

KURATORIUM FÜR FORSCHUNG  
IM KÜSTENINGENIEURWESEN  
POSTFACH 44 67 - TEL. (04 31) 33 94 -  
2300 KIEL 1

E. 01. Juli 1992

17.09. Juli 1992

Doppel 26/4

9/2.2

8/3.7

Universität Hannover

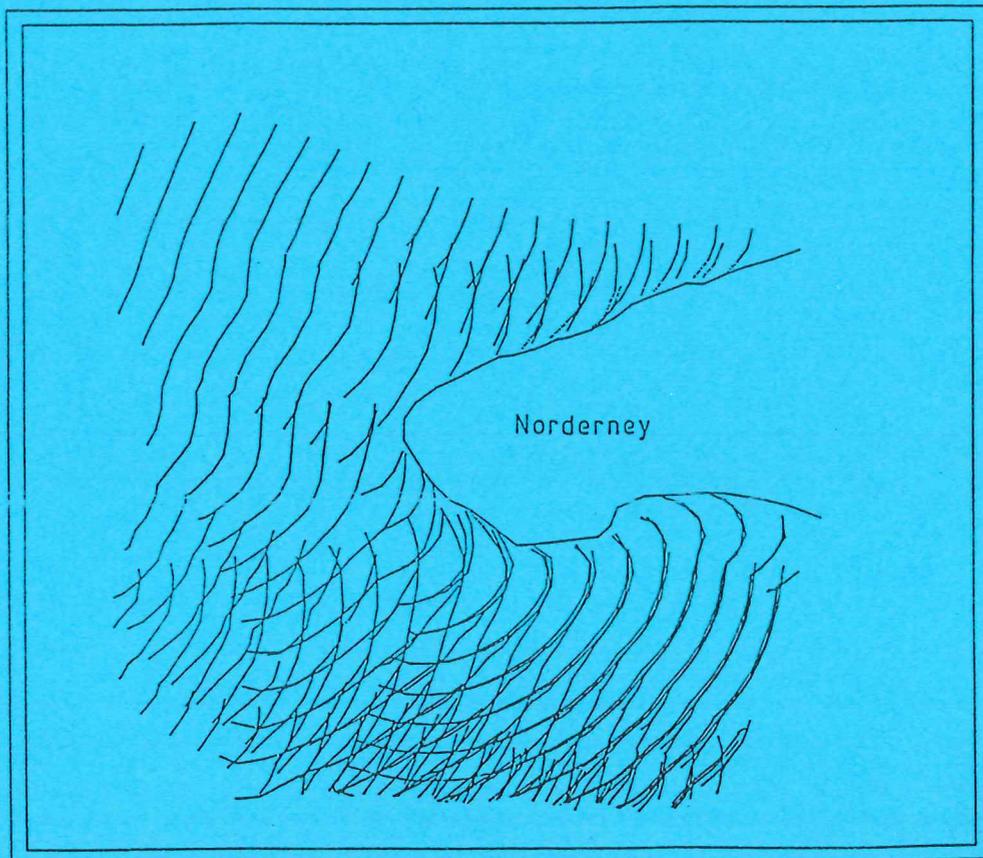
Institut für Strömungsmechanik und  
Elektronisches Rechnen im Bauwesen

Wechselwirkungen von Bauwerken  
und mariner Umwelt

Mathematisches Modell

Abschlußbericht

24. April 1992



Projektleitung : Prof. Dr.-Ing. P. Holz  
Projektbearbeitung : Dipl.-Ing. H. Nöthel

029719 Lit.-1

KURATORIUM FÜR FORSCHUNG  
IM KÜSTENINGENIEURWESEN  
POSTFACH 44 67 - TEL. (04 31) 33 94 -  
2300 KIEL 1

01. Juli 1992  
09. Juli 1992

9/2.2

8/3.7

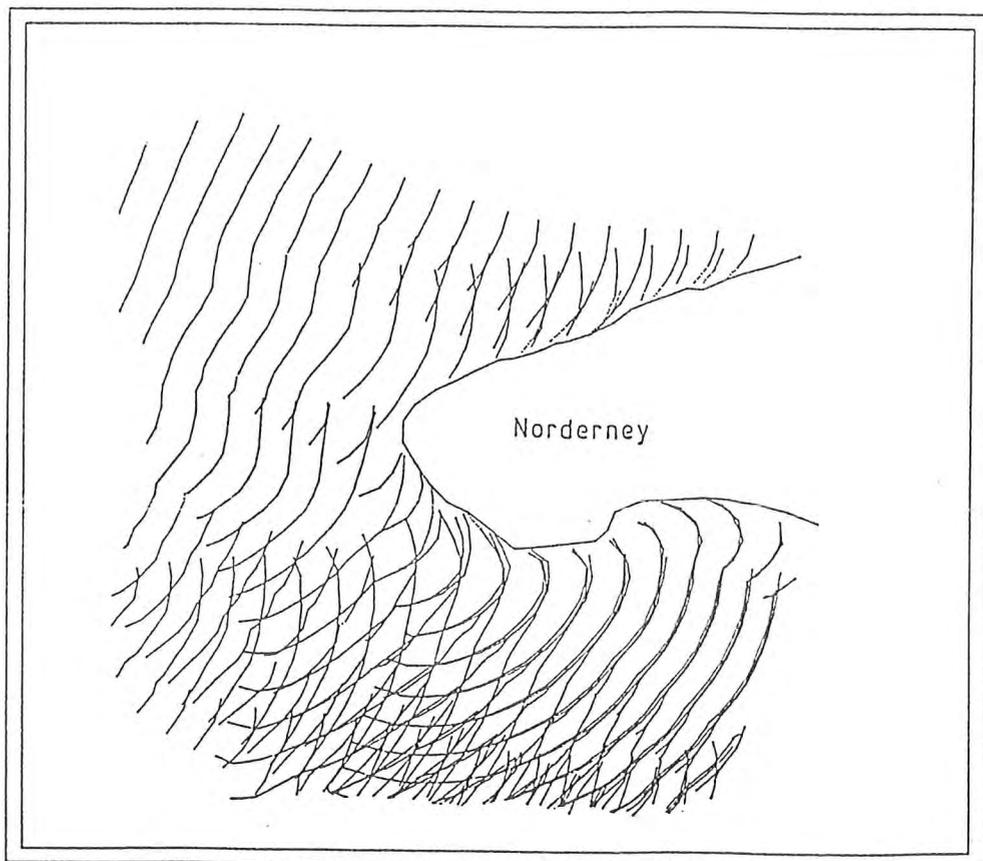
Universität Hannover

Institut für Strömungsmechanik und  
Elektronisches Rechnen im Bauwesen

Wechselwirkungen von Bauwerken  
und mariner Umwelt

Mathematisches Modell

Abschlußbericht  
24. April 1992



Projektleitung : Prof. Dr.-Ing. P. Holz  
Projektbearbeitung : Dipl.-Ing. H. Nöthel

029719 Lit. -1

Forschungsvorhaben

# Wechselwirkungen von Bauwerken und mariner Umwelt

Abschlußbericht zum hydrodynamisch-numerischen Teil  
der Untersuchungen zur Optimierung  
des Küstenschutzes

24.04.1992

# Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabe	1
2	Ergebnisse	1
2.1	Statistische Meßdatenanalyse . . . . .	2
2.2	Numerische Untersuchungen . . . . .	5
3	Zusammenfassung	8
4	Veröffentlichungsliste	9
5	Literaturverzeichnis	10
6	Tabellenverzeichnis	12
7	Abbildungsverzeichnis	12

# 1 Aufgabe

Das KfKI-Projekt „Wechselwirkungen von Bauwerken und mariner Umwelt“ hat die Aufgabe, den Wissensstand über die hydrologischen, morphologischen und sedimentologischen Vorgänge an sandigen Strandabschnitten zu erweitern. Hierbei soll insbesondere die Stabilität von Strandaufspülungen in Bühnenfeldern am Beispiel der Insel Norderney untersucht werden.

Das Forschungsvorhaben wird finanziell vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

Aufgrund der Komplexität der Problemstellung gliedert sich das Arbeitsprogramm in unterschiedliche Teilgebiete, die von verschiedenen Institutionen interdisziplinär bearbeitet werden. Einerseits werden dabei auf der Insel Norderney Naturmessungen über Tidewasserstände, Strömungen, Wellen, Windgeschwindigkeiten und sedimentologische Untersuchungen zur Erfassung von Sedimentzusammensetzungen und -umlagerungen durchgeführt. Auf der anderen Seite werden die Naturvorgänge durch hydraulische und numerische Modelle näherungsweise simuliert.

Die Durchführung der Berechnung des Wellengeschehens, der tide- und welleninduzierten Strömungen und des Sedimenttransportes unter Verwendung hydrodynamisch-mathematischer Modelle wurde dem Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover übertragen und unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. P. Holz durch Dipl.-Ing. H. Nöthel bearbeitet.

Der hier vorgelegte Abschlußbericht bezieht sich auf den Teil der numerischen Modellierung innerhalb des Forschungsprojektes.

## 2 Ergebnisse

Die für die Berechnung erforderlichen mathematischen Simulationsmodelle wurden teilweise neu erstellt, einige wurden basierend auf bestehenden Programmen weiterentwickelt. Alle Programme benutzen finite Dreieckselemente zur Approximation der Tiefenstruktur. Die Rechenmodule sind eingebettet in das Programmsystem TICAD (Tidal Interactive Computation And Design), welches einheitliche Pre- und Postprozessoren für die verschiedenen Berechnungsmodule vorsieht.

Die für die Erstellung der Modelle benötigten Topographieinformationen wurden aus Feldmessungen ermittelt. Desweiteren wurden zur Steuerung der numerischen Modelle sowie der Verifikation der erzielten Resultate ebenfalls Naturmessungen herangezogen, wobei diese Daten von den anderen am Forschungsprojekt beteiligten Institutionen gewonnen worden sind. Die Daten wurden um Angaben aus der Literatur ergänzt.

Detaillierte Beschreibungen der ausgeführten Tätigkeiten sind in den Zwischenberichten eingehend zu finden und sollen hier nicht weiter ausgeführt werden. Die durchgeführten

Untersuchungen gliedern sich zum einen in statistische Auswertungen von Meßinformationen und zum anderen in die numerischen Berechnungen des Strömungs- und Morphologiegeschehens in einem Bühnenfeld.

## 2.1 Statistische Meßdatenanalyse

Ein Großteil der Arbeiten erstreckte sich auf die Auswertung und Bewertung von Strömungs- und Wellenhöhenmessungen sowie Topographieaufnahmen in der Natur, wobei die eigentliche Meßdatenerfassung von der Forschungsstelle Küste, Norderney, erbracht worden ist. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, die numerischen Modelle anhand der statistischen Ergebnisse zu steuern und zu verifizieren. Für zwei ausgewählte jeweils 14-tägige Meßzeiträume (07.11.1988 - 21.11.1988 und 05.04.1991 - 19.04.1991) wurden dem Institut Daten, die auf der Insel Norderney in dem Bühnenfeld D1-E1 gewonnen wurden, auf Magnetbändern übergeben. Aufgrund der sehr umfangreichen Datenmenge erstreckte sich der Datentransfer über mehrere Monate und stellte sich im nachhinein in der ausgeführten Art und Weise als nicht effizient heraus. Für zukünftige Datenübertragungen in ähnlicher Größenordnung sollten daher eher Medien mit größerer Speicherkapazität oder noch besser, die sehr leistungsfähigen und schnellen öffentlichen Netzwerkdienste in Anspruch genommen werden.

Die Meßstellenanordnung (Geräte W-M-O) für die erste Meßkampagne (07.11. - 21.11.1988) ist in Abb. 1 zu erkennen, wobei jeweils bodennah der Druck und in einer Wassertiefe zwei senkrecht zueinander stehende horizontale Geschwindigkeitsmessungen ausgeführt wurden. Bei der zweiten Meßperiode (05.04. - 19.04.1991) waren die Positionen der Pegel M1 und M2 identisch denen der Abb. 1, zusätzlich war ein Meßpfahl VS außerhalb der Bühnenstreichlinie zwischen den Bühnen D1-E1 angeordnet. Es wurden an jeder Meßstelle der Druck und in drei verschiedenen Tiefen jeweils wieder die zwei zueinander senkrecht stehenden horizontalen Strömungskomponenten gemessen. Bei beiden Messungen betrug die Meßdauer jeweils 20 Minuten, wobei die Daten immer bei Hoch- und Niedrigwasser sowie bei den beiden Mittelwasserzeitpunkten gewonnen wurden.

Für die Auswertung und Interpretation der Daten mußte umfangreiche Software erstellt werden, um Analysen für den Zeit- als auch den Frequenzbereich durchführen zu können. Zunächst war es jedoch notwendig, die Rohdaten auf ihre prinzipielle Aussagefähigkeit zu überprüfen, da die Meßstellen teilweise nicht permanent unter Wasser waren. Nach dieser Prüfung reduzierte sich die gesamte gemessene Datenmenge um mehr als die Hälfte. Desweiteren waren bei den Druckaufzeichnungen an der Position VS innerhalb des zweiten Meßraumes in unregelmäßigen Zeitabständen unverhältnismäßig große Werte zu erkennen, die augenscheinlich auf Meßfehlern beruhten und eliminiert werden mußten. Die wichtigsten Resultate der Druckdatenauswertung sollen nachfolgend dargestellt werden.

### Druckmessungen

Alle Wellendruckdaten wurden für den Zeitbereich sowohl nach dem Zero-Up-Crossing- als auch nach dem Zero-Down-Crossing-Verfahren analysiert und die signifikanten Wellenkennwerte wie z.B.  $H_{1/3}$ ,  $H_{mittel}$ ,  $T_{1/3}$  und  $T_{mittel}$  ermittelt. Als Beispiel ist in Abb. 2

die Verteilung der  $H_{1/3}$ - und  $T_{mittel}$  - Werte innerhalb der zweiten Meßperiode wiedergeben, wie sie sich nach der Zero-Up-Crossing-Methode ergibt. Deutlich ist hierbei die Höhenabnahme der einlaufenden Wellen infolge Shoaling-Effekte vom Vorstrandpfahl VS zur Meßstelle M1 hin sichtbar, anschließend erfolgt eine erneute Aufsteilung an der Position M2. Die Wellenperioden nehmen dagegen infolge Umwandlung der Wellenenergie kontinuierlich zum Strand hin ab. Zur Beschreibung der Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden die ermittelten Wellenhöhen und -perioden auf bekannte Häufigkeitsverteilungen überprüft. Es stellte sich dabei heraus, daß die RAYLEIGH-Verteilung und insbesondere im Flachwasserbereich die WEIBULL-Verteilung eine gute Beschreibung der Wellenparameter ergibt. Zwischen den beiden Crossing-Auswertemethoden wurden praktisch keine Unterschiede in den Resultaten festgestellt. Die aufgezeigten Ergebnisse sind mit Literaturangaben verglichen worden, wobei eine gute Übereinstimmung vorhanden war [5].

Als weiteres wurden Spektraluntersuchungen mittels der Fast-Fourier-Transformationsmethode im Frequenzbereich für die Druckdaten angestellt. Als Beispiel ist für den Zeitpunkt 16.11.1988, 02:00 Uhr, in Abb. 3 die typische Verteilung der Spektraldichten für die Meßpegel dargestellt, wobei die Frequenzen nur bis 0.8 Hz aufgetragen sind. Zusätzlich sind die signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  in der Abbildung dargestellt. Es ist ersichtlich, daß das Spektrum und somit die Energieverteilung breitbandig ist. Die Peakfrequenz im Maximum des Spektrums verschiebt sich dabei vom höherfrequenten Bereich für die Positionen O1, M1 und W1 mit größeren Wassertiefen zu niedrigeren Frequenzen für die Meßpegel O3 und W3 im unmittelbaren Flachwasserbereich. Die Ursache für diese Erscheinung liegt in dem Brechen der Wellen innerhalb dieses Bereiches.

### Strömungsmessungen

Zunächst wurden die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten einer Regressionsanalyse unterzogen, mit dem Ziel, hieraus die Wellenanlaufrichtungen zu ermitteln. Beispielfhaft sind in Abb. 4 für einen ausgewählten Zeitpunkt aus der ersten Meßkampagne die gemessenen Geschwindigkeiten für die Meßstellen in einem globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem eingezeichnet. Die gestrichelten Linien stellen die Regressionsgeraden dar, die sich aus dem Zusammenhang der beiden Strömungsmessungen ergeben. Aufgrund der Tatsache, daß die beiden Untersuchungsgrößen in gleicher Abhängigkeit zueinander stehen, kann näherungsweise durch Mittelwertbildung der zwei zugehörigen Geraden auf eine mittlere Regressionsgerade geschlossen werden, die der Wellenanlaufrichtung entspricht. In der Abb. 4 ist diese Gerade als durchgezogene Linie dargestellt. Wegen der großen Streuung wurden aus Literaturquellen verschiedene Methoden zur Bestimmung der Anlaufrichtung der Wellen zum Vergleich herangezogen, da gerade diese Informationen als ein wichtiger Eingangswert für das numerische Wellenmodell anzusehen sind [1][10]. 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, wobei jedoch das eigene benutzte Auswerteverfahren Werte innerhalb dieser Bandbreite geliefert hat. Infolge der schwierigen exakten Bestimmung der Anlaufrichtung der Wellen kann diese Angabe nur einen Mittelwert darstellen.

Geht man davon aus, daß die Wellen nicht mit einem Massentransport verbunden sind, so ergibt der Vektor vom Koordinatenursprung zum Schnittpunkt der Regressionsgeraden ge-

rade die (tidebedingte) Grundströmung. Diese zeigt im Bühnenfeld eine meist inhomogene Struktur, wie es beispielhaft in Abb. 5 für einen bodennahen Tiefenhorizont erkennbar ist. Die Auswertung der zweiten Meßkampagne, bei der auch Strömungsmessungen über die Wassertiefe vorgenommen wurden, zeigt für alle Tiefenhorizonte ein ähnlich inhomogenes Bild. Die Auswertungen am Vorstrandpfahl zeigen dagegen eine gleichmäßigere Verteilung der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten. Die Abnahme der resultierenden Strömungen von der Meßstation VS bis zur Station M2 ist aus Abb. 6 ersichtlich. Es wurden dabei für die drei Meßstellen VS, M1 und M2 und die jeweils drei Meßhöhen die resultierenden Geschwindigkeiten aus jeweils 20-minütigen Messungen für den 06.04.1991 dargestellt.

Eine weitere Untersuchung bestand in der Ermittlung der Strömungsverteilung während einer Wellenperiode. Beispielhaft sind in Abb. 7 für jeweils eine beliebig gewählte Periode die Geschwindigkeiten für die Meßpositionen VS, M1 und M2 dargestellt. Erkennbar ist dabei am Vorstrandpfahl die mehr alternierende Strömung, während beim Fortschreiten der Welle in Richtung Strand eine Stauchung und somit mehr eine bauchige horizontale Teilchenbewegung festzustellen ist. Diese Tendenz zeigte sich bei allen drei Meßhorizonten.

Diese Einzelbetrachtung ist sehr illustrativ, für eine Analyse des Meßdatenkollektivs aber nicht weiterführend. Deshalb wurden die küstenparallelen und -normalen Strömungskomponenten mittels der Frequenzanalyse auf ihre Eigenschaften untersucht. Es zeigte sich, daß an der Meßstation M1 die beiden Komponenten oft von ähnlicher Größenordnung waren, welches auf einen unregelmäßigen und kurzkämmigen Seegang schließen läßt. Bei den anderen Pegeln im Bühnenfeld dominierte dagegen die strandnormale Strömung gegenüber dem parallelen Anteil, was mehr auf einen längerkämmigen Seegang hindeutet.

Neben den bisher aufgeführten Auswertungen wurde schließlich noch versucht, aus der gemessenen Wellenhöhenverteilung die horizontale Komponente der Orbitalgeschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung theoretisch zu ermitteln. Zur Berechnung der Strömung wurde ein statistisches Modell entwickelt, welches nach der „time domain method“ [13] formuliert ist und als Grundlage die lineare Wellentheorie verwendet. Beispielhaft sind in Abb. 8 die Verläufe der Energieverteilungen infolge gemessener und simulierter strandnormaler Wellenströmungsgeschwindigkeiten an den verschiedenen Meßpositionen im Bühnenfeld ersichtlich. Eine relativ gute Übereinstimmung bei den Kurvenverläufen ist hierbei insbesondere bei den seewärtigsten Meßstellen festzustellen, bei den strandnahen Pegeln sind jedoch Abweichungen in den Peakfrequenzen erkennbar.

## Topographische Messungen

Zu Beginn und Ende der beiden Meßkampagnen wurden jeweils morphologische Aufnahmen vorgenommen. Die Messungen wurden jedoch nur von Land aus durchgeführt, so daß sie stets nur bis an die Niedrigwasserlinie reichten. Innerhalb der zwei Meßperioden zeigten sich dabei keine signifikanten Veränderungen der Morphologie, sondern es waren eher geringfügige lokale Umlagerungen im Bühnenfeld zu erkennen. Anzumerken ist hierzu, daß die zeitlichen Umformungen des Strandes infolge eines normalen Tidezyklus unter Umständen wesentlich größer sind als die resultierende Änderung über einen längeren Zeitraum.

## Aussagen der Meßdatenanalyse in bezug auf die numerische Simulation

Aufgrund des stochastischen Seegangprozesses und des sehr großen vorhandenen Meßdatenvolumens war es zunächst erforderlich, aussagekräftige Anfangs- und Verifikationswerte für die mathematischen Modelle zur Simulation eines 14-tägigen mittleren Seeganggeschehens im Bühnenfeld zu bekommen. Wegen der großen Lückenhaftigkeit der nutzbaren Meßdaten über die Zeit war es jedoch nicht möglich, diesen Zeitraum anhand der Meßdaten kontinuierlich zu modellieren. Vielmehr können nur Situationen für diskrete Zeitpunkte berechnet werden, und von diesen Resultaten auf einen längerfristigen Zeitraum extrapoliert werden. Desweiteren streuen die Meßdaten und die hieraus gewonnenen statistischen Aussagen beträchtlich, so daß wohl eine statistische Beschreibung des Naturgeschehens anhand der Daten erfolgen kann, eine deterministische Simulation jedoch sehr schwierig ist. Für zukünftige Naturmeßprogramme ist daher zu prüfen, welche Fragestellungen mit den Meßdaten beantwortet werden sollen und mit welchen Frequenzen die Datenerfassung erfolgen muß.

## 2.2 Numerische Untersuchungen

### Tidegeschehen

Am Anfang der Projektarbeiten stand die hydrologische Simulation der Strömungen in den unmittelbar strandnahen Bühnenfeldern. Hierfür wurden die beiden Bühnenfelder C-D sowie D1-E1 auf der Insel Norderney herangezogen, da innerhalb dieser Gebiete Meßdaten vorlagen [12]. Zur Steuerung der numerischen Modelle wurden jedoch auch seeseitige Randwerte in Form von Durchflüssen und Wasserständen benötigt, die nicht vorhanden waren. Daher wurde in der folgenden Phase ein großräumiges Modell entwickelt, mit dem die Simulation des Tidegeschehens im gesamten Inselbogen von Norderney durchgeführt werden kann und mit dem Randwerte für die lokalen Modelle gewonnen werden können. Das großräumige Modell, das mit am Institut entwickelten übergeordneten Modellen der Deutschen Bucht und Nordsee gesteuert worden ist, wurde für ein mittleres Tidegeschehen anhand des Pegels Norderney-Riffgat verifiziert [3]. Anhand der nunmehr vorhandenen Daten konnten die kleinskaligen Modelle betrieben und mittlere Tidevorgänge simuliert werden. Hierzu diente einerseits ein stationäres hydrodynamisch-numerisches Modell, das sehr schnell rechnet, die Vorgeschichte der Dynamik über eine Tide im Bühnenfeld aber nicht erfaßt. Andererseits konnten aber auch instationäre Zustände mit einem entsprechenden alternativen Modell simuliert werden, wobei sich jedoch aufgrund der erforderlichen hohen Auflösung der Topographie bei dem gewählten formulierten Lösungsverfahren ein sehr großer Rechenaufwand ergab.

### Wellengeschehen

Zur Simulation der seegangsbedingten Vorgänge im Küstenvorfeld wurde ein Wellenmodell entwickelt, welches auf der von AIRY formulierten linearen Wellentheorie basiert. Aufbauend auf empirischen Ansätzen wird die Veränderung der Wellenhöhen und -richtungen unter Einschluß der für Küstengebiete wesentlichen Effekte wie Shoaling, Diffraktion, Refraktion, Brechvorgänge und einer Grundströmung, wie sie z.B. infolge Tide vorhanden

sein kann, ermittelt. Das Modell ist erfolgreich bei akademischen Fallstudien sowie bei den für die tidebedingten Untersuchungen erstellten Strömungsmodellen angewandt und mit Literaturangaben verglichen worden [6][11][20]. Für ausgewählte Zeitpunkte, die innerhalb der Zeiträume der Meßkampagnen lagen, wurden Simulationen des Wellengeschehens im Bühnenfeld D1-E1 vorgenommen. Ausgehend von den aus den Meßdaten ermittelten Einlaufrichtungen der Wellen wurde die Verteilung der Wellenhöhen berechnet und mit den an den Pegeln gemessenen Werten verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung erzielt wurde.

Da die im Bühnenfeld gemessenen Strömungen und deren Richtungen in der Zeitachse und über die Tiefe betrachtet kein homogenes Bild ergaben, wurden im Hinblick auf die Ermittlung der brandungsbedingten Strömungen zunächst grundsätzliche Untersuchungen angestellt. Es wurden dabei die innerhalb des Forschungsvorhabens vom Leichtweiß-Institut, Braunschweig, durchgeführten hydraulischen Modellversuche für die weiteren Untersuchungen herangezogen und versucht, sie nachzurechnen [4]. Diese Vorgehensweise hatte den Vorteil, daß die Topographie exakt vorgegeben werden konnte, sowie genau definierte Randbedingungen in Form monochromatischer Wellen vorhanden waren. Für die numerische Modellierung wurden dabei die gleichen Wasserstände, Wellenparameter und Wellenlaufrichtungen zugrunde gelegt wie bei den hydraulischen Versuchen. Als Beispiel ist in Abb. 9 die flächenhafte Wellenhöhenverteilung sichtbar, wie sie sich bei der Simulation einer senkrecht zum Strand in das Bühnenfeld einlaufenden Welle mit den Parametern  $H_{1/3} = 1,0m$  und  $T = 3,0sec$  bei einem Wasserstand von  $NN + 0,0m$  einstellt. Deutlich sichtbar sind dabei im unteren Bildteil der trockengefallene Strandbereich sowie die nicht überfluteten Bühnenwurzeln. Anzumerken zu dieser Abbildung ist, daß sich die am unmittelbaren Rand befindlichen hellblauen Flächen infolge Interpolationen ergeben und außeracht gelassen werden müssen. Vergleiche zwischen berechneten und der vom Leichtweiß-Institut gemessenen Wellenhöhen an diskreten Meßpegeln zeigen dabei gute Übereinstimmungen.

### Brandungsbedingte Strömung

In einem weiteren Arbeitsschnitt wurde aus der infolge Änderung der Wellenhöhen hervorgerufenen Energieverteilung die welleninduzierte Strömung ermittelt. Hierbei wurden zunächst die von LONGUET-HIGGINS [8][9] formulierten sogenannten „radiation stress“ ermittelt. Aufbauend auf der in Abb. 9 berechneten Seegangsverteilung wurde der „radiation stress“ ermittelt, der sich infolge des Brechens und damit einhergehender Wellenhöhenabnahme in diesem Bereich ergibt. Die Abb. 10 zeigt beispielhaft diese Verteilung für das oben beschriebene Seegangsgeschehen. Anschließend wurden die „radiation stress“ - Kräfte in den Impulsgleichungen des Strömungsmodells als zusätzlich treibende Kraft implementiert. Exemplarisch ist in der Abb. 11 die brandungsinduzierte Strömungsverteilung ersichtlich, die sich aus dem oben geschilderten Fall des „radiation stress“ infolge senkrechtem Wellenangriff einstellt. Gleichzeitig sind in der Darstellung Pegel eingezeichnet, wobei ihre Lage und Bezeichnung denen im hydraulischen Versuch [4] entsprechen. In der folgenden Abb. 12 sind für diese Punkte Ganglinien über Geschwindigkeiten und der Ruhewasserspiegelerhöhung, dem sogenannten wave-set-up, dargestellt. Erkennbar ist hieran, daß sich bereits nach wenigen Minuten der Simulation ein stationärer Strömungszustand einstellt. Im Gegensatz dazu zeigten die hydraulischen Versuche für die Versuchsreihe des senkrechten Wellenangriffs keine Stationarität, so daß ein Vergleich

der Strömungsbilder zwischen hydraulischer und numerischer Simulation nur schwierig möglich war. Als weiteres Beispiel ist in der Abb. 13 die Verteilung der Wellenhöhenfronten ersichtlich, die sich aufgrund vom linken Bildrand unter 45 Grad zum Strand einlaufenden 1,5 m hohen Wellen einstellt, wobei die Wellenperiode 8,0 sec und der Ruhewasserstand NN +2,0 m beträgt. Die unterschiedlichen Farben geben die Wellenhöhen wieder, wobei jede Farbe einen in der Legende definierten Wellenhöhenbereich abdeckt. Die gepunkteten Gebiete stellen Zonen dar, in denen ein Brechen der Wellen eintritt. Das hierdurch hervorgerufene welleninduzierte Strömungsgeschehen ist in der Abb. 14 dargestellt. Bei dieser Situation zeigte sich eine deutlich bessere Übereinstimmung der Strömung im Bühnenfeld zwischen den beiden Modelltypen.

### Mehrschichtenmodell

Aufgrund des durch die Meßdatenanalyse beobachteten komplexen Strömungsvorganges schien es erforderlich, diesen Prozeß auch dreidimensional zu untersuchen. Hierfür kam ein einfaches Mehrschichten-Modell zum Einsatz, das im Vergleich zu den 3-D Modellen den bedeutenden Vorteil der wesentlich geringeren Rechenzeit besitzt. Dieses Modell konnte zunächst nur Strömungen infolge Tide und Wind berechnen und mußte um den Anteil der „radiation stresses“ erweitert werden, um ebenfalls die brandungserzeugte Strömung berechnen zu können. Für die in der Abb. 16 dargestellten Strömungsverläufe wurde das Bühnenfeld zunächst idealisiert und in sechs jeweils 1,0 m dicke Schichten eingeteilt. Ein schematischer Längsschnitt durch das Bühnenfeld ist im linken Teil der Abb. 15 ersichtlich, wobei eine Abstufung in der Tiefenstruktur vorhanden war. Daneben ist die „radiation-stress“ - Verteilung dargestellt, die sich aufgrund einer Wellensimulation ergeben hat. Die Strömungsbilder zeigen über die Tiefe eine gleichmäßige Struktur, außer in den Bereichen wo ein hoher Energieeintrag infolge Brechen vorhanden ist. Aufgrund der groben Idealisierungen können die Ergebnisse jedoch nur als Prinzipstudie betrachtet werden.

### Sedimentologische Untersuchungen

Die Berechnung der Transportvorgänge, einschließlich der Morphologieveränderungen infolge Erosion und Sedimentation, die auf den vorher ermittelten Strömungsgrößen infolge Tide- und Wellengeschehen aufbauen, erfolgte mittels zweier Sedimentmodelle, die innerhalb des Projektes erstellt wurden. Es handelt sich hierbei zum einen um ein am Anfang der Projektarbeiten entwickeltes Modell, bei dem die verzögerten Absetzvorgänge des aufgewirbelten Materials nicht berücksichtigt wurden. Die ersten praktischen Untersuchungen zeigten dann jedoch, daß diese Vorgänge nicht vernachlässigbar sind, zumal sich das infolge Strömung in Bewegung geratene Sedimentmaterial im Norderney-Riffgat erst nach mehreren Kilometern Entfernung wieder auf dem Riffbogen abgelagert. Aus diesem Grunde wurde als weiteres Modell ein Tracer-Modell entwickelt, bei dem im Untersuchungsgebiet Tracerpunkte ausgesetzt und mit der Strömung transportiert werden. Für jeden Rechenschritt werden dann mittels ingenieurpraktisch erprobter Sedimenttransportformeln für diese beweglichen Merkmalsträger mögliche Transportkapazitäten bestimmt.

Bei den durchgeführten Studien ist in erster Näherung davon ausgegangen worden, daß das Umfeld von der Insel Norderney durch ein Sedimentmaterial einheitlichen Korndurchmessers beschrieben werden kann. Beispielhaft hierfür sind in den Abb. 17 und 18 die infolge

Tideströmungen innerhalb eines Tidezyklus auftretenden Sedimentations- und Erosionszonen im Bereich des Norderney-Riffgat dargestellt, wobei der Ansatz nach Zanke [19] gewählt wurde. Größere sedimentologische Umlagerungen beschränken sich auf das Gebiet um den Westkopf von Norderney direkt nördlich und südlich davon und die davor liegende Robbenplate. Erkennbar ist die Ausräumtendenz im Bereich des Seegates und die Ablagerungseffekte durch den Ebbstrom im Bereich des Riffbogens und infolge des Flutstromes im Bereich des Hohen Riffs. Ebenso wird die Lage der Robbenplate in einem durch starke morphologische Veränderungen geprägten Gebiet deutlich.

### 3 Zusammenfassung

Die Aufgabe des Teilprojektes „Mathematisches Modell“ innerhalb des Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen von Bauwerken und mariner Umwelt“ lag in der numerischen Modellierung des Strömungsverhaltens infolge Tide- und Wellengeschehen und des sich daraus ergebenden Sedimenttransportes in ausgewählten Bühnenfeldern auf der Insel Norderney. Hierfür war es zunächst erforderlich, umfangreiches Naturmeßdatenmaterial über Geschwindigkeiten, Wellenhöhen und Morphologie zu analysieren und zu interpretieren, die dann zur Verifikation der mathematischen Modelle herangezogen werden sollten. Es zeigte sich, daß aufgrund der großen Variabilität der Daten eine statistische Beschreibung der Naturvorgänge möglich ist, jedoch für die numerischen kleinskaligen Berechnungen sind diese Angaben nur bedingt anwendbar. Es wurde nachgewiesen, daß die Tidedynamik und die sich hieraus ergebenden Strömungsverhältnisse und Wasserstände im gesamten Inselbogen von Norderney sowie in einzelnen Bühnenfeldern gut simuliert werden können. Die Untersuchungen über die Modellierung des Wellengeschehens haben gute Ergebnisse in den berechneten Wellenparametern für die groß- und kleinräumigen Modellgebiete ergeben. Die brandungsbedingten Strömungen im Bühnenfeld konnten nicht abschließend ermittelt werden, da die Meßdaten große Schwankungsbreiten enthielten und somit eine Verifikation der Simulationsergebnisse nur bedingt vorgenommen werden konnte. Sedimentologische großräumige Berechnungen wurden anhand ingenieurpraktisch erprobter Sedimenttransportformeln für ein Sediment mit einem einheitlichen Korndurchmesser an- gestellt.

## 4 Veröffentlichungsliste

1. V. Sundar, H. Nöthel, K.-P. Holz. **Wave Climate in a Groin Field.** Zur Veröffentlichung akzeptiert im Ocean Engineering, 1991
2. V. Sundar, H. Nöthel, K.-P. Holz. **Wave Climate in a Groin Field - Frequency Domain Analysis.** Zur Veröffentlichung akzeptiert beim Ocean Engineering Journal, 1991
3. V. Sundar, H. Nöthel, K.-P. Holz. **Wave Climate in a Groin Field - Time Domain Analysis.** Zur Veröffentlichung eingereicht beim Journal of Coastal Research, 1992
4. H. Nöthel, V. Sundar, K.-P. Holz. **Statistische Meßdatenanalyse in einem Bühnenfeld.** Zur Veröffentlichung vorgesehen in "Die Küste", 1992

## 5 Literaturverzeichnis

1. S.J. Buchan, R.K. Steedman, S.A. Stroud, D.G. Provis. **A Shallow Water Directional Wave Recorder**. Proceeding 19th Coastal Engineering Conference, Houston, Texas, S. 287-303, 1984
2. CERC. **Shore Protection Manual**. U.S. Army Coastal Engineering Research Center. Washington, 1984
3. Deutsches Hydrographisches Institut (DHI). **Hoch- und Niedrigwasserzeiten für die Deutsche Bucht und deren Flußgebiete**, 1988
4. A. Führböter, H. Dette, K.-P. Schulz. **Modelluntersuchungen zu wellenerzeugten Strömungen in einem Bühnenfeld**. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Hydromechanik und Küstenwasserbau, Technische Universität Braunschweig, Bericht Nr. 679, 1989
5. Y. Goda. **Random Seas and Design of Maritime Structures**. University of Tokyo Press, 1985
6. K.-P. Holz, D. Günzel, P. Milbradt. **Mathematisches Modell Sylt, 7. Zwischenbericht**. Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, unveröffentlicht, 1991
7. S. Kohlhasse. **Ozeanographisch-Seebauliche Grundlagen der Hafenanplanung**. Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 57, 1983
8. M.S. Longuet-Higgins, R.W. Stewart. **Radiation stress in water waves - A physical discussion with application**. Deep Sea Res., 11, No. 4, S. 225-239, 1977
9. C.C. Mei. **The applied Dynamics of Ocean Surface Waves**. Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, Vol. 1, 1989
10. M. Mizuguchi, M. Isobe, S. Hotta, K. Horikawa. **Field Observation of the wave-induced Water Particle Velocity in the Surf Zone**. Coastal Engineering in Japan, Vol. 23, S. 81-89, 1980
11. H.D. Niemeyer. **Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattgebiet von Norderney**. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Forschungsstelle Küste, Jahresbericht 1985, Band 32, 1986
12. H.D. Niemeyer. **Tidestrommessungen in Bühnenfeldern**. Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Forschungsstelle Küste, Jahresbericht 1986, Band 38, 1987
13. R.O. Reid. **Correlation of Water Level Variations of Offshore Forces on a Vertical Pile for non Periodic Waves**. Proceeding 6th Coastal Engineering Conference, Florida, S. 749-786, 1957
14. H. Rouse. **Modern Conceptions of the Mechanics of Turbulence**. Transactions ASCE, Vol. 102, 1937
15. L. Sachs. **Angewandte Statistik**. Springer Verlag, 6. Auflage, 1984
16. T. Sarpkaya, M. Isaacson. **Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981

17. I.A. Svendsen, J.G. Jonson. **Hydrodynamics of Coastal Regions**. Den private Ingenioerfond, Technical University of Denmark, Lyngby, 1980
18. I.A. Svendsen. **Wave heights and set-up in a Surf Zone**. Coastal Engineering, No. 8, S. 303-329, 1984
19. U. Zanke. **Grundlagen der Sedimentbewegungen**. Springer-Verlag, 1982
20. U. Zanke. **Zur Leistungsfähigkeit von Wellenmodellen auf Mikrocomputern**. Die Küste, Heft 45, 1987

## 6 Tabellenverzeichnis

1. Wellenanlauffrichtungen in Grad bzgl. rechtweisend Nord berechnet aus Geschwindigkeitsmeßdaten nach verschiedenen Methoden

## 7 Abbildungsverzeichnis

1. Meßstellenanordnung im Bühnenfeld D1-E1
2.  $H_{1/3}$ - und  $T_{mittel}$  - Verteilungen für den Meßzeitraum vom 05.04. - 19.04.1991
3. Wellenspektren für den Meßzeitpunkt 16.11.1989, 02:00 Uhr
4. Gemessene Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem
5. Resultierende Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem
6. Resultierende Geschwindigkeiten für acht jeweils 20-minütige Messungen am 06.04.1991
7. Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb einer Wellenperiode für eine Messung am 18.04.1991, 08:50 Uhr
8. Onshore - offshore Geschwindigkeitsspektrum für eine Messung am 16.11.1988, 02:00 Uhr
9. Flächenhafte Wellenhöhenverteilung für eine senkrecht zum Strand einlaufende Welle
10. Radiation-Stress-Verteilung infolge einer senkrecht zum Strand einlaufenden Welle
11. Brandungsinduzierte Strömung infolge einer senkrecht zum Strand einlaufenden Welle
12. Wellenhöhen- und Geschwindigkeitsganglinien für ausgewählte Pegel
13. Wellenverteilung für eine schräg zum Strand einlaufende Welle
14. Brandungsinduzierte Strömung infolge einer schräg zum Strand einlaufenden Welle
15. Schematischer Längsschnitt des Bühnenfeldes und Radiation-Stress-Verteilung
16. Brandungsinduzierte Strömungsverteilung innerhalb der sechs Schichten
17. Sedimentationszonen
18. Erosionszonen

Beginn der Messung : 18.11.1988 01:57

Meßdauer: 20 min

Methode Meßstelle	Mizuguchi 1	Mizuguchi 2	Mizuguchi 3	Buchan 1	Buchan 2	Kim	Nöthel
M1	337	319	332	333	334	324	331
M2	340	310	329	307	311	314	312
O1	336	295	314	289	288	297	301
O2	348	304	323	291	294	314	305
W1	349	313	328	321	316	318	315

Tabelle 1: Wellenanlafrichtungen in Grad bzgl. rechtweisend Nord berechnet aus Geschwindigkeitsmeßdaten nach verschiedenen Methoden

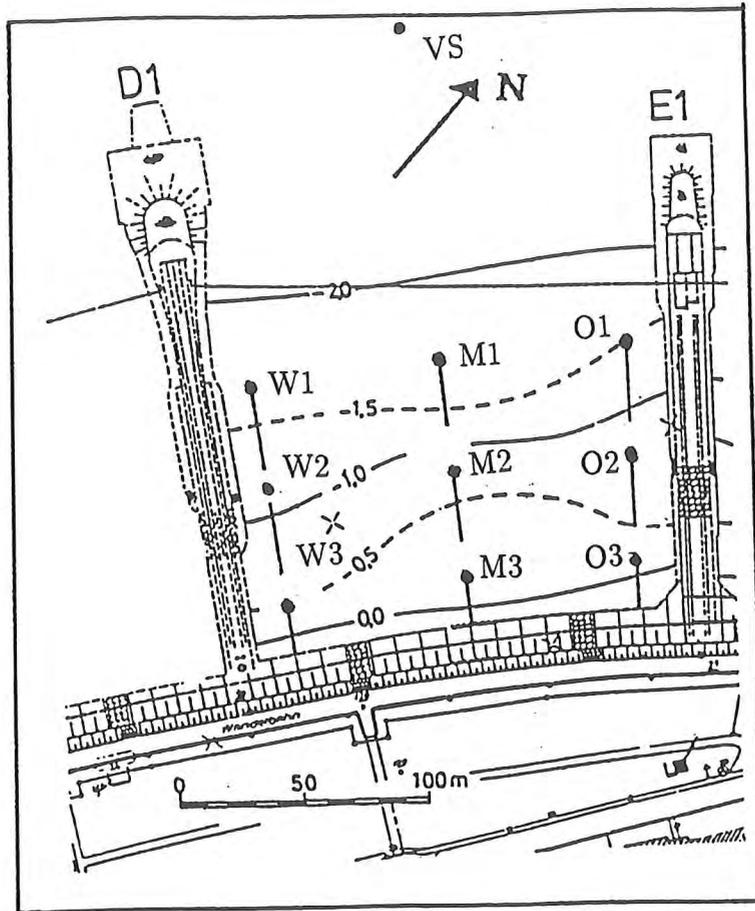


Abbildung 1: Messstellenanordnung im Bühnenfeld D1-E1

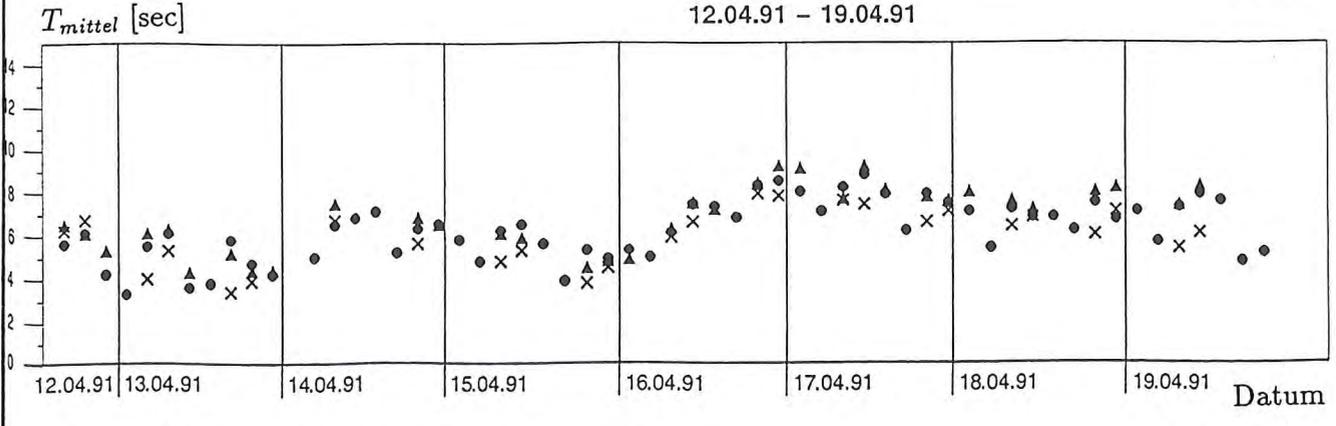
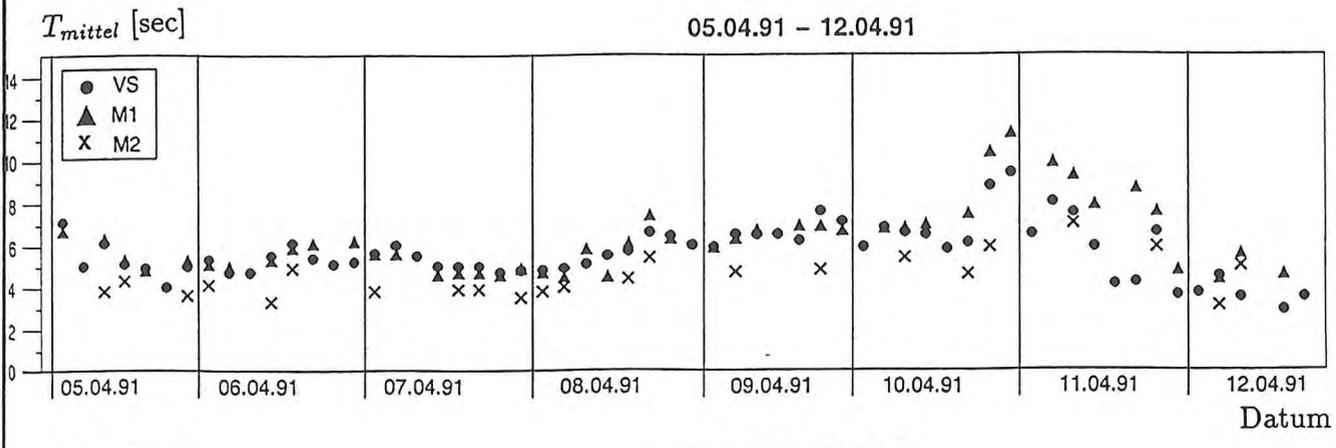
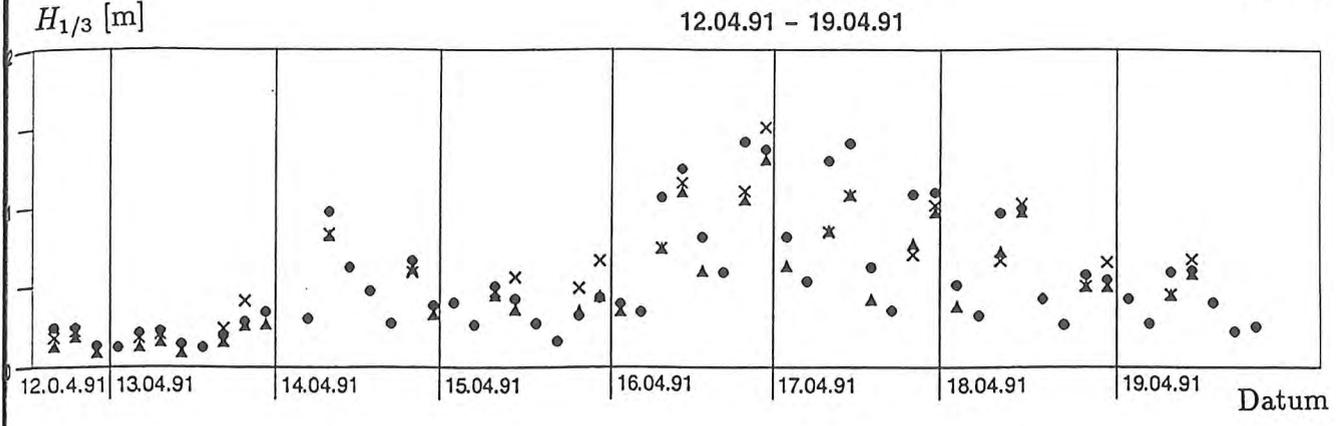
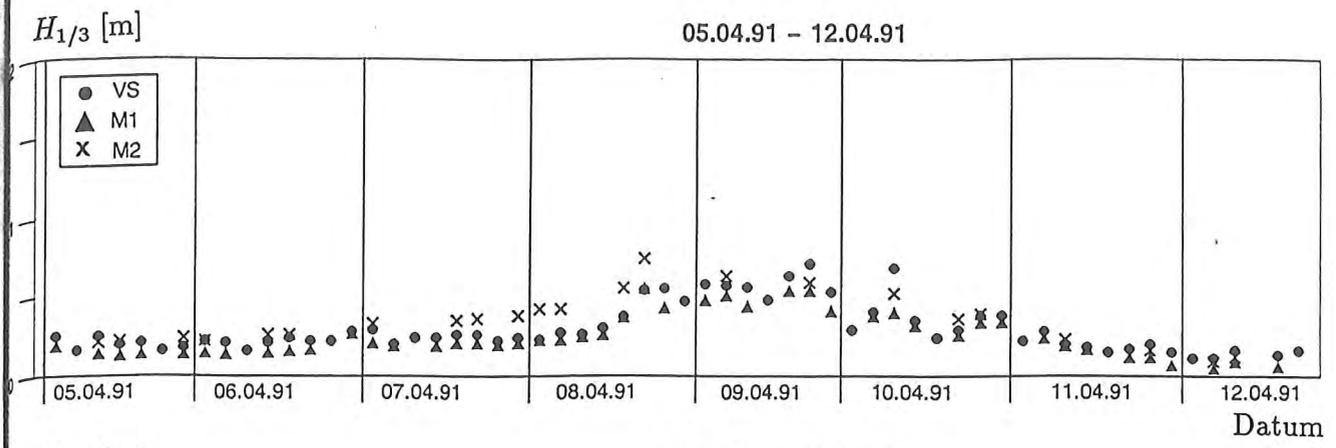


Abbildung 2:  $H_{1/3}$ - und  $T_{mittel}$  - Verteilungen für den Meßzeitraum vom 05.04. - 19.04.1991

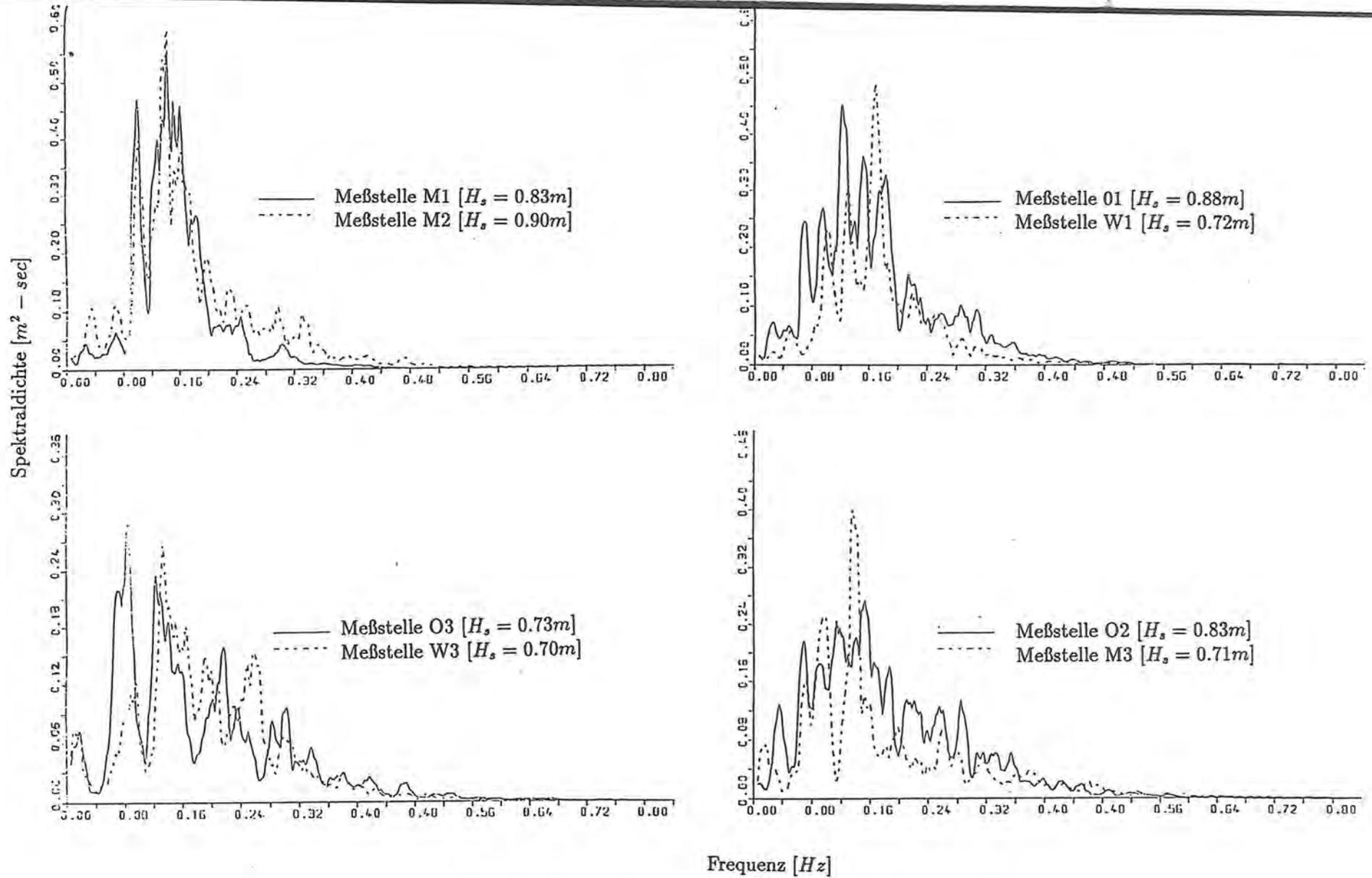
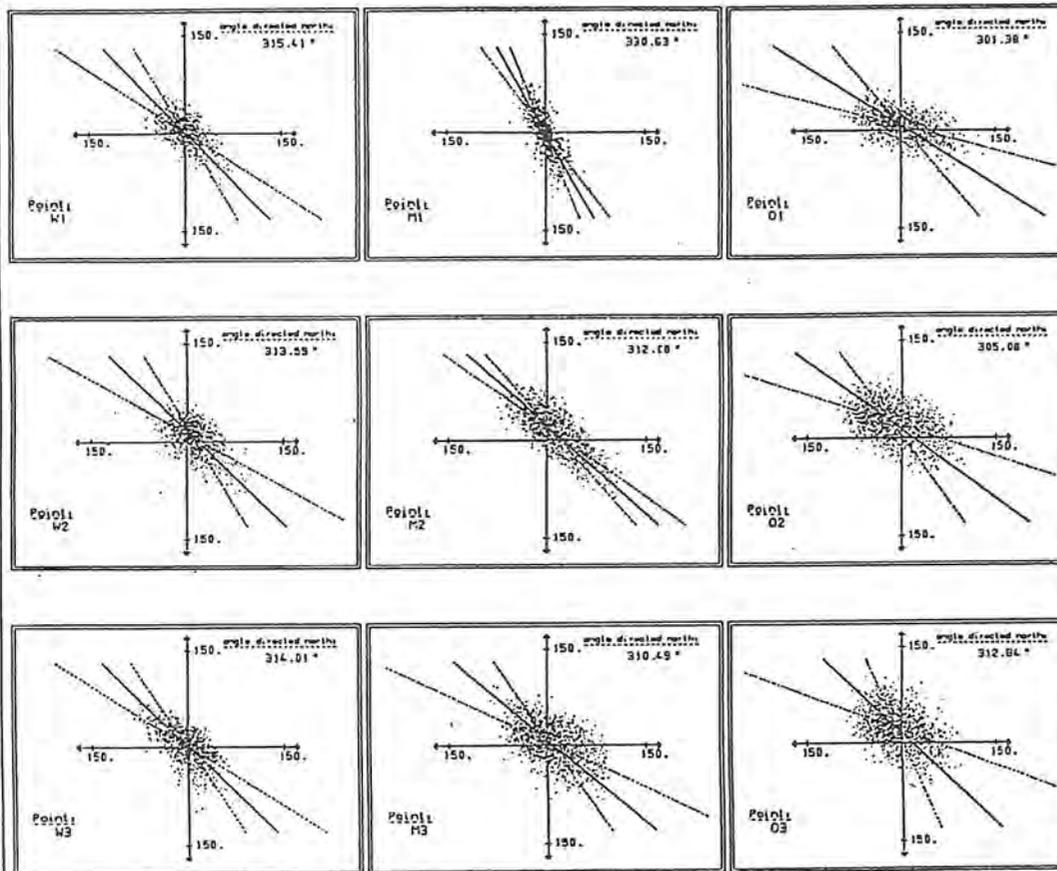


Abbildung 3: Wellenspektren für den Meßzeitpunkt 16.11.1989, 02:00 Uhr



Legende:

----- Regressionsgerade  $x = f(y)$  bzw.  $y = f(x)$

—— mittlere Regressionsgerade

Gemessene Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen Koordinatensystem

Datum : 18.11.1988

Zeit : 01:57 Uhr

zugehörige Tidekurve am  
Pegel Norderney-Riffgat:

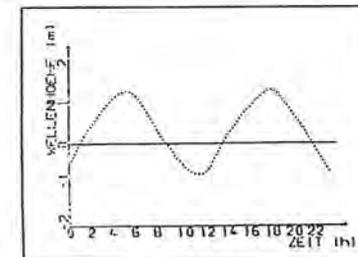
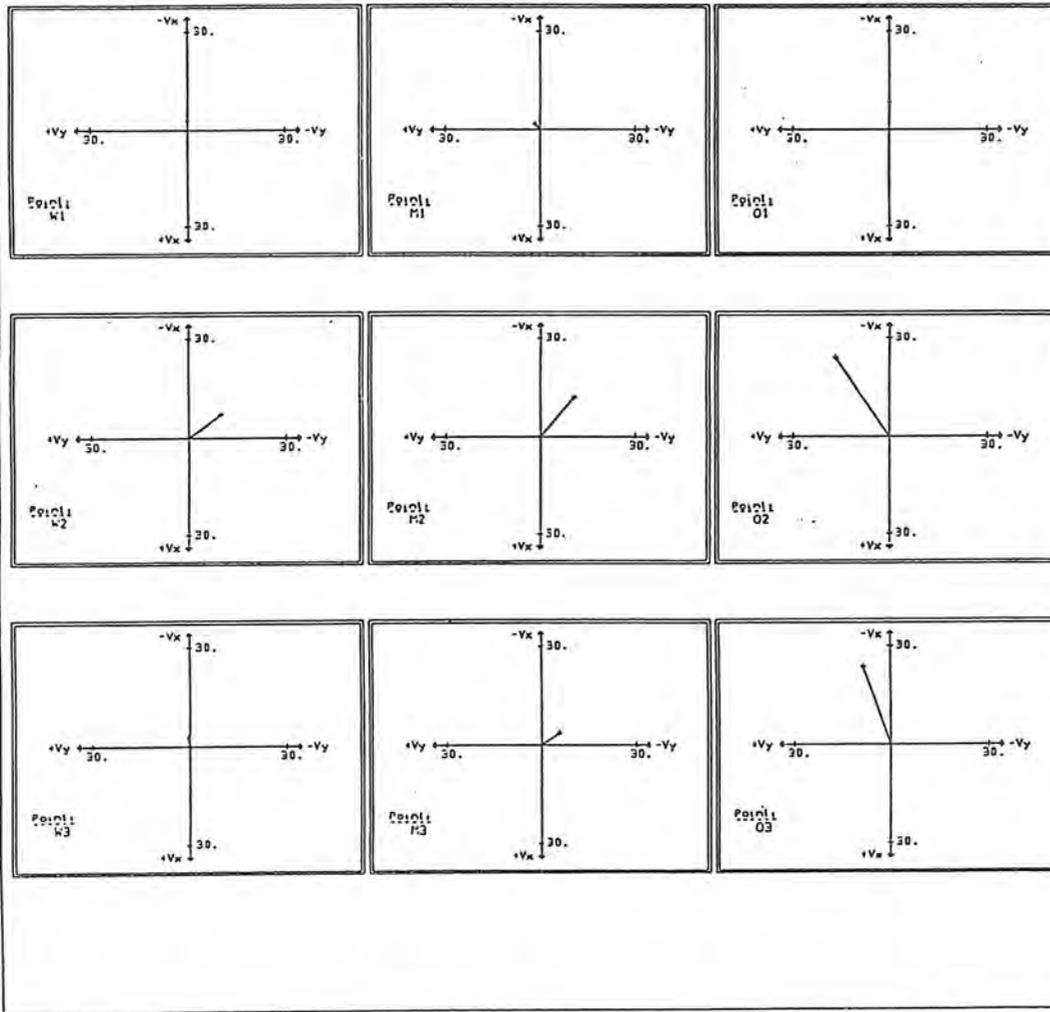


Abbildung 4: Gemessene Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem



Resultierende Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen Koordinatensystem

Datum : 18.11.1988

Zeit : 01:57 Uhr

zugehörige Tidekurve am Pegel Norderney-Riffgat:

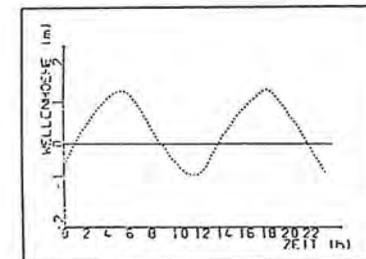


Abbildung 5: Resultierende Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem

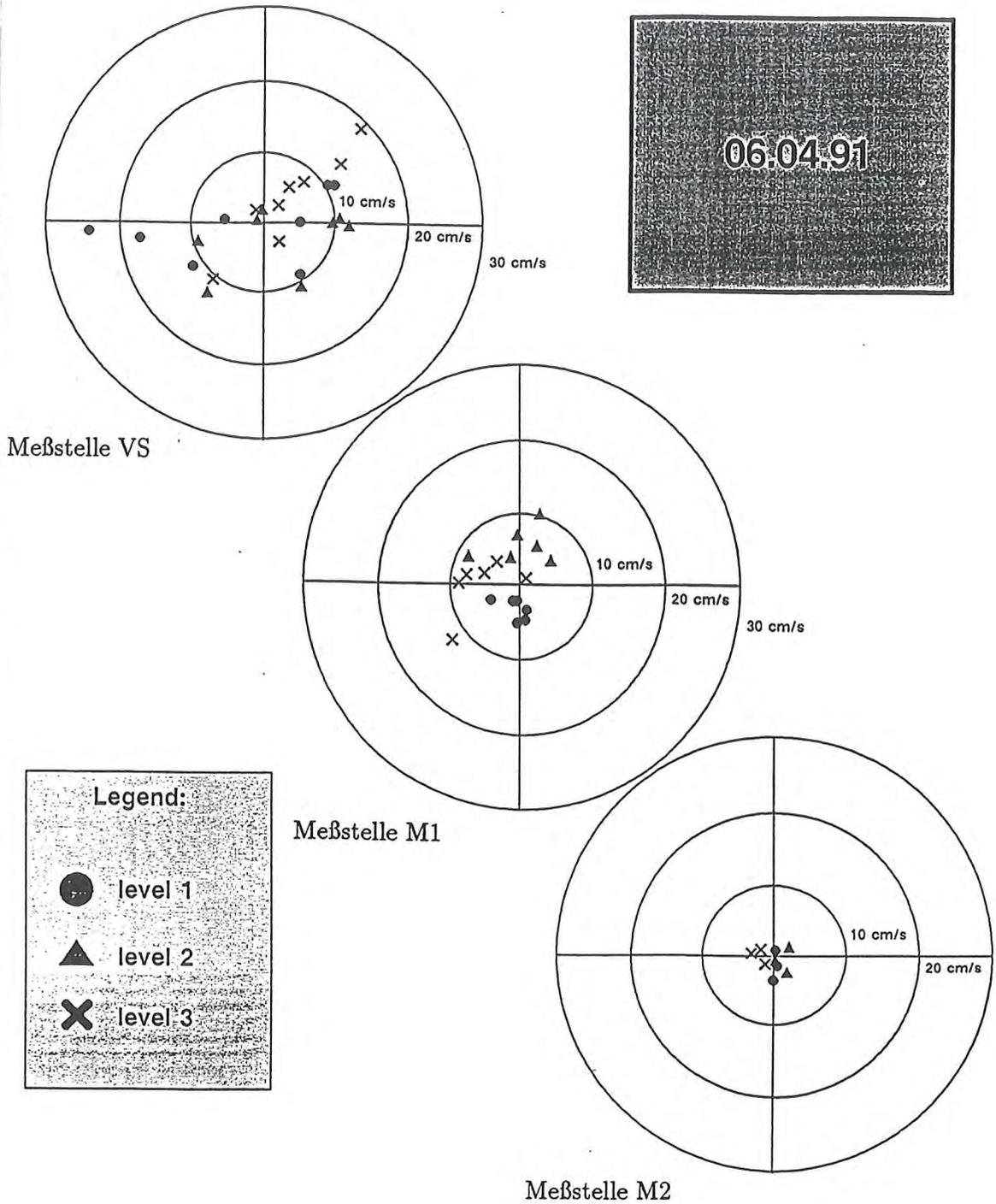


Abbildung 6: Resultierende Geschwindigkeiten für acht jeweils 20-minütige Messungen am 06.04.1991

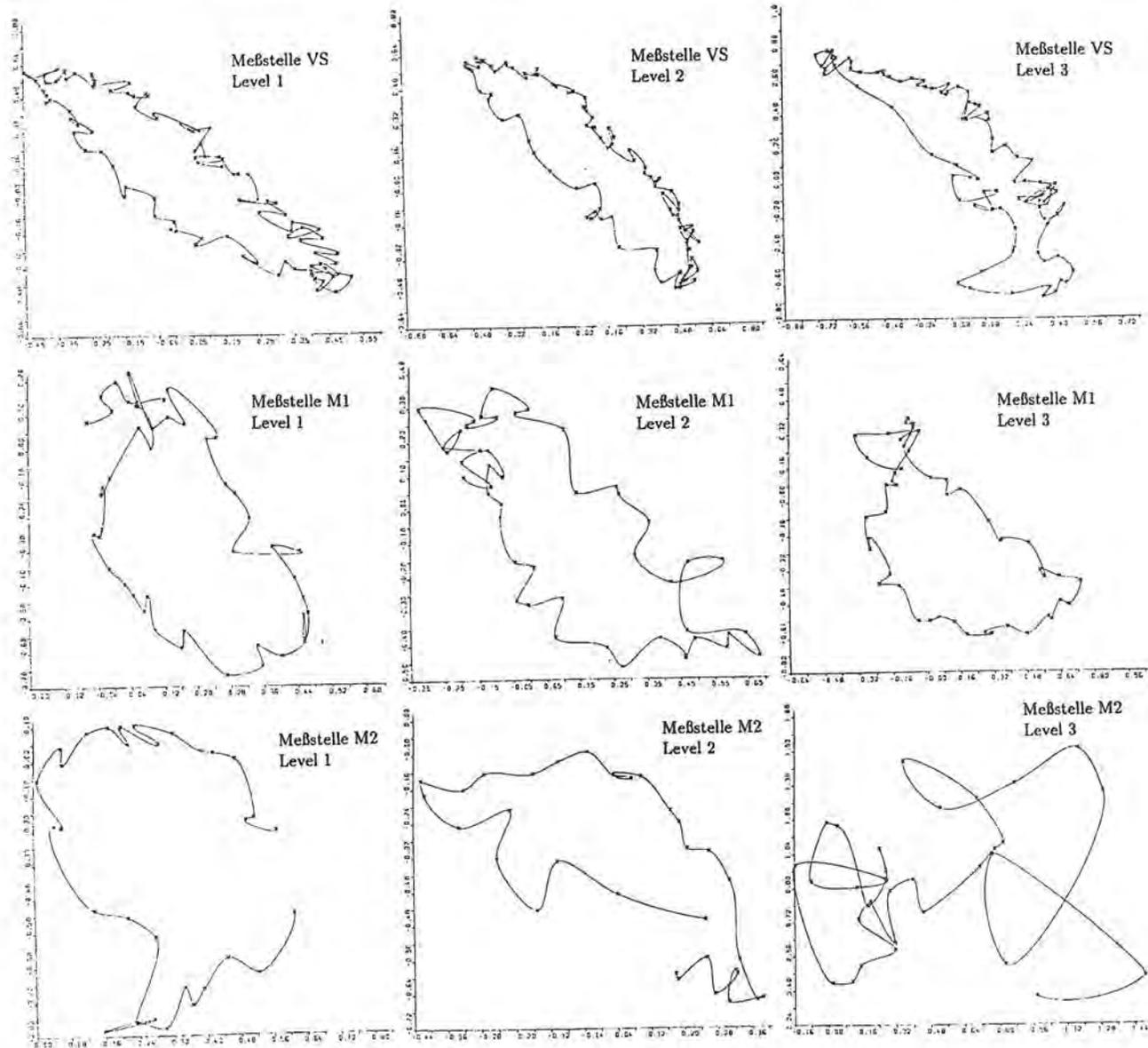


Abbildung 7: Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb einer Wellenperiode für eine Messung am 18.04.1991, 08:50 Uhr

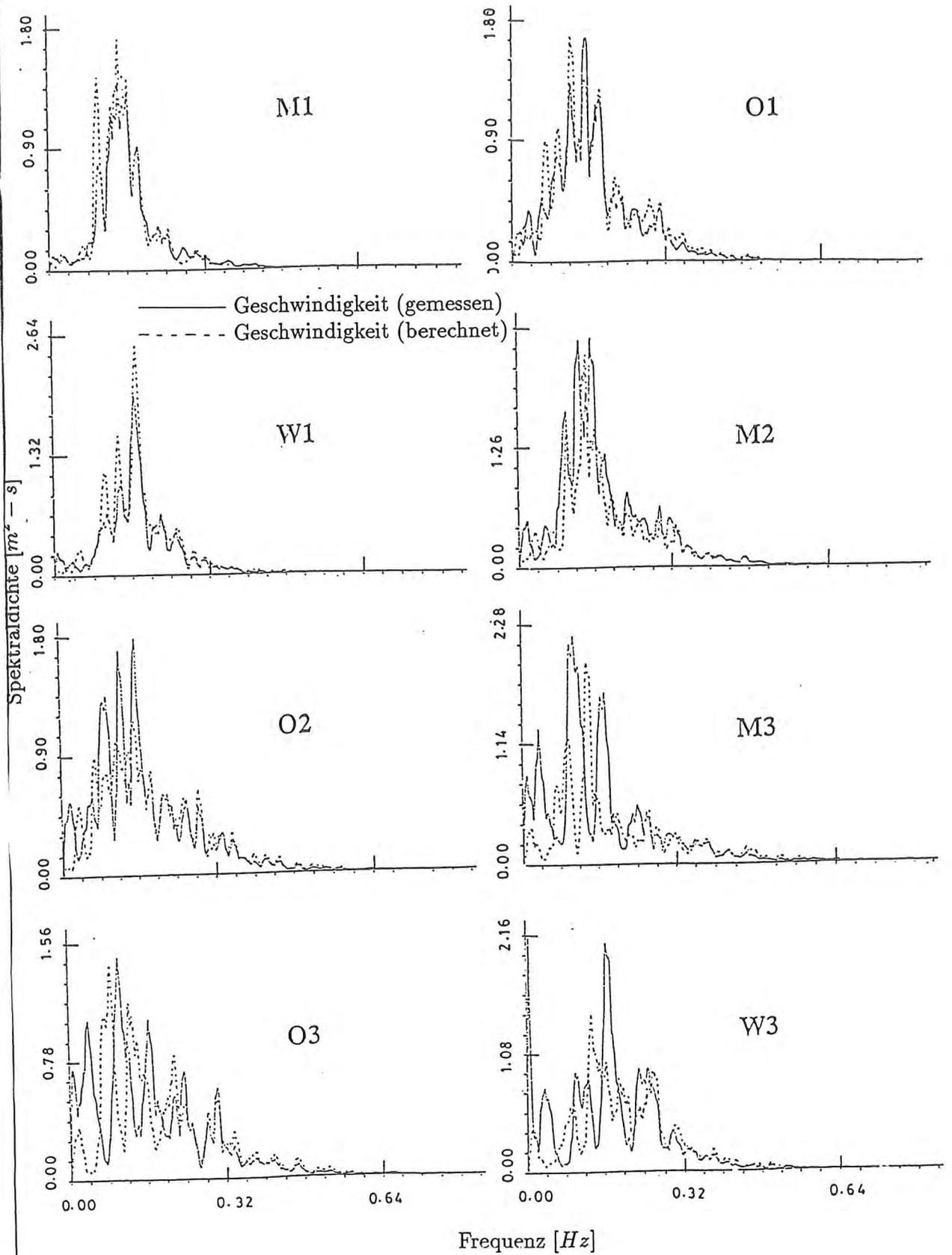


Abbildung 8: Onshore - offshore Geschwindigkeitsspektrum für eine Messung am 16.11.1988, 02:00 Uhr

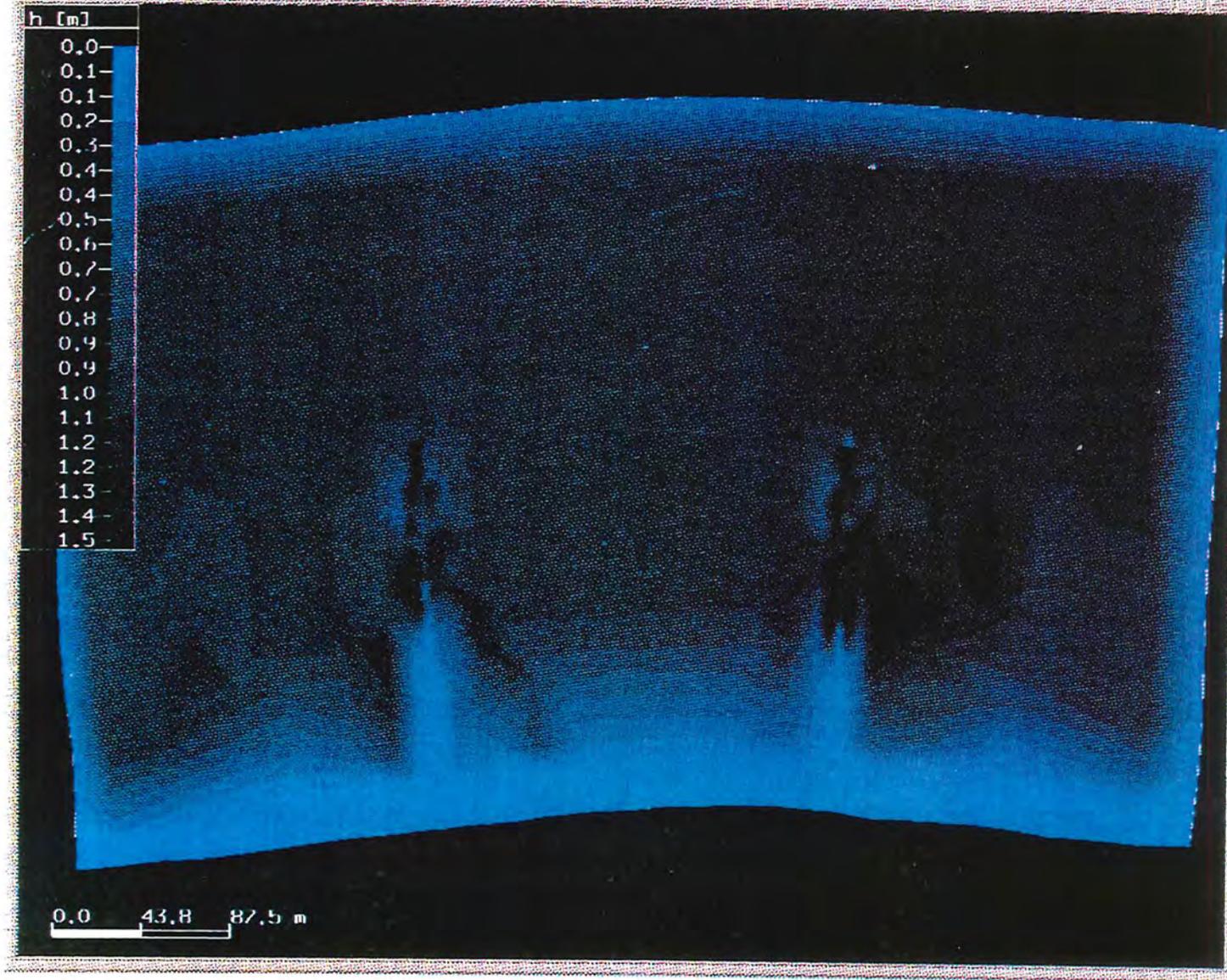


Abbildung 9: Flächenhafte Wellenhöhenverteilung für eine senkrecht zum Strand einlaufende Welle

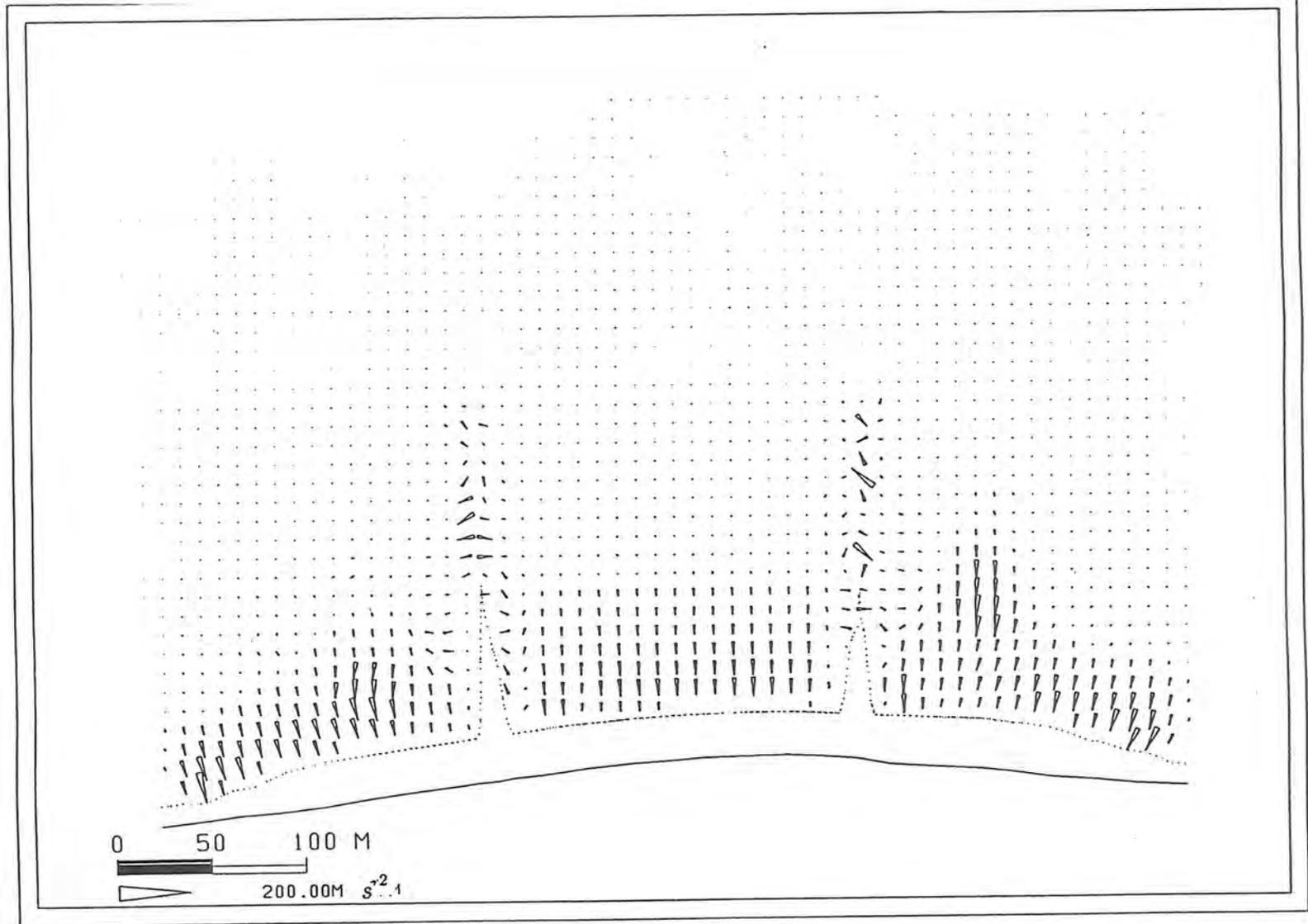


Abbildung 10: Radiation-Stress-Verteilung infolge einer senkrecht zum Strand einlaufenden Welle

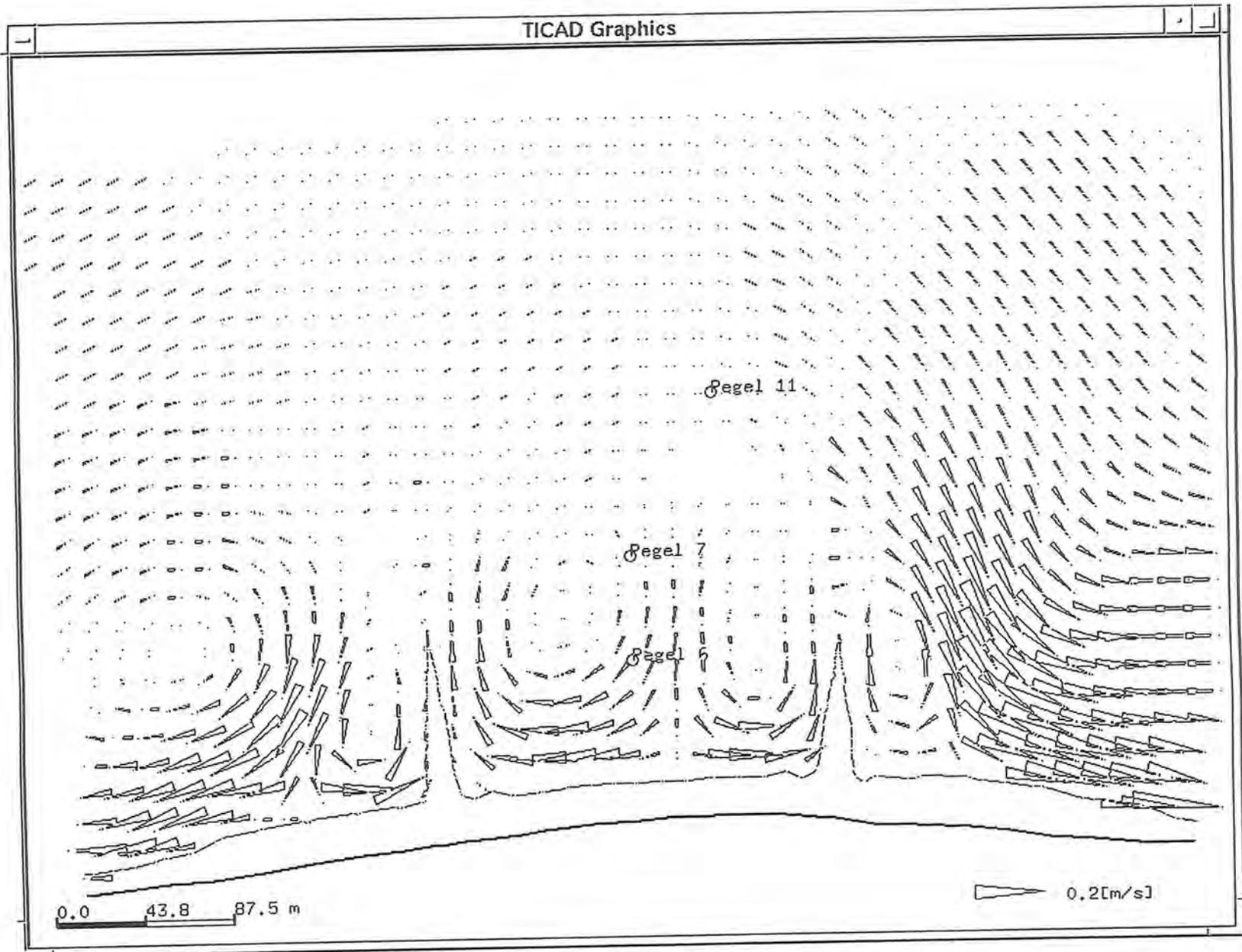


Abbildung 11: Brandungsinduzierte Strömung infolge einer senkrecht zum Strand einlaufenden Welle

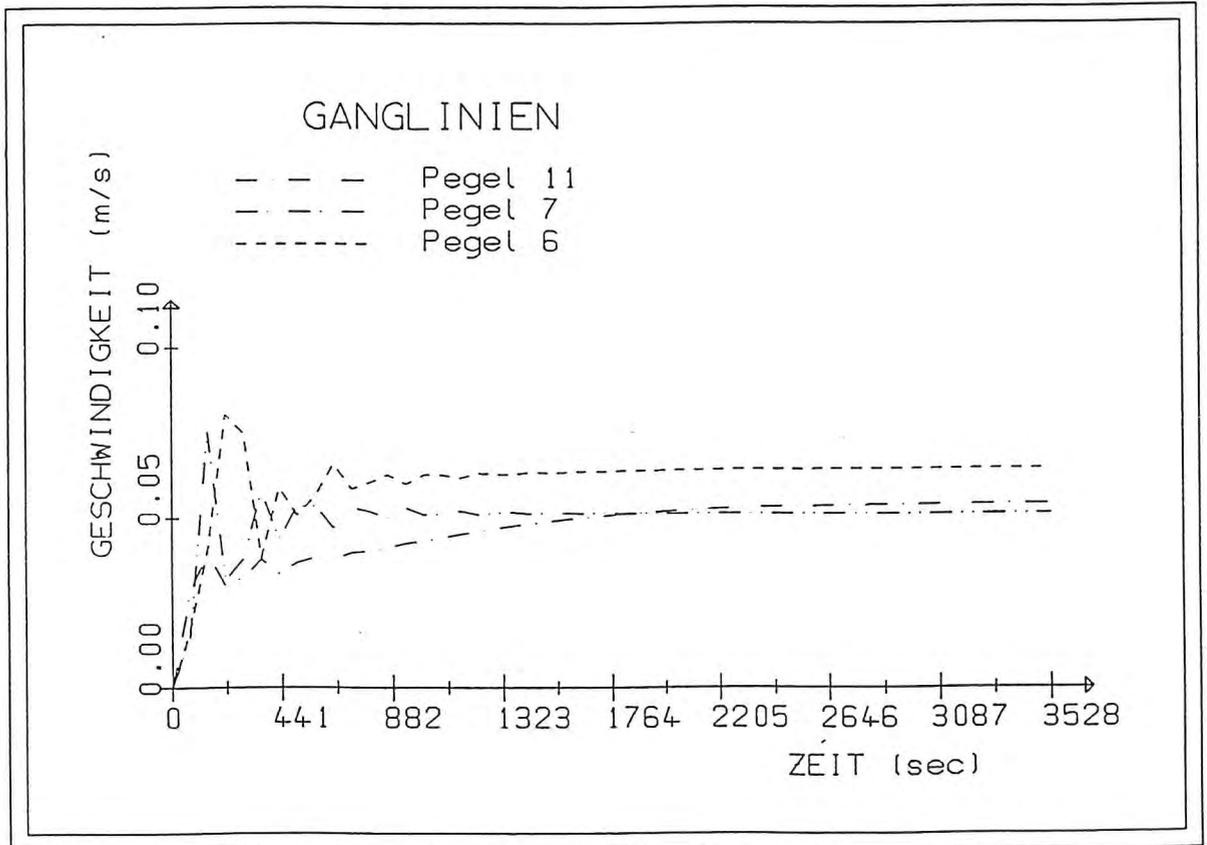
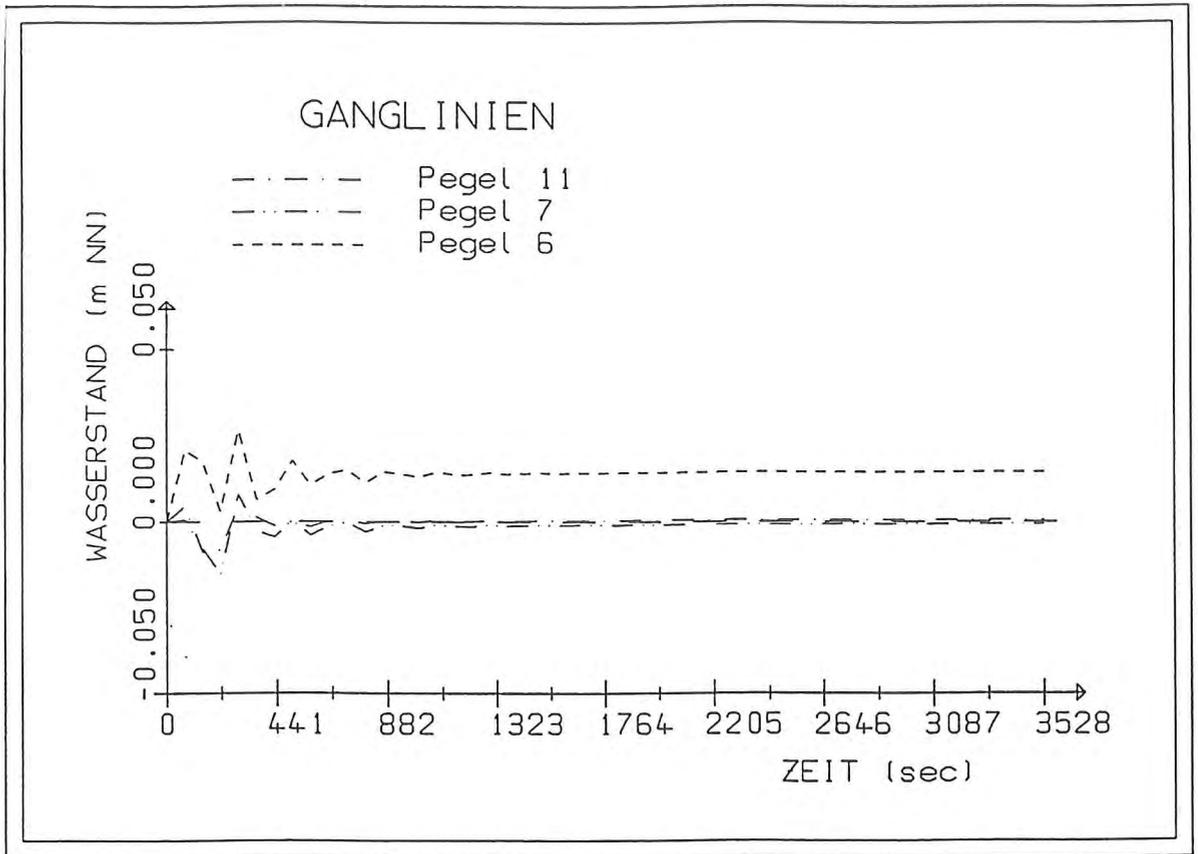
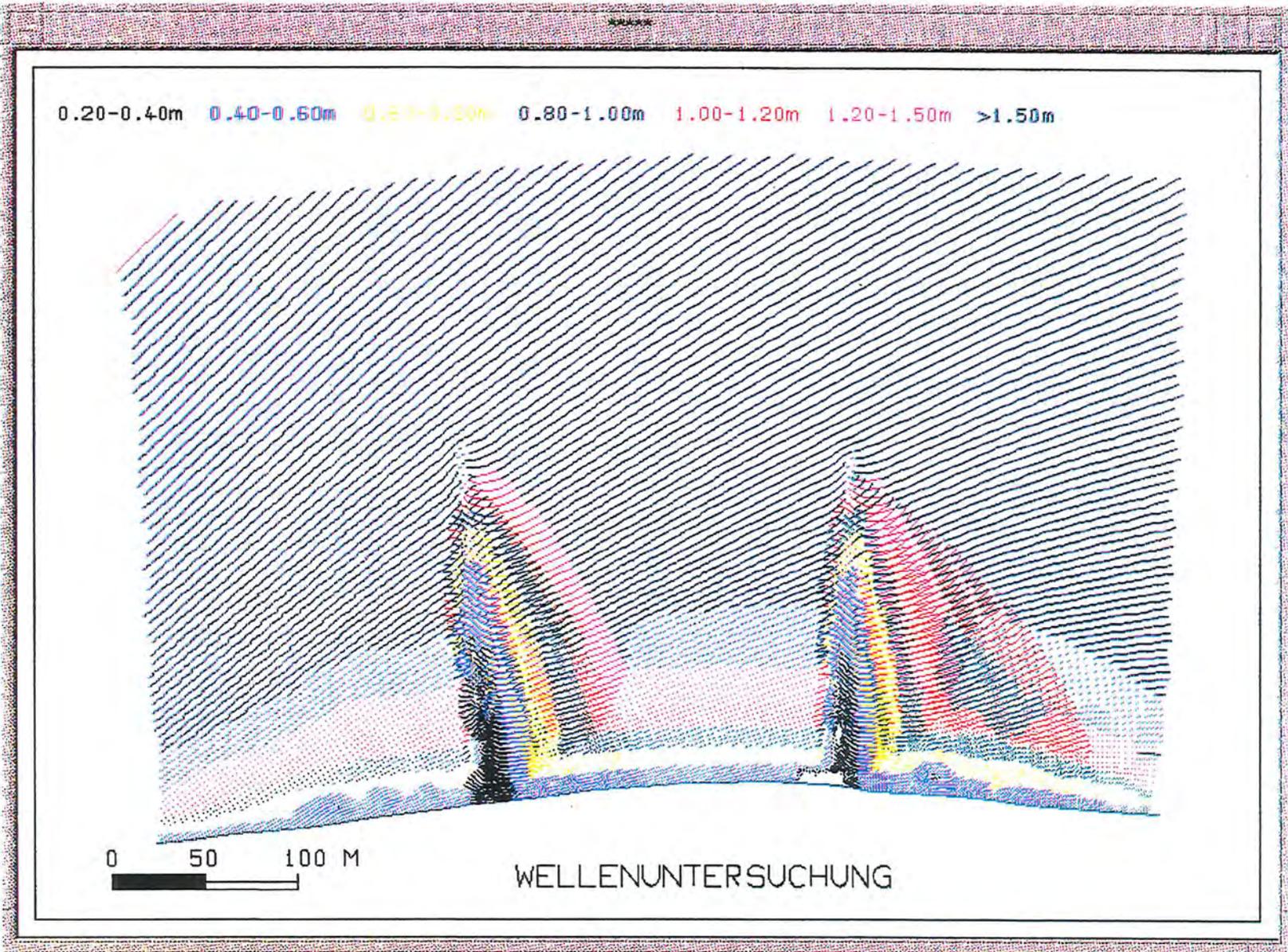


Abbildung 12: Wellenhöhen- und Geschwindigkeitsganglinien für ausgewählte Pegel



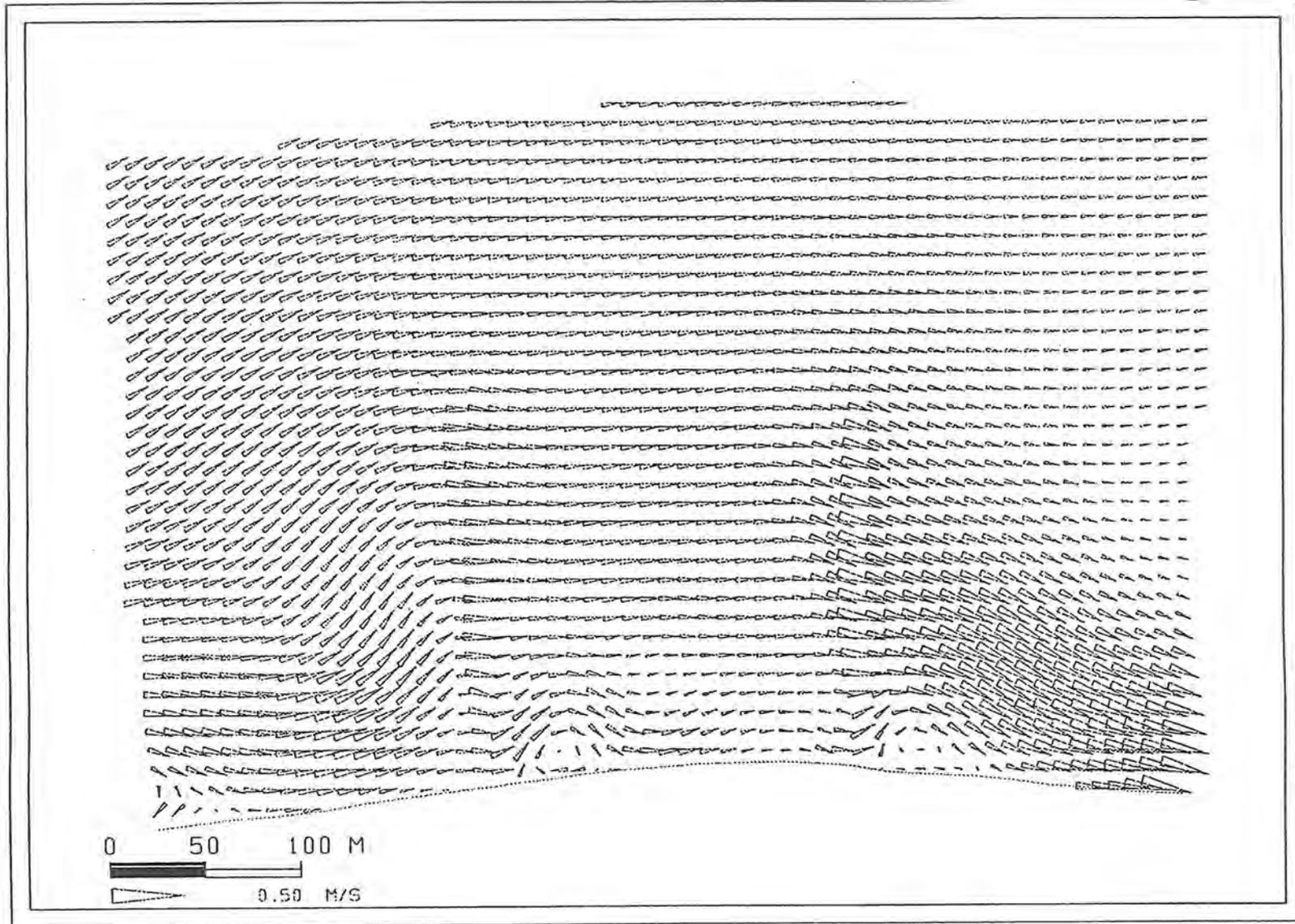
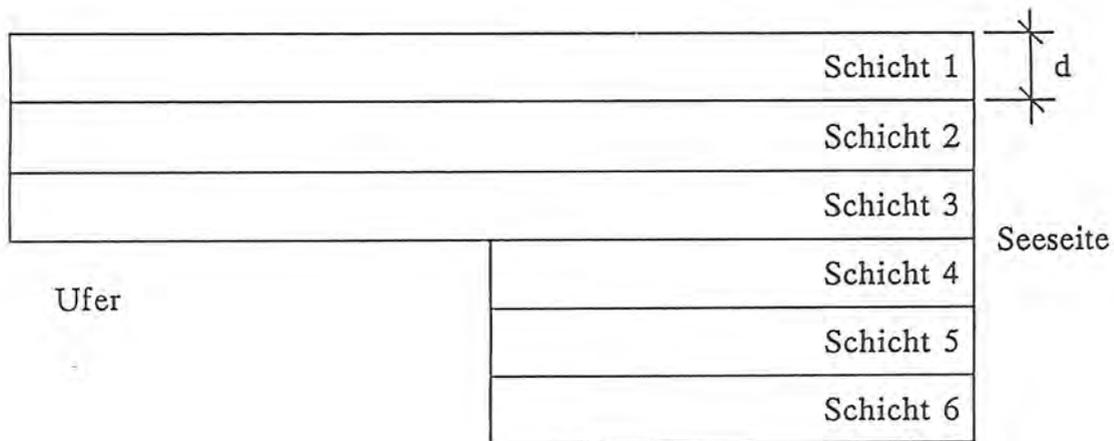


Abbildung 14. Brandungsinduzierte Strömung infolge einer schräg zum Strand einlaufenden Welle

# Längsschnitt durch das Bühnenfeld D1-E1



abgestufte Wassertiefe  
konstante Schichtdicken  $d = 1.0 \text{ m}$

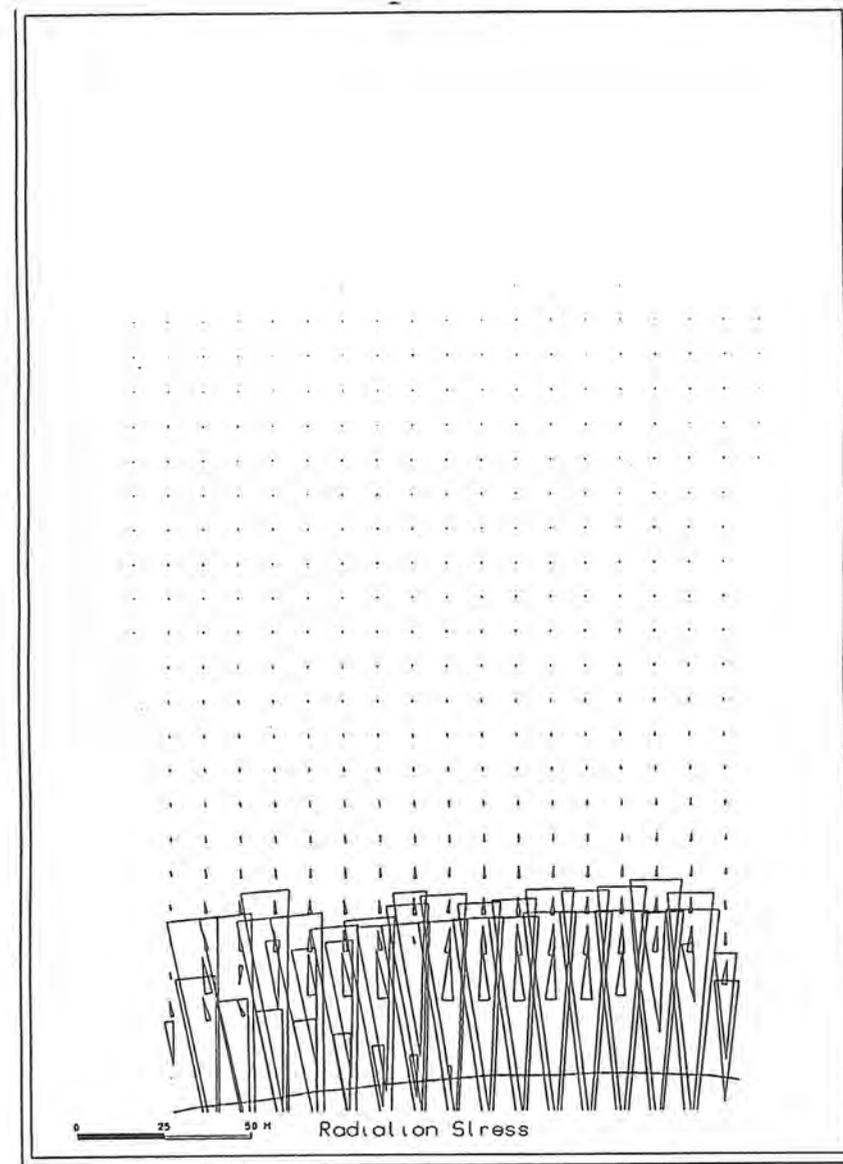


Abbildung 15: Schematischer Längsschnitt des Bühnenfeldes und Radiation-Stress-Verteilung

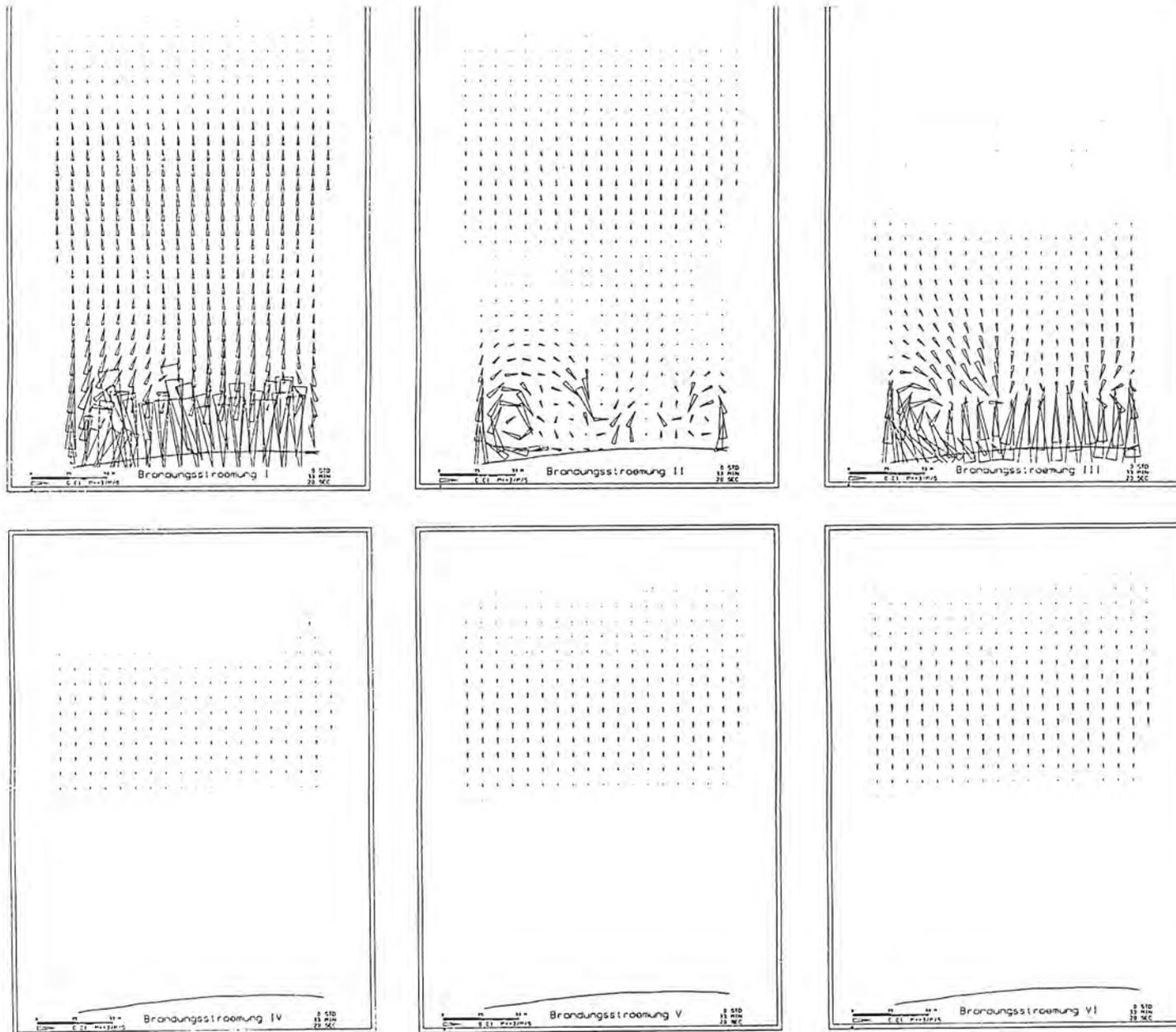


Abbildung 16: Brandungsinduzierte Strömungsverteilung innerhalb der sechs Schichten

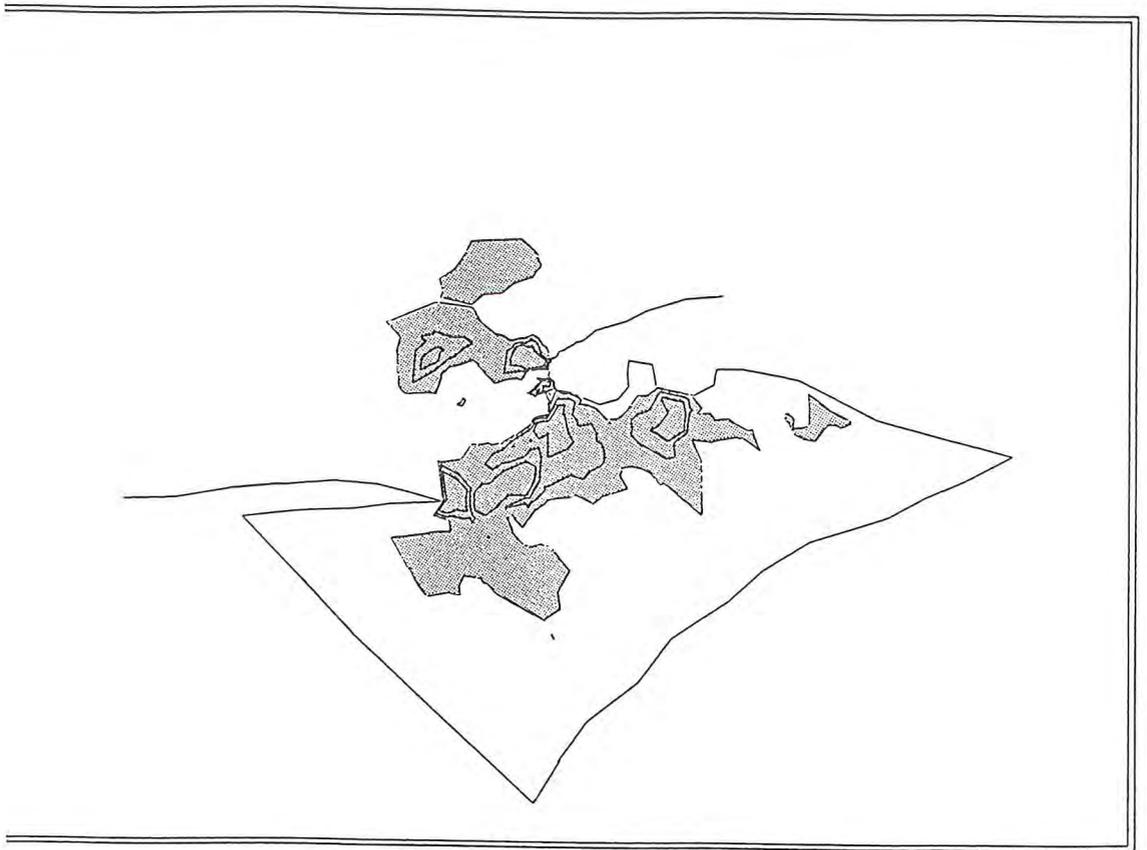


Abbildung 17: Sedimentationszonen

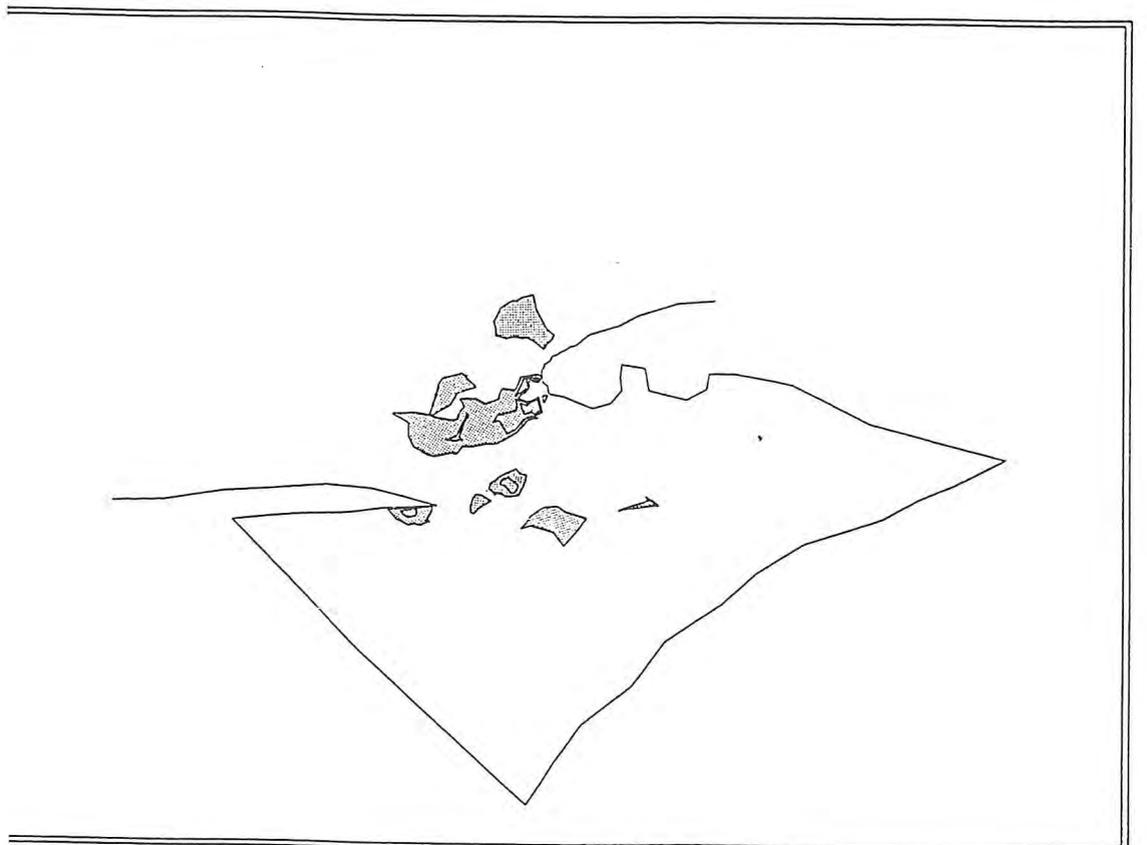


Abbildung 18: Erosionszonen