispielhaft für das Projektgebiet Heiligenhafen dargestellt. Hier sind die gemessenen und berechneten Wellenhöhen unabhängig von der Wind- bzw. der Wellenanlaufichtung aufgetragen. Der mittlere Betrag der Abweichungen zwischen berechneter und gemessener Wellenhöhe beträgt deutlich weniger als  $\Delta H_{m0} = 10$  cm, und die 90% Konfidenzintervalle liegen in einer Größenordnung von etwa 20 cm. Die Steigung der Regressionsgeraden zwischen den gemessenen und den korrelierten Werten beträgt  $m = 0,99$ , der Korrelationskoeffizient ist größer als  $r = 0,95$ . Die Ergebnisse der Korrelationen für Wellenhöhen sind auch in den Projektgebieten Schönhagen und Brodten ähnlich gut.

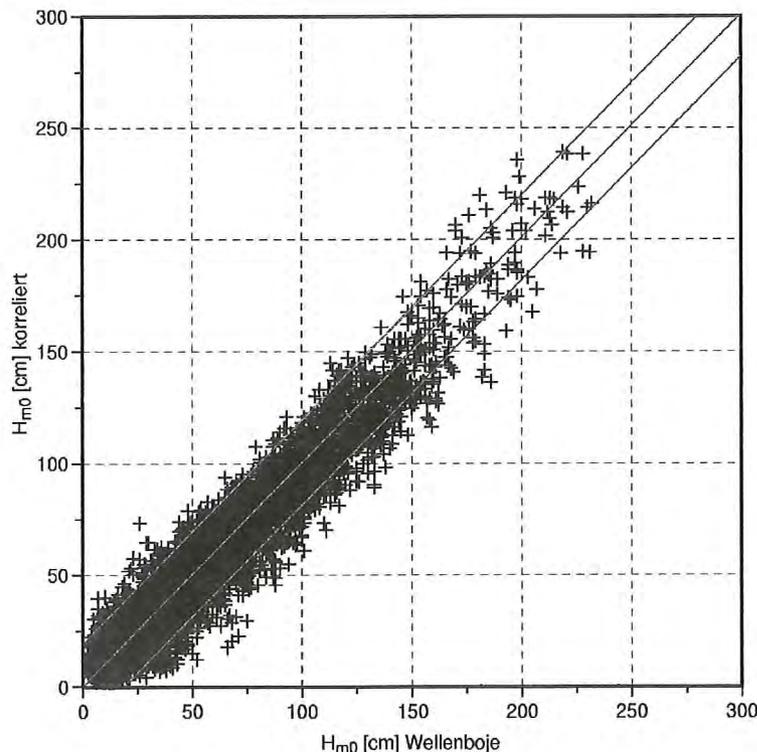


Abbildung 9: Berechnete und gemessene signifikante Wellenhöhen mit linearer Regression und 90% Konfidenzintervallen (Bsp. Projektgebiet Heiligenhafen)

### Wellenanaufrichtungen

Ein weiterer, wesentlicher Schritt für die Anwendung von Wind-Wellen-Korrelationen als Grundlage für die Bewertung von Sedimenttransportprozessen ist die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Windrichtung und der Wellenanaufrichtung. Die in der Ingenieurpraxis im allgemeinen angewendeten parametrischen Seegangsvorhersageverfahren gehen davon aus, daß im Tiefwasser die Wellenanaufrichtung der Windrichtung entspricht (Flachwassereffekte können dann nach linearen Verfahren berücksichtigt werden). Diese Annahme ist insbesondere für die Bewertung von Sedimenttransportprozessen zu stark vereinfachend und nicht ausreichend genau.

Auf der Basis von Wind- und Seegangsmessungen wird der statistische Zusammenhang zwischen der Wind- und der Wellenanaufrichtung ermittelt. In Abb. 10 ist die grundsätzliche Vorgehensweise dargestellt. Die für die Korrelation zugrunde gelegten Daten (Abb. 10a) werden in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit klassifiziert als:

- Starkwindereignisse (im Bsp.  $U > 7,5$  m/s, Abb. 10b),
- Ereignisse mit mäßigem Wind (im Bsp.  $5$  m/s  $< U < 7,5$  m/s , Abb. 10c) und
- Ereignisse mit schwachem Wind (im Bsp.  $U < 5$  m/s , Abb. 10d).

Vergleichsuntersuchungen zum Einfluß des Zeitraums über den die Winddaten gemittelt werden auf die Ergebnisse der Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen für Wellenanaufrichtungen haben ergeben, daß sich auch hier mit Mittelwerten der Windgeschwindigkeiten und der Windrichtungen zu den Zeitpunkten 2h und 1h vor der Wellenmessung die geringsten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten ergaben.

Für die Verhältnisse im Projektgebiet Schönhagen ergibt sich bei der Betrachtung aller Ereignisse (Abb. 10a) erwartungsgemäß keine direkte Abhängigkeit der Wellenanaufrichtungen von den Windrichtungen. Die Wellenanaufrichtungen sind teilweise völlig unabhängig von der Windrichtung, insbesondere bei ablandigem Wind (d.h. in diesem Beispiel Wind aus westlichen Richtungen). Eine nach der mittleren Windgeschwindigkeit differenzierte Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Wind- und Wellenanaufrichtungen ergibt ein verändertes Bild.

Für Starkwindereignisse (Abb. 10b) werden deutliche Abhängigkeiten zwischen Wind- und Wellenanaufrichtungen beobachtet. Auch wenn sich die Wind- und die Wellenanaufrichtungen mehr oder weniger entsprechen, wird deutlich, daß die Annahme 'Wellenrichtung = Windrichtung' selbst auch für Starkwindereignisse allgemein nicht haltbar ist. Die Abweichungen zwischen den Wind- und Wellenanaufrichtungen gehen auch für vergleichsweise einfach strukturierte Seegebiete (wie in diesem Beispiel) deutlich über das theoretisch zu erwartende Maß der Veränderung der Wellenanaufrichtungen hinaus. Hier müssen neben den Veränderungen der Wellenanaufrichtungen zusätzlich die Veränderungen der Windrichtungen beim Auftreffen des Windes auf Land berücksichtigt werden.

a) Alle Messungen

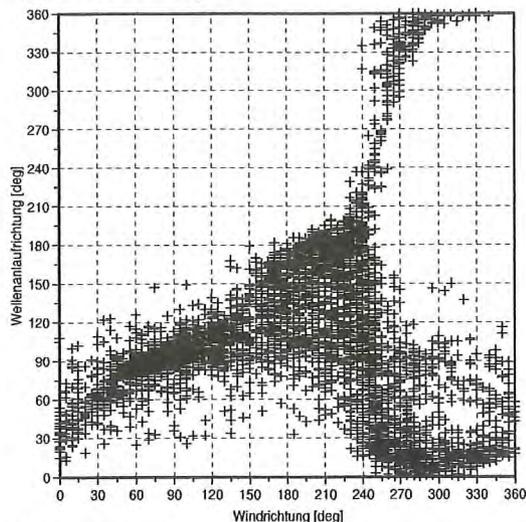
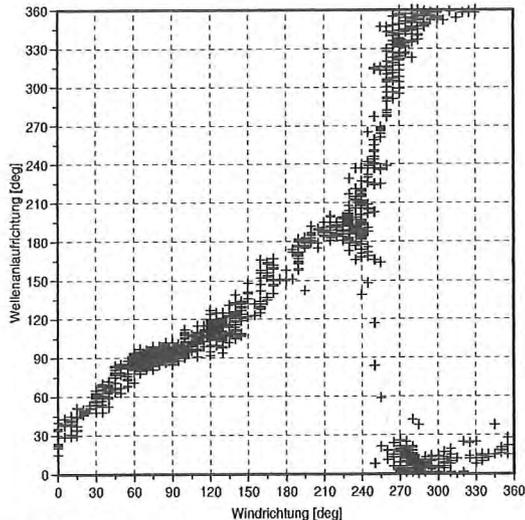
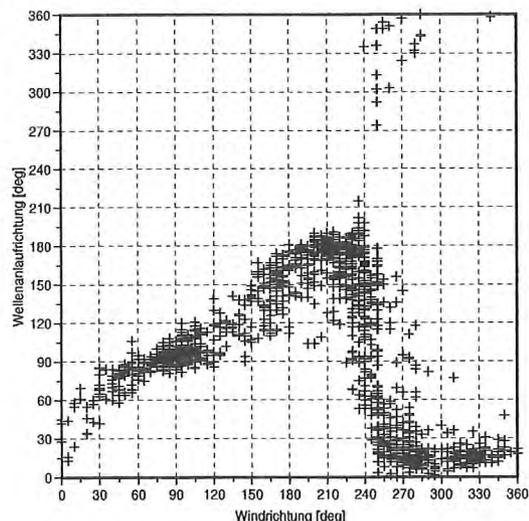
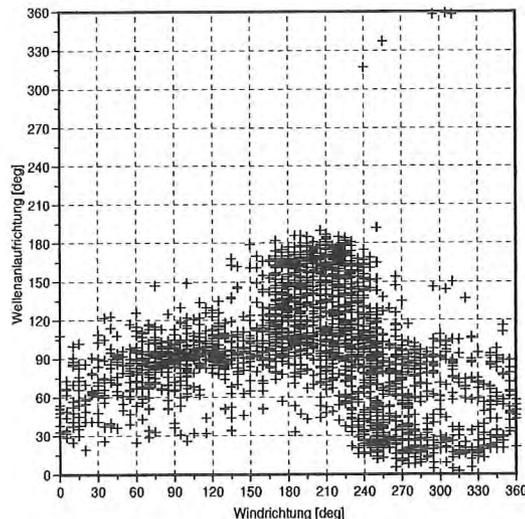
b)  $U \geq 7,5$  m/sc)  $7,5 \leq U \leq 5,0$  m/sd)  $U < 5,0$  m/s

Abbildung 10: Gemessene Wind- und Wellenrichtungen Projektgebiet Schönhagen

Für Ereignisse mit mäßigem Wind (Abb. 10c) ergeben sich in diesem Beispiel für Wind aus östlichen Richtungen ähnliche Verhältnisse wie bei den Starkwindereignissen, lediglich die Streubreite der Ergebnisse ist größer. Für Wind aus westlichen Richtungen unterscheidet sich der Zusammenhang jedoch deutlich von den Verhältnissen bei Starkwindereignissen; obwohl der Wind aus westlichen Richtungen ( $210^\circ - 330^\circ$ ) weht, laufen die Wellen aus östlichen Richtungen an. Für Ereignisse mit schwachem Wind (Abb. 10d) ergeben sich erwartungsgemäß größere Streubreiten für die Wellenanlafrichtungen.

Für die Anpassung der Wellenanlafrichtungen an die Windrichtungen wurden zunächst in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit die Klassenmittelwerte der Wellenanlafrichtungen für vorgegebene Windrichtungen berechnet. Diese wurden dann abschnittsweise an geeignete mathematische Ausgleichsfunktionen angepaßt.

Das Ergebnis der statistischen Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen für die Wellenanlafrichtungen ist in Abb. 11 für das Projektgebiet Schönhagen dargestellt. Gemessene und berech-

nete Wellenanlafrichtungen sind unabhängig von Windrichtung und Windgeschwindigkeit dargestellt. Der mittlere Betrag der Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Wellenanlafrichtung beträgt etwa  $\Delta\Theta = 20^\circ$ , wenn alle verfügbaren Datensätze betrachtet werden (Abb. 11a) und etwa  $\Delta\Theta = 10^\circ$ , wenn alle Ereignisse mit Wellenhöhen größer als  $H_{m0} = 0,25$  m betrachtet werden (Abb. 11b). Die 90% Konfidenzintervalle liegen im Bereich von etwa  $\Delta\Theta = 90^\circ$  für alle Ereignisse bzw. rd.  $\Delta\Theta = 50^\circ$  für Ereignisse mit  $H_{m0} > 0,25$  m. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch für die Projektgebiete Heiligenhafen und Brodten ermittelt. Die Steigung der Regressionsgeraden zwischen den gemessenen und den korrelierten Werten liegt für alle 3 Projektgebiete zwischen  $m = 0,99$  und  $m = 1,04$ . Der Korrelationskoeffizient ist jeweils größer als  $r = 0,9$ .

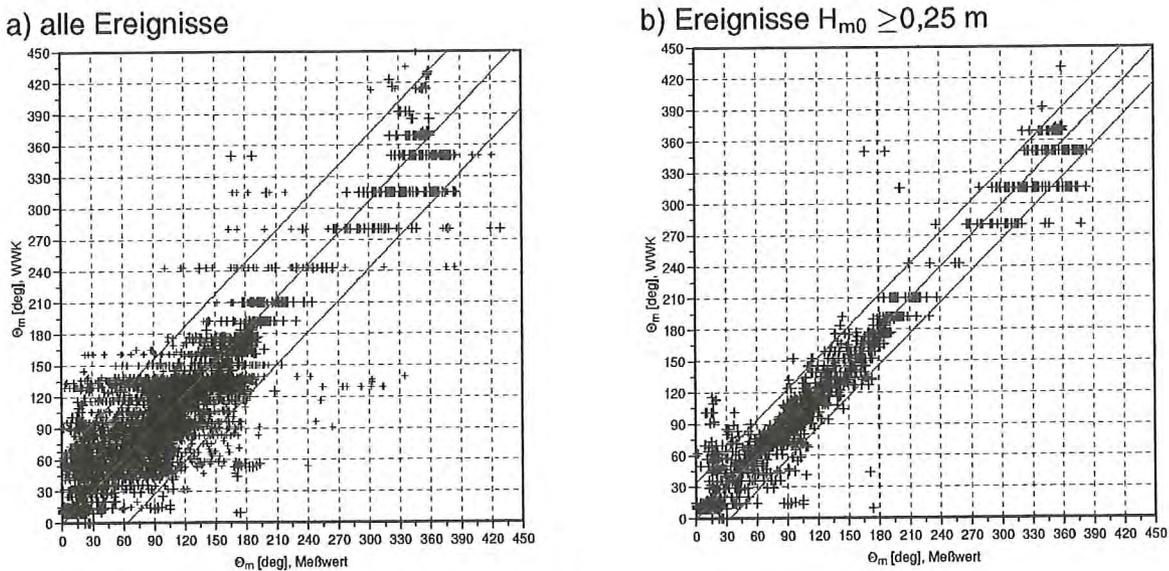


Abbildung 11: Gemessene Wind- und Wellenrichtungen Projektgebiet Schönhagen

### Wellenperioden

Die Wellenperioden werden im allgemeinen nicht direkt aus den lokalen Windparametern berechnet; statt dessen erfolgt die Berechnung auf der Basis der kurzzeitstatistischen Zusammenhänge zwischen den signifikanten Wellenhöhen und den mittleren Wellenperioden (Abb. 12). Für die lokale Windsee besteht im allgemeinen ein guter Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe und signifikanter Wellenperiode, so daß hier nicht der Umweg über die Winddaten genommen werden muß. Die Streubreite der Ergebnisse wird hierdurch verringert, und es treten die vergleichsweise geringsten Abweichungen zwischen den gemessenen und den korrelierten Seegangsparametern auf.

Der Zusammenhang muß auf Basis der Meßdaten für jede Lokation gesondert berechnet werden. Für die Verhältnisse in den untersuchten Projektgebieten wurde ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen Wellenhöhe und Wellenperiode für Wellenhöhen  $H_{m0} > 0,20$  m ermittelt (vgl. Abb. 12). Für Wellenhöhen  $H_{m0} < 0,20$  m ist keine direkte Abhängigkeit vorhanden, vielmehr treten hier Wellenperioden im Bereich von  $T_{02} = 2,0$  s bis etwa  $T_{02} = 5,0$  s, unabhängig von der Wellenhöhe, auf. Diese große Bandbreite der Ergebnisse wird auf Dünungseinflüsse zurückgeführt. Die Häufigkeit von ausgeprägten Dünungsereignisse ist in den 3 Projektgebiete

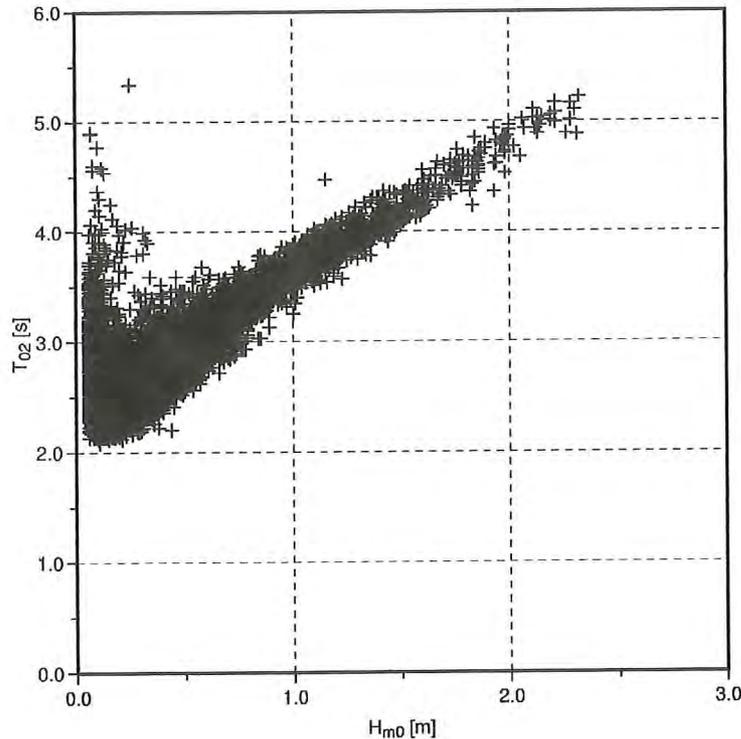


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Wellenhöhe und Wellenperiode im Projektgebiet Heiligenhafen

ten deutlich geringer als 1%. Da zudem für die 3 Projektgebiete in der westlichen Ostsee die signifikanten Wellenhöhen der Dünungswellen vergleichsweise gering sind und auch die Wellenperioden nicht länger sind als für die Windsee, sind die aus der Dünung resultierenden Einflüsse auf die Sedimenttransportprozesse gering, so daß Dünungseinflüsse in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden können.

Das Ergebnis der Korrelationsrechnungen für die Wellenperioden ist in Abb. 13 beispielhaft für das Projektgebiet Heiligenhafen dargestellt. Der mittlere Betrag der Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Wellenperioden beträgt in den 3 Projektgebieten etwa  $\Delta T_{02} = 0,2\text{s}$  für Wellenhöhen größer als  $H_{m0} = 0,20\text{ m}$ . Die 90% Konfidenzintervalle liegen jeweils im Bereich von etwa  $\Delta T_{02} = 0,5\text{ s}$ . Die Steigung der Regressionsgeraden zwischen den gemessenen und den korrelierten Werten liegt für die Projektgebiete zwischen  $m = 0,95$  und  $m = 1,0$ . Der Korrelationskoeffizient ist größer als  $r = 0,8$ .

Neben der Abschätzung der Güte von Wind-Wellen-Korrelationen auf der Basis direkter Vergleiche der einzelnen korrelierten Parameter ist die Bewertung der Abweichungen in der zeitlichen Abfolge der Seegangparameter und in Kombination der einzelnen Parameter notwendig. Für eine erste Beurteilung der Anpassung wurden die gemessenen und die korrelierten Parameter als Ganglinie aufgetragen. Abb. 14 zeigt, daß die Wellenparameter nicht nur im Mittel korrekt wiedergegeben werden, sondern auch der zeitliche Ablauf der Seegangparameter und die Kombination von Wellenhöhe, Wellenperiode sowie Wellenanlaufhöhe korrekt wiedergegeben werden. Dies gilt auch für vergleichsweise schnell wechselnde Windsituationen wie

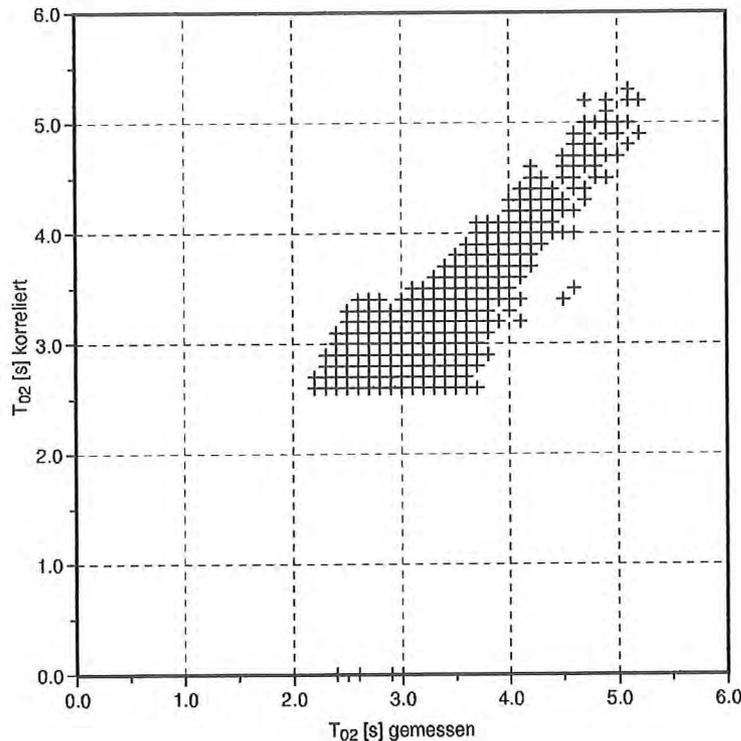


Abbildung 13: Gemessenen und korrelierte Wellenperioden für das Projektgebiet Heiligenhafen (mit linearer Regressionsgerade und 90% - Konfidenzintervall)

beispielsweise ein kurzes Starkwindereignis oder wenn sich beim Durchzug eines Tiefdruckgebiets die Windrichtung relativ schnell ändert.

Beispielhaft wird die Güte der hier vorgestellten Methode zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen den örtlichen Windparametern und den zugehörigen Seegangereignissen mit den Berechnungsergebnissen eines numerischen Modells und den Ergebnissen einer (einfachen) Wellenvorhersage nach dem SPM-Flachwasserverfahren (CERC 1984) verglichen.

Vergleichende Untersuchungen für die Projektgebiete zur möglichen Genauigkeit bei der Ermittlung von Seegangparametern aus meteorologischen Daten ergeben die in Tab. 5 angegebenen Abweichungen. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Berechnungen mit der Wind-Wellen-Korrelation auf der Basis von Messungen erwartungsgemäß die geringsten Abweichungen ergeben. Weiter zeigt sich, daß das numerische Berechnungsmodell 'Hypas' - außer für die Wellenanlaufstufen - die vergleichsweise größten Abweichungen aufweist.

Die in Tab. 5 angegebenen Abweichungen bilden die Grundlage für die Bewertung möglicher Prognoseverfahren zur Ermittlung von Seegang in den Projektgebieten und in der westlichen Ostsee.

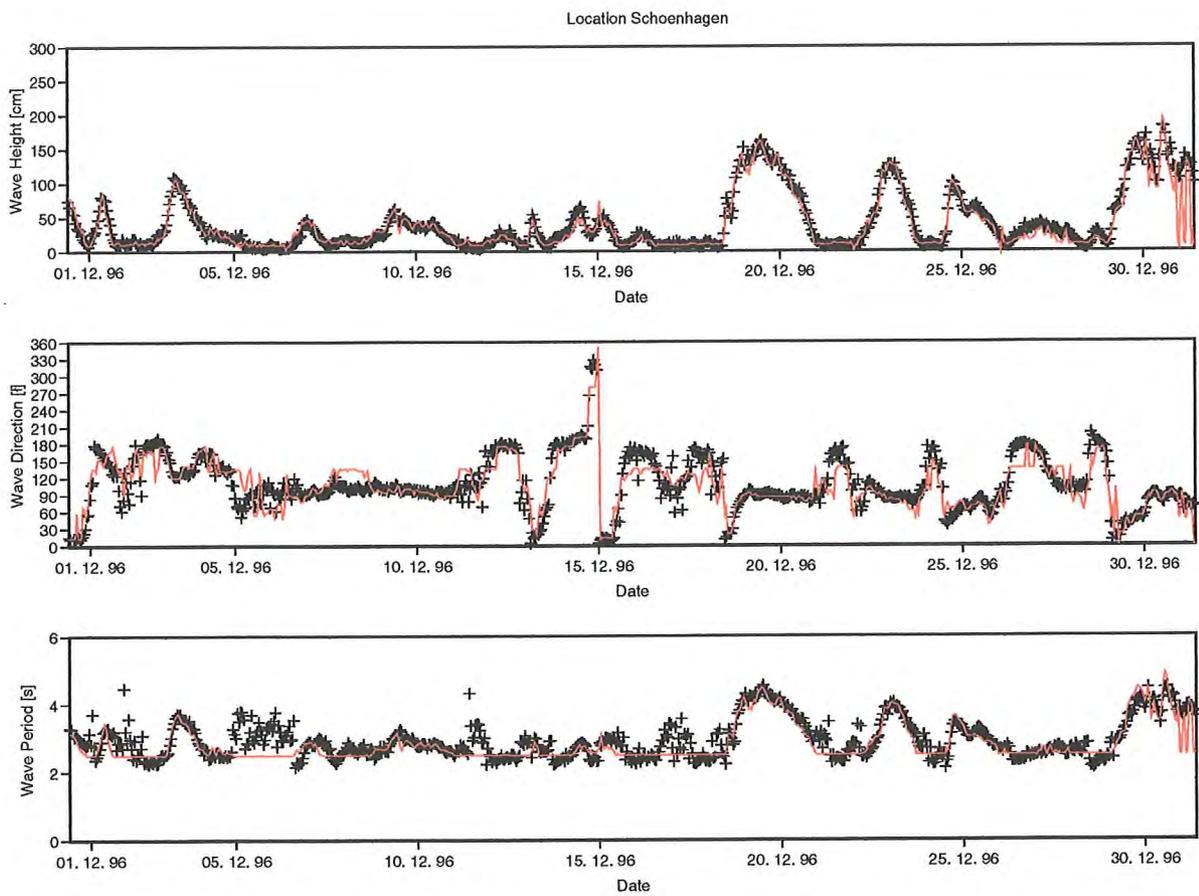


Abbildung 14: Gemessene (+) und berechnete (—) Wellenparameter Projektgebiet Schönhagen

mittlere Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Parametern				
	WWK	SPM - Flachwasser	Hypas	Hypas
$\Delta_m H_{m0}$	< 9 cm	12 cm	26 cm	k.A.
$\Delta_m T_{02}$	0,3 s	0,4 s	0,5 s	k.A.
$\Delta_m T_{02}$	0,2 s	k.A.	k.A.	k.A.
$\Delta_m \Theta_m$	20°	47° - 64°	53°	k.A.
$\Delta_m \Theta_m$	10°	23° - 30°	k.A.	k.A.
Standardabweichung berechneter und gemessener Parameter				
$\Delta_m H_{m0}$	< 14 cm	18 cm	33 cm	rd. 30 cm
$\Delta_m T_{02}$	0,30 s	0,55 s	0,6 s	0,94
$\Delta_m T_{02}$	0,27 s	k.A.	k.A.	k.A.
$\Delta_m \Theta_m$	28°	k.A.	k.A.	k.A.
$\Delta_m \Theta_m$	15°	k.A.	k.A.	k.A.
Steigung der Korrelationsgeraden				
$m H_{m0}$	1,0	0,95 - 1,03	1,5	k.A.
$m T_{02}$	1,0	1,15	1,3	k.A.
$m \Theta_m$	1,0	k.A.	0,87	k.A.

Tabelle 5: Anpassungsgüte ausgewählter Methoden zur Berechnung von Seegangparametern aus meteorologischen Daten für die Projektgebiete in der südlichen Ostsee (Wind-Wellen-Korrelationen, WWK)

### 3.4 Schließung von Datenlücken und Extrapolation der gemessenen Seegangsdaten

Zur die Schließung von Datenlücken ausgewerteter Seegangparamter, d.h. die nachträgliche Ermittlung von Seegangparametern für festgelegte Projektgebiete, eignen sich grundsätzlich rein mathematische Routinen. Beispiele hierfür sind lineare und nichtlineare Interpolationen und Spline-Interpolationsverfahren sowie Prognoseverfahren auf der Basis von Wind-Wellen-Korrelationen. In Abhängigkeit vom gewählten Verfahren und der Dauer einer Datenlücke ergeben sich unterschiedliche Abweichungen von den tatsächlich gemessenen Werten. Für Wellenhöhen und Wellenanlaufrichtungen wird die geringste Abweichung von den Meßwerten mit einer einfachen linearen Regression zwischen dem letzten Wert vor der Meßlücke und dem ersten Wert nach der Meßlücke erreicht, wenn die Dauer der Datenlücke weniger als 5 h - 6 h beträgt (Abb. 15). Mathematisch aufwendigere Verfahren (Spline-Interpolation, nichtlineare Regression etc.) und auch die Einbeziehung längerer Zeiträume vor bzw. nach der Meßlücke (in Abb. 15 mit 'b' gekennzeichnet) ergeben im Mittel keine Verbesserung der Ergebnisse; die mittleren Abweichungen werden betragsmäßig eher größer. Für den Fall, daß eine Datenlücke länger als etwa 5 h - 6 h andauert, ergeben sich mit einer Prognose der Seegangparameter auf der Basis von Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen (WWK) die geringsten Abweichungen von den Meßwerten.

Die in Abb. 15 zusammengefaßten Ergebnisse zu möglichen Abweichungen bei der Schließung von Datenlücken wurden für das Projektgebiet Heiligenhafen ermittelt. Eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf andere Gebiete ist nicht zulässig, jedoch zeigen auch die beiden anderen Projektgebiete Schönhagen und Brodten tendenziell ähnliche Ergebnisse.

Grundsätzlich eignen sich rein mathematische Interpolations- und Regressionsverfahren zur Schließung von Datenlücken nicht für große Datenlücken. Hier liefern Prognoseverfahren auf der Grundlage von Wind-Wellen-Korrelationen vergleichsweise geringere Abweichungen zwischen den berechneten Werten und den Meßwerten.

Die für das Gesamtprojekt vorgesehene Meßstrategie sah lediglich zeitlich begrenzte Seegangsmessungen in den einzelnen Projektgebieten vor. Die gemessenen Seegangsdaten sollten dann auf der Grundlage von Windinformationen, die über längere Zeiträume verfügbar sind, extrapoliert werden.

Unter der Annahme, daß sich die grundsätzlichen Beziehungen zwischen den Wind- und den Wellenparametern in Projektgebieten nicht ändern, wird der mögliche Zeitraum zunächst lediglich durch die Verfügbarkeit von homogenen und vertrauenswürdigen Winddaten begrenzt. Die Bandbreite gemessener Windgeschwindigkeiten nimmt im allgemeinen mit zunehmender Meßdauer zu. Da extreme Ereignisse selten eintreten, werden nur in Ausnahmefällen innerhalb des Untersuchungszeitraums extreme Wind- und hieraus resultierend extreme Seegangsbedingungen erfaßt. Bevor extrapolierte Seegangsdaten für weiterführende statistische Untersuchungen verwendet werden können, ist es notwendig, mögliche Abweichungen der korrelierten Daten und mögliche Grenzen der Extrapolation abzuschätzen. Weiterhin ist es unabdingbar, grundsätzlich zu klären, inwiefern die den Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen zugrunde liegenden Wind- und Seegangsdaten die Bandbreite möglicher (extremer) Wind- und Seegangsbedingungen enthalten. Hierdurch wird abgeschätzt, ob die Eingangsdaten (Wind und Seegang) ausreichend für die Extrapolation sind und in welcher Größenordnung mögliche Verbesserungen der Wind-Wellen-Korrelationen als Folge einer Verlängerung des Meßzeitraums liegen. Diese Untersuchungen sind Grundlage für die Ableitung von Bewertungskriterien zur Beurteilung von erforderlichen Meßzeiträumen für Seegangmeßprogramme.

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen basieren auf Sensitivitätsanalysen gemessener Wind- und Seegangsdaten. Die Meßdaten stammen aus den 3 Projektgebieten Schönhagen, Brodten und Heiligenhafen. Die windrichtungsabhängigen Korrelationsbeziehungen zwischen der örtlich gemessenen Windgeschwindigkeit (2h Mittelwerte) und den hieraus resultierenden Wellenhöhen wurden für ausgewählte maximale Grenz-Windgeschwindigkeiten ( $U_{gr}$ ) ermittelt (vgl. Abb. 16). Die gewählten Grenz-Windgeschwindigkeiten sind jeweils bezogen auf die maximal im Untersuchungszeitraum gemessene Windgeschwindigkeit ( $U_{max}$ ). Für die Analyse der Daten mit einer Grenzgeschwindigkeit von z.B.  $0,71 U_{max}$  wurden nur diejenigen Ereignisse berücksichtigt, bei denen die Windgeschwindigkeit geringer war als 71% der maximal gemessenen Windgeschwindigkeit. Die in Abb. 16 angegebenen Regressionskurven wurden jeweils bis zur maximal gemessenen Windgeschwindigkeit extrapoliert.

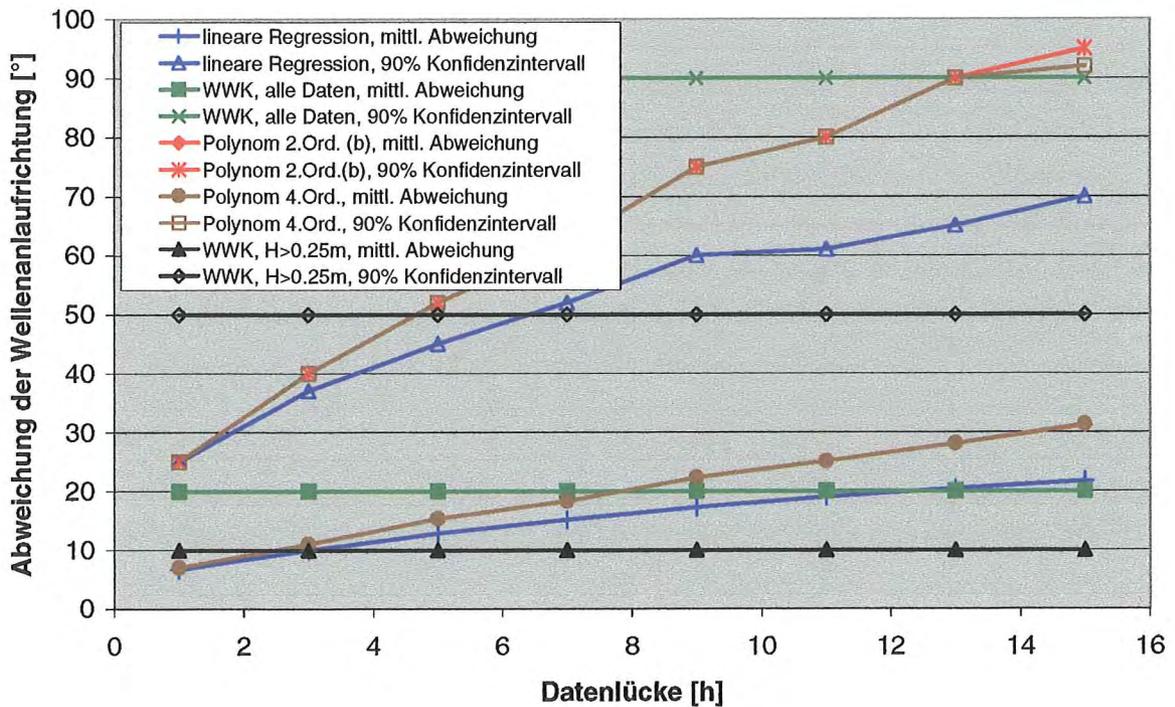
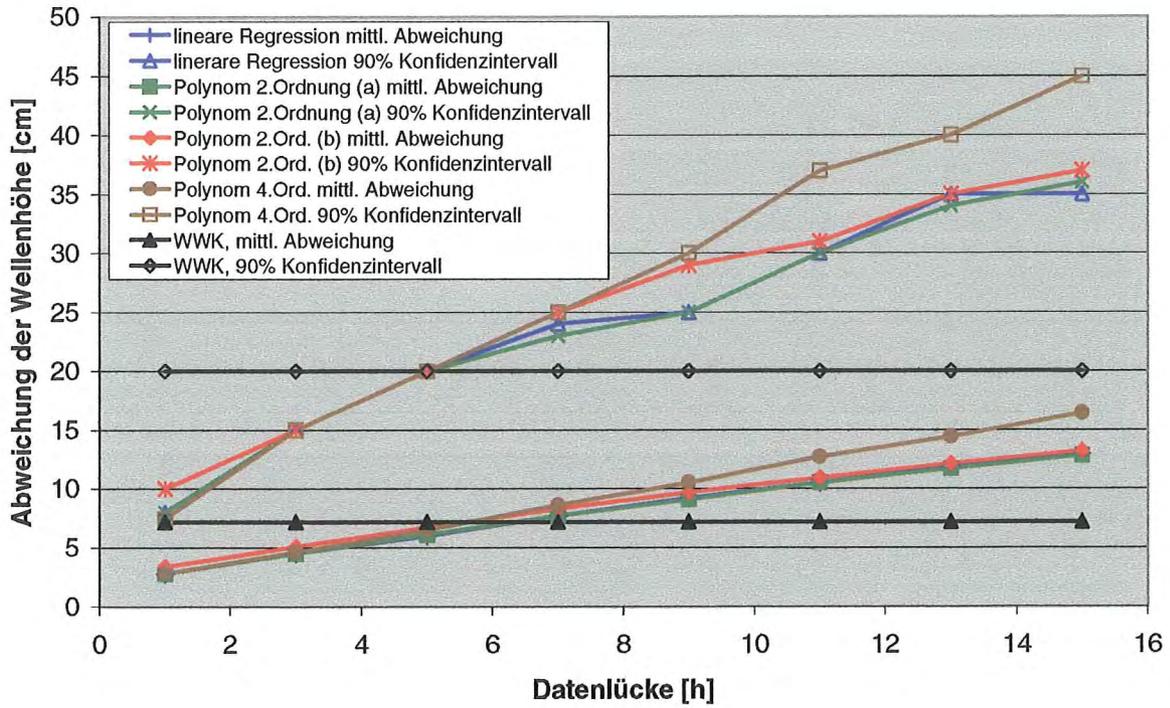


Abbildung 15: Abweichung von berechneten Seegangparametern von Meßwerten für ausgewählte Verfahren zur Schließung von Datenlücken (Bsp. Projektgebiet Heiligenhafen)

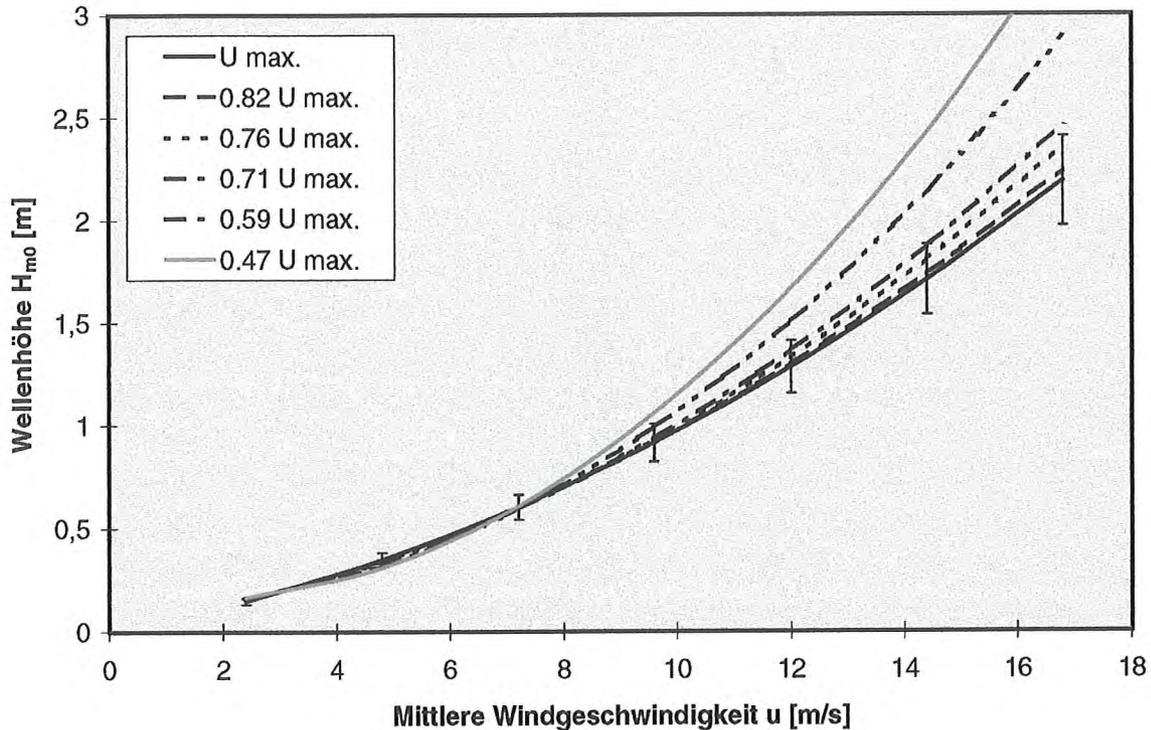


Abbildung 16: Sensitivitätsanalyse der Wind-Wellen-Korrelationen für ausgewählte Grenz-Windgeschwindigkeiten  $U_{gr}$  (2h Mittelwerte) (Bsp.: Projektgebiet Brodten Richtungssektor  $25^\circ < \Theta \text{ Wind} < 56^\circ$ ) (nach FRÖHLE, FITTSCHEN 1999)

Die 10% Abweichungsgrenzen bezogen auf die Regressionskurve für die Grenz-Windgeschwindigkeit  $1,0 U_{max}$  umfassen hier die Regressionskurven bis zur Grenz-Windgeschwindigkeit von  $0,76 U_{max}$ . Dies bedeutet, daß die Wind-Wellen-Korrelation basierend auf einem auf  $0,76 U_{max}$  begrenzten Datensatz nur vergleichsweise geringe Abweichungen von der Wind-Wellen-Korrelation mit allen verfügbaren Daten liefert und somit für die betrachtete Bandbreite möglicher Windgeschwindigkeiten nahezu die gleiche Aussagefähigkeit hat (vgl. FRÖHLE, FITTSCHEN 1999).

Diese Auswertungen wurden für alle Windrichtungssektoren und alle 3 Projektgebiete durchgeführt. In Tab. 6 sind die Ergebnisse zusammengefaßt. Grundsätzlich gelten die angegebenen Werte nur für die jeweiligen Projektgebiete, die Ergebnisse sind jedoch vom Grundsatz her ähnlich, so daß die Übertragung auf andere Projektgebiete – zumindest in der südwestlichen Ostsee – möglich scheint.

Für die Durchführung und Planung von Meßprogrammen resultiert hieraus, daß Seegangsmessungen, die als Basis für die Erstellung von Wind-Wellen-Korrelationen durchgeführt werden, beendet werden können, wenn die zur Korrelation benötigten Wind- und Wellendaten in den betrachteten Windrichtungssektoren bis zu den in Tab. 6 angegebenen Grenz-Windgeschwindigkeiten verfügbar sind. In günstigen Fällen ist es also möglich, Wind-Wellen-Beziehungen auf der Basis von vergleichsweise kurzfristigen Seegangsmessungen ohne wesentliche Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit der Ergebnisse zu ermitteln; die Ko-

Projektgebiet	Grenz-Windgeschwindigkeit $U_{gr}$ [m/s]			
	10% Abweichung	7,5% Abweichung	5% Abweichung	2,5% Abweichung
Schönhagen	0,75 $U_{max}$	0,81 $U_{max}$	0,86 $U_{max}$	0,93 $U_{max}$
Heiligenhafen	0,75 $U_{max}$	0,81 $U_{max}$	0,86 $U_{max}$	0,95 $U_{max}$
Brodten	0,76 $U_{max}$	0,81 $U_{max}$	0,91 $U_{max}$	0,97 $U_{max}$

Tabelle 6: Grenz-Windgeschwindigkeiten ( $U_{gr}$ ) und zugehörige Abweichungen für Wind-Wellen- Korrelationsrechnungen (erweitert nach Fröhle, Fittschen 1999)

steneinsparungen für Meßprogramme sind dann erheblich. Für die Anwendung der Seegangsmessungen als Grundlage für die Bewertung von morphologischen Veränderungen an den Steilufer vor den 3 Projektgebieten resultiert hieraus, daß eine Extrapolation der Seegangsdaten auf längere Zeiträume über einen weiten Windgeschwindigkeitsbereich möglich ist und daß Abweichungen bei der Interpretation der Ergebnisse abgeschätzt werden können.

Für Schönhagen wurden im Untersuchungszeitraum Ostwindereignisse und zugehörige Seegangereignisse mit Windgeschwindigkeiten von bis zu rd. 17 m/s (2h Mittelwerte) aufgezeichnet. Hieraus resultiert, daß die Extrapolation ohne wesentliche Einschränkungen bei der Genauigkeit bis zu Windgeschwindigkeiten von etwa 22 m/s bis 23 m/s (2h Mittelwerte) durchgeführt werden können.

Für Heiligenhafen wurden Westwindereignisse und zugehörige Seegangereignisse mit Windgeschwindigkeiten von bis zu rd. 21 m/s (2h Mittelwerte) aufgezeichnet. Hieraus resultiert, daß für dieses Projektgebiet Extrapolationen bis zu Windgeschwindigkeiten von etwa 28 m/s (2h Mittelwerte) durchgeführt werden können.

Im Projektgebiet Brodten wurden Windereignisse aus Nordost und zugehörige Seegangereignisse mit Windgeschwindigkeiten von bis zu rd. 17 m/s (2h Mittelwerte) aufgezeichnet. Hieraus resultiert, daß die Extrapolation – wie auch im Projektgebiet Schönhagen – bis zu Windgeschwindigkeiten von etwa 22 m/s bis 23 m/s (2h Mittelwerte) durchgeführt werden können.

Für die Projektgebiete liegen nach Schließung der Datenlücken und der Extrapolation der Meßdaten auf der Grundlage von Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen vertrauenswürdige Seegangsdaten über Zeiträume von rd. 17 Jahren für Schönhagen, rd. 20 Jahren für Brodten und mehr als 40 Jahren für Heiligenhafen vor.

### 3.5 Mittleres Seegangsklima

Die langfristige küstenparallele Umlagerung von Sedimenten wird wesentlich durch die mittleren Seegangsverhältnisse beeinflusst (vgl. z.B. KOHLHASE 1991). Daher ist für die Bewertung von seegangserzeugtem Sedimenttransport die Kenntnis der lokalen mittleren Seegangsverhältnisse und deren örtliche und räumliche Verteilung von großer Bedeutung.

Einen ersten Überblick über die langzeitstatistischen Verhältnisse des Seegangs in einem Projektgebiet erhält man durch die Auftragung charakteristischer Seegangparameter bzw. abgeleiteter Größen sowie – vergleichsweise – der zugehörigen Parameter als Ganglinie oder Summenlinie. Zweckmäßigerweise werden die Darstellungen für definierte Zeiträume (Monate, Quartale, Halbjahre, Jahre etc.) erzeugt. Aus den Ganglinien können beispielsweise Mittelwerte und Größtwerte einzelner Parameter direkt abgeleitet werden (vgl. Abb. 17).

Für die Bewertung der mittleren Seegangsverhältnisse, die eine wichtige Komponente für die Abschätzung von lanfristigen küstenparallelen Sedimenttransportraten sind, haben Ganglinien der Seegangparameter nur eingeschränkte Aussagefähigkeit.

Einen vergleichsweise guten Überblick über die Verhältnisse in einem Projektgebiet erhält man, wenn man die richtungsabhängige Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen mit den jeweils zugehörigen Mittelwerten der Wellenperioden und mit Mittelwerten (bzw. je nach Fragestellung auch extrem hohen bzw. extrem niedrigen) zugehöriger Wasserstände in einer Tabelle zusammenfaßt. Ein Beispiel ist in Tab. 7 wiedergegeben. Die mittleren Häufigkeitsverteilungen des Seegangs in den 3 Projektgebieten sind im Anhang zusammengefaßt.

Bei der Interpretation der Ergebnisse von Häufigkeitsuntersuchungen ist der zugrunde liegende Zeitraum von entscheidender Bedeutung. Um mittlere Seegangsverhältnisse in einem Untersuchungsgebiet beschreiben zu können, ist es notwendig, die Stichprobe aus in sich geschlossenen klimatischen Zyklen – d.h. mindestens 1 Jahr – auszuwählen. Mögliche Unterschiede der mittleren Seegangsverhältnisse zwischen einzelnen Jahren sind jedoch nicht zu vernachlässigen (FRÖHLE 2000). Selbst für lange Meßzeiträume und für Klassen mit vergleichsweise großer Eintrittswahrscheinlichkeit von >5% bis >10% (vgl. Tab. 7) aller Ereignisse liegt die Standardabweichung der Einzelergebnisse noch in einer Größenordnung von bis zu 10%.

Daher ist es im allgemeinen bei einer langzeitstatistischen Bewertung von Seegang notwendig, die Daten über sehr lange Zeiträume zu erfassen bzw. mit geeigneten Mitteln (vgl. Kap. 3.3) zu extrapolieren.

### 3.6 Extreme Seegangereignisse

Auf die Bedeutung extremer Ereignisse insbesondere im Hinblick auf die Bewertung von Steiluferabbrüchen und der Verlagerung von Sedimenten im Quertransport wurde bereits hingewiesen. Hierbei sind die Ereignisse von entscheidender Bedeutung, bei denen zeitgleich mit extremen Wellenhöhen auch hohe Wasserstände eingetreten sind, so daß das Steilufer direkt dem Wellenangriff ausgesetzt ist. Ferner ist zur Bewertung von Steiluferabbrüchen auch die Dauer und der Ablauf extremer Ereignisse bedeutsam.

Im folgenden werden daher die Eintrittswahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse ermittelt. Hierbei werden zunächst maximale signifikante Wellenhöhen in extremen Ereignissen betrachtet. Basierend hierauf werden Dauer und Ablauf von Sturmereignissen sowie der Einfluß wech-

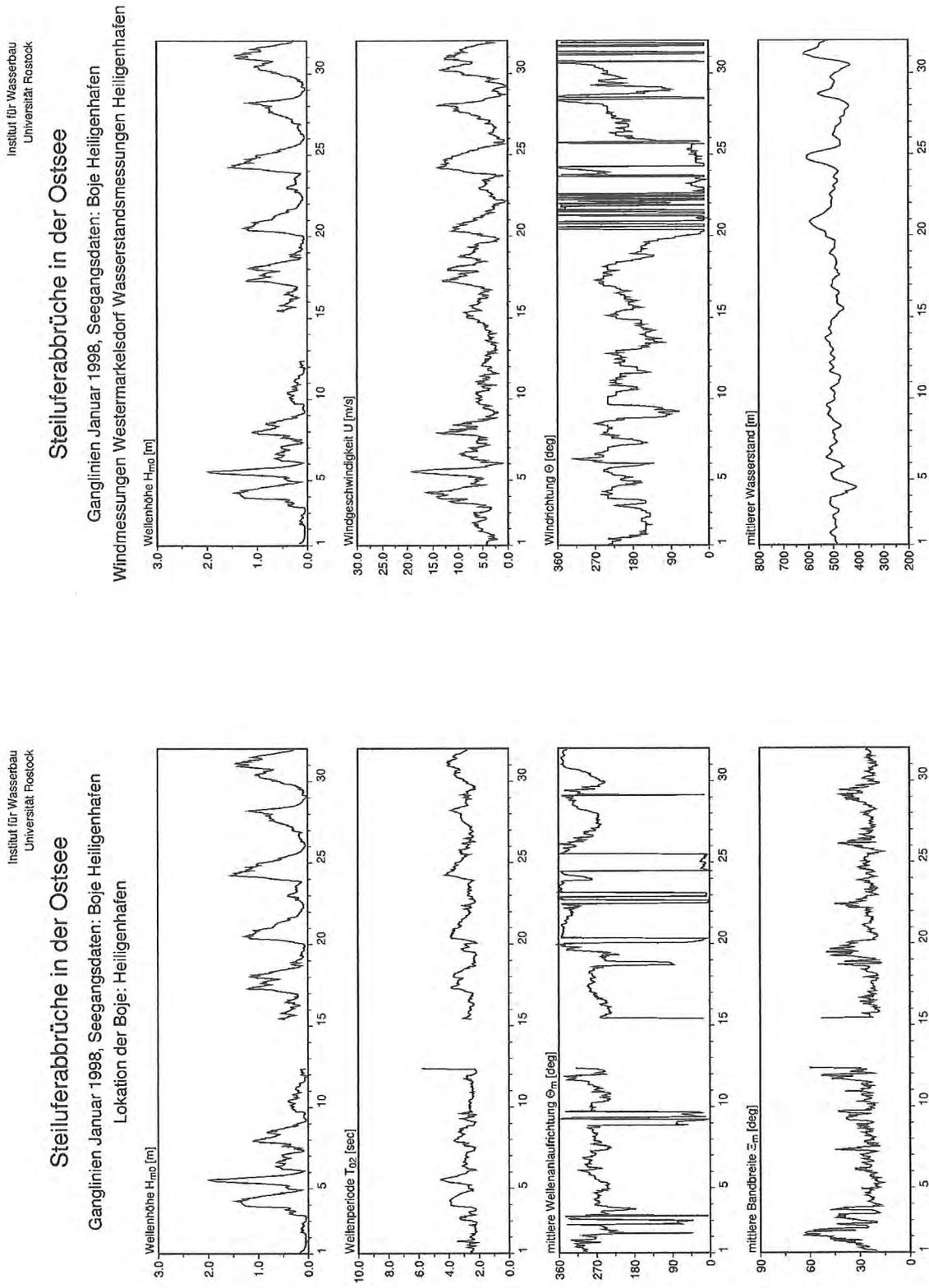


Abbildung 17: Darstellung von charakteristischen Seegangparametern und zugehörigen Parametern. Seegangsmessungen Heiligenhafen, Januar 1998

Häufigkeitsverteilung der Seegang, Projektgebiet Heiligenhafen (01.01.1991 – 31.12.1998)													
H <sub>m0</sub>	N		NE		E		SW		W		NW		
cm	0	22,5	45	67,5	90	...	225	247,5	270	292,5	315	337,5	Summe
0–25	9,965	0,023	0,125	0,852	3,358		1,445	1,680		11,194	8,042	4,032	40,714
25–50	1,213	0,499	0,483	2,045	3,215		0,158	2,023	4,249	4,674	4,299	1,685	24,541
50–75	1,478	0,220	0,197	0,436	0,792		0,011	0,553	2,804	4,883	2,949	0,603	14,925
75–100	0,750	0,009	0,026	0,005	0,088			0,197	1,231	3,733	2,498	0,474	9,136
100–125	0,319	0,021	0,012	0,049	0,005			0,071	0,410	2,313	2,048	0,305	5,553
125–150	0,164	0,017						0,012	0,179	1,182	1,286	0,132	2,972
150–175	0,105	0,006						0,015	0,076	0,454	0,534	0,070	1,26
175–200	0,044							0,002	0,017	0,140	0,261	0,043	0,505
200–225	0,021								0,006	0,080	0,114	0,011	0,232
225–250	0,014									0,040	0,050	0,008	0,111
250–275	0,008									0,008	0,020	0,005	0,040
275–300	0,005								0,002		0,002		0,008
300–325													
325–350										0,003			0,003
Summe	14,085	0,876	0,842	3,430	7,457		1,614	4,554	8,972	28,703	22,102	7,365	100,000
Zugehörige mittlere Wellenperiode T02 (s)													
H <sub>m0</sub>	N		NE		E		SW		W		NW		
cm	0	22,5	45	67,5	90	...	225	247,5	270	292,5	315	337,5	
0–25	2,7	2,6	2,6	2,5	2,6		2,7	2,6	0	2,6	2,7	2,6	
25–50	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7		2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	
50–75	3	3	3	3	3		3	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	
75–100	3,4	3,4	3,3	3,4	3,3			3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	
100–125	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7			3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	
125–150	4	4						4	4	4	4	4	
150–175	4,3	4,3						4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	
175–200	4,6							4,7	4,7	4,6	4,6	4,6	
200–225	4,9								4,9	4,9	4,9	5	
225–250	5,3									5,2	5,2	5,3	
250–275	5,5									5,5	5,5	5,4	
275–300	5,8								5,9		5,7		
300–325													
325–350										6,0			
Zugehöriger mittlerer Wasserstand (cm)													
H <sub>m0</sub>	N		NE		E		SW		W		NW		
cm	0	22,5	45	67,5	90	...	225	247,5	270	292,5	315	337,5	
0–25	503	519	509	506	504		497	492	0	497	501	505	
25–50	517	520	516	507	505		499	491	492	497	503	510	
50–75	526	539	535	518	516		502	481	483	494	507	514	
75–100	532	554	572	536	530			484	476	490	506	512	
100–125	542	563	616	548	536			481	471	487	502	516	
125–150	538	572						480	457	483	496	515	
150–175	542	644						487	460	475	493	519	
175–200	556							486	453	470	491	520	
200–225	595								449	476	486	509	
225–250	581									464	493	479	
250–275	610									448	490	508	
275–300	617								531		437		
300–325													
325–350										503			

Tabelle 7: Mittlere Häufigkeitsverteilung des Seegangs vor Heiligenhafen mit zugehörigen mittleren Perioden und Wasserständen

selnder Wasserstände in die Auswertungen statistisch einbezogen. Die Bewertung extremer Ereignisse muß immer auch die Betrachtung physikalisch möglicher Grenzzustände des Seegangs z.B. als Folge begrenzter Wassertiefen mit einschließen.

Die extremwertstatistische Bewertung von Daten erfolgt im allgemeinen auf der Basis einer Stichprobe, die aus den verfügbaren Datensätzen ausgewählt wird. Für die Extrapolation der Daten wird den Stichprobendaten mittels einer sog. plotting-position-Formel eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet, und die Daten werden mit statistischen Methoden an extremwertstatistische Verteilungen angepaßt und extrapoliert.

Der Umfang der Stichprobe und die Datensätze, die für die Stichprobe ausgewählt werden, sind in Abhängigkeit von der untersuchten Fragestellung jeweils problemabhängig zu definieren. Die Stichprobendaten, die als Eingangsdaten für die Untersuchung und statistische Bewertung extremer Ereignisse benutzt werden sollen, müssen – der statistischen Fragestellung entsprechend – immer der Grundgesamtheit der extremen Ereignisse entstammen. Hierbei dürfen mögliche unterschiedliche Grundgesamtheiten nicht miteinander vermischt werden. Grundsätzlich müssen die Daten homogen sein, d.h. die Daten müssen demselben statistischen Versuch entstammen und dürfen keine systematischen Unterschiede aufweisen dürfen. Ferner müssen die für die Untersuchungen berücksichtigten Einzelereignisse im statistischen Sinne unabhängig voneinander sein (z.B. GODA 1998), und ggf. vorhandene Trends sind vor der statistischen Analyse zu eliminieren.

Bei der Untersuchung extremer Seegangereignisse haben sich verschiedene Arten der Stichprobenwahl aus der verfügbaren Gesamtheit der Daten bewährt (z.B. ISAACSON, MACKENZIE 1981, MATHIESEN ET AL. 1994, GODA 1998, FRÖHLE, KOHLHASE 1999):

- Jährliche Maximalwerte,
- Monatliche Maximalwerte und
- Peak-Over-Threshold- (POT) Werte (Grenzwert-Überschreitungswerte).

Bei der Festlegung der Stichprobe muß sichergestellt werden, daß jedes Extremereignis nur jeweils einmal in der Stichprobe berücksichtigt wird.

Untersuchungen von GODA (1979, zitiert bei GODA 1988) und Vergleichsberechnungen mit Seegangsdaten aus der Nordsee (FRÖHLE & KOHLHASE 1996) und aus der Ostsee zeigen, daß Seegangsdaten bis zu einem Zeitintervall von  $\Delta t = 6h$  deutlich miteinander korrelieren und erst ab einem Zeitintervall von etwa  $\Delta t = 24h$  nahezu unkorreliert sind. Nach GODA (1988) liegen die Korrelationskoeffizienten in einem Bereich zwischen  $r = 0,3$  bis  $r = 0,5$  für ein Zeitintervall von  $\Delta t = 24h$ . Für Messungen in der Nordsee (vor Sylt) wurden Korrelationskoeffizienten zwischen  $r = 0,99$  für  $\Delta t = 1h$  und  $r = 0,38$  für  $\Delta t = 24h$  ermittelt, für die Seegangereignisse in den betrachteten Projektgebieten der Ostsee (Brodten, Heiligenhafen und Schönhagen) lagen die Korrelationskoeffizienten erst ab einem Zeitintervall von  $\Delta t = 24h$  unter  $r = 0,5$ . Für diese

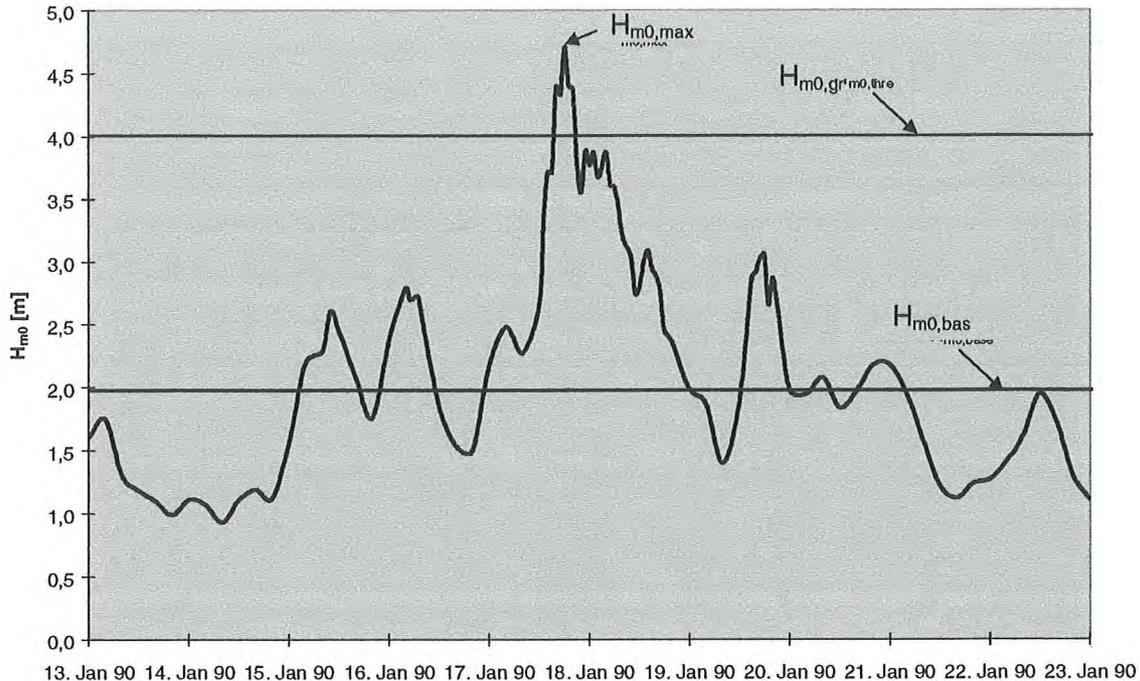


Abbildung 18: Zur Definition von Peak-Over-Threshold-Werten (POT-Werten)

3 Projektgebiete lagen die Korrelationskoeffizienten für Zeitintervalle bis zu  $\Delta t = 6$  h größer als  $r = 0,8$ .

Die Definition von POT-Werten für die Auswertung von Seegangsdaten ist in Abb. 18 dargestellt. Es wird deutlich, daß hierbei nicht nur der eigentliche Grenzwert ( $H_{m0,gr}$ ) festgelegt wird, sondern auch ein sog. Basiswert ( $H_{m0,bas}$ ) mit dem das Ende eines Extremereignisses definiert wird. Dieser Basiswert ( $H_{m0,bas}$ ) entspricht in einem Seegebiet immer einem Ereignis, welches als durchschnittlich eingeordnet werden kann. Durch die Festlegung eines Basiswertes wird verhindert, daß im Falle von fluktuierenden Wellenhöhen innerhalb eines Extremereignisses die Daten eines Extremereignis häufiger als einmal berücksichtigt werden. Dieses Kriterium kann auch auf Jahresmaxima sowie monatliche Maximalwerte angewendet werden.

Vergleichsuntersuchungen zeigen, daß die Ergebnisse der POT-Untersuchungen im statistischen Sinne recht robust gegen die Definition des Basiswertes sind, sofern der Basiswert – abhängig vom jeweils betrachteten Projektgebiet – kleiner als 50% und größer als 25% des untersuchten Grenzwertes ( $0,25\Delta H_{m0,thres} > H_{m0,base} > 0,5\Delta H_{m0,thres}$ ) gewählt wird.

Die Definition und endgültige Festlegung der Stichprobendaten für extremwertstatistische Untersuchungen erfolgt generell auf Grundlage des Zeitraums, für den Seegangsdaten verfügbar sind. Für die 3 Projektgebiete wurden Jahresmaxima der Wellenhöhen als Eingangsdaten für die extremwertstatistische Analyse gewählt. Vergleichend wurden die extremen Ereignisse ferner auf der Grundlage von Monatsmaxima und von POT-Daten berechnet. Die Ergebnisse deckten sich im wesentlichen mit den im folgenden angegebenen Wellenparametern.

Die statistische Unabhängigkeit der Stichprobe wurde mit Methoden der Teststatistik und auf der Grundlage von Korrelationsanalysen untersucht (z.B. SACHS 1984).

ausgewählte Extremwertverteilungen und zugehörige Dichtefunktionen		
Verteilung	Verteilungsfunktion	Dichtefunktion
WEIBULL	$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^\beta\right)$	$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^\beta\right)$
Log-Normal	$F(x) = \int_{x_0}^x f(x)dx$	$f(x) = \frac{\exp\left[-\frac{(\ln(x-x_0)-\alpha)^2}{2\beta^2}\right]}{(x-x_0)\beta\sqrt{2\pi}}$
Extremal-I	$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\alpha}{\beta}\right)\right]$	$f(x) = \frac{1}{\beta} \cdot \exp\left\{\frac{x-\alpha}{\beta} - \exp\left[\frac{x-\alpha}{\beta}\right]\right\}$
PEARSON-III	$F(x) = \int_{x_0}^x f(x)dx$	$f(x) = \frac{(x-x_0)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_0)}{\beta}\right]$
Log-PEARSON-III	$F(x) = \int_{x_0}^x f(x)dx$	$f(x) = \frac{(\ln(x)-\ln(x_0))^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln(x)-\ln(x_0))}{\beta}\right]$

Tabelle 8: Verteilungs- und Dichtefunktionen für ausgewählte statistische Verteilungen

Die gewählten statistischen Tests und auch die Berechnung der Korrelationskoeffizienten der extremen Ereignisse haben für alle 3 Projektgebiete ergeben, daß die für die extremwertstatistischen Untersuchungen ausgewählten Datensätze (Jahresmaxima, Monatsmaxima und POT-Werte) unabhängig voneinander sind und somit für weitere statistische Untersuchungen herangezogen werden können.

Grundlage für die Untersuchung von Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse ist die Verteilungsfunktion der gewählten Stichprobe. Untersuchung und Bewertung extremer Ereignisse erfolgen im allgemeinen auf der Basis ausgewählter statistischer Extremwert-Verteilungen. Zur Beschreibung extremer Seegangseignisse werden häufig die Log-Normal-Verteilung, Verteilungen aus der Gruppe der Extremal-Verteilungen (hier vielfach die Extremal-I und die WEIBULL-Verteilung) sowie Verteilungen aus der Gruppe der Gamma-Verteilungen (PEARSON-III-, Log-PEARSON-III- und Exponential-Verteilung) eingesetzt (GODA 1988, GODA et al. 1993). Die Dichte- und Verteilungsfunktionen der im Küstenwasserbau für extremwertstatistische Analysen von Seegang gebräuchlichsten Verteilungen sind in Tab. 8 zusammengefaßt. Außer für die nur in der 2-parametrischen Form existierenden Extremal-I-Verteilung sind jeweils die 3-parametrischen Formen der Verteilungen angegeben. Die häufig angewendeten 2-parametrischen Formen der Verteilungen erhält man für  $x_0=0$ .

Als Voraussetzung für extremwertstatistische Untersuchungen einer Stichprobe ist es notwendig, jedem einzelnen Datensatz der Stichprobe mittels einer sog. Plotting-Position-Formel eine definierte Eintrittswahrscheinlichkeit zuzuordnen. Hierzu werden zunächst die Datensätze der Stichprobe – beginnend mit dem größten Wert – der Größe nach geordnet. Der Index  $i$  zeigt den Rang des entsprechenden Datensatzes an. In einer Stichprobe mit  $n$  Datensätzen korrespondiert der Wert mit dem Index  $i = 1$  mit dem größten Wert, der Index  $i = n$  mit dem kleinsten Wert. Den geordneten Datensätzen der Stichprobe wird eine Eintrittswahrscheinlichkeit, die sog. Plotting-Position, zugeordnet. Gebräuchliche Formeln zur Berechnung der Plotting-Positions sind in Tab. 9 zusammengefaßt.

Ist die wahrscheinliche Verteilung der Daten bekannt, kann es häufig vorteilhaft sein, speziell modifizierte Formeln bzw. direkt aus der Verteilungsfunktion abgeleitete sog. expected proba-

Ausgewählte Plotting-Position-Formeln	
HAZEN	$p_i = \frac{i-0,5}{n}$
WEIBULL / GUMBEL	$p_i = \frac{i}{n+1}$
BLOM	$p_i = \frac{i-\frac{3}{8}}{n+\frac{1}{4}}$
GRINGORTON	$p_i = \frac{i-0,44}{n+0,12}$
GODA	$p_i = \frac{i-(0,2+0,27\sqrt{n})}{n+(0,2+0,23\sqrt{n})}$

Tabelle 9: Ausgewählte Gleichungen zur Ermittlung der Plotting-Position eines Datensatzes

bility plotting - positions zur Berechnung der Plotting - Positions zu wählen. Hierdurch kann vielfach der Bias (Abweichung vom Erwartungswert) der den Stichprobendaten zugeordneten Wahrscheinlichkeiten deutlich vermindert werden (CARTER, CHALLENGER 1983). So empfiehlt sich die Formel von BLOM (1958) für die Untersuchung normalverteilter Daten, die Formel von GRINGORTON (1963) für Extremal-I verteilte und die Formel von GODA (1988) für die Untersuchung WEIBULL - verteilter Daten.

Ist die Verteilung der Daten nicht bekannt, sollte die von HAZEN (1914) vorgeschlagene Formel (vgl. Tab. 9) zur Berechnung der Plotting - Positions angewendet werden, da sie bei unterschiedlichsten Formen der Verteilung der Daten akzeptable Ergebnisse ergibt, d.h., der Bias ist gering (CUNANE 1978). Als Plotting - Position wird bei der Formel von Hazen die Mitte des Wahrscheinlichkeitsintervalls zwischen zwei benachbarten Werten gewählt.

### Ermittlung der Verteilungsparameter

Die Eigenschaften der statistischen Verteilungen (Dichte- und Verteilungsfunktionen) werden durch die Parameter (vgl. Tab. 8) der jeweiligen Verteilung bestimmt. Nach der Auswahl einer statistischen Verteilung als mögliche Verteilung der Stichprobe müssen die Verteilungsparameter ermittelt werden, die die beste empirische Anpassung der gewählten Verteilung an die Stichprobendaten ergeben. Hierzu sind mehrere statistische Methoden bekannt:

- Graphische Methode
- Regressionsmethode
- Maximum-Likelihood-Methode
- Jackknife-Methode

Im folgenden wird die Ermittlung der Verteilungsparameter, dem Sprachgebrauch der Statistik folgend, als Parameterschätzung bezeichnet. Der Begriff Schätzen der Parameter impliziert in diesem Zusammenhang im Gegensatz zum allgemeinen Sprachgebrauch nicht eine subjektive Beeinflussung der Parameter, sondern resultiert aus der Tatsache, daß die Grundgesamtheitsparameter aus Stichprobendaten natürlich nicht mit letzter Sicherheit ermittelt werden können, da die Grundgesamtheit üblicherweise nicht verfügbar ist und die Stichprobe nur einen (im allgemeinen sehr geringen) Teil der Grundgesamtheit enthält (vgl. SACHS 1984).

Die *graphische* Methode ist die einfachste und anschaulichste Methode. Die Stichprobendaten werden in Wahrscheinlichkeitspapier der ausgewählten Verteilung eingetragen. Zur Anpassung der Verteilung an die Daten wird eine Ausgleichsgerade durch die Daten gelegt. Die Bewertung der Anpassung und die Minimierung der Abweichungen zwischen den Stichprobendaten und der Verteilung erfolgt optisch. Die Parameter der Verteilung werden aus der Steigung der Ausgleichsgeraden und aus den Achsenabschnitten ermittelt (D'AGOSTINO, STEVENS 1986).

Die *Regressionsmethode* (Methode der kleinsten Fehlerquadrate) ist die analytische Umsetzung der graphischen Methode. Bei der Regressionsmethode werden die Daten zunächst linearisiert. Nach der Linearisierung wird nach der linearen Regressionsrechnung (Minimierung der Fehlerquadrate) eine Ausgleichsgerade durch die Daten gelegt. Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden und dem Achsenabschnitt werden analog zur graphischen Methode die Parameter der zugrunde gelegten Verteilungsfunktion berechnet.

Bei der Momentenmethode werden die Verteilungsparameter aus den Momenten (1. Moment (Mittelwert), 2. Moment (Varianz), usw.) ermittelt. Die Momentenmethode hat den Vorteil, daß sie sehr einfach anwendbar ist und häufig zu guten Schätzwerten für die Verteilungsparameter führt. Dies insbesondere dann, wenn das erste und das zweite Moment der Stichprobe ausreichen, um die Verteilungsparameter zu ermitteln. Bei kleinen Stichproben oder bei schiefen Verteilungen kann die Schätzung mit der Momentenmethode zu sehr großen Schätzfehlern (Bias) führen.

Das wichtigste Verfahren zur Ermittlung von Schätzwerte für die Parameter einer Verteilung aus der Stichprobe ist die Maximum-Likelihood-Methode. Sie wurde von R.A. FISHER (1912) in allgemeiner Form eingeführt. Die Maximum-Likelihood-Methode geht unter der Annahme, daß die gemessenen Stichprobenwerte unabhängige Ereignisse des durch die Dichtefunktion beschriebenen Zufallsprozesses sind, von der Wahrscheinlichkeitsdichte  $f(x)$  der bekannten Verteilungsfunktion aus. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der einzelnen Stichprobenwerte  $x_i$  ist somit  $f(x_i)$ . Die Likelihoodfunktion (L) entspricht der Wahrscheinlichkeit, daß die Elemente der Stichprobe in der vorhandenen Form auftreten. Sie hängt somit von den Werten  $x_i$  der Stichprobe und dem Funktionsverlauf  $f(x)$  der Wahrscheinlichkeitsdichte ab. Die Maximum-Likelihood-Methode berechnet nun den Parameterwert  $u$  bzw. die Parameterwerte  $u_i$  der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, welche mit größter Wahrscheinlichkeit eintreten, d.h. für den/die die Likelihood-Funktion ein Maximum hat. Die Anwendung des Prinzips kann häufig vereinfacht werden, wenn die Likelihood-Funktion logarithmiert wird (Plate 1993).

Für die Anpassung von (Seegangs-)Daten an extremwertstatistische Verteilungsfunktionen sind die Maximum-Likelihood-Methode und die Momentenmethode grundsätzlich besonders gut geeignet, da die Anpassung der Daten direkt auf Basis der Stichprobe erfolgen kann und keine weitere Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten zu den einzelnen Datensätzen erforderlich ist.

Bei der Anpassung von Verteilungen an Stichproben wird zwar jeweils nur ein (der bestmögliche) Parametersatz geschätzt, dieser Parametersatz ist jedoch als Folge der statistischen

Streubreite der Verteilungsparameter mit Unsicherheiten behaftet. Hieraus resultiert direkt, daß auch die Verteilungsfunktion eine Streubreite aufweist. Als Maß für die Streubreite der (geschätzten) Verteilungsparameter oder der (geschätzten) Verteilungsfunktion dienen Vertrauensbereiche (sog. Konfidenzintervalle). Diese besagen, daß die gesuchte Größe mit einer definierten, vorher festgelegten Wahrscheinlichkeit (Signifikanzniveau) innerhalb der Grenzen des Konfidenzintervalls gefunden werden kann. Zum Beispiel liegt die Verteilungsfunktion der Stichprobendaten mit 90%-iger Wahrscheinlichkeit innerhalb des 90%-Konfidenzintervalls der Verteilungsfunktion.

### **Bewertung der Anpassung**

Grundsätzlich sind für extremwertstatistische Untersuchungen alle denkbaren stetigen Verteilungen geeignet, und im allgemeinen ist auch eine Anpassung der Stichprobe an eine gewählte Verteilungsfunktion und somit die Schätzung der Verteilungsparameter unabhängig von der gewählten Methode problemlos möglich. Ob die gewählte Verteilungsfunktion mit den ermittelten Verteilungsparametern jedoch der Verteilung der Stichprobe entspricht und somit die Verteilung der Grundgesamtheit bekannt ist, kann jedoch mit der Anpassung der Schätzung der Verteilungsparameter allein nicht beantwortet werden.

Eines der Hauptprobleme bei extremwertstatistischen Untersuchungen ist die Bewertung der Güte der Anpassungen, d.h. die Beantwortung der Fragen, ob:

- einerseits die Verteilungsfunktion der Stichprobe und somit die der zugrunde liegenden Grundgesamtheit und die angepaßte Verteilungsfunktion der gewählten Verteilung zumindest im statistischen Sinne gleich sind und
- andererseits die gewählte statistische Verteilung im Vergleich zu anderen Verteilungen eine bessere Anpassung an die Stichprobe ergibt und somit der Grundgesamtheit besser entspricht.

Grundsätzlich werden bei der Bewertung der Anpassung von Daten an Verteilungsfunktionen die visuelle Methode, die Berechnung von Korrelationskoeffizienten, statistische Tests sowie weitere häufig jedoch lediglich für Spezialfälle aussagefähige Methoden angewendet.

Für Anwendungen im Küstenwasserbau haben sich insbesondere die visuelle Methode in Kombination mit statistischen Testverfahren bewährt (FRÖHLE 2000).

In Abb. 19 ist ein Beispiel für die Bewertung der Anpassung dargestellt. Die untersuchten Daten (Jahresmaxima der Wellenhöhen im Projektgebiet Heiligenhafen) sind in Wahrscheinlichkeitspapier ausgewählter extremwertstatistischer Verteilung (Abb.19a, b, c) zusammen mit den 90% - Konfidenzintervallen dargestellt. Die Anpassung an die jeweilige Verteilung wurde mit der Maximum-Likelihood-Methode durchgeführt. In Abb.19d sind zum weiteren Vergleich 3 untersuchte Verteilungen in ein Wahrscheinlichkeitsdiagramm eingetragen.

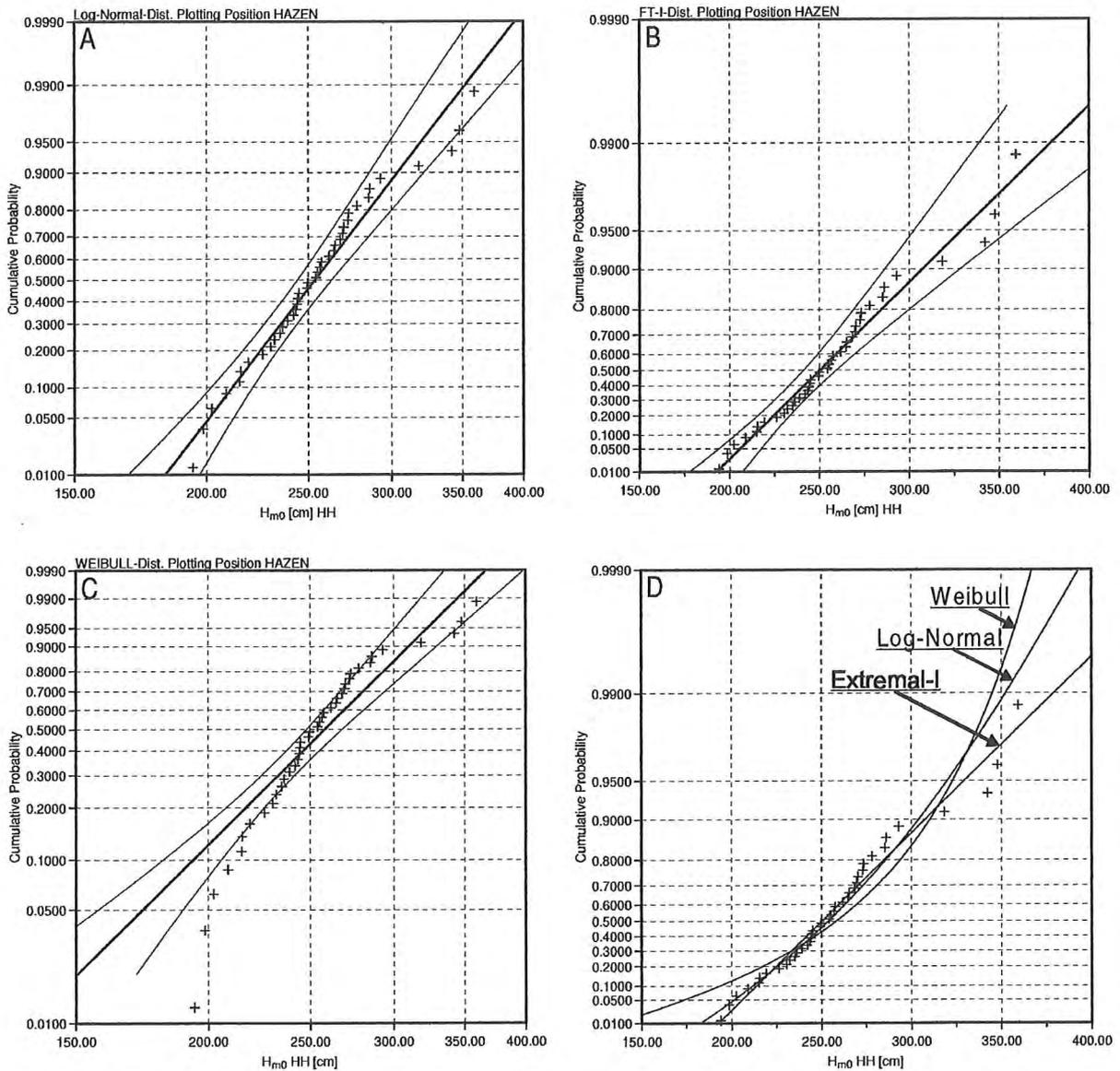


Abbildung 19: Bewertung der Anpassung (Jahresmaxima der signifikanten Wellenhöhen Projektgebiet Heiligenhafen, Datenreihe 1958 bis 1998)

Verteilung	Kolmogoroff-Smirnoff-Test	$\chi^2$ -Test (FG=12)	$\chi^2$ -Test (FG=6)	mittlere Abweichung
WEIBULL	KS=0,153	$\chi^2=33,38$	$\chi^2=21,06$	29,60 cm
Extremal-I	KS=0,066	$\chi^2=20,04$	$\chi^2=9,64$	13,12 cm
Log-Normal	KS=0,086	$\chi^2=26,10$	$\chi^2=14,09$	9,66 cm

Tabelle 10: Berechnungsergebnisse der statistischen Tests, Datensatz:  
Extremwertuntersuchungen jährliche maximale signifikante Wellenhöhen im Projektgebiet  
Heiligenhafen

Weitere Grundlage für die Bewertung der Güte der Anpassungen sind die in Tab.10 die Ergebnisse der durchgeführten Tests und die mittlere Abweichung zwischen den Daten und der Verteilungsfunktion zusammengefaßt.

Das Ergebnis der Untersuchung ist in diesem Fall vergleichsweise eindeutig. Aus der graphischen Methode und aus den statistischen Tests geht hervor, daß die Extremal-I-Verteilung hier die am besten passende Verteilung ist. Die mittlere Abweichung ist für die Log-Normal-Verteilung am geringsten. Da jedoch insbesondere für die höheren Seegangereignisse die Extremal-I-Verteilung die geringsten Abweichungen aufweist, wird sie als Grundlage für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Ist die (wahrscheinliche) Verteilungsfunktion der Stichprobendaten bekannt, kann hieraus auf die Wahrscheinlichkeit des Eintretens beliebiger Ereignisse geschlossen werden. Nach dem Konzept von VON MISES (1936) kann die Wahrscheinlichkeit als Grenzprozeß der relativen Häufigkeit aufgefaßt werden. Demnach gilt für der Größe nach geordnete Daten:

$$P_u(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_x}{n} \quad (1)$$

mit:  $P_u$  = Unterschreitungswahrscheinlichkeit  
 $n_x$  = Ordnungszahl des Wertes  $x$   
 $n$  = Gesamtanzahl der Werte

Die mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit eines einzelnen Ereignisses in einem definierten Wiederholungszeitraum kann abgeleitet werden zu:

$$P_u = 1 - \frac{B}{n \cdot W} \quad (2)$$

mit:  $P_u$  = Unterschreitungswahrscheinlichkeit  
 $B$  = Beobachtungszeitraum der Stichprobe  
 $W$  = Wiederholungszeitraum  
 $n$  = Gesamtanzahl der Werte der Stichprobe

Aus der Verteilungsfunktion (Tab. 8) wird der zur Unterschreitungswahrscheinlichkeit zugehörige Wert ermittelt. Als Grundlage für die Bestimmung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit wird häufig das mittlere Wiederkehrintervall (z.B. 10, 20 ,50 oder 100 Jahre) herangezogen.

Signifikante Wellenhöhen für ausgewählte mittlere Wiederholzeiträume				
Projektgebiet	mittlerer Wiederholungszeitraum			
	10 Jahre	20 Jahre	50 Jahre	100 Jahre
Schönhagen	2,83m	3,00m	3,20m	3,34m
Heiligenhafen	3,08m	3,29m	3,58m	3,79m
Brodten	3,12m	3,32m	3,55m	3,71m

Tabelle 11: Extreme Ereignisse in den 3 Projektgebieten

Häufig ist neben dem mittleren Wiederholungszeitraum auch die mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit innerhalb eines definierten Zeitraums wichtig für die Bewertung der möglichen Entwicklung eines Küstenabschnitts. Ausgehend von der aus dem BERNOULLI-Experiment abgeleiteten Binomial-Verteilung (Gl. 28) kann die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Einzelerignisses mit definierter Eintrittswahrscheinlichkeit berechnet werden. Die Binomial-Verteilung geht für große  $n$  in die Poisson-Verteilung (Gl. 29) über (vgl. PLATE 1993).

$$P(y \leq k; n) = \sum_{y=0}^k \binom{n}{y} \cdot p^y \cdot (1-p)^{n-y} \quad (3)$$

- mit:  $k$  = Anzahl der betrachteten Ereignisse  
 $n$  = Gesamtanzahl der Ereignisse  
 $p$  = Eintrittswahrscheinlichkeit des Einzelerignisses  
 $y$  = aktuelles Ereignis (Laufvariable)

$$P(y \leq k; n) = \sum \frac{(a \cdot L)^y}{y!} \cdot e^{-a \cdot L} \quad (4)$$

- mit:  $a$  = mittlere Anzahl von Ereignissen je Intervall  
 $L$  = Intervalllänge  
 $k$  = Anzahl der betrachteten Ereignisse  
 $y$  = aktuelles Ereignis (Laufvariable)

Für die 3 Untersuchungsgebiete wurden die in Tab. 11 angegebenen extremen Seegangereignisse ermittelt. Für die Projektgebiete Schönhagen und Brodten ergab die Log-Normal-Verteilung und für das Projektgebiet Heiligenhafen die Extremal-I-Verteilung die beste Übereinstimmung und die geringsten Abweichungen. Für Fragen der statistischen Relevanz der extrapolierten Werte und der notwendigen Datenbasis wird auf die Untersuchungen von FRÖHLE (2000) verwiesen.

### Dauerstatistik extremer Seegangereignisse

Neben der zu erwartenden max. signifikanten Wellenhöhe, welche mit einer in Abhängigkeit von der Zielsetzung der extremwertstatistischen Untersuchungen zu bestimmenden Wahrscheinlichkeit geschätzt werden kann, sind für die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus auch die Dauer extremer Seegangereignisse und die gemeinsame Eintrittswahr-

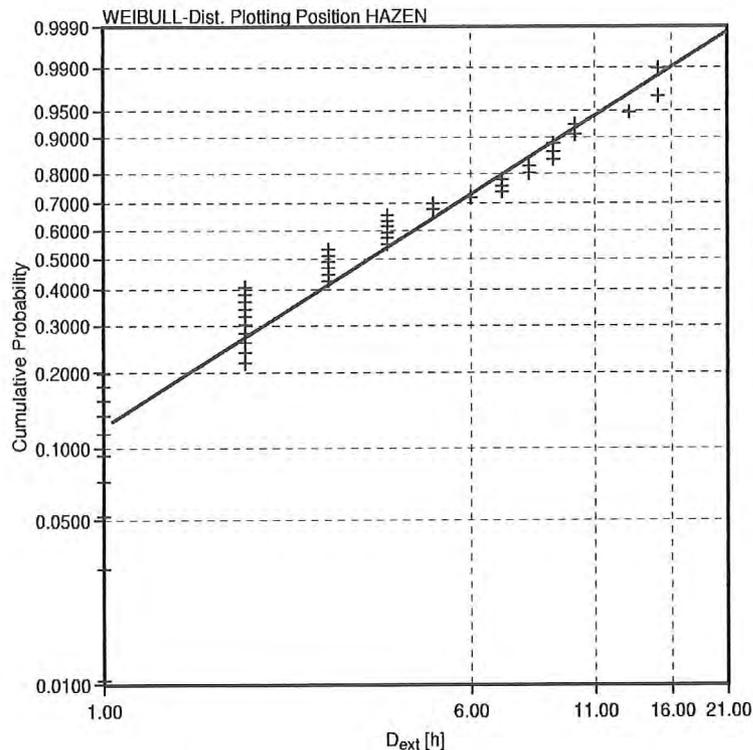


Abbildung 20: Verteilung der Dauer extremer Seegangereignisse ( $D_{\text{ext}}$ ) Achseneinteilung gemäß Weibull-Verteilung (Projektgebiet Heiligenhafen, Vergleichswellenhöhe ( $H_{m0,vgl}$ ) entspricht der jeweiligen 1-jährlichen Wellenhöhe)

scheinlichkeit von Wellenhöhen und zugehöriger Dauer extremer Ereignisse sowie das Zeitintervall zwischen zwei extremen Ereignissen bedeutsam.

Als Grundlage für statistische Untersuchungen zur möglichen Dauer extremer Ereignisse ist es notwendig, zunächst die Dauer eines Extremereignisses ( $D_{\text{ext}}$ ) zu definieren. Hier wird die Dauer eines Extremereignisses definiert als das Zeitintervall in dem eine vorher festgelegte signifikante Wellenhöhe (Grenz-Wellenhöhe oder Vergleichswellenhöhe) im Verlauf eines Sturmereignisses überschritten wird. Hinsichtlich der Definition zur Abgrenzung von Sturmergebnissen wird auf Abb. 18 verwiesen. Als Vergleichswellenhöhe kann hierbei die gleiche Wellenhöhe wie bei der Definition von Extremereignissen mit der Peak-Over-Threshold Methode (POT) verwendet werden. Für spezielle Untersuchungen sind jedoch abhängig von der jeweiligen Fragestellung auch andere Vergleichswellenhöhe denkbar.

Die Dauerstatistik für Seegangsdaten aus dem Bereich Heiligenhafen (Ostsee) ist in Abb. 20 für eine Vergleichswellenhöhe entsprechend der jeweiligen 1-jährlichen Wellenhöhe dargestellt. Die beste Anpassung an die Stichproben der Dauer extremer Ereignisse wurde für den Bereich Heiligenhafen mit der WEIBULL- und der Log-Normalverteilung erzielt. In Abb. 20 sind zur besseren Übersicht lediglich die Ergebnisse für die WEIBULL-Verteilung dargestellt.

Aus den Verteilungsfunktionen wird die zu einem definierten Wiederkehrintervall zugehörige Dauer extremer Ereignisse berechnet.

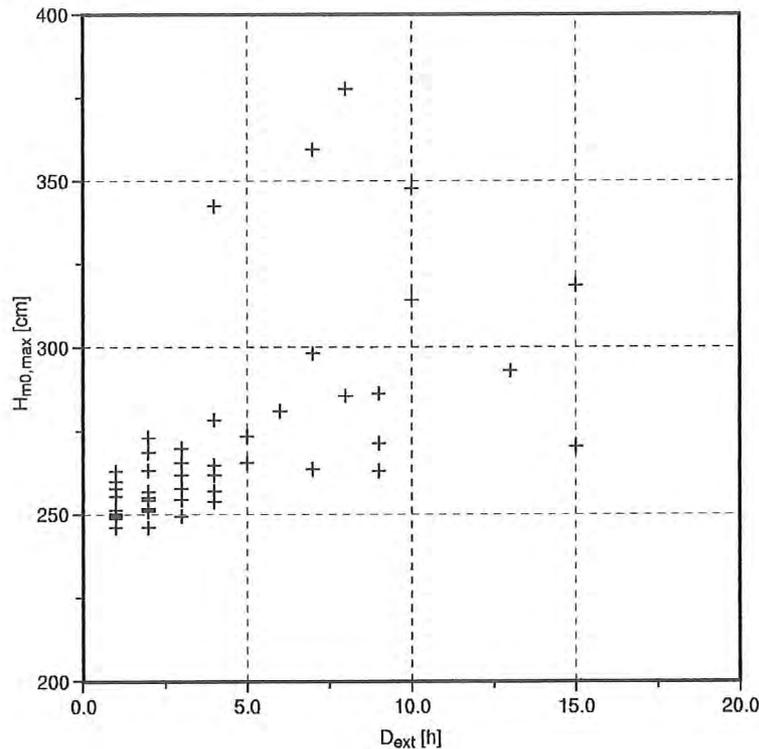


Abbildung 21: Dauer ( $D_{\text{ext}}$ ) und maximale signifikante Wellenhöhen ( $H_{m0,\text{max}}$ ) für extreme Seegangereignisse an der Position Heiligenhafen (Ostsee) (Vergleichswellenhöhe für die Berechnung der Dauer  $H_{m0,\text{vgl}} = 2,46$  m, 1 jährliche Wellenhöhe)

In Abb. 21 sind max. signifikante Wellenhöhe und Dauer der extremen Ereignisse ( $D_{\text{ext}}$ ) für das Projektgebiet Heiligenhafen dargestellt. Die Dauer eines Extremereignisses und die maximale signifikante Wellenhöhe innerhalb des Ereignisses hängen im allgemeinen nicht direkt voneinander ab. Dennoch kann die gemeinsame Wahrscheinlichkeit von maximaler signifikanter Wellenhöhe und Dauer des Ereignisses nicht direkt aus den jeweiligen Dichte- und Verteilungsfunktionen für die max. signifikante Wellenhöhe und der Dauer extremer Ereignisse berechnet werden, da die Verteilung der Dauer der einzelnen Ereignisse nicht unabhängig von der jeweiligen max. signifikanten Wellenhöhe ist. Die Verteilungsfunktion der Dauer der einzelnen Ereignisse für geringere max. signifikante Wellenhöhen unterscheidet sich also von derjenigen für höhere signifikante Wellenhöhen.

Zur Beschreibung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeit von Dauer und Wellenhöhe extremer Ereignisse müssen zunächst Untersuchungen zur Korrelation der beiden Variablen durchgeführt werden.

Für die Stichprobendaten aus dem Projektgebiet Heiligenhafen (Abb. 21) wurde als Beispiel die gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit von max. signifikanter Wellenhöhe und Dauer des Extremereignisses ermittelt. Hierzu wurde die Stichprobe in Abhängigkeit von den Wellenhöhen in Klassen aufgeteilt und jeweils die Verteilung der Dauer ermittelt. Als Verteilung, welche die Dauer der extremen Ereignisse am besten wiedergibt, wurde für alle Klassen die Log-Normalverteilung ermittelt. Für die Parameter der Log-Normalverteilung wurde jeweils eine li-



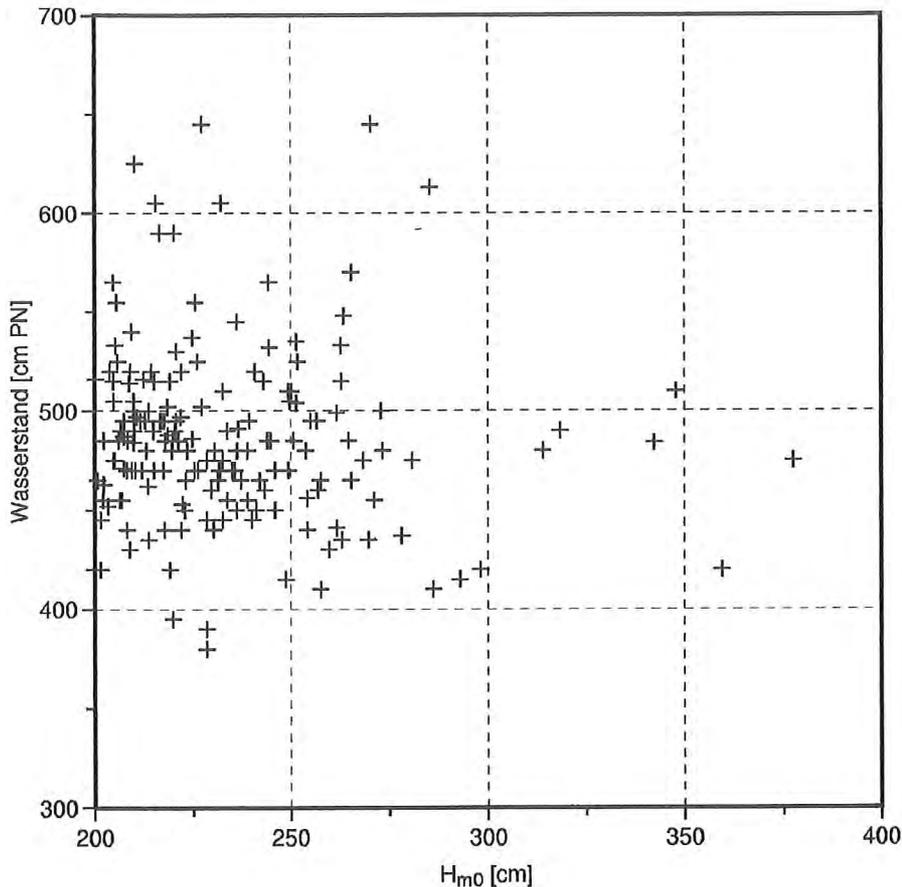


Abbildung 23: Seegangseignisse mit signifikanten Wellenhöhen  $H_{m0} > 2,0$  m und zugehörige Wasserstände (Position Heiligenhafen, Zeitraum 1957 - 1999)

Wasserständen zugehörige Seegang oder die zu extremen Seegangseignissen zugehörigen Wasserstände gesucht werden.

Auf der Grundlage der Fragestellung wird die Stichprobe festgelegt. In Abb. 23 sind für den Bereich Heiligenhafen die Seegangseignisse mit signifikanten Wellenhöhen  $H_{m0} > 2,0$  m und die zugehörigen Wasserstände (gemessen am Pegel Heiligenhafen) dargestellt<sup>1</sup>.

Es ist deutlich zu erkennen, daß im Projektgebiet höhere Seegangseignisse sowohl bei vergleichsweise geringen Wasserständen ( $Wst \leq 400$  cm PN) als auch bei vergleichsweise hohen Wasserständen ( $Wst < 600$  cm PN) gemessen wurden. Für Seegangseignisse mit extrem hohen Wellen ( $H_{m0} > 3,0$  m) wurden fast ausschließlich Wasserstände im Bereich des mittleren Wasserstandes ermittelt. Jedoch ist in diesem Bereich die Datendichte sehr gering, so daß eindeutige Aussagen nicht möglich sind. Somit kann in diesem Projektgebiet keine Zuordnung von hohen Wasserständen und hohen Seegangseignissen getroffen werden.

<sup>1</sup>Die Wasserstandsdaten lagen nicht in digitalisierter Form vor und wurden aus den Pegelbögen des Pegels Heiligenhafen abgelesen. Daher wurden die hier beschriebenen Untersuchungen nur für das Projektgebiet Heiligenhafen durchgeführt. Die Methodik ist aber direkt auf die anderen Projektgebiete übertragbar

Wasserstand	Unterschreitungswahrscheinlichkeit
[cm PN]	[-]
350	1,06e-7
400	0,01
450	0,28
500	0,69
550	0,90
600	0,97
650	0,99

Tabelle 12: Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Wasserstände bei extremen Seegangereignissen (Position Heiligenhafen,  $H_{m0} > 2,50$  m, Zeitraum 1957 - 1999)

Aus der Häufigkeitsverteilung der zu den extremen Seegangereignissen zugehörigen Wasserstände lassen sich die in Tab. 12 angegebenen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten für die Wasserstände ableiten. Für diese Untersuchungen wurden als Stichprobe nur Ereignisse mit  $H_{m0} > 2,50$  m ausgewählt.

Im Projektgebiet treten, auch wenn extreme Seegangereignisse auftreten, Wasserstände im Bereich von 400 cm PN bis 600 cm PN am häufigsten (rd. 96%) auf. Sie werden im Mittel in rd. 1% aller Fälle unterschritten und nur in rd. 3% aller Fälle überschritten.

Zur Detaillierung der Zusammenhänge werden die Verteilungen der zu extremen Wasserständen zugehörigen signifikanten Wellenhöhen ermittelt. Hier werden sowohl extrem hohe als auch extrem niedrige Wasserstände betrachtet.

In Abb. 24 sind die monatlichen minimalen und die monatlichen maximalen Wasserstände<sup>2</sup> zusammen mit den zugehörigen signifikanten Wellenhöhen aufgetragen. Da in den Gewässerkundlichen Jahrbüchern als Eintrittszeit der monatlichen Extremwerte lediglich der betreffende Tag angegeben wird, wurde für die zugehörigen Wellenparameter die maximal am betreffenden Tag ermittelten signifikanten Wellenhöhen mit der zugehörigen Wellenperiode und der Wellenaufrichtung ausgewählt.

Aus den in Abb. 24 dargestellten Daten wurden die zu niedrigen und hohen Wasserständen zugehörigen extremen signifikanten Wellenhöhen ermittelt. In Abb. 25 sind die Verteilungen der maximalen signifikanten Wellenhöhen für niedrige ( $Wst < 400$  cm PN) und hohe Wasserstände ( $Wst > 600$  cm PN) dargestellt. Die ermittelte Verteilung der Wellenhöhen ist für niedrige und hohe Wasserstände deutlich unterschiedlich. Beispielsweise beträgt die im Mittel einmal in 50 Jahren auftretenden Wellenhöhen für niedrige Wasserstände  $H_{m0,max} = 3,58$ m ( $p_u = 0,973$ ) und für hohe Wasserstände  $H_{m0,max} = 2,75$ m ( $p_u = 0,985$ ). Somit sind vor Heiligenhafen für niedrige Wasserstände für gleiche mittlere Eintrittshäufigkeiten deutlich höhere Wellenhöhen zu erwarten als für hohe Wasserstände.

<sup>2</sup>Die Wasserstandsdaten liegen nicht in digitaler Form vor und wurden den Gewässerkundlichen Jahrbüchern entnommen.

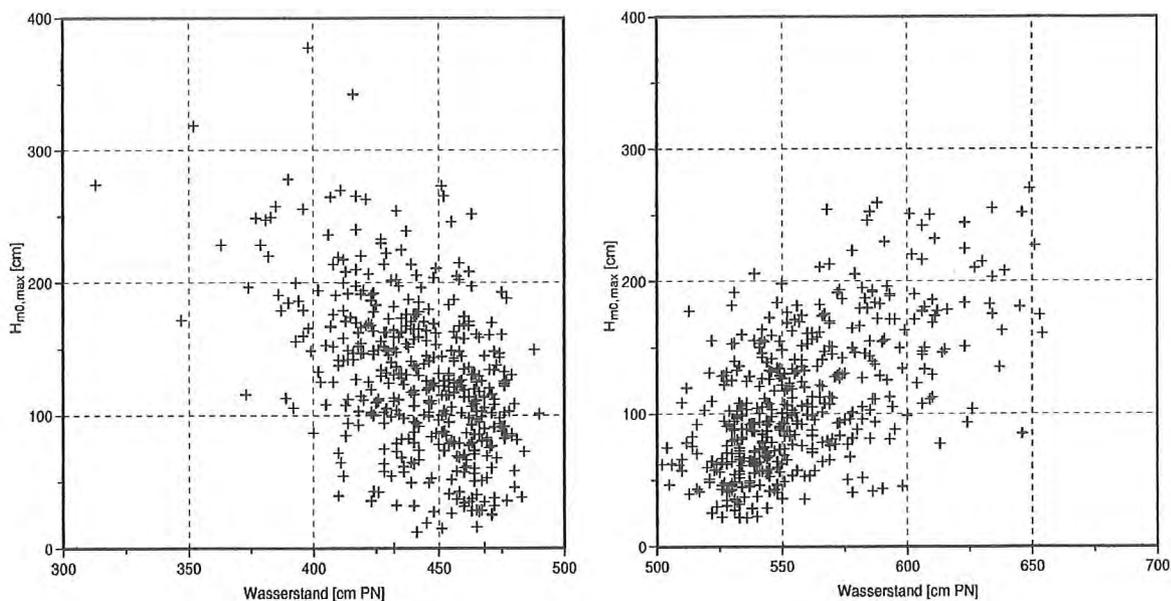


Abbildung 24: Extrem niedrige und extrem hohe Wasserstände (Monatsminima und -maxima aus den Gewässerkundlichen Jahrbüchern) mit zugehörigen maximalen signifikanten Wellenhöhen (jeweils die maximal am betreffenden Tag gemessenen Wellenhöhen, Projektgebiet Heiligenhafen, Zeitraum 1957 - 1999)

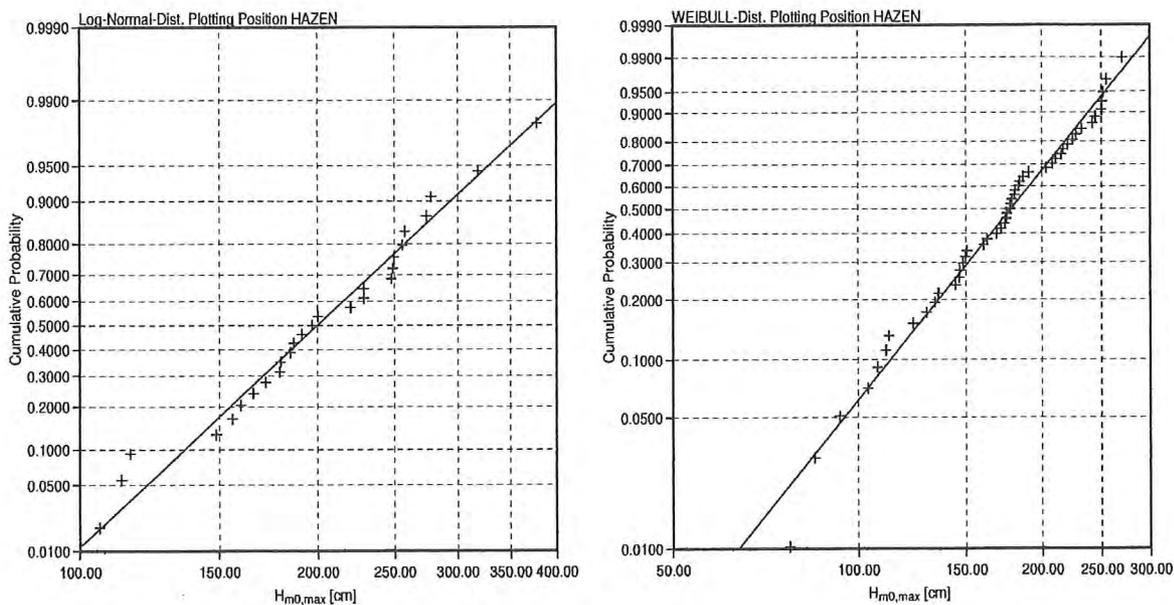


Abbildung 25: Verteilung extremer signifikanter Wellenhöhen für niedrige (Wst < 400 cm PN) und hohe Wasserstände (Wst > 600 cm PN) für das Projektgebiet Heiligenhafen, (Zeitraum 1957 - 1999)

## 4 Energieflußuntersuchungen / Sedimenttransportkapazitäten

Das Ziel der Energieflußberechnungen ist es, auf der Grundlage der kontinuierlich gemessenen bzw. korrelierten Seegangparameter kontinuierliche Eingangsdaten für die Analyse und Bewertung der langfristigen Wirkungen der seegangserzeugten Kräfte auf die Steiluferabschnitte zu erhalten. Die in diesem Zusammenhang berechneten Energieflußkomponenten können direkt als Eingangsdaten für Sedimenttransportuntersuchungen verwendet werden. Der im Seegang vorhandenen Energiefluß  $P$  in einer Welle wird nach der linearen Wellentheorie berechnet zu:

$$P = E \cdot c_g \quad (5)$$

Hierbei ist die Energie des unregelmäßigen Seegangs definiert durch:

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H_{rms}^2 \quad (6)$$

Bezogen auf eine Strandbreite von 1 m ergeben sich somit die küstenparallelen Komponenten und die küstennormalen Komponenten des Energieflusses zu:

$$P_{ls} = \frac{1}{16} \cdot \rho \cdot g \cdot H_{rms}^2 \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \quad (7)$$

$$P_{cs} = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H_{rms}^2 \cdot \sin^2(\alpha) \quad (8)$$

mit:  $H_{rms}$  = root mean square Wellenhöhe, der Mittelwert des Quadrates der Wellenhöhen  
 $\alpha$  = Winkel zwischen Wellenfortschrittsrichtung und Küstenlinie

Im ersten Schritt wird der Energiefluß direkt an der Meßposition über die Zeit berechnet. Vom IWR wurde ein Computerprogramm entwickelt, mit dem die Energieflüsse für die Projektgebiete aus den gemessenen bzw. korrelierten Wellenparametern berechnet werden. In Abb. 26 ist eine Ganglinie der resultierenden Energieflußkomponenten beispielhaft für den Zeitraum eines Monats für das Projektgebiet Heiligenhafen dargestellt.

Für die 3 Projektgebiete wurden die jährlichen Energieflußkomponenten ermittelt. In Abb. 27 sind beispielhaft die Energieflüsse für das Projektgebiet Heiligenhafen dargestellt. Die in das Projektgebiet eingetragenen Gesamtenergieflüsse liegen in einer Größenordnung zwischen rd. 2.000 kWh/m und rd. 8.500 kWh/m. Die Gesamtenergieflüsse im Projektzeitraum von 1996 bis 1998 liegen im mittleren Bereich der gemessenen Gesamtenergieflüsse. Auch die Verteilung von küstennormalen Energieflüssen und den beiden küstenparallelen Energieflußkomponenten liegt im mittleren Bereich und weist keine Besonderheiten auf, so daß davon ausgegangen werden kann, daß während der Projeklaufzeit im Projektgebiet Heiligenhafen vom Energieeintrag her gesehen im wesentlichen mittlere Verhältnisse vorlagen und keine außergewöhnlichen Belastungen und somit auch außergewöhnliche Reaktionen des Steilufers und der angrenzenden Flachwasserbereiche aufgetreten sind. Die Abbildungen für die beiden anderen Projektgebiete sind im Anhang dargestellt. Auch hier sind in den 3 Jahren in denen die Messungen für das Projekt durchgeführt wurden keine besonders hohen oder besonders niedrigen Energieeinträge zu beobachten, so das auch hier jeweils von mittlerem Energieeintrag ausgegangen werden kann.

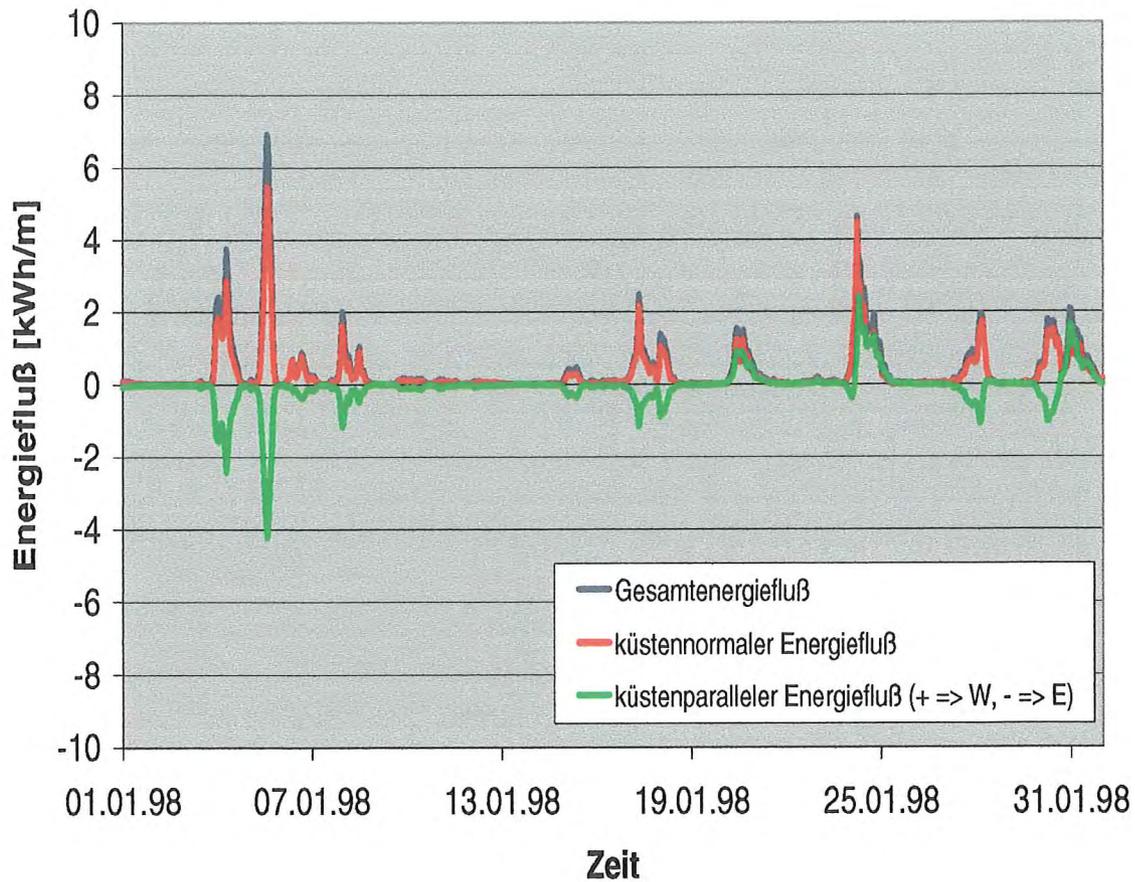


Abbildung 26: Seegangsenergiefluß im Projektgebiet Heiligenhafen, Beispielrechnung für Januar 1998

### Energiefluß Projektgebiet Heiligenhafen

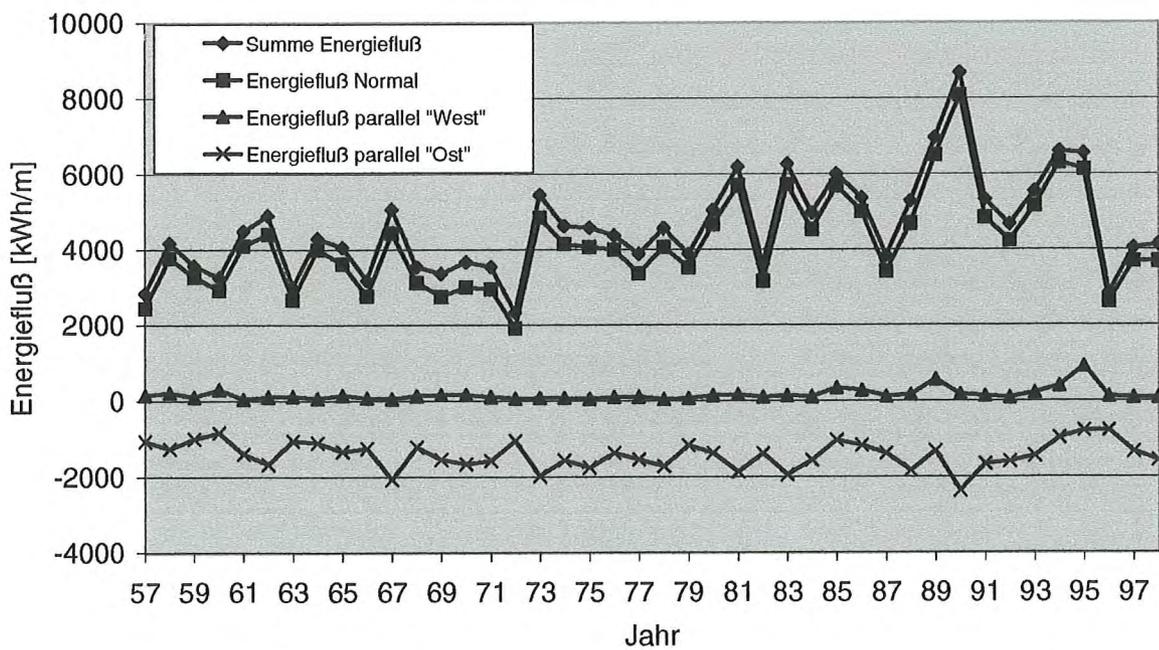


Abbildung 27: Summierte Energieflußkomponenten im Projektgebiet Heiligenhafen von 1957 bis 1998

Datum / Uhrzeit	H <sub>m0</sub> [cm]	T <sub>02</sub> [s]	Θ <sub>m</sub> [°]	E <sub>ges</sub> [kWh/m]	E <sub>n</sub> [kWh/m]	E <sub>p</sub> [kWh/m]	Wst [cm PN]	H <sub>m0,s</sub> [cm]	T <sub>02,s</sub> [s]	Θ <sub>s</sub> [°]	v <sub>m</sub> [cm/s]	Θ <sub>vm</sub> [°]	v <sub>max</sub> [cm/s]	Θ <sub>vmax</sub> [°]
30.12.96 00:00	79	3,25	353	0,820	0,663	0,482	574	74	2,69	338	9	166	77	100
30.12.96 01:00	79	3,26	353	0,835	0,676	0,491	578	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
30.12.96 02:00	84	3,31	353	0,947	0,766	0,557	581	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
30.12.96 03:00	90	3,39	353	1,110	0,898	0,653	584	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
30.12.96 04:00	95	3,45	355	1,225	0,965	0,754	586	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
30.12.96 05:00	104	3,55	357	1,466	1,123	0,942	589	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
30.12.96 06:00	118	3,73	357	2,000	1,533	1,286	592	104	2,42	335	11	178	97	100
30.12.96 07:00	126	3,84	357	2,390	1,829	1,534	595	101	2,51	336	11	176	91	100
30.12.96 08:00	123	3,80	357	2,240	1,716	1,440	595	101	2,41	334	11	171	89	100
30.12.96 09:00	115	3,69	357	1,875	1,436	1,205	591	103	2,34	327	10	181	80	100
30.12.96 10:00	103	3,54	357	1,442	1,104	0,927	584	97	2,32	326	10	174	90	100
30.12.96 11:00	96	3,46	357	1,216	0,931	0,781	575	77	2,45	339	8	187	82	100
30.12.96 12:00	79	3,24	360	0,732	0,536	0,499	567	55	2,63	340	2	183	71	100

Tabelle 13: Beispiel für den Aufbau der Excel-Tabellen mit den Seegangs-, Wasserstands- und weiteren abgeleiteten Größen

Die zeitliche Abfolge der Wellenparameter in den 3 Projektgebieten wurde für die gesamte Projektlaufzeit ermittelt und hieraus die Energieflußkomponenten als stündliche Werte und als Tagesmittelwerte abgeleitet. Die berechneten Parameter wurden zusammen mit den örtlichen Wasserständen und den Ergebnissen der Flachwasser-Meßgeräte vereinbarungsgemäß in Excel-Dateien gespeichert und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Aus den Excel-Dateien können Seegangsparameter, örtliche Wasserstände und die zugehörige Seegangsenergie in den Projektgebieten für beliebige Zeiträume extrahiert werden und stehen somit allen Projektbeteiligten seit etwa Juli 1999 direkt zur Verfügung. Ein Beispiel für den Aufbau der Excel-Tabellen ist in Tab. 13 angegeben.

Neben der in die Projektgebiete eingetragenen Seegangsenergie ist für die Bewertung der zu erwartenden Sedimenttransporte und der Bewertung von örtlichen Veränderungen im Schorrbereich auch die Verteilung der Seegangsenergie und Energiedissipation über das jeweilige Profil und somit der Veränderung der Wellenhöhen beim Einlaufen in die Flachwasserbereiche wichtig. Für die Berechnung der Wellentransformation an geneigten Stränden existiert eine Vielzahl von Modellen, die zumeist für regelmäßige Wellen gelten und im einfachsten Fall annehmen, daß die Wellenhöhe nach dem Brechen durch die – zuvor ermittelte – maximale Brecherhöhe als Folge abnehmender Wassertiefe oder durch die örtliche Wellensteilheit begrenzt wird. Zur Berücksichtigung des Einflusses profilierter Unterwasserstrände auf die Veränderung der Wellenparameter kommen häufig Energieflußmodelle zur Anwendung, in denen mittels numerischer Lösungsverfahren die Veränderung der Wellenhöhe auch über ein veränderliches Profil in diskreten Abständen schrittweise berechnet werden kann (vgl. STROTMANN, et al. 1994). Zu den im Schrifttum empfohlenen Modellen zur Berechnung der Energietransformation beim Einlaufen in flacheres Wasser zählen die Ansätze von:

- TUCKER, CARR & PITT 1983
- BATTJES & JANSSEN 1978
- THORNTON & GUZA 1983
- DALLY 1991

Diese Ansätze und die Grundsätze der Energieflußmodelle wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens 'Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt' Phase II im Detail untersucht und auf die Verhältnisse vor Sylt angepaßt (vgl. STROTMANN, et al. 1994). Die Untersuchungen haben ergeben, daß der Ansatz von BATTJES & JANSSEN und ein erweiterter Ansatz auf der Grundlage des Ansatzes von TUCKER, CARR & PITT die vergleichsweise beste Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Wellenhöhen liefert. Für die weiteren Untersuchungen wird der Ansatz von BATTJES & JANSSEN verwendet. Dieser Ansatz wird auch in verschiedenen numerischen Modellen (Swan, Mike 21, etc.) angewendet.

Zur Ermittlung der resultierenden, maximalen Wellenhöhe an einem Punkt in Abhängigkeit von der aktuellen Wassertiefe ( $d$ ) und der örtlichen Wellenzahl ( $k$ ) wird das von BATTJES & STIVE (1984) erweiterte Brechkriterium von MICHE (1994) benutzt.

$$H_{\max,BJ} = \frac{0,88}{k} \tanh \left( \frac{\gamma}{0,88} \cdot k \cdot d \right) \quad (9)$$

mit:

$$\gamma = 0,5 + 0,4 \cdot \tanh \left( 33 \cdot \frac{H_{rms,0}}{L_0} \right) \quad (10)$$

Einzelne bereits gebrochene Wellen werden in diesem Modell auf die maximale Wellenhöhe reduziert. Der Anteil der an einem Punkt bereits gebrochenen Wellen ( $Q_b$ ) wird abgeschätzt nach:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = - \left( \frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 \quad (11)$$

Hieraus wird der Anteil brechender bzw. bereits gebrochener Wellen iterativ ermittelt. Als Energiedissipation resultiert dann:

$$\epsilon_b = \frac{\alpha}{4} \cdot Q_b \cdot f_p \cdot \rho \cdot g \cdot H_m^2 \quad (12)$$

mit:  $\alpha = 1,0$  (vgl. BATTJES & STIVE 1984).

Im Modell von BATTJES & JANSSEN werden andere Effekte, die die Wellenhöhe beeinflussen, wie z.B. die Bodenreibung oder Perkolaton, vernachlässigt.

Mit dem Energieflußansatz werden im Rahmen des Vorhabens die Wellenhöhenverteilung über das Vorstrandprofil für einzelne Seegangereignisse sowie die innerhalb eines festgelegten Zeitraums insgesamt in das Projektgebiet eingetragene Seegangenergie und die Verteilung über das Vorstrandprofil berechnet.

In Abb. 28 ist beispielhaft der Verlauf ausgewählter Wellenhöhen über das Profil 1+300 (Geologisches Profil) im Projektgebiet Schönhagen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß hier die direkt am Strand resultierende Wellenhöhe unabhängig von der Ausgangswellenhöhe nahezu gleich groß sind. Die höheren Ausgangswellen werden im Vorfeld an Riffen bzw. riffähnlichen Strukturen durch die resultierende Energiedissipation abgemindert.

In Abb. 29 ist beispielhaft der Verlauf der Seegangenergie, die im Zeitraum 25.07.1997 bis 15.09.1997 berechnet wurde, über das Profil 1+300 (Geologisches Profil) im Projektgebiet Schönhagen dargestellt. Die Seegangenergie wird beim Einlaufen des Seegangs in flacheres Wasser insbesondere an der riffartigen Struktur sowie direkt am Strand abgemindert. In

### Wellenhöhenverlauf über Meßprofil Projektgebiet Schönhagen Profil 1+300

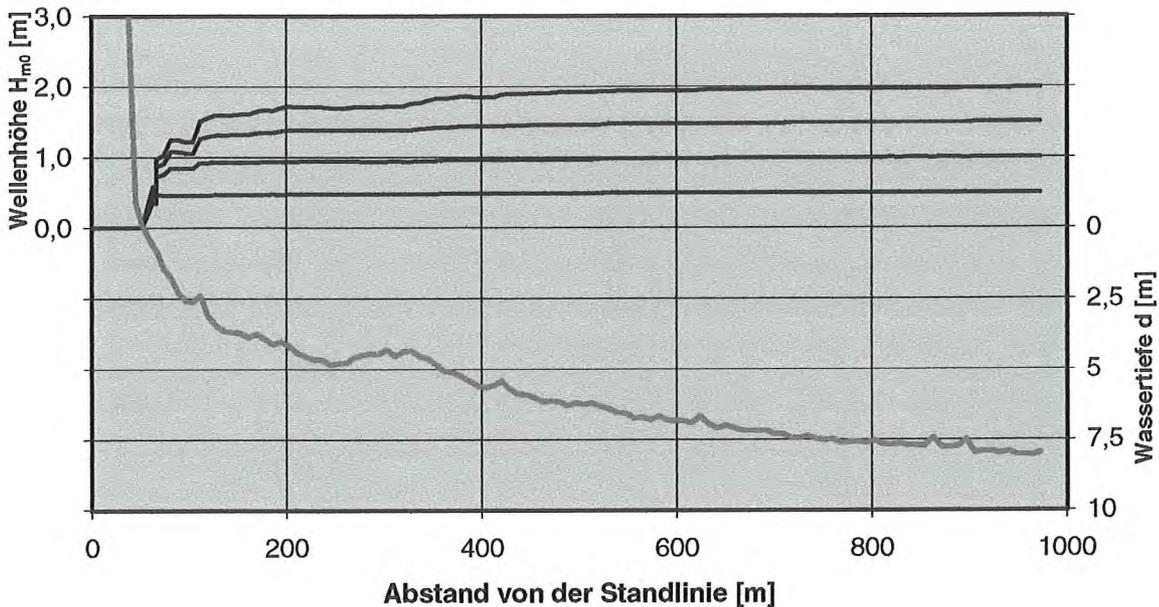


Abbildung 28: Wellenhöhenverlauf über ein Meßprofil im Projektgebiet Schönhagen Profil 1+300, Ausgangswellenhöhen:  $H_{m0} = 2,0$  m,  $H_{m0} = 1,5$  m,  $H_{m0} = 1,0$  m,  $H_{m0} = 0,5$  m

diesen Bereichen ist somit die Energiedissipation am größten und es ist zu erwarten, daß dort im wesentlichen der Sedimenttransport stattfindet. Energieeintrag und Energiedissipation können z.B. mit den Abrasionsmessungen und den hieraus resultierenden Veränderungen im Profil korreliert werden.

Aus dem örtlichen Energiefluß können die lokal vorhandenen Sedimenttransportkapazitäten nach GL. 13 direkt abgeschätzt werden.

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot a'} \cdot P_{Is} \quad (13)$$

Für die 3 Projektgebiete ergeben sich hieraus die in Tab. 14 zusammengefaßten Sedimenttransportkapazitäten. Ein Vergleich mit den im Abschlußbericht des Amt für Ländliche Raume (ALR 1999) angegebenen Umlagerungsraten zeigt, daß die berechneten Sedimenttransportkapazitäten höher liegen als die aus den Vermessungen ableitbaren Größenordnungen.

## 5 Weitere Untersuchungen

Neben den Untersuchungen zu den örtlichen Seegangsverhältnissen und deren Verknüpfung mit anderen hydrodynamischen Größen wurden vom Institut für Wasserbau weitere Untersuchungen als Grundlage für die geologischen und morphologischen Fragestellungen bearbeitet.

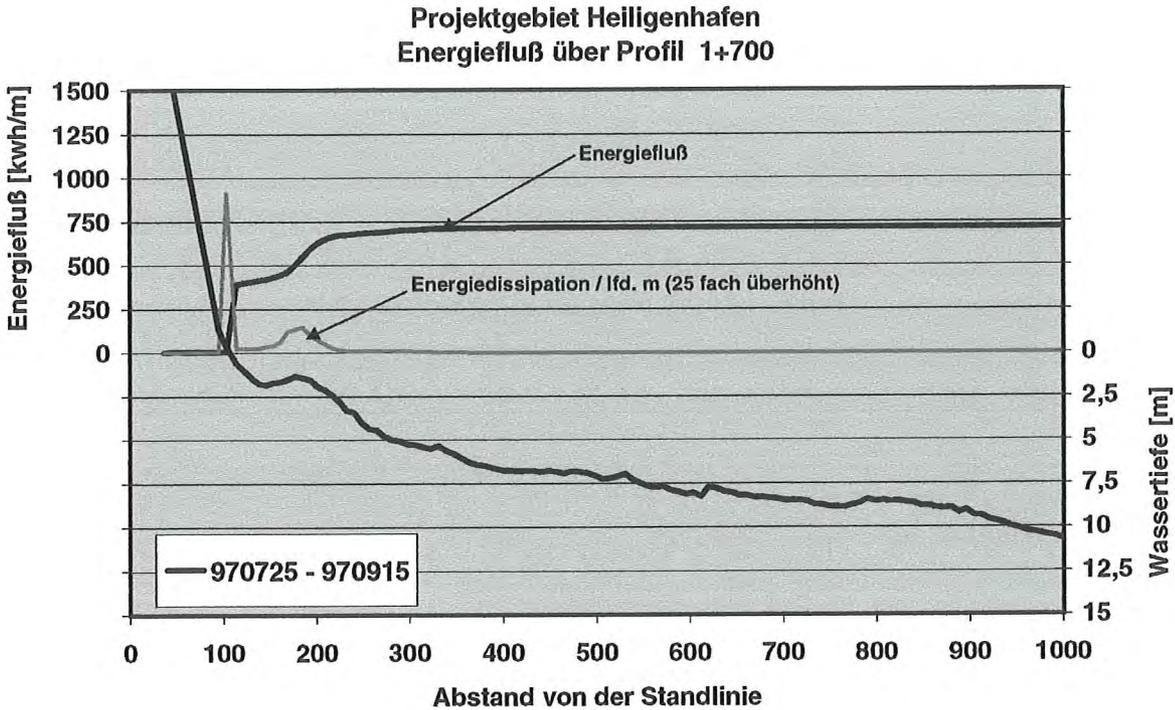


Abbildung 29: Energiefluß im Meßprofil 1+700, Projektgebiet Heiligenhafen, Zeitraum: 25.07.1997 - 15.09.1997

Projektgebiet		Sedimenttransportkapazitäten	
[-]		[ $\frac{m^3}{a}$ ]	
Schönhagen	44.000 N	31.000 S	
Heiligenhafen	41.000 W	118.000 E	
Brodten	63.000 W	8.000 E	

Tabelle 14: Sedimenttransportkapazitäten in den 3 Projektgebieten (Jahresmittelwerte im Zeitraum 1991 bis 1998)

### 5.1 Örtliche Wasserstände

Die natürliche Entwicklung von Steiluferabschnitten erfolgt in Zyklen. Hierbei werden Steiluferbereiche immer dann besonders stark belastet, wenn hohe Wasserstände eintreten (vgl. 2. Zwischenbericht des Forschungsvorhabens 1997). Sowohl die Erosion des Kliffs als auch die Kapung der Hangschutthalde erfolgen im wesentlichen bei erhöhten Wasserständen.

Für die Bewertung der Transportprozesse im Bereich der Steiluferabschnitte in den 3 Projektgebieten ist es notwendig, die örtlichen Wasserstandsverhältnisse statistisch zu bewerten und die Wasserstandsverhältnisse im Projektzeitraum in das längerfristige Wasserstandsgeschehen einzubinden.

Stationsname	Zeitraum
Heiligenhafen	11.1991 - 04.1999
Schleimünde	11.1990 - 04.1999
Travemuende	11.1990 - 04.1999

Tabelle 15: WSA - Wasserstandsdaten (5- / 1-Minuten Mittelwerte) als Grundlage für die Wasserstandsuntersuchungen

Vom Institut für Wasserbau der Universität Rostock wurden neben den Untersuchungen der Seegangsverhältnisse auch die örtlichen Wasserstandsverhältnisse insbesondere für den Projektzeitraum untersucht.

Die Wasserstandsdaten wurden vom Wasser- und Schiffsamt Lübeck zur Verfügung gestellt (vgl. Tab. 15).

Für die Bewertung der Unterschiede der Wasserstandsverhältnisse in den einzelnen Jahre wurden die Eintrittshäufigkeiten der Wasserstände für die jeweiligen Wasserwirtschaftlichen Jahre miteinander verglichen. In Abb. 30 und Abb. 31 ist dies beispielhaft für das Projektgebiet Heiligenhafen dargestellt. Im Projektzeitraum weichen sowohl die mittlere Häufigkeitsverteilung der Wasserstände als auch die Häufigkeitsverteilung der erhöhten Wasserstände nicht signifikant von den mittleren Werten ab, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Wasserstandsverhältnisse im Projektzeitraum mittlere Verhältnisse darstellen. Für die beiden anderen Projektgebiete ergeben sich annähernd gleiche Ergebnisse.

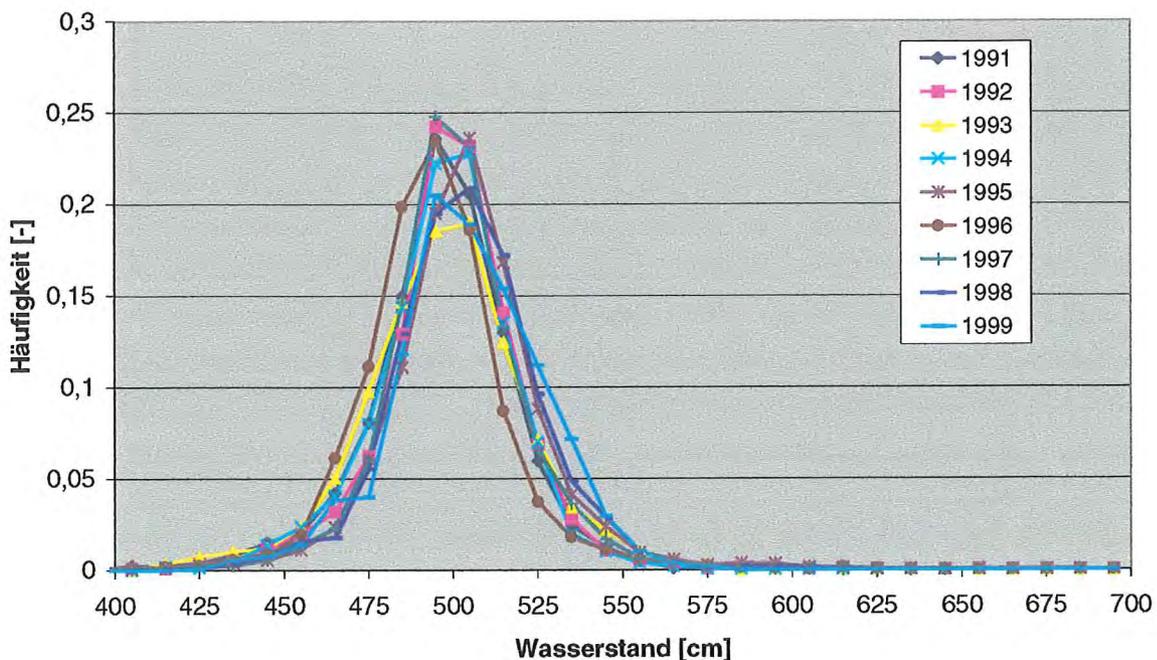


Abbildung 30: Häufigkeitsverteilung der Wasserstände im Projektgebiet Heiligenhafen für den Zeitraum 1991 bis 1998

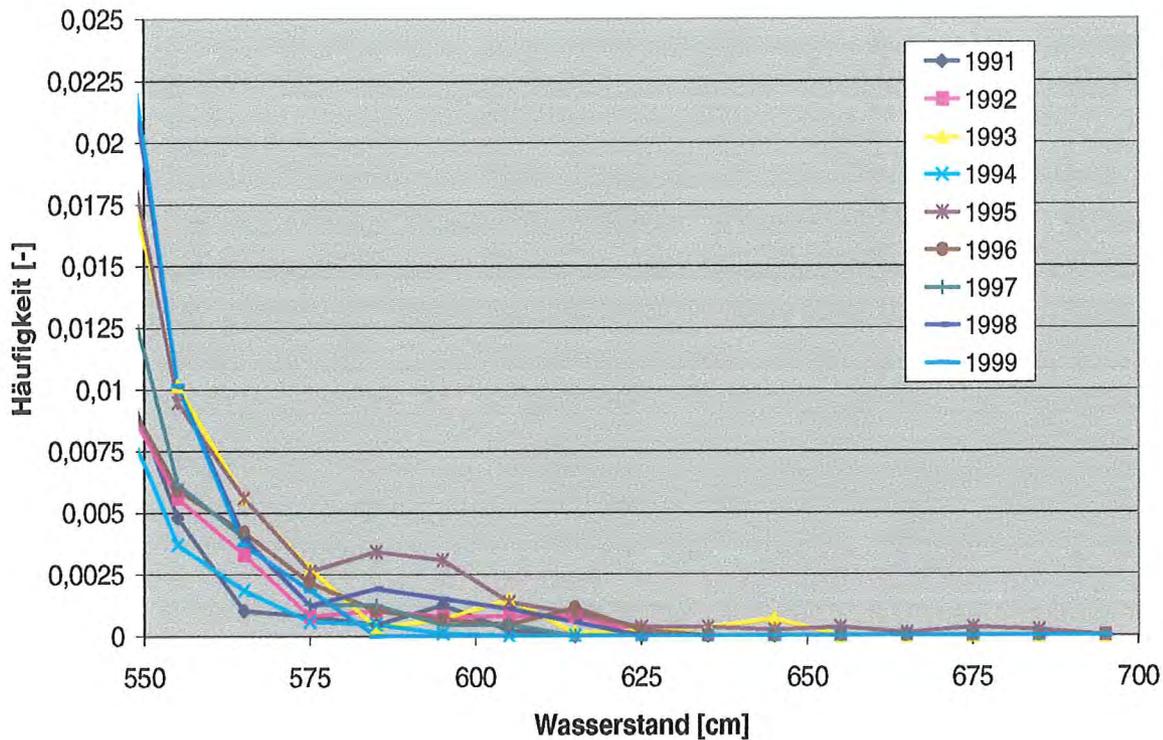


Abbildung 31: Häufigkeitsverteilung der erhöhten Wasserstände im Projektgebiet Heiligenhafen für den Zeitraum 1991 bis 1998

Da die Projektgebiete unterschiedlich ausgerichtet sind, treten Hoch- und Niedrigwasserstände auch bei unterschiedlichen Windrichtungen auf. Um festzustellen, ob sich die Wasserstandsverhältnisse in den 3 Projektgebieten grundsätzlich voneinander unterscheiden und somit entsprechend unterschiedliche morphologische Entwicklungen zu erwarten sind, wurden die mittleren Häufigkeitsverteilungen aus den Projektgebieten direkt miteinander verglichen (Abb. 32). Es ist zu erkennen, daß die Unterschiede in den Häufigkeitsverteilungen der 3 Projektgebiete gering sind. Lediglich sind die Häufigkeiten der niedrigeren Wasserstände im Projektgebiet Schönhagen etwas höher als in den beiden anderen Projektgebieten, und der mittlere Wasserstand ist im Projektgebiet Schönhagen etwas höher als in den beiden anderen Projektgebieten. Die absoluten Unterschiede sind jedoch gering. Für die weiteren Auswertungen und für die Bewertung der Sedimenttransporte können diese sehr geringen Unterschiede jedoch vernachlässigt werden.

## 5.2 Strömungsgeschwindigkeiten

Im Zusammenhang mit den morphologischen Untersuchungen zur Bestimmung der kritischen Tiefe des Sedimenttransports stellt sich die Frage nach den in tieferem Wasser am Boden zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten. Insbesondere durch die Feldversuche mit gefärbten Grobsedimenten aber auch durch die Abrasionsmessungen und die Pflockaufmessungen wurde die geologische und morphologische Datengrundlagen für die Bewertung der kritischen Tiefe geschaffen.

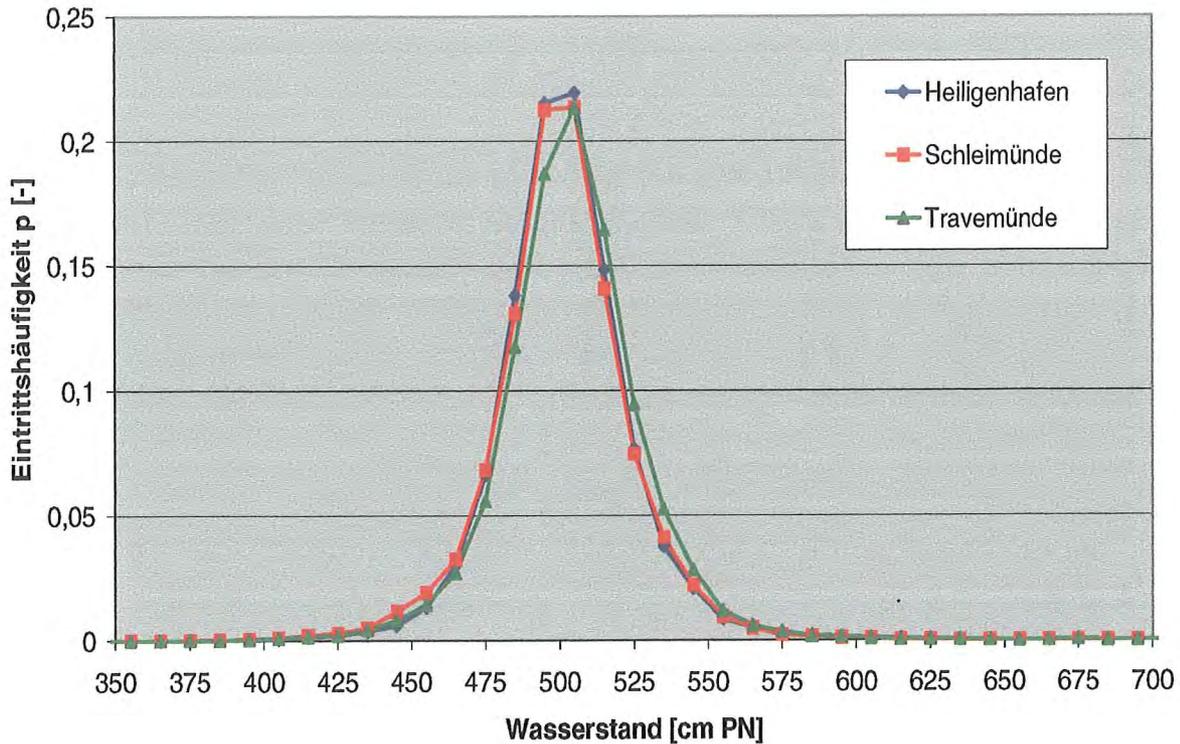


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der Wasserstände in den Projektgebieten Heiligenhafen, Schönhagen (Pegel Schleimünde) und Brodten (Pegel Travemünde) für den Zeitraum 1991 bis 1998

Für die Bewertung der am Seegrund zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten wurden auf der Basis der gemessenen bzw. korrelierten Seegangsverhältnisse die Teilchengeschwindigkeiten nach theoretischen Verfahren berechnet. Nach CERC (1984) ist der Anwendungsbereich der Wellentheorien jeweils in Abhängigkeit von der relativen Wassertiefe sowie der relativen Wellensteilheit begrenzt. Für die in den Projektgebieten zu erwartenden Seegangsverhältnisse lassen sich die Teilchengeschwindigkeiten bis zu einer Wassertiefe von  $d = 2\text{m} - 3\text{m}$  in guter Näherung nach der Stokes'schen Wellentheorie 3. Ordnung bestimmen. In Gl. 15 ist die Berechnungsformel für die horizontale Teilchengeschwindigkeit ( $u$ ) angegeben.

$$\begin{aligned}
 u = & C \cdot \left[ k \cdot a \cdot \frac{\cosh[k \cdot (z + d)]}{\sinh(k \cdot d)} \cdot \cos(\Theta) \right. \\
 & + \frac{3}{4} k^2 a^2 \cdot \frac{\cosh[2k \cdot (z + d)]}{\sinh^4(k \cdot d)} \cdot \cos(2\Theta) \\
 & \left. + \frac{3}{64} k^3 a^3 \cdot \frac{11 - 2 \cosh[2k \cdot (z + d)] \cdot \cosh[3k \cdot (z + d)]}{\sinh^7(k \cdot d)} \cdot \cos(3\Theta) \right]
 \end{aligned} \tag{14}$$

- mit:  $u$  = horizontale Teilchengeschwindigkeit  
 $C$  = Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  
 $k$  = Wellenzahl  $k = 2\pi/L$   
 $z$  = vertikale Koordinate des Wasserteilchens  
 $d$  = Wassertiefe  
 $\Theta$  = Phasenlage der Welle  $\Theta = kx - \omega t$   
 $a$  aus  $H = 2a + \frac{3}{32} \cdot k^2 \cdot a^3 \cdot \left[ \frac{1+8 \cosh^6(kd)}{\sinh^6(kd)} \right]$

Da der Seegang ein stochastischer Prozeß aus Abfolgen von Wellen unterschiedlicher Höhen und Perioden ist, ist es für die Berechnungen zunächst notwendig, die für die Berechnungen benötigten Wellenparameter ( $H$ ,  $T$ ,  $\Theta$ ) festzulegen. Hierbei hat die Welle mit der maximalen Wellenhöhe nicht zwangsläufig die maximale Wellenperiode, wie auch Abb. 33 zeigt. Im Pro-

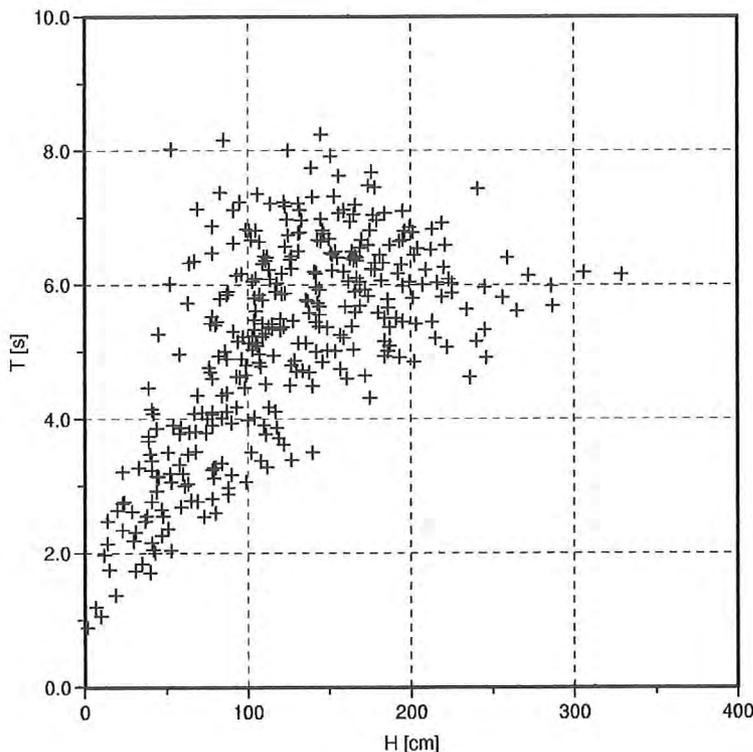


Abbildung 33: Verteilung von Wellenhöhe und zugehöriger Wellenperiode aller Wellen einer Messung, Bsp. Messung Projektgebiet Brodten vom 25.01.1998, 1.00 Uhr,  $d=10\text{m}$

jekt werden für die weiteren Anwendungen der abgeleiteten Größen lediglich die maximal zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten direkt am Boden benötigt. Daher müssen für die Berechnungen jeweils diejenige Parameterkombinationen von Wellenhöhe und Wellenperiode ermittelt werden, für die die maximalen Teilchengeschwindigkeiten zu erwarten sind.

Wie Gl. 15 zeigt, ist die Wellenhöhe der wesentliche Einflußfaktor für die Teilchengeschwindigkeit innerhalb einer Welle. Der Einfluß der Wellenperiode ist von untergeordneter Bedeutung. Somit ist es erforderlich, die maximale Wellenhöhe und die zugehörige Wellenperiode zu bestimmen. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Wellenhöhen einzelner Wellen gehorchen in guter Näherung der RAYLEIGH-Verteilung vgl. z.B. (GODA 1985, KOHLHASE 1983. Ausgehend

von der RAYLEIGH-Verteilung der Wellenhöhen kann die maximal innerhalb einer Stunde zu erwartende Wellenhöhe berechnet werden zu:

$$H_{\max} = 0,707 \cdot \sqrt{\ln(3600/T_m)} \cdot H_{1/3} \quad (15)$$

Für die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Wellenperioden einzelner Wellen läßt sich keine allgemeingültige Verteilungsfunktion angeben (Goda 1985). Auswertungen der Verhältnisse für die 3 Projektgebiete haben ergeben, daß das Verhältnis von mittlerer Wellenperiode zur Periode der Welle mit der maximalen Wellenhöhe  $T_{H_{\max}}/T_m \cong 1,25$  beträgt.

Die Abb. 34 zeigt beispielhaft ein Ergebnis der Strömungsuntersuchungen. Die Verteilung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten am Seegrund ist für die Zeiträume zwischen zwei Beobachtungen der Feld-Meßkampagne *Gefärbte Grobsedimente Brodten* dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden für die untersuchte Position in  $d = 4$  m Wassertiefe berechnet. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten betragen in den betrachteten Zeiträumen rd. 2.3 m/s bis 2.4 m/s.

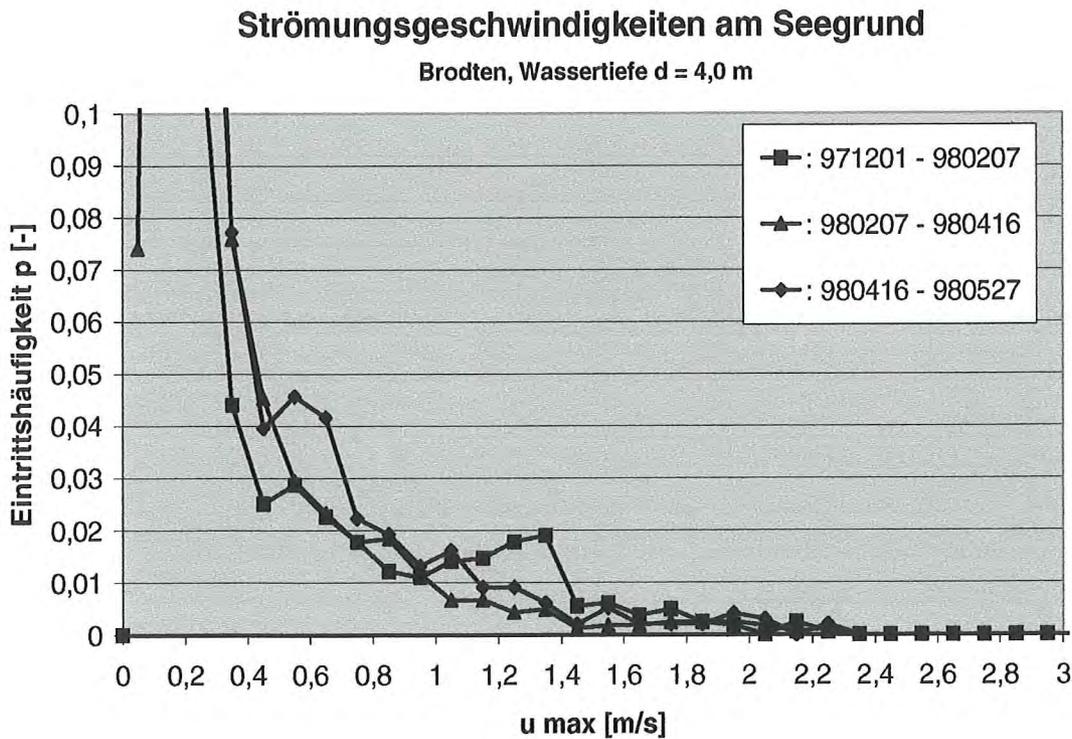


Abbildung 34: Eintrittshäufigkeit der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten am Seegrund für gegebene Zeiträume, Bsp.: Projektgebiet Brodten, Meßkampagne *Gefärbte Grobsedimente*

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens *Einfluß von Steiluferabbrüchen an der Ostsee auf die Prozeßdynamik angrenzender Flachwasserbereiche* hat das Institut für Wasserbau der Universität Rostock die Bearbeitung des Themenkomplexes Hydrodynamik übernommen. Im Zusammenhang mit der Bewertung der Sedimentdynamik sind hierbei insbesondere die örtlichen Seegangsverhältnisse in Kombination mit wechselnden Wasserständen und ggf. auftretenden großräumigen Strömungen wichtig.

Der vorliegende Bericht faßt die Ergebnisse der vom Institut für Wasserbau durchgeführten Untersuchungen zusammen. Im einzelnen wurden im Zuge der Projektbearbeitung die folgenden Themenkomplexe behandelt:

- Parametrisierung des Seegangs
- Ermittlung von Dünungseinflüssen
- Bewertung von Wellengruppen
- Anpassung der örtlichen Seegangsspektren an Normspektren
- Ermittlung der Beziehungen zwischen Wind- und Seegang
- Auffüllung von Datenlücken
- Langzeitstatistik mittlerer und extremer Seegangereignisse unter Einschluß wechselnder Wasserstände
- Energieflußuntersuchungen, Einflüsse von mittleren und extremen Ereignissen
- Ermittlung von Sedimenttransportkapazitäten
- Ermittlung und Bewertung örtlicher Strömungen aus Seegang

Für die im Projekt vorgesehenen Messungen in der Natur wurden von der Projektgruppe 3 Projektgebiete in der westlichen Ostsee (Schönhagen, Heiligenhafen, Brodten) ausgewählt. Zur Ermittlung der örtlichen Wellenverhältnisse in den Projektgebieten wurden vom IWR Richtungsseegangsmessungen an repräsentativen Meßpositionen im tieferen Wasser durchgeführt. Als Meßsystem wurden 2 Richtungswellenbojen vom Typ 'Directional Waverider' eingesetzt. Zusätzlich wurden Winddaten vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und Wasserstandsdaten vom Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Lübeck in die Untersuchungen mit einbezogen. Die Methodik der Seegangsmessungen und Auswertungen sowie der langzeitstatistischen Bewertung der Daten sind in Kap. 2 und Kap. 3 ausführlich dargestellt.

Auf der Grundlage der Seegangsmessungen und Winddaten des DWD wurden die Beziehungen zwischen den örtlichen Wind- und den örtlichen Seegangsverhältnissen ermittelt und die gemessenen Seegangsdaten auf längere Zeiträume extrapoliert. Als ein Ergebnis stehen für

alle 3 Projektgebiete umfassende und nahezu lückenlose Datensätze der signifikanten Seegangssparameter über einen Zeitraum von rd. 20 Jahren (Schönhagen) bis ca. 43 Jahren (Heiligenhafen) zur Verfügung. Ferner wurden im Rahmen der Projektbearbeitung Kriterien für die Durchführung künftiger Seegangsmeßprogramme abgeleitet.

Aufbauend auf den umfassenden Datensätzen des Seegangs wurden die Seegangsverhältnisse in den Projektgebieten langzeitstatistisch bewertet. Hierzu wurden die mittleren Verhältnisse des Seegangs und die Signifikanz extremer Seegangsereignisse sowie der Einfluß wechselnder Wasserstände analysiert.

Für die Verknüpfung des Seegangs mit dem örtlichen Sedimenttransport wurde der gerichtete Energiefluß des Seegangs und hieraus resultierend die Sedimenttransportkapazitäten ermittelt.

Die im IWR gemessenen, interpolierten und extrapolierten Seegangsdatensätze sowie die hieraus abgeleiteten Seegangenergieflüsse und Strömungsgeschwindigkeiten wurden den am Projekt beteiligten Instituten zur Verfügung gestellt.

## 7 Schrifttum

BATTJES, J.A. JANSSEN, J.P.F.M. Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves, Proc. 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 569-587, Hamburg, 1978

CARTER, D.J.T. CHALLENGOR, P.G. Methods of Fitting the Fisher-Tippett Type 1 Extreme Value Distribution Ocean Engineering, Vol. 10, pp. 191-199, 1983

CERC Coastal Engineering Research Centre 'Coastal Engineering Manual' CEM Summary <http://bigfoot.cerc.wes.army.mil/cem025.html> (Stand: 27.02.1998, 09.10.1998)

CERC Coastal Engineering Research Centre 'Shore Protection Manual' U.S. Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, 1984

D'AGOSTINO; STEVENS Goodness of fit Techniques Statistics: Textbooks and Monographs, Vol.68, Marcel Dekker, Inc., New York, 1986

DATAWELL Operation and Service Manual for Directional Waverider Mark II from serial no. 30185 incl. no. 30175-5 & 30176-5 Datawell, Haarlem, The Netherlands 1995

DEAN, R.G. DALRYMPLE, R.A. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1984

EAK Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzwerke 'Empfehlungen für Küstenschutzwerke', Die Küste, Heft 55, Heide 1993

FRÖHLE, P. Some Aspects of Conceptual Planning of Wave Measurement Programmes for Application in Coastal Engineering Proc. Second German - Chinese Joint Seminar on Recent Developments in Coastal Engineering Sept. 13th - 15th Tainan, Taiwan ROC 1999

FRÖHLE, P. FITTSCHEN, T. Hydrodynamic Impact on Cliff Coast Areas of the Baltic Sea on the Basis of Directional Wave Measurements Proc. 1st German-Chinese Seminar on Recent Developments in Coastal Engineering, Hasenwinkel, September 1997, Shaker Verlag, Deutschland

FRÖHLE, P. FITTSCHEN, T. Assessment of Short-Term Directional Wave Measurements with Respect to Long-Term Statistical Evaluations Proc. 5th Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC V), Cape Town, South Africa, April 1999

FRÖHLE, P. FITTSCHEN, T. KOHLHASE, S. (IWR) 1. Zwischenbericht zum BMBF Forschungsvorhaben 'Einfluß von Steiluferabbrüchen in der Ostsee auf die Prozeßdynamik angrenzender Flachwasserbereiche', TP Hydrodynamik, Wismar 1996 (unveröffentlicht)

FRÖHLE, P. FITTSCHEN, T. KOHLHASE, S. (IWR) 2. Zwischenbericht zum BMBF Forschungsvorhaben 'Einfluß von Steiluferabbrüchen in der Ostsee auf die Prozeßdynamik angrenzender Flachwasserbereiche', TP Hydrodynamik, Wismar 1997 (unveröffentlicht)

FRÖHLE, P. FITTSCHEN, T. KOHLHASE, S. (IWR) 3. Zwischenbericht zum BMBF Forschungsvorhaben 'Einfluß von Steiluferabbrüchen in der Ostsee auf die Prozeßdynamik angrenzender Flachwasserbereiche', TP Hydrodynamik, Wismar 1998 (unveröffentlicht)

FRÖHLE, P. FITTSCHEN, T. KOHLHASE, S. (IWR) 4. Zwischenbericht zum BMBF Forschungsvorhaben 'Einfluß von Steiluferabbrüchen in der Ostsee auf die Prozeßdynamik angrenzender Flachwasserbereiche', TP Hydrodynamik, Wismar 1999 (unveröffentlicht)

FRÖHLE, P. KOHLHASE, S. Long-Term Statistical Analysis of Proc. 4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC IV, Rio de Janeiro, Brasil 1995

FRÖHLE, P. KOHLHASE, S. Statistical Estimation of Extreme Events Proc. International Conference in Ocean Engineering, COE '96, IIT Madras India, 17 - 20 Dec. 1996

FRÖHLE, P. KOHLHASE, S. Statistical Assessment of Sea State within Extreme Events Proc. MEDCOAST 99, Antalya, Turkey 1999

GODA, J. Random Seas and Design of Maritime Structures University of Tokyo Press, 1985

GODA, J. On the Methodology of Selecting Design Wave Height Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Engineering, Costa del Sol, 1988

GODA, Y. HAWKES, P. MANSARD, E. MARTIN, M.J. MATHIESEN, M. PELTIER, E. THOMPSON, E. VAN VLEDDER, G. Intercomparison of extremal wave analysis using numerical simulated data Proceedings of the Second International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, July 25-28, 1993, New Orleans, Louisiana 1993

GRINGORTON, I.I. A plotting rule for extreme probability paper *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 3, 1963

HASSELMANN, K. ET AL. Measurement of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift*, Nr. 12, 1973

HAZEN, A. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply, *Trans. Am. Soc. Civil Engineers*, Paper 1308/77, 1914

HORIKAWA, K. *Nearshore Dynamics and Coastal Processes* University of Tokyo Press, Tokyo 1988

IAHR International Association of Hydraulic Research 'List of Sea State Parameters', Supplement to Bulletin 52, PIANC (Permanent Association of Navigational Congresses), Brüssel 1986

ISAACSON, M. DE ST. Q MACKENZIE, N.G. Long-Term Distribution of Ocean Waves: A Review *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 107, No. WW2 1981

KOHLHASE, S. *Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenanlage* Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Heft 57, Hannover, 1983

KOHLHASE, S. Seegang und Brandung In EAK 1993, Kap. 3, DIE KÜSTE Heft 55, Heide, 1993

LONGUET-HIGGINS, M.S. On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves *Journal of Marine Research*, Vol.11, No.3, 1952

MASSEL, S. *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction* Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publishing, Vol. 11, Singapore, 1996

MATHIESEN, M. GODA, Y. HAWKES, P.J. MANSARD, E. MARTIN, M.J. PELTIER, E. THOMPSON, E.F. VAN VLEDDER, G. Recommended practice for extreme wave analysis *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32 1994

PIERSON, W.J. MOSKOWITZ, L. A proposed Spectral Form for fully developed Wind Seas Based on Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii *Journal of Geophysical Research*, No. 69, 1964 PILARCZYK, K. W. (ED.) *Coastal Protection* A.A.Balkema Rotterdam, 1990

PLATE, E.J. *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure* Ernst & Sohn, Berlin, 1993

RICHTER, K. Seegang als Grundlage für die Ermittlung der hydrodynamischen Lasten, *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*, Band 75, Hamburg 1981

SACHS, L. *Angewandte Statistik* Springer Verlag, Berlin, 1984

SCHADE, D. Untersuchungen über das Wellenklima an einer Brandungsküste unter Einschluß der Richtungsstruktur des Seegangs, dargestellt am Beispiel der Insel Sylt Mitteilungen des FRANZIUS-INSTITUTs, Heft 71, 1991

STROTMANN, TH. FRÖHLE, P. KOHLHASE, S. ZIMMERMANN, C. Abschlußbericht zum BMFT - Forschungsvorhaben 'Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt' Phase II Hannover 1994 (unveröffentlicht)

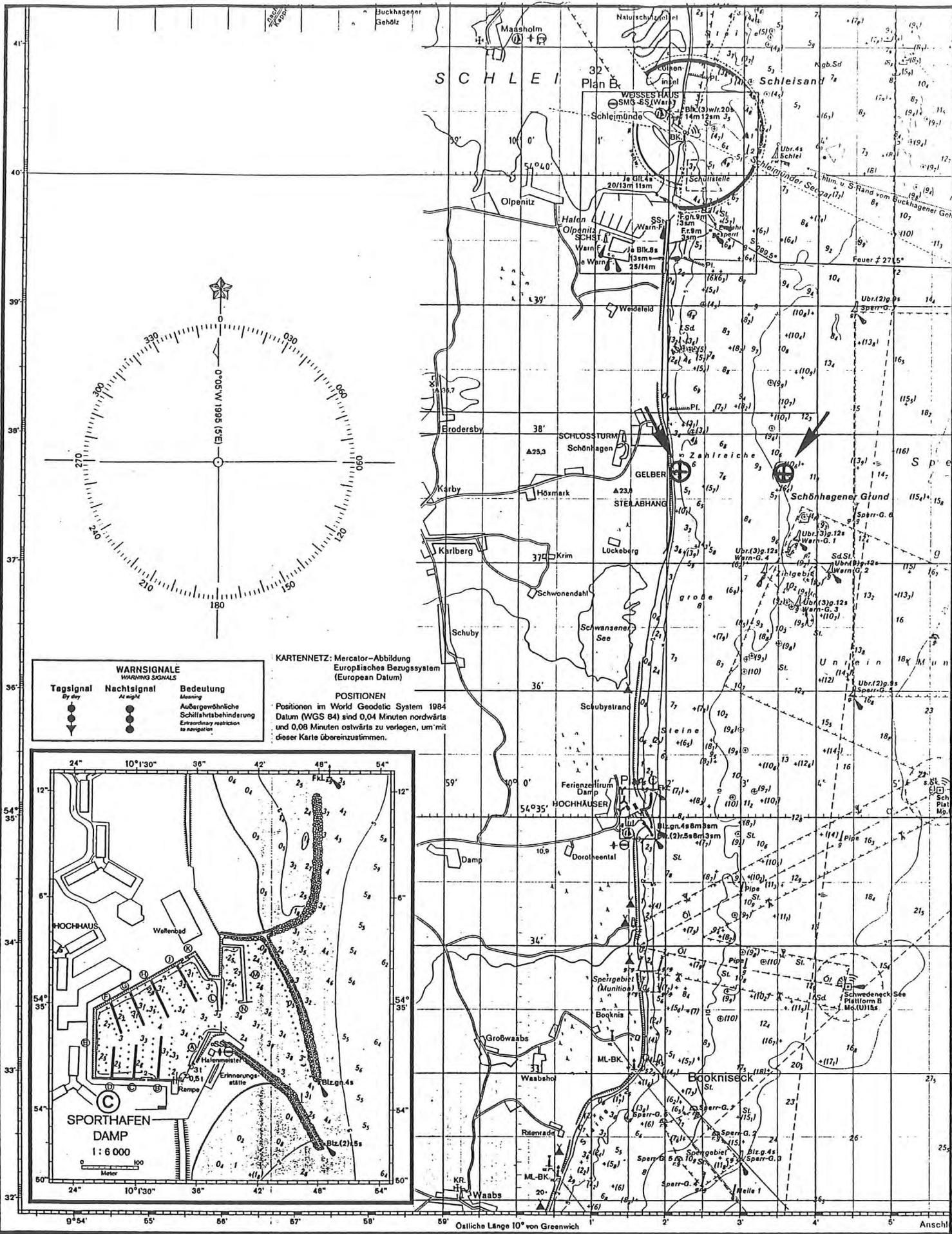
TUCKER, M.J. CARR, A.P. PITT, E.G. The Effect of an Offshore Bank in Attenuating Waves Coastal Engineering, Vol. 7, No. 2, 1983

VLEDDER, G. VAN YOSHIMI GODA, Y HAWKES, P. MANSARD, E. MARTIN, M.J. MATHIESEN, M. PELTIER, E. THOMPSON, E. Case studies of extreme wave analysis: a comparative analysis. Proceedings of the Second International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, July 25-28, 1993, New Orleans, Louisiana 1993

WITTE, J.O. FRÖHLE, P. FITTSCHEN, T. KOHLHASE, S. Assessment of Long-Term Directional Wave Conditions Based on Nearshore Wind - Wave Correlations Proc. MEDCOAST 99, Antalya, Turkey 1999

WMO World Meteorological Organisation, 'Guide to Wave Analysis and Forecasting' WMO No.702, Wave Climate Statistics, Genf, 1988

## 8 Anhang



WARNSIGNALE WARNING SIGNALS		
Tagsignal By day	Nachtsignal At night	Bedeutung Meaning
▼	●	Außergewöhnliche Schiffahrtsbehinderung Extraordinary restriction to navigation

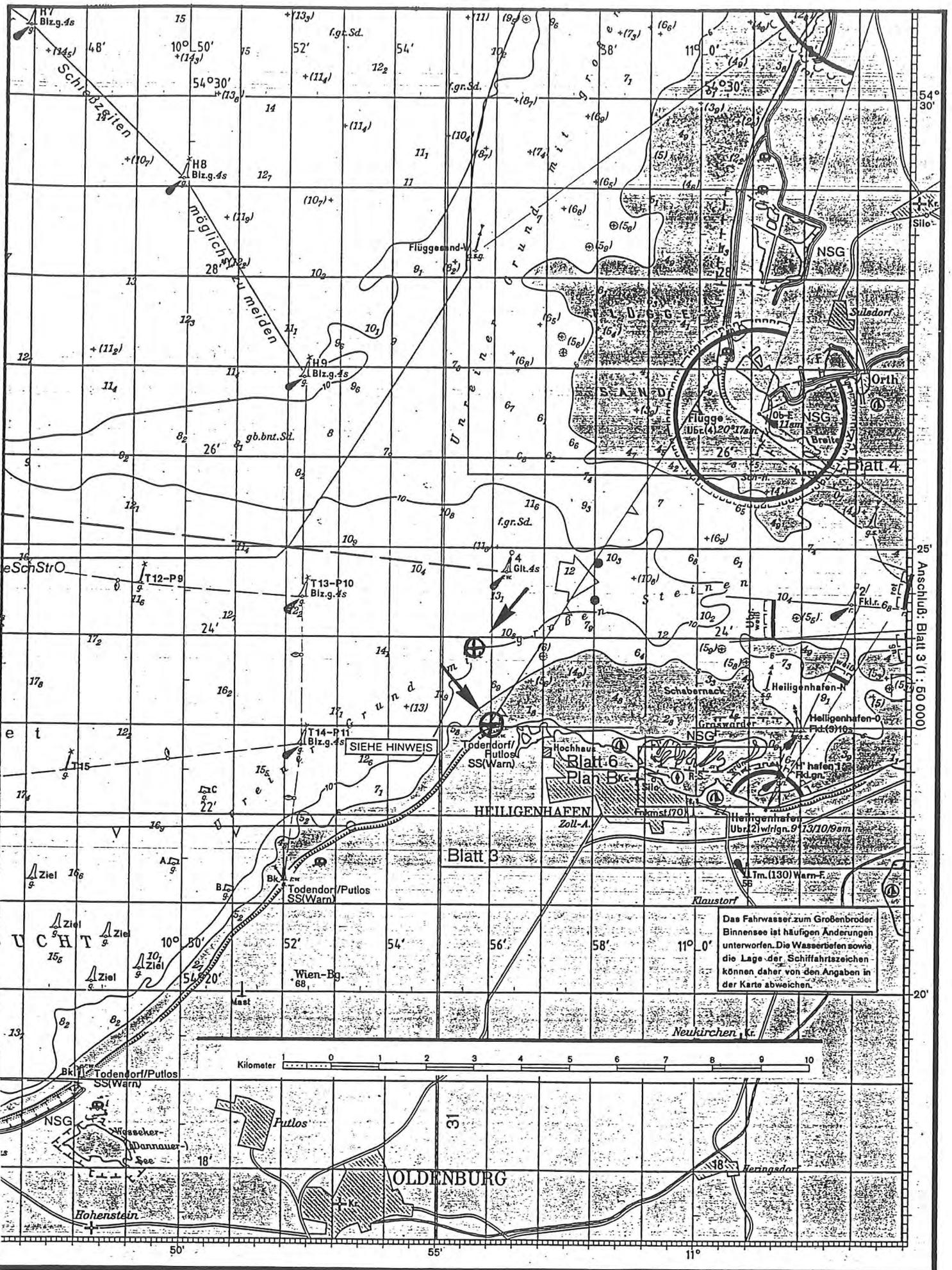
KARTENNETZ: Mercator-Abbildung  
Europäisches Bezugssystem  
(European Datum)

POSITIONEN  
Positionen im World Geodetic System 1984  
Datum (WGS 84) sind 0,04 Minuten nordwärts  
und 0,08 Minuten ostwärts zu verlegen, um mit  
dieser Karte übereinzustimmen.

Ausgabe 1995

600 0 1000 2000 3000 4000 5000  
Meter

Anlage 1: Positionen der Tiefwasser-Wellenmeßboje und des Flachwassermeßgeräts im Untersuchungsraum Schönhagen.



Anlage 2 : Positionen der Tiefwasser-Wellenmeßboje und des Flachwassermeßgeräts im Untersuchungsraum Heiligenhafen.



Mittlere Häufigkeitsverteilung des Seegangs, Projektgebiet Schönhagen (1991 – 1999, gemittelt aus WWK)

		mittlere Wellenanlauffrichtung															
H <sub>m0</sub>	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5	Summe
12,5	2,24	4,53	4,36	6,98	6,49	9,01	7,01	6,12	2,18	1,23	0,48	0,25	0,25	0,11	0,03	1,93	53,16
37,5	2,27	2,71	2,67	3,37	3,84	3,35	2,08	1,58	1,47	0,88	0,63	0,48	0,48	0,68	0,36	1,46	28,31
62,5	0,58	0,71	0,58	1,47	1,88	1,94	0,89	0,42	0,23	0,12	0,07	0,04	0,04	0,04	0,02	0,33	9,37
87,5	0,15	0,23	0,30	0,98	1,22	1,13	0,38	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01			0,06	4,61
112,5	0,03	0,05	0,11	0,58	0,68	0,61	0,12	0,01	0,00	0,00						0,02	2,21
137,5	0,02	0,03	0,07	0,37	0,41	0,36	0,05			0,00						0,01	1,32
162,5	0,00	0,01	0,03	0,16	0,16	0,15	0,01										0,53
187,5		0,00	0,01	0,10	0,10	0,09											0,30
212,5				0,05	0,05	0,05											0,14
237,5				0,02	0,02	0,02											0,05
262,5					0,00												0,00
287,5																	0,00
	5,29	8,28	8,13	14,07	14,84	16,70	10,54	8,19	3,92	2,24	1,19	0,78	0,78	0,83	0,41	3,80	100,00

Zugehörige mittlere Wellenperiode, Projektgebiet Schönhagen (WWK)

		mittlere Wellenanlauffrichtung														
H <sub>m0</sub>	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
12,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
37,5	2,6	2,7	2,6	2,6	2,8	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
62,5	2,9	3,0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
87,5	3,2	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2		3,2	3,2
112,5	3,5	3,5	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7	3,7	3,6	3,4		3,5				3,5
137,5	3,7	3,8	4,2	4,1	4,1	4,1	4,0			3,8						3,7
162,5	3,8	4,0	4,4	4,5	4,5	4,4	4,2									
187,5		4,3	4,5	4,8	4,8	4,8										
212,5				5,0	5,1	5,0										
237,5				5,4	5,5	5,4										
262,5					5,8											
287,5																

Zugehöriger mittlerer Wasserstand Pegel Schleimünde

		mittlere Wellenanlauffrichtung														
H <sub>m0</sub>	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
12,5	499	504	500	503	499	498	495	485	487	479	478	477	479	479	479	489
37,5	492	507	509	507	503	502	499	493	481	467	466	465	467	470	476	448
62,5	495	530	519	515	506	504	498	493	478	463	461	459	447	451	457	476
87,5	477	546	532	525	511	507	494	490	481	469	448	427	431	430	426	451
112,5	467	543	558	537	517	513	495	465	442	492		404				460
137,5	495	566	579	557	526	523	505			462						470
162,5	-	579	590	566	532	516	-									
187,5		584	598	614	539	559										
212,5				-	539	556										
237,5				-	560	-										
262,5					577											
287,5																

Mittlere Häufigkeitsverteilung des Seegangs, Projektgebiet Brodten (1991 – 1999, gemittelt aus WWK)

		mittlere Wellenanlaufrihtung																
H <sub>m0</sub>	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5	Summe	
12,5	8,12	10,23	6,62	7,65	6,49	3,07	2,10	1,64	1,81	2,01	2,12	1,86	1,28	0,76	0,29	7,69	63,73	
37,5	0,52	1,97	2,46	2,40	0,71	0,15	0,40	0,53	0,60	0,89	1,58	2,53	2,66	2,56	1,66	1,21	22,85	
62,5	0,13	0,94	1,49	1,44	0,62	0,07	0,09	0,06	0,06	0,15	0,23	0,41	0,41	0,31	0,16	0,09	6,67	
87,5	0,04	0,54	0,91	0,90	0,40	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	3,15	
112,5	0,02	0,29	0,56	0,55	0,29	0,02	0,02	0,00		0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	1,79	
137,5	0,02	0,13	0,26	0,26	0,15	0,02	0,02			0,00				0,00	0,01	0,01	0,88	
162,5		0,07	0,12	0,12	0,06	0,00	0,00							0,00		0,00	0,39	
187,5		0,03	0,05	0,05	0,03	0,01	0,01				0,00						0,17	
212,5		0,01	0,03	0,03	0,02	0,00										0,00	0,09	
237,5			0,01	0,01	0,01	0,00											0,04	
262,5				0,00	0,00	0,00											0,01	
287,5						0,00											0,00	
Summe	8,86	14,22	12,51	13,41	8,79	3,37	2,68	2,25	2,49	3,08	3,97	4,85	4,40	3,68	2,18	9,04	99,78	

Zugehörige mittlere Wellenperiode, Projektgebiet Brodten (WWK)

		mittlere Wellenanlaufrihtung														
H <sub>m0</sub>	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
12,5	2,3	2,3	2,5	2,7	2,7	4,5	5,5	4,7	4,0	3,8	3,3	3,3	3,7	3,6	5,4	60,6
37,5	2,5	2,5	2,9	2,9	3,0	3,0	2,9	2,7	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4
62,5	2,7	2,7	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,1	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
87,5	2,9	3,0	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,3	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
112,5	3,3	3,3	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,2		3,3	3,3	3,3	3,2	3,3	3,3	3,3
137,5	3,5	3,5	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2			3,4				3,5	3,5	3,5
162,5		4,6	4,6	4,6	4,6	4,5	4,5							3,8		3,7
187,5		4,9	4,9	4,9	4,9	4,8	4,8				4,2					0,0
212,5		5,2	5,2	5,2	5,2	5,2										4,4
237,5			5,5	5,5	5,6	5,7										
262,5				5,8	5,8	5,8										
287,5						6,3										

Zugehörige mittlerer Wasserstand, Projektgebiet Brodten (WWK)

		mittlere Wellenanlaufrihtung														
H <sub>m0</sub>	0	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225	247,5	270	292,5	315	337,5
12,5	-	-	469	494	488	490	485	485	485	481	482	487	487	496	488	-
37,5	520	528	510	509	505	501	494	495	485	478	475	482	489	504	511	516
62,5	533	538	518	512	506	500	491	489	477	463	453	459	469	484	-	515
87,5	537	557	530	515	505	496	503	487	476	447	463	460	455	477	-	523
112,5	561	575	537	519	509	499	512	477		457	427	426	506	483	-	524
137,5	593	592	543	525	514	503	505			442				478	-	520
162,5		-	555	525	510	496	-							530		569
187,5		-	557	530	516	502	-				445					
212,5		-	584	528	511	495										473
237,5			635	536	515	495										
262,5				578	539	501										
287,5						515										