Statistische Analyse von Meßdaten aus einem Buhnenfeld

Von Herwig Nöthel, Vallam Sundar und Klaus-Peter Holz

Zusammenfassung

Messungen des sohlnahen Druckes unter Wellen und der zugehörigen horizontalen Geschwindigkeitskomponenten in verschiedenen Wassertiefen in einem Buhnenfeld werden statistischen Analysen im Zeit- und Frequenzbereich unterzogen. Die Wellenhöhen- und Wellenperiodenparameter werden an verschiedenen Meßstellen im Buhnenfeld mit ihrem zeitlichen Verlauf ausgewertet und entsprechenden Verteilungsformen angepaßt. Weiterhin werden ihre spektralen Eigenschaften dargestellt. Die Geschwindigkeitsauswertungen haben zum Ziel, das Strömungsgeschehen während der Meßkampagnen zu beschreiben. Es werden Verfahren zur Ermittlung der mittleren Wellenanlaufrichtungen aus diesen Daten dargelegt. Weiter wird ein statistisches Modell vorgestellt, das, basierend auf der Grundlage der linearen Wellentheorie, die theoretischen Geschwindigkeiten in Wellenfortschrittsrichtung ermittelt. Vergleiche zwischen simulierten und gemessenen Resultaten im Zeit- als auch im Frequenzbereich werden dargestellt.

Summary

Measurements of the near bottom pressure under waves and their corresponding horizontal velocity components in different depths in a groin field are analyzed statistically in the time- and frequency domain. The temporal variation of several parameters concerning wave height and period at different locations in the groin field are compared with distribution functions and their spectral characteristics are shown. The aim of the velocity analysis is to describe the wave current characteristics during the survey. Methods are shown to determine the mean wave direction from this data. Based on linear wave theory, a statistical model to calculate the theoretical velocity in the wave propagation direction is presented. Comparisons are given between simulated and measured data in the time and frequency domain.

Inhalt

1. Einleitung		 		112
2. Meßdatenerfassung				112
3. Meßdatenanalyse		 		114
3.1 Allgemeines		 		114
3.2 Wellengeschehen				114
3.2.1 Wahrscheinlichkeitscharakteristika des Seegangs				114
3.2.2 Spektralcharakteristika des Seegangs				117
3.2.3 Beziehungen zwischen statistischer und spektraler Betrachtung				119
3.3 Strömungsgeschehen				120
3.3.1 Statistische Eigenschaften				120
3.3.2 Spektrale Eigenschaften				125
4. Zusammenfassung				125
5. Anmerkungen				129
6. Schriftenverzeichnis				129

1. Einleitung

Die im küstennahen Bereich vorherrschenden hydrologischen, morphologischen und sedimentologischen Vorgänge haben einen bedeutenden Einfluß auf die Stabilität von sandigen Strandabschnitten sowie auf den Entwurf und die Berechnung von Küsten- und Offshorebauwerken. Von besonderem Interesse sind die Verteilungen der Wellenhöhen und -perioden sowie die resultierenden Strömungen für die Bemessung. Etliche Forscher haben sich mit diesen Problemen auseinandergesetzt, z. B. DATTATRI, 1973; GODA, 1985; LONGUET-HIG-GINS, 1952; 1975, jedoch für den unmittelbaren Küstenbereich und insbesondere für Buhnenfelder gibt es nur wenige Untersuchungen, z. B. BLACK, 1978; SIEFERT u. KALDENHOFF, 1975.

Das KFKI-Forschungsprojekt "Wechselwirkungen von Bauwerken und mariner Umwelt" hatte Untersuchungen zur Stabilität und Optimierung von Strandaufspülungen in Buhnenfeldern zum Ziel. Innerhalb des Projekts wurde ein umfangreiches Naturmeßprogramm über Tidewasserstände, Strömungen, Wellen, Windgeschwindigkeiten, morphologische Veränderungen und sedimentologische Parameter durchgeführt. Die entsprechende Meßdatenerfassung wurde von dem in das Projekt integrierten Niedersächsischen Landesamt für Wasser und Abfall, Forschungsstelle Küste, Norderney, durchgeführt. Das Datenmaterial wurde anschließend den an dem Projekt beteiligten Instituten zur Verfügung gestellt. Die hier dargestellten Methoden und Ergebnisse beziehen sich nur auf Auswertungen, die im Hinblick auf die Teilarbeiten "Mathematisches Modell" von Bedeutung waren. Die gewonnenen Informationen wurden zur Steuerung und Verifikation hydrodynamisch-numerischer Modelle benötigt und herangezogen, die am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover bearbeitet wurden.

2. Meßdatenerfassung

Das Naturmeßprogramm wurde in ausgewählten Buhnenfeldern sowie in strandnahen Abschnitten im Westkopfbereich der Insel Norderney durchgeführt. Dieser Bereich ist durch Erosionszonen charakterisiert, welche ständige Küstenschutzmaßnahmen zur Sicherung der Insel notwendig machen (KUNZ, 1990). Ein Teil der Feldmessungen, die statistisch ausgewertet wurden, erfolgte in dem Buhnenfeld D1-E1 in den Jahren 1988 bis 1991. Die Lage dieses Feldes ist aus dem Übersichtsplan in Abb. 1 ersichtlich (NIEMEYER, 1990). Für zwei ausgewählte, jeweils 14tägige Meßzeiträume (7. 11. 1988–21. 11. 1988 und 5. 4. 1991–19. 4. 1991) werden die angefallenen Daten analysiert und die Ergebnisse dargestellt.

Die Anordnung der Meßstellen (Geräte W-M-O) für den ersten Meßzeitraum im November 1988 ist in Abb. 2 zu erkennen. An jeder Station wurden bodennah der Druck mit einer Druckmeßdose und in einer anderen feststehenden Höhe über Grund die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten mit einem nach dem magneto-hydrodynamischen Prinzip arbeitenden Strömungssensor gemessen.

Für die zweite Meßperiode im April 1991 wurde noch ein zusätzlicher Meßpfahl VS außerhalb der Buhnenstreichlinie zwischen den Buhnen D1-E1 installiert. Während dieser Meßperiode waren jedoch nur die Meßpunkte M1 und M2 aktiv. An diesen Meßstellen wurden bodennah der Druck und die horizontalen Strömungskomponenten in drei verschiedenen Höhen über Grund gemessen.

Während beider Meßperioden wurden die Druck- und Strömungssensoren mit Abtastraten von 5,9 Hz bzw. 11,8 Hz betrieben. Beide Messungen erfolgten in Zeitserien von



Abb. 1. Buhnenanordnung im Westkopfbereich der Insel Norderney



Abb. 2. Lage der Meßstellen im Buhnenfeld D1-E1

20 Minuten Dauer jeweils bei Hoch- und Niedrigwasser sowie bei den beiden Mittelwasserzeitpunkten.

Zusätzlich zu den hydrologischen Messungen wurden für die Auswertungen Windmeßwerte für den Zeitraum 20. 6. 1988–31. 12. 1991 berücksichtigt. Die Daten beinhalten Standardmittelwerte und wurden vom Deutschen Wetterdienst, Seewetteramt Hamburg, an der im Rahmen des KFKI-Forschungsprojektes betriebenen Station "Norderney-Wasserwerk" gemessen.

3. Meßdatenanalyse

3.1 Allgemeines

Der natürliche Seegang ist als ein stochastischer Vorgang anzusehen, der Wellen unterschiedlicher Höhen, Perioden und Laufrichtungen aufweist. Es wird angenommen, daß deren Verteilung statistischen Gesetzmäßigkeiten unterliegt.

Für ingenieurpraktische Aufgabenstellungen wird eine Parametrisierung des Seegangs vorgenommen. Aus der Gesamtheit aller Wellen werden charakteristische Wellenhöhen und -perioden ermittelt und der Seegang als Zeitreihe mit gleichbleibenden Wellenkennwerten aufgefaßt. Dazu ist es nötig, die einzelnen Wellen und Perioden innerhalb eines unregelmäßigen Wellenzuges zu definieren. Alternativ hierzu kann eine Wellenaufzeichnung auch nach den spektralen Eigenschaften des Seegangs ausgewertet werden. Hierbei erfolgt eine Zerlegung der Messung in die Frequenzkomponenten mittels Fourier-Analyse.

3.2 Wellengeschehen

3.2.1 Wahrscheinlichkeitscharakteristika des Seegangs

Für die Untersuchungen im Zeitbereich wurde zunächst der Tideeinfluß aus den Druckdaten eleminiert. Hieraus wurden dann die Wellenhöhen und -perioden nach dem Nulldurchgangsverfahren unter Benutzung der Zero-Up-Crossing- und Zero-Down-Crossing-Methode bestimmt. Es wurden dabei die signifikanten Wellenkennwerte wie z. B. H1/3, H1/10, Hmittel- $T_{1/3}$ und T_{mittel} ermittelt, wobei sich zwischen den beiden Auswertemethoden keine auffälligen Unterschiede ergaben. Als Beispiel ist in Abb. 3 die Verteilung der $H_{1/3}$ - und T_{mittel} -Werte innerhalb der zweiten Meßperiode wiedergegeben, wie sie sich nach der Zero-Up-Crossing-Methode ergibt. Deutlich ist dabei die Höhenabnahme der einlaufenden Wellen infolge von Shoaling-Effekten vom Vorstrandpfahl VS zur Meßstelle M1 sichtbar; anschließend erfolgt eine erneute Aufsteilung zur Position M2. Die Wellenperioden nehmen infolge Umwandlung der Wellenenergie kontinuierlich zum Strand hin ab. Bei hohen Wellenhöhen wird auch der Einfluß des Tidewasserstandes auf die Größe der Wellenhöhe deutlich. Die zeitliche Variation der Wellenperiode zeigt, daß der Tidewasserstand auf diese Größen nur einen geringen Einfluß hat und der Periodenparameter nur wenig zwischen den Meßstellen im Buhnenfeld schwankt. Zur Beschreibung der Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden die ermittelten Wellenhöhen und -perioden als Histogramme dargestellt und auf bekannte theoretische Häufigkeitsverteilungen überprüft. LONGUET-HIGGINS (1952) hat bereits nachgewiesen, daß die RAYLEIGH-Verteilung unter bestimmten Bedingungen eine gute Approximation für die Verteilung der Random-Wellen ergibt. In der Brandungszone kann diese Verteilungsform jedoch nur eingeschränkt angewendet werden. Dort liefert die WEIBULL-Verteilungsfunk-



Abb. 3. H_{1/3}- und T_{mittel}-Verteilungen für den Meßzeitraum vom 5. 4. 1991–19. 4. 1991

tion eine wesentlich bessere Anpassung an die Meßdaten. Bei den Untersuchungen für die Messungen im Buhnenfeld erwies sich die RAYLEIGH-Verteilung als eine gute, die WEI-BULL-Verteilung als eine sehr gute Beschreibungsform der Wellenhöhen und -perioden.

Exemplarisch sind in Abb. 4 die Wellenhöhenhistogramme mit den beiden Verteilungskurven für die verschiedenen Meßstellen aufgetragen, wobei die Höhen mit der Zero-Down-Crossing-Methode ermittelt wurden (15.11. 1988, Meßbeginn 23:55 Uhr, Klassenbreite $\triangle H = 0,2$ m). Die Wellenhöhen werden an der Meßstelle M1 eher durch die RAYLEIGH-Verteilung wiedergegeben, da hier größere Wassertiefen vorhanden sind und der Buhneneinfluß keine Rolle spielt. Die anderen Meßpunkte werden dagegen besser durch die WEIBULL-Verteilung beschrieben. Ähnliche Ergebnisse haben LEE und BLACK (1978) bei Wellenmessungen an verschiedenen Korallen-Riffstellen auf der Insel Oahu, Hawaii, beobachtet.

Analog zu den Wellenhöhen wurden entsprechende Histogramme und Verteilungskurven für die Wellenperioden ermittelt, die hier jedoch nicht dargestellt sind. Auch hier stellten



Abb. 4. Verteilungsformen der Wellenhöhen infolge Zero-Down-Crossing-Auswertung für den Meßzeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr

sich die zwei obengenannten Verteilungsformen als besonders brauchbar zur Beschreibung der gemessenen Perioden heraus.

Zur Absicherung der Aussagen wurde für den Meßpunkt M1 für den Zeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr, der Einfluß der Aufzeichnungsmenge der Meßdaten auf die Auswertung der Wellencharakteristika abgeschätzt. Es wurden die signifikanten Werte für Wellenhöhe und -periode unter Benutzung der Down-Crossing-Methode und Berücksichtigung unterschiedlicher Anzahl von Meßdaten in Abb.5 einander gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß die Kennwerte relativ unabhängig von der Datenanzahl sind. Lediglich die Extremwerte H_{max} , T_{max} und T_{bmax} unterliegen erwartungsgemäß einer Vergrößerung. Auswertungen für die übrigen Meßstellen sowie für andere Meßzeitpunkte zeigen die gleichen Tendenzen. Die Auswertungsmethode Zero-Up- oder Zero-Down-Crossing hat keinen Einfluß auf die Ergebnisse.



Abb. 5. Variation der Meßdatenanzahl auf verschiedene Wellenkennwerte

3.2.2 Spektralcharakteristika des Seegangs

Für die Spektraluntersuchungen wurden die gemessenen Druckdaten mittels der Fast-Fourier-Transformation in dem Frequenzbereich abgebildet, in dem die Zeitreihen als Überlagerung einer Summation von Sinus- oder Cosinus-Schwingungen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen aufgefaßt werden. Jeder Schwingungskomponente wird dabei ein Energieanteil zugeordnet, der dem Quadrat der Wellenhöhe proportional ist. Das



Abb. 6. Wellenspektren für den Meßzeitpunkt 16. 11. 1988, 2:00 Uhr

Spektrum ergibt sich dann aus der Gesamtheit aller Schwingungskomponenten. Hieraus können spektrale Parameter wie die Spektrumsmomente m_n , signifikante Wellenhöhen H_s , Peakperioden T_p , Spektralbreiteparameter ε usw. bestimmt werden.

Als Beispiel ist in Abb.6 für den Zeitpunkt 16. 11. 1988, 2:00 Uhr, die typische Verteilung der Spektraldichten für die Meßpunkte dargestellt, wobei die Frequenzen nur bis 0,8 Hz aufgetragen sind. Zusätzlich sind die signifikanten Wellenhöhen H_s , die sich aus der Beziehung $H_s = 4\sqrt{m_0}$ bestimmen lassen, in der Abbildung angegeben. Es ist ersichtlich, daß das Spektrum und somit die Energieverteilung breitbandig ist und mehrfache Peaks pro Meßstelle vorhanden sind. Die Peakfrequenz im Maximum des Spektrums verschiebt sich dabei vom höherfrequenten Bereich für die Positionen O1, M1 und W1 mit größeren Wassertiefen zu niedrigen Frequenzen für diese im betrachteten Untersuchungszeitraum auftretende Erscheinung liegt in dem Brechen der Wellen innerhalb dieses Bereiches.

3.2.3 Beziehungen zwischen statistischer und spektraler Betrachtung

Da die wichtigsten Bemessungsverfahren auf der Grundlage der charakteristischen Wellenhöhe $H_{1/3}$ aufbauen, sind Beziehungen entwickelt worden, mit denen die zugehörigen Kennwerte aus statistischer und spektraler Auswertung in Relation gebracht werden können. Bei den Wellenhöhen können näherungsweise die aus der Häufigkeitsauswertung gewonnenen $H_{1/3}$ -Werte gleich der signifikanten Wellenhöhe H_s gesetzt werden. In Abb. 7 sind für die gesamte erste Meßperiode vom 7. 11. 1988–21. 11. 1988 die $H_{1/3}$ -Werte gegenüber den H_s -Parametern für ausgewählte Meßpegel aufgetragen, wobei für die statistische Auswertung die Zero-Up-Crossing Methode benutzt wurde. Es ist hierbei ersichtlich, daß eine gute Korrelation zwischen den beiden Kennwerten zu verzeichnen ist.



Abb. 7. Vergleich zwischen den Wellenhöhenparametern Hs(spektral) und H1/3(statistisch)



Abb. 8. Vergleich zwischen den Wellenperiodenparametern Tm02(spektral) und Tmittel(statistisch)

Für die Ermittlung der Perioden aus der Spektrumbetrachtung gibt es in der Literatur verschiedene Formulierungsmöglichkeiten, z.B. GODA, 1985, KOHLHASE, 1983, wobei an dieser Stelle die Beziehung T_{m02} (spektral) = $\sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$ benutzt wurde. Die Abb. 8 zeigt ebenfalls wieder für die gesamte erste Meßkampagne die Wellenperioden, wie sie aus Zeit- und Frequenzbetrachtungen ermittelt wurden. Im Vergleich zu den Wellenhöhen ist bei den Perioden eine größere Schwankungsbreite zwischen den beiden Betrachtungsweisen erkennbar.

3.3 Strömungsgeschehen

An der Küste wird das Strömungsgeschehen durch die Tide, den Wind sowie den Seegang und, im kleinskaligen Bereich, durch die Einzelwelle selbst bestimmt, wobei alle diese Effekte in Wechselwirkung zueinander stehen. Meßdaten im Buhnenfeld zeigen, daß die Größe der hervorgerufenen Strömungen und ihre Frequenz sehr variieren und einem Zufallscharakter unterliegen. Des weiteren ändert sich die Richtung der Strömungen mit der Zeit. Das Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen lag in der statistischen und spektralen Beschreibung der gemessenen Strömung, um hieraus vornehmlich die Wellenanlaufrichtung zu bestimmen sowie Vergleiche mit einem mathematischen Modell anstellen zu können.

3.3.1 Statistische Eigenschaften

Ermittlung der Wellenanlaufrichtungen

Die Richtung der aus der offenen See in Flachwassergebiete einlaufenden Wellen, insbesondere unmittelbar vor dem Brechen in der Brandungszone, ist zur mathematischen Bestimmung der hier vorherrschenden Strömung und des damit verbundenen Sedimenttransportes von großem Interesse. Eine möglichst exakte Vorhersage ist dabei wünschenswert, da ansonsten große Fehler in den Transportberechnungen auftreten können (SHERMAN u. GREENWOOD, 1986). Zur Ermittlung der Wellenanlaufrichtungen wurden zunächst die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten einer Regressionsanalyse unterzogen (SUNDAR et al., 1992). Beispielhaft sind in Abb. 9 für einen ausgewählten Zeitpunkt aus der ersten Meßkampagne die gemessenen Geschwindigkeiten für die verschiedenen Meßstellen in einem globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem eingezeichnet. Die gestrichelten Linien stellen die Regressionsgeraden dar, die sich aus dem Zusammenhang der gemessenen Strömungskomponenten ergeben. Aufgrund der Tatsache, daß die beiden Untersuchungsgrößen in gleicher Abhängigkeit zueinander stehen, kann näherungsweise durch Mittelwertbildung der beiden Geraden auf eine mittlere Regressionsgerade geschlossen werden, die der Wellenanlaufrichtung entspricht. In Abb. 9 ist für jeden Meßpegel diese Gerade als durchgezogene Linie dargestellt, wobei zusätzlich deren Winkel bezüglich rechtweisend Nord angegeben ist. Wegen der großen Streuung wurden zum Vergleich aus Literaturquellen verschiedene Methoden zur Bestimmung der Anlaufrichtung der Wellen herangezogen (BUCHAN et al., 1984; KIM et al., 1986; MIZUGUCHI et al., 1980). Anzumerken zu den verschiedenen Verfahren ist, daß sie aus Auswertungen von Naturmessungen, aber auch aus Laboruntersuchungen gewonnen worden sind. Für einige Meßpunkte des Testfeldes sind in Tab. 1 die entsprechenden Resultate dargestellt. Es ist ersichtlich, daß die Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden relativ große Streubreiten aufweisen. Diese Kenntnis ist wichtig für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit mathematischer Modelle. Infolge der schwierigen Bestimmung der Anlaufrichtung der Wellen können die jeweiligen Methoden nur Näherungswerte liefern.



Abb. 9. Gemessene Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem

Tabelle 1. Wellenanlaufrichtung in Grad bzgl. rechtweisend Nord, berechnet aus Geschwindigkeitsmeßdaten nach verschiedenen Methoden (Meßbeginn: 18. 11. 1988, 1:57 Uhr, Meßdauer: 20 Min.)

Meßstelle	M1	M2	01	02	W1
Methode					
Buchan 1	333	307	289	291	321
Buchan 2	334	311	288	294	316
Kim	324	314	297	314	318
Mizuguchi 1	337	340	336	348	349
Mizuguchi 2	319	310	295	304	313
Mizuguchi 3	332	329	314	323	328
Nöthel	331	312	301	305	315

Vergleiche mit parallel zu den hydrologischen Messungen durchgeführten Windmessungen an der Wetterstation "Norderney-Wasserwerk" zeigen, daß im strandnahen Bereich die Wellenanlaufrichtung nur noch wenig durch den Wind und dessen Richtung beeinflußt wird. Der Windeinfluß darf daher vernachlässigt werden. Die morphologischen Gegebenheiten und Buhnenbauwerke spielen eine wesentlichere Rolle für die Verformung der Wellen.

Resultierende Strömungen:

Geht man davon aus, daß der Wellenfortschritt nicht mit einem Massentransport verbunden ist, so ergibt der Vektor vom Koordinatenursprung zum Schnittpunkt der Regres-



Abb. 10. Resultierende Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem

sionsgeraden gerade die Grundströmung, die sich infolge Tide, Wind und Seegangsumformung ergibt. Sie zeigt im Buhnenfeld eine meist inhomogene Struktur, wie es beispielhaft in Abb. 10 für eine am 18. 11. 1988 durchgeführte 20minütige Messung für einen bodennahen Horizont (im Mittel 0,20 m über Grund) erkennbar ist. Die Auswertung der zweiten Meßkampagne, bei der auch Strömungsmessungen über die Wassertiefe vorgenommen wurden, ergab für alle Höhenniveaus im Buhnenfeld ein ähnlich inhomogenes Bild. Die Ergebnisse am Vorstrandpfahl, die hier nicht dargestellt sind, zeigen dagegen eine gleichmäßigere Verteilung der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten. Es ist anzunehmen, daß außerhalb des Buhnenfeldbereiches die Tideströmung im Vergleich zur seegangsinduzierten Strömung überwiegt und daher das Strömungsgeschehen sich homogener ausbildet.

Die Abnahme der resultierenden Strömungen von der Meßstation VS bis zur strandnahen Station M2 ist aus Abb. 11 ersichtlich. Es wurden dabei für die drei Meßstellen VS, M1 und M2 und die jeweils drei Meßhöhen die resultierenden Geschwindigkeiten aus jeweils 20minütigen Messungen für den 6. 4. 1991 dargestellt.



Abb. 11. Resultierende Geschwindigkeiten für acht jeweils 20minütige Messungen am 6. 4. 1991

Variation der Strömungen:

Der quadratische Mittelwert der strandnormalen Strömung wird als Strömungsparameter u_{rms} bezeichnet. Die Veränderung dieses Wertes an ausgewählten Meßpunkten für den Meßzeitraum vom 16. 11. 1988–18. 11. 1988 ist in Abb. 12 dargestellt, wobei in diesem Zeitraum kein Extremereignis auftrat. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß für jeden



Tag und Zeit der Messung

Abb. 12. Zeitliche Variation des Strömungskennwertes urms im Buhnenfeld

Meßzeitpunkt die Meßstelle M1 die minimalen und die Meßstelle M2 die maximalen Werte ergeben haben, wobei Unterschiede bis zu 30 % zu verzeichnen sind. Weniger große Unterschiede treten dabei an den beiden Meßpegeln O1 und W1 auf. Dies erklärt sich durch die Lage dieser Pegel im äußeren Bereich des Buhnenfeldes. Über die Zeitachse betrachtet ist eine Streuung der u_{rms} -Werte erkennbar, welche auf den Tideeffekt zurückzuführen ist.

Statistische Simulation der Strömungen:

Neben der reinen Datenauswertung wurde ein statistisches Modell entwickelt, mit dem aus der gemessenen Wellenhöhenverteilung die horizontale Geschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung infolge Welleneinfluß theoretisch ermittelt werden kann. Aufgrund der vorher bereits beschriebenen schwierigen Bestimmung der Wellenanlaufrichtung wurde angenommen, daß die Wellenrichtung mit der Meßprofilrichtung übereinstimmt und somit die strandnormale Geschwindigkeitskomponente für einen Vergleich herangezogen werden darf.

Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit unter Wellen wurde die "time domain method" nach REID (1957) benutzt, die auf der Grundlage der linearen Wellentheorie formuliert ist.

Als Simulationsbeispiel werden hier die Messungen vom 15. 11. 1988, Startzeit 23:55 Uhr, zugrunde gelegt. Zur besseren Übersichtlichkeit in den Darstellungen werden zunächst nur die ersten 1024 Meßdaten der Wellendrücke von insgesamt 7076 Werten je Meßpegel für die Berechnung herangezogen.

Abb. 13 zeigt für die verschiedenen Meßstellen jeweils die berechneten und gemessenen Geschwindigkeitsgrößen. Zu erkennen ist, daß die Formen der berechneten Geschwindigkeiten sowie deren Zeitbereiche mit Vorzeichenwechsel gut mit den entsprechenden Meßwerten übereinstimmen.

Tab. 2 enthält für die Meßstellen die Korrelationskoeffizienten zwischen den gemessenen und simulierten Geschwindigkeiten, wobei an den Pegeln in größerer Wassertiefe gute Übereinstimmungen erkennbar, dagegen an den Meßpunkten mit geringer Wassertiefe größere Abweichungen festzustellen sind. Da diese Meßstellen im unmittelbaren Flachwasserbereich liegen, treten infolge Brech- und turbulenter Strömungsvorgänge Nichtlinearitäten auf, für deren Erfassung das Modell jedoch nicht ausgelegt ist.

3.3.2 Spektrale Eigenschaften

Spektrale Untersuchungen wurden ebenfalls für die Geschwindigkeitsmessungen angestellt. Beispielhaft sind in Abb. 14 die Frequenzspektren aus gemessener und simulierter Geschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung für die verschiedenen Meßpunkte dargestellt, wie sie sich aus den Zeitreihen in Abb. 13 ergeben. Es zeigen sich dabei in den Kurvenverläufen für die seewärtigen Meßdosen gute Übereinstimmungen; an den ufernahen Pegeln sind jedoch Abweichungen erkennbar. Im Bereich der Peakfrequenzen sind, außer an den Stellen W3, M3 und O3, Abweichungen zwischen 10 und 30 % zwischen den gemessenen und simulierten Frequenzgrößen festzustellen. Weiterhin ist erkennbar, daß sich die Peakfrequenzen für die strandnahen Meßstellen mehr in den niederfrequenten Bereich verschieben. Die Ursache hierfür liegt zum einen im Brechen und dem Ineinanderlaufen der Wellen, welches niedrige Frequenzkomponenten hervorruft, und zum anderen im Abbau der hohen Frequenzen beim Einlaufen der Wellen in flacheres Wasser.

Vergleiche zwischen dem Spektralbreiteparameter, mit dem die Energiekonzentration in dem Spektrum beschrieben werden kann, aus gemessener Strömung ($\varepsilon_{gemessen}$) und simulierter Strömung ($\varepsilon_{berechnet}$) an ausgewählten Pegeln für die gesamte erste Meßkampagne sind in Abb. 15 dargestellt. Es sind dabei gute Übereinstimmungen erkennbar, jedoch sind größere Abweichungen in diesem Parameter bei Werten größer als 0,85 festzustellen.

4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Analyse von Naturmeßdaten über Wellendrücke und Strömungsgeschwindigkeiten beschrieben, wobei die Messungen an verschiedenen Pegeln in einem Buhnenfeld auf der Insel Norderney durchgeführt wurden. Das Ziel der Unter-



0.00

-1.56





gemessene Geschwindigkeiten - – – – berechnete Geschwindigkeiten









Abb. 13. Gemessene und berechnete strandnormale Geschwindigkeitsverläufe für den Zeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr

Die Küste, 54 (1992), 111-130

Tabelle 2. Korrelationskoeffizient zwischen gemessenen und berechneten Teilchengeschwindigkeiten

Meßstelle	M1	O1	W1	M2	O2	M3	O3	W3
Korrelationskoeffizient	0.91	0.87	0.88	0.81	0.79	0.76	0.71	0.65



Abb. 14. Spektren infolge gemessener und berechneter strandnormaler Geschwindigkeiten für den Zeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr



Abb. 15. Vergleich zwischen dem Spektralbreiteparameter ε infolge gemessener und simulierter Strömung für den Meßzeitraum 7. 11. 1988–21. 11. 1988

suchungen lag in der statistischen Beschreibung dieser physikalischen Vorgänge, deren Ergebnisse für eine mathematische Modellierung herangezogen wurden.

Die Auswertungen der Wellenzeitreihen nach der Zero-Up-Crossing- als auch der Zero-Down-Crossing-Methode ergaben, daß die Wellenhöhen und Wellenperioden im Brandungsbereich sehr gut durch eine WEIBULL-Verteilungsfunktion angenähert werden können. Der Tideeffekt hat auf die Größe der Höhenparameter einen bedeutenden Einfluß, weniger jedoch auf die Periodenkennwerte. Die spektrale Betrachtung der Druckdaten zeigt eine breitbandige Spektrumsverteilung, wobei eine Verschiebung der Peakfrequenzen von höherfrequenten zu niederfrequenten Werten für die flachliegenden Meßstellen festzustellen ist. Die Vergleiche zwischen den statistischen und spektralen Kennwerten zeigen, daß der statistisch ermittelte $H_{1/3}$ -Wert und der spektrale H_s -Wert gut korrelieren, dagegen traten zwischen den beiden Betrachtungsweisen für die Perioden Abweichungen auf.

Für die Strömungsmessungen wurden Regressionsbetrachtungen angestellt und hieraus die mittleren Wellenanlaufrichtungen bestimmt. Vergleiche mit verschiedenen Literaturangaben ergeben dabei Übereinstimmungen. Die resultierende Grundströmung wurde ermittelt, wobei im Buhnenfeld in horizontaler und vertikaler Richtung keine gleichbleibende Struktur zu erkennen war.

Mittels eines statistischen Modells, das auf der Grundlage der linearen Wellentheorie aufbaut, wurde aus der gemessenen Wellenhöhenverteilung die horizontale Geschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung ermittelt. Es ergab sich dabei eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten; nur im unmittelbaren Flachwasser- und Brandungsbereich traten größere Differenzen auf. Die hierfür angestellten Spektrumsbetrachtungen zeigten außer für die strandnahen Pegel relativ gute Übereinstimmung in den Peakfrequenzen.

5. Anmerkungen

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) geförderten interdisziplinären Forschungsprojektes "Wechselwirkungen von Bauwerken und mariner Umwelt" durchgeführt, wobei die Finanzierung vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) übernommen wurde. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover erarbeitet. Die Autoren bedanken sich bei den Institutsmitarbeitern für die Unterstützung und bei dem Niedersächsischen Landesamt für Wasser und Abfall, Forschungsstelle Küste, Norderney, für die Bereitstellung der umfangreichen Meßdaten.

6. Schriftenverzeichnis

- BLACK, K. P.: Wave Transmission over Shallow Reef (Field Measurement and Data Analysis). University of Hawaii, Technical Report 78-42, 1978.
- BUCHAN, S. J., STEEDMAN, R. K., STROUD, S. A. u. PROVIS, D. G.: A Shallow Water Directional Wave Recorder. Proceeding 19th Coastal Engineering Conference, Houston, 1984.

DATTATRI, J.: Wave off Mangalore Harbor – West Coast of India. Journal Waterways, Habors Coastal Engineering Division, ASCE, WW 1, 1973.

- GODA, Y.: Irregular Wave Deformation in the Surf Zone. Coastal Engineering in Japan, Vol. 18, 1975.
- GODA, Y.: Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo Press, 1985.
- KIM, K. H., TORU, S. u. ISCHIRO, D.: Lateral Mixing and Wave Direction in the Wave-current Interaction Region. Proceedings 20th International Conference on Coastal Engineering, Taipei, 1986.
- KOHLHASE, S.: Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenplanung. Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 57, 1983.
- KUNZ, H.: Artificial Beach Nourishment on Norderney, A Case Study. Proceeding 22nd International Coastal Engineering Conference, Delft, 1990.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt". Die Küste, H. 54, 1992.
- LEE, T. T. u. BLACK, K. P.: The Energy Spectra of Surf Waves on a Coral Reef. Proceedings 16th Coastal Engineering Conference, Hamburg, 1978.
- LONGUET-HIGGINS, M.S.: On the Statistical Distributions of the Height of the Sea Waves. Journal of Marine Research, Vol. 11, Nr. 3, 1952.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.: On the Joint Distribution of the Periods and Amplitudes of Sea Waves. Journal Geophysical Research, 1975.
- MIZUGUCHI, M., ISOBE, M., HOTTA, S. u. HORIKAWA, K.: Field Observation of the Wave-induced Water Particle Velocity in the Surf Zone. Coastal Engineering in Japan, Vol. 23, 1980.
- NIEMEYER, H. D.: Field Measurements and Analysis of Wave Induced Nearshore Currents. Proceeding 22nd International Coastal Engineering Conference, Delft, 1990.
- OCHI, M. K. u. MCMILLEN, R. I.: Stochastic Analysis of Offshore Currents. Proceedings 21st International Coastal Engineering Conference, Malaga, 1988.
- OCHI, M. K. u. WANG, W. C.: Non-gaussian Characteristics of Coastal Waves. Proceedings 19th Coastal Engineering Conference, Houston, 1984.
- REID, R. O.: Correlation of Water Level Variations of Offshore Forces on a Vertical Pile for non Periodic Waves. Proceeding 6th Coastal Engineering Conference, Florida, 1957.
- SHAHUL HAMMED, T.S. u. BABA, M.: Wave Height Distribution in Shallow Waters. Ocean Engineering 12(4), 1985.
- SHERMAN, D.J. u. GREENWOOD, B.: Determination of Wave Angle in Shallow Water. Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 112, Nr. 1, 1986.

SIEFERT, W. u. KALDENHOFF, H.: Analysis of Random Waves in Shallow Water and Laboratory

Reproduction. Proceedings 16th Congress International Association Hydraulics Research, Paris, 1975.

SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Climate in a Groin Field. Ocean Engineering, Vol. 19, No. 5, 1992.

SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Kinematics in a Groin Field – Frequency Domain Analysis. Coastal Engineering, 18, 1992.

SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Kinematics in a Groin Field – Time Domain Analysis. Zur Veröffentlichung akzeptiert beim Journal of Coastal Research, 1992.

SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Directions in a Groin Field. Zur Veröffentlichung eingereicht beim Journal of Atmospheric and Oceanographic Technology, 1992.