

# Zur Leistungsfähigkeit von Wellenmodellen auf Mikrocomputern

Von ULRICH ZANKE

## Zusammenfassung

Die Ermittlung der Wellenbelastung von Objekten des Küstenschutzes und des Hafenausbaus kann auf drei Weisen durchgeführt werden: im hydraulischen Modell, durch graphische Konstruktion in Verbindung mit manuellen Berechnungen und im numerischen Modell. Alle Modelltypen haben Leistungsgrenzen technischer und wirtschaftlicher Art. Mit der Verfügbarkeit von ausreichend leistungsstarken Rechnern für den Arbeitsplatz des Ingenieurs wächst der Bedarf nach Programmen, die für Planungsarbeiten quasi auf dem Schreibtisch geeignet sind. Ein derartiges Programm für die Ermittlung der Wellenausbreitung unter Einschluß von Refraktion, Shoaling, Diffraktion, Bodenreibung, Brechen und Wind wird vorgestellt.

## Summary

*The calculation of waves propagating onshore in coastal regions is necessary for the design of harbors and coastal structures. These investigations may be carried out in three ways: hydraulic models, graphically or with numerical models. All three methods have restrictions related to cost and technical limitations.*

*As the level of performance of low cost computers is increasing, complex "desk top" calculations become attractive. Such a model for the calculation of wave refraction, shoaling, diffraction, bottom friction, breaking and wind induced wave height is discussed in this paper.*

## Inhalt

1.	Problemstellung . . . . .	166
2.	Problemlösungen . . . . .	166
2.1	Untersuchung im hydraulischen Wellenmodell . . . . .	166
2.2	Manuelle Konstruktion des Wellenfeldes . . . . .	167
2.3	Numerische Modellierung . . . . .	168
2.3.1	Diskrete Verfahren . . . . .	168
2.3.2	Programmierte analytische Lösung . . . . .	169
2.3.2.1	Allgemeines . . . . .	169
2.3.2.2	Theoretische Grundlagen . . . . .	170
2.3.2.2.1	Refraktion . . . . .	170
2.3.2.2.2	Shoaling . . . . .	171
2.3.2.2.3	Bodenreibung . . . . .	171
2.3.2.2.4	Brechen . . . . .	171
2.3.2.2.5	Diffraktion . . . . .	172
2.3.2.2.6	Windeinfluß . . . . .	172
3.	Anwendungsbeispiele . . . . .	173
4.	Schriftenverzeichnis . . . . .	180

## 1. Problemstellung

Für den Küstenschutz ist die Belastung der Küste durch Seegang ein zentrales Problem. So geben Wellen von z.B. 5 m Höhe auf 1 km Strandbreite bereits die Leistung des Kernkraftwerkes Lingen (240 MW) ab. Diese hohe Energie wird vom Wind über große Streichlängen in den Wasserkörper eingetragen. Sie wird in einem relativ schmalen Streifen an der Küste wieder abgegeben. Bei der Abgabe der Wellenenergie infolge Brechens der Wellen entstehen starke Turbulenzen, in denen der Sand des Untergrundes aufgewirbelt wird. Wenn die Wellen schräg auf die Küste zulaufen, treibt ein Teil der freiwerdenden Energie eine Brandungsströmung an. Diese Brandungsströmung verläuft parallel zur Küste. Sie kann erhebliche Sandmengen verfrachten. Welche Probleme durch die Sandwanderung infolge Brandungsströmung entstehen können, zeigt das Beispiel Sylt.

Wellen, die im tiefen Wasser vom Wind angefacht wurden, verändern sich auf ihrem Weg zur Küste durch den Einfluß der abnehmenden Wassertiefe. Die Veränderungen betreffen die Wellenlängen und die Wellenhöhen sowie die Laufrichtungen der Wellen (Refraktion und Shoaling). Im Gegensatz zur Ausbreitung des Lichtes laufen Wasserwellen um Hindernisse wie Landvorsprünge oder Molen herum. Durch diesen Vorgang der Diffraktion treten auch im „Wellenschatten“ Wellen auf, wenn auch mit abgeschwächter Höhe. An besonders exponierten Lagen im Diffraktionsbereich bilden sich infolge Interferenz Wellen aus, deren Höhen deutlich über denen der einfallenden Wellen liegen.

Die Rate an Energie, die auf bestimmte Küstenabschnitte freigesetzt wird, ist daher neben den Wellenkenngrößen im Tiefwasser (Richtung und Größe) in hohem Maße von der Topographie des Meeresbodens im Küstenvorfeld abhängig.

Berechnungsprogramme für die Ausbreitung der Wellen im Küstenvorfeld und ihre Energieabgabe auf Strände und Küstenschutzbauwerke in Abhängigkeit von Windgegebenheiten und der Topographie des Küstenvorfeldes sind daher eine wesentliche Planungshilfe.

Ein weiterer Aspekt von hohem Interesse bezüglich der Wellenenergie ist deren mögliche Nutzung. Mit den genannten Berechnungsprogrammen können exponierte Orte mit ggf. besonders hoher Verfügbarkeit von Wellenenergie aufgezeigt werden.

## 2. Problemlösungen

Zur Berechnung der Wellenausbreitung und der zugehörigen Wellenhöhenentwicklung im Küstenbereich kommen drei Wege in Betracht:

### 2.1 Untersuchung im hydraulischen Wellenmodell

Hydraulische Wellenmodelle bestechen durch ihre auch für den Nichtfachmann offensichtliche Anschaulichkeit. Sie haben sich über Jahrzehnte in einer Vielzahl von Untersuchungen und Planstudien bewährt. Aus einer großen Zahl von ausgeführten Wellenmodellen ist bekannt, daß diese Modelle für ein weites Gebiet von Fragestellungen geeignet sind. Für großmaßstäbliche Detailuntersuchungen sind hydraulische Wellenmodelle ein besonders geeigneter Lösungsweg. Zu nennen sind z.B. komplizierte Vorgänge, wie Resonanzerscheinungen in Hafenbecken und deren Abhilfe, ggf. im Zusammenspiel mit vertäuten Schiffen.

Auch zur Untersuchung des Nahbereichs von Häfen oder Anlagen des Küstenschutzes sowie zur Ermittlung der Wellenkennwerte an Molen und Wellenbrechern und die damit verbundenen Planstudien ist das hydraulische Wellenmodell geeignet.

Es erlaubt nicht nur die Modellierung idealisierter Verhältnisse mit monochromatischen Dünungswellen, sondern auch das Einsteuern von Seegangsspektren. Letzteres wird allerdings selten ausgeführt, da die Aussagen mit monochromatischen Wellen häufig ausreichen.

Bestimmte Fragestellungen können allerdings im hydraulischen Modell nur ungenau oder nicht beantwortet werden. Hydraulische Modelle sind eine maßstäbliche Verkleinerung der Naturverhältnisse. Sie unterliegen Modellgesetzen. Diese Modellgesetze bedingen eine Reihe von Einschränkungen bezüglich der Anwendbarkeit von Modellen.

Problematisch ist daher z.B. die Untersuchung größerer Gebiete. Die Modellgesetze erlauben keine beliebige Verkleinerung der Modellwellen. Werden diese zu klein, d.h., werden die Wellenlängen kleiner als rd. 2 cm, gewinnen die Kräfte infolge Oberflächenspannung dominierende Bedeutung gegenüber den Schwerkraftwirkungen. Das Modell wäre schon in der Nähe derartiger Verhältnisse nicht mehr naturähnlich. Weiterhin soll die Wassertiefe an keiner Stelle des Modells kleiner als 5 cm sein. Die Wellenhöhe soll 2 cm nicht unterschreiten (KIRSCHMER, 1952; KOHLHASE, 1983). Die Konsequenzen auf die Anwendbarkeit kann ein Beispiel verdeutlichen: Ist z.B. das Gesamtgebiet der Insel Sylt zu untersuchen, so wären ca. 50 km Natur in der Längenausdehnung zu modellieren.

Ein Modell mit dem Maßstab 1:500 wäre bereits ein sehr großes Modell, nämlich 100 m lang. Die Wassertiefe über dem Riff vor der Küste Sylts würde von ca. 2,5 bis 4 m Natur auf 5 bis 8 mm im Modell verkleinert. Wellen von z.B. 60 m Länge und 4 m Höhe vor dem Riff würden im Modell 12 cm lang und 8 mm hoch sein. Nach Passieren des Riffs wären die Wellen noch kleiner. Ein derartiges Modell würde trotz hoher Kosten keine für Planungen ausreichenden Erkenntnisse liefern. Die Wellen lägen bereits in den „tiefen“ Gebieten des Modells an der Grenze der Übertragbarkeit. Der wesentliche Bereich der Brandungszone wäre gänzlich naturunähnlich. Bei hydraulischen Strömungsmodellen lassen sich mit dem Kunstgriff der Modellüberhöhung bisweilen übertragbare Modelle trotz starker Flächenverkleinerung erreichen. Diese Technik kann hier nicht angewandt werden. Die Wellen lassen sich nicht verzerren.

Soll die Sedimentumlagerung infolge Wellen studiert werden, kann das hydraulische Modell nicht herangezogen werden. Die Modellgesetze für die Wellenbewegung und die Sedimentbewegung widersprechen einander (vgl. z.B. GRIESSEIER/VOLBRECHT, 1957).

Die Veränderung der Wellen infolge Wind kann in flächenhaften Wellenmodellen schon aus wirtschaftlichen Gründen nicht modelliert werden. Sie ist allerdings auch darum nicht relevant, weil hydraulische Modelle derart großer Naturgebiete, in denen der Wind die Wellen maßgeblich verändern würde, aus den oben genannten Gründen gar nicht ausführbar sind.

Letztlich ist zu erwähnen, daß Umbauten zur Untersuchung von Planungsvarianten vergleichsweise kostenintensiv sind.

## 2.2 Manuelle Konstruktion des Wellenfeldes

Für bestimmte Fragestellungen kann die refraktionsbedingte Ausbreitung von Dünungswellen im Küstenbereich durch manuelle Konstruktion der Wellenorthogonalen und/oder der Wellenkämme durchgeführt werden. Entsprechende Verfahren werden z.B. von MAGENS (1958) und von WIEGEL (1964) beschrieben.

Prinzipiell kann diese Untersuchungsmethode für die Ermittlung der Wellenausbreitung unabhängig von der Größe des Untersuchungsgebietes angewandt werden. Die Einflüsse von Shoaling, Bodenreibung, Diffraktion und auch Wind lassen sich angenähert auf analytischem Wege ermitteln und in der Konstruktion berücksichtigen. Die Lage der Brecherzone kann

ebenfalls angenähert bestimmt werden. Eine genügend genaue Bearbeitung ist jedoch nicht nur sehr arbeitsintensiv, sie erfordert auch ein großes Maß an Erfahrung, besonders wenn Gebiete mit komplizierter Topographie zu behandeln sind. Das bisherige Hauptanwendungsgebiet lag in der Ergänzung des hydraulischen Wellenmodells, besonders bei der Ermittlung der Eingangsdaten für die Modelle, wenn keine Messungen aus der Natur vorlagen. Die Abb. 1 zeigt ein Beispiel manuell ermittelter Wellenausbreitung.

## 2.3 Numerische Modellierung

Seit einigen Jahren gewinnt die numerische Modellierung auf allen Gebieten des Wasserbaus zunehmend an Bedeutung. Leistungsfähige Strömungsmodelle ergänzen oder ersetzen hydraulische Modellversuche. Mit der Weiterentwicklung der (numerischen) Modelltechniken und der Leistung der Rechner wird zukünftig eine Vielzahl bislang dem hydraulischen Modell vorbehaltenen Probleme rechnerisch gelöst werden.

Bei der Erstellung von Computerprogrammen zur Berechnung der Wellenausbreitung können zwei verschiedene Wege eingeschlagen werden.

### 2.3.1 Diskrete Verfahren

Die beschreibenden Gleichungen der Flüssigkeitsbewegung lassen sich in einem Finite-Element-Schema oder Finite-Differenzen-Schema für die Wellenbewegung lösen. Derartige Modelle sind u.a. wegen der hohen Diskretisierungsanforderung (etwa 10 Elemente je Wellenlänge) sehr rechenintensiv. Bereits für eng begrenzte Gebiete, wie z.B. einen Hafen allein oder den Nahbereich einer Mole oder einer Buhne, ist die Rechenleistung von Großrechnern erforderlich. Dennoch sind die Rechenzeiten erheblich. Entsprechend hoch sind die Kosten für kommerzielle Untersuchungen.

Für größere Küstengebiete sind diese Modelle darum derzeit ungeeignet. Des weiteren ist die theoretisch hohe Genauigkeit exakter numerischer Lösungen aus verschiedenen Gründen oft nicht praxisrelevant. Zum einen versagt die Theorie in der gerade besonders wichtigen Zone des Brechens. Dort muß auf empirische Hilfsansätze zurückgegriffen werden. Zum anderen steht und fällt die Berechnungsgenauigkeit mit der Genauigkeit der Daten, auf denen die Rechnung aufbaut. So liegt die Güte der Erfassung der Topographie im Bereich der Flüsse etwa bei einem Dezimeter. In Seegebieten sind Abweichungen zwischen Realität und Karten zumindest bereichsweise in der Größenordnung von Metern wahrscheinlich. Nicht exakt bestimmbar sind auch die in das Modell einzusteuernden Wellen. Sie sind dem Wettergeschehen und damit dem Zufall unterworfen und können daher nur unscharf angegeben werden. Die Genauigkeit der Gesamtaussage bei Berechnungen für Küstenregionen ist also nicht nur eine Frage der Berechnungsgenauigkeit an sich. Das Einsatzgebiet dieses Modelltyps dürfte damit derzeit auf die Ermittlung der Wellenruhe in Hafenbecken und auf ähnliche Detailstudien beschränkt sein, für die auf der anderen Seite aber auch das hydraulische Modell geeignet ist.



Programmsystems TICAD (HOLZ/ZANKE). Das Programm benutzt zur Erfassung der Topographie ein Geländemodell auf der Basis von Dreiecksnetzen, das für Finite-Element-Strömungsmodelle entwickelt wurde. Mit diesem Verfahren gelingt eine gute Beschreibung der Topographie schon mit einer vergleichsweise geringen Knotenanzahl (ca. 700 Knoten für das Gebiet Norderney auf Abb. 5). Das Programm kann mit Strömungsmodellen gekoppelt werden. Nachfolgend werden die theoretischen Grundlagen des Modells beschrieben.

### 2.3.2.2 Theoretische Grundlagen

Die Ausbreitung einer Welle im flachen Wasser läßt sich über die Wassertiefenabhängigkeit der Wellenlänge bzw. der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit berechnen. Die örtliche Wellenhöhe  $H$  ist eine Funktion der Wellenhöhe  $H_0$  im tiefen Wasser, der Wassertiefe (Shoaling), der Wellenausbreitung (Refraktion, Diffraction) sowie der Bodenreibung:

$$H = H_0 \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_f \cdot k'$$

mit  $k_s$  = Shoaling-Koeffizient  $k_f$  = Bodenreibungskoeffizient  
 $k_r$  = Refraktionskoeffizient  $k'$  = Diffractionskoeffizient

Im Falle brechender Wellen sind die Energie- bzw. Höhenverluste infolge Brechens zusätzlich zu berücksichtigen.

#### 2.3.2.2.1 Refraktion

Für die Wellenlänge gilt nach der linearen Theorie (CERC, 1984)

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

und nach der Theorie z. B. dritter Ordnung

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \left\{ 1 + \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 \left[ \frac{5 + 2 \cosh(4\pi h/L) + 2 \cosh^2(4\pi h/L)}{8 \sinh^4(2\pi h/L)} \right] \right\}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \left\{ 1 + \left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 \left[ \frac{5 + 2 \cosh(4\pi h/L) + 2 \cosh^2(4\pi h/L)}{8 \sinh^4(2\pi h/L)} \right] \right\}$$

mit  $c$  = Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  $H$  = Wellenhöhe  
 $g$  = Erdbeschleunigung  $L$  = Wellenlänge  
 $h$  = Wassertiefe  $T$  = Wellenperiode

Beim Einlaufen in flaches Wasser werden die Wellen kürzer. Dadurch werden die Wellenkämme verformt. Sie werden je nach Tiefenverteilung des Seegrundes bereichsweise länger oder kürzer. Die Energie je Kammweiten-Einheit ändert sich und mithin auch die Wellenhöhe. Die Art der Ausbreitung steuert so die örtlichen Refraktionskoeffizienten  $k_r$

$$k_r = \sqrt{b_0/b}$$

Darin ist  $b_0$  die Breite eines Wellenkammabschnittes im Tiefwasser und  $b$  die Breite desselben Abschnittes an einem Ort im flachen Wasser.

## 2.3.2.2.2. Shoaling

Der Einfluß der Wassertiefe (Shoaling) auf die Wellenhöhe ist durch

$$k_s = \sqrt{\frac{1}{\tanh(2\pi h/L)} \left[ \frac{1}{1 + \frac{(4\pi h/L)}{\sinh(4\pi h/L)}} \right]}$$

gegeben (s. z.B. CERC).

## 2.3.2.2.3. Bodenreibung

Der Energieverlust infolge Bodenreibung wird durch

$$E_f = \frac{2}{3\pi} \rho \cdot f_e \cdot U_{bm}^3$$

- mit  $E_f$  = Energieverlust infolge Bodenreibung  
 $f_e$  = Energieumwandlungsbeiwert  
 $U_{bm}$  = max. Orbitalgeschwindigkeit an der Sohle  
 $\rho$  = Dichte des Wassers

beschrieben.

Der Energieumwandlungsfaktor  $f_e$  kann als Funktion der Wellenpartikelamplitude an der Sohle und des NIKURADSE-Beiwertes angegeben werden (SKOVGAARD et al., 1975). Die Bodenreibung ist allerdings für den Bereich der Küsteningenieurprobleme von untergeordneter Bedeutung.

## 2.3.2.2.4 Brechen

Besonders infolge Shoaling werden die Wellen mit abnehmender Wassertiefe höher. Das Höhenwachstum wird durch das Brechen begrenzt. Der Vorgang des Brechens ist ein hochkomplizierter Prozeß. Er ist bis heute nicht vollständig gelöst und wird üblicherweise durch idealisierte theoretische Ansätze in Kombination mit empirischen Erkenntnissen beschrieben.

Das Programm ermittelt den Brechpunkt infolge Übersteilheit der Wellen nach dem MICHE-Kriterium.

$$H/L = 0,14 \cdot \tanh(2\pi h/L)$$

und den Brechpunkt infolge zu geringer Wassertiefe nach WEGGEL (1972)

$$H/h = b - a H / (gT^2)$$

- mit  $a = 43,75 (1 - e^{-19m})$   
 $b = 1,56 / (1 + e^{-19,5m})$   
 $m$  = Neigung des Unterwassergrundes

Die Form der Wellen beim Brechen ist nicht einheitlich. Deutlich unterscheidbar sind Schaumbrecher, Sturzbrecher und Schwallbrecher, je nach Wellenkennwerten und Strandneigung. Der Energieverlust infolge Brechens führt zu einer Höhenabnahme längs des folgenden Laufweges. Dieser Verlust wiederum hängt von der Energieabgabe direkt zu Beginn der

Brecherstrecke (abhängig vom Brechertyp) und den Wassertiefen im weiteren Verlauf ab. Dadurch kann das Ausbranden flächenhaft bis zur Uferlinie erfolgen. Die gebrochenen Wellen können sich aber auch restabilisieren und ggf. ein zweites oder drittes Mal mehr oder weniger linienförmig brechen.

Das Programm berechnet die Wellenhöhe  $H$  auf der Strecke  $x$  nach Einsetzen des Brechens aufgrund der Untersuchungen von HORIKAWA/KUO (1966) und ANDERSON/FRED-SOE (1983):

$$H/H_B = 0,35 + 0,65 \exp(-0,12 x/H_B)$$

Diese Lösung enthält keine Information über den Brechertyp. Von laufenden und zukünftigen Meßprogrammen werden Verbesserungen erwartet.

### 2.3.2.2.5 Diffraction

Starke Landvorsprünge sowie Molen, Wellenbrecher und Bühnen führen zu Diffraktionseffekten. SOMMERFELD veröffentlichte 1896 die theoretische Lösung der Diffraction von Lichtwellen. DAEMRICH und KOHLHASE (1978) haben die SOMMERFELD-Lösung, angewandt auf die Diffraction der Wasserwellen an einem Wellenbrecher, berechnet und in Diagrammen wiedergegeben. In der Ingenieurpraxis wird die Diffraction üblicherweise mit derartigen Diagrammen graphisch gelöst. Im hier beschriebenen Programm werden die SOMMERFELD-Gleichungen direkt berechnet.

Mit den Bezeichnungen der Abb. 2 lautet die Lösung

$$F(r, \theta) = f(\sigma) \cdot e^{-ikr \cdot \cos(\theta - \theta_0)} + f(\sigma') \cdot e^{-ikr \cdot \cos(\theta + \theta_0)}$$

mit

$$\sigma = 2 \cdot \frac{k \cdot r}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\theta - \theta_0}{2}\right)$$

$$\sigma' = -2 \cdot \frac{k \cdot r}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\theta + \theta_0}{2}\right)$$

$$f(\sigma) = \frac{1+i}{2} \int_{-\infty}^{\sigma} e^{-i\pi t^2/2} dt$$

$$f(\sigma') = \frac{1+i}{2} \int_{-\infty}^{\sigma'} e^{-i\pi t^2/2} dt$$

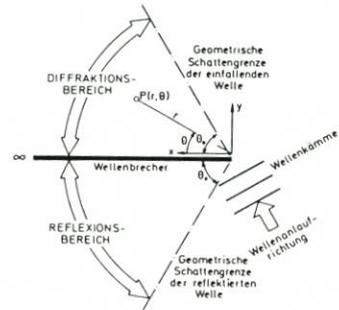


Abb. 2. Bezeichnungen zur Diffraction (DAEMRICH/KOHLHASE, 1978)

### 2.3.2.2.6 Windeinfluß

Die bisher besprochenen Grundlagen gelten für Dünungswellen. Auf längeren Laufstrecken können die Wellen durch den Einfluß des Windes zusätzlich verändert werden.

Für alle Arten von Modellen ist die Kenntnis des maßgebenden Seegangs als Randbedingung für das eigentliche Untersuchungsgebiet erforderlich. Nur in seltenen Fällen stehen verlässliche Daten zur Verfügung.

Die erforderlichen Randbedingungen können durch Messung oder durch Seegangsvorhersage ermittelt werden. Der Seegang ist vom Wettergeschehen abhängig und hat Zufallscharakter. Aus diesem Grund führen nur Langzeitmessungen zu Bemessungsgrundlagen. Meist ist hierfür vor einer Baumaßnahme nicht genügend Zeit verfügbar. Darum und auch wegen des Kostenaufwandes sind spezielle umfangreiche Messungen die Ausnahme.

Die maßgebenden Wellenkenngrößen werden i.d.R. vorausberechnet und, wenn möglich, an einzelnen Messungen abgesichert. Zur Vorausberechnung stehen deterministische und statistische Verfahren zur Verfügung. Mit deterministischen Verfahren werden die Kenngrößen einer „maßgebenden“ Welle, i. a. der vom Ingenieurstandpunkt wichtige  $H_{1/3}$ -Wert und die zugehörige Periode, bestimmt. Die statistischen Verfahren geben über die Gesamtheit der Wellen in einem Wellenfeld Aufschluß. Für die Nordsee wurde auf der Grundlage von Messungen das sogenannte JONSWAP-Spektrum als typisch ermittelt.

Beide Verfahren enthalten keine Information über die Auswirkung der Topographie und des Küstenverlaufs auf die Windwirkung. Die numerische Modellierung bietet jedoch Möglichkeiten, die Wellenhöhenentwicklung auch in Flachwasserbereichen mit komplizierter Tiefenverteilung unter Einschluß von Refraktion, Shoaling, Diffraktion und Brechen zu berechnen. Auch der Einfluß realer Windereignisse mit zeitlich und flächenhaft unterschiedlichen Winden kann erfaßt werden.

Das Programm berechnet die Änderung der signifikanten Wellenhöhe  $H_{1/3}$  eines Wellenfeldes infolge Wind näherungsweise nach CERC (1984) durch

$$\frac{gH}{U_A^2} = 2.83 \times 10^{-1} \tan h \left[ 5.3 \times 10^{-1} \left( \frac{gh}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \tan h \left\{ \frac{5.65 \times 10^{-3} \left( \frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tan h \left[ 5.3 \times 10^{-1} \left( \frac{gh}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\}$$

mit  $U_A$  = Windgeschwindigkeit  
 $F$  = Streichlänge des Windes

Alternativ können die JONSWAP-Gleichungen berechnet werden.

Für die Benutzung im Programm wurde die Gleichung auf die Ermittlung von Wellenhöhendifferenzen entlang des Laufweges umgestellt. Mit dieser Methode kann der Einfluß der Topographie und des Küstenverlaufs auf die Seegangsentwicklung mit dem schrittweisen Vorrücken der Wellen berücksichtigt werden. Im derzeitigen Stand des Programms können einheitliche Windbedingungen für das Lösungsgebiet verarbeitet werden. Eine Erweiterung auf die Simulation großräumiger Zyklone ist möglich.

### 3. Anwendungsbeispiele

Anhand einiger Beispiele werden die Berechnungsmöglichkeiten zu den einzelnen Phänomenen der Wellenbewegung (Refraktion, Shoaling, Brechen, Diffraktion und Windwirkung) gezeigt. Des weiteren wird herausgestellt, daß ein derartiges Modell zur Untersuchung von Gebieten unterschiedlichster Größe dienen kann.

Die Ergebnisse erster Pilotrechnungen zum Problem der Ermittlung des windgetriebenen Seeganges sind auf den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Das Untersuchungsgebiet umfaßt mehrere hundert Kilometer.

Die weitere Entwicklung der Wellen wird je nach angestrebter Aussage in verschiedenen großen Untersuchungsgebieten errechnet: Abb. 5 zeigt die Tiefenauflösung des Seegatbereiches zwischen Norderney und Juist. Mit rd. 700 Knoten wird eine Auflösung erzielt, die die wesentlichen Strukturen des Riffbogens und der tiefen Rinnen gut wiedergibt. Abb. 6 stellt die Entwicklung von Wellen aus westlicher Richtung in diesem Gebiet dar. Der Untersuchungsraum hat eine Ausdehnung von einigen Kilometern.

Noch kleinräumiger ist das Untersuchungsgebiet der Wellen im Bereich eines Bühnenfel-

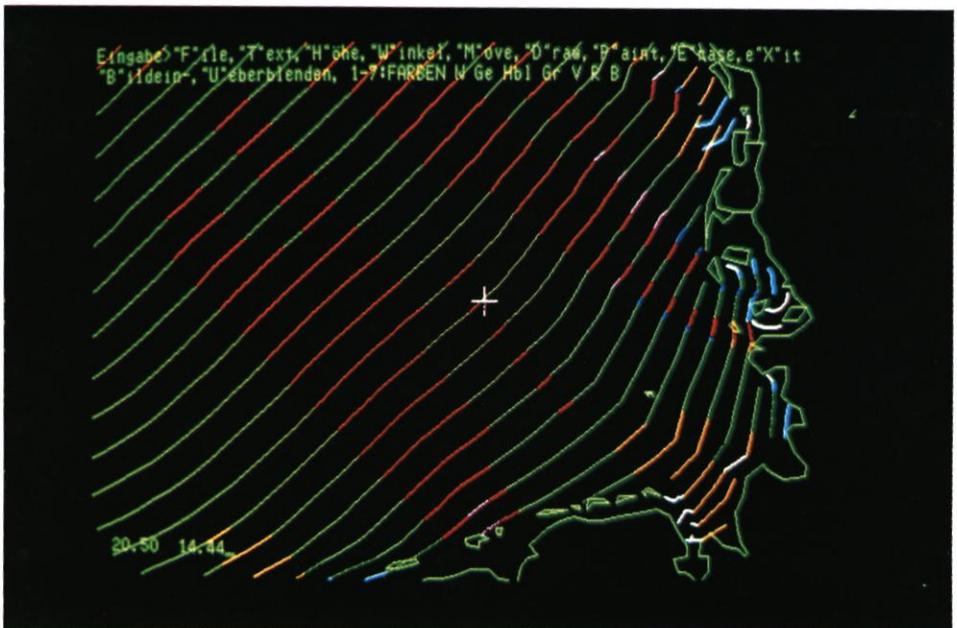


Abb. 3 und 4. Oben Nordsee-Gesamtmodell, unten Ausschnitt Deutsche Bucht.  $H_{1/3}$ -Entwicklung einer anfangs 20 cm hohen Welle mit  $T = 10$  s Periode unter konstanter Windanfachung mit  $U_A = 25$  m/s aus NW. Abstufung der Wellenhöhen beginnend mit weiß = 0-1,5 m in 1,5-m-Schritten: weiß, hellblau, gelb, grün, rot, violett, blau

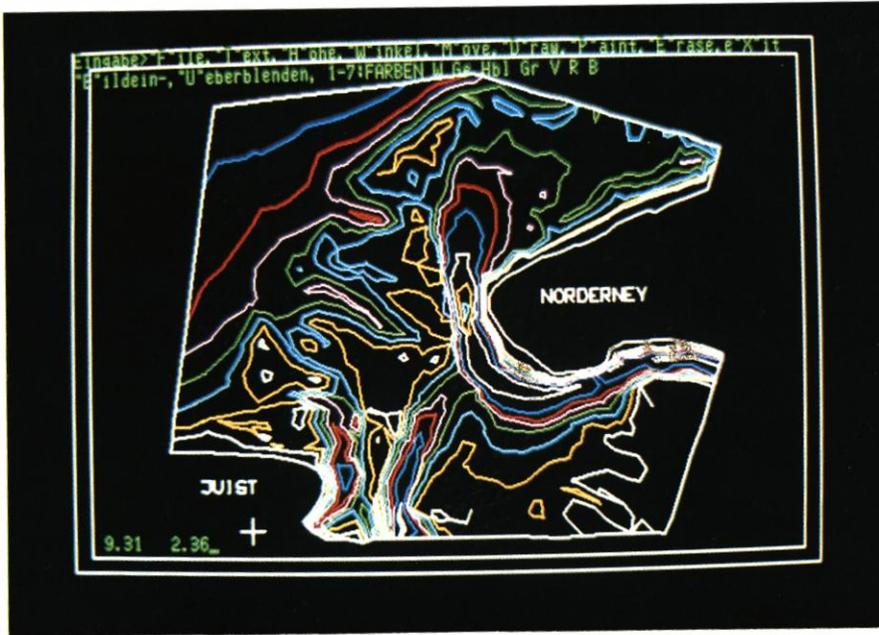


Abb. 5. Testgebiet Norderney: Tiefenauflösung

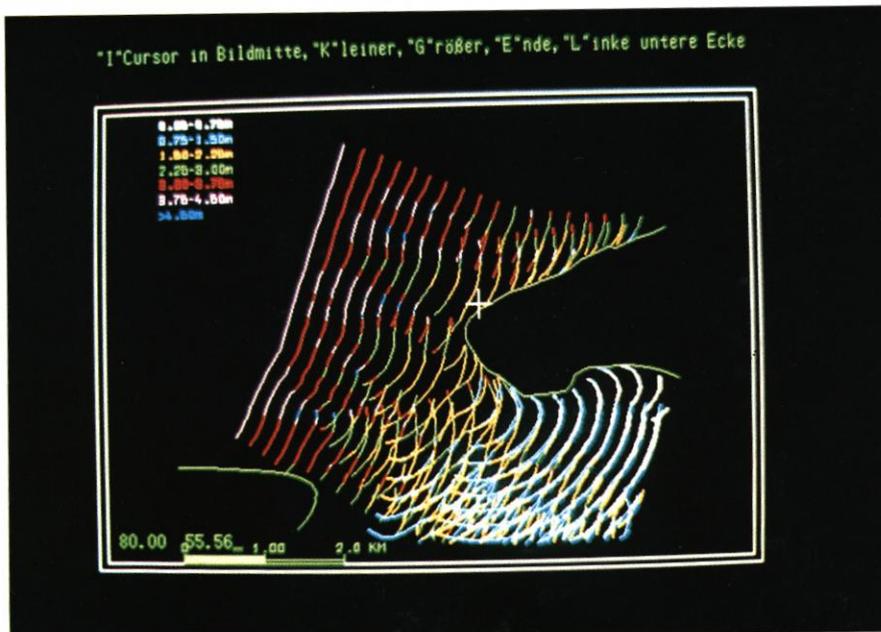


Abb. 6. Testgebiet Norderney: Wellen aus westlicher Richtung mit  $H_0 = 4$  m und  $L_0 = 76$  m bei Wasserstand MThw +3 m, Wellenhöhenabstufung in 1-m-Schritten, Farbfolge wie auf Abb. 3.

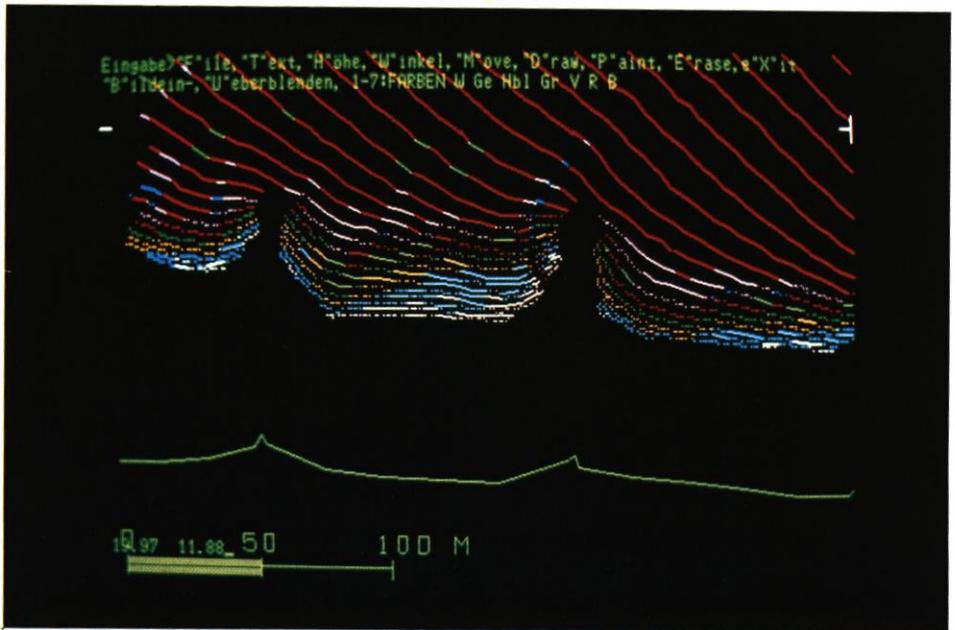
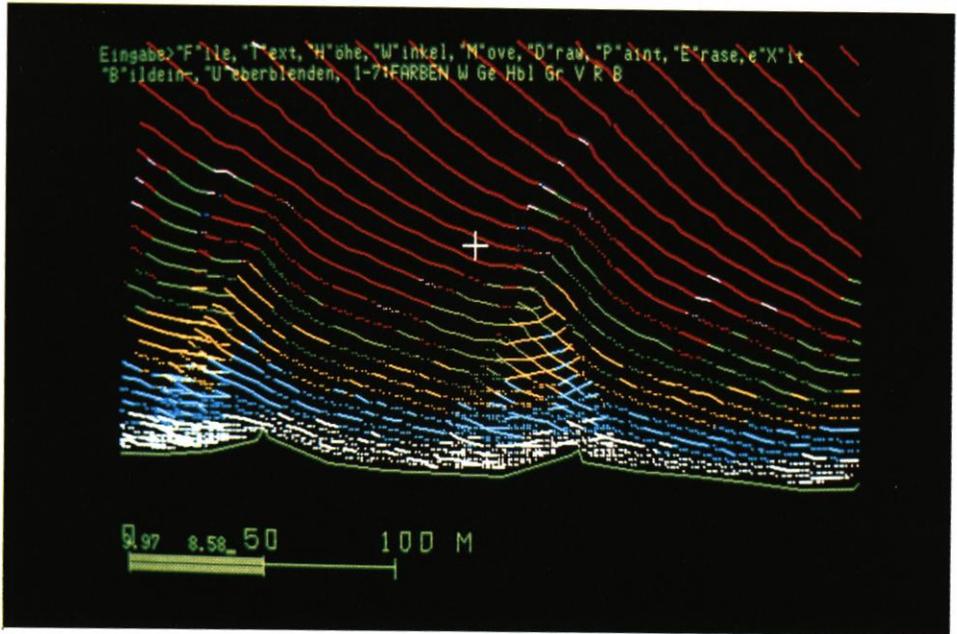


Abb. 7 und 8. Ausschnitt aus einem Bühnenfeld (Norderney). Oben bei Thw, unten bei Tnw.

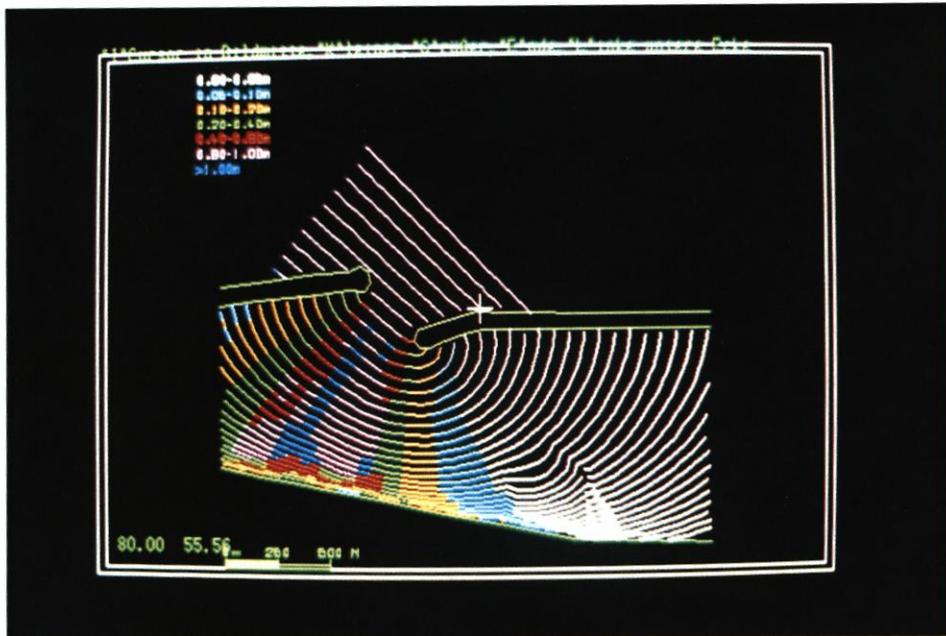
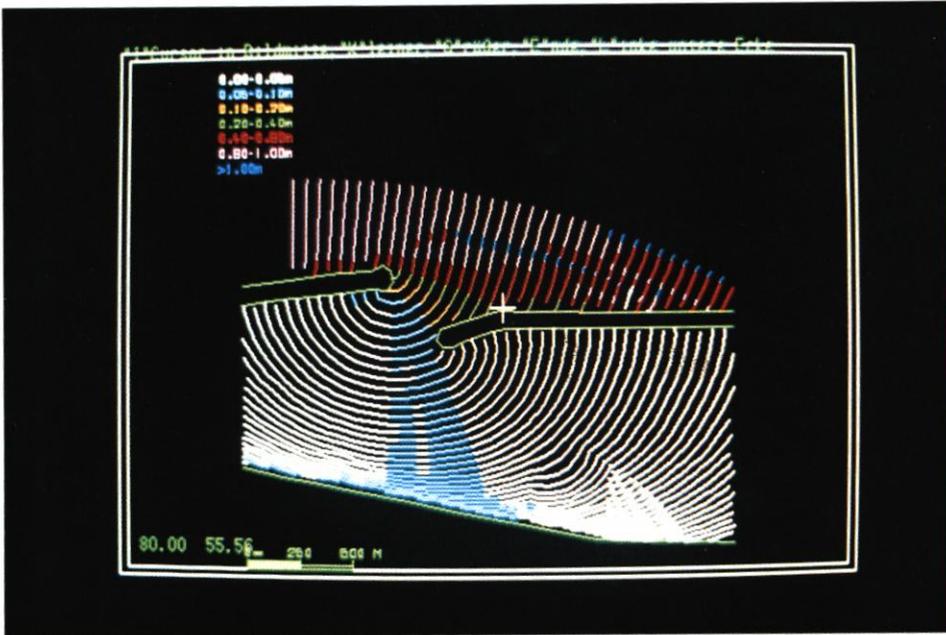


Abb. 9 und 10. Zwei Beispiele für gleichzeitige Diffraktion und Refraktion einschließlich Shoaling. (Die Wassertiefe fällt von 20 m am oberen Bildrand auf 0 m am unteren Ufer, zu beachten die Auswirkung einer tiefen Stelle kurz vor dem Ufer Mitte rechts.)

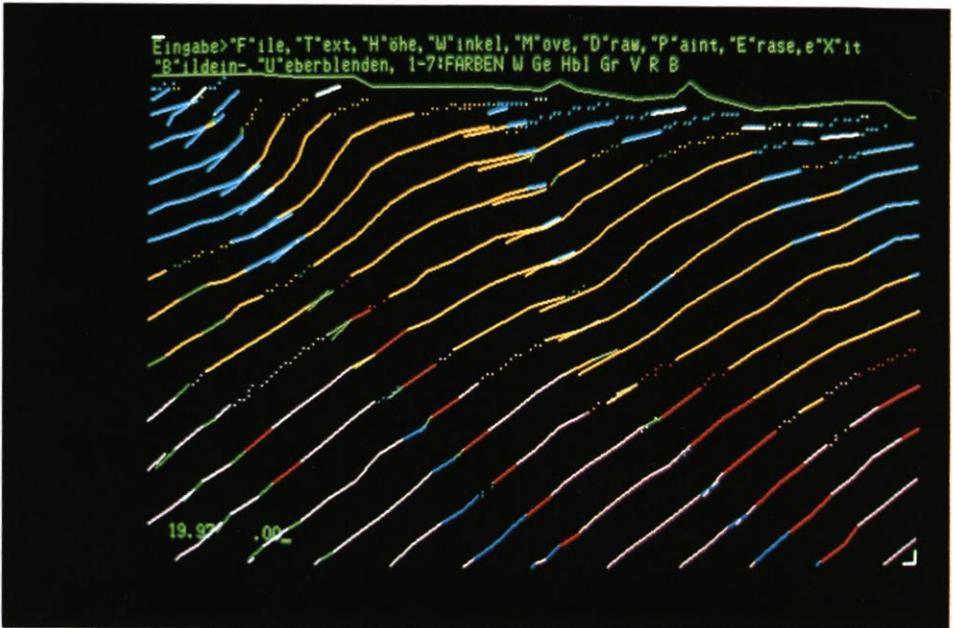


Abb. 11. Gebiet Rantum/Sylt. Beispiel für die Erfassung einer Riffbrandung, gepunktet brechende Wellen. Einlaufende Welle  $L_o = 100$  m,  $H_o = 6$  m. Wellenhöhen 0-1 m weiß, 1-2 m hellblau, 2-3 m gelb, 3-4 m grün, 4-5 m rot, 5-6 m violett, >6 m blau

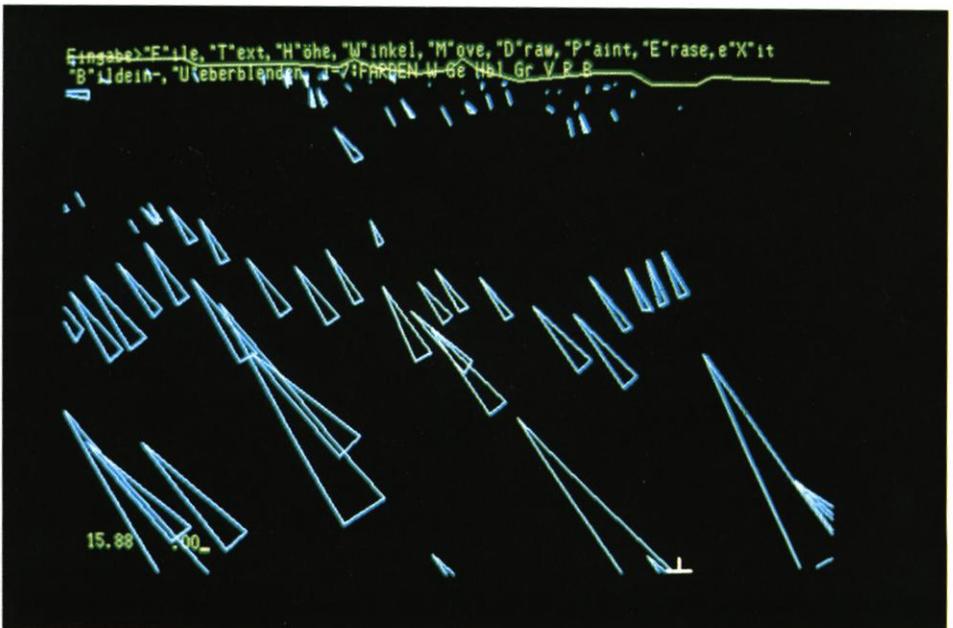


Abb. 12. Gebiet Rantum: Abbrandende Energie in Richtung und Größe

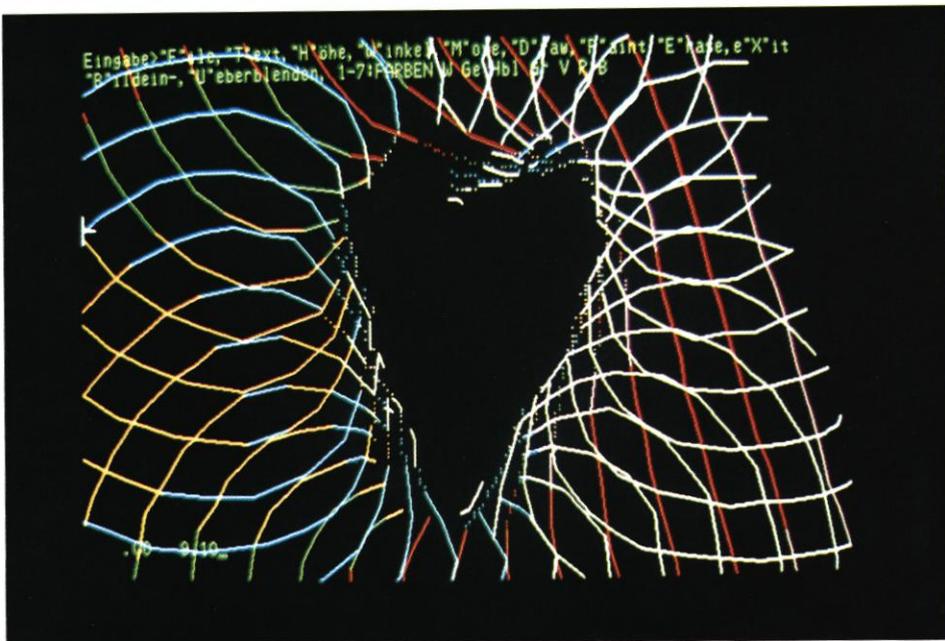
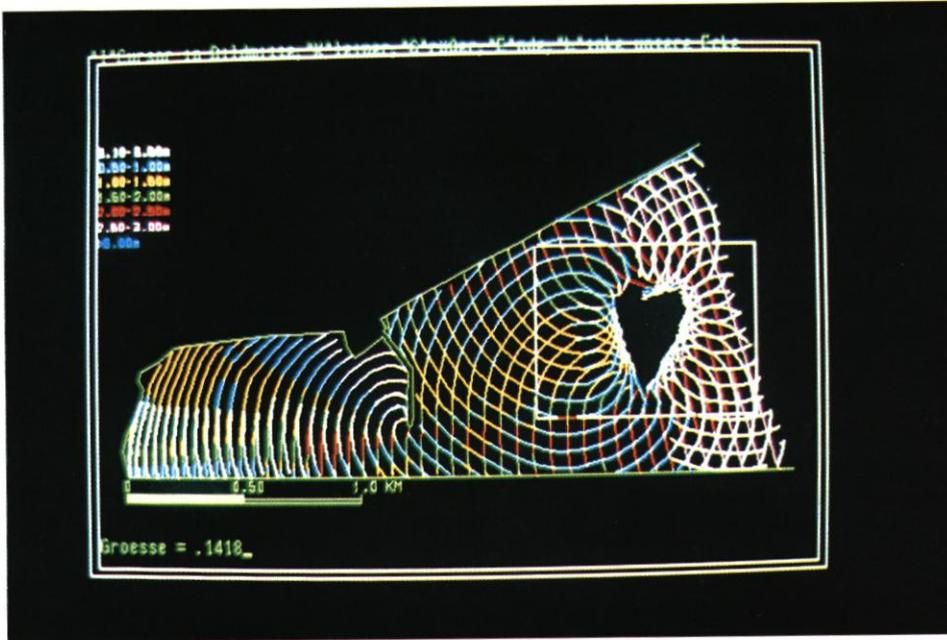


Abb. 13 und 14. Zusammenwirkungen einer küstenvorgelagerten Insel mit einer Hafensmole. Der von rechts einfallende Seegang umläuft die Insel beidseitig infolge Refraktion und Diffraktion. Unten Ausschnittsvergrößerung.

des am Westende von Norderney. Die Bühnen haben einen Abstand von etwa 110 m (Abb. 7 und 8).

Die Wirkung küstenvorgelagerter Riffs wird von der Energieabgabe der Wellen über dem Riff geprägt. Die Abb. 9 zeigt den Verlauf und die Höhenänderung der Wellen bei Rantum/Sylt. Abb. 10 verdeutlicht Größe und Richtung der Energieabgabe durch Energieflußpfeile. Die Strandbrandung ist sichtbar schwächer als die Riffbrandung.

Ein weiteres Untersuchungsfeld ist die Anlage und Wirkung von Molen und Wellenbrechern. Die beiden Abbildungen 11 und 12 zeigen, wie die Schutzwirkung der Molen von ihrer Lage zur Richtung der anlaufenden Wellen abhängt. Die beiden Aufnahmen sind Prinzipdarstellungen.

Wesentlich komplizierter kann der tatsächliche Wellenverlauf vor einem Hafen sein, wie das Beispiel eines mittelamerikanischen Hafens (Abb. 13) zeigt. Von See (rechts) anlaufende Wellen umrunden eine küstenvorgelagerte Insel infolge Refraktion und Diffraktion. Die anlaufende Welle von 2,8 m Höhe wird durch die Interferenzen am Wellenbrecher z. T. über 3 m hoch. Im Schatten der Mole sind die einlaufenden Wellen abgeschwächt (weiß:  $H = 0$  bis 0,5 m, blau:  $H = 0,5$  bis 1 m, gelb:  $H = 1$  bis 1,5 m).

Mit einem Zooming lassen sich Details studieren (Abb. 14).

#### 4. Schriftenverzeichnis

- ANDERSON, O. H. u. FREDSOE, J.: Transport of Suspended Sediment Along The Coast. Progr. Rep. 59, Inst. Hydrodyn. Hydraul. Eng., Techn. Univ. Danmark, 1983.
- CERC, U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol. I u. II, 1984.
- DAEMRICH, K. F. u. KOHLHASE, S.: Diffraktion an halbbunendlichen Wellenbrechern – Diagramme der Wellenhöhenverteilung hinter totalreflektierenden, linienförmigen Bauwerken. Mitt. des Franzius-Instituts der Univ. Hannover, H. 47, 1978.
- GRIESSEIER, H. u. VOLLBRECHT, K.: Zur Problematik der modellmäßigen Darstellung litoraler Prozesse. Mitt. des Franzius-Instituts der TH Hannover, H. 11, 1957.
- HOLZ, K. P. u. ZANKE, U.: TICAD, ein CAD-System für Strömungs- und Wellenberechnungen. Unveröff. Manuskript, 1987.
- HORIKAWA, K. u. KUO, C. T.: A Study on Wave Transformation inside Surf Zone. Coast. Eng. Conf., Vol. 1, 1966.
- KIRSCHMER, O.: Die Theorie der Meereswellen als Grundlage von Modellversuchen für Seebauten. MAN-Forschungsheft, 2. Halbj. 1952.
- KOHLHASE, S.: Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenplanung. Mitt. des Franzius-Instituts der Univ. Hannover, H. 57, 1983.
- MAGENS, C.: Seegang und Brandung als Grundlage für Planung und Entwurf im Seebau und Küstenschutz. Mitt. des Franzius-Instituts der TH Hannover, H. 14, 1958.
- NIEMEYER, H.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. Forsch. Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Jahresbericht 1985.
- SKOOVGAARD, O., JONSSON, G. J. u. BERTELSEN, A. J.: Computation of waveheights to refraction and friction. Journ. of the Waterways, Harbour and Coast. Eng. Div. WW1, ASCE, 1975.
- SOMMERFELD, A.: Mathematische Theorie der Diffraktion. Mathematische Annalen, Bd. 47, 1896.
- WEGGEL, J. R.: Maximum Breaker Height. Journ. of the Waterways, Harbour and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 15, 1972.
- WIEGEL, R. L.: Oceanographical Engineering. Prentice Hall International Series in Theoretical and Applied Mechanics, Englewood Cliffs, N. J., 1964.