LEICHTWEISS - INSTITUT FÜR WASSERBAU HYDROMECHANIK UND KÜSTENINGENIEURWESEN Professor Dr.-Ing. Hocine Oumeraci

Technische Universität Braunschweig



Bericht Nr. 828

WIRKUNGSWEISE VON EINBAUTEN IN SEE

- Teilprojekt: Hydrologische Untersuchungen -

FORSCHUNGSBERICHT MTK 0546 BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 515-3892-MTK 0546 B2 gefördert. Die Verantwortung liegt bei den Autoren.

Akad. Direktor Dr.-Ing. H.H. DETTE Wiss. Mitarbeiter Dipl.-Ing. T. TRAMPENAU BRAUNSCHWEIG Januar 1998

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Aufgabenstellung	5
3.	Hydrodynamische und morphologische Aspekte im Forschungsprogramm"Sandküsten und durchlässige Pfahlbuhnen"3.1 Einleitung3.2 Hypothesen zur Wirkungsweise der Pfahlbuhnen3.3 Das Forschungsprogramm	6 6 10 15
4.	 Hydrodynamische und hydrologische Randbedingungen der einwirkenden Umweltparameter im Untersuchungszeitraum 1993 bis 1996 4.1 Vorbemerkung 4.2 Wasserstände und Sturmfluten 4.3 Windstatistik im Untersuchungszeitraum im Vergleich zur längerfristigen Windstatistik 4.4 Windverhältnisse im Untersuchungszeitraum 	18 18 19 22 26
	 4.5 Verknüpfung von Wind, Wasserstand und Seegang	 30 37 37 39 42 45
5.	Energiefluß im Untersuchungsgebiet5.1 Vorbemerkung5.2 Grundlagen der Energieflußberechnung5.3 Energieflußberechnungen aus Meßdaten5.4 Energieflußberechnungen aus Winddaten5.5 Zusammenfassung	46 46 47 48 51 58
6.	Küstenlängstransportvermögen im Untersuchungsgebiet6.1 Methodischer Ansatz6.2 Jährliches Küstenlängstransportvermögen im Zeitraum 1980 bis 1996	59 59 60

7.	 Morphologische Reaktionen im Küstenvorfeld auf das Buhnensystem vor Warnemünde	64 64 69
8.	Simulation von Dünenabbrüchen bei Extremsturmfluten	71 71 74
9.	Forschungs- und Optimierungsbedarf zur Wirkungsweise durchlässiger Pfahlbuhnen	78
10.	Schrifttum	82

1. Einleitung

Der Begriff "Küstenschutz" erlaubt eine Vielfalt von Interpretationen, die maßgeblich von den Zielsetzungen des Menschen geprägt werden. Dabei sind die Erwartungen an Küstenschutzmaßnahmen häufig sehr hoch. Nur bei einer völligen Versiegelung der Uferlinie, was einer felsigen Küste gleichzusetzen ist, kann deren Schutzwirkung vorhergesagt werden. Bei allen anderen Maßnahmen, d.h. "sanften" Methoden des Küstenschutzes, sind die Auswirkungen allgemein nur eingeschränkt abschätzbar.

Der Schutzbedarf einer sandigen Küste resultiert aus der langzeitigen Sedimentmassenbilanz, d.h., ob im Jahresmittel mehr Sand aus dem betroffenen Küstenabschnitt verlagert wird als aus anderen Gebieten hinzukommt. Die Verlagerung des anstehenden Materials erfolgt hauptsächlich durch den Küstenlängstransport. Verluste im Strandund Unterwasserstrandbereich führen häufig auch zu einem Substanzverlust aus landwärtigen Dünen oder Kliffs.

Nach ihrer Wirkungsweise können Küstenschutzmaßnahmen in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Maßnahmen zur Verringerung von Sandverlusten
- Kompensation des Sedimentverlustes durch Sandvorspülungen
- Maßnahmen zur Verminderung der Energiebelastung in der Brandungszone.

Die Auswahl der optimalen Küstenschutzmaßnahme für eine Örtlichkeit hängt wesentlich von den Vorgaben bzw. zu erfüllenden Forderungen u.a. wie folgt ab:

- Sicherung des Strandes unter der Maßgabe, daß das Erscheinungsbild erhalten bleiben muß oder geändert werden darf
- Beibehaltung oder Verminderung der Strandbrandung
- keine nachteilige oder nur beschränkt zulässige Beeinflussung der angrenzenden Bereiche
- konstruktive und wirtschaftliche Realisierbarkeit.

Zur Vorgabe, die Ausräumung eines Strandes (Sandverlust) zu vermindern, bieten sich verschiedene bauliche Maßnahmen an. Deren Hauptaufgabe besteht darin, die Verweilzeit des Sandes im Strandbereich zu verlängern. Hierzu zählen:

- Deckwerke
- küstenparallele Wellenbrecher
- Buhnensysteme.

Durch Deckwerke und Ufermauern wird die Uferlinie eines Küstenabschnittes fixiert. Dadurch soll der Sandtransport im Unterwasserstrandbereich z.B. auf einer Schorre nicht unterbunden, sondern primär der rückwärtige Bereich (Bebauung, Dünen, etc.) geschützt werden. Durch vorgelagerte Wellenbrecher wird angestrebt, den Energiefluß vor der Brandungszone und somit die Ausräumung des Strandes zu vermindern. Die Reduzierung des Sandverlustes ist dabei als Hauptziel anzusehen.

Die Errichtung von Buhnensystemen gehört zu den oben erwähnten sanfteren Methoden. Durch ihren Bau soll in der Regel erreicht werden, unter Erosion leidende Küstenabschnitte zu stabilisieren, den Uferlinienrückgang zu stoppen und die betroffenen Gebiete nach Möglichkeit in Bereiche positiver Sedimentbilanz zu überführen. Diese Maßnahmen werden überwiegend an rückgängigen Flachküsten durchgeführt, um z.B. die in vielen Fällen bestehende Durchbruchsgefahr und damit eine akute Gefährdung für Menschen und Wirtschaftsgüter im Hinterland zu verhindern. Hinsichtlich der Wirkungsweise wird allgemein die Auffassung vertreten, daß an Stellen hoher wellenerzeugter Turbulenz (Brandungszone) mit daraus resultierenden Küstenlängsströmungen, die Strömung und der daraus resultierende küstenparallele Sedimenttransport durch vom Strand ausgehende Querwerke (Buhnen) unterbunden oder zumindest verlangsamt werden kann. Aus Erfahrung ist bekannt, daß unter günstigen Umständen der Strand durch ein Buhnenfeld etwa bis zur Höhe der Buhnenköpfe geschützt werden kann, die Erosion sich seewärts aber fortsetzt.

Etwa 70% der Küste Mecklenburg-Vorpommerns (78 % der 206 km langen Flachküste und 58% der 134 km langen Steilküste) weisen Sandmangel und damit eine landwärtige Verlagerung der Uferlinie auf (WEISS 1991 a). Im Schrifttum stellen Arbeiten, die die Morphogenese und die Prognose der Küstenlinienentwicklung zum Inhalt haben, vorrangig Fallstudien kleinerer Abschnitte dar (KOLP 1982, GOMOLKA 1987). Nur in diesen Einzelfällen wurden auch bilanzierende Betrachtungen zur Wirksamkeit angestellt und die dabei gestaltenden, ursächlichen Faktoren in die Betrachtung mit einbezogen. Arbeiten zum morphologischen gesamten Ostseeküstenbereich bzw. größeren zusammenhängenden Bereichen entstammen fast ausnahmslos der Greifswalder und Rostocker Schule aus den 20er bis 50er Jahren des 20. Jahrhunderts. Hervorzuheben sind die Arbeiten von GEINITZ (1910) und ZANDER (1934) über die Mecklenburgische Küste; KEILHACK (1911) und WERNICKE (1930) über Usedom; SCHÜTZE (1931) über die Rügenschen Nehrungen; HURTIG (1954) über den Darß; REINHARD (1956) über Hiddensee; außerdem die den Gesamtraum zwischen Trave und Swine betreffenden Arbeiten von KOLP (1955) und von v. BÜLOW (1954). Diese Arbeiten sind vorwiegend auf Einzelaspekte der Morphodynamik und auf lokale Küsteneigenschaften ausgerichtet. Auf anthropogene Einflüsse wurde darin, wenn überhaupt, nur am Rande eingegangen. Dieser Faktor hat in den letzten Jahrzehnten jedoch zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Der allgemeine Wissensstand zur Funktion und Wirksamkeit von Buhnenbauten an der Küste läßt sich, wie folgt, zusammenfassen:

Die Ansichten der Wasser- und Küsteningenieure zur 100-jährigen Buhnenproblematik faßte PETERSEN (1961) zusammen. Weit voneinander abweichende Auffassungen zwischen Wirksamkeit und Wirkungslosigkeit charakterisieren danach die damalige Situation.

Die anwendungsorientierte Zusammenfassung des Erkenntnisstandes in den "Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken - EAK 1981" weist darauf hin, daß die "*funktionelle Gestaltung der Buhnen nach wie vor problematisch ist*".

In der EAK 1993 wird festgestellt: "Buhnen sind wohl die auf der Welt am häufigsten ausgeführte Küstenschutzwerke, dennoch sind sie problematisch. In vielen Fällen wurden durch sie die beabsichtigten Wirkungen erreicht. Manchmal war jedoch nur ein geringer oder kaum ein Erfolg zu verzeichnen und es gibt Fälle, in denen Buhnen sogar Schäden (z.B. durch Lee-Erosion) verursacht haben. Deshalb sollte erst dann an den Bau von Buhnen gedacht werden, wenn es nicht möglich ist, den Strand mit wirtschaftlichen Mitteln durch künstliche Sedimentzufuhr zu stabilisieren". Die Problematik der Buhnen liegt in der Unsicherheit bei der vorausschauenden Beurteilung ihrer Wirkung. Es gibt daher hinsichtlich der funktionellen Anordnung von Buhnen, einzeln oder in einer Gruppe, keine einheitlichen Richtlinien. Weiterhin gibt es unterschiedliche Auffassungen über das Eintreten der gewünschten Funktion. Deshalb können die in den o.g. Empfehlungen behandelten Fallbeispiele allgemein nur als gesammelte Hinweise aus dem Schrifttum angesehen werden, woraus Planungshilfen für eigene Überlegungen abgeleitet werden können. Die vorgenannten Aussagen beziehen sich ausnahmslos auf die Funktion und Wirkung von undurchlässigen Buhnen.

Bis heute ist nicht geklärt, ob bei den undurchlässigen Buhnen mittel- und langfristig die erodierende Wirkung durch kurzfristig auftretende Rippströme, oder die stabilisierende Wirkung durch Wasserberuhigung dominiert.

Nach einem groß angelegten Untersuchungsprogramm kam KOLP (1966) zu dem Ergebnis, daß im Gegensatz zu undurchlässigen Buhnen offen geschlagene Pfahlbuhnen für die Ausbildung von Sandriffen und Rinnen kein Hindernis bedeuten, da sich Riffsysteme in solchen Buhnenfeldern ausbilden konnten. KOLP (1966) schrieb diesem Buhnentyp eine den Strand schützende Wirkung zu, wobei dieser erosionshemmend, aber nicht akkumulationsfördernd wirkt.

Derzeit wird mit mehr als 1000 durchlässigen Buhnen auf etwa 75 km Länge an ausgewählten Küstenabschnitten in Mecklenburg-Vorpommern versucht, den Küstenrückgangsprozessen entgegenzuwirken. Die funktionelle und konstruktive Gestaltung dieser Buhnen beruht bislang allerdings hauptsächlich auf empirischen Erfahrungen (WEISS, 1991 b).

2. Aufgabenstellung

Am Beispiel von durchlässigen Buhnen wurde die Aufgabe gestellt, für die nahezu tidefreie Ostseeküste die Wirkungsweise von Einbauten in See an verschieden exponierten Uferabschnitten der Küste Mecklenburg-Vorpommerns zu untersuchen. Hierbei sollten Buhnensysteme hauptsächlich im Hinblick auf funktionelle Grundsätze betrachtet werden. Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei der gegenseitigen Beeinflussung von Einbauten und der Hydro-/Morpho-/Sedimentdynamik der ufernahen Schorre sowie des Strandes geschenkt werden.

Neben solchen prozeßorientierten Fragen war auch der Einfluß des Standortes auf die Bauwerkswirkung im großräumigen Zusammenhang zu untersuchen. Dies bezieht sich vor allem auf die Bedeutung des Abschnittes im naturräumlichen Prozeß, d.h. die langfristige Küstenentwicklung. Aus diesem Grund war die Wechselwirkung und die Überlagerung von Bauwerkseinfluß einerseits und der Küstenentwicklung andererseits in die Untersuchungen einzubeziehen.

Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Hydrologen (Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig), Geologen (Geologisches Institut der Universität Kiel) und Geographen (Geographisches Institut der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald) sowie praktischen Küsteningenieuren (Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock) wurde im Jahre 1992 ein umfangreiches Untersuchungsprogramm als Grundlage für das KfKI-Forschungsvorhaben "Wirkungsweise von Einbauten in See" aufgestellt.

Von den Untersuchungen wurde aufbauend auf dem bisherigen Kenntnisstand im einzelnen Aufschluß über grundlegende Fragenkomplexe auf folgenden Gebieten erwartet:

- 1. Hydrodynamik und Hydrologie
- 2. Sedimentdynamik
- 3. Morphogenese
- 4. Morphologie und Zusammenführung.

Die einzelnen Fragestellungen zu diesen Punkten sowie die Beschreibung der methodischen Vorgehensweise, die dem Forschungsantrag zugrundegelegt wurden, sind als Anlage A und B beigefügt.

3. Hydrodynamische und morphologische Aspekte im Forschungsprogramm "Sandküsten und durchlässige Pfahlbuhnen"

3.1 Einleitung

Die fortwährende Umgestaltung der Unterwassertopographie einer sandigen Küste als Folge des Seeganges läßt sich nur schwer im Sinne von allgemeingültigen "Regeln" zusammenfassen. Generelle "Verhaltensweisen", d.h. Trendaussagen sind jedoch unverkennbar. Es muß aber zugleich auch herausgestellt werden, daß der Begriff "sandige Küste" an sich schon eine Vielzahl von Formen beinhaltet. Sie kann aus einer Sandauflage von beachtlicher Mächtigkeit bestehen oder aber auch eine Felsküste darstellen, die bedingt durch Erosionswirkungen vollständig oder nur teilweise von einer dünnen Sandschicht bedeckt sein kann. Zu der letzteren Art sind auch die moränen Ablagerungen zu zählen, die sogar häufig lokal bloßgelegt sind. Im Folgenden wird nur der Zustand betrachtet, bei dem die Mächtigkeit der losen Sandmasse so groß ist, daß die morphologischen Vorgänge nicht beeinträchtigt werden.

Eine der Charakteristiken der tidefreien Sandküste ist das System der küstenparallelen Sandriffe, von denen das innere Riff relativ zum Wasserspiegel am höchsten ist. Seewärts nimmt die Höhe des Riffkammes ab und der Abstand zwischen den einzelnen Riffkämmen zu. BOCZAR-KARAKIEWICZ et al. (1981) haben die Entstehung von Riffsystemen bezüglich der Wechselwirkung der Sohle mit den Geschwindigkeitskomponenten höherer Ordnung verbunden. Es gibt aber auch Ansätze, die die Bildung des Riffsystems mit "infra-gravity" Wellen verknüpfen. Hier wird nur das erste bzw. innere Riff betrachtet, das in Verbindung mit den hydrodynamischen Vorgängen in der Brandungszone die bedeutenste Rolle zugewiesen wird. Zusätzlich tritt zwischen dem äußeren Riff und dem Strand zeitweilig ein Riff-Rinnen-System auf, das durch die Strandbrandung entsteht (Abb. 3.1).

An der Wasserlinie ist der Vorstrandbereich ("swash zone") mit einer relativ konstanten Neigung um etwa 1:15 bis zur Brechertiefe der Strandbrandung ausgebildet. Von dort fällt das Unterwasserprofil seewärts ab und geht mit einer steileren Hangneigung in die Rinne landwärts des inneren Riffes über. Der Seegang bewirkt auf dem Unterwasserprofil eine Verteilung des Sandes nach dessen Korngrößen. Dabei sind im Vorstrandbereich die gröbsten Körner anzutreffen. Von dort wird der Sand seewärts



<u>Abb. 3.1:</u> Typisches Küstenprofil mit innerem und äußerem Riff im Untersuchungsgebiet; hier im zentralen Buhnenfeld vor Warnemünde mit Meßbrücke

stetig bis zum landwärtigen Hang der Rinne feiner. In der Rinne selbst herrschen wiederum die Grobanteile des Sandes vor. Auf dem Riffkamm dagegen dominieren die Feinanteile des Sedimentes. Anschließend nimmt der Grobanteil seewärts erneut zu.

Die Position des Riffes wie auch die Kammhöhe variiert im Laufe eines Jahres beträchtlich. Wenn die Wellen am Riff brechen, steigt die Riffhöhe an, da das Riff im "Staubereich" der seewärts und landwärts gerichteten Strömungen liegt. Wenn die Umwandlung der Wellenenergie auf den Strandbereich konzentriert ist, ist die Rückströmung aufgrund des höheren Wellenstaues ("set-up") gegenüber der landwärtigen Komponente stärker, so daß der Riffkamm seewärts verlagert wird und zugleich in seiner Höhe abnimmt. Während der Dauer von strandaufbauenden langen Wellen wird der Riffkamm landwärts verschoben. Vor Kalifornien, am Ostende der Kieler Förde, betragen die Verlagerungen etwa 30 m, wohingegen die Höhenlage bis zu 0,5 m variiert und die höheren Riffkämme mit den strandnäheren Riffpositionen verknüpft sind. Bei lang anhaltenden "Dünungsverhältnissen" kann es sogar möglich sein, daß das Riff in den Strand "einläuft". Unter normalen Verhältnissen ist mit einer gewissen Bandbreite der Riffbewegung zu rechnen, die mit den mittleren Seegangs- und Wasserstandsschwankungen verknüpft ist. Ein Verbau der Küste mit durchlässigen Buhnen hat nun zur Folge, daß die Geschwindigkeit der küstenparallelen Strömung verlangsamt wird. Durch diese Verlangsamung wird die Wasserlinie seewärts verlagert und das Profil im Buhnenfeld insgesamt angehoben. Es entsteht eine flache Terrasse im Buhnenfeld, die mit einem seewärtigen Hang in die Rinne landwärts des ersten Riffes übergeht. Wenn die Buhnen, während der strandnahen Lage des Riffes, nur bis zur Rinne hinausragen, wird das natürliche Riffsystem nicht nennenswert durch die Buhnen beeinflußt. Diese Tendenzen sind durch vorliegende Naturdaten (KOLP, 1970) und Modellergebnisse (BAKKER et al., 1984) angedeutet und auf Abb. 3.2 schematisch dargestellt. Ein Vergleich der Profilvermessungen im zentralen Buhnenfeld vor Warnemünde aus dem Jahre 1990 (vor dem Buhnenbau) mit den Profilvermessungen von 1994 (drei Jahre nach dem Buhnenbau) zeigt den Profilanstieg im Buhnenfeld (Abb. 3.3).

Die Profilform der Terrasse ist als ein Mittelwert zu betrachten. Wenn die Wellen am Rand des seewärtigen Hanges der Terrasse brechen, entsteht dort ein "kleines" temporäres Riff mit einer landwärtigen Rinne. Dieses Riff-Rinnen-System kann, entsprechend den vorherrschenden Seegangsverhältnissen, in wenigen Stunden aufgebaut werden und ebenso schnell wieder verschwinden. Laufen die Wellen z.B. als Solitärwellen über die Terrasse wird das Sediment, aufgrund der hohen landwärts gerichteten Orbitalgeschwindigkeiten unter den Wellenkämmen, stoßweise landwärts verschoben. Das "kleine" Riff am Hang der Terrasse verschwindet, und die Wasserlinie wird seewärts verschoben. Dieser Vorgang bedeutet jedoch noch nicht unbedingt eine Nettoanlandung im Buhnenfeld. Diese ist zusätzlich noch von der Konzentration des Sandes in Suspension in Abhängigkeit vom Seegang und von der Größe des seewärtigen Transportes aus dem Buhnenfeld durch die Rückströmung abhängig.



<u>Abb. 3.2</u>: Vergleich der "Gleichgewichtsprofile" und küstenparallelen Geschwindigkeitsverteilungen an der Küste ohne und mit durchlässigen Pfahlbuhnen (schematisch)



<u>Abb. 3.3:</u> Profilvermessungen im zentralen Buhnenfeld vor Warnemünde vor dem Buhnenbau (1990) und nach dem Buhnenbau (1994)

3.2 Hypothesen zur Wirkungsweise der Pfahlbuhnen

Durchlässige Pfahlbuhnen sind in großer Zahl an der Südküste der Ostsee gebaut worden, und es besteht kein Zweifel, daß diese auch den Strand stabilisieren. Obwohl sie schon über 150 Jahre angewendet worden sind, gibt es bis heute noch keine rationale Erklärung zur Wirkungsweise der Pfahlbuhnen. Es ist die Aufgabe dieser Untersuchungen eine auf hydrodynamischen Prinzipien beruhende Erklärung der Wirkungsweise der Pfahlbuhnen aufzustellen und diese durch Meßdaten zu belegen.

Der eigenartige Charakter der durchlässigen Pfahlbuhnen zeichnet sich durch das Merkmal einer geradlinigen, durchgehenden Strandlinie von Buhnenfeld zu Buhnenfeld aus. Die Strandlinie verläuft vergleichbar derer an einer buhnenlosen Küste. Sie ist nicht sägezahnförmig, wie dies für undurchlässige Buhnen kennzeichnend ist. Die Wirkungsweise der durchlässigen Buhnen wurde von RAUDKIVI (1996) wie folgt beschrieben:

"Die durchlässigen Pfahlbuhnen wirken wie ein Strömungswiderstand auf die küstenparallele Strömung, die im Buhnenfeld etwa halbiert wird (KOLP, 1970). Da die Buhnen keinen nennenswerten Einfluß auf die Wellen ausüben, muß die Wirkung der Buhnen mit der Reduzierung der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der durchlässigen Buhnen verknüpft sein. Die anfängliche Anlandung in den Buhnenfeldern nach dem Buhnenbau, die zu einer Terrasse führt, könnte mit der Abnahme der küstenparallelen Geschwindigkeit im Buhnenfeld verknüpft sein. Dieses Argument erklärt jedoch nicht, warum die entstandene Terrasse langfristig stabil bleibt, obwohl die Terrasse von den erodierenden Sturmwellen, die immer nahezu senkrecht auf die Küste zulaufen und mit relativ geringen küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten verbunden sind, ähnlich wie dies bei einer buhnenlosen Küste der Fall ist, belastet wird."

Alle Buhnen sind mit der Erwartung gebaut worden, daß sie eine gewisse Menge Sand aus dem küstenparallelen Transport auffangen. Dieser Auffangprozeß ist jedoch ein zeitlich begrenzter Vorgang nach dem Buhnenbau. Im Laufe der Zeit wird die Kontinuität des Transportes an der Küste wieder hergestellt, d.h. die Menge, die in eine Küstenstrecke mit Buhnen einläuft, entspricht der Menge, die wieder heraustransportiert wird. Das Verhalten der Buhnenfelder wird dann nur noch durch den Küstenquertransport geprägt, wie dies auch an einer buhnenlosen Küste der Fall ist. Daher muß die Stabilität des Buhnenfeldes auf den veränderten Strömungszuständen beim Küstenquertransport beruhen.

Es ist allgemein bekannt, daß die Überlagerung einer Strömung mit der Wellenbewegung die scheinbare hydraulische Rauheit der Sohle beachtlich erhöht. Eine zunehmende hydraulische Rauheit wird zur einer erhöhten Turbulenz an der Sohle führen. Versuchsdaten aus dem Schrifttum deuten darauf hin, daß die turbulenten Schwankungen der Geschwindigkeiten der Strömung und der Wellenbewegung, d.h. die Turbulenzintensitäten, sich näherungsweise aufsummieren. Daraus läßt sich schließen, daß eine Reduzierung der küstenparallelen Geschwindigkeit die Turbulenz an der Sohle ebenfalls verringert.

Die Mobilisierung des Sandes ist von der Sohlschubspannung und der Turbulenzintensität abhängig. Der Bewegungsbeginn kann, wie auf Abb. 3.4 schematisch angedeutet, charakterisiert werden.



<u>Abb. 3.4:</u> Bewegungsbeginn als eine Funktion des zeitlichen Mittelwertes der Sohlschubspannung und der Turbulenzintensität (schematisch)

Aus der Darstellung ist zu erkennen, daß ein Korn entweder nur durch die Sohlschubspannung, wie dies in einer laminaren Strömung geschieht oder durch Turbulenz allein bewegt werden kann, wenn die Sohlschubspannung den Wert Null aufweist. Dies ist z.B. der Fall wenn eine Trennfläche in der Strömung wieder an die Sohle anschließt (vgl. Abb 3.9, RAUDKIVI, 1990). Die Sedimentkonzentration c(z) in einer Höhe z über der Sohle kann näherungsweise durch

$$c(z) = c_0 \cdot e^{-az}$$

mit:	c_0	Ξ	Bezugskonzentration an der Sohle
	a	=	Abnahmeparameter = w/ϵ_s
	٤ ₂	=	Impulsaustauschkoeffizient der Suspension
	0		(ähnlich der "eddy viscosity" ε)
	w	=	Sinkgeschwindigkeit
	Z	=	Höhe über der Sohle

ausgedrückt werden. Durch eine Abnahme der Turbulenz verringert sich der Impulsaustauschkoeffizient (ε_s), wodurch der Abnahmeparameter ($a=1/\varepsilon_s$) vergrößert wird. Damit wird die Sedimentkonzentration c(z) schnell (exponentiell) abnehmen, und die Dicke der suspendierten Sandschicht wird entsprechend dünner. Infolgedessen wird auch der seewärtige Transport durch die Rückströmung sehr schnell reduziert. Die Abnahme des seewärtigen Transportes wird noch weiter dadurch verringert, daß auch die Geschwindigkeit der Rückströmung in Sohlnähe geringer wird, womit die Summe der Suspension (c · u dz) über die Tiefe kleiner wird (Abb. 3.5). Bei Dünungsverhältnissen, d.h. bei landwärtigem Transport, erfolgt der Transport vorwiegend als Bodenfracht, die von der Turbulenz weniger beeinflußt wird.

Die Reduzierung der Turbulenz an der Sohle wird daher die "Grenze" zwischen dem see- und landwärtigen Transport zugunsten des landwärtigen Transportes verschieben und damit auf das Buhnenfeld eine stabilisierende Wirkung ausüben. Aufgrund der Durchströmung der durchlässigen Buhnen wird die Zirkulation (Strömungswalze) zwischen den Buhnen, wie sie sich in einem undurchlässigen Buhnenfeld zeigt, weitgehend aufgehoben und die küstenparallele Geschwindigkeit im Buhnenfeld reduziert, d.h. solange die Buhnen nicht so dicht geschlagen sind, daß sie die Entstehung von Rippströmen entlang der Buhnenflanken infolge des wellenerzeugten Wassertransportes verursachen. Die Charakteristiken der Zirkulation in den Buhnenfeldern der beiden Buhnentypen sind auf Abb. 3.6 schematisch dargestellt. Es wird weiterhin davon ausgegangen, daß, im Gegensatz zu den undurchlässigen Buhnen bei durchlässigen Pfahlbuhnen, die Bildung von Strömungswalzen nur auf die "Trennfläche" im Bereich der Streichlinie konzentriert ist und sich dort, als Folge des erheblich geringeren Geschwindigkeitsunterschieds, nur eine Reihe von kleineren Wirbeln ausbildet.



<u>Abb. 3.5:</u> Suspensionskonzentrationsverteilung (links) und Rückstromgeschwindigkeit (rechts) über der Sohle (schematisch)



<u>Abb. 3.6:</u> Charakteristiken der von der küstenparallelen Strömung verursachten Zirkulation in den Buhnenfeldern der undurchlässigen Buhnen (links) und der durchlässigen Pfahlbuhnen (rechts)

Zusammenfassend können die Hypothesen zur Wirkungsweise von durchlässigen Pfahlbuhnen wie folgt ausgedrückt werden:

- Die Pfahlbuhnen haben keinen nennenswerten Einfluß auf die Wellen im Buhnenfeld.
- Die Pfahlbuhnen wirken wie ein Strömungswiderstand auf die küstenparallele Strömung, wodurch die Geschwindigkeit dieser Strömung im Buhnenfeld reduziert wird.
- Die Reduzierung der den wellenerzeugten Orbitalgeschwindigkeiten überlagerten küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten wird zur Abnahme der an der Sohle erzeugten Turbulenz führen.
- Die Suspension des Sandes ist eine Funktion der Orbitalgeschwindigkeiten und der Turbulenz. Die Strömung allein hat nur eine Transportfunktion.
- Die Suspensionsverteilung, die durch $c(z)=c_0 \exp \left[-(w/\epsilon_s)z\right]$ charakterisiert ist, wird mit abnehmender Turbulenz (ϵ_s) schnell verringert und zugleich die Schichtdicke der Suspension über der Sohle reduziert.
- Die Reduzierung der Suspension und deren Schichtdicke wird den durch die Rückströmung verursachten seewärtigen Quertransport verringern.
- Der Aufbau einer Unterwasserterrasse im Buhnenfeld durch die Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit und der Turbulenz bewirkt, daß das Unterwasserprofil weniger empfindlich auf den Seegang reagiert und die Wellenenergie gleichmäßiger über einen breiteren Bereich, verglichen mit dem buhnenlosen Zustand, umgewandelt wird.
- Das Durchströmen der Buhnen wirkt der Ausbildung einer großräumigen Zirkulation im Buhnenfeld und einem Rippstrom entlang der Buhnenflanken entgegen, was die Ausräumung des Buhnenfeldes reduziert.

3.3 Das Forschungsprogramm

Die komplizierten Wechselwirkungen zwischen den hydrodynamischen Kräften und der Morphologie in der Brandungszone sind im allgemeinen bislang nur teilweise erfaßt worden, so daß eine analytische Lösung des Problems der Wirkungsweise von durchlässigen Pfahlbuhnen in absehbarer Zeit nicht zu erwarten ist. Ein Nachweis der vorgenannten Thesen kann daher nur durch Naturuntersuchungen, d.h. auf empirischem Wege, vorgenommen werden. Aus Erfahrungen hierzu ist aber bekannt, daß jedes Meßergebnis aus der Natur immer nur eine Momentaufnahme der zufällig vorherrschenden Konstellationen von angreifenden Kräften, wie Wind, Seegang und Wasserstand und den dadurch hervorgerufenen Reaktionen, wie Strömungen und Sedimentbewegung, darstellen. Durch die Ansammlung von möglichst lückenlosen Meßdaten über mehrere Jahre kann daher nur erhofft werden, daß die Bandbreiten aller physikalischen Prozesse, in diesem Falle im Küstenvorfeld mit und ohne Buhnen, die in dieser Zeit aufgetreten sind und ohne Meßgerätestörungen bzw. -ausfälle erfaßt wurden.

Das Buhnensystem vor Warnemünde wurde für den Nachweis der Wirkungsweisen von durchlässigen Buhnen auf der Grundlage von Naturmessungen ausgewählt (Abb. 3.7 und 3.8). Die Vorgehensweise zur Untermauerung der Thesen zur Wirkungsweise von durchlässigen Buhnen durch hydrodynamische und morphologische Messungen, kann wie folgt zusammengefaßt werden.

Als Referenzprofil für alle anderen Meßwerte aus dem Buhnensystem wurde ein Profil am buhnenlosen Küstenabschnitt, etwa 140 m westlich des Buhnensystems, ausgewählt und mit Meßgeräten ausgerüstet. Das Buhnenfeld 2-3, typisch für die Anordnung der Buhnen, die über die ganze Länge durchlässig (10-25 cm lichter Pfahlabstand) sind, stellt das erste Versuchsfeld dar. Das zweite Versuchsfeld ist das Buhnenfeld 5-6. Diese Buhnen sind über die ersten 70 m, vom Strand in Richtung See, dicht gerammt. Die seewärtig anschließende Strecke von rd. 50 m Länge ist mit 10-15 cm lichtem Pfahlabstand gebaut worden. Das Buhnenfeld 7-8 mit der Meßbrücke stellt das zentrale Meßfeld dar und wurde entsprechend mit einer Anzahl von Meßsensoren bestückt, wobei die Meßbrücke als Meßgeräteträger sowie als Zugangsmöglichkeit in das Buhnenfeld genutzt werden konnte, was sich als äußerst vorteilhaft erwies.



<u>Abb. 3.7:</u> Küstenabschnitt zwischen Geinitz Ort und der Westmole des Seekanals nach Rostock mit dem Buhnensystem vor Warnemünde (Luftaufnahme vom 20.05.1992; StAUN Rostock)



<u>Abb. 3.8:</u> Ausschnittsvergrößerung zur Veranschaulichung des Küstenvorfeldes mit 12 Buhnen (Luftaufnahme vom 20.05.1992; StAUN Rostock)

Nach Wiederherstellung des Buhnenfeldes 7-8, aufgrund von Zerstörungen (Wurmbefall und Eiswinter) mit ausschließlich dicht gerammten Pfählen über die gesamte Buhnenlänge im Oktober 1995, wurden dann auch in diesem Buhnenfeld weitere Untersuchungen im bisherigen Rahmen durchgeführt.

Diese Programmvorstellung setzte voraus, daß diese vier Meßfelder eine ausreichende Sandauflage aufweisen, so daß morphologische Umlagerungen ungestört stattfinden können.

Die Zielsetzung des zugehörigen Meßprogrammes war auf folgende Schwerpunkte ausgerichtet:

- Ermittlung der Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in den drei Buhnenfeldern und an der buhnenlosen Küste in Abhängigkeit vom Seegang.
- Erfassung der Änderungen des Unterwasserprofils als eine Funktion des Seeganges.

Die Hauptseegangsdaten wurden über die Dauer des Forschungsvorhabens von den Meßstationen im Profil längs der Meßbrücke zwischen Buhne 7 und 8 geliefert, d.h. von den Stationen 305 m, 155 m und 115 m (vgl. Abb. 3.8). An diesen Stationen sind ebenfalls Geschwindigkeitssonden angebracht, so daß von dort auch Meßwerte seewärts der Buhnenfelder aufgezeichnet werden konnten.

Mit Hilfe solcher Meßdaten wurde erwartet, die Wechselwirkungen zwischen hydrodynamischen Einflüssen und der Unterwassermorphologie in den Buhnenfeldern mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten der Buhnen erfassen und verknüpfen zu können.

4. Hydrodynamische und hydrologische Randbedingungen der einwirkenden Umweltparameter im Untersuchungszeitraum 1993 bis 1996

4.1 Vorbemerkung

In Abschnitt 3.3 wurde dargelegt, daß die Hypothesen zur Wirkungsweise von durchlässigen Pfahlbuhnen nicht analytisch überprüft werden können und ein Nachweis daher nur auf empirischem Wege, hier über umfassende Naturmessungen, angestrebt wurde. Für das Naturmeßprogramm wurde das Buhnensystem vor Warnemünde (vgl. Abb. 3.7 und 3.8) ausgewählt. Kenntnisse über den Wasserstand, den Wind sowie den Seegang und über die daraus resultierenden Sekundärwirkungen von drift- und wellenerzeugten Küstenquer- und Küstenlängsströmungen sind die Voraussetzungen für die Analyse und Bewertung von morpho- und sedimentdynamischen Prozessen im Küstenvorfeld und an der Küste. Aber auch der Einfluß von menschlichen Einbauten sowie deren Wechselwirkungen mit den vorgenannten Prozessen sind von Bedeutung.

Das Forschungsvorhaben wurde im Mai 1993 begonnen und bis zum 31.10.1997 bearbeitet. In diesem Zeitraum wurden kontinuierlich, d.h. in Intervallen von 2 Stunden, Seegangs- und Strömungsmessungen im Untersuchungsgebiet vor Warnemünde durchgeführt und die Meßdaten im Hinblick auf charakteristische Kenngrößen ausgewertet. Auf fortlaufende Wasserstandsregistrierungen am Pegel Warnemünde konnte ebenfalls zurückgegriffen werden. Das ermittelte Datenmaterial erlaubt einerseits die Zuordnung von Veränderungen im Küstenvorfeld zu den sie hervorrufenden äußeren Einflußparametern während des Untersuchungszeitraumes und ermöglicht andererseits eine Antwort auf die Fragestellung, ob die im Untersuchungszeitraum aufgetretenen Wind-, Seegangs- und Wasserstandsverhältnisse als repräsentativ für das Langzeitgeschehen in diesem Küstenabschnitt eingestuft werden können. In diesem Fall können alle gewonnenen Erkenntnisse als allgemein aussagefähig für das betreffende Untersuchungsgebiet angesehen werden. Dazu konnte zusätzlich auf Langzeitstatistiken der angreifenden Kräfte, die vom StAUN Rostock zur Verfügung gestellt wurden, zurückgegriffen werden. Hierauf wird im Folgenden zunächst eingegangen.

4.2 Wasserstände und Sturmfluten

Wasserstandsbeobachtungen bzw. -aufzeichnungen am Pegel Warnemünde liegen seit 1872 vor. In Tab. 4.2 (links) sind chronologisch alle Hochwasserereignisse mit einem Scheitelwasserstand über NN +1,20 m aufgelistet. Tab. 4.2 (rechts) zeigt die Zusammenstellung dieser 29 Ereignisse geordnet nach deren Eintrittshöhen.

Entsprechend der Klassifikation von Sturmfluten in Mecklenburg-Vorpommern sind danach im Beobachtungszeitraum von 125 Jahren (1872 bis 1996) folgende Anzahlen an Sturmfluten am Pegel Warnemünde aufgetreten (Tab. 4.1):

<u>Tab. 4.1:</u> Einteilung und Anzahl der Sturmfluten an der Außenküste von Mecklenburg-Vorpommerns im Zeitraum 1872 bis 1996

Sturmfluten	Häufigkeit des Auftretens	Hochwasser [mNN]	Hochwasser [mPN]	Anzahl
schwere Sturmfluten	zwischen 1mal in 5 Jahren und 1mal in 20 Jahren	1,41 - 1,70	6,41 - 6,70	8
sehr schwere Sturmfluten	weniger als 1mal in 20 Jahren	> 1,70	> 6,70	3

Schon bei Wasserstanderhöhungen von NN +1,0 m treten bereits allgemein nennenswerte morphologische Umlagerungen im Küstenvorfeld auf, die bei noch höheren Wasserständen überproportional zunehmen. Wasserstände über NN +1,0 m treten im Mittel alle 1 bis 2 Jahre auf. Das zeitliche Auftreten der jährlich höchsten Hochwasserereignisse (HW) \geq NN +1,0 m im Untersuchungszeitraum 1972 bis 1996 veranschaulicht Abb. 4.1 (unten). Am Beispiel weiterer Horizonte (HW \geq NN +1,25 m (Mitte) und HW \geq NN +1,50 m (oben)) zeigt sich eine "Ausdünnung", d.h. die relativ starke Abnahme der höchsten Scheitelwasserstände im Hinblick auf schwere und sehr schwere Sturmfluten (HW \geq NN +1,25 m). Aus den Auftragungen ist keine Trendentwicklung im Hinblick auf eine Veränderung, z.B. eine Erhöhung von Extremwasserständen in den letzten Jahrzehnten, wie z.B. von der deutschen Nordseeküste bekannt (vgl. FÜHRBÖTER und DETTE, 1992), ersichtlich. Hinsichtlich der Häufigkeit von Extremwasserständen (Anzahl von HW-Ereignissen \geq NN +1,0 m) deutet sich hingegen eine Zunahme in jüngster Zeit an (Abb. 4.2).

Lfd. Nr.	Datum	HW eingetreten (chronologisch)	Lfd. Nr.	Datum	HW eingetreten (geordnet)	Klassifikation der Sturmfluten
-		[cm NN]	-	-	[cm NN]	-
1	13.11.1872	243	1	13.11.1872	243	
2	05.12.1883	122	2	30.12.1913	189	sehr
3	25.11.1890	148	3	31.12.1904	188	Sturmfluten
. 4	19.04.1903	125	4	04.01.1954	170	
5	31.12.1904	188	5	03.11.1995	<u>162</u>	+)
6	09.01.1908	142	6	09.01.1914	160	
7	30.12.1913	189	7	07.11.1921	150	
8	09.01.1914	160	7	02.03.1949	150	schwere
9	07.11.1921	150	7	12.01.1968	150	Sturmfluten
10	20.01.1940	120	10	25.11.1890	148	
11	27.12.1941	130	11	09.01.1908	142	
12	13.01.1941	129	12	12.01.1987	140	
13	02.03.1949	150	13	14.12.1957	135	
14	11.12.1949	129	14	25.11.1955	133	
15	04.01.1954	170	15	28.11.1983	132	
16	25.11.1955	133	16	27.12.1941	130	
17	14.12.1957	135	17	13.01.1946	129	
18	10.12.1960	121	17	11.12.1949	129	leichte
19	12.01.1968	150	17	21.02.1993	129	Sturmiluten
20	29.12.1971	121	20	04.01.1976	128	
21	04.01.1976	128	21	15.12.1979	127	
22	15.12.1979	127	21	<u>03.01.1995</u>	<u>127</u>	+)
23	28.11.1983	132	23	30.11.1988	126	
24	19.12.1986	125	24	19.04.1903	125	
25	12.01.1987	140	24	19.12.1986	125	
26	30.11.1988	126	26	05.12.1883	122	
27	21.02.1993	129	27	10.12.1960	121	
28	03.01.1995	127	27	29.12.1971	121	
29	03.11.1995	162	29	20.01.1940	120	
	+) Eintritt im	Untersuchungszeitraum	1			

<u>Tab. 4.2:</u> Extremwasserstände von Sturmfluten (HW ≥NN +1,2 m) am Pegel Warnemünde im Zeitraum 1872 bis 1996 (STIGGE, 1994 und 1996)



<u>Abb. 4.1:</u> Pegel Warnemünde: jährlich höchste Hochwasserscheitelstände bei Sturmfluten im Zeitraum 1872 bis 1996; <u>oben:</u> HW ≥NN +1,5 m, <u>Mitte:</u> HW ≥NN +1,25 m, <u>unten:</u> HW ≥NN +1,0 m (Daten: STIGGE 1994 und 1996)



<u>Abb. 4.2:</u> Pegel Warnemünde: jährliche Anzahl von HW-Ereignissen ≥ NN+1,00 m im Zeitraum 1872 bis 1996 (Daten: STIGGE, 1994 und 1996)

Im Untersuchungszeitraum 1993 bis 1996 ist eine schwere (03.11.1995) und eine leichte Sturmflut (03.01.1995) aufgetreten (vgl. Tab. 4.2). Durch das Auftreten dieser Extremereignisse, die meßtechnisch erfaßt wurden, konnten auch Kennwerte über die Größenordnungen der Wirkparameter bei derartigen Zuständen in die Untersuchungen einbezogen werden.

Die jährlichen Unterschreitungshäufigkeiten der Wasserstände in einzelnen Höhenbereichen im Untersuchungszeitraum (10/93 - 09/96) sind mit Angabe des jeweils höchsten und niedrigsten Wasserstandes im Jahr in Abb. 4.3 zusammengestellt. Hieraus ist ersichtlich, daß sich die Wasserstandsverhältnisse in den einzelnen Untersuchungszeiträumen nicht nennenswert unterscheiden.

4.3 Windstatistik im Untersuchungszeitraum im Vergleich zur längerfristigen Windstatistik

In der nahezu tidefreien Ostsee sind die winderzeugten Wellen die Ursachen aller morphologischen Änderungen der Küste und des Unterwasserstrandes. Der Wind allein bewirkt den natürlichen Aufbau der Dünen.



<u>Abb. 4.3:</u> Pegel Meßbrücke-Warnemünde: jährliche Unterschreitungshäufigkeiten der Wasserstände in Prozent; <u>oben:</u> 10/93 bis 09/94, <u>Mitte:</u> 10/94 bis 09/95, <u>unten:</u> 10/95 bis 09/96

Für Warnemünde lag eine Langzeitstatistik für den Zeitraum von 1948 bis 1984 vor, die als 16-teilige Windrose auf Abb. 4.4 dargestellt ist. Es ist daraus ersichtlich, daß die häufigsten Winde innerhalb des Sektors W bis NO, aus dem der Seegang auf die Küste vor Warnemünde anläuft, aus den Richtungen W, WNW und NW wehen.



<u>Abb. 4.4:</u> Meßstation Warnemünde: Verteilung der mittleren jährlichen Windhäufigkeit des Zeitraumes 1948 bis 1984 auf die 16-teilige Windrose mit Klassifikation der Windstärken nach Beaufort (Daten: StAUN ROSTOCK)

Eine weitere 15-jährige Windstatistik für den Zeitraum 1980 bis 1994 ist von der Meßstation "Seestraße" in Warnemünde verfügbar. Die mittlere jährliche Verteilung der prozentualen Häufigkeit des Windes auf die 16-teilige Windrose, unterteilt nach den einzelnen Bft-Windstärken zeigt Tab. 4.3 (oben) und für den Untersuchungszeitraum 10/1993 bis 12/1996 Tab. 4.3 (unten). Die Gegenüberstellung läßt erkennen, daß die mittleren jährlichen Häufigkeiten in beiden Zeitreihen sowohl hinsichtlich der Windstärken als auch hinsichtlich deren Verteilung auf die Windrose größenordnungsmäßig übereinstimmen. Danach kann davon ausgegangen werden, daß auch die im Untersuchungszeitraum aufgezeichneten Windverhältnisse das Langzeitgeschehen repräsentieren.

WARNEMÜNDE

Zeitraum: 01.01.1980 bis 31.12.1994

								Windri	chtung				·····				W'stille	Gummo
in Bft	NNO	NO	ONO	0	oso	SO	SSO	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	uml.Wind	[%]
Windstille																	0.00	0.00
< 3	1.12	1.28	1.63	2.30	3.13	3.77	3.95	4.20	3.86	3.23	2.00	1.56	1.61	1.36	1.22	1.14	0.00	37.36
3	0.90	1.03	0.85	1.24	2.03	2.62	2.19	2.29	3.02	3.24	2.66	1.92	2.05	1.20	0.79	0.75	0.00	28.76
4	0.89	0.69	0.38	0.46	0.66	0.89	0.68	0.81	1.38	1.80	2.77	2.89	2.48	1.31	0.74	0.75	0.00	19.56
5	0.36	0.27	0.12	0.05	0.07	0.06	0.05	0.11	0.16	0.29	1.01	2.20	2.14	0.98	0.57	0.46	0.00	8.89
6	0.13	0.11	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.20	0.97	1.41	0.62	0.28	0.24	0.00	4.08
7	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.26	0.49	0.18	0.04	0.02	0.00	1.08
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.10	0.04	0.01	0.00	0.00	0.24
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
> 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Summe in %	3.42	3.41	3.01	4.04	5.90	7.34	6.86	7.42	8.45	8.60	8.67	9.87	10.30	5.70	3.65	3.37	0.00	100.00

Prozentuale Häufigkeitsverteilung von stündlichen Mittelwerten der Windstärke und der dominierenden stündlichen Windrichtung

Zeitraum: 01.10.1993 bis 31.12.1996

Prozentuale Häufigkeitsverteilung von stündlichen Mittelwerten der Windstärke und der dominierenden stündlichen Windrichtung

Windstärko								Windri	chtung								W'stille	Cummo
in Bft	NNO	NO	ONO	0	oso	SO	SSO	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	uml.Wind	[%]
Windstille																	0.00	0.00
< 3	0.86	0.78	0.85	1.36	2.79	3.66	5.17	4.26	5.28	2.96	1.19	0.95	1.19	0.97	0.95	0.82	0.00	34.04
3	1.02	0.98	0.92	1.67	3.56	2.14	2.15	1.52	3.19	3.16	2.40	1.61	1.69	1.09	0.74	0.57	0.00	28.40
4	0.99	1.15	0.92	1.78	2.42	0.49	0.45	0.38	0.81	1.62	2.87	2.44	2.07	1.34	0.75	0.65	0.00	21.12
5	0.68	0.70	0.52	0.36	0.19	0.01	0.01	0.01	0.07	0.21	1.29	2.63	1.75	0.92	0.45	0.58	0.00	10.37
6	0.23	0.34	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.28	1.57	1.27	0.46	0.22	0.27	0.00	4.74
7	0.05	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.29	0.41	0.15	0.06	0.04	0.00	1.11
8	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.11	0.01	0.01	0.00	0.00	0.22
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
> 10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Summe in %	3.84	4.02	3.31	5.18	8.95	6.29	7.77	6.17	9.34	7.95	8.04	9.57	8.48	4.95	3.18	2.94	0.00	100.00

4.4 Windverhältnisse im Untersuchungszeitraum

Die Windverhältnisse in einem Küstengebiet charakterisieren zugleich auch das zugehörige Seegangsklima. Winddauer und Windstärke aus einem zugehörigen seegangswirksamen Sektor bestimmen den Seegang (Wellenhöhen und Perioden) für einen Küstenabschnitt. Vor Warnemünde kennzeichnen die auflandigen Windrichtungen aus dem Sektor W bis NO annähernd die Wellenanlaufrichtungen im Tiefwasserbereich, in dem der Prozeß der Refraktion noch nicht wirksam wird. In den Zwischenberichten zum Forschungsvorhaben wurden die Auswertungen der Windaufzeichnungen im Untersuchungszeitraum detailliert dokumentiert. Die wichtigsten Ergebnisse werden nachfolgend zusammengefaßt. Sie kennzeichnen die Größenordnung der Windverhältnisse vor Warnemünde.

Normalwindlagen (< 10 m/s) stellen die dominierende Windsituation innerhalb eines Jahres dar. Starkwindlagen (10 m/s bis 15 m/s) und "Extremwindlagen" (> 15 m/s) nehmen einen wesentlich geringeren Anteil ein. Im Einzelnen wurden folgende jährliche Windhäufigkeiten aus dem seegangswirksamen Windsektor W bis NO für die vorgenannten Windstärkeklassen ermittelt (Tab. 4.4).

Zeitraum			Win	dlagen			
	normal (•	< 10 m/s)	stark (10	- 15 m/s)	extrem (> 15 m/s)		
	[Std.]	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]	[%]	
10/93 - 09/94	8160	93,1	530	6,1	70	0,8	
10/94 - 09/95	7920	90,4	790	9,0	55	0,6	
10/95 - 09/96 8230		94,0	490	5,5	40	0,5	

<u>Tab. 4.4:</u> Häufigkeit von Normal-, Stark- und Extremwindlagen an der Seebrücke vor Warnemünde im Untersuchungszeitraum 10/93 bis 09/96

In Tab. 4.5 sind getrennt nach einzelnen Jahren im Untersuchungszeitraum die Anzahl aller aufgetretenen Stark- und Extremereignisse in Abhängigkeit von der Dauer der einzelnen Windereignisse zusammengestellt. Als Kriterium wurde eine Mindestgeschwindigkeit von 10 m/s, die mehr als 3 Stunden andauerte, zugrundegelegt. Tab. 4.5:Anzahl der Starkwindereignisse ($\bar{u} \ge 10 \text{ m/s}$, $\Delta t \ge 3 \text{ h}$) im
Untersuchungszeitraum 10/93 bis 09/96 in Abh. von der
Dauer; seegangswirksame Sektoren SW bis ONO

Meßs	tatio	n Warn	emünd	e (Ok	t. 19	93 bi:	s Sep	t. 199	94)	
Wind-	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
Dauer										
>20 1	2		6	3	1				1	1
16-20 1	2		3	2						
11-15 1	n		2	1	2				1	
6-10 1	n		5	4				1	3	
0-5 1	<u>1</u>		4	4		1		2	2	1
	Sekt	ion		A				В		

Meßstation Warnemünde (Okt. 1994 bis Sept. 1995) Wind- SW WSW W NW NW NNO NO ON Dauer										
Wind-	SW	wsw	W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
Dauer										
>20 h			5	2	6		1	1		Γ
16-20 h			5	2	2					
11-15 h		2	3	4						
6-10 h		2	6	4	2	3			2	
0-5 h			3	2	1				1	
	Sekti	.on		A		В				T

Meßs	tation	Warn	emünd	e (Ok	t. 19	95 bi	s Sep	t. 19	96)	
Wind-	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
Dauer										
>20 1	·		3	3	2		1	1	2	
16-20 ł	-			1			1		1	
11-15 ł			1	3						
6-10 ł	·		1		1			1	1	1
0-5 ł			2	3	1	2	2	2	1	
	Sekt	on		A				в		

<u>Tab. 4.6:</u> Häufigkeit von Wasserständen zu Beginn der Starkwindereignisse im Zeitraum 10/93 bis 09/96; seegangswirksame Sektoren SW bis ONO

Meßsta	tion	Warne	münde	(Okt	. 199	3 bis	Sept	. 1994	1)	
Wasserstand	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
[cmPN] 560~579									1	1
540~559				1				1	1	
520-539			3	4		1		1	4	1
500-519			4	6	3			1	1	
480~499			5	1						
460-479	1		4	1						
440-459			4							
420-439										
Se		A			В					

Meßsta	tion	Warne	münde	(Okt	. 1994	4 bis	Sept	. 1995	5)	
Wasserstand	SW	wsw	W	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
[cmPN] 560-579							1			
540-559					1	2		1		
520-539			2	7	2	1			2	
500-519			7	3	3					
480-499		1	7	3	4				1	
460-479		2	4	1	1					
440-459		1	2							
420-439										
Sektion				A				в		

Meßstation Warnemünde (Okt. 1995 bis Sept. 1996)										
Wasserstand	SW	wsw	w	WNW	NW	NNW	N	NNO	NO	ONO
[cmPN] 560-579								1	1	
540-559					1			1		
520-539				2			2	1	2	1
500-519			2	3	2	1	2	1	2	
480-499			2	4	1					
460-479						1				
440-459			1	1						
420-439			2							
Sektion			A				в			

Daraus geht z.B. hervor, daß Starkwindereignisse mit einer Dauer von mehr als 20 Stunden nicht ungewöhnlich sind. Aus der Auswertung ist ferner ersichtlich, daß sich die Windhäufigkeit auf zwei Sektoren, die zugleich die Richtung der küstenparallelen Strömungen vor Warnemünde bestimmen, konzentriert. Der Sektor A umfaßt die Richtungen W-NW und der Sektor B die Richtungen N-NO (Abb. 4.5).



<u>Abb. 4.5:</u> Kernrichtungen der Windlagen (Sektor A und B), in denen signifikante Seegangsverhätnisse bei Starkwindphasen (mit $\bar{u} > 10$ m/s, $\Delta t > 3$ h) im Untersuchungszeitraum 10/93-09/96 auftraten Die Zahl aller Stürme aus den Sektoren A und B ergibt sich wie folgt (Tab. 4.7):

Zeitraum	Starkwindereignisse ($\bar{u} \ge 10$ m/s, $\Delta t \ge 3$ Std.)				
	Sektor A	Sektor B			
	Anzahl	Anzahl			
10/93 - 09/94	37	10			
10/94 - 09/95	47	5			
10/95 - 09/96	21	13			
Mittel	35	9			

<u>Tab. 4.7:</u> Anzahl von Starkwindereignissen aus den Sektoren A und B im Untersuchungszeitraum 10/93 bis 09/96

In dieser Statistik sind auch die Extremwindereignisse ($\bar{u} \ge 15$ m/s) enthalten und werden daher in Tab. 4.8 noch einmal gesondert aufgeführt:

<u>Tab. 4.8:</u> Anzahl von Extremereignissen aus den Sektoren A und B im Untersuchungszeitraum 10/93 bis 09/96

Zeitraum	Extremwindereignisse ($\bar{u} \ge 15 \text{ m/s}, \Delta t \ge 3 \text{ Std.}$))					
		Sektor A	Sektor B			
	Anzahl Maximalereignis		Anzahl	Maximalereignis		
10/93 - 09/94	9	20,5 m/s aus WNW	1	16,0 m/s aus N		
10/94 - 09/95	10	22,0 m/s aus W	-	-		
10/95 - 09/96	2 16,5 m/s aus WNW		2	20,0 m/s aus N		
Mittel	7	19,5 m/s	1	18,0 m/s		

Aufgrund der vorliegenden Daten kann davon ausgegangen werden, daß die im Untersuchungszeitraum aufgetretenen Windverhältnisse das langfristige Windspektrum vor Warnemünde repräsentieren. Auffällig ist, daß Windereignisse aus dem nordwestlichen Bereich (Sektor A) im Mittel etwa viermal häufiger als aus dem östlichen Bereich (Sektor B) vorherrschen (vgl. Tab. 4.7).

4.5 Verknüpfung von Wind, Wasserstand und Seegang

Die Verknüpfung der Windstatistik mit der Wasserstandsstatistik (Pegel Meßbrücke Warnemünde) veranschaulicht, wie sich die Starkwindereignisse auf die zugehörigen Wasserstände verteilen (Tab. 4.6). Im Sektor A konzentriert sich die Mehrzahl aller Ereignisse auf den mittleren Wasserstandsbereich (NN $\pm 0,2$ m). Die übrigen Ereignisse verteilen sich sowohl auf den Niedrigwasserbereich (NN -0,8 m bis NN -0,2 m) als auch auf den erhöhten Wasserstandsbereich (NN $\pm 0,2$ m bis NN $\pm 0,2$ m). Im Sektor B hingegen bewirken die Mehrzahl aller Ereignisse erhöhte Wasserstände (NN $\geq +0,2$ m).

Die Frage nach den Wellenhöhen, die durch die vorgenannten Stark- und Extremwindverhältnisse im strandnahen Bereich vor Warnemünde hervorgerufen wurden, konnte mit Hilfe der Meßdaten aus den laufenden Seegangsmessungen, z.B. vor Kopf der Meßbrücke, beantwortet werden. Tab. 4.9 veranschaulicht, welche Starkwindereignisse im Untersuchungszeitraum zu Wellenhöhen über bzw. unter $H_{m0} = 1,0$ m geführt haben. Daraus ist u.a. ersichtlich, in welchem Maße die Küste durch Wellen aus den verschiedenen Anlaufrichtungen belastet wird. Im Einzelnen ergibt sich für die jeweiligen Untersuchungsjahre folgende Verteilung der Starkwindereignisse ($\bar{u} \ge 10$ m/s, $\Delta t \ge 3$ Std.) in den Klassen über und unter $H_{m0} = 1,0$ m.

<u>Tab. 4.9:</u>	Verknüpfung der Starkwindereignisse im Untersuchungszeitraum 10/93 bis
	09/96 aus den Sektoren A und B mit zugehörigen Seegangsparametern

Verknüpfung der Starkwindereignisse aus den Sektoren A und B mit der zugehörigen Seegangsintensität							
Zeitraum	Sekt	Sekt	Sektor B				
	H _{m0} < 1 m	$H_{m0} \ge 1 m$	H _{m0} < 1 m	$H_{m0} \ge 1 m$			
10/93 - 09/94	28	9	2	8			
10/94 - 09/95	28	19	3	2			
10/95 - 09/96	14	7	3	10			
Mittel	23	12	3.	7			

Einen Überblick über die prozentualen Eintrittshäufigkeiten von bestimmten Wellenhöhen (H_{m0}), aufgeteilt in Klassen von je 0,2 m Wellenhöhe, vermittelt Abb. 4.6 für die drei Untersuchungsjahre. Die H_{m0} (50 %) - Wellenhöhe schwankte danach zwischen 0,23 m bis 0,30 m. Obwohl im 3. Untersuchungsjahr mit H_{m0} (max) = 2,2 m die höchste Welle während der Nov.'95 - Sturmflut im Untersuchungszeitraum gemessen wurde, fällt auf, daß die Häufigkeit aller Wellen über $H_{m0} = 0,6$ m in diesem Jahr gegenüber den Vorjahren geringer ist.

Die Gegenüberstellung von Wind, Wasserstand und Seegang, beispielhaft in Abb. 4.7 für drei Starkwindereignisse mit Wasserständen zwischen NN -0,5 m und NN +0,8 m im Januar 1994 dargestellt, veranschaulicht, wie diese Einflußparameter miteinander verknüpft sind. Es zeigt sich an diesem Beispiel, daß der Wind bzw. die Windrichtung die maßgebende Einflußgröße ist. Mit Beginn der Stürme, die in wenigen Stunden Windgeschwindigkeiten zwischen 15 m/s und 20 m/s erreichen, nehmen mit einer kurzen Phasenverschiebung die Wellenhöhen, hier bis zu H_{m0} = 1,6 m (28./29. Jan. 1994), zu. Die bei den Stürmen 1 und 3 vorherrschenden Westwinde führten zu keinen nennenswerten Wasserstandserhöhungen über den Mittelwasserstand hinaus. Der NW-Wind bei Sturm 2 mit dazugehörigen Windgeschwindigkeiten um 20 m/s bewirkte dagegen einen Wasserstandsanstieg bis auf etwa NN +0,8 m.

Durch die Anwendung von Seegangsvorhersageverfahren können bekanntlich unter Verwendung von Winddaten die zugehörigen Wellenhöhen rechnerisch ermittelt werden. Langzeitwinddaten, wie z.B. von Warnemünde (vgl. Abb. 4.4, Zeitraum 1948 -1984) ermöglichen Aussagen über das mittlere langjährige Wellenklima im Untersuchungsgebiet und erlauben auf diese Weise zugleich auch die Einordnung des Wellenklimas während der einzelnen Untersuchungsjahre in das Langzeitgeschehen.

Um einen Anhalt über die im Seegebiet vor Warnemünde zu erwartenden Wellenhöhen in Abhängigkeit vom Wind zu bekommen, wurde das bekannte Wellenvorhersageverfahren von BRETSCHNEIDER angewendet. Für die seegangswirksamen Windsektoren W bis NO wurden die entsprechenden Wellenhöhen und -perioden für Windgeschwindigkeitsklassen (0-5 m/s, 5-10 m/s, 10-15 m/s und >15 m/s) mit der jeweils mittleren Wassertiefe über die Streichlänge des Windes (Fetch) ermittelt.



<u>Abb. 4.6:</u> Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen H_{m0} an der Station 153 m vor Warnemünde im Zeitraum von 10/93 bis 09/96



<u>Abb. 4.7:</u> Beispielhafte Gegenüberstellung von Wind, Wasserstand und Seegang von drei Stürmen im Januar 1994
Abb. 4.8 veranschaulicht die Streichlängen des Windes für den Küstenbereich Warnemünde in der Mecklenburger Bucht. Die Ergebnisse der Berechnungen von Wellenhöhen und -perioden sind in Tab. 4.10 zusammengefaßt. Für die Extremwindereignisse $(\bar{u} \ge 15 \text{ m/s})$ im Jahre 1995 sind, beispielhaft zu den Winddaten, die an der Station 153 m gemessenen Wellenkennwerte zusammengestellt (Tab. 4.11). Unter Berücksichtigung, daß der Seegang bei den Maximalereignissen, infolge Refraktion und Shoaling sowie teilweises Brechen der höchsten Wellen, an der küstennahen Station (Tiefe etwa NN -2,5 m) gegenüber dem Seegang im tieferen Wasser (etwa 10 m Wassertiefe) gedämpft wurde, zeigt sich, daß das Wellenvorhersageverfahren für die Wellenanlaufrichtungen WNW - NNO realistische Werte liefert. Lediglich die Wellenhöhen aus West werden in der Vorhersage überschätzt, was allerdings durch die Annahmen beim Vorhersageverfahren bedingt ist.



<u>Abb. 4.8:</u> Fetchlängen der seegangserzeugenden Windrichtungen als Grundlage für die Seegangsvorhersage im Küstenabschnitt vor Warnemünde

<u>Tab. 4.10:</u>	Zusammenstellung der Ergebnisse der Seegangsvorhersage nach
	BRETSCHNEIDER für Warnemünde/Ostsee

Wellenhöhen H _s (Tiefwasser) und Wellenperioden T nach BRETSCHNEIDER								
			Windg	eschwin	digkeitskla	ssen		
	0-5 n	n/s	5-10 1	m/s	10-15	10-15 m/s		m/s
Windsektor	H _s [m]	T [s]	H _s [m]	T [s]	H _s [m]	T [s]	H _s [m]	T [s]
W	0,35	2,4	1,10	4,0	1,60	4,8	2,00	5,4
WNW	0,35	2,4	1,15	4,1	1,65	4,9	2,10	5,5
NW	0,35	2,5	1,25	4,3	1,75	5,1	2,20	5,8
NNW	0,35	2,3	1,00	3,9	1,40	4,6	1,75	5,2
Ν	0,35	2,4	1,05	4,0	1,50	4,7	1,85	5,3
NNO	0,40	2,6	1,35	4,5	1,95	5,4	2,40	6,1
NO	0,20	1,8	0,40	2,7	0,50	3,1	0,55	3,4
NO *)	0,35		0,80		1,30		1,60	
W *)	0,35		0,70		1,00		1,25	

*) realistische, mittlere Kennwerte aufgrund von 4-jährigen Naturmessungen

Detum	Winc	1-	max. Seegang (Station 153m)		
Datuili	Geschwindigkeit	Richtung	H _{m0} [m]	T _p [s]	
01.01.1995	15,5 m/s	W (270°)	1,40	3,6	
10.01.1995	21,0 m/s	WNW (290°)	1,75	3,6	
23.01.1995	22,0 m/s	W (270°)	0,85	3,2	
20.02.1995	16,0 m/s	W (265°)	1,05	3,4	
19.03.1995	17,0 m/s	W (275°)	1,05	3,2	
25.03.1995	19,0 m/s	WNW (295°)	1,35	3,5	
28.03.1995	18,0 m/s	WNW (300°)	1,85	3,6	
07.04.1995	20,5 m/s	WNW (285°)	1,65	3,6	
14.05.1995	16,0 m/s	WNW (300°)	1,40	3,7	
28.09.1995	21,5 m/s	W (280°)	1,15	3,2	
20.10.1995	15,5 m/s	NW (310°)	1,60	3,4	
03.11.1995	20,0 m/s	N (360°)	2,25	4,1	

<u>Tab. 4.11:</u> Extremereignisse $(\bar{u}_{max} \ge 15 \text{ m/s})$ des Jahres 1995 hier: Gegenüberstellung von Wind- und Seegangsdaten

4.6 Verknüpfung von Wind, Seegang, Wasserstand und wellenerzeugten Strömungen

4.6.1 Strömungen an der seewärtigen Station 305 m

Für die Beurteilung von morphologischen Veränderungen und der Wirksamkeit von baulichen Maßnahmen, wie z.B. die durchlässigen Buhnen, stellen die wellenerzeugten Strömungen einen wichtigen Indikator dar. Die Größenordnungen der einzelnen Strömungskomponenten (resultierende Geschwindigkeit nach Richtung und Betrag, sowie küstenparallele und küstennormale Komponenten) hängen hauptsächlich vom Seegang (Höhe, Periode, Wellenanlaufrichtung) ab, der wiederum ursächlich vom Wind gesteuert wird. Am Beispiel der seewärtigen Meßstation 305 m und für die bereits erwähnten 3 Stürme im Januar 1994 (vgl. Abb. 4.7) veranschaulicht Abb. 4.9 die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen während dieser Ereignisse, wobei die 2-stündlichen Meßdaten als Zeitreihen dargestellt werden. Die maximalen küstennormalen Strömungsgeschwindigkeiten (Momentanwert aus einem 15-minütigen Meßintervall, vn_{max}) erreichen sowohl in seewärtiger als auch in landwärtiger Richtung bei allen drei Einzelereignissen die Größenordnung von 1,2 bis 1,7 m/s. Die zugehörigen mittleren küstennormalen Strömungsgeschwindigkeiten (Mittelwert aller Momentanwerte aus dem 15-minütigen Meßintervall, vn_m) sind seewärts gerichtet und erreichen Höchstwerte in einer Größenordnung von 0,15 bis 0,25 m/s. Im Vergleich dazu sind die mittleren küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten erheblich größer. Sie erreichen Maximalwerte bis zu $vp_m = 1,3$ m/s. Bei allen 3 Starkwindereignissen aus West bis Nordwest ist die küstenparallele Strömung nach Osten gerichtet. Die aus den beiden Komponenten zusammengesetzten resultierenden Strömungsgeschwindigkeitn weisen Momentanwerte bis zu $vr_{max} = 2.8$ m/s auf. Die Mittelwerte der Momentanmessungen steigen bis auf $vr_m = 1,4$ m/s an. Tab. 4.12 zeigt die Auflistung der Maximalwerte der Momentangeschwindigkeit und der maximalen Mittelwerte eines jeden Sturmes.



<u>Abb. 4.9:</u> Beispielhafte Darstellung von gemessenen wellenerzeugten Strömungen an der Station 305 m

<u>Tab. 4.12:</u> max. Geschwindigkeiten (v_{max}) und Mittelwerte (v_m) der küstennormalen (v_n) , küstenparallelen (vp) und resultierenden (vr) Strömungsgeschwindigkeiten bei drei Stürmen im Zeitraum 23.01.94-01.02.94 (Station 305 m)

Strömungs- geschwindigkeit	Ereignis I 23./24.01.1994 [m/s]	Ereignis II 28./29.01.1994 [m/s]	Ereignis III 30./31.01.1994 [m/s]	
vn _{max}	1,20	1,70	1,40	küsten-
vn _m	0,15	0,20	0,25	normal
vp _{max}	2,60	2,80	2,25	küsten-
vp _m	1,25	1,30	1,20	parallel
vr _{max}	2,75	3,00	2,45	resultierend
vr _m	1,35	1,40	1,30	i countrei ente

4.6.2 Strömungen zwischen Station 305 m und der Brandungszone

Im Meßprofil entlang der Meßbrücke wurden die Strömungen zeitgleich an den Stationen 155 m, 131 m und 113 m gemessen. Die Veränderung der einzelnen Strömungsgeschwindigkeiten von Station 305 m bis 113 m zeigt Abb. 4.10 für den Sturm vom 24.01.94. Bei diesem Ereignis lag der Wasserstand bis zu 0,4 m unter dem Mittelwasserstand, so daß die Wassertiefe über dem Riff nur etwa 1,8 m betrug. Aus diesem Grund dominierte die Riffbrandung bei Wellen bis $H_{m0} = 1,10$ m gegenüber der Strandbrandung bei höheren Wasserständen. Bei dem 2. Sturm im Januar 1994 (28./29.1.) wurde ein Wasserstandsanstieg bis zu 0,8 m über den Mittelwasserstand gemessen. Die morphologischen Auswirkungen dieser Stürme gehen aus Abb. 4.11 hervor. Durch den 1. Sturm (23./24.01.1994), bei dem Wasserstände unter dem Mittelwasserstand vorherrschten, wurde eine seewärtige Verlagerung des Riffes im Buhnenfeld um etwa 17 m bewirkt, wie aus der Überlagerung der Profilaufmaße vom 17.01. und vom 26.01.94 hervorgeht. Durch die beiden Stürme vom 28./29.01. und 31.01.94, mit höheren Wasserständen über dem Mittelwasser, wurde das Riff wieder um 10 m landwärts verlagert, wie es die Peilung vom 01.02.94 belegt. Hieraus ist allgemein ersichtlich, in welcher Größenordnung Stürme, die im Mittel etwa 10 mal im Jahre auftreten, in der Lage sind, morphologische Änderungen zu bewirken. Die Beträge können jedoch als relativ gering eingestuft werden. Sie kennzeichnen aber die jahreszeitlichen Umlagerungen im Küstenvorfeld der Ostsee.

Bei Stürmen stellt der Wasserstand in Verbindung mit dem jeweiligen Seegang den Hauptindikator dafür dar, ob überwiegend Riff- und/oder Strandbrandung an Riffküsten vorherrscht und inwieweit dadurch maßgeblich morphologische Vorgänge gesteuert werden. Für die Bandbreite von Wasserstandsänderungen zwischen NN -0,60 m und NN +0,55 m, die einen mittleren jahreszeitlichen Zyklus repräsentieren, sind in Tab. 4.13 die Strömungsgeschwindigkeiten von 4 Stationen zwischen 305 m und 113 m für ausgewählte Stürme zusammengestellt. Daraus geht hervor, daß die Mittelwerte der küstennormalen und der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeit in der Regel von der äußeren seewärtigen Station bis in die Brandungszone erheblich abnehmen und auf weniger als die Hälfte reduziert werden. Die Mittelwerte der küstennormalen Strömungsgeschwindigkeit in der Brandungszone (Station 113 m, 131 m und 155 m) bewegen sich in einer Bandbreite von -0,20 bis +0,15 m/s. Die Mittelwerte der küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten von 0 bis 0,70 m/s.



Abb. 4.11:Profiländerungen im Zeitraum 17.01.94-26.01.94 (oben) und 26.01.94-
01.02.94 (unten) entlang der Meßbrücke im zentralen Buhnenfeld
sowie maximale signifikante Wellenhöhen an den Meßlokationen und
die Variation des Wasserstandes über die Dauer der Ereignisse

		küstennormale küstenparallele Strömungs- Strömungsgeschwindigkeit Strömungsgeschwindigkeit I			ierende nungs- vindigkeit	Wellen- höhe	Wasser- stand				
Datum	Station	See	v _{n m}	Land Vn max	Ost V _{n max}	Vnm	West Vn max	V _{r max}	V _{r m}	H _{m0}	w
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m]	[mPN]
20.12.93	305	1,20	0,05	-1.30	2.70	1.50	0.05	2.80	1.55		
	155	1,25	0,05	-0,90	1,45	0,55	-0,20	1,45	0.65	1.00	4.40
	131		L	<u> </u>	extremes N	I Jiedrigwasse	r	L		1,00	4,40
	113				keine l	Meßdaten		<u></u>			
11.12.93	305	0,75	-0,00	-0,85	1,00	0,30	-0,55	1,30	0,40		
	155	0,95	0,10	-0,75	0,90	0,25	-0,50	1,00	0,40	1.10	4.60
	131	0,80	0,00	-0,70	0,70	0,30	-0,10	0,90	0,40	-,	.,
	113	0,95	-0,05	-1,00	0,55	0,20	-0,20	1,05	0,35		
24.01.94	305	1,20	0,10	-1,10	2,60	1,25	0,30	2,75	1,35		
1	155	0,90	0,10	-0,85	1,10	0,50	0,30	1,25	0,60	1,10	4,70
	131	0,70	-0,05	-0,85	0,80	0,40	0,00	1,10	0,50		
	113	1,05	0,00	-1,10	0,75	0,30	-0,10	1,35	0,45		
14.03.94	305	1,40	0,20	-1,20	2,70	1,40	0,40	2,70	1,50		
	155	0,90	0,05	-1,00	1,20	0,55	-0,20	1,35	0,60	1,10	4,70
	131	0,60	-0,05	-0,75	0,80	0,40	0,00	0,95	0,45		
	113	0,90	-0,10	-1,25	0,90	0,50	0,00	1,35	0,55		
14.08.94	305	1,05	0,10	-1,25	1,85	0,90	0,15	1,90	1,00		
	155	1,00	0,15	-0,65	1,00	0,30	-0,50	1,10	0,50	1,10	4,75
	131	0,50	-0,10	-0,70	0,70	0,25	-0,05	0,90	0,30		
	113	0,95	-0,20	-1,45	1,05	0,50	-0,10	1,70	0,60		
31.01.94	305	1,40	0,25	-1,20	2,25	1,20	0,05	2,40	1,30		
3	155	1,05	0,10	-0,95	1,30	0,60	-0,35	1,50	0,70	1,30	5,05
-	131	0,90	-0,05	-0,85	0,90	0,40	-0,20	1,15	0,50		
	113	1,10	0,02	-1,15	0,80	0,25	-0,30	1,30	0,45		
28.01.94	305	1,70	0,20	-1,50	2,80	1,30	-0,60	3,00	1,40		
2	155	1,20	0,10	-1,15	1,75	0,70	-0,55	1,80	0,85	1,60	5,55
-	131	1,00	0,05	-1,05	1,00	0,50	-0,20	1,20	0,50		
	113	1,15	0,05	-1,20	0,90	0,45	-0,55	1,35	0,50		

<u>Tab. 4.13:</u> Variabilität der Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Wasserstand bei ausgewählten Seegangsereignissen im Zeitraum 10/93 - 09/94

4.7 Sturmflut vom 03./04. November 1995

Das dritte Versuchsjahr (10/95 - 09/96) war geprägt durch das Auftreten der schweren Sturmflut am 03./04. November 1995, wodurch erhebliche Schäden an den Küsten Mecklenburg-Vorpommerns hervorgerufen wurden. Abb. 4.12 zeigt die Auswertung der Messungen von Wind, Wasserstand und zugehörigem Seegang vor Kopf der Meßbrücke (Sektion 153 m).

In der Nacht vom 03. auf den 04.11. wurde mit 22 m/s aus Nord die höchste Windgeschwindigkeit registriert. Der Scheitelwasserstand erreichte NN +1,62 m mit Wellenhöhen bis zu $H_{m0} >2,20$ m. Abb. 4.13 veranschaulicht, welche morphologischen Änderungen im Strand- und Unterwasserstrandprofil dem Sturmflutereignis zugeordnet werden können. Abb. 4.14 illustriert zugehörige Dünenausräumungen im Bereich der Meßbrücke.

Eine ausführliche Beschreibung dieses Ereignisses und der durch diese Sturmflut verursachten Schäden an verschiedenen Küstenabschnitten Mecklenburg-Vorpommerns ist der Veröffentlichung "Dokumentation der Sturmflut vom 03. und 04. November 1995 an den Küsten Mecklenburgs und Vorpommerns" (REDIECK und SCHADE, 1996) zu entnehmen.



<u>Abb. 4.12:</u> Hydrologische Parameter an der Meßbrücke Warnemünde im Zeitraum vom 02.11.1995 bis 07.11.1995 (Sturmflut vom 03./04.11.1995)



<u>Abb. 4.13:</u> Gegenüberstellung von Profilvermessungen längs der Meßbrücke vor und nach der Nov.'95-Sturmflut



<u>Abb. 4.14:</u> Sturmflutschäden an den Dünen im Bereich der Meßbrücke vor Warnemünde (Aufnahme vom 07.11.1995)

4.8 Zusammenfassung

Im den vorhergehenden Abschnitten wurden die auf das mit einem Buhnensystem geschützte Küstengebiet vor Warnemünde einwirkenden Kräfte, wie Wind, Wasserstand und Seegang und dadurch hervorgerufene wellenerzeugte Strömungen, beschrieben. Damit sollte ein zusammenfassender Überblick über die Größenordnung der einzelnen Einflußparameter und deren Veränderlichkeit, sowohl im jahreszeitlichen Rhythmus als auch insgesamt während des Untersuchungszeitraumes von 10/93 bis 09/96, vermittelt werden. In diesem Zeitraum ist eine schwere Sturmflut mit einem Scheitelwasserstand von NN +1,62 m (03./04.11.1995) und eine leichte Sturmflut mit NN +1,27 m (03.01.1995) aufgetreten. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Bandbreite der Meßdaten des Untersuchungszeitraumes als repräsentativ für das längerfristige Geschehen vor Warnemünde angesehen werden kann.

Die eingetretenen und durch Messungen erfaßten Zustände im Untersuchungsgebiet stellen für alle Beurteilungen und Bewertungen der Küstenprozesse und deren Wechselwirkungen, die im Forschungsvorhaben durchgeführt werden, den Berzugsrahmen, d.h. die Größenordnungen und die Variabilität der auf die Küstenmorphologie einwirkenden Einflußparameter, wie Wind, Wasserstand und Seegang sowie deren Verknüpfungen, dar. Durch die Einbeziehung von Langzeitdaten in die vorliegenden Betrachtungen konnte zugleich aufgezeigt werden, daß die Umweltverhältnisse im dreijährigen Untersuchungszeitraum (10/93-09/96) als repräsentativ im Hinblick auf das mittlere längerfristige Geschehen eingestuft werden können.

5. Energiefluß im Untersuchungsgebiet

5.1 Vorbemerkung

Angaben über das allgemeine Sedimenttransportvermögen infolge des ortsständigen Wellenklimas, hier vor Warnemünde, sind hilfreich, um z.B. den Einfluß von Einbauten im Vorstrandbereich auf die morphodynamischen Prozesse beurteilen zu können. Solche Betrachtungen können einschränkend aber nur in Form von Abschätzungen der räumlichen und zeitlichen Variabilität des Sedimenttransportes im Hinblick auf resultierende Jahresbilanzierungen vorgenommen werden. Bei den morphologischen Prozessen im Küstenvorfeld ist der Küstenlängstransport der maßgebende Einflußparameter.

Die Umlagerung von Sediment im Vorstrandbereich resultiert aus dessen Mobilisierung durch die Energiedissipation. Der Sedimenttransport erfolgt letztlich durch die wellenerzeugten Strömungen. Die für die Formänderungen an der Sohle und für die Transportvorgänge erforderliche Leistung wird durch den Energiefluß der Wellen geliefert. Die in den Küstenabschnitt eingetragene Seegangsenergie wird dabei auf einem verhältnismäßig schmalen Streifen vor der Küste, hauptsächlich in der Brandungszone, in Turbulenz und Wärme umgewandelt.

Die Richtung des Energieflusses ist von der Wellenanlaufrichtung abhängig und kann daher, entsprechend den Windverhältnissen, die den Seegang hervorrufen, relativ stark variieren. Wellenanlaufrichtung sowie Dauer und Intensität der einzelnen Seegangsereignisse sind maßgebende Faktoren für den Energiefluß und den daraus resultierenden Küstenlängstransport.

5.2 Grundlagen der Energieflußberechnung

Der Wind erzeugt ein Spektrum von Wellenhöhen und Wellenperioden. Die einfachste Beschreibung des Spektrums der Windwellen liefert die signifikante Wellenhöhe H_S, die den Mittelwert der 33 % höchsten Wellen im Seegang darstellt, d.h. H_S ist ein statistischer Kennwert. Ein auf der Wellenenergie beruhender Kennwert der Seegangsbeschreibung ist die H_{m0}-Wellenhöhe. Sie entspricht dem Vierfachen der Standardabweichung (σ) der Wasserspiegelauslenkungen an der Wasseroberfläche (H_{m0} = 4 σ). Im Tiefwasser sind die H_S- und H_{m0}-Werte effektiv gleich, wohingegen die H_S-Werte im Flachwasser bei brechenden Wellen um bis zu 30 % größer sein können. Die Wellenenergie wird durch die H_{rms}-Wellenhöhe charakterisiert, die mit H_S über H_s = $\sqrt{2}$ H_{rms} verknüpft ist.

Der Energiefluß (F_m), der sowohl als resultierender Vektor als auch in Einzelkomponenten (küstennormal ($F_{m,n}$) und küstenparallel ($F_{m,p}$)) zerlegt betrachtet werden kann, ist in erster Näherung der maßgebende Einflußparameter auf den küstenparallelen Sedimenttransport und stellt somit ein Bindeglied zwischen Seegangsbelastung und Sedimentumlagerung dar (vgl. CERC - Formel, u.a.).

Der Energiefluß kann nach der linearen Wellentheorie im Flachwasser vereinfacht als Produkt von Wellenenergie (E) und Wellengeschwindigkeit (c) ausgedrückt werden.

$$F_{\rm m} = E \cdot c = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \sqrt{g \cdot d}$$
(5.1)

Unter Annahme eines konstanten Brecherindexes H/d = 0,78 und einer Wasserdichte von $\rho = 1007 \text{ kg/m}^3$ ergibt sich der Energiefluß als

$$F_{\rm m} = \frac{\sqrt{1,28}}{8} \cdot \rho \cdot g^{\frac{3}{2}} \cdot H_{\rm rms}^{\frac{5}{2}}$$
(5.2)
$$F_{\rm m} = 4376 \cdot H_{\rm rms}^{\frac{5}{2}}$$
(5.3)

5.3 Energieflußberechnungen aus Meßdaten

Während des Untersuchungszeitraumes (10/93 - 09/96) wurden bei einem Meßintervall von 2 Stunden Seegangsmessungen im Hauptmeßprofil (Meßbrücke) durchgeführt. Die Meßdaten von der seewärtigen Position (Station 305 m) in einer Wassertiefe von rd. NN - 2,5 m repräsentieren, insbesondere bei ausgeprägtem Seegang, den Seegang bzw. den Energiefluß in der Brandungszone nach dessen Umformung im Küstenvorfeld vom Tiefwasserbereich (etwa NN - 10 m) bis an die genannte Meßstation infolge Refraktion und Shoaling.

Zusätzlich zu den Meßdaten, wie Wind, Wasserstand und Seegang, können die zeitlich zugeordneten Energieflüsse (resultierende, sowie deren küstennormale und küstenparallele Komponenten) aus den Seegangsdaten berechnet werden. Abb. 5.1 veranschaulicht beispielhaft für drei ausgewählte Sturmereignisse vom Januar 1994 die Analogauftragung von Wind, Wasserstand und Seegang sowie die zugehörigen Energieflüsse. Es zeigt sich, daß das stärkste Ereignis vom 28./29.01.1994, mit Windgeschwindigkeiten bis zu 20 m/s und Wellenhöhen bis zu $H_{m0} = 1,6$ m im Vergleich zu den anderen beiden Stürmen, den größten Energiefluß liefert.

In Tab. 5.1 sind die Monatssummen der Energieflußanteile beispielhaft für den einjährigen Untersuchungszeitraum von 10/93 bis 09/94, zur Veranschaulichung der Bandbreite der Variabilität des Energieflusses über einen Jahreszyklus, zusammengestellt. Die Maximalwerte der resultierenden Einergieflußsummen wurden für die Monate Januar und Juni 1994 ermittelt. Maximale küstenparallele Anteile des Energieflusses (bei resultierenden Anlaufwinkeln relativ zur Küstennormalen zwischen -23° und -32°) zeigen sich in den Monaten 12/93, 1/94, 8/94 und 9/94. Sie sind sämtlich in West-Ost-Richtung (vgl. Tab. 5.1) ausgerichtet.



<u>Abb. 5.1:</u> Gegenüberstellung von einwirkenden Kräften (Wind, Wasserstand, Seegang) und daraus resultierendem Energiefluß am Beispiel von 3 Stürmen im Januar 1994

<u>Tab. 5.1:</u>	Monatliche und jährliche Energieflußsummen im Untersuchungszeitraum
	(10/93 bis 09/94) aus gemessenen Seegangsdaten an der seewärtigen Meß-
	station vor Warnemünde

Monat	Fm	Station 305 m F _{m,n}	F _{m,p}	Richtung ^{*)} des res. Energieflusses zur Küstennormalen
	<u>kWh/m</u>	kWh/m	<u>kWh/m</u>	
10.1993	241	234	-16	4
11.1993	242	239	-22	5
12.1993	267	224	109	-26
01.1994	349	294	180	-32
02.1994	150	141	5	-2
03.1994	251	227	19	-5
04.1994	156	144	9	-4
05.1994	180	166	7	-2
06.1994	321	297	77	-14
07.1994	45	38	-11	16
08.1994	272	243	109	-24
09.1994	257	228	96	-23
10/93 - 09/94	2731	2475	562	-13

*) negatives Vorzeichen: Richtung von West nach Ost

Die Variabilität des mittleren Energieflusses nach Richtung und Betrag im einjährigen Zyklus ist in Abb. 5.2 dargestellt. Die resultierenden monatlichen Anlaufrichtungen schwanken im Zeitraum 10/93-09/94 in einer Größenordnung von rd. 40°. Die Winkel zwischen der Anlaufrichtung und der Küstennormalen streuen etwa zwischen -32° (320°, bezogen auf Nord) und 5° (357°), wenn der mittlere Anlaufwinkel für den Juli 1994, aufgrund des sehr geringen Gesamtenergieflusses, vernachlässigt wird.

Die Jahressumme des resultierenden Energieflusses (Tab. 5.1, unten) in der Größenordnung von rd. 2700 kWh/m liegt etwas höher als ein vergleichbarer mittlerer jährlicher Energieeintrag (Messung an zwei Positionen über 3 Jahre) vor der Probstei in der Kieler Bucht mit rd. 1800 kWh/m (ALW KIEL, 1995). Die vorgenannten Jahressummen von Küsten der Ostsee sind im Vergleich zur Hochenergieküste Sylt aber um mehr als eine Potenz niedriger. Für das Jahr 1992 wurden z.B. für die Westküste Sylts rd. 30 000 kWh/m ermittelt (ALW HUSUM, 1994).



<u>Abb. 5.2:</u> Richtungen des resultierenden Energieflusses in den einzelnen Monaten im Zeitraum 10/93 bis 09/94

5.4 Energieflußberechnungen aus Winddaten

Aufzeichnungen von Winddaten über längere Zeiträume liegen relativ häufig für einen Ort, z.B. wie für Warnemünde (1948-1984, 1980-1996), vor. Energieflußberechnungen unter Verwendung von Winddaten, ermöglichen, sofern sie zuvor mit Meßdaten überprüft wurden, auch die Ermittlung des Energieflusses für solche Zeiträume, für die keine Meßdaten vorliegen. Auf diese Weise können dann Ergebnisse eines Untersuchungszeitraumes, die aufgrund von von Meßdaten ermittelt wurden, in die längerfristige Charakteristik des örtlichen Wellenklimas eingeordnet werden.

In Abschnitt 4 wurde die Anwendung des Wellenvorhersageverfahrens auf der Grundlage von Winddaten (Zeitraum von 10/93 bis 09/94) für den Küstenabschnitt vor Warnemünde beschrieben. Mit Hilfe der Wellenhöhen, für einzelne Geschwindigkeitsklassen und deren Eintrittshäufigkeiten in den einzelnen seegangswirksamen Windrichtungen (16-teilige Windrose), lassen sich die Energieflüsse E \cdot c und die mittleren jährlichen Energieeinträge (in kWh/m) in einen Küstenabschnitt berechnen. Da Refraktionseinflüsse im Vorhersageverfahren nicht berücksichtigt werden, gelten entsprechende Energieflußberechnungen für Wassertiefen im Küstenvorfeld, die noch nicht nennenswert dem Refraktionseinfluß unterliegen (vor Warnemünde etwa bis zur 7 m-Tiefenlinie). Vereinfacht wird angenommen, daß die Wellenanlaufrichtung jeweils der Windrichtung entspricht. Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich der resultierende Energiefluß, z.B. eines Jahres, für jeden Sektor aus der Aufsummierung des anteiligen Energieflusses aus den einzelnen Windklassen, unter Berücksichtigung der jährlichen Häufigkeit des Auftretens, zu:

$$F_{m} = \sum_{i,j=1}^{n} F_{m_{i,j}} \cdot h_{i,j}$$

i:Windsektoren W-NO
j:Windgeschw.-Klassen 1-4 (5.4)

Die Ergebnisse einer solch beispielhaften Berechnung für ein Jahr (10/93 bis 10/94) sind in Tab. 5.2 aufgelistet. Die jährlichen Energieflußsummen der einzelnen Windsektoren wurden vektoriell aufsummiert und anschließend entsprechend der Küstenausrichtung im Bereich des Meßfeldes vor Warnemünde in eine küstennormale und eine küstenparallele Komponente zerlegt. Die Berechnung der Größe und der Richtung des jährlichen resultierenden Energieflusses, zusammengesetzt aus den Anteilen der einzelnen Windsektoren, zeigt die Zusammenstellung in Tab. 5.3. Für den Verlauf der Küstenlinie im Untersuchungsgebiet (262°- 82°) ergeben sich danach folgende Energieeinträge für den Zeitraum 10/93 bis 9/94:

- resultierend:	4706 kWh/m
- küstennormal:	2816 kWh/m
- küstenparallel:	3771 kWh/m (nach Ost)

Der Betrag des resultierenden Energieflusses von rd. 4700 kWh/m ist wesentlich größer als der, der für den gleichen Zeitraum aus Meßdaten in der Brandungszone (Station 305 m) mit rd. 2700 kWh/m ermittelt wurde. Auch die Richtung von rd. 53° zur Küstennormalen weicht mit etwa 40° erheblich von den Meßdaten ab. Diese Unterschiede sind darin begründet, daß die Ergebnisse aus den Winddaten für den Tiefwasserbereich im Untersuchungsgebiet gelten, d.h. daß Refraktions- und Shoaling-einflüsse vom Tiefwasser bis zur Brandungszone nicht berücksichtigt sind. Wie aus Tab. 5.2 ersichtlich, weisen die Windsektoren W und WNW die größte Windhäufigkeit auf. Wellen, die aus diesen Richtungen anlaufen, werden jedoch infolge Refraktion und Shoaling stark abgemindert, was jedoch bei der Berechnung unberücksichtigt bleibt.

Tab. 5.2:Signifikante Wellenhöhen H_S für repräsentative Windgeschwindigkeiten u
und deren jährliche Häufigkeit sowie dei zugehörigen Energieflüsse für die
maßgebenden Sektoren W bis NO vor Warnemünde (1.10.1993 -30.09.1994;
X: Fetchlänge, d: mittlere Wassertiefe)

Richtung X [km]	U	H _s	Häufigkeit	F _m	ΣF _m
d [m]	[m/s]	[m]	[h]	[kWh/m]	[kWh/m]
W 66,0 15,2	2,5 7,5 12,5 17,5	0,35 1,10 1,60 2,00	163 413 250 44	22 972 1500 461	2955
WNW 66,0 18,4	2,5 7,5 12,5 17,5	0,35 1,15 1,65 2,10	178 294 161 19	24 417 563 225	1229
NW 90,0 17,1	2,5 7,5 12,5 17,5	0,35 1,25 1,75 2,20	140 119 21 5	19 385 158 36	598
NNW 57,0 11,8	2,5 7,5 12,5 17,5	0,35 1,00 1,40 1,75	114 88 6 0	15 163 26 0	204
N 66,0 12,8	2,5 7,5 12,5 17,5	0,35 1,05 1,50 1,85	87 66 3 1	12 138 15 9	174
NNO 141,0 17,3	2,5 7,5 12,5 17,5	0,40 1,35 1,95 2,40	100 174 29 1	19 683 285 17	1004
NO 27,0 2,2	2,5 7,5 12,5 17,5	0,20 0,40 0,50 0,55	117 187 49 0	64 35 16 0	115

Richtung	Energiefluß [kWh/m]					
	gesamt		Komp	onenten		
		N	S	0	W	
W	2955	-		2955	-	
WNW	1229		470	1135	-	
NW	598	-	423	423	-	
NNW	204	-	188	78	-	
N	174	_	174	-	-	
NNO	1004	-	928	-	384	
NO	115		81	-	81	
Summe		_	2264	4591	465	
Resultierende			2264	4126		

<u>Tab. 5.3:</u> Energiefluß aus den maßgebenden Anlaufrichtungen für Tiefwasserbedingungen vor Warnemünde für den Zeitraum 10/93 - 09/94

Nachfolgend wird eine vereinfachte Methode vorgestellt, um die aus den Winddaten berechneten Energieflüsse auf die Brandungszone, hier die Station 305 m (NN-2,5 m), zu übertragen, d.h. den Einfluß von Refraktion und Shoaling zu erfassen. Es wird die lineare Wellentheorie zugrundegelegt, wonach die Wellenlänge L_0 im Tiefwasser

$$L_0 = 1,56 \text{ T}^2 \tag{5.5}$$

beträgt.

Bei vereinfachter Annahme eines geraden Küstenabschnittes mit parallel zur Küste verlaufenden Tiefenlinien kann die Wellenanlaufrichtung für ausgewählte Wassertiefen nach dem SNELL'schen Gesetz wie folgt berechnet werden:

$$\sin\alpha = \frac{c}{c_0} \cdot \sin\alpha_0 \tag{5.6}$$

wobei α den Winkel zwischen Wellenanlaufrichtung und der Küstennormalen an der betrachteten Wassertiefe kennzeichnet (α_0 - analog der Winkel im Tiefwasser). Die Wellenschnelligkeit im Tiefwasser kann mit $c_0 = 1,56 \cdot T$ angenommen werden, während die Wellenschnelligkeit c = L/T, in Abhängigkeit der relativen Wassertiefe d/L, ermittelt wird. Für den Übergangsbereich (1/20 < d/L < 1/2) berechnet sich die Wellenlänge (L) nach der linearen Wellentheorie als

$$L = \frac{g}{\omega} \cdot T \cdot \tanh(kd)$$
 (5.7)

mit $k = 2\pi / L$ die Wellenzahl und $\omega = 2\pi / T$ die Kreisfrequenz.

Neben der Wellenanlaufrichtung wird auch die Wellenhöhe des einlaufenden Seegangs durch Refraktion beeinflußt. Die Veränderung der Tiefwasserwellenhöhe (unter der Annahme, daß keine Verlagerung von Energie in Wellenkammrichtung stattfindet, sondern zwischen zwei Wellenorthogonalen konstant bleibt), die durch den Refraktionskoeffizienten $H/H_0 = K_R$ beschrieben wird, berechnet sich mit

$$K_{\rm R} = \sqrt{\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}}$$
(5.8)

Infolge der Abnahme der Wellengeschwindigkeit und der Wellenlänge beim strandnormalen Einlaufen des Seegangs kommt es darüber hinaus zum Shoaling-Effekt, der aus

$$\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{H}_0} = \mathrm{K}_{\mathrm{S}} = \sqrt{\frac{1}{2\mathrm{n}} \cdot \frac{\mathrm{c}_0}{\mathrm{c}}}$$
(5.9)

worin n das Verhältnis c_g/c aus Gruppengeschwindigkeit und Wellenschnelligkeit bezeichnet und mit

$$c_{g} = \frac{c}{2} \left[1 + \frac{2 \text{ kd}}{\sinh (2 \text{ kd})} \right]$$
 (5.10)

ermittelt werden kann.

Für die Berechnung wurden die in Tab. 5.4 zusammengestellten Wellenparameter verwendet.

	Tiefwasser	
Wellenlänge L	20 m	14 m
Wellenschnelligkeit c	5,6 m/s	3,9 m/s
Gruppengeschwindigkeit c _g	-	3,1 m/s

<u>Tab. 5.4:</u> Gewählte Wellenparameter zur Ermittlung des Shoaling- und der Refraktionskoeffizienten

Mit diesen Eingangsparametern wurden die Refraktionskoeffizienten $K_{R,i}$ für die einzelnen Tiefwasser-Wellenanlaufrichtungen sowie die Shoaling-Koeffizienten K_S bestimmt. Da E ~ H² beträgt, wurden die zuvor für das Tiefwasser berechneten Energieflüsse aus den Windsektoren (vgl. Tab. 5.2) mit dem Faktor $(K_{R,i} \cdot K_S)^2$ abgemindert. Die hieraus für die Wassertiefe d = 2,5 m, unter Berücksichtigung von Shoaling und Refraktion, ermittelten Energieflußsummen sind in Tab. 5.5 für die seegangswirksamen Sektoren zusammengestellt.

<u>Tab. 5.5:</u> Jährlicher Energiefluß in die Brandungszone aus den seegangswirksamen Windrichtungen für das Untersuchungsgebiet vor Warnemünde im Zeitraum 10/93 bis 09/94

Anlaufrichtung			Energiefluß [kWh/m]				
Tiefv	vasser	Brandungs- zone	Gesamt		Kompo	onenten	
				N	S	О	W
W	270°	309°	502	-	194	390	-
WNW	292,5°	316°	688	-	495	478	-
NW	315°	327°	478	-	401	260	-
NNW	337,5°	342°	180	-	171	56	-
N	360°	358°	150	-	150	5	-
NNO	22,5°	12°	833	-	815		173
NO	45°	25°	75	-	68	-	32
Summe		2907	-	2294	1189	205	
Resultie	erende				2294	984	

Für die Brandungszone im Küstenabschnitt Warnemünde (262°- 82°) ergeben sich danach für den Untersuchungszeitraum folgende Energieeinträge:

- resultierend:	2496 kWh/m
- küstennormal:	2409 kWh/m
- küstenparallel:	655 kWh/m (nach Osten)

Die ermittelten Werte sind sowohl in der Größe der Einzelkomponenten als auch in der Richtung des resultierenden Energieflusses (Abweichung lediglich 2°) nahezu identisch mit den Ergebnissen, die aus Meßdaten ermittelt wurden (vgl. Tab. 5.1 und Abb. 5.3).



<u>Abb. 5.3:</u> Vergleich des jährlichen resultierenden Energieflusses in der Brandungszone berechnet aus Wellenparametern nach dem BRETSCHNEIDER-Seegangsvorhersageverfahren sowie aus Seegangsmeßdaten aus dem Küstenabschnitt vor Warnemünde (Station 305 m)

5.5 Zusammenfassung

Durch vergleichende Betrachtungen von Energieflußberechnungen aus Meßdaten und Seegangsvorhersagedaten nach dem BRETSCHNEIDER-Verfahren konnte gezeigt werden, daß die Übereinstimmung zwischen beiden Untersuchungsmethoden für ein Jahr (10/93 bis 09/94) sowohl hinsichtlich der resultierenden Richtungen als auch hinsichtlich der Beträge der Energieflüsse erstaunlich gut ist. Bei Vorliegen entsprechender Winddaten und deren Anwendung auf einer derartigen Grundlage kann erwartet werden, daß die vorgenannte vereinfachte Berechnungsmethode realistische Aussagen über langfristige Vorgänge in dem betreffenden Gebiet ermöglicht.

6. Küstenlängstransportvermögen im Untersuchungsgebiet

6.1 Methodischer Ansatz

Die Wellenauflaufrichtung sowie die Dauer und Intensität der einzelnen Seegangsereignisse sind die maßgebenden Faktoren für den Energiefluß und das daraus resultierenden Längstransportvermögen an einer Küste. Auf der Grundlage der küstenparallelen Energieflußkomponente läßt sich das mittlere jährliche Sedimenttransportvermögen über die bekannte CERC-Formel (SPM, 1984) abschätzen. Das mittlere Transportvermögen (Q_s in [m³/s]) ergibt sich aus Gl. 6.1 als

$$Q_{s} = \frac{I}{(\rho_{s} - \rho) \cdot (1 - n)}$$
 (6.1)

mit: ρ_s = Dichte des Sandes ρ = Dichte des Wassers n = Porosität des Sandbettes

Wird die sekundliche Sedimentfracht (I) unter Ansatz eines Beiwertes (K) mit dem mittleren küstenparallelen Energiefluß ($F_{m,p}$) verknüpft (Gl. 6.2)

$$I = K \cdot F_{m,p} \tag{6.2}$$

kann Q_s mit den Annahmen $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1007 \text{ kg/m}^3$, (1-n) = 0.65 undg = 9.81 m/s² aus Gl. (6.3) ermittelt werden.

$$Q_{s} = \frac{K}{1068 \cdot g} \cdot F_{m,p}$$
(6.3)

BODGE und KRAUS (1991) haben den empirischen Beiwert K, der von dem Brechertyp, der Neigung des Vorstrandes und der Korngröße abhängig ist, mit der Iribarren-Zahl (Gl. 6.4) korreliert

$$\xi = \tan\alpha \cdot \left(\frac{H_b}{L_0}\right)^{-\frac{1}{2}}$$
(6.4)

mit:
$$\tan \alpha = \text{Vorstrandneigung}$$

 $H_b = \text{Brecherhöhe}$
 $L_0 = \text{Wellenlänge im Tiefwasser}$

und die Beziehung

 $K = 0.22 \cdot \ln \xi + 0.62$

aufgestellt.

6.2 Jährliches Küstenlängstransportvermögen im Zeitraum 1980 bis 1996

Für das Untersuchungsgebiet vor Warnemünde ist u.a. eine Winddatenreihe (stündliche Werte) für den Zeitraum 1980 bis 1996 verfügbar. Mit dem CERC-Ansatz und unter Zugrundelegung einer mittleren Vorstrandneigung von 1:50 wurde für die vorgenannte Zeitreihe das jährliche Küstenlängstransportvermögen berechnet, um Angaben über die Größenordnung und die Variabilität des jährlichen resultierenden Transportvermögens zu ermöglichen. Einschränkend ist darauf hinzuweisen, daß den auf diese Weise ermittelten Daten hauptsächlich eine vergleichende Wertigkeit zugeordnet und die Zahlenwerte lediglich als Trendaussagen gewertet werden sollten.

In Tab. 6.1 sind die aus den stündlichen Winddaten von 1980 bis 1996 errechneten mittleren jährlichen Windverhältnisse (Windrichtung (Θ) und Windgeschwindigkeit (\bar{u})), der jährliche Energiefluß ($F_{m,res}$) und dessen Einzelkomponenten (küstennormal ($F_{m,n}$) und küstenparallel ($F_{m,p}$)), die mittlere jährliche Wellenhöhe (H_{rms}), der mittlere jährliche Anlaufwinkel des Energieflusses (bezogen auf Nord (β) und relativ zur Küstennormalen ($\Delta\beta$)) sowie das jährliche Sedimenttransportvermögen (Q_S) zusammengestellt. Als Mittelwert über die 17 Jahre ergibt sich ein mittleres Transportvermögen in der Größenordnung von 52 000 m³/a bei einer Schwankungsbreite von 26 100 m³/a (1987) und 72 300 m³/a (1983).

Für den Untersuchungszeitraum ergeben sich 42 300 m³/a (1993), 65 900 m³/a (1994), 63 000 m³/a (1995) und 30 000 m³/a (1996). Diese Werte bestätigen u.a., daß der Untersuchungszeitraum zugleich das Transportvermögen über einen längeren Zeitraum repräsentiert.

(<u></u>		
Jahr	Θ	ũ	F _{m,res}	F _{m,n}	F _{m,p}	H _{rms}	β	Δβ ^{*)}	Qs
	[°]	[m/s]	[kWh/m]	[kWh/m]	[kWh/m]	[m]	[°]	[°]	[m ³ /a]
1980	272	4,9	2655	2401	844	0,34	332,7	-19,3	63 370
1981	274	4,8	2578	2324	872	0,34	331,4	-20,6	65 860
1982	248	4,2	1377	1254	431	0,26	333,0	-19,0	36 639
1983	270	5,1	2829	2552	976	0,35	331,1	-20,9	72 344
1984	251	4,7	1800	1608	599	0,29	331,6	-20,4	48 494
1985	273	4,6	2366	2152	648	0,33	335,2	-16,8	49 783
1986	270	4,8	2333	2167	556	0,33	337,6	-14,4	42 833
1987	272	4,1	1629	1489	317	0,28	340,0	-12,0	26 142
1988	261	5,0	2385	2177	657	0,33	335,2	-16,8	50 395
1989	255	4,9	2243	2028	753	0,32	331,6	-20,4	58 457
1990	245	5,2	1836	1636	695	0,30	329,0	-23,0	56 058
1991	268	4,8	2265	2041	784	0,32	331,0	-21,0	60 748
1992	254	4,5	1853	1645	686	0,30	329,4	-22,6	55 237
1993	267	4,7	2463	2199	555	0,33	337,8	-14,2	42 301
1994	256	5,0	2770	2395	885	0,35	331,7	-20,3	65 881
1995	274	5,0	3650	3088	896	0,39	335,8	-16,2	62 963
1996	281	4,8	1935	1721	376	0,30	339,7	-12,3	30 030
Mittel	264	4,8	2292	2052	678	0,32	333,8	-18,2	52 208
Min.	245	4,1	1377	1254	317	0,28	329,0	-12,0	26 142
Max.	281	5,2	3650	3088	976	0,39	340,0	-23,0	72 344

Tab. 6.1:Jährliches Küstenlängstransportvermögen im Untersuchungsgebiet auf der
Grundlage von stündlichen Winddaten für den Zeitraum 1980 bis 1996

*) negatives Vorzeichen: Richtung von West nach Ost

Die Variabilität der jährlichen resultierenden Energieflüsse nach Betrag und Richtung für den Zeitraum 1980 bis 1996 ist in Abb. 6.1 dargestellt. Die jährlichen Anlaufrichtungen im Untersuchungszeitraum unterscheiden sich nur geringfügig und schwanken in einer Größenordnung von rd. 11° (329° bis 340° bezogen auf Nord). Die Beträge des resultierenden Energieflusses variieren dagegen in einer Größenordnung von rd. 2300 kWh/m (von 1377 - 3650 kWh/m). Das, aufgrund der Berechnungen ermittelte, jährliche Küstenlängstransportvermögen ist in Abb. 6.2 veranschaulicht.



<u>Abb. 6.1:</u> Jährliche resultierende Energieflüsse auf der Grundlage von Winddaten im Zeitraum 1980 bis 1996

Die Gegenüberstellung der jährlichen Transportraten des Untersuchungsgebietes mit Daten anderer Küstengebiete der Ostsee ermöglicht eine Einordnung der Transportkapazitäten vor Warnemünde. Für die Hochenergieküste von Sylt wird ein mittlerer jährlicher Küstenlängstransport von 1,5 Mio. m³/a zugrundegelegt. Etwa 1,0 Mio. m³/a gelangen an das nördliche und etwa 0,5 Mio. m³/a an das südliche Inselende (ALW HUSUM, 1994). Untersuchungen an der Fischlandküste (DETTE et al., 1994) und vor der Probstei (ALW KIEL, 1995) führten zu folgenden Größenordnungen für langjährige Mittelwerte in den jeweiligen Küstenabschnitten:

Fischland (Wustrow-Ahrenshop)	$= 60 \ 000 \ \mathrm{m^{3}/a}$
Prerow-Zingst	$= 40 \ 000 \ \mathrm{m^{3}/a}$
Probstei	$= 20 \ 000 \ \text{m}^3/\text{a}$

Im Vergleich zu diesen Werten liegen die Ergebnisse des Untersuchungszeitraums für den Küstenabschnitt Warnemünde in der Größenordnung des Transportvermögens vor dem Fischland und vor Prerow-Zingst.



<u>Abb. 6.2:</u> Jährliches Küstenlängstransportvermögen auf der Grundlage von Winddaten im Zeitraum 1980 bis 1996

7. Morphologische Reaktionen im Küstenvorfeld auf das Buhnensystem vor Warnemünde

7.1 Betrachtungen zu den Profilentwicklungen

In den Hypothesen zur Wirksamkeit von durchlässigen Pfahlbuhnen (Abschnitt 3.2) wurde dargelegt, daß

- die Verminderung der wellenerzeugten Küstenlängsströmungen in den Buhnenfeldern und
- die Vermeidung der Ausbildung von Rippströmungen entlang der Buhnen in seewärtiger Richtung (ein typisches Merkmal von undurchlässigen Buhnen)

als deren Hauptfunktion anzusehen sind. Dadurch soll die Anhebung der Sohllage im Bereich der Buhnenanordnung und die Ausbildung einer submarinen Terrasse (vgl. Abb. 3.2) bewirkt werden. Diese Erwartung wird nachfolgend anhand von Meßdaten aus dem Buhnenfeld vor Warnemünde untersucht.

Regelmäßige Profilaufmessungen liegen aus dem Untersuchungsgebiet im Buhnenfeld 7-8 seit 1989 vor. Mit Abständen von 80 m wurden insgesamt 17 Pfahlbuhnen in den Jahren 1991 und 1992 gebaut. Ihre Längen erstrecken sich 120 m seewärts einer Bezugslinie, die wiederum 20 m landwärts der Uferlinie liegt (vgl. Abb. 3.7 und 3.8). Die Kronenhöhe der Buhnen liegt 0,5 m über Mittelwasser (NN +5,5 m).

Die Durchlässigkeit der einzelnen Buhnen variiert. Im zentralen Buhnenfeld (7-8) sind die Buhnen über die anfängliche Länge von etwa 80 m nahezu dicht gerammt. Die restlichen 40 m weisen eine zunehmende Durchlässigkeit bis zu den Buhnenköpfen auf. Sie haben Durchlässigkeiten bis zu 40 %, bei einem Mittelwert über die gesamte Länge von 13 %. Auch innerhalb des gesamten Buhnenfeldes variiert die Durchlässigkeit von Buhne zu Buhne. Sie nimmt zu den Seiten des Buhnensystems hin zu. Abb. 3.8 veranschaulicht (grau hinterlegter Bereich), welcher Bereich im Buhnensystem dicht gerammt wurde. Die Buhnen 2 und 3 weisen Öffnungen zwischen je zwei Pfählen bis zu 0,25 m, im Vergleich zum Pfahldurchmesser von 0,22 m, auf. Außerhalb des dichten Bereiches nimmt die Durchlässigkeit bis zum Buhnenkopf, bei einem Mittelwert von 40%, von 30% bis auf 50% zu. Die Buhnen 5 und 6 sind mit Durchlässigkeiten von nominal Null bis zu 40 %, bei einem Mittelwert über deren Länge von 20%, versehen. Um die Wirksamkeit des durchlässigen Buhnensystems nach dem Bau möglichst objektiv beurteilen zu können, wurde 140 m westlich der Buhne 1 ein Referenzprofil, das den durch die Buhnen unbeeinflußten Küstenbereich kennzeichnet, ausgewählt. In diesem Profil sowie in den Buhnenfeldern 2-3, 5-6 und 7-8 wurden seit 1990 regelmäßige Aufmessungen des Unterwasserstrandes durchgeführt.

Die Einhüllende aller Profiländerungen eines Jahres läßt erkennen, in welchen Bereichen des Unterwasserprofiles nennenswerte Änderungen im Jahreszyklus aufgetreten sind und wie groß die Bandbreite von Umlagerungen ist. Die Aufmaße im Jahre 1990/91 repräsentieren den Ist- bzw. den Vergleichszustand vor dem Bau des Buhnensystems.

Für das Referenzprofil (140 m westlich Buhne 1) ist die Einhüllende des Jahres 1990/91 auf Abb. 7.1 jeweils mit den Einhüllenden der Jahre 1992 bis 1995 überlagert dargestellt. Aus der Gegenüberstellung ist ersichtlich, daß sich für alle Jahre nahezu identische Profiländerungen, in Abhängigkeit von den jeweils vorherrschenden Seegangsbedingungen, ergeben haben. Nennenswerte Profilveränderungen im Vergleich zum Ist-Zustand (1990/91) sind nicht erkennbar. Änderungen im Unterwasserprofil des Buhnenfeldes 2-3, das eine höhere mittlere Durchlässigkeit (40%), relativ zu den Buhnen 5-6 und 7-8, aufweist, veranschaulicht Abb. 7.2 für den 4-jährigen Zeitraum nach Einrichtung des Buhnensystems. Mit einer Phasenverschiebung, d.h. nach einer Zeitspanne von rd. 2 Jahren, stellen sich erste nennenswerte Änderungen gegenüber dem Ist-Zustand (1990/91) ein. In der Folgezeit zeigt sich bis 1995 eine erkennbare Strandverbreiterung sowie der Aufbau einer Terrasse. Bemerkenswert ist, daß sich im Jahre 1995 die Terrasse bis über die Buhnen hinaus seewärts ausdehnt. Die Entwicklung des Unterwasserstrandprofiles im Buhnenfeld 5-6 zeigt Abb. 7.3. In diesem zentralen Bereich des Buhnensystems, das gegenüber Buhnenfeld 2-3 eine geringere mittlere Durchlässigkeit (20 %) aufweist, deuten die Einhüllenden auf folgende Zustandsänderungen hin:

- Verkürzung der seewärtigen Terrassenausdehnung,
- Erhöhung des Unterwasserprofiles im Bereich der Wasserlinie und
- seewärtige Verbreiterung des Strandes um rd. 20 m.



<u>Abb. 7.1</u>: Einhüllende von jährlichen Profiländerungen im Referenzprofil, hier: Überlagerung des Ist-Zustandes (1990/91) mit den Jahren 1992 bis 1995



<u>Abb. 7.2</u>: Einhüllende von jährlichen Profiländerungen im Buhnenfeld 2-3, hier: Überlagerung des Ist-Zustandes (1990/91) mit den Jahren 1992 bis 1995



<u>Abb. 7.3</u>: Einhüllende von jährlichen Profiländerungen im Buhnenfeld 5-6, hier: Überlagerung des Ist-Zustandes (1990/91) mit den Jahren 1992 bis 1995



<u>Abb. 7.4</u>: Einhüllende von jährlichen Profiländerungen im Buhnenfeld 7-8, hier: Überlagerung des Ist-Zustandes (1990) mit den Jahren 1991 bis 1995

Die Veränderungen des Unterwasserprofils im zentralen Buhnenfeld (7-8) mit der geringsten mittleren Durchlässigkeit (13 %) sind aus Abb. 7.4 ersichtlich. Die Einhüllende des Ist-Zustandes zeigt in den Jahren 1990 und 1991 keine nennenswerten Unterschiede in den jahreszeitlichen Veränderungen. Diese Zustände repräsentieren den Zeitraum vor dem Buhnenbau und der Sandaufspühlung. Nach Fertigstellung des Buhnensystems im Herbst 1991 haben sich anschließend folgende Entwicklungen eingestellt:

- kontinuierliche Verschiebung der Uferlinie in Richtung See,
- nennenswerte Verkürzung der Terrasse,
- Zunahme der Strandhöhe,
- Anhebung des Unterwasserprofiles um etwa 0,5 m im Buhnenfeld,
- Ausbildung einer steileren Unterwasserböschung vor Kopf der Buhne gegenüber dem Ist-Zustand.

In dem Untersuchungszeitraum (1990 bis 1995) sind im buhnenlosen Abschnitt (Referenzprofil) nur unwesentliche Veränderungen, die auf Trendentwicklungen hindeuten könnten, aufgetreten. Aus diesem Grunde kann davon ausgegangen werden, daß alle Reaktionen des Unterwasserprofiles im Buhnensystem auf die Wirkung der durchlässigen Buhnen zurückgeführt werden können. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß durchlässige Buhnen mit einer relativ hohen Durchlässigkeit über deren gesamte Länge allein schon zu einer seewärtigen Verschiebung der Uferlinie führen (Buhnenfeld 2-3) können. Die weitere Verminderung der Durchlässigkeit und ein vergrößertes Segment, in dem die Buhnen zur Landseite undurchlässig angeordnet sind, bewirken, aufgrund der Buhnenwirksamkeit, zusätzlich zu der Uferlinienverschiebung eine Erhöhung des Unterwasserstrandprofiles, wie es die Einhüllenden der Felder 5-6 und 7-8 veranschaulichen.

Wenn die Buhnen zum seewärtigen Ende hin eine zu geringe Durchlässigkeit aufweisen, ist zu befürchten, daß sich als Folge vor der Buhnenstreichlinie die Küstenlängsströmung konzentriert und Erosion an der Unterwasserböschung bewirkt wird. Auf diese Erscheinungen deuten die Gegenüberstellungen von einzelnen Profilen im Buhnenfeld 7-8 hin (vgl. Abb. 7.5 D).

7.2 Untersuchungen zu Höhenlinienentwicklungen

In Abschnitt 7.1 wurde die Profilentwicklung einzelner Küstenabschnitte als Summe einjähriger Zeiträume untersucht. Eine derartige Auftragung erlaubt das Erkennen von Tendenzen in den Profilentwicklungen, nicht aber quantitative Aussagen über Profiländerungen in einzelnen Höhenstufen. Im Folgenden werden daher für die Untersuchungsprofile einzelne Höhenstufen und deren Veränderungen über die Zeit untersucht. Für diese Betrachtungen wurden Verschiebungen der Höhenlinie NN +1,0 m, der Uferlinie (NN $\pm 0,0$ m), sowie der Tiefenlinie NN -1,0 m und NN -2,0 m von ausgewählten Peilungen ausgewertet. Die Untersuchungsergebnisse für die 4 Profile sind in Abb. 7.5 zusammengestellt.

Im Referenzprofil (vgl. Abb. 7.5 A) deuten sich über den Gesamtzeitraum von 1990 bis 1995 keine nennenswerten Verschiebungen einzelner Höhen- bzw. Tiefenlinien an. Bemerkenswert ist aber, daß der Beginn von Änderungen im Verlauf der einzelnen Linien erst verzögert einsetzt. Im Buhnenfeld mit der größten mittleren Durchlässigkeit (vgl. Abb. 7.5 B) zeichnet sich erst etwa 2 Jahre nach dem Buhnenbau eine allmähliche Verschiebung der Uferlinie in Richtung See ab. Während dieser Zeit verlagerte sich die Tiefenlinie NN -2,0 m um etwa 20 m in Richtung See. In den Buhnenfeldern 5-6 und 7-8 (vgl. Abb. 7.5 C und D) setzte die vorgenannte Verschiebung der Uferlinie und der Tiefenlinie NN -1,0 m bereits unmittelbar nach dem Buhnenbau ein, wohingegen sich die Tiefenlinie NN -2 m um rd. 20 m auf die Höhe der Buhnenköpfe landwärts verlagerte.

Aus den Ergebnissen der Aufmessung während des laufenden Untersuchungszeitraumes läßt sich zusammenfassend folgern, daß durch die durchlässigen Buhnen offensichtlich die wellenerzeugte Küstenlängsströmung verlangsamt wird. Folgende positive Effekte sind zu nennen:

- Verbreiterung des Strandes und
- Aufhöhung der Terrasse.

Weiterhin ist noch als günstig anzumerken, daß der Verlauf der Unterwasserstrandneigungen, aufgrund der Terrassenbildung, kontinuierlicher geworden ist und somit die einlaufende Wellenenergie über einen breiteren Bereich dissipiert wird.


<u>Abb. 7.5</u>: Veränderungen einzelner Höhen- bzw. Tiefenlinien im Zeitraum von 1990 bis 1996

Bei den Interpretationen der Ergebnisse ist zu beachten, daß alle Reaktionen, die durch den Bau des Buhnensystems hervorgerufen wurden, als Summe der Buhnenwirkungen im gesamten System zu werten sind und nicht allein auf die Wirkung einzelner Buhnen zurückgeführt werden können.

8. Simulation von Dünenabbrüchen bei Extremsturmfluten

8.1 Grundlagen des Berechnungsmodelles

In den vorrangegangenen Abschnitten konnte als günstige Wirkung der durchlässigen Buhnen im zentralen Küstenbereich vor Warnemünde die Ausbildung einer submarinen Terrasse als Folge des Buhnenbaus aufgezeigt werden. Um die positiven Effekte dieses Vorganges auf die Belange des Küstenschutzes, hier der erhöhten Schutzwirkung für den hohen Strand und die Dünen, zu veranschaulichen, wurden am Beispiel des Meßbrückenprofiles (Buhnenfeld 7-8) Simulationberechnungen von Dünenausräumungen durchgeführt. Den Untersuchungen wurden nacheinander ausgewählte Profilaufmaße aus dem Zeitraum 1990 bis 1995 zugrundegelegt, also Zeiträume vor, während und nach dem Buhnenbau (1991). Das verwendete Dünenabbruchmodell stellt eine Weiterentwicklung des Küstenabbruchmodelles EDUNE von KRIEBEL (1989) dar, das dem LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU von KRIEBEL zur Verfügung gestellt wurde.

Die Grundlage für die Abschätzung der Abbruchmengen im numerischen Modell von KRIEBEL bildet die Theorie von DEAN (1977), wonach sich die Form eines Dünenprofiles bei konstantem Wasserstand und Seegang mit der Zeit einem Gleichgewichtsprofil entsprechend der Gleichung (8.1) annähert.

$$h = A \cdot x^{2/3} \tag{8.1}$$

Dabei bezeichnet h die Wassertiefe im Abstand x von der Küstenlinie und A den Gleichgewichtsparameter.

Der Berechnungsansatz beruht auf der Überlegung, daß sich der Brechpunkt der Wellen im Verlauf eines Sturmereignisses infolge des ansteigenden Wasserstandes auf die Küste zubewegt. Dabei erhöht sich die Energiedissipation im Bereich des Profiles zwischen Brechpunkt und dem Wellenauflauf. Diese übersteigt den Wert der Energieumwandlung in der Brandungszone des Gleichgewichtsprofiles und führt somit zu einer Erosion des Strandes und/oder der Düne. Unter der Annahme, daß der Sedimenttransport proportional zur Überschreitung der Dissipation D im berechneten Profil zu derjenigen D_{*} im Gleichgewichtsprofil ist, läßt sich der Transport Q_s in einem Abschnitt des Strandprofiles als

$$Q_s = k \cdot (D - D_*) \tag{8.2}$$

ausdrücken (Gl.8.2). Dabei ist k eine Konstante, die zur Kalibrierung des Modelles verwendet wird. Dieser Wert kann z.B. empirisch durch Vergleiche von errechneten mit tatsächlich gemessenen Profilen ermittelt werden.

Die Energiedissipation (D) beschreibt die Energieumwandlung infolge Wellenbrechens über einen Abschnitt der Brandungszone. Sie berechnet sich für eine beliebige Lokation innerhalb des Profiles aus dem Energiefluß (Gl. 8.3):

$$D = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial F_m}{\partial x}$$
(8.3)

Der Energiefluß ist die Energie, die in Fortschrittsrichtung der Wellen durch einen Querschnitt pro Wellenperiode übertragen wird. Dieser wird nach der linearen Wellentheorie als Produkt aus Wellenenergie und Gruppengeschwindigkeit berechnet (Gl.8.4):

$$F_{\rm m} = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot c_g \tag{8.4}$$

Unter Voraussetzung von Flachwasserverhältnissen kann die Gruppengeschwindigkeit durch die Wellengeschwindigkeit c ersetzt werden (Gl.8.5):

$$c_g = c = \sqrt{g \cdot h}$$
(8.5)

Weiterhin kann die Wellenhöhe in der Brandungszone unter Annahme von Schwallbrechern vereinfacht durch die Beziehung

$$\mathbf{H} = \mathbf{\kappa} \cdot \mathbf{h} \tag{8.6}$$

beschrieben werden (Gl.8.6). Durch κ wird das Verhältnis von Wellenhöhe zur Wassertiefe in der Brandungszone ausgedrückt. Der Wert hierfür liegt nach McCOWAN (1894) bei $\kappa = 0.78$. Somit ergibt sich der Energiefluß unter den genannten Voraussetzungen aus Gleichung 8.7.

$$F_{\rm m} = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g^{3/2} \cdot \kappa^2 \cdot h^{5/2}$$

$$(8.7)$$

Für die numerische Modellierung kann die Energiedissipation (Gl.8.8) in einer Lamelle der Brandungszone eines aufgemessenen Querprofiles als Funktion der Profilcharakteristik nach der Finiten Differenzenmethode berechnet werden (vgl. Abb. 8.1):

$$D_{n} = \frac{\rho \cdot g^{3/2} \cdot \kappa \cdot (h_{n}^{5/2} - h_{n-1}^{5/2})}{4 \cdot (h_{n-1} + h_{n}) \cdot (x_{n} - x_{n-1})}$$
(8.8)

Die Energiedissipation (Gl.8.9) je Lamelle im Gleichgewichtsprofil erhält man aus Gleichung 8.3 als Konstante:

$$D_{*} = \frac{5}{24} \cdot \rho \cdot g^{3/2} \cdot \kappa^{2} \cdot A^{3/2}$$
(8.9)

Die Umlagerungsmengen Q_s pro Zeiteinheit Δt während eines Sturmereignisses lassen sich unter der Annahme, daß die gesamte Sandmenge in küstennormaler Richtung erhalten bleibt, aus der Kontinuitätsbedingung ableiten (Gl.8.10)

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{\partial Q_s}{\partial h}$$
(8.10)

x bezeichnet die horizontale Entfernung des zu berechnenden Abschnittes innerhalb des Profiles zu einem frei gewählten, landeinwärts gelegenen Punkt, der von dem Abbruchgeschehen unberührt bleibt, und h den Abstand des Abschnittes zum Wasserspiegel. Die Werte für Q_s und x sind in seewärtige Richtung positiv definiert, h ist positiv unterhalb des Ruhewasserspiegels. Bei diesem Ansatz wird die küstenparallele Komponente des Sedimenttransportes vernachlässigt. Diese macht jedoch ohnehin nur einen geringen prozentualen Anteil am Gesamttransport aus, da während einer Sturmflut die Wellen nahezu küstennormal auf den hohen Strand auftreffen. Eine genaue Modellbeschreibung kann bei NEWE (1994) nachgelesen werden.



<u>Abb. 8.1:</u> Bezeichnungen und Definitionen für die Berechnung des Quertransportes $Q_{s,n}$ nach dem Ansatz von KRIEBEL (NEWE, 1994)

8.2 Ergebnisse von Simulationsberechnungen

Für die Simulationsberechnungen der Dünenabbrüche wurden die hydrologischen Verhältnisse der Sturmflut von 1872 verwendet. Der Wasserstandsverlauf am Pegel Wieck bei Greifswald und die angenommenen Wellenhöhen sind in Abb. 8.2 dargestellt. Die Einstellungen für das Berechnungsmodell wurden entsprechend den Untersuchungen für die Westküste vor Neuendorf (Hiddensee) übernommen.

Die Simulation der Dünenabbrüche wurde mit ausgewählten Profilen, die die unterschiedlichen morphologischen Zustände für die Zeiträume vor, während und nach dem Bau des Buhnensystems repräsentieren, durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse sind in den Abb. 8.3 repräsentativ für die Jahre 1991, 1992, 1993 und 1994 dargestellt. Neben den graphischen Darstellungen werden für jedes Profil zusätzlich folgende Umlagerungsmengen in den einzelnen Berechnungen angegeben:

- $\Delta Vol_{Ges} =$ Gesamtmenge des umgelagerten Sandes, unabhängig ob Erosion oder Anlandung, d.h. ohne Vorzeichen. Die Erosions- und Anlandungsvolumina müssen jedoch gleich sein, da das Gesamtvolumen unverändert bleibt.
- $\Delta Vol_{NN} =$ Volumen, das durch die NN ±0 m Höhenlinie hinaus seewärts verlagert wird, es entspricht der Summierung der Erosions- und Auflandungsflächen oberhalb NN ±0 m und gibt die Volumenänderung des normalerweise trockenen Strandbereiches an.

Aus den Auftragungen in Abb. 8.3 geht hervor, daß sich im Falle einer Extremsturmflut für den Zustand des Unterwasserprofiles vor dem Buhnenbau (1991, Abb. 8.3 A) Dünenausräumungen in einer Größenordnung von rd. $\Delta Vol_{NN} = 64 \text{ m}^3/\text{m}$ ergeben hätten. Bedingt durch die Profilumlagerungen nach dem Buhnenbau und nach der Dünenvorspülung (Übergangszeitraum) reduziert sich die Gesamtmenge des umgelagerten Sandes bereits um etwa 40 % auf $\Delta Vol_{NN} = 40 \text{ m}^3/\text{m}$ (vgl. Abb. 8.3 B). Infolge der Terrassenbildung zu Beginn des Jahres 1993 ergibt sich eine weitere Reduzierung der Umlagerungsmenge um nochmals etwa 50 % auf rd. 20 m³/m, d.h. auf rd. ein Drittel des Volumens, das noch vor dem Buhnenbau für die zugrundegelegte Sturmflut umgelagert worden wäre (vgl. Abb. 8.3 C).

In Abb. 8.4 sind beispielhaft nochmals je ein Zustand vor dem Buhnenbau (12.04.90) und ein Zustand 3 Jahre nach dem Bau des Buhnensystems (07.11.95) gegenübergestellt, um dessen positive Auswirkung zu veranschaulichen. Es ist ersichtlich, daß sich als Folge der Terrassenausbildung (bis 1995) der Dünenrückgang von 34 m (vor dem Buhnenbau) auf 17 m vermindert. Das Ausräumungsvolumen aus der Düne oberhalb vom Mittelwasserstand reduziert sich entsprechend von 69 m³/m auf rd. 20 m³/m. Die Simulationsergebnisse für die Dünenausräumungen und die Dünenkronenrückgänge (NN +4,0 m) sind zusammenfassend in Abb. 8.5 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Daraus geht noch einmal anschaulich hervor, daß sich nach dem Buhnenbau und der Dünenvorspülung die Umlagerungsmengen und der Dünenrückgang von 1990 bis 1995 größenordnungsmäßig etwa auf die Hälfte verringert haben.



<u>Abb. 8.2</u>: Zeitreihe des Wasserstandes am Pegel Wieck bei Greifswald und angenommener Wellenhöhenverlauf für die Sturmflut von 1872



<u>Abb. 8.3</u>: Umlagerungen im Strand- und Dünenbereich aufgrund der Sturmflut von 1872; hier für die Profilaufmaße vom 04.07.91 (A) vor dem Buhnenbau, 24.06.92 (B, Bauphase) sowie 24.02.93 (C) und 18.05.94 (D) nach Fertigstellung des Buhnensystems



<u>Abb. 8.4</u>: Umlagerungen im Strand- und Dünenbereich aufgrund der Sturmflut von 1872; hier vom 12.04.1990 (links) und vom 07.11.1995 (rechts)



<u>Abb. 8.5</u>: Gesamtmenge des umgelagerten Sandes (links) und Dünenkronenrückgang (rechts) unter der Annahme der Sturmflut von 1872 in Abhängigkeit einzelner Profilformen für das Meßbrückenprofil vor Warnemünde

Aus den Untersuchungen ergibt sich weiterhin hinsichtlich der Schutzwirkung, daß der Unterwasserstrand im Buhnenfeld 7-8 seit 1993 relativ stabil geblieben ist, d.h. die Dünenrückgänge und die Umlagerungsmengen für die nachfolgenden Jahre wären demnach effektiv gleich. Mit Hilfe der Simulation konnte somit die positive Wirkung einer submarinen Terrasse auf den Dünenschutz veranschaulicht werden.

Durch regelmäßige Aufmessungen des Unterwasserstrandprofiles im Buhnenfeld 7-8 sollte künftig die Profilentwicklung überprüft werden, um damit zu belegen, ob die geschilderte Terrassenbildung auch dauerhaft erhalten bleibt.

9. Forschungs- und Optimierungsbedarf zur Wirkungsweise durchlässiger Pfahlbuhnen

Die vorliegenden Ausführungen zu den Meßergebnissen aus dem mehrjährigen Naturmeßprogramm liefern Hinweise auf eine positive Wirkungsweise der durchlässigen Buhnen. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens, möglichst detaillierte Kenntnisse über den Einfluß von Einbauten in See, hier am Beispiel des durchlässigen Buhnensystems vor Warnemünde, auf der Grundlage von Naturmessungen zu erlangen konnte jedoch nur annähernd erfüllt werden. Dies liegt zum einen darin begründet, daß das Buhnensystem nicht über die gesamte Dauer des Untersuchungszeitraumes im ursprünglichen Zustand erhalten werden konnte. Durch Wurmbefall wurden Pfahlbuhnen zerstört und zusätzlich im Eiswinter 1994/95 große Lücken in die einzelnen Buhnenreihen gerissen. Dadurch war eine Zuordnung von einwirkenden Größen auf bestimmte Buhnenformen (z.B. unterschiedliche Durchlässigkeit) nahezu unmöglich, so daß einzelne Untersuchungsergebnisse lediglich als Trendhinweise, die noch eingehender zu belegen sind, eingestuft werden konnten. Andererseits ist auch die Variabilität der einwirkenden und gemessenen Größen so groß, daß eine systematische Analyse von Wirkungsweisen, hier am Beispiel von Buhnen mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten, in Buhnenlängsachse und auch von Buhne zu Buhne nahezu unmöglich ist. Dennoch ist ein mehrjähriges Meßprogramm in der Natur unverzichtbar, wobei jedoch die Ansprüche und Erwartungen in eine solche Vorgehensweise künftig von vornherein eingeschränkt werden sollten. Die Untersuchungsergebnisse haben vielfach Hinweise auf die Wirksamkeit von durchlässigen Buhnen geliefert, die bislang noch nicht erkannt worden waren und ermuntern dazu, an dieser Küstenschutzmethode festzuhalten. Hinsichtlich einer Optimierung bleiben noch zahlreiche Fragen unbeantwortet, unter anderem z.B.:

- Welche Buhnenlänge für ein vorgegebenes Unterwasserprofil optimal?
- Welche Parameter des lokalen Wellenklimas sind für die Bemessung der Buhnenfelder maßgebend?
- Welche Mindestbreite des gewöhnlich trockenen Strandbereiches ist notwendig, um die Erosion des Strandes und der Düne während der Sturmfluten zu minimieren?

Auch die Frage der Durchlässigkeit als Funktion der Wirksamkeit ist noch nicht untersucht worden, z.B.

- Bei welchem Verbauungsgrad wird die durchlässige Buhne quasi undurchlässig?
- Welche Anordnung der Pfähle ist die wirksamste im Sinne des Strömungswiderstandes?
- Welches Verhältnis zwischen Buhnenabstand und Buhnenlänge ist optimal?

Weiterhin fehlen noch Daten, woraus die funktionalen Zusammenhänge der küstenparallelen Geschwindigkeit und ihrer Verteilung in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit und dem Buhnenabstand abgeleitet werden könnten. Diese Zusammenhänge könnten durch systematische Laborversuche in einem dreidimensionalen Wellenbecken beantwortet werden. Darin sollte zunächst nur die Strömung allein untersucht werden. Durch die Variation der Buhnendurchlässigkeit und des Buhnenabstandes könnte dann die Anordnung ermittelt werden, die zur optimalen Geschwindigkeitsverteilung führt. Welche Buhnenkonfiguration letztendlich optimal ist, ist von vornherein nicht bekannt. Das Optimum ist ein Kompromiß zwischen der Anzahl der Pfähle pro Buhne, dem Buhnenabstand und der küstenparallelen Geschwindigkeit, d.h. wieweit die Geschwindigkeit reduziert werden kann, ehe die Querströmungen entlang der Buhnenflanken nennenswert ansteigen. Die Versuche nur mit Strömungen ohne Wellen werden zeigen, wie die Geschwindigkeit im Buhnenfeld als eine Funktion der Durchlässigkeit variiert. Eine zu große Geschwindigkeitsreduzierung im Buhnenfeld wird zur großräumigen Zirkulation (Strömungswalze) im Buhnenfeld führen.

Die Anordnung, die sich aus den Versuchen mit Strömung allein ergibt, muß dann unter Einwirkung von Strömung und Wellen untersucht werden. Da die Strömung in der Ostsee in der Regel wellenerzeugt ist, können die Untersuchungen mit Wellen auf einen Quadranten beschränkt werden. Die Hauptfrage wird sein: "Inwieweit wird der Buhnenabstand, der sich aus den Untersuchungen mit der Strömung allein ergibt, von den einlaufenden strömungserzeugenden Wellen beeinflußt?" Die wellenerzeugte küstenparallele Strömung wird das Strömungsbild in den Buhnenfeldern beeinflussen. Es muß also damit gerechnet werden, daß die Buhnenabstände aus den "Strömungsversuchen" für den Welleneinfluß angepaßt werden müssen.

Die Modellversuche werden Trendaussagen liefern. Sie können allerdings nicht die Vielfalt der Natur simulieren. Daher müssen, in einem sich anschließenden Schritt, die Daten aus den Modellversuchen mit Naturdaten verifiziert werden, die nur durch Meßkampagnen in den eigentlichen Buhnenfeldern gewonnen werden können. Wichtig bei diesen Naturmessungen, die im Vergleich zu den vorangestellten Meßprogramm gezielt auf die Optimierungsergebnisse aus den Laboruntersuchungen auszurichten sind, ist die Ermittlung der Geschwindigkeiten beiderseits der Buhne, der Durchfluß durch die Buhne und wenn möglich auch der Höhenunterschied des mittleren Wasserspiegels zwischen Luv- und Leeseite des Bauwerkes. Ebenso wichtig ist die Geschwindigkeitsverteilung am seewärtigen Rande der strandnahen Terrasse. Zusätzlich muß die zeitgleiche Geschwindigkeitsverteilung an der benachbarten, buhnenlosen Küstenstrecke gemessen werden. Die Durchlässigkeit der Buhne könnte während einer solchen Meßkampagne provisorisch, ausgehend vom Ausgangswert, stufenweise reduziert werden.

Laborversuche von BAKKER et al. (1984) deuten darauf hin, daß zweireihige Buhnen mit einer doppelten Entfernung, d.h. die gleiche Anzahl von Pfählen pro Strandabschnitt, wirksamer sind, gegenüber einreihigen Buhnen mit geringerem Abstand. Dies ist auch aus hydrodynamischen Überlegungen erklärbar, da die Pfähle der zweiten Reihe im Bereich der Nachlaufwirbel aus der ersten Reihe liegen und dadurch ein erhöhter Energieverlust verursacht wird. Es ist jedoch zu erwarten, daß größere Abstände zu einer Zirkulation im Buhnenfeld führen und damit die Wirksamkeit der Buhnen verringert wird. Es ist somit anzunehmen, daß, unter bestimmten Vorraussetzungen, einreihige Pfahlbuhnen mit einem kleineren Abstand wirksamer zu sein scheinen, als zweireihige Buhnen mit einem entsprechend größeren Buhnenabstand.

Der Buhnenabstand wird aber auch von der Verteilung der Windrichtungen (lokales Wellenklima) abhängig sein. Die Geschwindigkeitsreduzierung ist von der Durchlässigkeit der Buhne abhängig. Mit einer gewissen Durchlässigkeit ist ein optimaler Buhnenabstand verbunden, der mit der Reduzierung der Durchlässigkeit erhöht werden könnte. Die Konsequenz ist jedoch, daß die dichtere Buhne zur Ausbildung einer Rippströmung und einer großräumigen Zirkulation im Buhnenfeld führen würde. Um diese Rippströme zu vermeiden, sollte der Geschwindigkeitsabbau wieder möglichst flächenhaft verteilt erfolgen, d.h. durch möglichst kleine Buhnenabstände. Obwohl der Beweis noch nicht erbracht wurde, deuten alle Indizien darauf hin, daß Buhnen mit höheren Durchlässigkeiten bei einem geringeren Buhnenabstand die größte Wirksamkeit aufweisen werden.

Bei der Durchführung und Bewertung dieser Naturmessungen im Anschluß an die Laboruntersuchungen ist zu berücksichtigen, daß Langzeitdaten der Windrichtungen und Windstärke häufig Schwankungen aufweisen. Einige Jahre mit leichten küstennormalen Winden könnten die Buhnenfelder mit Sand füllen. Es könnten aber auch Jahre mit starken Winden auftreten, die die Felder ausräumen. Systematisch vergleichende Studien könnten hier wertvolle Erkenntnisse liefern.

Die Verknüpfung der küstenparallelen Strömung mit dem küstenparallelen Sedimenttransport kann nur durch Meßkampagnen in den Buhnenfeldern hergestellt werden. Es sollte daher angestrebt werden, den Transport an einem Punkt zu messen und mit der Geschwindigkeit zu verknüpfen. Diese Beziehung könnte dann in erster Näherung für das ganze Buhnenfeld angewandt werden, um die Größenordnung des Transportes zu ermitteln.

10. Schrifttum

- ALW HUSUM (1994) Untersuchungen zum Küstenschutz auf Sylt Phase II (1991-1993), Abschlußbericht.
- ALW KIEL et al. (1995) Forschungsvorhaben Vorstranddynamik einer tidefreien Küste, Abschlußbericht.
- BAKKER, W.T.; HULSBERGEN, C.H.; ROELSE, P.; SMIT, C. de; SVASEK, J.N. (1984) Permeable Groynes: Experiments and Practice in the Netherlands. Proc. 19th Coastal Engineering Conf. Vol. II, 2026-2041.
- BOCZAR-KARAKIEWICZ, B., PAPLIASKA, B.; WINIECKI, J. (1981) Formation of Bars by Surface Waves in Shallow Water. Polska Akademia Nauk, Instytut Budownictwa Wodnego, Gdansk. (Mitt. Leichtweiß-Institut, No. 70, 377-420).
- BODGE, K.R.; KRAUS, N.C. (1991) Critical Examination of Longshore Transport Rate Magnitude. ASCE, Coastal Sediments '91, Vol. I, 139-155.
- BÜLOW v., K. (1954) Allgemeine Küstendynamik und Küstenschutz an der südlichen Ostsee zwischen Trave und Swine. Beiheft zur Zeitschrift Geologie, Nr. 10, Berlin.
- CERC (1984) Shore Protection Manual. U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vol I, II & III, Vicksburg.
- DEAN, R.G. (1977) Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts.
- DETTE, H.H., RAUDKIVI, A.J., MAGNERE-WEND, N.; SCHÜTTRUMPF, H. (1994) Untersuchungen zu Hafenstandorten auf dem Fischland, Darß und Zingst. Bericht Nr. 783, Leichtweiß-Institut, TU Braunschweig (unveröffentlicht).
- DETTE, H.H.; NEWE J.; TRAMPENAU T. (1996) Windstatistik Warnemünde 1980 bis 1994 - Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, Bericht Nr. 801 (unveröffentlicht).
- EAK (1993) Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuß für Küstenschutzwerke. Die Küste, Heft 55.

- GEINITZ, E. (1910) Das Uferprofil des Fischlandes. Mitteilungen aus der Mecklenburgischen Geologischen Landesanstalt, XXI, Rostock.
- GOMOLKA, A. (1988) Erschließung und Auswertung von historischen Karten und anderen Quellen zur Feststellung von Veränderungen an ausgewählten Abschnitten der Außenküste (Insel Usedom).
- HURTIG, Th. (1954) Die mecklenburgische Boddenlandschaft und ihre entwicklungsgeschichtlichen Probleme. Ein Beitrag zur Küstengeschichte der Ostsee. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- KEILHACK, K. (1911) Die Verlandung der Swinepforte. Jahrbuch der Preuß. Geol. Landesanstalt.
- KOLP, O. (1955) Sturmflutgefährdung der deutschen Ostseeküste zwischen Trave und Swine. Seehydrographischer Dienst und Hydro-Meteorologisches Institut Stralsund.
- KOLP, O. (1966) Untersuchung der Wirksamkeit von Seebuhnen mit Hilfe von Farbsandversuchen. Beitrag z. Meereskunde, H. 17/18, 61-90.
- KOLP, O. (1970) Farbsandversuche mit lumineszenten Sanden in Buhnenfeldern. Ein Beitrag zur Hydrographie der ufernahen Meereszone. Petermanns Geographischen Mitteilungen, 114. Jg., Heft 2.
- KRIEBEL, D.L. (1989) Users Manual for Dune Erosion Model EDUNE.
- McCOWAN, J. (1894) On the Highest Wave of Permanent Type. Philos. Mag. Jour. of Science, Vol. 38.
- NEWE, J. (1994) Anwendungsorientierte Simulation von D
 ünen- und Aufsp
 ülprofilausr
 äumungen bei Sturmfluten f
 ür die Westk
 üste von Sylt. Untersuchungen zur Optimierung des K
 üstenschutzes auf Sylt Phase II. Statusseminar 1994. Der Bundesminister f
 ür Forschung und Technologie. S. 126-143.
- PETERSEN, M. (1961) Das Deutsche Schrifttum über Seebuhnen an sandigen Küsten. Die Küste, Heft 9. Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee.

RAUDKIVI, A.J. (1990) Loose Boundary Hydraulics. 3rd Edition. Pergamon Press.

- RAUDKIVI, A.J. (1996) Permeable Pile Groins. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 122, No. 6, pp. 267-272.
- REDICK, M.; SCHADE, A. (1996) Dokumentation der Sturmflut vom 3. und 4. November 1995 an den K
 üsten Mecklenburgs und Vorpommerns. Ministerium f
 ür Bau, Landwirtschaft und Umwelt des Landes Mecklenburg-Vorpommern.
- REINHARD, H. (1956) Küstenveränderungen und Küstenschutz der Insel Hiddensee. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- SCHÜTZE, H. (1931) Morphologischer Beitrag zur Entstehung des Darß und Zingst (Ostsee).
- STIGGE, H.J. (1994) Die Wasserstände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns. Die Küste, Heft 56, S. 1-24.
- STIGGE, H.J. (1996) Persönliche Mitteilung.
- TRAMPENAU, T.; GÖRICKE, F.; RAUDKIVI, A.J. (1996) Permeable Pile Goins. Proceedings of the 25rd International Conference on Coastal Engineering, Vol. 2, pp. 2142-2151, Orlando, Florida, USA.
- WEISS, D. (1991 a) Küstenschutzbauwerke an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern. Wasser und Boden, Heft 1.
- WEISS, D. (1991 b) Einreihige Holzpfahlbuhnen im technischen Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern. Die Küste, Heft 52.
- WEISS, D. (1991 c) Seebau und Küstenschutz. Wassertechnik, Band 4, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin.
- WERNICKE, D. (1930) Die Küste der Inseln Usedom und Wollin vom Penemünder Hafen bis zum Swinhöft. 1. Beiheft zum 47./48. Jahrgang der Pommerschen Geographischen Gesellschaft, Greifswald.
- ZANDER, R. (1934) Die rezenten Änderungen der mecklenburgischen Küste. Beihefte zu den Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft zu Rostock, Nr. 1, Rostock.

Fragestellungen zum KfKI Projekt "Wirkungsweise von Einbauten in See"

1. Hydrodynamik und Hydrologie

- Wie sind die Seegangs- und Strömungsverhältnisse im Buhnensystem (Schorre und Strand) und seewärts der Buhnenköpfe beschaffen und wie im Vergleich ohne Buhnen?
- Gibt es typische hydrodynamische Zonierungen, auf die durch die Buhnenkonstruktion reagiert werden muß?
- Wie pendelt die Strandlinie in Abhängigkeit vom Seegang (Höhe und Richtung)?
- Welche hydrodynamischen Vorgänge spielen sich in einem durchlässigen Buhnenfeld aufgrund der örtlichen Gegebenheiten beim Zustand: "Buhne nicht überströmt" ab und wieweit unterscheiden sie sich von einem undurchlässigen Buhnenfeld?
- Wie ändert sich die Suspensionsfracht in Abhängigkeit vom Energiefluß innerhalb (Eintrag bzw. Austrag) und außerhalb der Buhnenstreichlinie und welche morphologischen Veränderungen sind damit verknüpft?
- Wie verändert sich die Größenordnung der wellenerzeugten Strömungen und das Wellenauflaufverhalten (Reflexion) durch den Bau von Buhnen

in Sandriff-Rinnen-Systemen (Störung des natürlichen Gleichgewichtszustandes) und welche charakteristische Unterwasserstruktur bildet sich aus?

2. Sedimentdynamik

- Welche morpho- und sedimentdynamische Wechselwirkung existiert zwischen seewärtigem Riff und der Schorre im Buhnensystem?
- Kann von See kommendes Material akkumuiliert werden? Ist überhaupt genug vorhanden?
- Geht Sediment seewärts verloren?
- Gibt es einen Sedimentaustausch zwischen den Buhnenfeldern, speziell bei der halbdurchlässigen Holzpfahlbuhne? Wieviel Sediment wandert durch die Buhne, wieviel außen herum? Inwieweit ist der Sedimentaustausch mit der Durchlässigkeit des Bauwerkes verknüpft?
- Unter welchen hydrodynamischen Bedingungen finden Sedimentbewegungen statt, wie groß sind diese und wie sind sie ausgerichtet (On-/Offshore- oder Küstenlängstransport) und welchen Einfluß hat eine Morphologie auf solche Transportprozesse?
- Wie verändert sich die qualitative Sedimentzusammensetzung in den unterschiedlichen morphologischen Einheiten des Strandes und der Schorre in Abhängigkeit von den hydrologischen (Wellenklima) und morphologischen Parametern?

3. Morphogenese

- Welche Stadien der morphogenetischen Küstenentwicklung sind nachweisbar und wie ist die Extrapolation der bisherigen Entwicklungstrends?
- Welche Rolle besitzen "Aufhänger" und Buchten im sedimentdynamischen Entwicklungsgang und sind Wechselwirkungen zu Kausalfaktoren nachweisbar?
- Wie gestalten sich die qualitative Analyse des Küstenausgleichsprozesses und die quantitative Bestimmung von Akkumulations- und Abrasionsgebieten?
- Welches Gewicht hat der anthropogene Einfluß auf die Küstenentwicklung und wie stellt sich der unbeeinflußte Entwicklungsgang dar?

4. Morphologie und Zusammenführung

- Welche Vorgänge der Morpho-, Hydro- und Sedimentdynamik laufen in küstenparalleler Nachbarschaft und im seewärtigen Vorfeld (bis zum Tiefwasser) ab und wie ist der Küstenabschnitt mit dem Buhnensystem Warnemünde davon betroffen (Verhältnis erweitertes Untersuchungsgebiet zu Untersuchungsgebiet mit Detailprogramm in Buhnenfeldern)? Wie hängt die Ausbildung der Morphologie innerhalb und außerhalb des Buhnenfeldes von den einzelnen Parametern der Hydro- und Sedimentdynamik ab?
- Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen der Hydrodynamik und morphologisch markanten Punkten des Unterwasserstrandes (äußerer und innerer Sandriffhang, Riffkamm und Rinnenmitte)?
- Kann es sein, daß mit dem Buhnenbau die Tieferlegung des Vorstrandes rascher erfolgt oder z.B. eine baulich bedingte Erosion die Morphologie im seewärtigen Anschlußbereich ändert?

- Wie sind die morphologischen Stabilitätsbedingungen (Profil und Fläche) für die dominierenden hydrodynamischen Verhältnisse im Buhnensystem sowie seewärts der Buhnenköpfe und welche Wirkung leitet sich für den Küstenschutz ab?
- Welche Schwankungen im Riff-Rinnen-System treten innerhalb des Buhnensystems auf und ändern die Lage und Strukturen der vorgelagerten Riff-Rinnen-Systeme? Wie reagieren Uferlinie und Strand?
- Welche Prozesse spielen sich bei Sturmereignissen mit Wasserstandshebungen (unterschieden in die drei Hauptwellenangriffsrichtungen NW, N und NO) an der Ostseeküste ab und in welchem Verhältnis stehen die Veränderungen dort zu Umformungen durch "langandauernde Ereignisse" (stetiges mittleres Seegangsklima)?
- Wie verändert sich die Größenordnung der wellenerzeugten Strömungen und das Wellenauflaufverhalten (Reflexion) durch den Bau von Buhnen in Sandriff-Rinnen-Systemen (Störung des natürlichen Gleichgewichtszustandes) und welche charakteristische Unterwasserstruktur bildet sich aus?
- Wie kann die Wirkung von Buhnen auf die Morphologie, den Sedimenthaushalt und die Sedimentzusammensetzung einschließlich der sedimentdynamischen Prozesse im Strand- und Vorstrandbereich qualitativ und quantitativ abgeschätzt werden? Wie sind die Bauwerksabmessungen und die hydrodynamischen Parameter damit verknüpft?

Methodische Vorgehensweise im Forschungsprojekt

Hinsichtlich der zu bearbeitenden Untersuchungsbereiche wurde folgende Einteilung vorgenommen:

1. Bereich:

- Untersuchungen der natürlichen, großräumigen Entwicklung der Morphogenese und Prognose der Küstenentwicklung. Ausgangspunkt hierfür ist die Gesamtküste Mecklenburg-Vorpommerns, während schwerpunktmäßig eine Vertiefung für die Mecklenburger Bucht und speziell für den Buhnenversuchsabschnitt Warnemünde erfolgt.

2. Bereich:

- Untersuchungen zur Wirkungsweise und zum Wirkungsmechanismus von Buhnen durch Gewinnung von komplexen Naturdaten. Vornehmlich ist hierbei der vorherrschende Typ der einreihigen Holzpfahlbuhnen zu bearbeiten.

Hinsichtlich der zu bearbeitenden Fachdisziplinen ergibt sich eine Vierteilung mit den folgenden Arbeitspartnern:

- Hydrodynamik, TU Braunschweig
- Sedimentdynamik, Universität Kiel
- Morphogenese, Universität Greifswald
- Morphologie und Koordinierung, StAUN Rostock

Dem <u>ersten Bereich</u> der Morphogenese großräumiger Küstenlinien wird sich ihrem Profil entsprechend die Universität Greifswald widmen. Kartenmaterial unterschiedlichster Art aus möglichst vielen verschiedenen Zeitabschnitten ist dabei zu sichten und auszuwerten. Luftbilder von aktuellen Befliegungen sind schrittweise hinzuzuziehen. Es wird eine lückenlose Dokumentation der Küstenformen und ihrer Entwicklung an der Deutschen Ostseeküste erwartet. Sämtliche Bauwerke und deren Auswirkung auf die Morphogenese sind in die Betrachtungen einzubeziehen. So ist es möglich, den Effekt von Bauwerken über lange Zeiträume und somit den Einfluß des Menschen auf die Küstenentwicklung zu beurteilen. Prognosen über die künftige morphogenetische Küstenentwicklung sollen, soweit dies möglich ist, über die Extrapolation der bisherigen Entwicklungstrends erstellt werden. Hinweise auf Kausalfaktoren, die maßgeblich die Küstenumbildung über längere Zeiträume beeinflussen, sind zu geben.

Eine ausgezeichnete Ausgangsbasis für den zweiten Untersuchungsbereich bildet das bereits vorhandene, mit einer soliden Grundausrüstung ausgestattete Meßfeld vor Warnemünde. Hier liegt bereits eine umfangreiche Sammlung von Naturdaten in aufbereiteter Form von 1988 an (vor dem Buhnenbau) vor. Dabei wurden eine Fülle von, auf die Küstenentwicklung einflußnehmenden Kausalfaktoren miterfaßt. Weiterhin sind meteorologische Daten sowie die Pegelstände weit zurückreichender Zeiträume von anderen Institutionen abrufbar. Dies bildet die Grundlage für die Quantifizierung des Bauwerkseinflusses auf den betreffenden Küstenabschnitt (Möglichkeit des Vergleichs der Daten von vor, während und nach dem Buhnenbau).

Defizite, die insbesondere in der Gewinnung von Meßdaten über die Verteilung von Sediment im Wasserkörper, die Sedimentstruktur, die Sedimenttransportvorgänge, die Transportmassenbilanzen usw. bestehen, sollen durch die Mitwirkung der Partner beseitigt werden. Durch Vorabsprachen erfolgte eine konkrete Aufgabenaufteilung innerhalb dieser engen Verflechtung, die der Kompetenz der einzelnen Partner entsprach. Geplant sind kontinuierliche hydrodynamische und morphologische Untersuchungen, die nach Möglichkeit, zur besseren statistischen Absicherung auch über den dreijährigen Zeitraum der Projektbearbeitung hinaus weitergeführt werden sollten. Alle sedimentologischen Daten und zum Teil hydrodynamischen Daten sollen innerhalb vorgesehener Meßkampagnen gewonnen werden, wobei Sturmflutereignisse zu berücksichtigen sind. Hauptuntersuchungslokalität wird vorerst nur, wegen des enormen zeitlichen und organisatorischen Aufwandes, das Küstenvorfeld Warnemünde darstellen. Einfache morphologische und hydrologische Daten können parallel dazu an anderen Buhnensystemen erfaßt werden. Tiefergreifende Untersuchungen in anderen Testfeldern, die zu allgemeingültigeren Aussagen für die deutsche Ostseeküste führen würden, sind, soweit dies der zeitliche Rahmen zuläßt, erst frühestens im letzten Projektbearbeitungsjahr möglich. Großräumige Ergebnisse allgemeiner Natur werden über den morphogenetischen Untersuchungsteil erwartet.

Für die Koordinierung aller anstehenden Aufgaben und Maßnahmen zeigt sich das StAUN Rostock verantwortlich.