Berichtsblatt

	· · · ·
2. Berichisart Abschlußbericht	3.
^{4. Titel des Benichts} Wirkungsweise von Einbauten in See, Teilprojekt	Sedimentologie
5. Autorien) (Name Vornamein)) Schwarzer, Dr. K. und Schrader, Ekko	6. Abschlußdatum des Vorhabens 30.04.1997 7. Veröffentlichungsdatum
 3. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Geologisch-Paläontologisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Olshausenstraße 40 24118 Kiel 13. Fördernde Institution (Name, Adresse) 	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 10. Förderkennzeichen MTK 0546 A 11. Seitenzahl 89 12. Literaturangaben 150 14. Tabaitan
Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) Postfach 200240 5300 Bonn 2	14. Tabellen 14. 15. Abbildungen 38
¹⁴ Kurvtassuna Von 1993 bis 1997 wurden vor Warnemünde (Mecklenburg-Vorpomme konstruierter ("geschlossen", "halboffen", "offen") einreihiger Holzp te unter Einbeziehung der Bathymetrie und der Hydrologie untersuc erfolgten zweimal jährlich im Rahmen größerer Meßkampagnen. Weser portuntersuchungen mittels fluoreszierender Leitstoffe. Die Ergebnisse Arbeitsgebieten der deutschen Ostseeküste, wo ein anderer Buhn vorhanden ist, verglichen. Der natürliche Vorstrand vor Warnemünde w gen zum Aufbau der Vorstrandmorphgologie auf. Zur Strand- und Vo künstlich Sand eingebracht. Leichte bis mäßige Winde mit Geschwind Vorstrand hydrodynamische Bedingungen, die zu einem auflandiger Buhnenfeld mit einem "offenen" Baukörper sind die Sedimentation Buhnenfeldern mit einer halboffenen oder geschlossenen Bauwerkskom > 10 m/s entstehen in einem "geschlossenen" Buhnenfeld (einreihige I zirkulierende Strömungssysteme sowie Rippströmungen. Sie führen Sai tieferen Regionen der Schorre und wirken sich somit nachteilig au "halboffen" konstruierten Buhnenfeldern treten diese negativen Ers. Umfang auf, teilweise sind sie auch nicht vorhanden. Die "offene" Bi mentbewegungen auf dem flachen Vorstrand. Der ufernahe Transport Akkumulationskörper. Die "halboffene" Buhnenkonstruktion weist ge die Sedimentstabilität auf, als die "offene" und "geschlossene"	rn) die Wirkungen drei unterschiedlich fahlbuhnen auf die Vorstrandsedimen- cht. Die sedimentologischen Arbeiten atliches Element waren Sedimenttrans- e wurden mit Messungen aus anderen entyp (T-förmige Natursteinbuhnen) veist nur relativ geringe Sedimentmen- orstrandstabilisierung wurde mehrfach digkeiten < 10 m/s schaffen auf dem n Sedimenttransport führen. In dem sbedingungen ungünstiger als in den struktion. Bei Windgeschwindigkeiten Holzpfahl- und T-förmige Steinbuhne) nde aus dem Buhnenfeld hinaus in die f die Sedimentstabilität aus. In den cheinungen in wesentlich geringerem uhne ermöglicht küstenparallele Sedi- fördert hier die Bildung großflächiger enerell größere Vorteile in Bezug auf Bauweise. Im Wirkungsbereich von rohlässigkeit dieser Bauwerke für die
küstenparallel bewegten Sedimente keine größeren Veränderungen be Erosion schließen lassen. ^{19. Schlagwoner} Buhnen, Küstenschutz, Sedimenttransport	eobachtet werden, die auf eine Lee-

20. Verlag

21. Preis

Forschungsvorhaben

WIRKUNGSWEISE VON EINBAUTEN IN SEE

Teilprojekt Sedimentologie

Förderkennzeichen: MTK 0546 A

ABSCHLUßBERICHT

Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

April 1998

Forschungsvorhaben

WIRKUNGSWEISE VON EINBAUTEN IN SEE

Teilprojekt Sedimentologie

Förderkennzeichen: MTK 0546 A

ABSCHLUßBERICHT

Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

April 1998

When Show in

(Dipl. Geol. Dr. Klaus Schwarzer)

CUL Sola

(Dipl. Geogr. Ekko Schrader)

Kurzfassung

Von 1993 bis 1997 wurden vor Warnemünde (Mecklenburg-Vorpommern) die Wirkungen drei unterschiedlich konstruierter ("geschlossen", "halboffen", "offen") einreihiger Holzpfahlbuhnen auf die Vorstrandsedimente unter Einbeziehung der Bathymetrie und der Hydrologie untersucht. Die sedimentologischen Arbeiten erfolgten zweimal jährlich im Rahmen größerer Meßkampagnen. Wesentliches Element waren Sedimenttransportuntersuchungen mittels fluoreszierender Leitstoffe. Die Ergebnisse wurden mit Messungen aus anderen Arbeitsgebieten der deutschen Ostseeküste, wo ein anderer Buhnentyp (T-förmige Natursteinbuhnen) vorhanden ist, verglichen.

Der natürliche Vorstrand vor Warnemünde weist nur relativ geringe Sedimentmengen zum Aufbau der Vorstrandmorphgologie auf. Zur Strand- und Vorstrandstabilisierung wurde mehrfach künstlich Sand eingebracht.

Leichte bis mäßige Winde mit Geschwindigkeiten < 10 m/s schaffen auf dem Vorstrand hydrodynamische Bedingungen, die zu einem auflandigen Sedimenttransport führen. In dem Buhnenfeld mit einem **"offenen"** Baukörper sind die Sedimentationsbedingungen ungünstiger als in den Buhnenfeldern mit einer halboffenen oder geschlossenen Bauwerkskonstruktion.

Bei Windgeschwindigkeiten > 10 m/s entstehen in einem "geschlossenen" Buhnenfeld (einreihige Holzpfahl- und T-förmige Steinbuhne) zirkulierende Strömungssysteme sowie Rippströmungen. Sie führen Sande aus dem Buhnenfeld hinaus in die tieferen Regionen der Schorre und wirken sich somit nachteilig auf die Sedimentstabilität aus. In den "halboffen" konstruierten Buhnenfeldern treten diese negativen Erscheinungen in wesentlich geringerem Umfang auf, teilweise sind sie auch nicht vorhanden. Die "offene" Buhne ermöglicht küstenparallele Sedimentbewegungen auf dem flachen Vorstrand. Der ufernahe Transport fördert hier die Bildung großflächiger Akkumulationskörper. Die "halboffene" Buhnenkonstruktion weist generell größere Vorteile in Bezug auf die Sedimentstabilität auf, als die "offene" und "geschlossene" Bauweise.

Im Wirkungsbereich von "offenen" bzw. "halboffenen" Buhnen konnten auf Grund der Durchlässigkeit dieser Bauwerke für die küstenparallel bewegten Sedimente keine größeren Veränderungen beobachtet werden, die auf eine Lee-Erosion schließen lassen.

[*	*	1993	1993	1994	1994	1995	1995	1996	1996
	1992	1992								
Normalbeprobung im	04-09	20-26	14-20	10-19	18-03	14-24	24-21	1	08-13	21-24
Buhnenfeld 2/3	05	10	06	10	05-06	10	05-06		06	10
Normalbeprobung im	04-09	20-26	14-20	10-19	18-03	14-24	24-21			21-24
Buhnenfeld 7/8	05	10	06	10	05-06	10	05-06			10
Sondierungen und	04-09				18-03		24-21			
Kernentnahme (Sediment-	05				05-06		05-06			
verfügbarkeit)										
Großgebietskartierung					18-03					
					05-06					
Tracermessung (Nr.1)				10-19						
in Buhnenfeldern mit				10						
halboffenen Buhnen										
Tracermessung (Nr.2)						14-24				
<u>in</u> einem Buhnenfeld						10				
mit halboffener und										
geschlossener Buhne										
Tracermessung (Nr.3)										
in und vor Buhnen-									08-13	
feldern mit geschlos-									06	
senen Buhnen				1						
Sturmereignis 1995								21-24		
								11		
hochauflösende Zeitreihen									08-13	
									06	

Übersicht über den Zeitlauf der Untersuchungen des GPI-Kiel

(* = Voruntersuchungen von 1992; vgl. KÖSTER et al. 1993)

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung	1
1.2	Lage des Untersuchungsgebietes	2
1.3	Entwicklung des Küstenschutzes vor Warnemünde	3
2.	Stand der Forschung	3
2.1	Geologie und Morphologie	3
2.2	Entwicklung von Buhnen.	5
2.3	Die Wirkung von Buhnen	8
2.4	Die Buhnen vor Warnemünde	. 12
3.	Arbeitsmethoden	. 13
3.1	Auswahl und Lage der Untersuchungsgebiete	. 13
3.2	Geländearbeiten	. 13
3.2.1	Kartierungen	14
322	Probenentnahme in den Meßfeldern	14
323	Sondierungen	15
33	Labormethoden	15
3.5	Datenverarheitung	16
3.5	Tracermessungen	17
3.5	Tactimessungen	. 17
252	Mossungen im erweiterten Küstenvorfeld	10
2.5.2	Wessungen in er weiter ten Kustenvonen und Laborarbeit	. 19
3.3.3	Voldereitungs-, Auslage-, Beprodungstechnik und Laborarden	. 20
3.0	Ermittlung der Sedimentvolumina	. 21
4.	Ergebnisse	. 22
4.1	Entwicklung der Strand- und Vorstrandmorphologie	. 22
4.2.	Volumenberechnungen	. 25
4.2.1	Veränderungen in den Sedimentvolumina	. 27
4.2.2	Morphologische Entwicklung in den Buhnenfeldern 2-3 und 7-8 (1990 bis 1996)	30
4221	Halboffene Buhnen im Buhnenfeld 7-8	30
4222	Offene Ruhnen im Feld 2-3	32
A 3	Sedimentalogie	32
4.3 4.2.1	Sedimentologie	
4.3.1	Sedimentoeschaffenheit werschiedener morphologischer Einheiten (Seegebiet)	. 33
4.3.2	im Buhnenfeld 7-8	.35
4.3.3	Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung im Buhneneld 7-8	
	mit halboffenen Buhnen	. 36
4.3.4	Sedimentbeschaffenheit verschiederer morpologischer Einheiten in dem Ruhnenfeld 2,3 (offene Ruhnen)	лл
125	Veränderungen der Sedimentzugenmengetrung durch des	. 44
4.3.3	Sturmhochwasser im November 1995	46
436	Veränderungen in dem Sedimentmuster nach der Zerstörung der	10
ч.Ј.О	Pubnon 2.2	17
127	Duillicii 2-3	.41
4.3.1	Kenakuon, Dimakuon und Kenekuon.	.41
4.3.8	Anderungen in dem Sedimentmuster auf dem Vorstrand Wahrend Kurzer Windereignisse (>10m/s)	٨٥
1 1	Massungen mit Luminonhoren von 1002 1006	. 4 0 10
7.4	www.soungen mit Lummophoten von 1775 - 1770	47

4.4.1	Randbedingungen	49
4.4.1.1	Morphologische Ausgangssituation	49
4.4.1.2	Meteorologische und hydrologische Randbedingungen	50
4.4.2	Messungen mit Luminophoren in einem Buhnenfeld mit beidseitig	
	halboffenen Buhnen bei Starkwindereignissen 1993	55
4.4.2.1	1. Meßphase (2 Stunden)	55
4.4.2.2	2. Meßphase (17 Stunden)	57
4.4.2.3	3. Meßphase (46 Stunden)	58
4.4.2.4	4. Meßphase (88 Stunden)	58
4.3.3	Messungen mit Luminophoren in einem Buhnenfeld mit einer halboffenen	
	Buhne und einer geschlossenen Buhne bei Starkwindereignissen 1994	59
4.4.3.1	1. Meßphase (2 Stunden)	59
4.4.3.2	2. Meßphase (21 Stunden)	61
4.4.3.3	3. Meßphase (48 Stunden)	61
4.4.3.4	4. Meßphase (96 Stunden)	61
4.4.4	Messungen mit Luminophoren in einem Buhnenfeld mit beidseitig	
	geschlossenen Buhnen während einer großräumigen Normalwindlage 1996	62
4.4.4.1	1. Meßphase (2 Stunden)	62
4.4.4.2	2. Meßphase (20 Stunden)	63
4.4.4.3	3. Meßphase (45 Stunden)	63
4.4.4.4	4. Meßphase (96 Stunden)	64
4.4.5	Farbsanduntersuchungen im erweiterten Küstenvorfeld	65
5.	Vergleichende Betrachtungen	65
5.1	Vergleich der Wirkung der offenen, halboffenen und geschlossenen	
- • -	Buhnen auf die Morphologie	65
5.2	Vergleich der Wirkung der offenen, halboffenen und geschlossenen	
	Buhnen auf die Oberflächensedimente.	66
5.3	Vergleich der Wirkung der halboffenen und geschlossenen Buhnen	
	auf den Sedimenttransport während Starkwindlagen	67
5.4	Die Küste der Probstei	67
5.4.1	T-Buhnen in der Probstei	68
5.4.2	Wirkung der T-Buhnen auf die Bathymetrie	
5.4.3	Wirkung der T-Buhnen auf die Oberflächensedimente	. 69
5.4.4	Wirkung der T-Buhnen auf den Sedimenttransport	70
5.5	Vergleich der Wirkungen von einreihigen Holzpfahlbuhnen vor	
••••	Warnmünde mit den T-Buhnen vor der Küste der Probstei	70
6.	Zusammenfassung	74
7.	Empfehlung	77
8.	Literaturverzeichnis	79
8.1	Arbeitsgrundlagen	79
8.2	Literatur	81
	Anhang	90

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes
- Abb. 2a: Das Untersuchungsgebiet
- Abb. 2b: Luftbild des Untersuchungsgebietes
- Abb. 3: Die Wirkung von einfachen Buhnen auf die Wassermassenzirkulation und den Sedimenttransport (CERC 1984)
- Abb. 4: Empfohlenes Verhältnis von Buhnenlänge, Abstand, Durchlässigkeit, Schorreneigung und Uferbelastung bei einreihigen Holzpfahlbuhnen (EAK 1994)
- Abb. 5: Die Meßbrücke am Strand von Warnemünde
- Abb. 6: Das Buhnensystem östlich der Meßbrücke
- Abb. 7: Lage der Untersuchungsprofile in den Meßfeldern
- Abb. 8: Anordnung der Meßgeräte im Buhnenfeld 7-8
- Abb. 9: Gegenüberstellung unterschiedlicher Korngrößenmaße
- Abb. 10: Beeinflussung von Uferlinienentwicklung und Riffkammentwicklung durch den Buhnenbau
- Abb. 11: Veränderung der Bathymetrie im Buhnenfeld 7-8 (1990-1993; 1990-1996)
- Abb. 12: Feinsandkarte (Gew.-% Anteil < 0,200 mm)
- Abb. 13: Mächtigkeit der Sedimentbedeckung im Untersuchungsgebiet
- Abb. 14: Entwicklung von Momenten-Mittelwert und Sortierung im Buhnenfeld 7-8 von 1991 bis 1996
- Abb. 15: Jahreszeitliche Variation in der Sedimentverteilung 5/94 bis10/94
- Abb. 16: Entwicklung des Sedimentes im Bereich der Buhne 7 (5/94)
- Abb. 17: Entwicklung des Sedimentes im Bereich der Buhne 7 (10/94)
- Abb. 18: Entwicklung von Momenten-Mittelwert und Sortierung im Buhnenfeld 7-8 von 5/94 bis 5/95
- Abb. 19: Vergleich halboffene/geschlossene Buhne
- Abb. 20: Entwicklung von Momenten-Mittelwert und Sortierung im Buhnenfeld 2-3 von 1993 bis 1996
- Abb. 21: Entwicklung des Sedimentes im Buhnenfeld 2 3 von 5/93 bis10/96, Buhnenprofil 3/10
- Abb. 22: Feinsandkarte, Buhnenfeld 2 3, November 1995
- Abb. 23: Bathymetrische Aufnahme September 1994
- Abb. 24: Bathymetrische Aufnahme September 1996
- Abb. 25: Auslagepunkte der Tracer (Oktober 1993; a = rot, b = grün)
- Abb. 26a: Tracerverteilung im Oktober 1993; 2 u. 17 Std. nach Ausgabe roter und grüner Luminophoren
- Abb. 26b: Tracerverteilung im Oktober 1993; 46 u. 88 Std. nach Ausgabe roter und grüner Luminophoren
- Abb. 27: Skizze der Transportrichtung der Tracersande (Okt. 1993, alle Fraktionen, Gesamtzeitraum)
- Abb. 28: Auslagepunkte der Tracer (Oktober 1994)
- Abb. 29: Tracerverteilung im Oktober 1994; 2 u. 21 Std. nach Ausgabe blauer und oranger Luminophoren
- Abb. 30: Tracerverteilung im Oktober 1994; 48 u. 96 Std. nach Ausgabe blauer und oranger Luminophoren
- Abb. 31: Skizze der Transportrichtung der Tracersande (Okt. 1994, alle Fraktionen, Gesamtzeitraum)
- Abb. 32: Auslagepunkte der Tracer (Juni 1996)
- Abb. 33: Tracerverteilung im Juni 1996; 20 Std. nach Ausgabe grüner und roter Luminophoren

- Abb. 34: Tracerverteilung im Juni 1996; 45 u. 96 Std. nach Ausgabe grüner und roter Luminophoren
- Abb. 35: Skizze der Transportrichtung der Tracersande (Juni 1996, alle Fraktionen, Gesamtzeitraum)
- Abb. 36: Feinsandkarte November 1996 (B7 B8)
- Abb. 37: Luftbild des Küstenvorfeldes der Probstei (ALW et al. 1997)
- Abb. 38: Der Untersuchungsraum Probstei (ALW et al. 1997)

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 1:	Arbeitsprogramm im Untersuchungszeitraum	22
Tab. 2:	Rifftypisierung erweitert nach GREENWOOD & DAVIDSON-ARNOTT	
	(1979)	23
Tab. 3:	Volumenberechnung einzelner morphologischen Strukturen im	
	Vorstrand (m^3/m^2)	27
Tab. 4:	Volumen des gesamten Lockermateriales im Vorstrand (m ³ /m ²)	29
Tab. 5:	Gesamtvolumen einzelner Strukturen (m ³)	29
Tab. 6:	Strand- und Dünenaufschüttungen vor Warnemünde (1990 - 1996)	30
Tab. 7a:	Veränderung der Sedimentzusammensetzung (Fraktion < 0,200 mm) an	
	verschiedenen Punkten im Buhnenfeld 7-8 über den gesamten Unter-	
	suchungszeitraum	38
Tab. 7b:	Veränderung der Sedimentzusammensetzung (Fraktion < 0,200 mm) an	
	verschiedenen Punkten im Buhnenfeld 2-3 über den gesamten Unter-	
	suchungszeitraum	40
Tab. 8:	Zeitlich-räumliche Entwicklung von Momenten-Mittelwert und Sortier-	
	ung in unterschiedlichen Bauwerksbereichen	42
Tab. 9:	Häufigkeit von Normalwind- und Starkwindlagen vor Warnemünde	51
Tab. 10:	Meteorologische und hydrologische Rahmenbedingungen während der	
	1. Messung mit Farbsanden im Oktober 1993	52
Tab. 11:	Meteorologische und hydrologische Rahmenbedingungen während der	
	2. Messung mit Farbsanden im Oktober 1994	53
Tab. 12:	Meteorologische und hydrologische Rahmenbedingungen während der	
	3. Messung mit Farbsanden im Juni 1996	54
Tab. 13:	Vergleich der Wirkung von Buhnen: Warnemünde - Probstei	72
Tab. 14:	Mögliche Ursachen für die Unterschiede in der Entwicklung der Bathy-	
	metrie in den geschlossenen Buhnenfeldern (Warnemünde - Probstei)	73

Vorwort

Das Leben der Küstenbewohner ist seit Jahrhunderten geprägt von dem ständigen Kampf mit den Naturgewalten der See. Von anfänglichen einfachen Baumaßnahmen in Form von Erdhügeln als Siedlungsfläche entwickelten die Küstenbewohner mit der Zeit aufwendige Maßnahmen zum Schutze der Küstenlinie bis hin zur Landgewinnung.

Ein maßgebliches Element im Küstenschutz war und ist der Bau von Buhnen. Sie werden seit Jahrhunderten in den unterschiedlichsten Varianten erstellt. Bei den notwendigen Schutzmaßnahmen im Küstenraum bleiben heute Konflikte der unterschiedlichen Interessensgruppen (Naturschutz, Fremdenverkehr, Fischerei etc.) nicht aus. Letztendlich gilt es jedoch, unter Berücksichtigung aller Interessen vertretbare Kompromisse zu finden. So sind es nicht nur die Erstellungskosten, die dazu geführt haben, daß die Konstruktion von Holzpfahlbuhnen an den deutschen, holländischen, dänischen und polnischen Küsten zu einer der am häufigsten eingesetzten Schutzmaßnahmen zählt, sondern es ist auch die weit höhere Akzeptanz, die subjektiv kleinere Baumaßnahmen unter Verwendung natürlicher Baustoffe (z. B. Faschienen, Holz) gegenüber Massivbauten (Stein, Stahl, Beton) in der Öffentlichkeit genießen.

Der vorliegende Bericht faßt die Ergebnisse des Teilprojektes Sedimentologie des vom Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen MTK 0546A geförderten FuE-Vorhabens Wirkungsweise von Einbauten in See zusammen. Für die großzügige finanzielle Unterstützung bedanken wir uns aufrichtig.

Unser ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. R. Köster, der das Projekt in der Anfangsphase leitete und es zwar nach seiner Pensionierung weitergab, aber nie das Interesse an dem Fortgang der Arbeiten verlor und ständig mit Rat und Tat zur Seite stand. Besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang auch Herrn Professor Dr. R. Mayerle, der als Nachfolger von Herrn Professor Dr. Köster als Ingenieur das Verständnis für die Nachbardisziplin außerordentlich gefördert hat.

Die Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Küstengeologie des GPI, Frau Dipl. Geol. K. Schrottke, Herr Dr. K.-H. Runte, Herr Dr. K-A. Bayerl und Herr Dipl. Geol. "Jonny" Otten, waren immer zu anregenden Diskussionen bereit. Ohne den "guten Geist" der Arbeitsgruppe, Frau D. Kaufhold, wäre die Organisation der Laborarbeiten und vieler anderer technischer Details nicht möglich gewesen. Die wissenschaftlichen Taucher der Universität Kiel unter der Leitung von Herrn Th. Kollatschni führten die umfangreichen Unterwasserarbeiten in Zusammenarbeit mit dem Taucherkollegen B. Bugenhagen vom StAUN Rostock durch. Erst derjenige, der wochenlang von früh bis spät bei jeder Jahreszeit und jedem Wind und Wetter in der Brandungszone tauchend gearbeitet hat, weiß diese Leistung zu schätzen. Zahllose wissenschaftliche Hilfskräfte haben Unmengen an Proben in den Labors bearbeitet. Ohne die entlastende und unbürokratische Arbeit von Frau Stielow in der Verwaltung des GPI wäre der reibungslose Projektablauf nicht möglich gewesen. Die Bibliothekarinnen, Frau Schmidt im StAUN-Rostock und Frau Hennig in der Bibliothek des KFKI versorgten uns mit der notwendigen Literatur, wenn die "großen" Bibliotheken passen mußten. Am Ende darf nicht unerwähnt bleiben, daß die Zusammenarbeit und der Informationsaustausch der unmittelbar am Projekt beteiligten Wissenschaftler, Dipl. Ing. F. Görecke vom StAUN-Rostock, Dipl. Ing. T. Trampenau vom LWI-Braunschweig und Dipl. Geogr. E. Schrader vom GPI stets ausgezeichnet funktioniert hat.

All den genannten Institutionen und Personen gilt unser aufrichtiger Dank.

1. Einleitung

Die Außenküste Mecklenburg-Vorpommerns hat eine Länge von 340 km, von der bis zu 70 % unter Erosion liegen. Besonders problematisch ist der Hochwasserschutz entlang der Flachküsten, die auf einer Länge von 167 km durch Dünen gebildet werden (WEISS 1991a). Der Rückgang, der häufig durch einen negativen Sedimenthaushalt auf der Schorre bedingt ist, bewirkt die Schwächung des Systems Vorstrand-Strand-Düne. Die Folgen sind Dünendurchbrüche bei Hochwasserereignissen und die Gefährdung tiefliegender Gebiete durch Überflutungen. Mit der Errichtung von Einzelbuhnen oder Buhnensystemen als eine von mehreren möglichen Küstenschutzmaßnahmen sollen durch die Förderung der Akkumulation und der Erhöhung der Verweildauer von Sediment im Strand- und Vorstrandbereich die Uferbereiche stabilisiert und damit die Sicherheit der Küste vor Überflutungen an Buhnen in der Natur sowie der Anwendung numerischer und physikalischer Modelle, ist über den Mechanismus der Wirkung der Bauwerktypen auf die küstenformenden Prozesse noch wenig bekannt (BASINSKI 1994).

Die Küste vor Warnemünde ist eine typische Ausgleichsküste. Sie ist sowohl nach Nordwesten als auch nach Nordosten geöffnet (Abb. 1). Besondere Probleme durch eine stark zurückweichende Uferlinie bestehen hier im Übergangsbereich zwischen dem Kliff der Stoltera und dem nach Osten anschließenden Nehrungshaken (Abb. 2).

1.1 Zielsetzung

Im Rahmen dieses Untersuchungsprogrammmes sollten beispielhaft für die Küsten der Ostsee in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock (StAUN) und dem Leichtweiss Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig (LWI), an dem Strandabschnitt vor Warnemünde Untersuchungen zur Wirkungsweise von einreihig geschlagenen Holzpfahlbuhnen durchgeführt werden. Das Geologisch-Paläontologische Institut und Museum der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (GPI) übernahm dabei die sedimentologischen Aufgaben, deren Zielsetzung sich mit dem nachfolgend aufgelisteten Fragenkomplex zusammenfassen läßt:

- 1a. Wie sieht der Sedimenthaushalt im gesamten Vorstrandbereich vom Strand bis zur Abrasionsfläche aus?
- 1b. Ist genügend Sedimentmaterial verfügbar, um eine stabile Vorstrandmorphologie aufzubauen?
- 2. Wird das seewärts der Buhnen gelegene, äußere Sandriff in seinem sedimentologischen Aufbau durch das Buhnensystem beeinflußt?
- 3. Wie wird der Sedimenttransport in dem unmittelbaren Bereich der Buhne durch das Bauwerk beeinflußt? Wandert Sediment um das Bauwerk herum?

- 4. Gibt es einen Sedimentaustausch zwischen den einzelnen Buhnenfeldern, speziell bei der halbdurchlässigen einreihigen Holzpfahlbuhne? Wenn ja, wie ist dieser Austausch mit der Durchlässigkeit verknüpft?
- 5. Wie gestalten sich die Sedimentbewegungen unter bestimmten meteorologischen und hydrodynamischen Bedingungen? Gibt es eine Differenzierung in küstennormalen Transport und Küstenlängstransport?

Aus diesem Fragenkomplex geht hervor, daß zur Interpretation der sedimentologischen Sachverhalte neben einer umfangreichen sedimentologischen Datensammlung auch Kenntnisse über die Hydrologie und Morphologie vorhanden sein müssen. Die in dem vorliegenden Bericht verwendeten bathymetrischen Karten wurden vom StAUN - Rostock, die hydrologischen Meßwerte vom LWI - Braunschweig erarbeitet und bereitgestellt. In dem nachfolgenden Text werden die Ergebnisse der Projektpartner (StAUN, LWI) aus dem gemeinsamen Forschungsvorhaben nicht weiter als Zitat markiert.

1.2 Lage des Untersuchungsgebietes

Das Arbeitsgebiet liegt in der westlichen Ostsee an dem östlichen Küstenabschnitt der Mecklenburger Bucht. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf ein Seegebiet von ca. 5 km² Größe. Es wird durch den Küstenvorsprung Geinitz Ort des Stoltera Kliffs im Westen und die Mündung der Warnow im Osten begrenzt. Landseitig ist die Dünenkette die Begrenzung, seeseitig markiert die seewärts des äußeren Sandriffes liegende Abrasionsfläche die nördliche Grenze (Abb.2).

Weite Bereiche der Küsten Mecklenburg-Vorpommerns sind in eine durchlaufende Küstenkilometrierung eingehängt. Danach liegt das Untersuchungsgebiet im folgenden Bereich:

Westgrenze Geinitz-Ort:	142,000 Kkm
Ostgrenze Warnow-Mündung:	147,050 Kkm

Für die Detailuntersuchungen wurden aus einem, in den Jahren 1990 - 1991 vor Warnemünde errichteten und aus insgesamt 18 einreihigen Holzpfahlbuhnen bestehenden Buhnensystem, 2 Buhnenfelder mit unterschiedlich dicht geschlagenen Pfahlreihen ausgewählt. Vom Frühjahr 1993 bis zum Herbst 1996 wurden die Veränderungen in den Oberflächensedimenten dieser beiden Testfelder untersucht und mit Hilfe von 3 umfangreichen Meßreihen mit künstlichen Leitstoffen, sogenannter Luminophoren, experimentell Sedimentströme innerhalb und außerhalb der Buhnenfelder ermittelt.

1.3 Entwicklung des Küstenschutzes vor Warnemünde

Weite Bereiche der Stadt Warnemünde liegen auf einem Nehrungshaken, der die Breitlingsniederung und den Bereich des Dietrichshagener Moores von der offenen See trennt. Große Areale des Dietrichshagener Moores befinden sich unter dem Meeresniveau. Sie reichen bis an die Siedlungsgrenze des Rostocker Stadtteils Lichtenhagen heran. Diese heute dicht besiedelten Bereiche unterliegen seit Jahrhunderten der ständigen Bedrohung durch Sturmfluten.

Östlich des Stoltera-Kliffs kam es in historischen Zeiträumen immer wieder zu Durchbrüchen des schmalen Dünengürtels (Abb. 2b). In früheren Jahrhunderten wurden diese Durchbrüche mit Sand verfüllt. Erst seit dem 13. Jahrhundert versuchte man, durch Aufschüttungen und Anpflanzungen Dünengürtel anzulegen und diese durch Holzkonstruktionen und Steinschüttungen zu befestigen (MIEHLKE et al. 1982). Die letzten Durchbrüche im Küstenraum westlich von Warnemünde erfolgten 1913 - 1914. Sie führten zu der Flutung des Diedrichshagener Moores (BENCARD 1966).

Die jüngsten, in Luftbildern von 1994 (UVE 1994) noch lokalisierbaren Buhnen aus historischer Zeit wurden 1889 zwischen Warnemünde und dem westlichen Teil des Stoltera-Kliffs geschlagen. Wegen der hohen Instandhaltungskosten stellte man die Arbeiten an den Buhnen jedoch nach dem 1. Weltkrieg 1918 ein (KÖSTER 1952). Somit blieb der Übergangsbereich zwischen dem Stoltera-Kliff und dem Strandhaken, dem Nehrungshals, weiterhin stark gefährdet.

Erst 1990 begann man erneut in dem Küstenvorfeld vor Warnemünde mit dem Buhnenbau. Um die Gefahr eines Duchbruches des Warnemünder Nehrungshakens zu bannen, wurden 18 einreihige Holzpfahlbuhnen errichtet. Der durch einen starken Küstenrückgang zwischen jährlich 0,10 m bis 0,60 m (DIEDERICH 1986) gekennzeichnete und besonders durchbruchsgefährdete Ansatz des Nehrungshakens bildet den zentralen Schutzbereich des Buhnensystems. Im Winter 1992 war die Baumaßnahme abgeschlossen. Flankierend zum Aufbau des Buhnensystems erfolgten jeweils im Frühjahr der Jahre 1990, 1992 und 1996 Strand- bzw. Dünenaufschüttungen.

2. Stand der Forschung

2.1 Geologie und Morphologie

Die Mecklenburger-, Kieler- und Lübecker Bucht bilden den westlichen Abschnitt der westlichen Ostsee. Sie wird nach Osten durch die Darßer Schwelle und im Nordwesten durch das dänische Festland begrenzt (Abb. 1). Die heutige Gestalt der in viele Buchten und Förden gegliederten Ostseeküste ist im wesentlichen auf die pleistozäne Entwicklung dieses Randmeeres zurückzuführen.

Erst nach der Abschwächung der Litorina-Transgression ab 6000 B.P., bei einem Meerespiegel von ca. - 5 m NN (DUPHORN 1979), setzten die morphodynamischen Prozesse ein, die zur Bildung von Ausgleichsküsten führten. Die Aufhänger dieser Entwicklung sind die durch die

Brandung abradierten und rückverlegten Geschiebemergelkliffs. Sie dienen auch heute noch als Materiallieferanten für den küstennahen Sedimenthaushalt. Das erodierte Riffmaterial gelangt dabei durch den litoralen Sedimenttransport über Sandriffe als Transportband und Indikator küstenausgleichender Prozesse (ALLEN 1982) in Abschnitte, in denen die Küste im Profil zurückspringt und sich Sand- und Nehrungshaken vorschieben.

Im Küstenraum bei Warnemünde dominieren zwei unterschiedliche, morphologische Strukturen. Im Westen des Küstenabschnittes Kühlungsborn - Warnemünde erhebt sich das Stoltera Kliff, ein aus mehreren Geschiebemergelhorizonten und einige Zentimeter bis Dezimeter mächtigen glazifluvialen Einlagerungen bestehender, flach geneigter, NNE - SSW streichender Stauchmoränenkomplex (KÖSTER 1952, SCHULZ & PETERS 1989). Im Osten des Stoltera-Kliffs schließt sich die Breitlingsniederung als pleistozäne Depression an. Sie ist mit marinen Sedimenten sowie im Bereich der ehemaligen Warnowrinne, die bis zu -20 m NN in den Geschiebemergel eingeschnitten ist (ROGGE 1959), zusätzlich mit fluviatilen Sanden, Flachmoortorfen und Dünensanden verfüllt (MIEHLKE et al. 1982).

Das Steilufer der Stoltera ist aktiv (BENCARD 1966). Es bildet neben dem Seegrund den Materiallieferanten für das östlich angrenzende Nehrungssystem sowie darüberhinaus für die Markgrafenheide bis hin zur Rostocker Heide (BÜLOW 1951). Die Abriegelung der Breitlingsniederung erfolgte jedoch nicht nur durch den von der Stoltera nach Osten wachsenden Nehrungshaken, sondern es soll während des litorinazeitlichen Meeresspiegelanstieges auch ein Strandwall mit aufsitzender Düne gegen die Bucht vorgewandert sein (HURTIG 1954).

Nach Untersuchungen des Geologischen Landesamtes Mecklenburg-Vorpommern taucht die Geschiebemergeloberfläche von Küstenkilometer (im weiteren Text mit Kkm bezeichnet) 144.560, der westlichen Grenze des Buhnensystems, generell nach Nordosten ab. Bereits in der Höhe des großen Strandparkplatzes (Abb. 2, Kkm 144,750 bis Kkm 144,900) wurde der Geschiebemergel in einer Tiefe von -1,3 m bis -1,6 m NN angetroffen. Er fällt nach Osten im Bereich des alten Stromes auf eine Tiefe von - 4 m NN ab. In der Warnow-Mündung erbohrte GEINITZ (1902) diese Geschiebemergeloberfläche in einer Tiefe von - 8 m NN.

Der abtauchende Geschiebemergel wird durch zwei Schwellen und eine Rinne unterbrochen. Die erste Schwelle liegt bei Kkm 145,000 in unmittelbarer Nähe der Buhne 7. Die Geschiebemergeloberfläche liegt hier in -0,60 m bis 0,70 m Tiefe. Mit eigenen Sondierungen wurde sie in einer Tiefe von 85 cm unterhalb der Sedimentoberfläche erreicht. Die zweite Schwelle wurde im Bereich der Buhne 11 bei Kkm 145,400 erfaßt. Der Geschiebemergel steht hier an der Oberfläche (NN) an. Die Schwellen werden durch eine Rinne getrennt, die überwiegend mit Niedermoortorfen verfüllt ist. Sie deutet auf einen Durchbruch des Nehrungshakenhalses in historischer Zeit hin.

Im seewärtigen Abschnitt der Küste vor Warnemünde liegt insbesondere zwischen Kkm 142,000 und Kkm 145,500, ab ca. 500 m seewärts der Uferlinie, der Geschiebemergel am Seegrund stellenweise frei. Mit Annäherung an die Küste wird er mit einem bis zu 2 m mächtigen Sedimentpaket überdeckt.

Der Seeraum vor Warnemünde und die exponierte Lage des Stoltera-Kliffs begünstigen bei nord-nordwestlichen Winden Bedingungen, die zu einem Kliffrückgang von bis zu 0,25 m/a im langfristigen Mittel führen (WIEMER & GURWELL 1991). ZANDER (1934) gibt für diesen Küstenabschnitt sogar Rückgangsraten zwischen 0,31 m bis 0,87 m an. Das erodierte Sediment wird östlich von Geinitz-Ort vorwiegend nach Osten transportiert.

Zu einer besonders starken Luvakkumulation von Sanden kam es nach dem Ausbau der Warnemünder Mole (s. Abb. 2b). Diese Anlandungen wirken sich noch bis zu 1,5 km westlich der Mole positive auf die Küstenlinienentwicklung aus (BENCARD 1966). Demgegenüber leiden die im Lee der Mole gelegenen Flachküstenabschnitte durch die Abtrennung von einem Teil des Liefergebietes unter der außerordentlich geringen Sedimentzufuhr. Sie zeigen deutliche Erosionserscheinungen.

Für die morphologische Entwicklung einer Küste ist es von großer Bedeutung, inwieweit Erosion, Transport und Akkumulation in einem klar begrenzten Küstenraum stattfinden. Dieser Küstenraum wird nach WYRTKI (1953) als physiographische Einheit bezeichnet und unterteilt sich in ein offenes sowie ein geschlossenes System. Die morphologischen und sedimentologischen Unterschiede der Systeme können vielfältig sein. Entscheidend ist jedoch, daß in dem geschlossenen System die bewegten Sedimente dem System erhalten bleiben, während es in einem offenen System sowohl zu einem Sedimenteintrag als auch zu einem Sandverlust aus dem System heraus kommen kann. Die Einordnung der Küste vor Warnemünde in eines der beiden Systeme erfolgt nur unter Vorbehalt. Da die abradierten Sedimente des Stoltera-Kliffs bis zu dem Ausbau der Westmole 1957 auf eine Länge von 80 m (MEYER & RICKERT) nicht nur den Warnemünder Nehrungshaken, sondern auch die Küstenabschnitte entlang der Markgrafen Heide und Rostocker Heide mit Sediment versorgten, ist die Küste als ein offenes System zu bezeichnen. Nach dem Ausbau der bereits im 13. Jahrhundert (MIEHLKE et al. 1982) angelegten Mole wird dieses System teilweise unterbrochen. Einerseits lassen die Sandablagerungen westlich der Mole und die Erosionserscheinungen östlich der Absperrung ein geschlossenes System erwarten, andererseits zeigt die Versandungsproblematik der Fahrrinne des Seekanals, daß auch weiterhin nicht unerhebliche Sedimentmengen aus dem System herausgetragen werden.

2.2 Entwicklung von Buhnen

Die ersten Versuche, die Küsten durch den Bau von Buhnen zu stabilisieren und zu schützen wurden in den ersten Jahrzehnten des 18. Jahrhunderts begonnen (PETERSEN 1961). Meistens waren diese Bauwerke einfache Stein- oder Pfahlreihen unterschiedlicher Länge ohne eine einheitliche Streichlinie. An der Entwicklung des Küstenschutzes in der Ostsee war insbesondere der Bauingenieur HAGEN maßgeblich beteiligt (WEISS 1992). Er ließ erste Versuchsbuhnen im Jahre 1843 auf der Insel Ruden bauen (PETERSEN 1961). Die Länge der Buhnen war hauptsächlich durch die Wassertiefe bestimmt. Nachdem die Bedeutung der Sandriffe erkannt wurde, wurden die Buhnen bis an das Sandriff herangeführt (PETERSEN 1952). Die vielen an der Entwicklung des Buhnenbaus beteiligten Ingenieure werden bei PETERSEN (1961) ausführlich dargestellt. Ebenso zahlreich wie unterschiedlich sind die Einschätzungen über die Wirkungen von Buhnen, sodaß eine Vielzahl von unterschiedlichen Buhnenkonstruktionen erdacht wurden. Sie unterscheiden sich sowohl im zu verwendenden Werkstoff als auch in ihrer Höhe, Länge und Breite. Eine Auswahl an Buhnenkonstruktionen

sind in der EAK (1993), bei BASINSKI (1994) und WEBB & WEGGEL (1995) aufgeführt. Mit besonderen Werkstoffkombinationen und Formengebungen wurde in einigen Küstenabschnitten versucht, die Wirkung der Buhnen zu verstärken. Von T-, L-, Y- und Z-Buhnen sowie sichelförmigen und in verschiedenen Winkeln aus der Lotrechten geneigte Buhnen an der englischen Nordseeküste berichten PRICE & TOMLINSON (1970), TOMLINSON (1983) und FLEMMIG (1990). Neueste Entwicklungen im Buhnenbau stellen KRYSTIAN & PILARCZYK (1996) vor, bei denen sandgefüllte Geotextilkörper die bisherige konventionelle Bauart ersetzen.

Die Konstruktion der Buhne hängt stark von den erwünschten Effekten des Bauwerkes ab. Die Diffraktion und die Reflektion der Wellen erzeugen sowohl einen Einstrom in als auch einen Ausstrom (häufig Rippstrom) aus einem Buhnenfeld. Sie werden u.a. durch die Länge, die Höhe und die Abstände der einzelnen Pfahl-/Steinreihen voneinander beeinflußt (Abb. 3). Die Buhnenhöhe bestimmt, inwieweit ein Bauwerk überströmt wird. NORDSTROM (1994) berichtet von Buhnen mit einer Höhe von über 3 rn über NN.

Zu Anfang begrenzten die technischen Möglichkeiten die Höhe der Holzbuhnen. Sie wurden mit einer Kronenhöhe zwischen 0 bis 0,5 m ü. NN. erstellt (PETERSEN 1952) Später, als die technischen Einschränkungen entfielen, zeigten die Erfahrungen aus dem Buhnenbau, daß sich eine Kronenhöhe der Buhnen von 0,5 m ü. NN. besonders positiv auf die Akkumulation oder Stabilität von Sedimenten auswirkt (ZHDANOV 1964, TOMLINSON 1983). Außerdem sollten kaum deutliche Reflektionen der Wellen an den niedrigen Bauwerken erfolgen (EAK 1993). Mit Hilfe physikalischer Modelle verdeutlicht FLEMMING (1990) die Zusammenhänge zwischen der Bauwerkshöhe und der Entstehung von Ripströmen entlang der Buhnen. Demnach nimmt die Neigung zur Rippstrombildung mit der Kronenhöhe der Buhnen zu.

Der Einsatzzweck und die Kosten entscheiden häufig über das Baumaterial der Konstruktionen. Holzbuhnen und Eisenspundwände gehören zu den kostengünstigen Varianten im Buhnenbau, insbesondere, wenn definierte Durchlässigkeiten gefordert sind. Diese Baumaterialien sind allerdings in Bezug auf die Haltbarkeit der Konstruktionen die empfindlichsten Materialien. Während die Salinität des Seewassers die Lebensdauer von Stahlkonstruktionen durch Korrosion stark einschränkt, sind die in der Ostsee gebräuchlichsten Baustoffe - Holzpfähle und Faschine - durch den Fraß der Bohrmuschel *teredo navalis* in jüngster Zeit gefährdet. Ihr Vorkommen steht in Abhängigkeit zur Salinität des Ostseewassers, die je nach der Intensität diskontinuierlich auftretender Einstromlagen und damit Nordseewasserzufuhr variiert. Zeitweise ist die Bohrmuschel schon in früheren Zeiten bis zum Darßer-Ort vorgedrungen (PETERSEN 1952).

Die Unterbrechung oder Abschwächung der welleninduzierten, küstenparallelen Strömung und damit auch des Sedimenttransportes wird wesentlich durch die Länge der Buhnen beeinflußt. Theoretische Betrachtungen zum Küstenlängstransport werden u.a. von LONGUET-HIGGINS (1972) und FLEMMING & SWART (1982) angestellt. Basierend auf der Theorie von LONGUET-HIGGINS (1972) und den Angaben des CERC (1984) zeigt sich die höchste küstenparallele Strömung landseitig der Brecherzone, wobei die Brecherzonen an einer Küste mit Sandriffen in der Regel an diese gebunden sind. Daher wird zum Schutz des Strandes eine

Buhnenlänge bis in die Brandungszone hinaus, also bis kurz vor das innere Sandriff, empfohlen (EAK 1993).

Nach Modellstudien von FLEMMING (1990b) und QUICK (1991) beeinflussen die Vorstrandsedimente maßgeblich die Vorstrandneigung und somit die Länge der Buhnen. Da bestimmte Verhältnisse zwischen der Länge der einzelnen Buhne und dem Abstand der Buhnen voneinander nicht überschritten werden sollten, beeinflußt damit die Vorstrandneigung auch das Längen-/Breitenverhältnis. FLEMMING (1990) ordnet an sandigen Küsten den Buhnenfeldern ein Längen-/Breitenverhältnis von 1:1 bis 1:2 und an kiesigen Stränden ein Verhältnis von 1:1 bis 1:3 zu.

Einen besonderen Einfluß auf die Wahl des Längen/Breitenverhältnisses hat der Hauptwellenangriffswinkel (NAGAI 1956). Dieser ist von Küste zu Küste verschieden und unterliegt zudem durch temporäre Wettereinflüsse leichten, aber doch ständigen Modifikationen.

Da die Baukosten einer Buhne mit zunehmender Wassertiefe erheblich ansteigen, ist die Buhnenanordnung daher meist ein Kompromiß zwischen der hydraulischen Wirksamkeit und dem Kostenaufwand. Als Bemessungsempfehlung nennt der Ausschuß Küstenschutzwerke folgende Ansätze:

Undurchlässige Strombuhnen (CERC, 1975):

a = 2 bis 3 L_B

Strandbuhnen Nordsee (GUTSCHE, 1961):

 $a = 2e x ctg \beta$

Geschlossene Holzpfahl-Strandbuhnen Ostsee (WEISS, 1991a):

a = 1 bis 1,5 L	bei schwerer Küstenbelastung
a = 1,5 bis 2 L	bei mittlerer Küstenbelastung
a = 2 bis 2,5 L	bei leichter Küstenbelastung

a = Buhnenabstand

 $L_{B,L} = Buhnenlänge$

e = Maß für die erwartete Lee-Erosion bei Buhnenbauwerken

 β = Winkel der maßgeblichen Wellenangriffsrichtung gegenüber der Küstennormalen

Weitere Bemessungsansätze befinden sich in den Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke (EAK 1993).

In der Praxis treten häufig große Unterschiede in den Buhnenabständen innerhalb der Buhnensysteme auf. Daher ist anzunehmen, daß regionale Gegebenheiten in die Konstruktion von Buhnenfeldern einfließen. So berichtet WELLS (1952) am Eriesee von einem Verhältnis Buhnenlänge zu Buhnenabstand von 1:1; ZHDANOV (1964) erscheint ein Verhältnis von 1,3 : 1,5 sinnvoll. Nach TOMLINSON (1983) variieren die Abstände an der englischen Atlantikküste sogar zwischen 1:10 und 1:4. Auf Grund des guten Wirkungsgrades wird in England der Buhnenabstand 1:4 am häufigsten verwendet.

2.3 Die Wirkung von Buhnen

Mit der Errichtung von Buhnen als Maßnahme zum Küstenschutz wird eine Akkumulation von Sanden auf der Luvseite der Bauwerke oder der Schutz vorhandener, bzw. die Erhöhung der Verweildauer aufgespülter Sedimente angestrebt. Die gewünschte Wirkung einer Buhne soll durch die Abminderung der brandungsinitiierten, küstenparallelen Längsströmung erreicht werden. Wie es jedoch durch die entsprechende Bauwerkskonstruktion zu dieser Reduzierung der küstenparallelen Strömung kommt, ist noch weitgehend unbekannt (FLEMMIG 1990b). Auch der Einfluß, den die Buhnen auf den Sedimenttransport ausüben, ist noch nicht hinreichend geklärt (BASINSKI 1994). Ebenso ist der Einfluß von Buhnen auf das Küstenquerprofil vom Strand bis zum Ansatz der Schorre nicht abschließend bekannt, obwohl SORENSEN (1961) davon ausgeht, daß die Buhnen den Sedimenttransport nicht nur im Bereich des Buhnenfeldes, sondern über die Streichlinie der Buhnen hinaus über das gesamte Küstenquerprofil beeinflussen. Auch PRICE & TOMLINSON (1970) gehen von einer Förderung der Sedimentation seewärts der Streichlinie durch die Buhnen aus.

Der Sedimentablagerung auf der Luvseite der Buhne steht in der Regel die Erosion von Sanden in Lee der Buhne gegenüber. Sie tritt, in Abhängigkeit von dem Verhältnis zwischen dem Wellenfeld in der Nähe der Buhne und der Breite der Brandungszone, an kurzen Buhnen an anderen Stellen auf als an langen Buhnen (TARNOWSKA 1985). Häufigste Maßnahme zur Minderung der Lee-Erosion ist die Erweiterung von Buhnensystemen, eine Erweiterung der Abstände der einzelnen Buhnen voneinander bei gleichzeitiger Verkürzung der Buhnenlängen sowie eine Erhöhung der Durchlässigkeit der Einzelbuhne. Für die letztere Maßnahme bieten sich insbesondere geradlinige Pfahlbuhnen als eine der einfachsten Bauwerksvarianten im Küstenwasserbau an (BURHORN 1951). Die Effektivität von einreihigen Holzpfahlbuhnen wird im Vergleich zu anderen Buhnenbauwerken (z. B. aus Naturstein oder Beton) von PRICE & TOMLINSON (1968) und FLEMMING (1990b) generell als wesentlich geringer angesehen. Außerdem erweisen sich diese Konstruktionen aufgrund ihrer leichten Bauweise gegenüber anderen Bauwerken als besonders anfällig für Aus- und Unterspülungen. An der Nordsee wurden daher Einwandholzpfahlbuhnen in der Mehrzahl durch schwerere Konstruktionen ersetzt (ASTER et al. 1989).

Die Wirkung von Buhnen ist durch viele, sich gegenseitig beeinflussende, Parameter geprägt. Eine Vielzahl morphologischer, hydrologischer, sedimentologischer und auch bautechnischer Variationen hat bisher zu keiner eindeutig vorhersagbaren Auswirkung der einzelnen Maßnahme auf die Ablagerungsverhältnisse geführt. Bisherige Forschungsarbeiten lassen sich in Naturund Laborexperimente gliedern. Nur wenige Autoren u.a. PRICE & TOMLINSON (1970), BAKKER et al. (1984), FLEMMING (1990) oder NÖTEL (1994) verbinden sinnvollerweise die Modellierung mit Naturuntersuchungen. Naturmessungen auf dem Vorstrand sind jedoch äußerst komplex und bedürfen langer Beobachtungszeiträume. Die Wirkung und die Effektivität von Buhnen oder Buhnensystemen wird häufig erst nach einigen Jahren bis Jahrzehnten deutlich (NERSESIAN et al. 1992). SMITH & GORDON (1980, S. 1138) notieren nach ihren Experimenten an Stränden und Vorstränden ohne den Einfluß von Bauwerken

... that it is extremely difficult to isolate the overall effects of each or assign their individual contributions to either beach stability or littoral transport.

Gegenüber den wenigen Naturmessungen gibt es in der Literatur jedoch eine Vielzahl von Modellierungsansätzen. Die Gründe hierfür sind eindeutig: in numerischen und physikalischen Modellen lassen sich die Rahmenbedingungen klar definieren. Demgegenüber ist dies bei Naturmessungen aufgrund der sich vielfach überlagernden Effekte kaum möglich. In Modellierungen sind daher eindeutige Ergebnisse in Bezug auf die Wirkung von Buhnen zu erwarten. DIECKMANN (1995) weist daraufhin, das jedes Modell nicht die Wirklichkeit vorhersagen kann, sondern immer nur Modellvorstellungen einer möglichen zukünftigen Wirklichkeit liefert, die auf der Grundlage des derzeitigen parameterisierten Wissens basiert. Nach GRAW (1995) sind außerdem bei allen gängigen numerischen Simulationen zur Berechnung des Sedimenttransportes Fehlerspannen von 50% bis 200% anzunehmen. So resümieren HULSBERGEN et al. (1976, S.1439) nach der experimentellen Verifikation der Theorie zur Wirkungsweise von Buhnen nach BAKKER (1968):

In some cases the result is quite good, whereas in other conditions the theory does not even show the right trend;...

Zur Untersuchung des Sedimenttransportes in Naturexperimenten wurden von vielen Autoren radioaktive Tracer oder Luminophoren an natürlichen Küsten und Küstenabschnitten mit Bauwerken eingesetzt. Aus der jüngeren Literatur sind dies die Arbeiten von DUANE & JAMES (1980), DAVISON (1984), TOLA et al. (1984), SCHWARZER (1989), OSTEROWSKI et al. (1990), PRUSZAK & ZEIDLER (1994) u.v.a., die sich mit den Sedimentbewegungen auf dem Vorstrand, auf Sandriffen, in Rinnen, in Rippströmen sowie auch um Bauwerke herum befassen.

Messungen des Sedimenttransportes auf dem flachen Vorstrand in der Brandungszone mittels fluoreszierender Tracer sind von WHITE & INMAN (1989a, 1989b) an der nordamerikanischen Pazifikküste, sowie von AAGARD & GREENWOOD (1993) und AAGARD et al. (1995) an der dänischen Küste durchgeführt worden. Die Autoren weisen u.a. insbesondere auf die unterschiedliche Korrespondenz zwischen den Strömungen und dem Sedimenttransport in Abhängigkeit zur Wassertiefe hin.

Naturmessungen in Buhnenfeldern sind wegen des großen Meßaufwandes sehr selten durchgeführt worden. Den Arbeiten von KOLP (1958, 1966, 1970) über die Sedimentbewegungen in Buhnenfeldern mit unterschiedlich konstruierten Buhnen sowie verschiedenen morphologischen, sedimentologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen sind bisher bis auf die jetzt vorliegenden Untersuchungen keine vergleichbaren oder direkt anknüpfenden Experimente gefolgt. Anhand physikalischer Berechnungen (ERTEL 1967) und mit Hilfe von Strömungsmodellen zeigen MURRAY et al. (1980), daß es hinter einer geschlossenen Mole zur Ausbildung von Strömungswirbeln kommen kann. Modellierungen mit Buhnen weisen für die sowohl küstennormal als auch küstenparallel gerichteten Strömungen des Wirbels unterschiedliche Geschwindigkeiten auf (SATO & TANAKA 1980). Die im Gegensatz zu der landwärts gerichteten geringere seewärtige Strömungsgeschwindigkeit ermöglicht den Transport und die Ablagerung der von der Strömung mitgeführten Sande in dem leeseitigen Raum der Buhne. In Naturexperimenten an einer Einzelmole bestätigt SHERMAN et al. (1990), daß unter bestimmten Bedingungen entgegen der häufig zu beobachtenden Erosion, leeseitig der Einzelbuhne ein landwärts gerichteter Sedimenttransport erfolgen kann.

Strömungsmessungen von TAMIO et al. (1984) zeigen die Ausbildung von verschiedenen Zirkulationsmustern entlang einer Steinmole. Die sehr unterschiedlichen Muster variieren in Abhängigkeit von den verschiedenen meteorologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen. An Buhnen und Molen entstehen häufig Rückströmungen entlang des Bauwerks. Mittels fluoreszierender Tracer wurden von SASAKI et al. (1984) die Wirkung von Küstenbauwerken auf die Ausbildung von Rippströmungen sowie auf den Sedimenttransport erfaßt.

Der Wirkungsgrad von Buhnen oder Buhnenfeldern hängt unter anderem maßgeblich von der Verfügbarkeit von Sedimenten ab. Nach Untersuchungen von AHRBERG (1995) an der dänischen Küste ist eine positive bathymetrische Entwicklung in den Buhnenfeldern durch eine seewärtige Verschiebung der Uferlinie häufig mit der Versteilung des Vorstrandes verbunden. Ein starkes Sedimentangebot kann jedoch auch zur Ausbildung eines breiten Strandes führen, ohne daß diese negativen Effekte auf dem Vorstrand auftreten (NERSESIAN et al. 1992).

Bemerkenswert sind die Naturmessungen von PRICE et al. (1972). Sie verdeutlichen die Problematik der Einschätzung der Buhnenwirkung. In Experimenten mit durchlässigen Bauwerken wurde eine generell positive morphologische Entwicklung innerhalb des Buhnenfeldes festgestellt. Vergleichende Untersuchungen an dem benachbarten Küstenabschnitt ohne Buhnen zeigten jedoch später, daß diese Entwicklung dem natürlichen Trend der Küste entsprach. Von ähnlichen Erfahrungen berichten BAKKER et al. (1984). Nach einer über 20 jährigen Forschungsarbeit mit durchlässigen Holzpfahlbuhnen konnten die funktionalen Zusammenhänge in der Wirkungsweise der Buhnen mit Naturmessungen nicht ermittelt werden. Zum einen verschmolzen die Effekte der Buhnenwirkung auf die Strandentwicklung mit den natürlichen Fluktuationen und Trends; zum anderen zeigten Vergleichsmessungen zwischen durchlässigen und undurchlässigen Buhnen eine nahezu gleiche Entwicklung der Küstenlinien. NÖTEL (1994) kommt nach umfangreichen Naturmessungen und Modellierungen zu dem Ergebnis, daß die physikalischen Parameter bei Untersuchungen in der Natur so ausgesprochen vielgestaltig sind, daß den Naturmessungen Modellmessungen vorgeschaltet werden sollten.

Die Experimente von KRESSNER (1927) gehören zu den ersten, mittels derer die Wirkungsweise von Buhnen und die Entwicklung der Bathymetrie in Abhängigkeit zum Verhältnis Buhnenlänge zu Buhnenabstand untersucht wird. Trotz der zu erwartenden Maßstabseffekte in Bezug auf die im Modell verwendeten Sedimente beeindrucken die mit einfachen Mitteln gewonnenen Ergebnisse über die Entwicklung der Bathymetrie und die Ausbildung von Zirkulations- und Wirbelsystemen in den Buhnenfeldern. Die Empfehlungen der Ausweitung der Buhnenabstände von 1:1 auf 1:2 bis 1:3 entsprechen den Angaben der CERC-Formel (CERC 1975).

Ein wesentliches Ziel der Untersuchungen von BURHORN (1951) ist es, die Wirkung von Buhnen unterschiedlichster Bauart auf die Bathymetrie zu erfassen. Auch hier werden, gleich den Modellergebnissen von NODA (1984) und FLEMMIG (1990) sowie den Naturmessungen von TAMIO et al. (1984), Wirbel- und Zirkulationssysteme als ein wichtiges Element in der Beeinflussung der Bathymetrie erkannt. Entsprechend der Ergebnisse aus Naturuntersuchungen von KOLP (1966) werden Ruhezonen inmitten des Buhnenfeldes als Bereiche verstärkter Akkumulation bezeichnet. Besonders günstige Wirkungen werden der einfachen geraden Buhne zugeordnet. Zur Verringerung der Lee-Erosion empfiehlt BURHORN (1951) durchlässige Buhnen.

Anhand physikalischer Modelle mit durchlässigen Holzpfahlbuhnen zeigten BAKKER et al. (1984) die Wirkung der Buhnen auf die Küstenlängsströmung. Die durchlässigen Bauwerke reduzieren in Strandnähe die küstenparallele Strömung um bis zu 50 %, verstärken jedoch die Küstenlängsströmung im Buhnenstrich um bis zu 15 %. Funktionale Zusammenhänge zwischen der Anzahl sowie dem Abstand der Pfähle je Längeneinheit konnten jedoch nicht ermittelt werden.

In besonders umfangreichen Literaturstudien und Modelluntersuchungen werden von FLEMMING (1990) u.a. die Vorstrandsedimente als ein wesentliches Element in der Wirkung von Buhnen erörtert. Demnach werden durchlässigen Buhnen insbesondere an grobsandigen bis kiesigen Stränden eine erheblich höhere Effektivität zugesprochen als an feinsandigen Stränden.

Mittels physikalischer und numerischer Modelle werden von BARCELO (1968), WATANABE et al. (1980) und CROTOGINO (1985) Überlegungen zum Sedimenttransport innerhalb und außerhalb der Brandungszone angestellt. Unter Anwendung rechnergestützter Simulationen mit verschiedenen Rahmenbedingungen erstellt HORIKAWA (1988) an einer Buhne verschiedene Strömungsfelder. Von WALKER et al. (1991) werden numerische Modelle zur Berechnung des Sedimenttransportes, Erosions- und Akkumulationszonen und der Brandungsströmung entlang einer Einzelbuhne eingesetzt. Die Komplexität von Strömungsmustern und Sedimentbewegungen in einem Buhnenfeld zeigen die numerischen Modelle von MAYERLE et al. (1995).

Nur wenige Autoren widmen sich der Problematik der Veränderungen der Sedimente in der Brandungszone und am Strand, die in Abhängigkeit von der Errichtung von Molen oder Buhnen stehen. ORME et al. (1980) weisen auf die außerordentlich großen Schwierigkeiten hin, die sehr häufig auftretenden Variationen in der Korngrößenhäufigkeitsverteilung der Sedimente in der Brandungszone mit der Wirkung eines Bauwerkes in Beziehung zu setzen. So schreiben ORME et al. (1980):

.....The nature and movement of sediments around the groin were more complex than previous models have suggested,... (ORME et al. 1980; S. 111 - 112).

2.4 Die Buhnen vor Warnemünde

Zum Schutz der Küste vor Warnemünde wurde ein Buhnensystem bestehend aus 18 Einzelbuhnen des Typs "einreihig geschlagene Holzpfahlbuhne" errichtet. Dieser Bautyp bildet den einfachsten Vertreter von Buhnenbauwerken. Er wird seit Jahrzehnten an der deutschen Ostseeküste verwendet und insbesondere in Mecklenburg-Vorpommern bevorzugt eingebaut.

Das gesamte Buhnensystem erstreckt sich über ca. 1200 m Küstenlänge und bindet im Westen an das abtauchende Steilufer der Stoltera sowie im Osten an das Akkumulationsgebiet westlich der Hafenmole an. Bei der Bemessung des Buhnensystems wurde die Neigung der Schorre (1 : 93) bis in eine Wassertiefe von - 4 m NN berücksichtigt (DIEDERICH 1986). Weitere Bemessungsgrundlagen waren die maximale Wellenlänge bei Windstärken zwischen 6 Bft. und 8 Bft. sowie die allgemeine Ufersituation. Die Buhnen haben eine Länge von 100 m und weisen einen gegenseitigen Abstand voneinander von 90 m auf.

Die einzelnen Bauwerke in einem Buhnensystem unterscheiden sich durch unterschiedlich dicht geschlagene Holzpfähle. In dem Buhnensystem vor Warnemünde sind geschlossen, halboffenhalbgeschlossen und offen geschlagene Buhnen verbaut worden. Bei der offenen Buhne beträgt die Durchlässigkeit am landwärtigen Ende 30 %. Sie nimmt zum Buhnenkopf am seewärtigen Ende auf 52 % zu. Die halboffenen Buhnen bestehen aus einem 60 m langen, landseitig geschlossenen Abschnitt mit einer Durchlässigkeit von ca. 10 % sowie einem 40 m langen seeseitig geöffneten Teilstück mit einer Durchlässigkeit von 40 - 60 %. Die Kronenhöhe der Buhnen beträgt 0,45 m ü. NN. (DIETERICH et al. 1986).

Am westlichen und östlichen Ende des Buhnensystems wurden offengeschlagene Buhnen errichtet. Im zentralen Buhnenfeld wurden halboffen-halbgeschlossene Buhnen gerammt. Zum einfacheren Verständnis werden im weiteren Text die halboffenen-halbgeschlossenen Bauwerke als halboffene Buhnen bezeichnet. Die Durchlässigkeit der Buhnen variiert damit nicht nur in der küstenparallelen Erstreckung des Buhnensystems, sondern ebenfalls innerhalb einer jeden Buhne. Die empfohlenen Verhältnisse, nach denen auch die Buhnen vor Warnemünde bemessen wurden, zeigt die Abbildung 4.

3. Arbeitsmethoden

3.1 Auswahl und Lage der Untersuchungsgebiete

Die küstennormal ausgerichteten bathymetrischen und sedimentologischen Profile haben ihren Nullpunkt auf der vom StAUN 1992 eingemessenen Standlinie (vgl. KÖSTER et al. 1993). Alle im Text genannten küstennormal ausgerichteten Entfernungsangaben beziehen sich auf diese Standlinie. Sie ist nicht mit der variierenden Wasserlinie identisch.¹

Die Auswahl der Meßfelder erfolgte in Abhängigkeit vom Öffnungsgrad der Buhnen sowie der in den einzelnen Feldern vorhandenen Meßelektronik. Im Zentrum des Buhnensystems steht die Meßbrücke (Abb. 5), an der bereits viele Jahre vor dem Bau der Buhnen Meßinstrumente zur Registrierung hydrologischer und meteorologischer Parameter installiert waren (Abb. 8). Daher wurde das zentrale Buhnenfeld 7-8 als Untersuchungsfeld für die halboffene Bauweise der Buhnen ausgewählt. Die Meßbrücke unterteilt das Buhnensystem in einen westlichen und einen östlichen Abschnitt (Abb. 6).

Die Wirkung der offenen Bauweise wurde im Buhnenfeld 2-3 am westlichen Ende des Buhnensystems erfaßt. Die Wahl dieses Meßfeldes erfolgte vor einem rein bautechnischen Hintergrund; geologische und morphologische Besonderheiten, die sich darin äußern, daß die Geschiebemergelfläche sehr hoch aufragt und über weite Teile nur eine geringmächtige Übersandung aufweist, wurden zunächst nicht berücksichtigt.

Untersuchungsgebiete:

Buhnenfeld 2-3:	(westliche Grenze)	144,580 Kkm
	(östliche Grenze)	144,640 Kkm
Buhnenfeld 7-8:	(westliche Grenze)	145,020 Kkm
	(östliche Grenze)	145,115 Kkm

3.2 Geländearbeiten

Die Geländearbeiten führten überwiegend Taucher der wissenschaftlichen Tauchgruppe der Universität Kiel sowie Forschungstaucher des StAUN - Rostock durch. Die Entnahme von Oberflächensedimenten mit einem VAN VEEN -Greifer, die Sondierung des Vorstrandes und die Erfassung der Bathymetrie mit Hilfe eines Echographen erfolgte mit dem Forschungsboot ROSI der Arbeitsgruppe Küstengeologie des Forschungs- und Technologiezentrums Büsum.

¹ Anmerkung: Aufgrund einer erneuten Vermessung im Jahre 1994 haben das StAUN und das LWI eine neue Standlinie eingeführt. Sie korrespondiert nicht mit der Standlinie des GPI's und ist um 22,5 m landseitig verschoben.

3.2.1 Kartierungen

Zur möglichst vollständigen Erfassung der sedimentologischen Ausprägung des Meeresbodens erweist sich die Tauchkartierung als ein wesentliches Bindeglied zwischen den einzelnen Probenstationen und den jeweiligen Profilen. Sie ermöglicht über die Aufnahme rein sedimentologischer Kriterien hinaus durch die Beschreibung und Messung morphologischer und biologischer Parameter die Erstellung eines komplexen Gesamtbildes.

3.2.2 Probenentnahme in den Meßfeldern

Strand und Vorstrand unterliegen dem ständigen Einfluß wechselnder hyrodynamischer Bedingungen. Die Beprobung der Sedimentoberfläche kann deshalb immer nur den Zustand um den Zeitpunkt der Probenentnahme widerspiegeln. Ereignisse, die einige Tage vor der Beprobung stattfanden, bilden sich jedoch noch im Sediment ab. Durch häufige Wiederholungen der Sedimententnahme an festgelegten Positionen zu unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen lassen sich jedoch mittlere Sedimentverteilungen herausarbeiten und Entwicklungstendenzen aufzeigen.

Die Sedimententnahmen in den Buhnenfeldern 2-3 und 7-8 erfolgten auf 14 küstennormal ausgerichteten Profilen in Abständen von 10 m. Die Profile haben eine Länge von 200 m und erstrecken sich vom Strand bis zu einer Wassertiefe von - 3,00 m NN. Je Buhnenfeld ist das Mittelprofil auf eine Länge von 400 m erweitert worden. Sie reichen damit über das äußere Sandriff auf die Abrasionsfläche bis zu einer Wassertiefe von - 4,00 m NN hinaus (Abb. 7).

Die Lokalisierung der Probenpunkte auf den Meßprofilen erfolgte mittels markierter Bleileinen. Zur Entnahme der Sedimentproben kam ein seit Jahren bewährtes Standardverfahren der Arbeitsgruppe (AG) Küstengeologie des GPI zur Anwendung. Es werden PVC-Kästchen mit den Maßen 10,5 cm x 6,5 cm x 3,8 cm von dem Taucher so in das Sediment gedrückt, daß sie bündig mit der Oberfläche abschließen. Anschließend werden diese Kästen vorsichtig aus dem Sedimentverband gelöst und noch unter Wasser mit einem Deckel verschlossen. Diese standardisierte Entnahmetechnik gewährleistet eine Vergleichbarkeit der Proben (SCHWARZER 1989).

In kleinräumigen Untersuchungsgebieten hat die Probenentnahme durch Taucher gegenüber dem Beprobungsverfahren mit einem VAN VEEN -Backengreifer den Vorteil, daß neben der exakten Positionierung auch die Orientierung der Entnahmekästen zu möglichen Oberflächenstrukturen (Rippeln, Kolkstrukturen hinter Hindernissen, etc.) gewährleistet ist. Weiterhin können durch den Taucher vor Ort Zufälligkeiten bei der Probenentnahme und das Fördern eines nicht repräsentativen Sedimentes ausgeschlossen werden.

Zur Beprobung des ca. 5 km² großen Vorstrandbereiches zwischen Geinitz-Ort und der Warnow-Mündung wurde mit einem VAN VEEN - Greifer alle 25 m auf vorher festgelegten, in einem gegenseitigen Abstand von 250 m liegenden Profilen beprobt. Diese Profile erstreckten sich vom Strand über die Abrasionsfläche hinaus bis zu maximal 1000 m seewärts der

Standlinie. Um die Sedimente den morphologischen Formen auf dem Küstenvorfeld zuordnen zu können, wurde gleichzeitig die Bathymetrie der Profile mit einem Echographen aufgenommen.

3.2.3 Sondierungen

Die Effektivität eines Buhnensystems hängt u.a. entscheidend von dem Sedimentangebot auf der Schorre ab. Zur Erfassung der Sedimentmächtigkeit und zur Berechnung der Volumina verschiedener morphologischer Einheiten wurden die Sedimentdaten aus den Sondierungen und Tauchkartierungen verwendet. Mit Hilfe eigens zu diesem Zweck aufgenommener Echogramme ließ sich die Bathymetrie des Vorstrandes von der Wasserlinie bis zur Abrasionsfläche bestimmen und steinige Abschnitte im Oberflächensediment sowie Geschiebemergelflächen von Bereichen mit Sandbedeckung abgrenzen.

Die Sondierungen im Vorstrand erfolgten nach einem von LANESKY et al. (1979) entwickelten und in der AG Küstengeologie modifizierten Vibrationsverfahren (HÖCK & RUNTE 1992). Kernstück dieser Vorrichtung ist eine Rüttelflasche, wie sie im Baugewerbe zur Betonverdichtung verwendet wird. Über einen Metallflansch werden Schwingungen auf ein Bohrrohr ($\emptyset = 80$ mm, Wandstärke = 2 mm) übertragen. Im Kontaktbereich zwischen diesem Rohr und dem Sediment wird dabei durch die Schwingungen das Porenwasser aus dem Sediment gepreßt, sodaß das Rohr durch sein Eigengewicht auf dem Porenwasserfilm in die Tiefe gleitet. Steine, zu stark verdichtetes Sediment oder Torfe, die die Schwingungen absorbieren, können zu einem vorzeitigen Abruch der Bohrung führen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß ohne größeren logistischen Aufwand auch in unwegsamem Gelände Kerne bis zu 6 m Länge gezogen werden können.

3.3 Labormethoden

Die Bearbeitung des Probenmaterials im Labor erfolgte nach einem seit vielen Jahren in der AG Küstengeologie des GPI bewährten Verfahrens (KÖSTER 1979b). Der Analysengang von der Ausgangsprobe bis zur EDV-Auswertung ist dem nachfolgenden Flußdiagramm zu entnehmen.

Die Aufspaltung der Sedimentproben in einzelne Kornfraktionen erfolgte nach Abschlämmung des Anteiles < 0,050 mm und der Teilung der Rohprobe in Einwaagen von 80 g bis 120 g. Die Teilproben wurden im Trockensiebverfahren auf Sieben nach ASTM-Stufung in 1/4 Phi^o-Klassen aufgespalten. Die international gebräuchliche Abstufung der Siebe durch das von KRUMMBEIN (1936) eingeführte relativierende Korngrößenmaß Phi^o (dimensionslose Zahl) berechnet sich durch die logarithmische Transformation der Summenkurve:

 $Phi^{\circ} = -log_2 (x[mm] / x_0 [mm]) (x_0 = 1 mm)$

Mit Hilfe von Korngrößenhäufigkeitsverteilung können Sedimente aus verschiedenen Ablagerungsmilieus und Faziestypen unterschieden und Rückschlüsse auf die im Ablagerungsmilieu herrschenden Prozesse gezogen werden (TUCKER 1985). Eine Gegenüberstellung der gebräuchlichsten, unterschiedlichen Korngrößenmaße zeigt die Abbildung 9.

Flußdiagramm zur Probenbearbeitung:

Ausgangsprobe

Siebanalyse		Traceranalyse
Trocknen		
Wiegen		
evtl. H ₂ O ₂ Behandlung		
Abtrennen der Anteile		
< 0,050 mm, Entsalzen		Entsalzen
Verwerfen des Feinanteiles	Trocknen	Trocknen
	Wiegen	Wiegen
Gew Bestimmung des Anteiles < 0,050 mm	evtl. Teilen	evtl. Teilen
	Trockensiebung	Trockensiebung
	Eingabe der Siebergebnisse	Auszählen der Tracer in Fraktionen

EDV-Analyse

3.4 Datenverarbeitung

Zur Charakterisierung der Sedimente erwies sich die Aufspaltung der Sedimentproben in die Fraktionen Feinsand (< 0,200 mm), Mittelsand (0,200 mm - 0,630 mm), und Grobsand, Kiese und Steine (> 0,630 mm) als sinnvoll. Abweichend von der DIN 4022 wurde die Mittelsand-fraktion weiterhin in die Fraktionen "feiner Mittelsand" (0,200 mm - 0,350 mm) und "grober Mittelsand" (0,350 mm - 0,630 mm) aufgespalten. Diese Grenzen haben sich im Hinblick auf

die Charakterisierung des Seegrundes als auch für die Zuordnung zu morphologischen Strukturen (SCHWARZER 1989) als besonders günstig erwiesen.

Zur weiteren Charakterisierung der Sedimente werden die statistischen Parameter Medianwert und Mittelwert herangezogen. Sie geben eine Vorstellung über das Maß der Energie in dem Transportmedium (KACHHOLZ 1978). Der Medianwert leitet sich aus dem 50 %-Durchgang der Korngrößensummenkurve ab. Für unimodale Sedimente mit einem sehr engen Kornspektrum sind Mittelwert und Medianwert nahezu gleichwertig. Bei polymodalen Sedimenten oder unimodalen Verteilungen mit sehr breit gefächertem Korngrößenspektrum erweist sich der Medianwert jedoch als unbrauchbar (TINIAKOS 1978).

Mittelwert und Standardabweichung wurden nach dem Momentenverfahren berechnet (FRIEDMANN 1962). Hierbei wird gegenüber anderen statistischen Systemen (Quartilsystem, Folksystem oder Perzentil-99-System) die gesamte Korngrößensummenkurve berücksichtigt. Die Verwendung der o. a. statistischen Parameter war insbesondere für die Sedimente der ersten Probenentnahme im Mai 1992 problematisch (KÖSTER et al. 1993). Aufgrund der häufig auftretenden Bi-/Polymodalität der Korngrößenhäufigkeitsverteilungen, insbesondere der Rinnensedimente sowie bei Sanden in unmittelbarer Nähe entlang der Bauwerke, ist die Aussagekraft des Mittelwertes für einige Abschnitte im Untersuchungsfeld stark eingeschränkt. Sie können je nach Ausprägung der Bi- bis Polymodalität zur Errechnung fehlerhafter Mittelwerte führen (TUCKER 1996). Die polymodalen Häufigkeitsverteilungen sind in der Regel ein Zeichen für die Anwesenheit von mehr als einer Sediment-Population.

Es ist davon auszugehen, daß der Momenten-Mittelwert und die Standardabweichung ein geeignetes Maß zur Charakterisierung der Sedimente in dem Untersuchungsgebiet sind.

3.5 Tracermessungen

Der Einfluß, den Buhnen auf den Sedimenttransport in einem Buhnenfeld ausüben, wird durch die Bewegungsbahnen der Sande in dem Buhnenfeld deutlich. Sie wurden durch den Einsatz von fluoreszierenden Leitstoffen (sog. Luminophoren oder Tracer) in drei umfangreichen Meßkampagnen ermittelt.

Methodisch basiert die Verwendung von Luminophoren auf der Markierung von autochthonem Sediment. Dieses Verfahren wurde u.a. von REID et al. (1961), BOON (1969), OEBIUS (1979), WHITE & INMAN (1989, 1989) sowie an der Ostseeküste u.a. von KOLP (1966, 1970) und in jüngerer Zeit von KÖSTER & SCHWARZER (1988) und SCHWARZER (1989) eingesetzt. PAHLKE & GRIMM-STRELE (1970), PAHLKE 1976 sowie SCHWARZER (1989) diskutieren diese Verfahren ausführlich. Im Folgenden sollen nur die gängigen Methoden auszugsweise angesprochen werden. Zur Markierung stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung.

Die Verwendung von Tracern für Sedimenttransportuntersuchungen ohne Rücksicht auf das autochthone Material kann zu erheblichen Fehlinterpretationen führen. Ein Beispiel geben WHITE & INMAN (1989). Nach ihrer Meinung wählten MURRAY (1967) und KOMAR (1977) für ihre Experimente zu grobe Tracersande aus, um den Sedimenttransport vor Ort eindeutig wiederzugeben. Auch SCHWARZER (1989) beschreibt diesen Widerspruch bei dem Vergleich von KOMAR's (1977) Arbeiten zu seinen Experimenten, die er mit autochthonen Farbsanden durchgeführt hat.

Bei dem Färbeverfahren muß darauf geachtet werden, daß keine Veränderung der Korngröße, Kornform und der Kornoberfläche sowie der Mineralzusammensetzung der zu markierenden Sande eintritt. Nur dann ist sicher, daß die eingefärbten Sande und das in-situ-Sediment unter den gegebenen hydrologischen Bedingungen den gleichen Transportprozessen unterliegen. Kunststoffüberzogene Sandkörner (REID et al. 1961) und genormte Glaskugeln eignen sich nicht für Naturmessungen.

Die Markierung der Sande erfolgt durch Einlagern des Farbstoffes in Unebenheiten der mikroskopisch gesehen nie ganz glatten Sandkornoberfläche (RUCK 1967). Durch dieses Verfahren wird das Sandkorn hydraulisch nicht beeinträchtigt (OEBIUS 1979). Die Ergebnisse der Sedimenttransportmessungen mit Luminophoren sind daher uneingeschränkt auf nicht markierte Sande des gleichen Korngrößenspektrums übertragbar.

Die Auslage der eingefärbten Sande erfolgte in einer wasserlöslichen Spezialfolie. Sie verhinderte ein Verdriften der Luminophoren während des Ausbringens und ermöglicht das Einarbeiten der Farbsande in die Sedimentoberfläche, um so naturidentische Bedingungen zu schaffen. Die Folie löste sich nach mehreren Minuten auf. Es wurden ca. 70 kg Luminophorensande pro Farbe ausgebracht.

Die Luminophoren weisen eine langjährige chemische und physikalische Resistenz gegenüber den Angriffen durch das Meerwasser und die ständigen Sedimentumlagerungen auf. SCHWARZER (1989) findet bei seinen Untersuchungen in der Probstei (östliche Kieler Außenförde) noch 2 Jahre nach Abschluß eines Farbsandexperimentes vereinzelt Luminophoren aus diesen Messungen. So lassen sich nach dem Ausschöpfen aller zur Verfügung stehenden Farbvarianten Luminophoren-Messungen nicht in beliebiger Anzahl wiederholen. Abhängig von der Dynamik der Vorstrandsedimente kann ein Testgebiet über mehrere Jahre kontaminiert bleiben. Der erneute Einsatz von Luminophoren in einem kontaminierten Küstenabschnitt erfordert daher eine umfassende Voranalyse hinsichtlich noch vorhandener, "vagabundierender" Leitstoffe. Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten war eine Untersuchung auf Kontamination nur vor der dritten Luminophoren-Messung im zentralen Buhnenfeld notwendig.

Ein Nachteil des Arbeitens mit Farbsanden ist der hohe Proben- und Arbeitsaufwand im Labor. Bis heute werden die markierten Körner < 0,300 mm manuell ausgezählt. Der Einsatz einer von der Arbeitsgruppe Meeresmeßtechnik des Forschungs- und Technologiezentrums Büsum entwickelten Zählmaschine (FÖRSTER 1988) arbeitet bei geringeren Korngrößen nicht zuverlässig.

3.5.1 Testfelder zur Messung mit Luminophoren

Der resultierende Sedimenttransport im Untersuchungsgebiet ist nach Osten gerichtet (MIEHLKE et al. 1982, WEHNER 1991). Zur Vermeidung vorzeitiger Kontamination des Untersuchungsgebietes sollten die Messungen in drei unterschiedlichen, sich von West nach Ost aufreihenden Testfeldern zwischen der Buhne 7 bis zur Buhne 9 sowie zwischen den Buhnen 2 und 3 erfolgen. Wegen der fortschreitenden Zerstörung der Holzpfähle des Buhnensystems durch die Bohrmuschel *Teredo navalis* wurde eine Verlegung der Messungen 1994 und 1996 in den Bereich zwischen den Buhnen 5 bis 10 notwendig. Hier war die Zerstörung weniger weit fortgeschritten bzw. die Rekonstruktion der Buhnen 1996 erfolgreich abgeschlossen worden.

Die Verlegung der Untersuchungen aus den ursprünglich vorgesehenen Buhnenfeldern hatte für die Messungen 1996 einen erheblichen Mehraufwand zur Folge. Da das verfügbare Spektrum fluoreszierender Farben in diesem Bereich ausgeschöpft war, mußte eine umfangreiche Voranalyse der Vorstrandsedimente hinsichtlich noch vorhandener Tracer durchgeführt werden. Nur eine solche Untersuchung schloß eine mögliche Kontamination durch die vorangegangenen Farbsandmessungen ab 1993 aus oder ermöglicht eine Berücksichtigung der Kontamination bei der Interpretation der Daten.

Bereits zu Beginn der Untersuchungen 1993 stellte sich heraus, daß die vorgesehene Größe der Testfelder der Aufgabenstellung nicht genügen konnten. Die Ausdehnung der Beprobungsstationen wurde mit dem Ziel, die gesamte Luminophorenwolke zu erfassen, daher während der einzelnen Messungen anhand der aktuellen Windverhältnisse variiert. Die Beprobung der vollständigen Farbsandwolke wurde dennoch nur selten erreicht. Die Gründe sind vielschichtig: z. B. waren die Grenzen des Testfeldes wegen der hohen Anzahl der Probenentnahmen und der damit verbundenen großen Probenmenge nicht beliebig erweiterbar oder es herrschten während der Messungen 1993 und auch 1994 aufgrund einer Starkwindlage (> 10 m/s) sehr turbulente Verhältnisse auf dem Vorstrand vor, die eine seewärtige Ausdehnung der Messungen nicht zuließen.

3.5.2 Messungen im erweiterten Küstenvorfeld

Im Rahmen der Beprobung des Küstenvorfeldes (1993) zwischen Geinitz-Ort und der Warnow-Mündung (vgl. Kap. 4.2) wurden die hier entnommenen Sedimente zusätzlich einer Farbsandanalyse unterzogen. Um weitere Informationen über den küstennormal gerichteten Sedimenttransport zu erhalten, ist eigens zu diesem Zweck ein küstenparalleles Profil aufgenommen worden. Es liegt seewärts der Meßbrücke auf dem äußeren Sandriff und hat eine Länge von 300 rn. Es quert jenen Bereich, in dem das äußere Sandriff von einer Rinne durchbrochen wird und sich ein küstennormal ausgerichtetes, die Rinne nach See begleitendes, kurzes Sandriff befindet (vgl. UVE 1994).

3.5.3 Vorbereitungs-, Auslage-, Beprobungstechnik und Laborarbeit

Der Erfolg einer Messung mit Farbsanden hängt entscheidend von der Wahl des Auslagepunktes ab. Wo und wann Luminophoren eingesetzt werden, ist im Zusammenhang mit der Zielsetzung der Messung zu definieren. Zur Erfassung der Transport- und Bewegungsbahnen innerhalb des Buhnenfeldes mit unterschiedlich dicht geschlagenen Buhnen wurden während der ersten beiden Luminophoren-Messungen vom 10.10. bis zum 19.10.1993 und vom 14.10. bis zum 24.10.1994 die Auslagepunkte der verschieden eingefärbten Sande auf dem inneren Sandriff innerhalb des Buhnenfeldes und in der Schwallzone im Zentrum des Buhnenfeldes festgelegt.

Bevor auf die weitere Vorgehensweise eingegangen wird, muß jedoch noch eine, die zweite Messung nachhaltig beeinflußende Veränderung in der Meßsituation erläutert werden. Das Ziel der zweiten Farbsandmessung war die Erfassung des Sedimenttransportes in einem geschlossenen Buhnenfeld. Zur Simulation geschlossener Buhnen waren die halboffenen Buhnen 6 und 7 mit Geotextilien abgedichtet worden. Die Dichtung hielt jedoch der Brandung während eines Starkwindereignisses wenige Tage vor dem Experiment nicht stand. Zu Beginn der Farbsandmessungen hatte sich im Bereich des seeseitigen Abschnittes der Buhne 6 das Geotextil teilweise gelöst. Diese besondere Ausgangssituation der Messungen - nämlich ein Buhnenfeld mit zwei unterschiedlich dichten Buhnen - spiegelt sich deutlich in den Ergebnissen wieder.

Die dritte Messung erfolgte vom 08.06. bis 13.06.1996 im Buhnenfeld 7-8. Sie hatte zum Ziel, die wegen der bautechnischen Schwierigkeiten nicht vollständig gelöste Aufgabe der zweiten Farbsandmessung zu vervollständigen sowie nach Möglichkeit den Sedimenttransport in das Buhnenfeld hinein zu erfassen. Folglich wurde einer der beiden Eingabepunkt der Tracer nicht in die Schwappzone gelegt, wie bei den bisherigen Untersuchungen, sondern auf dem unteren Luvhang des inneren Sandriffes. Weiterhin unterscheidet sich die Farbsandmessung 1996 in der Zielsetzung von den beiden vorangegangenen Untersuchungen 1993 und 1994, die beide an Starkwindereignisse gebunden waren, dahingehend, daß diese dritte Messung während einer großräumigen Normalwindlage stattfand.

In allen Meßkampagnen waren folgende Zeitabstände zwischen den Probenentnahmen vorgesehen: 2 Std., 12 Std., 24 Std. und 72 Std. Die Wahl der Beprobungszyklen stand in Abhängigkeit zur Dauer der Windereignisse. Nach der Auswertung einer 15-jährigen Windstatistik (LWI 1996) zeigt sich, daß 30 % - 40 % der starken Windereignisse vor Warnemünde kürzer als 4 Stunden sind. Lediglich 10% bis 15 % der Ereignisse überschreiten die 12-Stundengrenze. So kann davon ausgegangen werden, daß in jedem Meßintervall eine veränderte meteorologische und hydrologische Situation erfaßt wird. Die vorgegebenen Zeitintervalle ließen sich in der Praxis nicht realisieren. Die schwierigen Arbeiten in der Brandungszone führten zu Verzögerungen. Trotz der Aufweitung der Beprobungsintervalle ist eine Beeinträchtigung der Ergebnisse dennoch nicht zu erwarten.

Die Entnahme der Proben erfolgte nach einem festen Beprobungsraster (vgl. Abb. 7). Profile und Probenpunkte auf diesen Profilen hatten zueinander einen Abstand von 10 m. Zusätzlich wurden westlich und östlich der Buhnen in Abständen von 2 m sowie 5 m zum Bauwerk jeweils ein weiteres Profil ausgelegt und beprobt. Die Entnahme erfolgte wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben.

Ein besonderes Problem bei der Messung mit Luminophoren ist die Variabilität der Sedimentmächtigkeit. Hierzu bedarf es noch einiger Erläuterungen. Unter Umständen könnten bei starken Sedimentumlagerungen Luminophoren in unbekannter Menge und Dauer verschüttet werden und so die Messungen nachhaltig negativ beeinflußen (KOLP 1966). Insbesondere in Bereichen mit einer hohen Sedimentdynamik, wie z. B. auf dem Sandriff (BOON 1969) und in der Schwappzone (WHITE & INMAN 1989), kann in Abhängigkeit von der Brandungsenergie die Mächtigkeit der mobilen Sedimentschicht stark variieren. In der Literatur werden zu dieser Problematik sehr unterschiedliche Angaben gemacht, leider häufig ohne Nennung der Rahmenbedingungen. Dennoch zeichnet sich ein klares Bild ab. So messen DUANE & JAMES (1980) in ihren Experimenten Umlagerungstiefen von lediglich 1 cm. Auch PRUSZAK & ZEIDLER (1992) und ZEIDLER (1994) geben unter moderaten Bedingungen eine mobile Sedimentschicht von 1,5 cm an. Diese nimmt unter stürmischen Bedingungen in ihrer Mächtigkeit auf bis zu 4 cm - 5 cm zu (PRUSZAK & ZEIDLER 1992). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen WHITE & INMAN (1989) und SCHWARZER (1989), Letzterer auf der Basis von entsprechenden Voruntersuchungen mit der Annahme, in seinen Messungen mit der Entnahme der oberen 4 cm der Sedimentoberfläche die mobile Sedimentschicht vollständig erfaßt zu haben. Lediglich TOLA et al. (1984) schreiben der mobilen Sedimentschicht bei sehr stürmischen Bedingungen eine Mächtigkeit von 3 cm bis 8 cm zu.

3.6 Ermittlung der Sedimentvolumina

Zur Berechnung der Sedimentvolumina wurde anhand der Sedimentkerne, Sondierungen und Tauchkartierungen eine Grenzfläche zwischen dem pleistozänen Geschiebemergel und den holozänen Lockersedimenten konstruiert. Durch Vermessungen und Lotungen konnte die Oberfläche der Strand- und Vorstrandsedimente auf einzelnen Profilen erfaßt werden. Diese Profile erstrecken sich vom Strand bis zur Abrasionsfläche in ungefähr 400 m bis 600 m Uferentfernung. Sie wurden entlang des Küstenabschnittes von Geinitz-Ort bis zur Warnow-Mündung in Abständen von 250 m aufgemessen. Zur Berechnung der Volumina wurde die Länge der Profile (küstennormal) mit der Mächtigkeit der Lockersedimente und der Länge des Küstenabschnittes (küstenparallel) in Beziehung gesetzt. Die Veränderungen der Bathymetrie zwischen den Profilen wurde nicht erfaßt und daher für diese Abschnitte generalisiert. Entscheidungsgrundlagen für die Generalisierung waren eigene Echogramme, Vermessungen sowie eine Luftbildserie aus dem Jahre 1994 sowie die Luftbildauswertung von der UVE (1994).

Durchgeführte Arbeiten	1993	1994	1995	1996	1997
Standardbeprobung Mai/Juni	x	x	x		
Standardbeprobung Oktober/Nov.	x	x	x		
1. Tracermessung (halboffene Buhne)	x				
2. Tracermessung (geschl. Buhne)		x			
Sedimentologische Großaufnahme		x			
Sondierungen/Sedimentkerne		x	x		
Ereignisbeprobung			x		
Gesonderte Profile				x	
3. Tracermessunga) Riff, b) geschlossene Buhne				x	
Auswertung	x	х	x	х	x
Abschlußbericht					x (98)

Tab. 1: Arbeitsprogramm im Untersuchungszeitraum

4. Ergebnisse

4.1 Entwicklung der Strand- und Vorstrandmorphologie

Dem Küstenvorfeld bei Warnemünde liegt zwischen Geinitz-Ort und der Warnow-Mündung ein von West nach Ost in seiner Ausdehnung zunehmendes, bis zu 600 m seewärts des Strandes reichendes Sandfeld vor. Es wird seeseitig durch eine Abrasionsfläche begrenzt. Die Vorstrandneigung der Schorre beträgt vor Geinitz-Ort 1:100 und versteilt sich nach Osten auf eine Neigung von 1:70. Innerhalb dieses Küstenabschnittes verlaufen mit west-östlichem Streichen 2 Sandriffe, das innere und das äußere Sandriff. Beide werden durch eine Rinne voneinander getrennt. Das innere Sandriff ist in einigen Küstenabschnitten im Buhnensystem mit dem flachen Vorstrand zu einer Terrasse verschmolzen. Entsprechend der Riffklassifikation von GREENWOOD & DAVISON-ARNOTT (1979) kann das Riffsystem dem Typ "mehrfach küstenparallel" (vgl. Tab. 2) zugeordnet werden. Sowohl der Abstand der Sandriffe zum Ufer als auch ihr Abstand voneinander variiert. Er wird maßgeblich durch die jahreszeitlich unterschiedlichen hydrodynamischen Verhältnisse bestimmt.

Aus Luftbildkartierungen (UVE 1994) ist zu entnehmen, daß sowohl das innere als auch das äußere Sandriff an mehreren Stellen und zwar in den Bereichen der Buhnen 2, 6, 9, 11, 15 und 17 durchbrochen sind. Als Ursache dafür werden Rippströmungen angenommen. Landseitig des inneren Sandriffes schließt sich der flache Vorstrand und ein durchschnittlich 50 m breiter Strand mit einem künstlich aufgeschütteten Dünenwall an.

Grup-	Bezeichnung	Autor	Ausmaße:	Form	Riffan-	Bereiche des	Wellenkli-	Wellentyp	Kommentar	Auftreten im
pe	_		h = Riffhöhe		zahl	Auftretens	ma (Ener-			deutschen
			1 = Rifflänge				gieeintrag)			Küstenbereich
I	<u>Strand</u> riff,	KING&	h = 0,2 - 1,5 m	gerade,	1 - 4	Eulitoral	Gering bis	Brandungszone	Nur im Tidalbe-	Nordsee,
	<u>Strand</u> rinne	WILLIAMS	$1 = 10^{3} m$	küstenparallel			mäßig		reich	Barriereinseln
		(1949)								
п	Strandhörner,	SONU	h = 0,2 - 1,5 m	asymetrisch	1 - 2	Eulitoral	mäßig	Brecher- und	Bildung auf der	Nordsee,
	Sand-	(1968)	$1 = 10^{2} m$	landwärts		Niedrigwas-		Brandungszone	Niedrigwasser-	Barriereinseln
	"wellen"			gebogen		serterrasse			terrasse	
ш	Mehrfach	ZENKO-	h = 0,2 - 0,75 m	gerade bis leicht	4 - 10	Sublitoral	Gering bis	Brecher- und	Beschränkt auf	Ostsee,
	küstenparallel	VITCH	$1 = 10^{3} m$	sinusförmig	und		mäßig	Brandungszone	tidefreie Bereiche	Probstei
		(1967)		gebogen	mehr				Vorstrandneigung	
									< 0,01	
IV	Transversale	NIEDER-	h = 0,2 - 0,75 m	gerade, spitzer	1	Eulitoral	Gering	Brandungs-	Vorstrandneigung	Ostsee,
	Riffe	ODA &	$1 = 10^{2} m$	bis stumpfer		und		und Schwapp-	< 0,01	geschützte
		TANNER		Winkel zur		sublitoral		zone,		Buchten
		(1970)		Küste				Schwallbrecher		
v	"Nearshore"	SHEPARD	h = 0,25 - 3,0 m	gerade bis leicht	1-2	Sublitoral	Mäßig bis	Sturzbrecher	Geringe Stabilität,	Nordsee,
		(1950)	$l = 10^{2} m$	landwärts			hoch		Riffhöhe wesent-	exponierte
				gebogen					lich geringer als	Bereiche
									Wellenhöhe	
VI	"Nearshore"	EVANS	h = 0,25 - 3,0 m	gerade bis	1-4	Sublitoral	Mäßig	Schwallbrecher	Räumliche	Nord- und
		(1940),	$1 = 10^{3} m$	bogenförmig					Ausmaße nehmen	Ostsee
		HOMMA &		landwärts					seewärts zu,	
		SONU				}			Riffhöhe und	
		(1962)							Wellenhöhe	
									ungefähr gleich	

Tab. 2: Rifftypisierung erweitert nach GREENWOOD & DAVIDSON-ARNOTT (1979)

Die Entwicklung der Uferline für den Küstenabschnitt des Buhnensystems zeigt eine Luftbildauswertung (UVE 1994). Von 1983 bis 1992 ist nahezu ausschließlich ein Rückgang der Uferlinie festzustellen. Erst nach der Fertigstellung der Buhnen kommt es zu nachhaltigen Veränderungen. Beinahe über den gesamten, buhnenbeeinflußten Küstenabschnitt verlagert sich die Küstenlinie deutlich seewärts. Im Bereich der Meßbrücke beträgt der Zuwachs der Uferlinie von 1990 bis 1996 ca. 30 m. In dem Zeitraum von 1992 bis 1994 kam es weiterhin zu einer erheblichen Akkumulation in den Buhnenfeldern zwischen Kkm 144,580 und Kkm 144,950 (UVE 1994).

Nach der Errichtung der Meßbrücke (Abb. 5) 1986 wurden über mehrere Jahre Handlotungen entlang dieses Bauwerkes durchgeführt. Daher existieren für das zentrale Buhnenfeld 7-8 umfangreiche bathymetrische Datensätze aus dem Zeitraum vor dem Projektbeginn.

Nach Abschluß der Arbeiten an den Buhnen zeigen sich erste Reaktionen des Sandriffes auf die Baumaßnahmen. Die Dynamik der Riffkammlagen verringerte sich erheblich. Während im Jahre 1991 die Amplitude der Schwankungen des Riffkammes noch maximal 58 m betrug, verringerte sie sich nach der Fertigstellung der Buhnen auf maximal 28 m. Der generelle Trend des strandwärtigen Verlagerns während der ruhigeren Sommermonate und des seewärtigen Hinausschwingens in den energiereicheren Wintermonaten blieb jedoch erhalten.

Auch nach der Abdichtung der halboffenen Buhnen wird der Riffkamm weiter seewärts verlegt (Abb. 10). Diese Veränderung kann jedoch nicht zweifelsfrei nur der Baumaßnahme zugeschrieben werden. Während des Abdichtens der Buhnen beeinflußte ein außergewöhnliches Sturmhochwasser die morphologische Entwicklung entlang der Küste erheblich. Bemerkenswert ist, daß die Kammlage des Sandriffes selbst ein Jahr nach dem Ereignis zum Abschluß der Untersuchungen seine vorherige Lage nicht wieder erreicht hatte. Es verblieb zwischen 30 m bis 40 m weiter seewärts, obwohl das "Hydrologische Jahr" 1996 sowohl eine wesentlich geringere Starkwindhäufigkeit und Beständigkeit der Ereignisse aufweist als auch die mittleren und maximalen Windgeschwindigkeiten im Jahre 1996 geringer sind als in den Jahren 1994 und 1995 (vgl. Bericht Hydrologie).

In dem Küstenabschnitt der offenen Buhnen 2 und 3 verändert sich ebenfalls nach der Beendigung der Baumaßnahme die Lage des Riffkammes. Es weicht am westlichen Ende, entlang der Buhne 1, seewärts aus und pendelt in dem Küstenabschnitt östlich des Buhnenfeldes 3-4 in den Buhnenstrich zurück. Die Beruhigung der Riffkammdynamik ist nach der Fertigstellung des Buhnensystems jedoch nicht so eindeutig, wie in dem zentralen Abschnitt. Die Lage des Riffkammes variiert weiterhin um bis zu maximal 70 m. Eine deutliche Verringerung der Schwankungsbreite läßt sich entgegen aller Erwartung erst nach der Teilzerstörung des Buhnensystems im Jahre 1996 feststellen. Die Position des Sandriffes entspricht danach in etwa der Lage, wie sie zu Beginn der wasserbaulichen Arbeiten im Jahre 1991 vorlag.

BOON (1969) und GREENWOOD & DAVIDSON-ARNOTT (1975) führen die Verlegung eines ufernahen Riffkörpers in die Streichlinie von Buhnensystemen auf die Unterbrechung des Küstenlängstransportes zurück. Sie berücksichtigten bei ihren Arbeiten allerdings nur Buhnensysteme mit geschlossenen Bauwerken. Das deckt sich mit einer ähnlichen Reaktion des
Riffkörpers im Buhnenfeld 7-8, wo nach der Schließung der halboffenen Buhnen ähnliches beobachtet wurde.

Bemerkenswert ist jedoch, daß auch im Küstenabschnitt entlang der geöffneten Buhnen 2 und 3 eine seewärtige Verlagerung des Sandriffes erfolgt. Insbesondere wenn berücksichtigt wird, daß die ersten Buhnen den größten Öffnungsgrad in diesem Buhnensystem haben und damit die höchsten Durchlässigkeiten aufweisen. Außerdem fällt auf, daß im weiteren ostwärtigen Verlauf des Sandriffes der Riffkörper aus dem Buhnenstrich hinaus in den offenen Teilabschnitt der Buhnen einschwenkt. Da der Öffnungsgrad der Buhnen in Richtung des zentralen Abschnittes des Buhnensystems abnimmt und sich die Durchlässigkeit der Buhnen verringert, überrascht diese Entwicklung.

Mit dem Beginn der Baumaßnahme wurde auch die Bathymetrie seewärts des inneren Sandriffes regelmäßig erfaßt. An welcher Position jedoch das äußere Sandriff vor der Errichtung der Buhnen auf dem Vorstrand lag, läßt sich nur anhand der Kartendarstellungen von DIEDERICH et al. (1986) rekonstruieren. Danach befand es sich von West nach Ost seewärts schwenkend ca. 300 m bis 350 m vor der Uferlinie. Diese Angaben können jedoch allenfalls als Richtwerte verstanden werden, da die generalisierten Kartendarstellungen eine feinere Auflösung nicht ermöglichten und als Bezugslinie nur die im ständigen Wandel begriffene Uferlinie zur Verfügung stand.

In der ersten Vermessung in Zusammenhang mit den Buhnenbauarbeiten wurde für den Riffkamm eine Entfernung von 270 m seewärts der Standlinie des StAUN ermittelt. Nach der Fertigstellung des Buhnensystems verschiebt sich der Kamm um bis zu 50 m seewärts. Eine besonders deutliche Verlagerung erfolgte 1994. Da keine meteorologischen Messungen aus dem "Hydrologischen Jahr" 1993 existieren, können über eine Zunahme der Starkwindphasen sowie über eine Veränderung in der Geschwindigkeit und der Beständigkeit der Ereignisse als eine mögliche Ursache für diese Veränderungen keine Angaben gemacht werden.

In den Jahren 1995 bis 1997 ist der Riffkamm äußerst lagestabil. Es treten nur noch geringe Veränderungen von durchschnittlich 10 m auf.

4.2. Volumenberechnungen

Um eine differenzierte Betrachtung der Verteilung der Sedimentvolumina auf dem Vorstrand zu ermöglichen, werden die nachfolgend aufgelisteten Strukturen gesondert berechnet:

- die Berme,
- das innere Sandriff,
- das äußere Sandriffe,
- ein gelegentlich auftretendes Sandriff seewärts der als äußeres Sandriff bezeichneten Struktur. Dieses seewärtigste Riff ist geringmächtig und erstreckt sich immer nur über kurze Distanzen.

Die Ergebnisse der Berechnungen des verfügbaren Sedimentvolumens sind in den Tabellen 3 bis 5 zusammengefaßt. Die Volumina beziehen sich lediglich auf die Kies- und Sandfraktion. Steine, die nicht wesentlich am Transportgeschehen beteiligt sind (ZANKE 1982), sind nicht berücksichtigt. In der Tabelle 3 gibt die Spalte Länge die Länge des Küstenabschnittes (Kkm) an. In der Spalte Breite ist die mittlere Breite der jeweiligen Struktur für die einzelnen Küstenabschnitte abzulesen. Steinige Abschnitte bzw. Bereiche mit Geschiebemergel bilden die Restsedimentflächen auf den einzelnen Profilen. Die vorgenommene Differenzierung des Küstenvorfeldes in mehrere Abschnitte orientiert sich an der Bathymetrie und der Sedimentverteilung (vgl. Kap 4.1). Die Sedimentvolumina lassen sich wie folgt differenzieren:

Berme und inneres Sandriff: Der 1. Küstenabschnitt zwischen Geinitz-Ort und Wilhelmshöhe (Kkm 142,000 - Kkm 143,300) weist eine sehr geringmächtige Sedimentbedeckung auf. In der Brandungszone wurden vorwiegend Geschiebemergel- und Steinflächen kartiert. Vereinzelte Sandinseln auf dem Vorstrand zwischen NN und seewärts der NN-Linie zeigen nur ein auf die gesamte einbezogene Fläche des flachen Vorstrandes geringes Sedimentvolumen von 0,06 m³/m² (vgl. Tab. 3).

Noch geringere Sedimentmengen von 0,03 m³/m² wurden für das innere Sandriff ermittelt. Dieses Riff läßt sich bathymetrisch kaum noch erfassen und ist streckenweise nur anhand der charakteristischen Feinsandstreifen zu ermitteln (vgl. Kap. 4.3). Mit einer mittleren Breite von 25 m und einer Mächtigkeit von wenigen Zentimetern steigt der Kamm dieses Sandriffes von West nach Ost bis vor Wilhelmshöhe auf einige Dezimeter an.

Im Küstenabschnitt zwischen Kkm 143,300 bis Kkm 144,400 nimmt die Sedimentbedeckung (vgl. Kap. 4.3) sowie das Sedimentvolumen der Berme und des inneren Sandriffes nach Osten kontinuierlich zu. Dennoch bleibt die Lockermaterialauflage selbst im Riffkammbereich unterhalb 30 cm Mächtigkeit.

Bemerkenswert ist der starke Anstieg des Sedimentvolumens des inneren Sandriffes an der westlichen Begrenzung des Buhnensystems (3. Küstenabschnitt: Kkm 144,400 bis Kkm 146,000). Auf wenigen hundert Metern wächst der Riffkörper sowohl vertikal als auch horizontal um ein Mehrfaches. So erreicht dieses Sandriff seewärts der ersten Buhnen eine Mächtigkeit von 1,20 m und setzt sich mit einer mittleren Höhe von ca. 1,0 m über dem Anstehenden nach Osten fort.

Ebenso nimmt das Sedimentvolumen auf der Berme von wenigen Dezimetern in den ersten, westlichen Buhnenfeldern bis auf 1,20 m im zentralen Buhnenfeld kontinuierlich zu (KÖSTER et al. 1993). Ein derart sprunghafter Volumenzuwachs wie auf dem inneren Sandriff läßt sich auf der Berme jedoch nicht verzeichnen.

Aus der Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß die zur Unterhaltung der Buhnenfelder auf dem inneren Sandriff akkumulierten Sande westlich des Buhnensystems zwischen Geinitz-Ort und dem 1. Buhnenfeld nur durchschnittlich 11 m³/lfd. m betragen. Dies ist ein sehr geringer Wert. Um diese geringen Sedimentmenge einschätzen zu können, ist ein Vergleich mit anderen Küstenräumen an der Ostseeküste äußerst hilfreich. REIMERS (1993) ermittelte für ein sedimentarmes Gebiet in der Howachter Bucht eine durchschnittliche Menge von 52 m³/lfd. m.

In der Probstei standen 1988 nach einer Strandaufspülung immerhin 120 m³/lfd. m zur Verfügung SCHWARZER (1991). Allein die Strandaufspülung vor Warnemünde im Jahre 1992 stellte mehr als die doppelte Sedimentmenge zur Verfügung (25,3 m³/lfd. m) als der natürliche Sedimenteintrag aus dem küstenparallelen Transport liefern kann.

Äußeres Sandriff: Im Gegensatz zu den Sedimentvolumina der Berme und des inneren Sandriffes unterliegt das äußere Sandriff keinen starken, West-Ost gerichteten Veränderungen. Innerhalb der verschiedenen Küstenabschnitte konnten vergleichbare Sedimentvolumina berechnet werden.

Tab.3: Berechnung der Volumina sandig bis kiesiger Lockersedimente der Berme, des inneren und äußeren Sandriffes sowie des lokal vorhandenen äußersten Sandriffes für einzelne Küstenabschnitte im m³/m² (Bezugsfläche: Berme bis zur Abrasionsfläche in 400 m bzw. 600 m Entfernung)

Volumen 1994/1995 (m³/m²)												
		Berm	e	Inneres Sandriff		Inneres Sandriff Äußeres Sandriff		f Äußerstes Sandriff				
Abschnitt	Länge	Breite	Vol.	Länge	Breite	Vol.	Länge	Breite	Vol.	Länge	Breite	Vol.
Kkm	Km	m	m³/m²	km	m	m³/m²	km	m	m³/m²	km	m	m^3/m^2
142,0-143,3	1,30	50	0,06	1,30	25	0,03	1,30	110	0,80	1,30	70	0,20
143,3-144,4	1,10	60	0,12	1,10	80	0,30	1,10	140	1,00	1,10	30	0,03
144,4-145,2	0,80	80	0,53	0,80	80	0,60	0,80	130	1,00	0,80	10	0,20
Gesamt: Σ	3,20			3,20			3,20			3,20		
Mittelwert:		65	0,25		60	0,30		130	0,90		40	0,10

4.2.1 Veränderungen in den Sedimentvolumina

Anhand von Seevermessungen wurden Höhenveränderungen der Sedimentauflage im Küstenvorfeld für die Jahre 1990 bis 1994 berechnet. Es zeigen sich starke Variationen in der Entwicklung.

Vor der Errichtung des Buhnensystems konnte ein deutlicher Zuwachs des Sedimentvolumens auf der Schorre über nahezu die gesamte Breite des Buhnensystems ermittelt werden. Hier nimmt das Sedimentvolumen von 0,17 m³/m² auf maximale Werte von bis zu 0,51 m³/m² zu.

Während der Arbeiten an dem Buhnensystem kehrt sich dieser Trend im gesamten Küstenabschnitt zwischen Kkm 144,340 bis Kkm 146,050 (westlich Buhne 1 bis östlich Buhne 17) nahezu vollständig um. Auf der Schorre nimmt die Mächtigkeit der Sedimentauflage deutlich ab. Lediglich im zentralen Meßfeld konnten noch Zuwächse im Buhnenfeld gemessen werden. Da zum Zeitpunkt der Messungen die Arbeiten an dem Buhnensystem in den benachbarten Buhnenfeldern stattfanden, ist die positive Volumenentwicklung in dem zentralen Buhnenfeld höchstwarscheinlich auf diese wasserbaulichen Arbeiten zurückzuführen. Es ist anzunehmen, daß die hier durch das Rammen der Buhnenpfähle aufgewirbelten Sande in dem östlich angrenzenden Buhnenfeld 7-8 abgelagert wurden.

Nach der Fertigstellung der Buhnen (1992) ändert sich die Situation dahingehend, daß sich wiederum eine Erhöhung der Sedimentauflage im gesamten Riff-Rinnensystem entlang des verbauten Küstenabschnittes einstellt. Ein besonders deutlicher Volumenzuwachs mit bis zu 0,40 m³/m² tritt zwischen der Uferlinie und dem inneren Sandriff in den Buhnenfeldern auf. Wesentlich geringer sind dagegen die Veränderungen seewärts des inneren Sandriffes bis zu der Abrasionsfläche. Hier variiert das Sedimentvolumen um + 0,15 m³/m². Dieser sehr geringe Wert liegt im Bereich des Höhenfehlers der Seevermessung.²

Die positive Entwicklung des Sedimentvolumens 1992/1993 verändert sich im Jahre 1994. Auf der Schorre stellt sich wieder eine Abnahme der Sedimentmächtigkeit ein. Insbesondere seewärts der Buhnenfelder verringert sich die Sedimentauflage stellenweise um bis zu 0,60 m³/m² (StAUN 1995). Diese negative Entwicklung des Sedimentvolumens bleibt bis zum Abschluß der Untersuchungen erhalten.

In den Jahren 1990, 1992 und 1996 wurden umfangreiche Sandaufschüttungen vorgenommen. Da aus den Jahren vor der anthropogenen Sedimentzufuhr mit Ausnahme entlang der Meßbrücke keine Vermessungen vorgenommen wurden, ist es daher kaum möglich den Anteil des natürlichen onshore gerichteten Sedimenteintrages durch die Buhnen fehlerfrei zu ermitteln. Auch sind die Mengen des Schüttgutes für die Strandsicherung 1990 nicht bekannt. Ebenfalls sind die Daten über die Sedimentmengen zum Aufbau des Strandes 1996 nur als Schätzungen vorhanden. Trotz dieser Einschränkungen zeigt sich deutlich, daß die Schüttmengen wesentlich umfangreicher sind als die zur Verfügung stehende natürliche Sedimentmenge.

Bemerkenswert ist, daß die positive Entwicklung der Sedimentmächtigkeit in den Buhnenfeldern eine besonders auffällige Korrespondenz zu den Zeiten der Sedimentaufschüttungen zeigt. Ebenfalls bemerkenswert ist, daß genau in jenem Küstenabschnitt, in dem auf der Basis von Luftbildaufnahmen 1992 und 1994 die Uferlinie und der flache Vorstrand eine besonders positive Entwicklung zeigten (UVE 1994), im Jahre 1992 eine Strandaufschüttung durchgeführt wurde. Unter Berücksichtigung der Hydrographie wird am Beispiel des Buhnenfeldes 7-8 deutlich, daß ein hoher Sedimenteintrag in das Buhnenfeld hinein, zumeist an eine Ereigniswetterlage mit einem erhöhten Wasserstand gebunden war. Einige Beispiele wurden durch die Sturmereignisse vom 05.12.1991, vom 17.01.1992 und vom 20.01.1992 gegeben. An diesen Tagen wurden Wasserstände von 0,56 m bzw. 0,98 m ü. NN. erreicht. Diese Ereignisse haben einen wesentlichen Anteil an dem Aufbau des ufernahen Vorstrandes. Nach den Stürmen wurde ein deutlicher Sedimenteintrag auf der Schorre gemessen.

² Bei Seevermessungen in der Probstei (AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT KIEL UND DAS LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT SCHLESWIG-HOLSTEIN, LEICHTWEISS-INST. FÜR WASSERBAU DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG & GEOLOGISCH-PALÄONTO-LOGISCHES INST. UND MUSEUM DER UNIVERSITÄT KIEL 1997) trat mit +/- 0,12 m ein Höhenfehler in vergleichbarer Größenordnung auf, jedoch wurde hier mit einem ständigen Eichen der Vermessungsprofile durch fest vermarkte Pflöcke unter Wasser sowie mit einer breiten Überlappungszone (bis zu 100 m) mit der Landvermessung gearbeitet.

Da Sturmhochwässer im allgemeinen eine Verebnung des Küstenprofiles bewirken und zu einem seewärts gerichteten Sedimenttransport führen, können sie als Materiallieferant für die positive Entwicklung des Vorstrandes, des Strandes und des Dünenwalles in Betracht gezogen werden. Bemerkenswert ist, daß der erhöhte Sedimenteintrag in die Buhnenfelder zu keinem späteren Zeitpunkt wieder umfangreich abgebaut wurde. Es ist anzunehmen, daß die Buhnen als strandstabilisierende Stützen fungieren. Der Verbleib der eingetragenen Strand- und Dünensande in das Buhnenfeld und die kontinuierliche seewärtige Verlagerung der Uferline zeigen die positive Wirkung des Buhnensystems auf die Entwicklung der Bathymetrie.

 Tab. 4: Berechnung der Gesamtvolumina (a) und der mittleren Mächtigkeit (b) sandig kiesiger Lockersedimente für die einzelnen Küstenabschnitte (Bezugsfläche: Berme bis zur Abrasionsfläche bis zu 600 m Standlinienentfernung)

Volumen 1994/1995 (m ³); (m ³ /m ²)					
	a	b			
Küstenabschnitt	Σ Sand + Kies	Sand + Kies			
Kkm	m ³	m ³ /m ²			
142.0-143.3	138,000	0.27			
143,3-144,4	189.000	0.36			
144,4-145,2	174.000	0.58			
		• • • • • • • • • • • • • • • • • • •			
Gesamt \sum :	501.000				
Mittelwert:		0,40			

Anmerkung: Zahlenwerte sind gerundet.

Tab. 5: Berechnung der Volumina (m³) sandig - kiesiger Lockersedimente der Berme, des inneren und äußeren Sandriffes sowie der lokal vorhandenen äußersten Sandriffstruktur für die einzelnen Küstenabschnitte (Bezugsfläche: Berme bis zur Abrasionsfläche bis zu 600 m Standlinienentfernung)

Volumen 1994/1995 (m ³) westlich des Buhnensystems						
				·····		
Abschnitt	∑ Berme	$\sum 1.$ Riff	$\sum 2.$ Riff	<u>Σ</u> . 3. Riff	\sum Gesamt	
Kkm	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	
142,0-143,3	4.000	1,000	114.000	19.000	138.000	
143,3-144,4	8.000	26.000	154.000	1.000	189.000	
Σ Gesamt	12.000	27.000	268.000	20.000	327.000	
lfd. m	5.0 (5.0)	11.3 (11)	111.6 (112)	8.3 (8)	136.3 (136)	

Anmerkung: Zahlenwerte gerundet. Klammerwert: auf- bzw abgerundet

Tab. 6: Strand- und Dünenaufschüttungen vor Warnemünde 1990 bis 1996

Strand- u. Dünenaufschüttung (Jahr):	1990* ¹	1992	1996
Küstenraum: von	144,970	144,775	144,650
bis (Kkm):	145,150	145,170	145,650
Buhnenfelder: von bis:	6-7 7-8	4-5 7-8	3-4 13-14
Länge des Küstenstreifens (m):	180	395	1000
Gesamtschüttmenge (m ³)* ² :			35.000
Menge für Randdüne u. Strand (m ³)	7.500	10.000	9.000* ³
Menge /lfd. Meter (m ³):	41,6	25,3	9,0
Körnung des Spülgutes im Ver-	keine		+
hältnis zum Strandmaterial	Angaben	о	о
(feiner= +; gleich = 0 ; gröber= -)			

Anmerkung: $*^1 =$ aus der Zeit der politischen Wende in der DDR bzw. den neuen Bundesländern sind keine Daten über die Sandvorschüttungen mehr vorhanden. Die Angaben basieren auf Aussagen ehemaliger Mitarbeiter und Schätzungen (frdl. mündl. Mitt. von F. GÖRECKE -StAUN).

 $*^2$ = Die Gesamtmenge der Sandaufschüttung bezieht auch Maßnahmen im Hinterland mit ein, z. B. die Aufschüttung einer neuen 2. Dünenreihe 1996.

 $*^3$ = Die Schüttmenge für die Randdüne und den Strand wurde aus der Gesamtschüttmenge nicht separat ausgewiesen. Anhand von Vermessungsdaten wurde eine Schätzung vorgenommen.

4.2.2 Morphologische Entwicklung in den Buhnenfeldern 2-3 und 7-8 (1990 bis 1996)

4.2.2.1 Halboffene Buhnen im Buhnenfeld 7-8

Die Veränderungen in der Bathymetrie des Buhnenfeldes 7-8 über den Zeitraum von 1990 bis 1992 ist eindeutig sowohl auf die Baumaßnahmen als auch auf die Sandvorschüttungen 1990 und 1992 zurückzuführen. In dieser Zeitspanne kam es zu einer starken Erhöhung der Sedimentmächtigkeit des inneren Sandriffes bis zu 1 m. Gleichzeitig verlor der Schüttungskörper auf dem Strand erheblich an Volumen. Auf dem Riffluvhang verringerte sich die Hangneigung von 1:20 auf 1:50. Die Uferlinie wanderte 1992 um ca. 20 m seewärts und blieb bis 1995 nahezu lagestabil. Erst danach bewegte sich die Uferlinie erneut um 5 m bis maximal 10 m weiter seewärts.

Von 1992 bis 1993 hat sich das Riff-Rinnen-System derart verändert, daß die strandnahe Rinne landseitig des inneren Sandriffes soweit mit Sedimenten aufgefüllt war, daß sich auf dem flachen Vorstrand eine Terrasse ausgebildet hat. Seitdem tritt das innere Sandriff in diesem Küstenabschnitt nicht mehr als eine eigenständige morphologische Form in Erscheinung (vgl. Abb. 11).

Ein Blick über das zentrale Buhnenfeld hinaus zeigt jedoch eine unterschiedliche Entwicklung der Bathymetrie in diesem Küstenabschnitt. In dem Buhnenfeld 6-7 hat sich keine Terrasse ausgebildet. Hier wird das Unterwasserrelief weiterhin durch die Riff-Rinnenstruktur bestimmt. Demgegenüber liegt im Buhnenfeld 8-9 wie auch in dem zentralen Buhnenfeld ebenfalls eine

Terrassenmorphologie vor. Diese unterschiedliche Entwicklung der Bathymetrie in den Buhnenfeldern kann nicht mit Unterschieden in der Buhnenkonstruktion begründet werden, da sie in diesem Küstenabschnitt nahezu identisch sind. Eine zufriedenstellende Erklärung für die unterschiedliche Entwicklung kann auf der Basis der vorliegenden Daten nicht gegeben werden.

Von 1994 bis 1995 traten keine gravierenden Veränderungen mehr in der Entwicklung der Bathymetrie auf. Es ist anzunehmen, daß sich die Bathymetrie in den Buhnenfeldern nach 1993 stabilisiert hat. Seewärts der Buhnenköpfe sind jedoch deutliche Veränderungen zu verzeichnen. Hier wurden die Luvhangsedimente des inneren Sandriffes stark erodiert und die Vorstrandneigung verstärkt.

Im Dezember 1995 waren die Baumaßnahmen zum Abdichten der Buhnen abgeschlossen. Das außergewöhnliche Sturmhochwasser im November 1995 (SCHWARZER et al. 1995) hatte sehr viel Strand- und Dünensande mobilisiert und überwiegend auf dem trockenen Strand abgelagert. Die Eisbildung auf dem flachen Strand und Vorstrand im Februar 1996 konservierte das erodierte Material vor den Auswirkungen der Starkwindereignisse im Frühjahr. Daher traten auch die Veränderungen in der Bathymetrie des Vorstrandes erst im Mai und Juni 1996 nach mehreren Starkwindereignissen auf. Beispielhaft sei hier das Ereignis vom 09.05.1996 mit einer maximalen Windgeschwindigkeit von 14,5 m/s aus Nordosten, einer Wellenhöhe (H_{max}; Station: 153 m) von 1,85 m und einem Wasserstand von 0,5 m ü. NN angeführt. Die Strandsande von dem trockenen Strand konnten in das Buhnenfeld gespült und über das gesamte Küstenquerprofil transportiert werden. Diese Sande erhöhen über das gesamte Profil vom Strand bis zum Luvhang des inneren Sandriffes die Sedimentmächtigkeit.

Erst nach den Ereignisswetterlagen in den Monaten 5/96 und 6/96 zeigten sich erste Reaktionen auf die durch den Umbau von halboffenen zu geschlossenen Buhnen veränderten Rahmenbedingungen. Der seewärtige Bereich der Terrasse wurde abgesenkt und der Luvhang des inneren Sandriffes seewärts der Buhnenstreichlinie verschoben. Der Küstenlängstransport erfolgt daher außerhalb des Buhnenfeldes (vgl. Kap. 4.4). Die Veränderungen in der Bathymetrie, die letztendlich zur Auflösung der Terrassenform und zur Bildung eines Riff-Rinnensystems führten, hielten bis zum Ende der Arbeiten im Frühjahr 1997 an.

Mit der Änderung der Bathymetrie nimmt im Küstenabschnitt zwischen 50 m und 90 m, dem ehemals halboffenen Buhnenabschnitt, die Sedimentmächtigkeit stark ab. Es wird ein Höhenniveau der Sedimentoberfläche erreicht, wie es vor dem Bau der Buhnen 1990/1991 vorlag. Trotz dieser Entwicklung im seewärtigen Abschnitt des Buhnenfeldes hat sich die Uferlinie noch geringfügig seewärts verschoben. Als Ursache für die sich weiterhin seewärts verlagernde Uferlinie ist ein anhaltender landseitiger Sedimenteintrag durch Starkwindereignisse (09.05.1996 u. 27.06.1996) verbunden mit Wasserstandserhöhungen zwischen 0,20 m bis 0,50 m anzunehmen. Aufgrund des frisch aufgeschütteten Dünenschutzwalles und des Strandes, die nach dem Sturmhochwasser vom November 1995 stark beschädigt waren, ist hierfür genügend Material vorhanden.

Aufgrund der Anpassung der Bathymetrie auf die neuen Randbedingungen versteilt sich das Küstennormalprofil durch die gegenläufigen Entwicklungen auf dem Vorstrand. Sie zeigt sich in der Tieferlegung der Sedimentoberfläche und der seewärtigen Verlagerung der Uferline. Der Vorstrand weist aufgrund der Steilheit nun eine in Bezug auf die Energiedissipation wesentlich ungünstigere Profilform auf als vor dem Abdichten der Buhnen.

Vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf die Entwicklung der Bathymetrie erhielt AHRBERG (1995) in einem Buhnensystem (Steinbuhnen) vor der dänischen Küste. Durch die erosive Versteilung des ufernahen Unterwasserbereiches bei einer größtenteils lagestabilen Uferlinie wurde dort allerdings aufgrund der Destabilisierung der Küstenlinie die positive Wirkung des Buhnenfeldes für den Schutz der Küste in Frage gestellt.

Eine weitere Reaktion auf die Schließung des Bauwerkes konnte im Buhnenfeld 8-9 beobachtet werden. Hier zeigen sich typische Lee-Erosionserscheinungen. Die Uferlinie weicht dort stark zurück. Die Veränderungen in dem Buhnenfeld 8-9 deuten auf einen Mangel an Sanden hin. Es ist anzunehmen, daß durch die seewärtige Verlagerung des inneren Sandriffes nach der Schließung des Buhnenfeldes nicht mehr genügend Sediment aus dem nun weiter seewärts verlaufenden Längstransport in das Buhnenfeld hineingelangt.

4.2.2.2 Offene Buhnen im Feld 2-3

Nach dem Ende der Baumaßnahme verstärkte sich in dem Buhnenfeld 2-3 das Riff-Rinnensystem. Während sich die strandnahe Rinne vertiefte, wanderte der Riffkörper unter Zunahme der Sedimentmächtigkeit um bis zu 0,50 m im Luvhangbereich seewärts. Bereits 1993 hat sich die Bathymetrie auf die durch den Buhnenbau veränderten Randbedingungen weitgehend eingestellt.

Die Variationen der Sedimentmächtigkeit in dem Buhnenfeld, die sich im allgemeinen auf die Lageveränderungen des Sandriffes zurückführen lassen, sind generell größer als im zentralen Buhnenfeld 7-8. Deutliche Akkumulationen treten allerdings nur unmittelbar entlang der Schwapplinie auf. Hier verschiebt sich von 1992 bis 1995 die Uferlinie um bis zu 25 m seewärts. Gleichzeitig erfolgt eine starke Erhöhung des trockenen Strandes um bis zu 1 m. Die Entwicklung der Uferlinie und des Strandes kommt nach der weitgehenden Zerstörung der Buhnen im Frühjahr 1996 zum Stillstand. In dem Buhnenfeld 2-3 konnte im Gegensatz zu dem Buhnenfeld 7-8 zu keinem Zeitpunkt die Ausbildung einer Terrasse beobachtet werden.

Von besonderem Interesse ist die Herkunft der Sande, die zu einer Verschiebung der Uferlinie und der Erhöhung des Strandes führen. Da die Entwicklung mit der Zerstörung des Buhnenfeldes endet, wird ein Sedimenteintrag von See angenommen. Die zeitweise sehr starke Erhöhung des Strandes läßt jedoch auch einen Sedimenteintrag von dem sich landseitig an den Strand anschließenden aktiven Kliff erwarten. Um dies zu klären, wurde sowohl die Kliffentwicklung einbezogen als auch die Veränderungen der Sedimentmächtigkeit auf einem 140 m westlich des Buhnensystems gelegenen, bathymetrischen Profil betrachtet. Hier befinden sich keine Buhnen.

Die Annahme, daß Materiallieferungen in einer nennenswerten Menge von dem Kliffhang erfolgten, konnte anhand des Kliffrückganges nicht bestätigt werden. Dennoch deuten die Materialanhäufungen am Kliffuß an, daß es einen geringfügigen, landseitigen Sedimenteintrag gibt. Wesentlich deutlicher ist der Zusammenhang zwischen dem zurückweichenden Kliffhang und der Entwicklung des Strandes in dem Küstenabschnitt ohne Buhnen. Hier erfolgte über den Zeitraum von 1990 bis 1995 gleichfalls eine, wenn auch wesentlich geringere, seewärtige Verschiebung der Uferlinie um bis zu 5 m sowie eine Erhöhung des trockenen Strandes um ca. 0,30 m. Das Steilufer hat sich über den gleichen Zeitraum um maximal 5 m zurückverlegt. Die Entwicklung der Morphologie ist daher hier möglicherweise auf Materiallieferungen von dem Kliffhang zurückzuführen.

Bisher ist ungeklärt, inwieweit Strandaufschüttungen in den benachbarten Küstenabschnitten einen Einfluß auf die Entwicklung der Bathymetrie in dem offenen Buhnenfeld ausüben. Bei starken östlichen bis nordöstlichen Winden und einem nach Westen gerichteten Küstenlängstransport (KÖSTER et al. 1993; StAUN 1995) ist nicht auszuschließen, daß die geschütteten Sande die natürliche Entwicklung der Bathymetrie beeinflussen.

4.3 Sedimentologie

4.3.1 Sedimentbeschaffenheit verschiedener morphologischer Einheiten (Seegebiet)

Die Verteilung der Sedimente orientiert sich in küstennormaler Richtung vornehmlich an den morphologischen Strukturen. Die dominierenden Elemente der Vorstrandmorphologie sind die Sandriffe. Sie heben sich durch ihren sehr hohen Feinsandgehalt (Gew.-%-Anteil < 0,200 mm) von den umgebenden Rinnensedimenten ab. Die Riffkammsedimente bestehen mit 60 - 80 Gew.-%-Anteil überwiegend aus Feinsanden; die Luvhangsedimente weisen teilweise Anteile von > 80 Gew.-% der Fraktion < 0,200 mm auf (vgl. Abb. 12).

Zum Zeitpunkt der Kartierung verliefen die Sandriffkämme mit einer geringen Schwankungsbreite zwischen 100 m bzw. 300 m Uferentfernung in -1 m bis -3 m NN (Abb. 13). In dem Küstenabschnitt mit der größeren Neigung des Vorstrandes (1:70) unmittelbar an der Warnow-Mündung schwenkt das äußere Sandriff in Richtung Strand ein. Hier liegt seeseitig dieses Sandriffes ein weiteres Sandriff entlang der 5 m bis 6 m Isobathe, dessen sehr feinsandige Luvhangsedimente sich bis zur Abrasionsfläche verfolgen lassen. Diese beginnt im Küstenabschnitt zwischen dem Hotel Neptun und der Hafenmole 1,1 km seeseitig der Uferlinie.

Die zwischen den Sandriffen liegenden Rinnensedimente zeichnen sich durch ein sehr heterogenes Korngrößenspektrum aus. Es besteht vorwiegend aus groben Mittelsanden, Grobsanden, Kiesen und Steinen. Die flächenhafte Verteilung der groben Komponenten in den Rinnensedimenten variiert. Lokal konnten Steinfelder erfaßt werden, in denen Steine mit einem Durchmesser von bis zu 30 cm gefunden wurden.

Die Sedimentverteilung auf dem Vorstrand ist in der Abbildung 12 dargestellt. Der Bereich zwischen Geinitz-Ort und der Warnow-Mündung läßt sich von West nach Ost in die im Kapitel 3.1 bereits aufgeführten Küstenabschnitte differenzieren (vgl. Abb. 12):

 Zwischen Geinitz-Ort (Kkm 142.000) und Kkm 143.300 besteht ein Mangel an Feinsanden. Auf dem Vorstrand dominieren Mittelsande, Grobsande, Steine und Kiese. In der Höhe von Geinitz-Ort wurden vorwiegend sehr "schlecht" sortierte, grobsandige und kiesige Sedimente kartiert. In der Brandungszone und auf dem flachen Vorstrand befindet sich zwischen der 1 m und 3 m Isobathe überwiegend freiliegender Geschiebemergel, teilweise nur geringfügig von Steinen bzw. Sanden bedeckt.

Das innere Sandriff ist stellenweise sowohl bathymetrisch als auch mit Hilfe der Luftbildanalyse (UVE 1994) nicht mehr zu erfassen. Es läßt sich jedoch der charakteristische Feinsandstreifen mit variierender Breite in 50 m bis 150 m Entfernung vom Strand (fast) durchgehend kartieren.

Jüngste Luftbildauswertungen (UVE 1994) zeigen eine generelle Rückverlegung der Uferlinie. Die Größenordnung einer langfristigen Rückverlegung für diesen Küstenabschnitt (1907 -1947) läßt sich aus den Daten von KÖSTER (1952) ermitteln und beträgt für den 40 jährigen Zeitraum 6 m bis 6,5 m bzw. 0,16 m im Jahresdurchschnitt (mit Ausnahme von Geinitz-Ort). Der Uferrückgang der Stoltera wird von ZANDER (1934) mit durchschnittlich 0,31 m/a und von KÖSTER (1952) mit 0,21 m/a angegeben, wobei in Teilabschnitten zwischen Kkm 142,000 und Kkm 143,300 sogar Rückgangsraten von bis zu 0,63 m/a ermittelt wurden (KÖSTER 1952). Die Küstenteilabschnitte mit besonders hohen Abbruchsraten zeigen im Vergleich zu den benachbarten Abschnitten größere sandige Bereiche auf dem Vorstrand. Hier ist insbesondere das äußere Sandriff wesentlich breiter ausgebildet.

- 2. Westlich der Begrenzung der Buhnenfelder zwischen Kkm 143,300 und Kkm 144,400 verringert sich die horizontale Ausdehnung der Steinfelder und der Geschiebemergelflächen. Die Riffe sind schmal und haben steile Luv- und Leehänge. Sie verlaufen engräumig und werden von grobsandigen bis kiesigen Rinnen mit Steinen begrenzt. Auch in diesem Küstenabschnitt unterliegt die Uferlinie einer generellen Rückverlegung (UVE 1994). Sie ist jedoch sehr gering und wird von KÖSTER (1952) mit 0,05 m/a angegeben.
- 3. Die Sedimentbedeckung nimmt im Küstenabschnitt zwischen Kkm 144,400 Kkm 146,000 von West nach Ost zu. Geschiebemergelflächen und größere Steinfelder lassen sich hier weder in der Brandungszone noch in den Rinnen zwischen den Riffen erfassen. In diesem Küstenabschnitt ist der Einfluß des Buhnensystems auf die Sedimente des Vorstrandes deutlich zu erkennen. Die Sedimentbänder, insbesondere die der feinsandigen Luvhangsedimente, werden auffallend breiter und dehnen sich seewärts aus. Diese Entwicklung setzt an der westlichen Begrenzung des Buhnensystems unvermittelt ein und läßt sich nach Osten weiterverfolgen.

Die Verteilung der Sedimente ist jedoch innerhalb dieses Küstenabschnittes nicht einheitlich. Im Bereich der Buhnen 1 bis 9 werden Feinsande (< 0,200 mm) in einer größeren horizontalen Ausdehnung und mit einem bis zu 30 Gew.-% höheren Anteil an den Oberflächensedimenten auf dem Vorstrand angetroffen als in dem Küstenabschnitt der Buhnen B11 bis B16. Die Grenze entspricht in etwa der Lage der Schnittstelle zwischen dem Stauchmoränenkomplex im Westen der Stoltera und der pleistozänen Depression östlich des Stoltera-Kliffes (MIEHLKE et al. (1982). Aus Luftbildern aus den Jahren 1992 und 1994 wird die Entwicklung der Bathymetrie in den Buhnenfeldern von der UVE (1994) bestimmt. Anhand der morphologischen Veränderungen wird insbesondere für den Küstenabschnitt um die Buhnenfelder 4-5 und 5-6 eine stark nach Osten gerichtete Akkumulation prognostiziert. Allerdings muß berücksichtigt werden, daß genau in diesem Küstenabschnitt 1992 eine umfangreiche Strand- und Dünenaufspülung stattgefunden hat (vgl. Kap.4.2.1; Tab. 6).

4. Östlich des Buhnensystems bei Kkm 146,000 bis zur Hafenmole an der Warnow-Mündung dominieren auf großen Flächen die sehr feinsandigen Luvhangsedimente der Sandriffe, die sich bis - 9 m NN ausdehnen. Die Sedimente bestehen größtenteils aus Korngrößenfraktionen < 0,200 mm (maximal 99 Gew.-%) und dokumentieren den Einfluß der Hafenmole auf die Sedimentation. Hier zeigt die Entwicklung der Uferlinie über einen Zeitraum von 11 Jahren (seit 1983) eine seewärtige Verschiebung insbesondere im näheren Umfeld der Mole an der Warnow-Mündung.</p>

4.3.2 Sedimentbeschaffenheit morphologischer Einheiten auf dem Vorstrand im Buhnenfeld 7-8

Aus dem zentralen Meßfeld, dem Buhnenfeld 7-8, liegen sedimentologische Daten von MIEHLKE et al. (1982), WEHNER (1991) und KÖSTER et al. (1993) aus der Zeit vor dem Beginn dieser Untersuchungen vor. Die Darstellungen aus dem Jahre 1982 lieferten auf Grund eines sehr groben Rasters nur vage Vorstellungen von der Sedimentverteilung auf dem Vorstrand. Daher wurden für die Auswertung die jüngeren Messungen bevorzugt.

Es war zu erwarten, daß gleich der morphologischen Umgestaltung des Küstenraumes (vgl. Kap. 4.2.2) auch die Veränderungen in den Vorstrandsedimenten sehr bald nach dem Bau der Buhnen als Reaktion auf die veränderte Hydrodynamik einsetzen würden. Daher wurde auf die für Teilabschnitte des Vorstrandes vorliegenden Daten von WEHNER (1991) zurückgegriffen. Leider ist das Probenpunktnetz unregelmäßig angelegt, so daß diese Daten nur eingeschränkt für den unmittelbaren Strandbereich verwendbar sind. Als weitere Ausgangswerte zur Bemessung der buhnenbedingten Veränderungen des Oberflächensedimentes erwiesen sich Daten und Kartierungen von KÖSTER et al. (1993) als hilfreich. Sie sind für den Untersuchungsraum flächendeckend vorhanden. Trotz dieser Untersuchungen liegen leider keine detaillierten sedimentologischen Daten aus der Zeit vor dem Buhnenbau vor.

BRESSAU & SCHMIDT (1977), KÖSTER (1979a) und SCHWARZER (1989a, 1989b) schreiben dem Feinsand (Gew.-% Anteil < 0,200 mm) einen wesentlichen Anteil am Aufbau der Riffzone zu. Er wird vornehmlich am Luvhang des Riffes bis hin zur Abrasionsfläche angereichert (KÖSTER, 1979a). In der flächenhaften Darstellung der Feinsandanteile des Gesamtsedimentes (Abb. 12) lassen sich die Riffkörper, die Rinnen und die lokalen Depressionen sowie die Abrasionsfläche sedimentologisch klar differenzieren. Damit zeichnet die Feinsandverteilung in groben Zügen die Morphologie nach.

Die Sande vom inneren und äußeren Sandriff heben sich mit einem Anteil von über 80 Gew.-% Feinsand am Gesamtsediment deutlich von dem umgebenden Sediment ab. Die höchsten Feinsandgehalte befinden sich dabei jeweils auf den Luvhängen. Ein weiteres kleines Riff in dem offenen Abschnitt der halboffenen Buhnen im Buhnenfeld 7-8 weist mit durchschnittlich 60 -70 Gew.-% die geringsten Feinsandgehalte auf.

Die Sandriffe lassen sich weiterhin untereinander durch ihre unterschiedlichen prozentualen Feinsandanteile noch weiter unterscheiden. Der Gew.-%-Anteil der Fraktion < 0,200mm beträgt auf dem inneren Sandriff durchschnittlich 80 Gew.-%. Im Bereich der Meßbrücke kommt es zu einem lokalen Maximum mit 95 Gew.-%. Das äußere Sandriff hat demgegenüber großflächig einen Feinsandgehalt von 90 Gew.-%. In einigen Bereichen des Riffes steigt er sogar auf 99 Gew.-% an. Diese Abfolge der sowohl landwärts als auch mit abnehmender Tiefe gröber werdenden Riffsande bei Riffstaffeln haben KÖSTER (1979), KACHHOLZ (1982) und SCHWARZER (1989) für große Bereiche im östlichen Raum der Probstei, sowie MIEHLKE et al. (1982) für Teile des Küstenvorfeldes vor Warnemünde festgestellt.

In den Kammlagen der Sandriffe und entlang der Schwappzone auf dem Strandhang tritt gegenüber dem Feinsand der feine Mittelsand mit einem hohen Prozentsatz am Gesamtsediment auf. Nach Untersuchungen aus der Probstei spiegelt das überwiegend auf dem Rifftop anzutreffende Sediment die Zonen höchster Energiebelastung durch die einlaufenden und brechenden Wellen wider (KACHHOLZ 1982, SCHWARZER 1989). Auch die Leehänge der Riffe und Rinnen weisen einen hohen Anteil (bis zu 70 Gew.-%) an feinen Mittelsanden am Gesamtsediment auf. Grobe Mittelsande, Grobsande, Kiese und Steine sind überwiegend in den Rinnen anzutreffen. Auf der Abrasionsfläche erreichen die Korngrößenfraktionen > 0,350 mm die höchsten Gew.-%-Anteile in den Oberflächensedimenten.

4.3.3 Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung im Buhneneld 7-8 mit halboffenen Buhnen

Besonders deutlich läßt sich die Entwicklung der Sedimente im zentralen Buhnenfeld anhand der Veränderung des Gew.-% Anteiles < 0,200 mm nachzeichnen (vgl. Tab. 7a). Von 5/92 bis 10/92 steigt der Feinsandgehalt im offengeschlagenen Abschnitt des Buhnenfeldes und auf dem inneren Sandriff um 20 - 40 Gew.-% an. Bereits in 5/93 wird mit einer Zunahme von bis zu 80 Gew.-% der Höchstwert erreicht. Gleichzeitig verlagert sich der Schwerpunkt der Feinsandablagerungen aus dem offengeschlagenen Teilbereich des halboffenen Buhnenfeldes hinaus auf den Luvhang des inneren Sandriffs.

In den überwiegend mittelsandigen Rinnensedimenten an dem Übergangsbereich zwischen dem offenen Teilabschnitt und dem geschlossenen Bereich zeigt sich eine deutliche Zunahme der feinen Mittelsande mit bis zu 50 Gew.%. Höchste Veränderungen erfolgen zwischen 10/92 und 5/93. In diesem Zeitraum löste sich auf dem flachen Vorstrand die strandnahe Rinne auf. Gleichzeitig bildet sich im Buhnenfeld von dem inneren Sandriff bis zum trockenen Strand ein nahezu durchgehender Hang (Terrasse) aus. Die Feinsandanreicherungen im Buhnenfeld und die Zunahme und Verfüllung der strandnahen Rinne mit feinen Mittelsanden deuten auf eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen im gesamten Buhnenfeld hin.

Mit dem Ende der Terrassenbildung erfolgen ab 10/93 über weite Bereiche keine größeren Variationen (> 20 Gew.-%) in den feinsandigen und mittelsandigen Korngrößenbändern. Nur die mittel- bis grobsandigen Sedimenten der Schwappzone verschieben sich mit der seewärtigen Verlagerung zur Uferlinie. Die Entwicklung der Sedimente zeigt die Abbildung 14.

Die Veränderungen in den Oberflächensedimenten des Buhnenfeldes waren nicht einheitlich. Die klare Grenzziehung zwischen den feinsanddominierten Sedimenten in dem offenen Buhnenabschnitt und der deutlichen Anreicherung an feinen Mittelsanden im geschlossenen Abschnitt des Buhnenfeldes besteht nur im unmittelbaren Umfeld der Bauwerke. Die Bindung der Sedimentbänder an die Konstruktionsmerkmale der Bauwerke nimmt mit der Entfernung von den Buhnenkörpern zur Mitte des Buhnernfeldes hin ab.

Die in den Jahren 1994 und 1995 auftretenden Variationen im Sedimentverteilungsmuster sind überwiegend auf die jahreszeitlich unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen einschließlich von Einzelereignissen, wie z. B. das Sturmhochwasser im November 1995, zurückzuführen.

Ein Beispiel für jahreszeitliche Variationen in der Sedimentverteilung geben die Abbildung 14 und die Tabellen 7a . Von besonderem Interesse ist der Vergleich der Sedimente zwischen den verschieden konstruierten Buhnensegmenten. In dem offenen Bereich zeigen sich in den feinsanddominierten Vorstrandsedimenten zwischen 5/94 und 10/94 nur geringe Schwankungen (vgl. Tab. 8). Demgegenüber sind die Sedimente in dem geschlossenen Teilbereich des Buhnenfeldes im Frühjahr wesentlich gröber als im Herbst. (5/94: Mom.-Mittl.: 0,23 mm - 0,40 mm, "sehr gute" Sortierung: bis 0,26 Phi^o; 10/94: Mom.-Mitt.: 0,20 mm - 0,23 mm, ; "gute bis mäßig gute" Sortierung: bis 0,61 Phi^o).





Tab. 7a:Veränderung der Sedimentzusammensetzung (Fraktion < 0,200 mm) an verschie-
denen Punkten im Buhnenfeld 7-8 über den gesamten Untersuchungszeitraum





Tab. 7b:Veränderung der Sedimentzusammensetzung (Fraktion < 0,200 mm) an verschie-
denen Punkten im Buhnenfeld 2-3 über den gesamten Untersuchungszeitraum

	offener Bul	nnenbereich	geschlossener	Buhnenbereich
	5/94 10/94		5/94	10/94
Momenten-Mittelwert (mm)	0,17 - 0,18	0,13 - 0,18	0,23 - 0,40	0,20 - 0,23
Momenten- Sortierung (PHI°)	0,25	0,27	0,26	0,61

Tab. 8: Zeitlich-räumliche Entwicklung von Momenten-Mittelwert und Sortierung in unterschiedlichen Bauwerksbereichen

Hier macht sich der höhere Energieeintrag durch ein häufigeres Auftreten von Starkwindereignissen im Winterhalbjahr bemerkbar. Da für die offenen bzw. geschlossenen Buhnenabschnitte die gleichen hydrodynamischen Randbedingungen gelten, zeigt sich, daß die geringeren Variationen in der Sedimentverteilung im offenkonstruierten Buhnenabschnitt auf geringere Turbulenzen als in dem geschlossenen Abschnitt zurückzuführen sind.

Sedimentverteilung beidseitig einer halboffenen Buhne

In dem Kapitel 2.4 wurde bereits auf das besondere Konstruktionsmerkmal der halboffenen Buhne hingewiesen. Aus den Untersuchungen von KOLP (1970) geht hervor, daß offene Pfahlbuhnen mit einer Durchlässigkeit von 37 % die Durchströmungsgeschwingigkeit um 50 % reduzieren. Die offenen Abschnitte der halboffenen Buhnen 7 und 8 weisen eine durchschnittliche Durchlässigkeit von 50 % (40 % bis 60 %) auf. Daher sind hier ähnliche bzw. geringfügig höhere Durchströmungsgeschwindigkeiten anzunehmen. Die Verringerung der Küstenlängsströmung läßt auf Grund der nachlassenden Schleppkraft die Ablagerung des transportierten Materials erwarten.

Die Auswirkung der Buhne auf den Sedimenttransport soll anhand eines Vergleichs zwischen einem Luv- und einem Leeprofil am Beispiel der Sedimentaufnahme von 5/94 aufgezeigt werden. Wie bereits ausgeführt, hat sich seit 10/93 ein stabiler Zustand bezüglich der Veränderung in der Sedimentverteilung als Reaktion auf den Buhnenbau ausgebildet. Die auftretenden Änderungen in dem Sedimentmuster sind daher überwiegend den meteorologischen (Windrichtung: NE; V_{Max} = 11,5m/s; V_m = 11,0 m/s) und hydrologischen Randbedingungen zu zuordnen.

Aufgrund einer nicht auszuschließenden Störung des Sedimenttransportes durch die Meßbrükke in dem östlichen Abschnitt des Buhnenfeldes wurden nur die Sedimentprofile entlang der Buhne 7 ausgewählt (Profil: 6/80 und 7/2,5). Den Einfluß, den die Meßbrücke auf die Entwicklung der Sedimentoberfläche in dem Buhnenfeld 7-8 ausübt, wird generell nicht berücksichtigt. Das bedeutet jedoch nicht, daß keine Wirkung der Meßbrücke auf die Sedimentverteilung vorhanden oder vernachlässigbar wäre, sondern nur, daß die Auswirkungen dieses Bauwerkes nicht bekannt sind, da es bereits 1986, 4 Jahre vor dem Bau der Buhnen, errichtet wurde.

Die Veränderung der Sedimente entlang des Bauwerkes ist unterschiedlich. Im offenen Teilabschnitt der Buhne kommt es durch die Verlangsamung der küstenparallelen Strömung und aufgrund der Reduzierung von Turbulenzen (StAUN 1995) in Luv des Bauwerkes zu geringfügigen Veränderungen in den Fraktionen der Feinsande und feinen Mittelsande (10 bis 15 Gew.-%). Nach Messungen von ORME et al. (1980) sind entlang einer geschlossenen Buhne in Luv des Bauwerkes erheblich feinere Sedimente zu erwarten als in Lee der Buhne. Eine deutliche Luv- oder Leewirkung des Bauwerkes läßt sich jedoch aus der Sedimentverteilung entlang des offenen Buhnenkörpers nicht ableiten. Anhand der Gleichförmigkeit der Sedimentverteilungsmuster beidseitig der Buhne ist ein ausgiebiger Materialaustausch durch den geöffneten Abschnitt des Bauwerkes hindurch anzunehmen.

Ein anderes Bild zeigt die Sedimentverteilung entlang des geschlossenen Abschnittes der Buhne 7. Erwartungsgemäß befindet sich auf der Luvseite der Buhne erheblich feineres Sediment als auf der Leeseite (vgl. Abb. 16). Dort kommen im Buhnenzwickel vorwiegend feine Mittelsande zur Ablagerung (bis zu 20 Gew.-%). Hier sind deutlich höhere Turbulenzen und Wirbelbildungen (Leewalzen) anzunehmen, die zur Ausbildung des gröberen Sedimentes im Leebereich führen (ORME et al. 1980).

Die Richtung der Leewirkung hängt allerdings entscheidend von den meteorologischen und hydrographischen Verhältnissen auf dem Küstenvorfeld ab. Sie wechselt mit der Angriffsrichtung der Wellen. Im Oktober 1994 tritt bei nordwestlichen Winden ($V_{max} = 7,7$ m/s; $V_m = 6,6$ m/s) die Leewirkung auf der anderen Seite der Buhne 7 auf als bei nordöstlichen Winden im Mai 1994 (vgl. Abb. 17).

Veränderungen durch die zerstörte Buhne 8

Im Oktober 1994 wurde die halboffene Buhne 8 durch den Fraß der Bohrmuschel *teredo navalis* teilweise zerstört. Die Demontage erfaßte den gesamten offen konstruierten Buhnenabschnitt und nur einen geringen Teil des geschlossenen Buhnenkörpers. Durch das Fehlen der Pfähle war eine Einschränkung der Buhnenwirkung anzunehmen (vgl. Kap. 2.3) und eine Änderung in der Verteilung der Vorstrandsedimente zu erwarten. Tauchbeobachtungen zeigten jedoch, daß die Pfähle nicht bis auf den Grund zerstört wurden, sondern auf einem nahezu einheitlichen Höhenniveau von ca. 1 m unterhalb der Wasseroberfläche brachen. Die Buhnenfragmente ragten bis zu 1,5 m (am Buhnenkopf) über die Sedimentoberfläche hinaus.

Die Sedimentverteilungen beidseitig der Buhne von 1994 bis 1995 (Profile 7/2,5; 8/10; Abb. 18) zeigen, daß keine Veränderungen in der Korngrößenhäufigkeitsverteilung auftraten, die eindeutig auf die Teilzerstörung der Buhne und die zu erwartende veränderte Hydrodynamik zurückzuführen sind. Die Rudimente der Buhne wirken als "getauchtes Bauwerk" und nehmen weiterhin Einfluß auf die Sedimentverteilung im Buhnenfeld. Auf den Küstenlängstransport wirken sie wie ein offen konstruiertes Bauwerk mit einem unbekannten Öffnungsgrad. Diese Annahmen werden durch die geringe Morphodynamik vom inneren Sandriff und der Uferlinie, die hier auch nach der Zerstörung des Bauwerkes keine signifikanten Unterschiede zu den normalen jahreszeitlichen Variationen des vorangegangenen Jahres 1993 zeigen, gestützt.

Veränderungen der Sedimentzusammensetzung mit geschlossenen Buhnen

Die Einordnung der Veränderungen in den Oberflächensedimenten nach dem Umbau des Buhnenfeldes 7-8 (halboffene Buhnen) zu einem geschlossenem Buhnenfeld wird dadurch erschwert, daß sich die umgebenden Rahmenbedingungen nachhaltig geändert haben. Das Sturmhochwasser von 4.11.1995 hat die Sedimentverteilung auf dem Vorstrand dahingehend stark beeinflußt, daß sich Feinsande im landseitigen Teilabschnitt des Buhnenfeldes zwischen Strand und 60 m seewärts, insbesondere im Zentrum des Feldes, ablagerten (Zunahme: bis zu 70 Gew.-%). Sowohl Vermessungsergebnisse als auch die Ablagerung extrem feiner Sedimente (Mom.-Mitt.: 0,11 - 0,12 mm) im Strand- und Vorstrandbereich deuten darauf hin, daß die Feinsandakkumulationen höchstwarscheinlich aus dem durch das o. a. Hochwasser verursachten Dünenabtrag stammen. Da diese Feinsandanreicherung im Mai 1996 noch nicht festgestellt wurde, ist anzunehmen, daß sich die durch das Sturmhochwasser erodierten Dünensande zunächst überwiegend auf dem trockenen Strand ablagerten und erst durch nachfolgende kleinere Ereignisse (08.07.1996; 15.07.1996 bis 18.07.1996; 07.09.1996; 12.09.1996) in mehreren Phasen von dem trockenen Strand in das Buhnenfeld transportiert wurden.

Generell werden die Sedimente im Buhnenfeld und insbesondere entlang der Buhnen gröber (vgl. Abb. 19). Der Momentenmittelwert verschiebt sich von durchschnittlich 0,200 mm (Okt. 1994) auf 0,250 mm bis 0,300 mm im Oktober 1996. Auch die Sortierung wird allgemein "schlechter" (vgl. Abb.19) Anhand von Vermessungen wurde bereits im Sommer 1996 die Auflösung der Terasse und die Bildung eines Riff-Rinnen-Systems festgestellt. Deutlich zeigt sich entlang der neu entstandenen Rinne eine Anreicherung des feinen Mittelsandes (bis zu 30 Gew.-%) im Küstenabschnitt zwischen 70 m bis 80 m Uferentfernung. Sie erfolgt durch Auswaschen des Feinsandanteiles im Sediment. Daraus lassen sich hier wesentlich höhere Turbulenzen als in der halboffenen Buhnenvariante ableiten.

In dem zentralen Bereich des Buhnenfeldes kann auf Grund der sturmbedingten Feinsandanreicherungen für weite Teile im Buhnenfeld keine Aussage über die Sedimentverteilung getroffen werden. Besonders auffällig ist jedoch, daß auch die Sedimente seewärts der Feinsandakkumulation auf dem Luvhang des inneren Sandriffes deutlich gröber werden (Momentenmittelwert: 5/95 u. 10/95: 0,180 mm - 0,200 mm; 10/96: 0,250 mm - 0,350 mm). Diese Entwicklung läßt sich auf dem Vorstrand bis 200 m seewärts verfolgen (vgl. Abb. 14). Einen Zusammenhang zwischen der seit dem Bau der Buhnen kontinuierlichen Versteilung des Vorstrandprofiles seewärts der Buhnen läßt sich nicht ableiten, da in den Jahren 1994/95 trotz des fortschreitenden Prozesses keine Reaktionen in der Sedimentverteilung zu erkennen waren.

Inwieweit hier die Meßbrücke zusätzlich die Sedimentverteilung auf dem Vorstrand beeinflußt, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden.

4.3.4 Sedimentbeschaffenheit verschiederer morpologischer Einheiten in dem Buhnenfeld 2-3 (offene Buhnen)

Auch für diesen Küstenabschnitt liegen keine ausreichenden Informationen über die Sedimentbeschaffentheit vor der Erstellung des Buhnensystems vor (vgl. MIEHLKE et al. 1982). Die erste Sedimentaufnahme des Buhnenfeldes 2-3 erfolgten erst 1 bis 1 1/2 Jahre nach dem Bau der Buhnen im Mai 1993.

Seewärts des Buhnenfeldes 2-3 zeigen die Riff- und Rinnensedimente grundsätzlich keine großen Unterschiede zu den Sedimenten der einzelnen morphologischen Formen des Feldes 7-8 (vgl. Kap. 4.3.1). Auftretende Variationen bestehen hauptsächlich darin, daß die Sandriffe in ihrem küstennormalen Profil kleiner sind. Die Riffluvhänge sind steiler und haben zudem einen geringeren Feinsandanteil zugunsten des Mittelsandes. Weiterhin ist die mit groben Sedimenten versehene Rinne zwischen dem inneren und dem äußeren Sandriff erheblich breiter.

In dem Buhnenfeld sind die Korngrößenbänder, angelehnt an die Bathymetrie, überwiegend küstenparallel ausgerichtet. Lediglich entlang der Buhne 2 deutet ein schmaler Sedimentstreifen, bestehend aus Kornfraktionen > 350 mm, auf Lee-Erosion hin.

Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung im Buhnenfeld 2-3.

Aufgrund der geringen, und stellenweise sehr unterschiedlichen Sedimentmächtigkeit sind die Variationen in dem Sedimentverteilungsmuster in dem Buhnenfeld 2-3 im allgemeinen ausgeprägter als in dem Buhnenfeld 7-8 (vgl. Tab. 7a u. b).

Die Sedimentoberfläche zeigt in dem Zeitraum von 5/93 bis 10/93 die wesentlichsten Veränderungen. Seewärts des inneren Sandriffes und im östlichen Abschnitt des Buhnenfeldes nimmt der Feinsandgehalt um durchschnittlich 10 Gew.-% Anteile ab. Demgegenüber nimmt der Feinsandanteil westlich des Mittelprofiles um ca. 15 Gew.-% zu.

Analog zur Verlagerung der morphologischen Formen verschieben sich auch die Korngrößenbänder um bis zu 30 m landwärts. Diese Änderungen führen zu einer relativen Feinsandanreicherung im Bereich des inneren Sandriffes und auf dem flachen Vorstrand. Hier füllt sich zeitweise die Rinne zwischen Sandriff und Berme mit Sedimenten < 0,200 mm auf.

Zuwachsraten bis zu 40 Gew.-% der Fraktion < 0,200 mm wurden seewärts des Buhnenstrichs in Verlängerung der Buhne 2 zwischen 90 m und 120 m Uferentfernung ermittelt. Luftbildaufnahmen zeigen in diesem Abschnitt eine Verbreiterung des inneren Sandriffes (UVE 1994). Es ist anzunehmen, daß ein Teil der Küstenlängsströmungen trotz der offenen Konstruktion der Buhne 2 um das Bauwerk herum gelenkt werden. Da dieses Phänomen an der Buhne 3 nicht festgestellt werden konnte, wird angenommen, daß die Ablagerungen von feinsandigen Riffsedimenten durch das Hinauspendeln des inneren Sandriffes als Reaktion auf den Bau der Buhnen noch unterstützt oder sogar maßgeblich beeinflußt wird.

Ab Mai 1994 treten nur noch geringere Veränderungen auf, die eine Entwicklungsrichtung aufzeigen. Besondere Schwierigkeiten bei der Interpretation der Sedimentverteilung bereiteten die über weite Bereiche des Buhnenfeldes geringmächtigen Lockersedimente (Abb. 20). Insbesondere im Küstenabschnitt zwischen dem Mittelprofil und der Buhne 3 lag teilweise dem Geschiebemergel eine nur wenige Zentimeter mächtige Sedimentdecke auf. In diesen Bereichen kann bereits ein sehr geringer Energieeintrag große Veränderungen in der Sedimentverteilung hervorrufen. Ein Beispiel sind die Variationen in dem Momenten-Mittelwert entlang der Buhne 3 (vgl. Abb. 21).

Eine Ausnahme bilden sicherlich die im Oktober 1993 auffallend starken Feinsandakkumulationen entlang der Buhne 3. Stellenweise werden hier Zuwächse um bis zu 60 Gew.-% Anteile erreicht. Da der Bereich der Feinsandakkumulation hier durch den Buhnenstrich nach See begrenzt wird, sind diese Ablagerungen eindeutig auf die Reduzierung der Längsströmung und Turbulenzen im Buhnenfeld durch die offen konstruierten Buhnen zurückzuführen.

Ein weiterer, lokaler Trend in der Entwicklung der Sedimentmuster im Buhnenfeld 2-3 zeigt sich durch die kontinuierliche, seewärtige Verlagerung des Korngrößenbandes der Fraktion > 350 mm zwischen der Wasserlinie und 30 m seewärts der Standlinie. Er wird durch die seewärtige Verschiebung der Uferlinie verursacht.

4.3.5 Veränderungen der Sedimentzusammensetzung durch das Sturmhochwasser im November 1995

Am 3./4.11.1995 kam es an der Küste vor Warnemünde zu dem schwersten Hochwasser seit der Jahrhundertflut von 1872 (STIGGE 1995). Der von NW auf NE drehende Starkwind erreichte Windgeschwindigkeiten von maximal 22 m/s Sturmstärke (WEISS & BIERMANN 1996). Die Verweildauer des Wasserstandes über 1 m ü. NN betrug 25 Stunden. Der Scheitelwasserstand lag in der Nacht bei 1,62 m ü. NN. Er stand somit 1,12 m über der Buhnenkrone. Auf dem Höhepunkt der Sturmentwicklung erreichten die Wellen am Kopf der Meßbrücke eine Höhe von 2,20 m (H_{mo}).

Die Brandungszone war auf den Strand vorgeschoben. Wasserstand und Wellenhöhen führen zu einem starken Energieeintrag auf den Strand und die Düne. Die nahezu küstennormal ausgerichtete Wellenangriffsrichtung erzeugte ein on-/offshore-dominiertes Strömungsbild. Innerhalb des Buhnenfeldes wurden in der Brandungszone bis zum Ausfall der Meßgeräte Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 2,0 m/s gemessen.

Während des Sturmhochwassers war das Buhnenfeld noch nicht rekonstruiert. Aus logistischen Gründen konnte die Probenentnahme erst am 21.11.1995 erfolgen. Zum Zeitpunkt der Beprobung waren die Reparaturen an der Buhne 8 abgeschlossen und die Arbeiten konzentrierten sich auf die Errichtung der Buhne 7.

Die Wirkung von Buhnen ist bei einem küstennormal ausgerichteten Wirkungsgeschehen äußerst gering (FLEMMING 1990b). Typische Auswirkungen eines Sturmhochwassers an sandigen Brandungsküsten ist die Einebnung der Vorstrandmorphologie (CERC 1984, OSTROWSKI et al. 1990, GRAAFF v d. 1990 u.v.a.). Erwartungsgemäß nahm die Neigung des Küstennormalprofils ab. Analog zu den morphologischen Veränderungen verschoben sich die Grenzen der Korngrößenbänder seewärts. Anhand der Verteilung der Feinsande (< 0,200 mm) wird die Wirkung des Sturmhochwassers im Buhnenfeld 7-8 besonders deutlich. Einer starken Auswaschung dieser Fraktion innerhalb des Buhnenfeldes bis 60 m Uferentfernung und der Sedimentation auf dem Luvhang des inneren Sandriffes, steht die Anreicherung der Korngrößenfraktion > 0,350 mm gegenüber (Abb. 22). Die feinen Mittelsande sind wesentlich lagestabiler. Nur im Küstenabschnitt zwischen 50 m - 70 m treten sie verstärkt auf. Die Sedimentverteilungsmuster innerhalb und außerhalb des Buhnenfeldes lassen keine deutlichen Unterschiede oder Tendenzen erkennen, die zweifelsfrei auf eine Wirkung der Buhnen zurückzuführen sind.

4.3.6 Veränderungen in dem Sedimentmuster nach der Zerstörung der Buhnen 2-3

Im Herbst 1995 begann die Zerstörung der Buhnen durch die Bohrmuschel *Teredo navalis*. Sie setzte sich bis zur endgültigen Demontage der Buhne durch die Brandung und ein ufernahes Treibeisfeld im Februar/März 1996 kontinuierlich fort. Erste Anzeichen, die ein Nachlasssen der strömungsmindernden Wirkung der Buhnen signalisieren, waren einzelne Ausreißer in der Form einer Vergröberung der Sedimente. Sie traten gehäuft an den Lücken in den Buhnen auf. Mit der Zerstöung des seewärtigen Abschnittes der Buhne im Frühjahr 1996 veränderten sich auch die hydrodynamischen Verhältnisse auf dem Vorstrand. Das innere Sandriff, das als Ausdruck eines dynamischen Gleichgewichtes mit der herrschenden Hydrodynamik (GREENWOOD & DAVIDSON-ARNOTT 1975) nach der Errichtung der Buhnen seewärts verschoben wurde, pendelt mit der Zerstörung der Buhnen zum Strand zurück. Analog zur Verlagerung des inneren Sandriffes verschieben sich auch die Korngrößenbänder um 20 m bis 30 m in Richtung des trockenen Strandes. In dem Buhnenfeld nimmt großflächig der Gehalt an Feinsanden und feinen Mittelsanden als ein Ausdruck der höheren Energiebelastung des Vorstrandes deutlich ab.

4.3.7 Refraktion, Diffraktion und Reflektion

Die aus dem Tiefwasserbereich in die Flachwasserzone einlaufenden Wellen breiten sich üblicherweise nicht entlang der Bathymetrie des Vorstrandes aus. Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten in der Wellenfront auf dem Küstenvorfeld führen zum Einlenken und zur küstenparallelen Ausrichtung der Wellenkammlinie (NÖTEL 1994). Reflektion und Diffraktion sind demgegenüber typische Begleiterscheinungen eines Wellenbildes an einem Bauwerk. Innerhalb eines Buhnenfeldes schwenken im Wellenschatten die Wellenkammlinien in die Richtung des Bauwerkes ein. Entlang der Buhnen kann die Reflektion der Wellen ebenfalls zu starken Änderungen in der Laufrichtung der Wellenkammlinie führen. Insbesondere an massiven Bauwerkskörpern mit einer hohen Buhnenkrone bilden sich die Diffraktionserscheinungen deutlich aus. Die Reflektion der Wellen tritt vorwiegend an senkrechten Konstruktionen auf, so z. B. an Einwand- oder Kastenbuhnen. Je nach der Intensität des Wellenbildes entstehen auf der Sedimentoberfläche Seegangs- oder Wellenrippeln. Anhand des Streichens von Rippelkammlinien lassen sich Änderungen in der Wellenfortschreitrichtung nachzeichnen.

In den Jahren 1992 bis 1996 wurden 6 Rippelkartierungen vorgenommen. Die Unterschiede zwischen der offenen sowie der halboffenen Bauweise der Buhnen wird exemplarisch an den Aufnahmen vom Mai 1992, Oktober 1992 und vom Mai 1993 untersucht. Zum Vergleich der Wirkung der Bauwerke auf die Reflektion und Diffraktion wurden bewußt sehr frühe Sedimentkartierungen ausgewählt. Da die größte seewärtige Verlagerung der Uferlinie in den Buhnenfeldern in dem Zeitraum von 1990 bis 1993 erfolgte, mußte ein möglichst frühes Entwicklungsstadium der Morpologie betrachtet werden. Nur so konnte sichergestellt werden, daß eine ausreichende Anzahl subaquatischer Meßpunkte für entsprechende Aussagen vorhanden war. Insbesondere der geschlossene Abschnitt der halboffenen Buhnen lag bereits nach kurzer Zeit im Einflußbereich der auf dem flachen Strand brandenden Wellen, die vorhandene Rippelstrukturen regelmäßig einebneten.

Die Ergebnislage ist eindeutig: Im offenen Buhnenfeld kam es bis in die Brandungszone hinein zu keiner bauwerksabhängigen Beugung der Wellenkammlinie (Diffraktion) oder zu einer Reflektion der Wellen an den Buhnenkörpern. Anders zeigt sich die Situation im halboffenen Buhnenfeld. Es machen sich hier die Unterschiede zwischen den verschiedenen Durchlässigkeiten - der "offen" konstruierten Buhne und dem geschlossen gebauten Teilabschnitt der halboffenen Buhnen - bemerkbar. Entlang der Streichlinie der Buhnen lenken die Wellenkämme in das Buhnenfeld ein. Da erwartungsgemäß bei einer küstennormal ausgerichteten Wellenangriffsrichtung weder Diffraktion noch Reflektion in dem Buhnenfeld zu erwarten sind, treten diese Erscheinungen vornehmlich bei Wellenagriffsrichtungen aus NW bzw. NE auf. Unter diesen Bedingungen werden die Wellenkämme um bis zu 40° Grad in eine nahezu küstennormal ausgerichtete Laufrichtung umgelenkt. Eine besonders deutliche Beugung der Wellenlaufrichtung konnte in der unmittelbaren Umgebung entlang der Buhnen registriert werden. Wesentlich geringere Abweichungen zeigten sich dagegen entlang der Mittelprofile. Hier läßt der Einfuß der Buhne langsam nach.

Bei diesen Betrachtungen ist der Einfluß zu berücksichtigen, den die Morphologie und der Pegelstand auf das Wellenfeld ausüben. Beide können die Wirkung der Buhne auf das Wellenfeld einschränken oder verstärken. Die Sedimentoberfläche ist in Abhängigkeit zur Wassertiefe und Stärke des Wellenereignisses nur das Abbild des aktuellen Wellenmusters. BAKKER (1968) mißt den Einwandholzpfahlbuhnen (offen, geschlossen) keinen wirklichen Einfluß auf die Diffraktion und Reflektion zu. Nur im direkten Umfeld der Bauwerke könnten geringe Veränderungen in den Sedimenten auftreten. Wie auch immer der Einfluß der Buhnen auf das Wellenfeld zu bewerten ist, sicher ist, daß sowohl die Windrichtung, die Intensität des Windereignisses und auch die Konstruktionsmerkmale der Buhnen das Wellenmuster beeinflussen. So zeigen Aufnahmen von T-Buhnen aus der Probstei besonders deutliche Diffraktionserscheinungen in einem Buhnenfeld nach einem Sturm (vgl. ALW et al. 1997).

4.3.8 Änderungen in dem Sedimentmuster auf dem Vorstrand während kurzer Windereignisse (>10m/s).

Während mehrerer Starkwindereignisse in dem Zeitraum vom 10.10. bis zum 19.10.1993 wurden parallel zu den Luminophorenmessungen Proben von der Sedimentoberfläche entnommem. Aufgrund der durch die starke Brandung eingeschränkten Möglichkeit Taucher einzusetzen, liegt aus dem Buhnenfeld kein flächendeckendes Probenmaterial vor. Die Vielzahl der einzelnen Beprobungspunkte ergeben allerdings ein ausreichend klares Bild. Aufgrund der stark wechselnden meteorologischen und hydrologischen Bedingungen (vgl. Tab. 9) zeichnen sich insbesondere in dem Küstenabschnitt zwischen 30 m bis 70 m Standlinienentfernung - der Brandungszone - die Oberflächensedimente durch eine besonders hohe Variabilität in der Korngrößenhäufigkeitsverteilung aus. Erwartungsgemäß ließen sich in diesem Küstenabschnitt während der einzelnen Starkwindereignisse keine Sedimentverteilungsmuster erkennen, die in irgendeiner Weise eine Buhnenwirkung andeuten. Die Vorstrandsedimente unterlagen durch die während der Messungen häufig wechselnden meteorologischen und hydrologischen Bedingungern einem ständigen Anpasssungsprozeß.

Bemerkenswert ist die deutlich zonale Anordnung der Sedimentvariabilität. Da der Wasserstand um mehrere Dezimeter erhöht war (vgl. Tab. 9), schließt sich seewärts der sedimentdynamischen Brandungszone die Riffzone und landseitig der Bereich des trockenen Strandes an. Trotz der sehr unterschiedlichen meteorologischen und hydrologischen Bedingungen innerhalb des Meßzeitraumes, z. B. mehrere Wasserstandsänderungen mit einer Differenz um bis zu 60 cm und die damit verbundene, sehr unterschiedliche energetische Beanspruchung der Sedimentoberfläche einer jeden Zone, sind die Veränderungen in der Korngrößenhäufigkeitsverteilung der Strand-/Riffsedimente über die gesamte Beobachtungszeit nur äußerst gering. Daher kann angenommen werden, daß kurzfristige Starkwindereignisse keinen nennenswerten Einfluß auf das Grundmuster der Sedimentverteilung auf dem Vorstrand und in Buhnenfeldern nehmen.

4.4 Messungen mit Luminophoren von 1993 - 1996

4.4.1 Randbedingungen

4.4.1.1 Morphologische Ausgangssituation

Während der Farbsanduntersuchungen in den Jahren 1993 bis 1996 war die Bathymetrie in den Buhnenfeldern in einem ständigen Wandel. Zwar hatte sich großräumig die Vorstrandmorphologie bis zum Mai 1993 auf die, durch den Buhnenbau veränderten, hydrographischen Randbedingungen eingestellt - die starken Veränderungen vollzogen sich in den Jahren 1991 und 1992. Bis zur Rekonstruktion und Abdichtung der Buhnen im Jahre 1995 erfolgte aber weiterhin in vielen Buhnenfeldern ein kontinuierlicher Umbau des submarinen Riff-Rinnen-Reliefs in der Form, daß sich die Terrassenbildung auf dem Vorstrand fortsetzt.

Für die erste Tracermessung liegen aus dem Buhnenfeld keine Vermessungsdaten vor. Angaben zur Morphologie stützen sich auf Tauchbeobachtungen. Die Vorstrandmorphologie in den Buhnenfeldern ist sehr gleichförmig. Sie wird durch einen gering seewärtsgeneigten Unterwasserhang (Terrasse) bestimmt. Eine Riff-Rinnen-Bathymetrie konnte nicht kartiert werden. Das innere Sandriff bildet einen Teil des Terrassenkörpers. Auch die Ausbildung von kleinförmigen lokalen Sandriffen und Rinnen auf dem flachen Vorstrand, die noch 1992 kartiert wurden (KÖSTER et al. 1993), war nicht mehr festzustellen. Dagegen liegt in der Mitte des Buhnenfeldes 8-9, in dem dichtgeschlagenen Abschnitt der halboffenen Buhnen, eine küstenormal ausgerichtete Stromrinne.

Auch aus dem Küstenabschnitt seewärts der Buhnenfelder liegen keine Vermessungen vor. Luftbildkartierungen von 1992 und 1994 (UVE 1994) geben allerdings eine Vorstellung von der Morphologie des Untersuchungsraumes. Die Luftaufnahme von 1992 zeigt einige steinige Rinnen zwischen dem inneren und dem äußeren Sandriff. Sie deuten auf ein komplexes Strömungs- bzw. Rippströmungssystem hin. Die Rinnen setzen am Luvhang des inneren Sandriffes an und verlaufen innerhalb des Küstenabschnittes Kkm 145,000 bis Kkm 145,500 in einem Winkel von 30^o bis 90^o zur Küstenlinie. Das seewärtige Ende der Rinnen ist häufig an Durchlässe in dem äußeren Sandriff gebunden.

In der Luftbildaufnahme von 1994 konnten die Rinnen in der Form nicht mehr erkannt werden. Stattdessen zeigen sich Veränderungen, die im Bereich des Buhnenfeldes 8-9 eine Tieferlegung des seeseitigen Terrassenhanges annehmen lassen. Während Tauchbeobachtungen, direkt vor der Farbsandmessung 1993, war die Tieferlegung bereits im Ansatz zu erkennen. Sie setzt sich seeseitig des Buhnenfeldes 8-9 auf dem äußeren Sandriff mit einem Durchbruch im Riffkörper fort.

Ein bedeutender Unterschied in der bathymetrischen Ausgangssituation der zweiten Luminophorenmessung 1994 gegenüber dem ersten Farbsandexperiment 1993 besteht darin, daß in diesem Küstenabschnitt der Vorstrand weitgehend eine Riff-Rinnen-Morphologie aufweist (Abb. 23). Lediglich in der unmittelbaren Nähe der Buhne 7 endet diese Riff-Rinnen-Struktur. Hier verschmilzt das innere Sandriff mit dem flachen Vorstrand zu einer Terrasse. Bei der Betrachtung der Farbsandverteilung des 2. Experimentes (1994) ist zu berücksichtigen, daß sich im inneren Sandriff westlich der Buhne 6 und korrespondierend dazu auch im äußeren Sandriff ebenfalls Durchbrüche im Riffkörper befinden, durch die die Strömungen seewärts gelenkt werden.

Die Bathymetrie der dritten Messung im Jahre 1996 entspricht generell den Verhältnissen der Messung von 1993 - einer Terrasse auf dem Vorstrand (Abb. 24). Die Veränderung in der Vorstrandbathymetrie im Jahre 1996, nämlich die Rückentwicklung von einer Terrassenmorphologie in eine Riff-Rinnen-Struktur durch die Rekonstruktion der Buhnen und der Abdichtung der Buhnen, lassen sich zum Zeitpunkt des Experimentes vermessungstechnisch noch nicht nachweisen. Sie setzten nach der letzten Farbsandmessung im Juni 1996 ein.

Entlang der Buhnen tritt, unabhängig von den Konstruktionsmerkmalen (offen, halboffen, geschlossen mit Geotextil, geschlossen durch dichtgerammte Pfähle), das Problem der Kolkbildung in einer unterschiedlichen Stärke auf. Besonders ausgeprägte Kolke und Erosionsrinnen zeigen sich erwartungsgemäß entlang des geschlossenen Teilabschnittes der halboffenen Buhnen sowie entlang der dicht gebauten, geschlossenen Buhnen. Die Kolktiefen variieren über die Zeit und sind von den ereignisgebundenen Rippströmungen entlang der Bauwerke abhängig.

4.4.1.2 Meteorologische und hydrologische Randbedingungen

Um eine Differenzierung der Windlagen vornehmen zu können, wurde in Starkwind- und Normalwindlagen unterschieden. Als Trenngröße hat sich die Windgeschwindigkeit 10 m/s bewährt. Auf der Grundlage einer langjährigen Windstatistik (LWI et. al 1996) zeigt sich, daß Starkwindlagen (< 10 m/s) im Küstengebiet vor Warnemünde mit einer Häufigkeit von < 20 % auftreten und auch meistens nur von kurzer Dauer sind (Tab. 9).

Windlagen	Prozent
Normalwindlagen	> 80
Starkwindlagen	< 20

Tab. 9: Häufigkeitsverteilung der Windlagen vor Warnemünde *

* Berechnet aus: Windstatistik Warnemünde -1980 bis 1994 (Dette et al. 1996)

Während der ersten beiden Sedimenttransportmessungen mit Luminophoren herrschten hauptsächlich Starkwindlagen vor (Tab. 10a bis 10c, 11a bis 11c). Die dritte Farbsandmessung zeichnete sich durch sehr gegensätzliche meteorologischen Randbedingungen aus (Tab. 12a bis 12c). Hier traten innerhalb einer großräumigen Ruhigwetterlage zeitlich sehr begrenzte, überwiegend schwache Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten < 10m /s auf. Während einiger Windereignisse wurden allerdings kurzfristig auch maximale Geschwindigkeiten > 10 m/s gemessen. Nach der Klassifikation sind sie als (kurze) Starkwindphasen zu bezeichnen.

Mit der Höhe des Wasserstandes sind zwei bedeutende Einflußfaktoren verbunden. Einerseits bestimmt der Wasserstand in Verbindung mit der Wellenhöhe die örtliche Lage der, die Bathymetrie und Sedimentverteilung beeinflussende, Brandungszone, zum anderen wird die Wirkung der Buhnen durch das Überströmen bzw. das Tauchen des Bauwerkes verändert. GRAW (1995) mißt der getauchten Buhne (Höhe = 90 % der Wassertiefe) eine Verminderung der urprünglichen Wellenhöhe von > 50 % zu. Innerhalb der Farbsandmessungen wird zwischen der Situation Buhne überströmt und Buhne nicht überströmt unterschieden. Der Begriff Buhne überströmt bedeutet: Während der Tracermessungen war dieser Zustand erreicht, wenn die Höhe des Wasserstandes ein nahezu ungehindertes Überlaufen der Bauwerke durch die Wellen ermöglichte.

Als besonders problematisch erwies sich die Einbindung der an der Meßbrücke gemessenen Strömungsdaten. Da Strömungen im Vertikalprofil der Wassersäule sehr unterschiedliche Richtungen und Geschwindigkeiten aufweisen können, hängt eine sinnvolle Verknüpfung der Strömungsangaben mit den Sedimentdaten vor allem von der Position der Sensoren ab. In der Literatur wird die Korrespondenz zwischen den Sedimentbewegungen und den gemessenen Strömungen sehr unterschiedlich bewertet. SCHWARZER (1989) stellte in seinen Untersuchungen fest, daß Strömungsmessungen ½ m über der Sedimentoberfläche keinen Rückschluß auf die Sedimentbewegungen zulassen. WATANABE & ISOBE (1990) bestätigen, daß die gemessenen Strömungen und der resultierende Sedimenttransport nicht übereinstimmen müssen, sogar unter bestimmten ungünstigen meßtechnischen Bedingungen unterschiedlich bewertet werden können.

Wie komplex turbulente Strömungsfelder in einem Buhnenfeld aufgebaut sind, zeigen Modellrechnungen von MAYERLE (1995), in denen eindrucksvoll demonstriert wird, wie turbulent und unterschiedlich die Partikelwege von suspendiertem Material in einem Buhnenfeld auf den verschiedenen Strömungsebenen innerhalb einer Wassersäule sind. Wie auch immer Sedimentbewegungen und Strömungsrichtungen miteinander korrellieren, unbestritten ist, daß nur die Strömung der Antrieb für die Sedimentbewegung ist und letztendlich auch die Bewegungsrichtung der Sande bestimmt. So stellte AAGAARD et al. (1995) fest, daß bei Messungen unmittelbar über der Sedimentoberfläche die mittlere Strömungsrichtung ungefähr der Bewegungsrichtung des Sedimentes entspricht.

Tab. 10a: Meteorologische und hydrographische Rahmenbedingungen zur 1. Farbsandmessung im Oktober 1993 während einer großräumigen Starkwindlage (gesamte Meßphase)

Probenentnahme nach:	2 h	17 h	46 h	88 h
Windrichtung (0 \rightarrow 360°) * ¹	$20^{\circ} \rightarrow 40^{\circ}$	$340^{\circ} \rightarrow 250^{\circ}$	$200^{\circ} \rightarrow 240^{\circ}$	$220^{\circ} \rightarrow 360^{\circ}$
mittl. Windricht. $(0 \rightarrow 360^{\circ})$	30°	345°	230°	310°
mittlere Windstärke (m/s)	9.0	8.0	4.0	5.0
max. Windstärke (m/s) * ²	13.5	16.4	4.8	11.0
Wasserstand ü. NN. (m)* ³ von-bis	+0.25	-0.05	-0.30	-0.30
	+0.35	+0.45	+0.10	+0.25
Strömung Station 305 m	0.5	0,2	0,3	0,4
$(V_{m Res.} : m/s)$				
Strömung Station 305 m				
(V _{min} . : m/s)	-	-	-	-
Strömung Station 305 m	1.0	0.5	0,6	0,8
$(V_{\max Res.}: m/s)$				
Strömung 113 m (Richtung:	→ 290°	→ 250°	→ 280°	→ 290°
Mittelwert; von- bis)	$\rightarrow 280^{\circ}-300^{\circ}$	$\rightarrow 225^{\circ}-310^{\circ}$	$\rightarrow 225^{\circ}-320^{\circ}$	$\rightarrow 250^{\circ} 320^{\circ}$
Wellenhöhe (H _{mo})				
ü. NN.(m) Station 153	1.20	0.80	0.60	0.80
Zustand der Buhnen:				
nicht überströmt			(29Std)	
überströmt (ca. Dauer)	(2 Std.)	(17 Std)		(5 Std)

Anmerk.: - = keine Daten vorhanden; $*^1 *^2 *^3$ = Daten für die Tabellen 10 b, c

Tab. 10b: Häufigkeitsverteilung für Windrichtung und Windgeschwindigkeit > 10 m/s während der Farbsandmessungen in einem Buhnenfeld mit halboffenen Buhnen im Oktober 1993 (Bezug: Windstatistik 1980 - 1994)

Probenentnahme nach:	2 Std.	17 Std.	46 Std.	88 Std.
Windrichtung * ¹ (%)	8	20	18	46
Windgeschwindigkeit (V_{max}) * ² (%)	5	2	28	5
Windgeschwind. ^{*2} bei Windrichtung ^{*1} (%)	2	80	45	80

Anmerk.: $*^1 *^2 =$ Daten aus der Tabelle 10a

Tab. 10c:Häufigkeit von Wasserständen während der Farbsandmessungen in einem Buhnen-
feld mit halboffenen Buhnen im Oktober 1993 während einer Starkwindlage

Probenentnahme nach:	2 Std.	17 Std.	46 Std.	88 Std.
Wasserstand * ³ in Abhängigkeit				
zur Windrichtung *1 (%)	11	40	3	79

Anmerk.: Berechnet aus: Häufigkeit von Wasserständen zu Beginn von Starkwindlagen im Zeitraum von 10/93 bis 09/96 für die seegangswirksamen Sektoren SW bis ONO (StAUN 1994-1996); *¹ *³ = Daten aus der Tabelle 10a

Tab. 11a: Meteorologische und hydrographische Rahmenbedingungen zur 2. Farbsandmessung im Oktober 1994 während einer großräumigen Starkwindlage (gesamte Meßphase)

Probenentnahme nach:	2 h	21 h	48 h	96 h
Windrichtung (0 \rightarrow 360°) * ¹	$270^{\circ} \rightarrow 290^{\circ}$	$260^{\circ} \rightarrow 350^{\circ}$	$300^{\circ} \rightarrow 15^{\circ}$	$0^{\circ} \rightarrow 180^{\circ}$
mittl. Windricht. $(0 \rightarrow 360^{\circ})$	275°	310°	340°	75°
mittlere Windstärke (m/s)	6.6	7.5	6.5	3.6
max. Windstärke (m/s) * ²	7.7	11.8	11.4	8.6
Wasserstand ü. NN. (m) * ³	+0.03	-0.13	+0.08	-0.11
von-bis	+0.13	+0.49	+0.36	+0.09
Strömung Station 153 m		0,25		
$(V_{m Res.} : m/s)$	-		-	-
Strömung Station 153 m				
$(V_{\min}:m/s)$	-	-	-	-
Strömung Station 153 m		0,90		
$(V_{\max Res.}: m/s)$	-		-	-
Strömung 113 m (Richtung:				
Mittelwert; von-bis)	-	-	-	-
Wellenhöhe (H _{mo})				
ü. NN.(m) Station 153	0.55	0.70	0.80	0.50
Zustand der Buhnen:				
nicht überströmt	(2 Std)	(12 Std)	(22 Std)	(48 Std)
überströmt (ca. Dauer)		(7 Std)	(5 Std)	

Anmerk.: - = keine Daten vorhanden; $*^1 *^2 *^3$ = Daten für die Tabellen 11 b, c

Tab. 11b: Häufigkeitsverteilung für Windrichtung und Windgeschwindigkeit > 10 m/s während der Farbsandmessungen in einem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen im Oktober 1994 (Bezug: Windstatistik 1980 - 1994)

Probenentnahme nach:	2 Std.	21 Std.	48 Std.	96 Std.
Windrichtung * ¹ (%)	30	32	20	51
Windgeschwindigkeit (V _{max}) * ² (%)	19	5	5	9
Windgeschwind. ^{*2} bei Windrichtung ^{*1} (%)	45	85	45	22

Anmerk.: *¹ *² = Daten aus der Tabelle 11a

Tab. 11c: Häufigkeit von Wasserständen während der Farbsandmessungen in einem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen im Oktober 1994 während einer Starkwindlage

Probenentnahme nach:	2 Std.	21 Std.	48 Std.	96 Std.
Wasserstand * ³ in Abhängigkeit				
zur Windrichtung * ¹ (%)	82	75	3	79

Anmerk.: Berechnet aus: Häufigkeit von Wasserständen zu Beginn von Starkwindlagen im Zeitraum von 10/93 bis 09/96 für die seegangswirksamen Sektoren SW bis ONO (StAUN 1994-1997); *¹ *³ = Daten aus der Tabelle 11a

Tab. 12a: Meteorologische und hydrographische Rahmenbedingungen zur 3. Farbsandmessung im Juni 1996 während einer großräumigen Normalwindlage (gesamte Meßphase)

Probenentnahme nach:	2 h	20 h	45 h	96 h
Windrichtung $(0 \rightarrow 360^{\circ})^{*1}$	$99^{\circ} \rightarrow 218^{\circ}$	$102^{\circ} \rightarrow 304^{\circ}$	182° → 355°	$280^{\circ} \rightarrow 280^{\circ}$
mittl. Windricht. $(0 \rightarrow 360^{\circ})$	206°	235°	271°	194°
mittlere Windstärke (m/s)	4.1	4.3	3.0	3.6
max. Windstärke (m/s) * ²	4.6	9.5++	7.8++	13.0++
(⁺⁺ =Windereignis: s. Tab. 12a')				
Wasserstand ü. NN. (m)* ³ von-bis	0.00	- 0.10	- 0.20	- 0.25
Strömung Station 113 m (V _{m Res.} : m/s)	0.01	-	0.04	-
Strömung Station 113 m (V _{min} : m/s)	0.01	-	0.01	-
Strömung Station 113 m	0.03	-	0.30	-
$(V_{\max Res.}: m/s)$				
Strömung 113 m (Richtung:	→ 208°	-	$\rightarrow 190^{\circ}$	-
Mittelwert; von-bis)	→ 205°-211°		$\rightarrow 126^{\circ}-210^{\circ}$	
Wellenhöhe (H _{max})				-
ü. NN. (m) Station 153	0.08	0.20	0.43	0.44
Zustand der Buhnen:				
nicht überströmt	(2 h)	(18 h)	(26 h)	(50 h)
überströmt (ca. Dauer)	Nes			

Anmerk.: - = keine Daten vorhanden; $*^{1} *^{2} *^{3}$ = Daten für die Tabellen 12 b, c

Tab. 12a': Meteorologische und hydrographische Rahmenbedingungen zur 3. Farbsandmessung im Juni 1996 während der kurzen Windereignisse

Probenentnahme nach:	2 h	20 h	45 h	96 h
mittlere Windrichtung	umlaufend	275°	291°	285°
mittlere Windstärke (m/s)	0	7.6	6.2	10.1
maximale Windstärke (m/s)	0	9.5	7.8	13.0
Dauer (h)	0	1	4	7
Wellenhöhe (H _{max})				
ü. NN.(m) Station 155	0	0.20	0.43	0.44

Tab. 12b: Häufigkeitsverteilung für Windrichtung und Windgeschwindigkeit < 10 m/s während der Farbsandmessungen in einem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen im Juni 1996 (Bezug: Windstatistik 1980 - 1994)

Probenentnahme nach:	2 Std.	20 Std.	45 Std.	96 Std.
Windrichtung * ¹ (%)	48	78	65	100
Windgeschwindigkeit (V_{max}) * ² (%)	28	9	19	-
Windgeschwind.* ² bei Windrichtung * ¹ (%)	58	60	77	

Anmerk.: $*^1 *^2 =$ Daten aus der Tabelle 12a

Tab.12c:Häufigkeit von Wasserständen während der Farbsandmessungen in einem Buhnen-
feld mit geschlossenen Buhnen im Juni 1996 während einer Normalwindlage

Probenentnahme nach:	2 Std.	20 Std.	45 Std.	96 Std.
Wasserstand * ³ in Abhängigkeit				
zur Windrichtung * ¹ (%)		46	49	55

Anmerk.: Berechnet aus: Häufigkeit von Wasserständen zu Beginn von Starkwindlagen im Zeitraum von 10/93 bis 09/96 für die seegangswirksamen Sektoren SW bis ONO (StAUN 1994-1997)); - = keine Daten vorhanden; $*^1 *^3$ = Daten aus den Tabellen 12a

4.4.2 Messungen mit Luminophoren in einem Buhnenfeld mit beidseitig halboffenen Buhnen bei Starkwindereignissen 1993

4.4.2.1 1. Meßphase (2 Stunden)

Die meteorologischen und hydrographischen Randbedingungen während der ersten Meßphase treten im Untersuchungsgebiet relativ selten auf (vgl. Tab. 10a bis 10c). Bei starken nordöstlichen Winden und einem erhöhten Wasserstand verschiebt sich die Brandungszone auf den flachen Vorstrand. Landwärts des Brechpunktes der Wellen herrschen nach FEMMING (1990) und WALKER et al. (1991) die größten küstenparallelen Strömungsgeschwindigkeiten im Buhnenfeld sowie die höchste Konzentration suspendierter Sedimente auf dem Vorstrand (STERNBERG et al. 1984).

Die Verteilung der Luminophoren (rot) zeigt eine intensive Materialumlagerung und einen gebündelten, küstenparallelen Sedimenttransport entlang des oberen Terrassenhanges (Abb. 26 u. 27). Die Dominanz des küstenparallelen Sedimenttransportes in dem offenen Teilabschnitt der halboffenen Buhne wird durch die Konzentration der Farbsandwolken in diesem Bereich besonders deutlich. Trotz des starken auflandigen Windes konzentriert sich der Sedimentransport nahezu ausschließlich küstenparallel auf den offengeschlagenen Buhnenabschnitt. Luminophorenfunde im geschlossenen Buhnenbereich sowie auf der Schwappzone sind selten. Sie beschränken sich auf die Fraktionen < 180 mm.

Das Verteilungsmuster der Farbsande (grün) in der Schwappzone deutet auf unterschiedliche Transportprozesse innerhalb des geschlossenen Abschnittes des halboffenen Buhnenfeldes hin. Außergewöhnlich während aller Farbsandmessungen von 1993 bis 1996 war der gebündelte, seewärts gerichtete Sedimentstrom in der Mitte des Buhnenfeldes. In Verbindung mit der Bathymetrie in dem Buhnenfeld läßt sich hier die Wirkung eines zentralen Rippstromes ableiten. In den Luminophorenmessungen nach 1993 wurde kein ähnliches Sedimentverteilungsmuster erfaßt. Diese Tatsache bedeutet aber nicht, daß es sich bei dem gebündelten Ausstrom im Zentrum des Buhnenfeldes um eine Einzelerscheinung handelt. Vielmehr haben sich im Rahmen der weiteren Messungen die hier auftretenden Rahmenbedingungen nicht wieder eingestellt.

Die Rippströmung tritt nur im geschlossenen Abschnitt des Buhnenfeldes auf. Mit der Öffnung der Pfahlabstände im offengeschlagenen Abschnitt der halboffenen Buhne löst sich der gebündelte, seewärts gerichtete Sedimentstrom auf und lenkt das schmale Farbsandband in das gleiche, die Farbsande (rot) auf dem Terrassenhang beeinflussende, küstenparallele Transportsystem ein.

Anhand der seewärtigen Verschleppung roter Luminophren am Auslagepunkt (Abb. 25) in unmittelbarer Nähe zur Buhne 9 sowie grüner Luminophoren in der Schwappzone entlang der Buhne 8 ist eine seewärts gerichtete Strömung entlang der Buhne anzunehmen. Strömungsmessungen aus dem benachbarten Buhnenfeld zeigen bei auflandigen Winden eine starke seewärtige Strömung entlang der Buhnen (LWI 1995). Auf die Bedeutung von Rückströmungen an Bauwerken für den seewärts gerichteten Sedimenttransport hat bereits SASAKI et al. (1984) hingewiesen.

Die Betrachtung einzelner Luminophorenfraktionen ermöglicht eine Differenzierung der Sedimente in einzelne, korngrößenspezifische Bewegungsbahnen. Nach Experimenten von ENDO et al. (1996) bzw. Naturmessungen von SCHWARZER (1989) wird unter turbulenten hydrographischen Bedingungen, wie sie in der Brandungszone auf dem oberen Terrassenhang und dem flachen Vorstrand während der Messung auftraten, häufig das gesamte Korngrößenspektrum der Sandfraktion unselektiert bewegt. So verwundert es nicht, daß die Farbsandwolken in den meisten Fällen nahezu keine Differenzierungen in den Bewegungsrichtungen aufzeigen. Eine Ausnahme bilden feine bzw. gröbere Fraktionen der Luminophoren entlang der Schwappzone. Hier gelangt Material < 0,106 mm als Suspensionsfracht ausschließlich durch den Rippstrom auf die Terrasse. Der Transport der Fraktion > 0,350 mm erfolgt überwiegend als *bed load* durch Strandversatz entlang der Schwappzone. Die Fraktionen < 0,106 mm und > 0,350 mm sind jedoch mit einem Gew.-Anteil von < 10 % nicht maßgeblich an der Korngrö-Benhäufigkeitsverteilung der Strandsedimente beteiligt.

Unterschiede in dem Transport der Sande definieren sich auch über die zurückgelegten Distanzen der einzelnen Fraktionen innerhalb eines Zeitintervalles. Luminophorenwolken mit nur einer geringen Anzahl an Farbkörnern sind jedoch bei der Bewertung der für das Gesamtsediment repräsentativen Distanzen ungeeignet, da sie nach SCHWARZER (1989) und PRUSZAK & ZEIDLER (1994) nicht die Transportgeschwindigkeit der Gesamtfraktion representieren.

Die Ausbreitungsgrenzen der Wolken unterscheiden sich in jeder Fraktion um mehrere Meter. Bemerkenswert ist die schnelle Ausbreitung der Farbsande in dem Buhnenfeld. Die Geschwindigkeit der küstennormalen Sedimentbewegung beträgt 50 m/h. Da der küstenparallele Transport auf dem oberen Terrassenhang diesen Wert mit 35 m/h unterschreitet, zeigt sich, daß unter den gegebenen Bedingungen die küstennormale Transportrichtung dominiert.

In der Literatur werden häufig Daten über die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Tracern veröffentlicht. So kommen z. B. WHITE & INMAN (1989a) in ihren Untersuchungen in der Brandungszone ohne Buhnen zu ähnlichen der o.a. Ergebniswerte. Die Versuchung die Literaturdaten zu Vergleichszwecken heranzuziehen ist daher groß.

Hier gibt es jedoch nicht nur in der Ergebnislage deutliche Gegensätze. Häufig sind auch die Randbedingungen der Messungen sehr unterschiedlich oder, im ungünstigsten Fall, nicht hinlänglich dokumentiert, um die Qualität der Daten einschätzen zu können. Ein Beispiel für die großen Unterschiede auf Grund verschiedener Randbedingungen geben KOMAR (1977) und PRUSZAK & ZEIDLER (1992, 1994). So variieren nach KOMAR (1977) die Wegstrekken der Farbsande in Abhänigkeit zu der Korngröße zwischen 2 m/h bis 1200 m/h. Dahingegen messen PRUSZAK & ZEIDLER (1992,1994) Versatzgeschwindigkeiten für das Gesamtsediment von 0,70 m/h bis 1,50 m/h; ein deutlicher Unterschied!

Wie entscheidend die Randbedingungen die Ergebnisslage beeinflussen diskutiert SCHWARZER (1989) ausführlich. Auch WHITE & INMAN (1989b) verweisen auf die, teilweise schon allein durch die Anwendung anderer Arbeitsmethoden, großen Unterschieden in den Ergebnissen.

4.4.2.2 2. Meßphase (17 Stunden)

Der Transport der Farbsande in der 2. Meßphase entsprach trotz veränderter meteorologischer und hydrologischer Randbedingungen in ihrer grundsätzlichen Tendenz dem Sedimenttransport in der 1. Meßphase (Abb. 26 u. 27, Tab. 10a bis 10c). Von Interesse ist, inwieweit die Farbsandverteilung weiterhin von dem zentralen Rippstrom gesteuert wird, da diese entscheidend den Erfolg oder Mißerfolg einer Baumaßnahne beeinflussen (BAKKER 1968, FLEMMING 1990b). Die während des Experimentes herrschenden nördlichen Winde lassen Rippströmungen im Buhnenfeld und entlang der Buhnen erwarten. Anhand der Gesamtverteilung (Abb. 26) zeichnet sich kein eindeutiges Bild ab. Augenscheinlich paust sich die Farbsandverteilung aus der 1. Meßphase durch.

Ebenfalls lassen sich anhand der Verteilung der eingefärbten Sande keine Rückströmungen entlang der Bauwerke erkennen. Es ist anzunehmen, daß der hohe Wasserstand Ausgleichsströmungen über das Bauwerk hinweg und um den landseitigen Buhnenanschluß herum ermöglicht. Damit veringert sich die Möglichkeit der Rippstrombildung (FLEMMING 1990).

AHRBERG (1995) hält einen Sedimenttransport über das überströmte Bauwerk hinweg für möglich. Diese Annahmen können durch die eigenen Farbsandmessungen nicht bestätigt werden. Der suspensionsführende Wasserkörper reicht in Abhängigkeit von der Wellenenergie häufig nicht höher als 1 m über die Sedimentoberfläche hinaus (KANA & WARD 1980, RIJN & KROON 1992). Vom LWI durchgeführte Suspensionsmessungen entlang der Meßbrücke zeigen ebenfalls, daß höhere Sedimentkonzentrationen nur einige Dezimetern über der festen Sedimentdecke bewegt werden.

Die geschlossenen Buhnen haben zwischen den einzelnen Pfählen konstruktionsbedingte schmale Durchlässe, durch die hindurch ein Sedimenttransport erfolgen kann (KOLP 1966). Die eigenen Messungen zeigen ebenfalls, daß dies möglich ist. Die Passage durch die Pfahllükken hängt vorwiegend vom Wasserstand ab. Bei nicht überströmten Buhnen gelangen die Farbsande durch das geschlossene Bauwerk von einem Buhnenfeld in das andere. Überströmte Buhnen lassen dahingegen keine Sande hindurch. Die Sedimentbewegungen durch das Bauwerk hindurch sind allerdings vernachlässigbar gering. Sie sind auf die Druckunterschiede beidseitig der Buhne zurückzuführen. Sie entstehen durch Lauflängenunterschiede in der Wellenkammlinie brechender Wellen entlang des Buhnenkörpers sowie durch das Auflaufen der Wellen gegen die Pfahlwände bei schräg zur Küste einlaufenden Wellenkammlinien (NISHIMURA & TAKEWAKA 1990, HATTAORI & ARAMI 1992). Wird das Bauwerk überströmt, bildet sich kein nennenswertes hydraulisches Gefälle beidseitig der Buhnen aus. Das Passieren des Bauwerkes durch die Pfahllücken hindurch wird damit verhindert.

Zur Erstellung halboffener Buhnen lassen sich Pfahldurchmesser und -abstände berechnen und bautechnisch realisieren. Die Auswirkungen faunistischer Aktivitäten sind jedoch unkalkulierbar. Aus den Tauchbeobachtungen ist bekannt, daß die 1990 bis 1991 frisch verbauten Buhnenpfähle im Laufe des Beobachtungszeitraumes nach wenigen Jahren (1994 /1995) mit Algen und Muscheln überzogen waren. Messungen von der niederländischen Küste zeigten, daß ein Besatz der Pfähle durch Algen und Muschelkolonien den gleichen Effekt auf die Durchlässigkeit der Buhnen hat wie eine Veränderung der Pfahlabstände (BAKKER et al. 1984). Dennoch geht aus den Messungen mit Farbsanden klar hervor, daß zwischen der Wirkung des offenen Abschnittes auf den Sedimenttransport und des geschlossenen Teilbereiches der Buhnen unterschieden werden kann. Weitere Differenzierungen der Durchlässigkeiten, die bauseitig innerhalb des offenen Abschnittes vorgenommen wurden, lassen sich anhand der Luminophorenverteilung nicht nachvollziehen. Sie scheinen auch vor dem Hintergrund der variablen faunistischen Aktivität an den Buhnen wenig sinnvoll zu sein.

4.4.2.3 **3. Meßphase (46 Stunden)**

Die Farbsandkarten zeigen ein sehr differenziertes Bild in der Luminophorenverteilung (vgl. Abb. 26 u. 27). So sind die nach Westen gerichteten Farbsandwolken auf die überwiegend nord-nordöstlichen Starkwindlagen in den ersten beiden Meßphasen zurückzuführen. Den östlichen Transport der eingefärbten Sande bestimmen dahingegen die während der 3. Meßphase dominierenden südwestlichen Winde einer kurzen Normalwindphase.

Anhand der Farbsandfunde wird die unterschiedliche Wirkung von einer Normalwindphase innerhalb einer größräumigen Starkwindlage sowie explizit von Starkwindlagen auf die Sedimentbewegung deutlich. Während der Normalwindphase durchqueren alle Farbsandfraktionen den offengeschlagenen Abschnitt der Buhnen. Nur ein geringer Teil der Luminophoren driftet aufgrund von Rippströmungen entlang der Buhne 9 seewärts und verläßt das Buhnenfeld. Dahingegen deutet die unterschiedliche Anzahl der beidseitig der Buhne 8 wiedergefundenen Sande und die weit seewärts reichende Farbsandwolke an, daß hier wesentlich stärkere küstennormale Strömungen (Ripp) entlang der Bauwerke die Verteilung der Luminophoren maßgeblich beeinflußt haben. Unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten einzelner Fraktionen der Farbsande und damit eine Selektion durch die Rippströmungen (DUANE & JAMES 1980) lassen sich aber nicht ableiten.

4.4.2.4 4. Meßphase (88 Stunden)

Die Ergebnisse aus der 4. Meßphase verdeutlichen wiederum den überwiegend seewärts gerichteten Sedimenttransport während eines Starkwindereignisses. Auch hier bestätigen die in das Küstenvorfeld hinausreichenden Farbsandwolken die Bedeutung und negative Wirkung der

Ripströme entlang der Buhnen für das Buhnenfeld. Laut Windstatistik (LWI 1996) ist die während dieser Meßphase aktuelle Windsituation häufig vor Warnemünde anzutreffen.

Die östliche Erweiterung des Beobachtungsraumes um ein nicht mit Farbsanden kontaminiertes Buhnenfeld zeigt, daß unter den herrschenden Randbedingungen an keiner Stelle im Buhnenfeld eine landwärts gerichtete Sandbewegung erfolgt. Es ist anzunehmen, daß in diesem Küstenabschnitt die Längströmung dominiert. Das Auftreten eines ruhigen Küstenabschnittes zwischen zwei Buhnen wird von KOLP (1958, 1966, 1970) auf die höheren Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Streichlinie zurückgeführt (vgl. BAKKER et al. 1984). Daraus leitete er eine dynamische Riegelwirkung ab, die weder einen Sedimenttransport in das Buhnenfeld hinein noch eine Bewegung der Sande hinaus erlaubt.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Farbsandmessungen vor Warnemünde und jenen der Experimente von KOLP (1958, 1966, 1970) ist sinnvoll, da seine Messungen unter vergleichbaren meteorologischen Rahmenbedingungen durchgeführt wurden. Es zeigt sich jedoch, daß die von KOLP (1958) postulierte dynamische Riegelwirkung nicht als eine typische Wirkungsweise von (kurzen) geschlossenen Buhnen bewertet werden kann. Sie steht mit den bereits in der früheren Literatur aufgeführten Ergebnissen (u.a. KRESSNER 1927, BURHORN 1952) im Widerspruch. Die Unterscheidung zwischen der Wirkung von kurzen und langen geschlossenen Buhnen, wie sie KOLP (1970) in einer späteren Arbeit vorgenommen hat, erscheint daher sinnvoll. Wie Farbsandmessungen vor Fischland zeigen, konnten sich aufgrund der sehr kurzen, maximal 40 m langen Bauwerke keine, anhand eingefärbter Sande nachweisbaren, Zirkulationssysteme innerhalb des Buhnenfeldes ausbilden. Im gesamten Feld tritt eine überwiegend küstenparallel ausgerichtete Strömung in unterschiedlichen Größenordnungen auf. Der Sedimenttransport erfolgt hauptsächlich uferparallel. Die Ergebisse aus dem Buhnenfeld vor dem Fischland lassen sich auch auf die Farbsandverteilung in dem geschlossenen, zum Zeitpunkt der Messungen maximal 40 m langen Abschnitt der halboffenen Buhnen vor Warnemünde übertragen.

4.3.3 Messungen mit Luminophoren in einem Buhnenfeld mit einer halboffenen Buhne und einer geschlossenen Buhne bei Starkwindereignissen 1994

4.4.3.1 **1. Meßphase (2 Stunden)**

Auf die besonderen Begleitumstände dieser Messungen wurde bereits hingewiesen. Vorgesehen war eine Messung mit Luminophoren in einem Buhnensystem mit beidseitig geschlossenen Buhnen.

Im Buhnenfeld zeichnen sich mehrere unterschiedliche Transportsysteme ab. Es erfolgt in dem einen System ein küstenparalleler Sedimenttransport auf dem inneren Sandriff und in der landseitig anschließenden Rinne. Die Sedimentverteilung eingefärbter Sande wird durch die halboffene Bauweise der Buhne 6 bestimmt (Abb. 28 u. 29). Das Verhalten der Farbsandwolken entspricht daher auch jenem der Luminophorenmessungen im Jahre 1993. Die Entstehung des 2. Transportsystems ist auf die Schließung des halboffenen Abschnittes der Buhne 7 zurückzuführen. Der auf das geschlossene Bauwerk treffende Sedimentstrom weicht zum einen seewärts aus und führt um den Buhnenkopf herum in das benachbarte Buhnenfeld (1. System), zum anderen entsteht im Buhnenfeld eine der generellen Transportrichtung gegenläufige, großräumige Zirkulation (2. System, Abb. 30). Die Verteilung der Farbsande (blau) in der Schwappzone weist auf die Existenz eines weiteren Transportstromes auf dem flachen Vorstrand hin (3. System). Hier bewegen sich die Sedimente wiederum gegenläufig zum großräumigen Zirkulationswirbel. Die Mobilität der Sande auf dem Strand wird durch den brandungsinitiierten Strandversatz durch Auf- und Rücklaufströmungen sowie den Rippstrom entlang der geschlossenen Buhne bestimmt.

Die Aufspaltung der Sedimente in einzelne Fraktionen ermöglicht auch in dieser Messung eine differenzierte Betrachtung der Transportbahnen. Aus der Verteilung der Farbsande (orange) ist zu entnehmen, daß feine Sande mit Korngrößen < 0,125 mm überwiegend über das innere Sandriff küstenparallel transportiert werden, während sich Sedimente > 0,150 mm größtenteils durch die Rinne bewegen. Sehr ähnliche Diffenzierungen können anhand der Farbsandverteilung (blau) auf dem flachen Vorstrand und in der Schwappzone vorgenommen werden. Hier lenken die Fraktionen < 0,300 mm als Suspensionsfracht in das Zirkulationssystem ein. Dagegen werden gröbere Sedimentfraktionen hauptsächlich entlang der Schwappzone bewegt und teilweise entlang der geschlossenen Buhne durch vermutlich starke Rippströmungen seewärts transportiert. Die hohen Farbsandkonzentrationen entlang der Buhne 7 (Rippstrom) und der Transport von einer deutlich gröberen Sedimentfraktionen in der Rinne des Riff-Rinnen-Systems landseitig des inneren Sandriffes lassen hier besonders hohe Strömungsgeschwindigkeiten vermuten.

Von besonderem Interesse ist, inwieweit Wirbel- und Zirkulationssysteme Sedimentströme in ein Buhnenfeld hineinführen und damit die Sedimentbilanz in dem Feld positiv beeinflußen, oder ob Sande hinausgeführt werden und die Wirbel daher erodierend wirken. In dem in das Buhnenfeld hinein zirkulierenden Sedimentstrom dominieren die Korngrößenfraktionen zwischen 0,125 - 212 mm. Sie sind mit ca. 40 Gew.% am Gesamtsediment beteiligt. Dahingegen werden die Kornfraktionen (< 0,300 mm) der Sande aus der Schwallzone von Strömungen beeinflußt, die sie auf den flachen Vorstrand treiben und somit aus dem Buhnenfeld hinausleiten. Diese Fraktionen sind mit ca. 84 Gew.-% an den Farbsanden beteiligt. Die Menge der wiedergefundenen Luminophoren des hineinführenden Sedimentstromes sowie die Anzahl der Farbsande in dem seewärts gerichteten Transportband unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Da jedoch der hinausleitende Sandstrom über ein breiteres Korngrößenspektrum verfügt als die hineintransportierten Sande, läßt sich anhand der Verfügbarkeit der Fraktionen unter den die Messungen begleitenden meteorologischen und hydrographischen Bedingungen ein Überwiegen des seewärts gerichteteten Sedimenttransportes aus dem Buhnenfeld hinaus ableiten.

Die Neigung geschlossener Buhnen zur Ausbildung unterschiedlicher Walzen- und Zirkulationsströmungen wurde schon von KRESSNER (1927) experimentell nachgewiesen. Auch BURHORN (1951), YAMAGUCHI & NISHIOKA (1984), FLEMMING (1990), NÖTEL (1994) u.v.a. haben sich dieser Thematik in Naturversuchen oder Modellierungen angenommen und sind zu ähnlichen Ergebnissen gekommen. Die hier aufgezeigten Transportsysteme in einem Buhnenfeld zeigen in den Grundzügen eine deutliche Korrespondenz mit den Strömungssystemen aus den genannten Modellversuchen. Außerdem stehen sie grundsätzlich im
Einklang mit den Messungen von KOLP (1970) vor Neuendorf (Wirbelbildung) sowie den theoretischen Annahmen von BASINSKI (1993) über den Sedimenttransport entlang einer geschlossenen Buhne.

4.4.3.2 2. Meßphase (21 Stunden)

Starke nordwestliche Winde führten während der Messungen über einen längeren Zeitraum zum Überströmen der Buhnen. Die Verteilung der Farbsande zeigt, daß sich die während der 1. Meßphase aktiven Zirkulationssysteme auflösen (Abb. 29 u. 31). Im Buhnenfeld dominiert der küstenparallele Sedimenttransport. Numerische Modelle von YAMAGUCHI & NISHIOKA (1984) zeigen, daß bei nahezu gleicher Wind- und Wellenangriffsrichtung in einem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen, vergleichbar mit der 1. Meßphase, Wirbel- und Zirkulationsbildungen zu erwarten sind. Besondere Beachtung verdienen daher auch die geringen Farbsandkonzentrationen entlang der Buhne 7. Bereits in dem Kapitel 4.4.3 wurde diese Tatsache als ein Indiz für die Verringerung von Rippstromaktivitäten gewertet und als Ursache für das Überströmen der halboffenen Buhnen genannt. Sowohl die Auflösung der Zirkulationssysteme als auch die Verminderung der Rippstromaktivität zeigen deutlich, daß auch in einem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen ein Überströmen der Bauwerke - und somit der Wasserstand - maßgeblich an der Steuerung des Sedimenttransportes innerhalb eines Buhnenfeldes beteiligt ist.

4.4.3.3 **3.** Meßphase (48 Stunden)

In dieser Meßphase haben sich die meteorologischen und hydrographischen Bedingungen nur geringfügig zu denen der vorangegangenen Messung verändert. Erwartungsgemäß läßt sich daher aus der Verteilung der eingefärbten Sande auch keine wesentliche Änderung im Transportgeschehen ablesen (Abb. 30 u. 31). Die Modifikationen in den Kartenbildern sind vornehmlich auf die längere Wirkzeit zurückzuführen. Sie bestehen hauptsächlich in der fortgeschrittenen Ausbreitung der Farbsande. Auch hier deutet die geringe Anzahl an Luminophoren entlang der geschlossenen Buhne 7 eine eingeschränkte Aktivität des Rippstromes an dem überströmten Bauwerk an.

4.4.3.4 4. Meßphase (96 Stunden)

Zur Vermeidung von Mißverständnissen bei der Betrachtung der Farbsandverteilung im Kartenbild der aktuellen Messungen muß kurz auf die Besonderheiten im östlich benachbarten Buhnenfeld 7-8 eingegangen werden. Die hier klar hervortretenden Unterschiede in der Farbsandverteilung zwischen den Buhnenfeldern 6-7 und 7-8 sind vermutlich auf die teilweise Zerstörung der Buhne 8 zurückzuführen. Obwohl die Vermessung der Bathymetrie nach der Zerstörung des seewärtigen Abschnittes der Buhne und die Körngrößenhäufigkeitsverteilung der Oberflächensedimente im Buhnenfeld 7-8 keinen Hinweis auf Veränderungen liefern, die in Abhängigkeit zu der geänderten Bauwerkskonstruktion stehen, ist dennoch anzunehmen, daß sich die küstenparallele Strömung von dem Buhnenstrich weiter in das Buhnenfeld hinein verlegt hat. Dies wird durch das Einschwenken der Farbsandbänder (orange) entlang des Terrassenhanges unterstrichen.

In dem Kartenbild der letzten, abschließenden Meßphase wird die Wirkung eines Buhnenfeldes mit geschlossenen Buhnen während einer Starkwindlage über einen längeren Zeitraum zusammenfassend verdeutlicht. Die Konzentration der Luminophoren auf dem inneren Sandriff und die Abnahme der Farbsande in dem Buhnenfeld zeigt eindrucksvoll, daß trotz auflandiger Winde, die über die Gesamtzeit der Farbsandmessungen im Jahre 1994 herrschten, letztendlich kein nennenswerter Sedimenteintrag in die Buhnenfelder erfolgte. Demgegenüber wird aus der Verteilung der Luminophoren (blau) in der Schwallzone klar, daß die starkwindbeeinflußte Hydrographie einen Sedimentstrom bewegt, der eindeutig aus dem Buhnenfeld hinausführt. Die Ergebnisse der Messungen stehen daher in einem gewissen Widerspruch zu den Aussagen von KOLP (1966, 1970). Wie bereits in dem Kapitel 4.4.2.4 dargelegt wurde, werden Sedimentbewegungen durch das Vorhandensein eines stillen Raumes (KOLP 1966) bzw. durch ein geschlossenes Zirkulationssystem in einem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen (KOLP 1970) nahezu ausgeschlossen.

4.4.4 Messungen mit Luminophoren in einem Buhnenfeld mit beidseitig geschlossenen Buhnen während einer großräumigen Normalwindlage 1996

Die in der dritten Luminophorenmessung eingesetzten Farbsande hatten das gleiche Farbspektrum wie die Tracersande in der ersten Messung 1993. Mit Hilfe einer umfangreichen Voranalyse wurde geprüft, ob zweieinhalb Jahre nach dem Einsatz dieser Farben weiterhin eine Kontamination der Vorstrandsedimente durch die Messung von 1993 in dem Buhnenfeld vorlag. Es zeigte sich, daß trotz der bekanntermaßen, mehrjährigen Haltbarkeit der Farbstoffe innerhalb des Buhnenfeldes keine Verunreinigungen durch alte Farbsande vorzufinden waren.

4.4.4.1 1. Meßphase (2 Stunden)

Aus den bathymetrischen Vermessungen in den Buhnenfeldern von 1990 bis 1996 geht eindeutig hervor, daß durch die Wirkung der Buhnen der Strand aufgebaut wurde bzw. die Buhnen zumindest das Material der Strand- und Dünenaufspülungen von 1990 und 1992 vor Erosion geschützt haben. Da unabhängig von den Konstruktionsmerkmalen der Buhnen durch die Farbsandmessungen während der Starkwindlagen in den Jahren 1993 und 1994 kein nennenswerter Materialeintrag in die Buhnenfelder hinein festgestellt werden konnte, muß angenommen werden, daß andere Randbedingungen für die positive Wirkung der Buhnen verantwortlich sind.

Großräumige Normalwindlagen prägen zu über 80 % das Wettergeschehen vor Warnemünde. Als Normalwindlagen wurden Windgeschwindigkeiten zwischen 0 - 10 m/s definiert. Die Verteilung der Luminophoren zeigt, daß während dieser ersten Meßphase kein Farbsandtransport ermittelt werden konnte (Abb. 35). Die zum Zeitpunkt der Messung herrschenden meteorologischen und hydrographischen Bedingungen reichten nicht zum Transport der Sande aus. Demgegenüber waren durch Tauchbeobachtungen eindeutig Bewegungen der Farbsande während geringer Wellenbewegung (Dünung) und die Einarbeitung der Sande in die geringmächtige Rippelstruktur der Sedimentoberfläche festzustellen. Obwohl die Strömungssensoren an der Meßbrücke zu diesem Zeitpunkt Strömungsgeschwindigkeiten anzeigten, die unterhalb der Meßgenauigkeit liegen (frdl. mündl. Mitt. T. Trampenau; LWI 1996), läßt sich unmittelbar an den Auslagepunkten durch die hohen Konzentrationen eingefärbter Sande (rot, grün) ein über 5 m bis 6 m langer Sedimentstrom visuell in das Buhnenfeld hinein verfolgen. Aufgrund der geringen Ausdehnung der Farbsandwolke während dieser ersten Meßphase konnte jedoch trotz des dichten Probenrasters die Lageveränderung (rot, grün) meßtechnisch nicht erfaßt werden.

Nach Experimenten von SUNAMURA (1980) sind geringe Bewegungen des Wasserkörpers durchaus in der Lage, einen Sedimenttransport in kleinem Umfang und über sehr geringe Distanzen, von einem Rippel zu dem anderen, zu bewirken. Als unteres Strömungsniveau zur Entwicklung von Wellenrippeln für die Korngrößen der auf dem Vorstrand anzutreffenden Sedimente in Warnemünde (0,100 mm bis 0,400 mm) werden von REINECK (1984) Ge-0,10 0,12 schwindigkeiten zwischen ---m/s angegeben. Inwieweit diese Strömungsgeschwindigkeiten in der schwachen Dünung tatsächlich auftreten, konnte nicht registriert werden.

4.4.4.2 **2. Meßphase (20 Stunden)**

Aufgrund eines kurzen und starken, einstündigen Windereignisses sind die Veränderungen der Farbsandwolke den wirkenden meteorologischen und hydrographischen Rahmenbedingungen eindeutig zuzuordnen. Ein Blick auf die Kartendarstellungen zeigt, daß sich anhand der Verteilung der Luminophoren nur schwer eine klare Trennung zwischen einer überwiegend küstennormalen oder einer vorwiegend küstenparallelen Bewegungsrichtung der Sande vornehmen läßt (Abb. 33 u. 35). Die Dominanz der küstennormalen Transportrichtung wird jedoch durch die Ausbreitung der grünen Luminophorenwolke auf dem oberen Terrassenhang deutlich. Sie wandert aus dem Küstenvorfeld in den seewärtigen Abschnitt des Buhnenfeldes 7-8 hinein. Die Farbsandkonzentration im Buhnenstrich weist jedoch auch auf eine durch den westlichen Starkwind initiierte küstenparallele Strömung hin. Die gegenläufige Transportrichtung der Luminophoren (rot, grün) können auf Rippströmungen entlang des Buhnenkörpers zurückgeführt werden. Demnach reicht ein kurzes Windereignis in einer großräumigen Normalwetterlage aus, um Rippströmungen so zu aktivieren, daß sämtliche eingegebenen Sedimentfraktionen bewegt wurden und Feinsande (< 0,200 mm) bis zu 40 Meter seewärts des Buhnenkopfes hinaus auf das Küstenvorfeld verlagert wurden.

4.4.4.3 **3. Meßphase (45 Stunden)**

Obwohl sich die Windrichtung nicht wesentlich verändert hat, tritt eine deutliche Richtungsänderung im Sandtransport auf. Aus einer überwiegend küstennormalen Bewegungsrichtung wird eine vorwiegend küstenparallele (Abb. 34). Zudem gelangt nur feines Sediment in das Buhnenfeld. Die Ursache liegt in der Meßkonstellation, da die Auslagepunkte der Farbsande für diese Winde nicht optimal gewählt waren. Vorhergesagte nordöstlichen Winde traten während der Messungen nicht ein, sondern es dominierten westliche Winde. So werden die Farbsande durch die Strömungen im Buhnenstrich an dem Buhnenfeld vorbeigeleitet (Abb. 35).

Da die Strömungssonden im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen nur gering höhere Strömungsgeschwindigkeiten anzeigten, die kaum über der Erfassungsgrenze liegen, ist anzunehmen, daß die deutliche Änderung im Wellenklima für die Modifikationen in dem Strömungsmuster und daher auch in der Sedimentverteilung verantwortlich ist. Es wurden nur wenige eingefärbte Sande in das Buhnenfeld 7-8 hineintransportiert. Dennoch läßt sich aus der Farbsandverteilung der Fraktionen < 0,106 mm die Ausbildung eines Zirkulationsystems in der Form eines zentralen Wirbels im Buhnenfeld ableiten.

Anhand der Farbsandanreicherungen in Lee der Buhne 8 sind dort Walzensysteme anzunehmen, die einen Sedimentstrom in das benachbarte Buhnenfeld hineinbewegen. Zur Vermeidung einer Fehlinterpretation der Kartendarstellungen sei an dieser Stelle jedoch nocheinmal hervorgehoben, daß die Messungen in einem größtenteils zerstörten Buhnensystem durchgeführt wurden. Lediglich in dem zentralen Meßfeld wurden die geschlossenen Buhnen rekonstruiert. So ist der bauliche Rahmen in dem Buhnenfeld 8-9 nicht mit einem geschlossenen Buhnenfeld vergleichbar. Die Bedingungen für den Sedimenttransport östlich der Buhne 8 und die Ausbildung von einem Leewalzensystem entsprechen daher eher den Voraussetzungen, wie sie an Einzelbauwerken angetroffen und von TAROWSKA (1984) und SHERMAN et al. (1990) beschrieben werden.

4.4.4.4 4. Meßphase (96 Stunden)

In der letzten Meßphase trat nach einer zweitägigen Normalwindlage ein mehrstündiges Starkwindereignis unmittelbar vor der Beprobung auf. Aufgrund des starken und länger anhaltenden Windes läßt sich nun anhand der Farbsandverteilung die Wirkung einer Normalwindlage und eines Starkwindereignisses auf die Sedimentoberfläche nur noch schwer voneinander unterscheiden. Im Kartenbild ist im Gegensatz zu der vorangegangenen 45 Stunden-Messung, ein in das Buhnenfeld 7-8 hineinführendes Farbsandband dargestellt (vgl. Abb. 34). Anhand der relativ hohen Konzentrationen eingefärbter Sande, die weit in das Buhnenfeld hineinreichen, ist der küstennormale Sedimenttransport einer Normalwindlage zuzuordnen. Die Verteilung der einzelnen Farbsandfraktionen (grün) macht deutlich, daß mit der Veränderung der meteorologischen und der hydrologischen Verhältnisse (Normalwind/Starkwind) dieser landwärts gerichtete Sedimenttransport unterbrochen wird. Mit dem Starkwindereignis setzt ein Zirkulationssystem ein, daß die Luminophoren innerhalb des Buhnenfeldes 7-8 entlang der geschlossenen Buhne 7 wieder hinausleitet. Ebenfalls läßt sich anhand der nach Osten gerichteten Verschleppungen der Farbsandwolken (grün, rot) deutlich der mit dem Starkwindereignis einsetzende küstenparallele Sedimenttransport erkennen. Erwartungsgemäß hat sich auch unter den Bedingungen der aktuellen Messung ein Rippstrom ausgebildet.

4.4.5 Farbsanduntersuchungen im erweiterten Küstenvorfeld

Die Luminophorenmessungen zeigten, daß während Starkwindlagen Sedimente aus den Buhnenfeldern hinaus über das innere Sandriff oder von dem Terrassenhang seewärts verfrachten werden können. Wohin diese Sande letztendlich transportiert werden, ist bisher nicht bekannt und war nicht Gegenstand der Untersuchungen. Zur Ergänzung der Farbsanduntersuchungen in Buhnenfeldern wurden zusätzliche Messungen auf dem erweiterten Küstenvorfeld durchgeführt. In der Abbildung 11 sind die Positionen der wiedergefundenen Farbsande dargestellt.

Bemerkenswert sind die Unterschiede in der Verteilung der Luminophoren (1993: grün, rot). Die Farbsande (rot), die auf dem Terrassenhang (inneres Sandriff) ausgelegt waren, ließen sich in dem weiteren östlichen Verlauf des Sandriffes überwiegend nur hier antreffen. Dahingegen wurden die Luminophoren (grün) von der Schwappzone weit in das Küstenvorfeld hinausgetragen und auf dem äußeren Sandriff sowie auf den weit nach See reichenden Feinsandakkumulationen entlang der Warnow-Mündung wiedergefunden. Da die Luminophoren (grün) auf dem äußeren Sandriff erheblich gröber waren, als jene (rot) auf dem inneren Sandriff wird deutlich, daß die Sande durch starke Strömungen von dem Vorstrand auf das Küstenvorfeld hinaus transportiert wurden.

Inwieweit die küstennormal gerichtete Verfrachtung durch die Ripströme auf dem Küstenvorfeld erfolgt, wurde anhand einer kleinen, gesonderten Untersuchung der Sedimente an den Durchbrüchen des äußeren Sandriffes ermittelt. Aufgrund des großen labortechnischen Aufwandes mußte die Farbsandanalyse auf die Registrierung der fluoreszierenden Farben reduziert werden. Wenige Tage nach dem Einsatz der Luminophoren (1994; orange, blau) ließen sich die ausgelegten Sedimente bereits auf dem Luvhang des äußeren Sandriffes wiederfinden. Da zusätzlich Luminophoren entlang des Durchbruches in dem äußeren Sandriff und auf dem seewärtigen Luvhang eines weiteren, kurzen Sandriffes erfaßt wurden, zeigt sich, daß der seewärts gerichtete Transport der Sande überwiegend durch die Ripströme erfolgt. Ein weiterer seewärtiger Transport über das äußere Sandriff hinaus ist anzunehmen.

5. Vergleichende Betrachtungen

5.1 Vergleich der Wirkung der offenen, halboffenen und geschlossenen Buhnen auf die Morphologie

Zwischen den drei Buhnenkonstruktionen treten deutliche Unterschiede in ihrer Wirkung auf die Bathymetrie auf. Im Buhnenfeld 7-8 (halboffene Buhnen) hat sich nach der Errichtung der Bauwerke die strandnahe Rinne zwischen dem inneren Sandriff und dem Strandhang aufgelöst und sich eine durchgehende Terrasse ausgebildet. In dem geschlossenen Abschnitt des Buhnenfeldes 7-8 führt eine umfangreiche Sedimentation zu einer seewärtigen Verschiebung der Uferlinie.

Auch in dem Buhnenfeld 2-3 (offene Buhnen) ließ sich ein seewärts gerichteter Vorschub der Uferlinie beobachten. Er war jedoch um ca. 20 % geringer als im Buhnenfeld 7-8 mit den

halboffenen Buhnenkörpern. Nach der Errichtung der offenen Buhnen nahm das innere Sandriff an Mächtigkeit zu. Der Riffkörper verlagerte sich entgegen der Entwicklung in dem halboffenen Buhnenfeld seewärts. Es ist anzunehmen, daß die unterschiedliche Lage des inneren Sandriffes in den Buhnenfeldern 2-3 und 7-8 nicht nur der Wirkung der einzenlen Bauwerkstypen zugeordnet werden kann, sondern ebenso der Einfluß des gesamten Buhnensystems zu berücksichtigen ist.

Auch in dem geschlossenen Buhnenfeld liegt das innere Sandriff seewärts der Streichlinie. Auf dem Strandhang ist wieder eine Rinne entstanden. Die geschlossene Bauweise fördert ebenso wie die offene und die halboffene Konstruktion die Sedimentation auf dem flachen Strand. Auch hier verlagert sich die Uferlinie seewärts. Bei allen Konstruktionsvarianten ist jedoch seewärts der Buhnenfelder die Tieferlegung der Vorstrandsedimente zu beobachten.

5.2 Vergleich der Wirkung der offenen, halboffenen und geschlossenen Buhnen auf die Oberflächensedimente.

In dem Buhnenfeld 7-8 (halboffen) setzen unmittelbar nach dem Bau der Buhnen umfangreiche Feinsandanreicherungen (< 0,200 mm) in dem offenen Abschnitt des Buhnenfeldes ein (Abb. 35). Dagegen nahm in dem geschlossenen Bereich des halboffenen Buhnenfeldes die Fraktion des feinen Mittelsandes (0,200 mm - 0,350 mm) deutlich zu. Die Sedimentation feiner Sande (< 0,200 mm) ist ein Zeichen der Reduzierung von Turbulenzen und der Verringerung der küstenparallelen Strömung in dem offenen Abschnitt des halboffenen Buhnenfeldes. Die gröberen Sande in dem geschlossenen Bereich des halboffenen Buhnenfeldes lassen hier im Gegensatz zu dem offenen Abschnitt auf höhere Strömungen und Turbulenzen schließen. In Abhängigkeit zur Entwicklung der Bathymetrie, insbesondere durch die Verschiebung der Uferline, verlagert sich auch der Bereich des feinen Mittelsandes seewärts.

Durch die unterschiedliche Energiebelastung des Vorstrandes variieren die Grenzen dieses Korngrößenbandes im Buhnenfeld. Bemerkenswert ist, daß die Korngrößenbänder normalerweise küstennormal ausgerichtet sind. Die Grenze zwischen den feinsanddominierten Oberflächensedimenten und jenen Sanden, die einen hohen Gew.-%-Anteil an der Fraktion des feinen Mittelsandes aufweisen, liegt im allgemeinen dort, wo die offene Bauweise in die geschlossene Konstruktionsvariante übergeht.

Die Entwicklung der Sedimentoberfläche in dem Buhnenfeld 2-3 (offen) ist nicht so eindeutig. Die Sedimentmächtigkeit über der hochliegenden Geschiebemergeloberfläche beträgt häufig nur wenige Zentimeter. Daher sind bereits kleinere hydrologische Ereignisse in der Lage, sehr unterschiedliche Sedimentverteilungsmuster entstehen zu lassen. Die Anreicherung von Feinsanden ist geringer und weniger flächendeckend als in dem halboffenen Buhnenfeld. Die stark variierenden Feinsandanteile am Gesamtsediment deuten hier auf größere Turbulenzen hin als in dem Buhnenfeld mit halboffenen Buhnen.

Die Sedimente in dem geschlossenen Buhnenfeld sind in der Regel gröber als in dem halboffenen Buhnenfeld, insbesondere dort, wo sich die strandnahe Rinne ausgebildet hat. Hier sind höhere Strömungen anzunehmen. In diesem Zusammenhang ist auch das seewärts gerichtete Einbiegen der Korngrößenbänder entlang der Buhnen zu beachten. Es ist ein deutliches Zeichen für stärkere Ausgleichsströmungen entlang der geschlossenen Bauwerkskörper.

Das Sedimentverteilungsmuster in dem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen läßt gegenüber dem Feld mit den halboffenen Buhnen auf größere Turbulenzen und die Ausbildung von stärkeren Ausgleichsströmungen schließen.

5.3 Vergleich der Wirkung der halboffenen und geschlossenen Buhnen auf den Sedimenttransport während Starkwindlagen

Bei Starkwindereignissen aus unterschiedlichen Richtungen tritt sowohl in dem Buhnenfeld mit halboffenen Buhnen als auch in dem Buhnenfeld mit geschlossenen Bauwerken ein seewärts gerichteter Sedimenttransport auf.

Innerhalb des geschlossenen Buhnenfeldes hat sich ein aus Wirbel- und Rippströmungen bestehendes Zirkulationssystem ausgebildet. Dieses ist maßgeblich für den seewärts gerichteten Transport der Sande verantwortlich. Sie werden entlang der Buhnen über die Streichlinie hinaus in tiefere Bereiche der Schorre gelenkt. Hier erfolgt bei geschlossenen Buhnen der Küstenlängstransport. Mit der Ausbildung derartiger Zirkulationssysteme gelangen auch Sedimente in das Buhnenfeld hinein. Anhand der geringen Anzahl der in das Buhnenfeld hineinbewegten Farbsande wird jedoch deutlich, daß dieser Sedimentstrom nur untergeordnet stattfindet (vgl. Abb. 29).

Die halboffene Buhnenkonstruktion ermöglicht einen Sedimenttransport durch das Bauwerk hindurch. Im Gegensatz zur geschlossenen Bauweise der Buhnen wird nur ein geringer Anteil der küstenparallel bewegten Sande durch Rippströmungen entlang der Bauwerke über die Streichlinie hinausgetragen. Der überwiegende Sedimenttransport erfolgt in dem offengeschlagenen Abschnitt der Buhnen. Damit verbleiben die Sande strandnah auf dem flachen Vorstrand. Wesentlichste, resultierende bathymetrische Veränderungen ist hier die Bildung von Terrassen.

Besonders deutlich sind die unterschiedlichen Wirkungen der beiden Konstruktionen in dem Bereich der Schwappzone. Dort werden in dem geschlossenem Abschnitt der halboffenen Buhne die Strandsedimente in einem wesentlich geringeren Umfang aus dem Buhnenfeld hinausgetragen als in dem Buhnenfeld mit geschlossenen Buhnen. Durch die Farbsanduntersuchungen konnte aufgezeigt werden, daß innerhalb des geschlossenen Abschnittes der halboffenen Buhnen kein großflächiges Wirbelsystem entstanden ist. Als mögliche Ursache dafür ist die geringe Länge des geschlossenen Abschnittes dieser Konstruktionsvariante anzunehmen. Außerdem ist davon auszugehen, daß geringere Turbulenzen hier die Verweildauer der Sande erhöhen.

5.4 Die Küste der Probstei

Im Küstenvorfeld der Probstei (östliche Kieler Außenförde, vgl. Abb. 1, Gebiet 2) werden seit ca. 20 Jahren umfangreiche Untersuchungen zu den verschiedensten Bereichen küstennaher Transportprozesse (anthropogen beeinflußt und unbeeinflußt) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in einer Vielzahl von Publikationen und Berichten zusammengefaßt, von denen nur die wesentlichsten hier genannt sein sollen (ALW et al. 1997, KACHHOLZ 1979, 1982, 1984, KÖSTER & SCHWARZER 1988, LWI 1979, REISCH 1994, SCHWARZER 1989, 1991, 1994). Sie werden in den folgenden Kapiteln auszugsweise dargestellt.

Im Westen liegt das Kliff von Stein, die östliche Grenze bildet das Todendorfer Kliff. Beide Steilufer sind aktiv, jedoch trägt aufgrund des Ost-West gerichteten Sedimenttransportes nur das Kliff von Todendorf zum Sedimenthaushalt der Strand-Vorstrandzone bei. Das wesentlichste Materialliefergebiet ist der Vorstrand selbst. Er wird küstennah durch ein uferparalleles Sandriffsystem dominiert, das unter Zunahme der Riffzahl von Ost nach West immer weiter auffächert (Abb. 37 u. 38). Im Akkumulationsgebiet vor dem Bottsand erreicht es mit einer Riffzahl bis zu 10 und einer Breite bis zu 700 m seine maximale Ausdehnung. Nach der WYRTKI schen Einteilung von Küsten ist der zentrale Teil vor der Probstei als eine offene physiographische Einheit zu bezeichnen (vgl. Kap. 2.1 Geologie u. Morphologie). Die Grund-konfiguration

- Erosionsgebiet (Kliff und Seegrund selbst)
- Sedimentdurchsatzgebiet
- Akkumulationsgebiet

ist mit der Situation vor Warnemünde vergleichbar.

5.4.1 T-Buhnen in der Probstei

Von 1974 bis 1989 wurden entlang der Probsteiküste umfangreiche Küstenschutzmaßnahmen durchgeführt. Sie umfaßten u.a. den Bau eines Landesschutzdeiches, die Errichtung von Buhnen und einige Sandvor- und Aufspülungen. Die Buhnen bestehen im Gegensatz zu den geraden einreihigen Holzpfahlbuhnen vor Warnemünde aus Bruchstein. Sie sind an dem Buhnenkopf mit einem Wellenbrecher (Querwerk) versehen. Er gibt den Buhnen damit eine T-Form. Die Kronenhöhe des Buhnenkörpers (Längswerk) beträgt 1,00 m ü. NN., jene des Wellenbrechers (Querwerk) 1,50 m ü. NN. Das Bauwerk wird damit nur bei extremsten Hochwasserlagen überströmt. Es ist nicht durchlässig. Die T-Buhnen haben eine Länge von 100 m. Das Längen- / Breitenverhältnis der Buhnenfelder beträgt 1:2. Durch den 40 m breiten Querriegel wird die seewärtige Öffnung des Buhnenfeldes im Buhnenstrich eingeengt.

Dieses T-förmige Buhnensystem hat vornehmlich die Aufgabe, den Strand zu stützen (FÜHRBÖTER et al. 1979). Die Buhnen sollen die Mobilität der Sande auf den Aufspülflächen einschränken. Aufgrund der längeren Verweildauer des Spülgutes wird die Vorstrandstabilität erhalten.

5.4.2 Wirkung der T-Buhnen auf die Bathymetrie

Nach Untersuchungen von KÖSTER & SCHWARZER (1988), SCHWARZER (1989) und ALW et al. (1997) haben sich die Bauwerke positiv auf die morphologische Entwicklung in den Buhnenfeldern ausgewirkt. Bereits kurz nach Beendigung der Baumaßnahme setzte an den Buhnenstielen (Längswerk) eine Sedimentation ein. Insbesondere im Schutz der Wellenbrecher (Querwerke) reicht in einigen Feldern der trockene Strand bis an den Buhnenkopf heran (ALW et al. 1997). Im Zentrum der Buhnenfelder wurden demgegenüber zunächst die während der Baumaßnahme eingebrachten Sande erodiert (ALW et al. 1997). Anhand von zahlreichen, über mehrere Jahre durchgeführten Vermessungen zeigt sich jedoch, daß letztendlich in den meisten Buhnenfeldern die Materialbilanz ausgeglichen ist. Probleme hinsichtlich des Sedimentvolumens im Buhnenfeld bereiten die Felder, bei denen das Verhältnis von Buhnenlänge zu gegenseitigem Buhnenabstand 1:2 unterschritten wird.

Entlang der Querriegel treten zeitweise tiefe Kolke auf. Sie entstehen durch Strömungswalzen in Lee des Bauwerkes. Lage, Größe und Tiefe der Kolke werden durch die aktuelle Wellenanlaufrichtung und Wellenhöhe variiert. Aus Tauchbeobachtungen ist bekannt, daß diese Kolkungen unbeständig sind und schon nach kürzester Zeit wieder aufgefüllt sein können.

Innerhalb der Buhnenfelder stellten sich die größten Veränderungen unmittelbar nach dem Abschluß der Baumaßnahme ein. Es kam im Mittelteil (Bereich Kalifornien) zu einem erheblichen Materialdefizit, das nur durch eine Sandvorspülung ausgeglichen werden konnte. Von 1986 bis 1990 wurden in mehreren Schüben ca. 520.000 m³ Sand vorgespült (SCHWARZER 1994).

Besonders starke Veränderungen der Vorstrandmorphologie entstehen nach einem Ereignishochwassser. Als dessen Wirkung werden die Strände abgebaut und das Material je nach Wellenanlaufrichtung seewärts und/oder im Küstenlängstransport verfrachtet und an geeigneter Stelle deponiert. Gleichzeitig verlagert sich die Riffmorphologie seewärts. Auf der Basis einer Vielzahl von Vermessungen in einem nur 6-wöchigen Zyklus konnte jedoch festgestellt werden, daß die Auswirkungen solcher Sturmwetterlagen auf natürliche Weise bereits nach 4 bis 6 Wochen wieder ausgeglichen sein konnten (ALW et al. 1997).

5.4.3 Wirkung der T-Buhnen auf die Oberflächensedimente

Vor der Errichtung der Buhnen waren in dem Küstenabschnitt Kalifornien großflächige Steinund Kiesfelder auf dem Vorstrand vorhanden (ALW et al. 1997). Die Sandriffzone war hier sehr weit ausgedünnt. Unmittelbar nach Fertigstellung des Deiches setzte sich dort das defizitäre Sedimentbudget fort, sodaß bereits 1 Jahr nach der Fertigstellung des Deiches eine erste Sandvorspülung erfolgte. Die letzte Strandernährung wurde 1990 durchgeführt. Seither sind die Strand- und Vorstrandverhältnisse stabil. Auch in den übrigen Buhnenfeldern hat sich gezeigt, daß sich seit ihrer Fertigstellung die Uferline stabilisiert hat. Die Reichweite der Buhnenwirkung auf die Oberflächensedimente seewärts der Wellenbrecher (Querwerk) ließ sich anhand von Veränderungen in der Sedimentverteilung bestimmen. Es hat sich gezeigt, daß dieser Buhnentyp bei den in der Probstei herrschenden Verhältnissen bis zu 30 m seewärts des Buhnenkopfes auf die Sedimente einwirkt. Die Korngrößenverteilungen sind in diesem Bereich heterogener zusammengesetzt, was auf eine gegenüber der Umgebung etwas erhöhte Turbulenz schließen läßt (ALW et al. 1997).

5.4.4 Wirkung der T-Buhnen auf den Sedimenttransport

Zur Ermittlung der Transportprozesse während einer Ereigniswetterlage wurden 1987 von SCHWARZER (1989) in dem zentralen Buhnenfeld vor Kalifornien Farbsandexperimente durchgeführt. Es gelang, die Auswirkungen einer NE-Sturmwetterlage auf die Transportprozesse im Strand-/Vorstrandbereich dadurch zu erfassen, daß im Strand eingegrabene Leitstoffe (Luminophoren) durch das Sturmereignis freigesetzt und bei Beprobungen unmittelbar an zwei aufeinanderfolgenden Tagen nach diesem Sturmereignis wiedergefunden wurden.

Innerhalb des Buhnenfeldes hatte sich ein zentraler Rippstrom ausgebildet. Die Ausbildung eines solchen zentralen Rippstromes ist häufig an senkrecht zur Küste auftretende Wellenfelder gebunden (KOLMAR 1983). Die freigesetzten Sedimente wurden vom Strand bis über die Streichlinie hinaus seewärts verfrachtet. Nahezu das gesamte Kornspektrum der bewegten Sande folgte den gleichen Bewegungsbahnen, vom Strand in die zwischen Strand und Riff liegende Rinne und von dort durch einen Rippstrom und durch das Riff hindurch auf die Abrasionsfläche. Ein Rücktransport in das benachbarte Buhnenfeld über die Streichlinie der Buhnenköpfe hinaus erfolgte nicht. Das wäre nach den Ergebnissen aus den Messungen vor Warnemünde unter den Bedingungen einer Ereigniswetterlage auch nicht zu erwarten gewesen. Da der Buhnenstil wie ein geschlossenes Bauwerk wirkt, wird dieser Rippstrom analog zu den Buhnen vor Warnemünde durch diese selbst induziert worden sein. Eine Differenzierung der Fraktionen des bewegten Sedimentes geschah allein über die Transportgeschwindigkeit.

5.5 Vergleich der Wirkungen von einreihigen Holzpfahlbuhnen vor Warnmünde mit den T-Buhnen vor der Küste der Probstei

Ein Vergleich zwischen der Wirkung von Buhnen in verschiedenen Küstenregionen mit unterschiedlichen Buhnentypen unterliegt üblicherweise großen Einschränkungen, da jeder Küstenabschnitt seine eigenen besonderen Merkmale aufweist TEUSCHL (1940). Die Voraussetzung für diese vergleichende Bewertung ist daher, daß die Regionen ähnliche geologischsedimentologische, morphologische und hydrologische Rahmenbedingungen aufweisen (ALW et al. 1997). Diese wichtigen Grundvoraussetzungen werden von beiden Küstenregionen annähernd erfüllt.

Alle Buhnenvarianten haben eine gemeinsame Wirkung auf die Strand- und Vorstrandsedimente, denn sie greifen steuernd in die Sedimentationsprozesse ein. Dieses wird sowohl für die Probstei als auch für Warnemünde erwartet. An beiden Vorstrandabschnitten finden diese Steuerungsprozesse statt. Dennoch ergeben sich zum Teil deutliche Unterschiede. So bewirkt der offene, halboffene und geschlossene Holzpfahlbuhnentyp die Entwicklung einer geraden Küstenlinie. Sie wird durch die T-förmige Steinbuhne nicht gefördert. Hier entsteht aufgrund der Sedimentakkumulation im Schutze des in der Regel nicht überströmten Wellenbrechers eine konkave Uferlinie. Eine positive oder negative Bewertung dieser Küstenform hängt entscheidend von dem Sedimentangebot auf der Schorre ab.

Nach ALW et al. (1997) trat während eines Starkwindereignisses in einigen Buhnenfeldern eine verstärkte Erosion in der Buhnenfeldmitte auf. In manchen Fällen wurden in dem Zentrum der Ausbuchtung an der schmalsten Stelle des Strandes zwischen der Wasserlinie und dem Deckwerk sogar Schäden an der Ufersicherung festgestellt. Ähnliche negative Auswirkungen während Starkwindereignissen sind aus dem Buhnensystem mit geschlossenen Holzpfahlbuhnen nicht bekannt. Die möglichen Ursachen für die unterschiedliche Entwicklung der Bathymetrie werden in der Tabellen 13 und 14 aufgezeigt.

In der Sedimentverteilung bestehen deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Konstruktionsvarianten. Die Ausrichtung der Korngrößenbänder folgt im allgemeinen der Bathymetrie. Die Sedimentverteilung in der offenen bzw. halboffenen Buhnenvariante zeigt einen deutlichen zonalen, küstenparallelen Verlauf der Korngrößenbänder. Diese biegen in den geschlossenen Buhnenfeldern im Gegensatz zu den offenen Konstruktionen entlang der Bauwerke seewärts ein. Während in dem Buhnenfeld vor Warnemünde die Sedimente entlang der Buhnen deutlich gröber werden, sind solche Veränderungen der Sande entlang der T-Buhnen der Probstei nicht zu beobachten.

Die Wirkung der geschlossenen Buhnen (einreihige Holzpfahlbuhne, T-förmige Steinbuhne) auf den Küstenlängstransport sind nahezu gleich. Beide Konstruktionen unterbrechen den Küstenlängstransport auf dem flachen Vorstrand. Innerhalb der Buhnenfelder treten Wirbelund Zirkulationssysteme auf. Es ist anzunehmen, daß die Wellenbrecher (Querwerke) grundsätzlich keinen Einfluß auf die Ausbildung eines Zirkulationssystems haben.

Deutliche Unterschiede zwischen den geschlossenen Buhnenvarianten können jedoch mit einem ansteigenden Wasserstand entstehen. Bei dem Überströmen der Buhnenkrone läßt die Neigung zu einer Rippstrom- und Wirbelbildung innerhalb des Buhnenfeldes nach. Aufgrund der großen Bauwerkshöhe ist die Möglichkeit des Überströmens der T-förmigen Steinbuhne sehr gering. Die Pegelstände und die maximalen Wellenhöhen (H_{max}), die in einem Zeitraum von 1992 bis 1994 während Starkwindereignisse aufgezeichnet wurden, zeigen, daß die Buhnenkörper nur zu maximal 10 % überspült und lediglich zu 4 % getaucht wurden.

Bedingungen				
Ort:	Warnemünde			Probstei
Konstruktion:	Pfahlbuhne			Schüttbuhne
Merkmal:	gerade			T-Form
Material	Holz			Bruchstein
Bauweise	offen	halboffen	geschlossen	geschlossen
Verhältnis Länge/Breite	1/1	1/1	1/1	1/2
Bathymetrie				
seewärtige Verschiebung der gesamten Uferlinie	+	+	+	
seewärtige Verschiebung der Uferlinie insbeson-				+
dere in den Buhnenzwickeln				
gute Wirkung als Strandstütze		+	+	+
Verlagerung des Sandriffes in den Buhnenstrich				
Verlagerung des Sandriffes in das Buhnenfeld		+		
hinein				
Erhöhung des Vorstrandes in dem Buhnenfeld		+		+* ¹
seewärts der Uferlinie				
Tieferlegung von Abschnitten der Schorre				
seewärts des Buhnenfeldes				
starke Kolkungen an den Buhnen		<u>*</u> *2	NUTLING	<u>*</u> *3
Lee-Erosion				
Sedimentologie				
Förderung der Sedimentation am Ufer (Uferlinie)	+	+	+	+
Förderung der Sedimentation im gesamten		+		
Buhnenfeld (Terrassenbildung)				
Förderung der Sedimentation im gesamten				+
Buhnenfeld, insbesonders entlang der Buhnen				
Sedimenttransport durch das Bauwerk hindurch	+	+		
möglich				
Überwiegend küstennormaler Sedimenttransport		* ²		
in den Buhnenfeldern				
Überwiegend küstenparalleler Sedimenttransport	+	+		
in den Buhnenfeldern				
Deutliche Zunahme der Sedimentmächtigkeit im		+		
Buhnenfeld				
direkte Einflußnahne des Bauwerkes auf die		* ²		
Korngrößenhäufigkeitsverteilung der Sande im				
Buhnenfeld				
Bildung von Zirkulationssystemen	*4			<u>*</u> *
Hydrologie				
Minderung der Küstenlängsströmung im Buhnen-	+	+		
feld				
Unterbrechung der Küstenlängsströmung im		* ²		
Buhnenfeld				
Starke Ausgleichsströmungen entlang der Buhnen		<u>*</u> * ² * ⁶	* ⁶	
Reflektion der Wellen				
Diffraktion der Wellen		<u>*</u> *2	* ⁴	

Tab. 13: Vergleich der Wirkung von Buhnen: Warnemünde - Probstei

Anmerk.: siehe Tabelle "Anmerkungen"

Anmerkungen				
+	positive Bewertung der Wirkung der Buhnen			
	negative Bewertung der Wirkung der Buhnen			
*1	Annahme: deutlicher Einfluß der Sandaufschüttung			
*2	gilt nur für den geschlossenen Abschnitt der halboffenen			
	einreihigen Holzpfahlbuhne			
*3	gilt nur für den Querriegel an der T-förmigen Steinbuhne			
*4	Es liegen keine Daten vor			
*2	nach ALW et al. (1997)			
*6	Trifft nur zu, wenn die Buhnen nicht überströmt werden			

Tab. 14:Mögliche Ursachen für die Unterschiede in der Entwicklung der Bathymetrie in
den geschlossenen Buhnenfeldern (Warnemünde, Probstei)

Nr.		Warne-	Probstei
		münde	
1	Energiedissipation am Strand hauptsächlich im Bereich des Fensters zwischen den Wellenbrechern		X
2	Energiedissipation am Strand über den gesamten Strandabschnitt	X	
3	Bauwerk überströmt	X	
4	Bauwerk nicht überströmt		X
5	bei Sturmereignissen: Ausbildung von starken Ausgleichsströmungen in der		
	Feldmitte (Wirkung: Erosion; mögliche Ursache: Einengung des Feld-		X
	querschnittes durch die Wellenbrecher, keine Ausgleichsströmungen bei		
	einem erhöhten Wasserstand über die Buhnenkrone hinweg möglich (siehe		
	Nr. 4)		
6	Ausbildung von tiefen Kolken und starken Walzenströmungen unter Ereig-		X
	nisbedingungen am Buhnenkopf. Folge: Starke punktuelle Belastung des		
	Vorstrandes.		
7	Ausbildung von Walzen- und Zirkulationssytemen unter Ereignisbedingungen	Х	X
	im gesamten Buhnenfeld.		* 1, * 2
8	Lee-Erosionserscheinungen im Bereich der Buhnen	Х	X

Anmerk.: *¹ Es liegen keine Daten aus den ersten Jahren nach dem Bau der Buhnen vor. *² Nach ALW et al. (1997). Vier Jahre nach der Errichtung der Buhnen

6. Zusammenfassung

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde das Ziel verfolgt, die Wirkung von drei unterschiedlichen Holzbuhnenkonstruktionen auf die Entwicklung der Vorstrandsedimente vor Warnemünde zu ermitteln. Ein weiterer Buhnentyp - die T-förmige Steinbuhne vor der Küste der Probstei - wurde als Vergleich zu den Holzbuhnenkonstruktionen betrachtet. Die Untersuchungsergebnisse basieren auf Echolotungen, Kartierungen, Sedimententnahmen, Messungen mit Luminophoren, Sondierungen und Sedimentkernen.

Es werden zwei Themenkomplexe bearbeitet:

1. Die Verfügbarkeit von Sedimenten auf der Schorre vor Warnemünde. Sie ist für den Erfolg eines Buhnensystems von großer Bedeutung:

Anhand von Sondierungen und Seegrundbeprobungen konnte für den Küstenabschnitt zwischen Geinitz-Ort und dem Beginn des Buhnensystems eine Sedimentbedeckung von durchschnittlich 11 m³/lfd. m ermittelt werden. Die Sedimentmenge ist hauptsächlich auf dem inneren Sandriff akkumuliert. Im Vergleich zu anderen Küstenabschnitten - z. B. der Hohwachter Bucht mit einer durchschnittlichen Menge von 52 m³/lfd. m (REIMERS 1993) ist dieser Sedimentvorrat ausgesprochen gering. Dies wird besonders deutlich, wenn man berücksichtigt, daß z. B. nach den Sandaufspülungen in der Probstei ca. 120 m³/lfd. m auf dem Strand und Vorstrand vorhanden waren. Allein durch die Strandaufschüttung in Warnemünde im Jahre 1992 standen in den betroffenen Küstenabschnitten mehr als die doppelte Sedimentmenge zur Ausbildung der Vorstrandbathymetrie zur Verfügung als durch den Küstenlängstransport möglich wäre.

2. Die Wirkung unterschiedlicher Konstruktionen von Holzpfahlbuhnen (offen, halboffen, geschlossen) vor Warnemünde und der Steinbuhnen in der Probstei auf die Bathymetrie, die Ausbildung der Sedimentoberfläche und den Sedimenttransport.

In allen Buhnenvarianten zeigt sich eine gemeinsame Reaktion der Bathymetrie auf die Errichtung der Buhnen: Die Uferlinie verschiebt sich seewärts. Zusätzlich wird der Vorstrand seewärts der Streichlinie der Buhnen erodiert und vertieft. Bauwerksabhängige Unterschiede bestehen jedoch in der Distanz der seewärtigen Verschiebung der Uferlinie und in der Küstenform.

Unabhängig von der Konstruktionsvariante der Holzbuhnen verläuft die Uferlinie zwischen den Bauwerken überwiegend nahezu geradlinig da durch die Möglichkeit des Überströmens die Kräfte gleichmäßiger auf dem Vorstrand verteilt werden. Demgegenüber entwickelt sich zwischen den T-förmigen Steinbuhnen ein etwas konkaver Küstenverlauf. Ursache für diese Unterschiede ist nicht nur allein der Wellenbrecher der T-Buhne sondern insbesondere das nicht Überströmen des Bauwerkes.

In allen Buhnenvarianten, mit Ausnahme der halboffenen Bauweise, zeigte sich nach der Errichtung der Buhnen die seewärtige Verlagerung des Sandriffes in tiefere Bereiche auf der Schorre. Das Riff-Rinnensystem blieb in seiner morphologischen Ausprägung überwiegend bestehen. In der Entwicklung der Bathymetrie zeigen sich jedoch Unterschiede zwischen den einzelnen Buhnentypen. Die Sedimentation von Feinsanden (< 0,200 mm) führte in der offenen und halboffenen Buhnenvariante zur Auffüllung der strandnahen Rinne. Außerdem wanderte das Sandriff in dem halboffenen Buhnenfeld auf den Strandhang zu und bildet dort eine Terrasse.

Besonders deutliche Unterschiede zwischen den Buhnenfeldern mit einer offenen bzw. halboffenen Konstruktion bestehen innerhalb des seewärtigen Abschnittes der Buhnenfelder. Hier tritt in dem offenen Buhnenfeld nur eine zeitlich und räumlich begrenzte positive Veränderung der Bathymetrie auf. Demgegenüber entwickelt sich in dem Buhnenfeld mit halboffenen Bauwerken die Terrasse stetig weiter.

Die Sedimentverteilung in den Buhnenfeldern weist starke Parallelen zu der Veränderung der Bathymetrie auf. In allen Buhnenfeldern setzen die Veränderungen in der Sedimentverteilung unmittelbar nach der Fertigstellung des Buhnensystems ein. Innerhalb von 18 Monaten ist sie größtenteils abgeschlossen. Im Hinblick auf die Sedimentzusammensetzung herrscht nun ein stabiler Zustand vor. Geringe Variationen in den Oberflächensedimenten sind überwiegend auf die jahreszeitlich unterschiedlichen hydrodynamischen Verhältnisse zurückzuführen oder an temporäre meteorologische oder hydrologische Ereignisse gebunden.

Die Entwicklung der Sedimente innerhalb der verschiedenen Buhnenvarianten zeigen folgende Gemeinsamkeit: die Anreicherung von feinen Mittelsanden an der vorrückenden Uferlinie. Die Zunahme dieser feinen Mittelsande ist ein Zeichen einer höheren energetischen Belastung der Oberflächensedimente auf dem flachen Vorstrand. Sie entsteht hier durch die Erhöhung der Sedimentoberfläche.

Deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Konstruktionsmerkmalen lassen sich seeseitig der Uferlinie erkennen. In dem Buhnenfeld mit halboffenen Buhnen kommt es über weite Bereiche des Buhnenfeldes zu einer umfangreichen Feinsandanreicherung. Demgegenüber konnte sich in dem Buhnenfeld mit offenen Buhnen nur eine geringmächtige Sedimentdecke entwickeln. Hier sind bereits geringe hydrodynamische Ereignisse in der Lage, sehr unterschiedliche Sedimentverteilungsmuster entstehen zu lassen. In den Oberflächensedimenten des geschlossenen Buhnenfeldes treten höhere Gew.-%-Anteile des feinen Mittelsandes (0,200 mm - 0,350 mm) auf als in den Sedimenten der offenen und halboffenen Buhnen. Es ist anzunehmen, daß hier deutlich stärkere Turbulenzen und Strömungen auf die Sedimentoberfläche einwirken.

In der Bewertung der Wirkungsweise der Buhnen ist zwischen einer Normalwindlage und einer Starkwindlage zu unterscheiden. Während der Untersuchungen wurden für die Küste von Warnemünde typische meteorologische und hydrodynamische Bedingungen angetroffen. Es ist davon auszugehen, daß die generelle Wirkungsweise der Buhnen in diesem Küstenraum damit erfaßt wurde.

Die Experimente zur Ermittlung des Sedimenttransportes während der Normalwindlagen erfolgten nur in und vor einem geschlossenen Buhnenfeld. Dennoch ist anzunehmen, daß auch für die anderen Buhnenvarianten gilt, daß bei schwachen bis mäßigen Winden aus den seegangswirksamen Sektoren Vorstrandsedimente in das Buhnenfeld hineintransport werden können. Eine Differenzierung des bewegten Materiales in einzelne Korngrößenfraktionen erfolgt nahezu nur über die Transportdistanz. Eine Differenzierung in korngrößenspezifische Bewegungsbahnen tritt kaum auf.

In Abhängigkeit von der Windstärke und der Dauer des Ereignisses kann sich bei stärkeren Winden während einer Normalwindlage in einem geschlossenen Buhnenfeld ein Wirbel- und Zirkulationssystem ausbilden. Mit der Zunahme der Windgeschwindigkeit sowie der Turbulenzen und der Strömungen auf dem Vorstrand erfolgt ein Übergang von dem landwärts gerichteten Sandtransport, der die Sedimentation fördert, zu dem Zirkulationssystem. Der Übergang wird maßgeblich von der Stärke der Ausgleichsströmungen bestimmt.

Während der Starkwindlagen dominiert ein seewärtiger Sedimenttransport. Es werden jedoch nicht nur Sande aus dem seewärtigen Abschnitt des Buhnenfeldes über die Streichlinie seewärts geführt, sondern auch die Sande von der Schwappzone auf dem Strandhang. Zeitweise konnte dieser seewärtige Transport bis über das äußere Sandriff hinaus festgestellt werden.

Der Sedimenttransport variiert in Abhängigkeit vom Bauwerkstyp sowohl in seinem Umfang als auch in der Entfernung von der Uferlinie. Die halboffene Buhnenkonstruktion verhindert die Ausbildung eines großräumigen Zirkulationssystems innerhalb des Buhnenfeldes. Die Öffnungen in den Buhnenkörpern lassen hier eine Küstenlängsströmung zu. Daher erfolgt auch der überwiegende Sedimenttransport auf dem flachen Vorstrand.

Die geschlossenen Buhnen (einreihige Holzpfahlbuhne, T-förmige Steinbuhne) drängen den küstenparallelen Sedimenttransport in die tieferen Bereiche der Schorre hinaus. Der Küstenlängstransport erfolgt hier erst seewärts der Streichlinie. Innerhalb des Buhnenfeldes bildet sich ein Zirkulationssystem aus. Die erosive Wirkung von Zirkulationssystemen kann anhand eines Vergleiches der Stabilität von Ufersedimenten in den Buhnenfelden mit unterschiedlichen Bauwerkskonstruktionen aufgezeigt werden: Dort, wo sich kein Zirkulationssystem ausgebildet hat (halboffenes Buhnenfeld), wurde ein wesentlich geringerer Sedimenttransport von der Uferlinie aus dem Buhnenfeld hinaus festgestellt als dort, wo Turbulenzen und zirkulierende Strömungen die Sande mobilisieren und fortführen. Entscheidend für diese Unterschiede sind die Ausgleichsströmungen. Sie treten normalerweise entlang der Bauwerke auf.

Unter bestimmten, variierenden hydrodynamischen Bedingungen können unterschiedliche korngrößenspezifische Bewegungsbahnen bei dem Sedimenttransport auftreten. Im allgemeinen wird unter den turbulenten Bedingungen in der Brandungszone das gesamte Korngrößenspektrum bewegt. Unter Normalwindbedingungen bei schwachen Winden treten die Sande < 0,106 mm vorwiegend als Suspensionsfracht und Sedimente > 0,106 mm häufig als Rollfracht auf. Bei Starkwindereignissen kann sich in Abhängigkeit zu der Stärke der Ereignisse diese Grenze auf 0,300 mm bis 0,350 mm verschieben. Es ist anzunehmen, daß sie unter Sturmbedingungen zwischen wesentlich gröberen Sedimentfraktionen anzutreffen ist.

Auch lokal können Unterschiede in dem Sedimenttransport auftreten. Unter bestimmten Starkwindbedingungen werden die Fraktionen < 0,125 mm überwiegend auf dem Riffkörper

bewegt. Der Transport der Sande > 0,125 mm erfolgt maßgeblich in den Rinnen. Jedoch auch hier varriieren die Fraktionsgrenzen in Abhängigkeit zu den hydrologischen Bedingungen.

Bei küstennormal ausgerichteten Starkwindereignissen kann sich in einem Buhnenfeld ein zentraler Rippstrom bilden. Die Entstehung dieser Ausgleichsströmung wurde sowohl in dem Buhnenfeld mit halboffenen Buhnen festgestellt als auch in dem Buhnenfeld mit T-förmigen Bauwerken erfaßt. Die Auflösung dieser Strömung in dem offenen Abschnitt des halboffenen Buhnenfeldes zeigt deutlich, daß die geschlossene Bauweise (geschlossene Buhne oder geschlossener Teil der halboffenen Buhne) die Entstehung eines zentralen Rippstromes fördert.

Zu der Beurteilung der Wirkungsweise von unterschiedlichen Buhnenkonstruktionen bedarf es aufgrund der unterschiedlichen hydrodynamischen Rahmenbedingungen von Fall zu Fall einer genauen Differenzierung. Die Höhe des aktuellen Wasserstandes und der Wellen sowie die Kronenhöhe des Bauwerkes beeinflussen die Wirkung der Buhne auf die Sedimentbewegungen. Überspülte, überströmte oder getauchte Buhnen verlieren je nach dem Umfang des Wasserübertrittes ihren Einfluß auf den küstenparallelen Sedimenttransport. Die Strömungen über das Bauwerk hinweg verringern die Bildung von Ausgleichsströmungen und fördern den geradlinigen Verlauf der Uferlinie. Die Wirbel- oder Zirkulationssysteme werden bis zu ihrer Auflösung modifiziert. Die Wirkungsweise überströmter oder getauchter Buhnen nähert sich damit der Wirkungsweise durchlässiger Buhnen.

Eine Wirkung der Buhnen während eines außergewöhnlich heftigen Sturmhochwassers am 3. bis 4. November 1995 mit senkrecht zur Küste anlaufenden Wellen war erwartungsgemäß nicht festzustellen. Feine Sedimente wurden großflächig aus den Buhnenfeldern erodiert. Von vergleichbaren Vorgängen berichtet KÖSTER & SCHWARZER (1988) in den T-Buhnenfeldern der Probstei. Zwischen den unterschiedlichen Bauwerkskonstruktionen konnten daher keine nennenswerten Unterschiede in der Wirkung auf die Sedimentoberfläche festgestellt werden. Wenige Monate nach dem Hochwasser waren die Sedimentverluste insbesondere durch den Eintrag von Strand- und Dünensedimenten (Warnemünde) zum größten Teil wieder ausgeglichen.

7. Empfehlung

Auf der Basis der gewonnenen Ergebnisse wird deutlich, daß die halboffene einreihige Holzpfahlbuhne weitaus größere Vorteile in Bezug auf die Akkumulation und insbesondere die Stabilität von Sedimenten während <u>Starkwindlagen</u> in den Buhnenfeldern in dem Küstenraum vor Warnemünde aufweist als die offene oder geschlossene Buhnenvariante. Ebenfalls sind Vorzüge gegenüber der geschlossenen T-förmigen Steinbuhne an der Küste der Probstei zu erkennen. Die halboffene Bauweise ist aus folgenden Gründen zu empfehlen:

Der offene Abschnitt der halboffenen Buhnen ermöglicht den Küstenlängstransport durch das Bauwerk hindurch. Im Gegensatz zu den geschlossenen Buhnenkonstruktionen werden die Sedimente nahezu kaum seewärts in die tieferen Regionen der Schorre transportiert. Sie bleiben auf dem flachen Vorstrand. Es bilden sich keine großräumigen Wirbel- und Zirkulationssysteme. Sie werden aus folgenden Gründen verhindert:

- Im offenen Abschnitt läßt der Küstenlängstransport eine Wirbelbildung nicht zu. Der geschlossene Abschnitt der halboffenen Buhne ist zu kurz, um ein großräumiges Zirkulationssystem auszubilden. Treten zentral im Buhnenfeld oder entlang der Buhnen Ausgleichsströmungen auf, so werden sie im offenen Abschnitt aufgelöst oder stark vermindert.
- Ein Überströmen der Buhnen ermöglicht eine Küstenlängsströmung über das Bauwerk hinweg. Die Neigung zur Ausbildung von Ausgleichsströmungen innerhalb des Buhnenfeldes wird reduziert. Damit nimmt der seewärts gerichtete Sedimenttransport deutlich ab.

Die Reduzierung von Turbulenzen und die Unterbrechung des Küstenlängstransportes führen in dem geschlossenen Abschnitt der halboffenen Buhne zu einer verstärkten Sedimentation von Feinsanden. Ein Zeichen dieser positiven Akkumulationsbedingungen ist die Bildung einer Terrasse auf dem flachen Vorstrand innerhalb des geschlossenen Abschnittes des halboffenen Buhnenfeldes sowie die seewärts gerichtete Verschiebung der Uferlinie.

Mit der Sedimentation wird die Sedimentoberfläche erhöht. Sie unterliegt daher verstärkt dem Einfluß der Brandungsenergie. Die feineren Sedimentfraktionen werden ausgewaschen. Die Anreicherung der Fraktion des feinen Mittelsandes in der turbulenten Brandungszone auf dem Strandhang zeigt, daß diese Fraktion unter "normalen" hydrodynamischen Bedingungen besonders lagestabil ist.

Unter "außergewöhnlichen" hydrodynamischen Bedingung, wie sie z. B. während des Sturmhochwassers vom 03/04.11.1995 herrschte, ist sowohl von den halboffenen Buhnen als auch von den offenen und geschlossenen Buhnenvarianten keine nennenswerte Wirkung zu erwarten.

8. Literaturverzeichnis

8.1 Arbeitsgrundlagen

AMT FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT KIEL UND DAS LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT SCHLESWIG-HOLSTEIN; LEICHTWEISS-INST. FÜR WASSERBAU AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG & GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INST. UND MUSEUM DER UNIVERSITÄT KIEL: (1997): Vorstranddynamik einer tidefreien Küste.- Abschlußbericht: 232 S.; (unveröff.).

BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU - BAW (1987): Anfärben von rolligem Material mit fluorezierenden Farbstoffen (Lumis) - Abrollversuche mit gefärbtem Material.- Interner Bericht: 18 S.; Kiel.

BASINSKI, T. (1994): Wirkungsweise und Konstruktion von Seebuhnen an der polnischen Ostseeküste.- Monographie im Rahmen des KFKI-Themas MTK 0546: 187 S.; Gdynia.

DETTE, H. H.; RAUDKIVI, A. J.; MAGNERE-WEND, N. & SCHÜTTRUMPF, H. (1994): Untersuchungen zu Hafenstandorten auf dem Fischland, Darß und Zingst.- Ber. d. Leichtweiss-Inst. f. Wasserbau d. TU Braunschweig, 783: 353 S.; Braunschweig.

DETTE, H. H.; RAUDKIVI, A. J. & TRAMPENAU, T. (1995): Zur Wirkungsweise der Buhnen als eine Küstenschutzmaßnahme.- Ber. d. Leichtweiss-Inst. f. Wasserbau d. TU Braunschweig, 788: 88 S.; Braunschweig.

DETTE, H. H.; NEVE, J. & TRAMPENAU, T. (1996): Windstatistik Warnemünde von 1980 bis 1994 - ein Erläuterungsbericht.- Ber. d. Leichtweiss-Inst. f. Wasserbau d. TU Braunschweig, 801: 13 S.; Braunschweig.

DIEDERICH, H.-G. & WEISS, D. (1986): Untersuchungen zur Wirkungsweise von Buhnen in ausgewählten Küstenabschnitten mit Erarbeitung eines Anlagenkatasters und Empfehlungen für den effektiven Bau von Buhnen.- Bericht der Wasserwirtschaftsdirektion Küste - Abt. Küstenforschung: 116 S.; Warnemünde (unveröff.).

ERTEL, H. (1967): Theorie der Strömung um Seebuhnen.- Manuskript der Wasserwirtschaftsdirektion Küste: 8 S.; (Anmerk.: im Literaturbestand des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur Rostock) Rostock (unveröff.).

FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H. & MANZENRIEDER, H. (1979): Buhnensysteme als Stabilisatoren für Sandaufspülungen an der Probstei.- Ber. d. Leichtweiss-Inst. f. Wasserbau d. TU. Braunschweig, 457: 101 S.; Braunschweig.

FÖRSTER, J. (1988): Untersuchungen zur auromatischen Erfassung und Zählung von Luminophorentracern in natürlichen Sänden.- Dipl. Arb. Univ. Kiel IAP: 150 S. Kiel (unveröff.)

KACHHOLZ, K.-D. (1978): Gestalt und Entwicklung der Ostseeküste im Bereich Laboe - Bottsand.- Dipl. Arb. Math.- Naturw. Fakult. Univ. Kiel: 214 S. (unveröff.).

KÖSTER, R.(1979b): Bearbeitung von Sedimentproben zur Bestimmung der Kornverteilung in der Gruppe Küstengeologie des Geol-Paläont. Inst. Univ. Kiel.- (unveröff.).

KÖSTER, R. & SCHWARZER, K.(1988): Geologische Untersuchungen zur Sandaufspülung vor der Probstei/Ostseeküste - Untersuchungszeitraum 4/87 bis 6/88.- Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel: 113 S. (unveröff.).

KÖSTER, R.; SCHWARZER, K. & SCHRADER, E. (1993): Sedimentologische Untersuchungen zur Funktionsweise von Buhnen im Küstenraum vor Rostock-Warnemünde.- Bericht Geol.-Paläont. Inst. Kiel: 31 S.; (unveröff.).

MIEHLKE, O.; WEISS, D.; BARDUBITZKI, I.; GURWELL, B.; JÄGER, B.; WIEMER, R. & ZIELISCH, E. (1982): Dokumentation - Hydro- und Sedimentdynamik des Küstenabschnittes Warnemünde-West und Vorschlag für ein Schutzsystem.- Abschlußbericht der Wasserwirtschaftsdirektion Küste - Abt. Küstenhydrographie: 75 S.; Warnemünde (unveröff.).

MINISTERIUM FÜR BAU LANDESENTWICKLUNG UND UMWELT DES LANDES MECKLENBURG-VORPOMMERN: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern.- 108 S., Schwerin.

REIMERS, H.-Ch. (1993): Geologische Kartierung eines Küstenabschnittes zwischen Neuland und Lippe (westl. Ostsee) & Granulometrische Untersuchungen zum sedimentologischen Aufbau eines der Küste vorgelagerten Sandriffes einschließlich der Abrasionsfläche.- Dipl.-Arb. Geol.-Paläont. Inst.Univ. Kiel, 1-2: 92 S. Kiel. (unveröff.).

REISCH, F. (1994): Untersuchungen zur Strand- und Vorstrandmorphologie ausgewählter Abschnitte der schleswig-holsteinischen Ostseeküste (eine Luftbild- und Kartenauswertung).-Dipl.-Arb. Geogr. Inst. Univ. Kiel: 144 S. Kiel. (unveröff.).

SCHLÜTER, H. (1994): Sedimentpegel-Messungen im Meßfeld Warnemünde 1993/94 - Bestandteil des KFKI-/-BMFT-Projektes über die Wirkungsweise von Einbauten in See.- Ber.: 20 S.; Warnemünde (unveröff.).

SCHULZ, W. (1995): Bericht über die geologische Situation an der Ostseeküste vor dem hochwassergefährdeten Diedrichshagener Moor sowie im Stadtgebiet von Warnemünde.- Ber.: Geol. Landesamt Meckl-Vorp.: 10 S. Schwerin (unveröff.).

SCHWARZER, K. (1989): Sedimendynamik in Sandriffsystemen einer tiedefreien Küste unter besonderer Berücksichtigung von Rippströmen.- Ber.-Reports, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, 33 270 S.; Kiel.

STAATLICHES AMT FÜR UMWELT UND NATUR ROSTOCK; LEICHTWEISS-INST. AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG & GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INST. UND MUSEUM DER UNIVERSITÄT KIEL (1994, 1995, 1996, 1997): Forschungsvorhaben über die Wirkungsweise von Einbauten in See.- Zwischenber.: 1-4; Rostock (unveröff.).

TEUSCHEL (1940) [Originalarbeit konnte nicht beschafft werden]. Zitiert in: FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H. H. & MANZENRIEDER, H. (1979): Buhnensysteme als Stabilisatoren für Sandaufspülungen an der Probstei.- Ber. d. Leichtweiss-Inst. f. Wasserbau d. TU Braunschweig, 457: 101 S.; Braunschweig. UVE (1994): Multitemporale Luftbildauswertung zur Erfassung und Bewertung langfristiger morphologischer Veränderungen eines Küstenabschnittes der Ostsee bei Warnemünde; Teil 1: 24 S.; Teil 2: 12 S.; Berlin; Potsdam (unveröff.).

WEHNER, K. (1991): Bericht über die Durchführung geowissenschaftlicher Untersuchungen zur rezenten Sedimentdynamik im Küstengebiet vor Rostock-Warnemünde im Jahre 1991.-Ber. Ges. Umwelt u. Wirtschaftsgeol., 1/2: 22 S.; Berlin; Grimmen (unveröff.).

8.2 Literatur

AAGARD, T. & GREENWOOD, B. (1993): Sediment transport by waves and currents in a barred surf zone.- Proc. Canadian Coastal Conf. 1993, S. 602-614; Vancouver/British Columbia.

AAGARD, T.; NIELSEN, J.; GREENWOOD, B.; CHRISTIANSEN, C.; LUNDHANSEN, L. & NIELSEN, N. (1995): Coastal morphodynamics at Skallingen, SW - Denmark: Low and moderate energy conditions.- In: Geografisk Tidsskrift, 95: S. 1-10; Kopenhagen.

AHRBERG, N. (1995): Ergebnisse einer küstenmorphologischen Untersuchung des Buhnenfeldes von Blaavand (Dänemark).- RADTKE, U. [eds]: Vom Südatlantik bis zur Ostsee - neue Ergebnisse der Meeres- und Küstenforschung.- Kölner Geographische Arbeiten, 66:71-81; Köln.

ALLEN, J. R. L. (1982): Sedimentary structures - their character and physical basis.- Develop. in Sed. 33 a/b: 663 S.; Amsterdam; New York.

ASTER; D.; JÜRGENS, H. H. & WEITZEL, H. (1989): Buhnenbauten auf Borkum.- Hansa - Zentralorgan für Schiffahrt, Schiffbau und Hafen, 126 (21): 1411-1481, Hamburg.

BAKKER, W. T. (1968): The Dynamics of a coast with a groyne system. - Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 11 (1): 492-517; New York.

BAKKER, W. T.; HULSBERGEN, C. H.; ROELSE, P.; SMIT, C. de & SVASEK, J. N. (1984): Permeable groynes: Experiments and practice in the Netherlands.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 19 (2): 2026-2041; New York.

BARCELO, J. B. (1968): Experimental study of the hydraulic behaviour of groyne systems.-Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 11 (1): 526-548; New York.

BENCARD, J. (1966): Der Küstenschutz im Rostocker Raum - Entwicklung und Perspektive.-In: GELLERT, J. F. [eds]: Wiss. Abh. Geogr. Ges. DDR, 4: 45-47; Leibzig.

BOON, J. D. (1969): Quantitative analysis of beach sand movement, Virginia Beach, Virginia.-Sedimentology, 13: 85-103; Amsterdam.

BRESSAU, S. & SCHMIDT, R. (1979): Die Sedimente im Küstengebiet der Probstei.- Ein Beitrag zu Sedimenthaushalt und Dynamik von Strand, Sandriffen und Abrasionsfläche.- Mitt. Leichtweiß Inst. f. Wasserbau d. TU Braunschweig, 65: 191-209; Braunschweig.

BURHORN, E. (1951): Seebuhnen an Küsten mit schwachen Gezeiten und starker Sanddrift.-In: Sonderdruck aus der Zeitschrift: Planen und Bauen 5/3: S. 57-62; Leibzig.

BÜLOW, K. v. (1951): Schwermineralseifen an der mecklenburgischen Ostseeküste.- Arch. f. Lagerstättenfor., 81: 25-32; Berlin.

CERC (1975, 1984): Shore Protection Manual.- U.S. Army, Corps of Eng., Coastal Eng. Research Center [Hrsg]; Vickysburg.

CROTOGINO, A. (1985): Ein Beitrag zur numerischen Modellierung des Sedimenttransports in Verbindung mit vertikal integrierten Strömungsmodellen.- Ber. d. Inst. f. Strömungsmechanik und elektron. Rechnen im Bauwesen der Univ. Hannover, 17: 113 S.; Hannover.

DAVISON, A (1984): A pree-dredging sand mobility study using a radioisotope tracer.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 19 (2): 2063-2076; New York.

DIECKMANN, R. (1995): Baumaßnahmen im Küstengebiet.- Hansa - Zentralorgan für Schiffahrt, Schiffbau und Hafen 132 (4): 73-76; Hamburg.

DUANE, D. B. (1970): Synoptic observations of sand movement.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 12 (1): 799-813; New York.

DUANE, D. B. & JAMES W. R. (1980): Littoral transport in the surf zone elucidated by an Eulerian sediment tracer experiment.- J. of Sed. Petrol., 50 (3): 928-942; Amsterdam.

DUPHORN, K. (1979): The Federal Republic of Germany.-In: GUDELIS, V. & KÖNIGSSON, L.-K. [eds]: The quarternary history of the Baltic.- Acta Univ. Ups. Symp. Annum Quingentesimum Celebratis, 1: 195-206; Upsala.

EAK (1993): Empfehlungen für Küstenschutzbauwerke: Die Küste, 55: 541 S.; Heide i. Holstein.

ENDO, N.; MASUDA, F. & YOKOKAWA, M. (1996): Grain-size distributions of sediment carried by single transportation modes in an experimental microdelta system.- Sedimentology Geology, 102: 297-304; Amsterdam.

FLEMMING, C. A. & SWART, D. H. (1982): New framework for prediction of longshore currents.- Proc. Coastal. Eng. Conf. ASCE, 18 (2): S. 1640 - 1658; New York.

FLEMMING, C. A. (1990a): Principles and effectiveness of groynes.- In: PILARCZYK, K. [eds]: Coastal protection.- Proc. Delft Univ. of Technology; S. 121-156; Rotterdam.

FLEMMING, C. A. (1990b): Guide on the use of groynes in coastal engineering.- Constuction Industry Research and Information Association (CIRA) Report, 119: 114 S.; London.

FOSTER, G. A; HEALY, T. R. & LANGE, W. P. de. (1996): Presaging beach renourishment from a nearshore dredge dump mound, Mt. Maunganui Beach, New Zealand.- J. Coastal. Res., 12 (2): 395-405; Fort Lauderdale/Florida.

FRIEDMAN, G. M. (1962): On sorting, sorting cefficients and lognormality of the grain size distribution of sandstones.- J. Geol., 70: 737-756; Chicago.

GEINITZ, E. (1902): Die geologischen Aufschlüsse (Litorina Ablagerungen) des neuen Warnemünder Hafenbaus.- Mitt. Großherzogl. mecklbg. geol. Landesanstalt, 14: 3-6; Rostock.

GEINITZ, E. (1907): Die Stoltera bei Warnemünde.- Mitt. Großherzogl. Mecklbg. Geol. Landesamt, 19: 25 S.; Rostock.

GRAFF. J.v.d. (1990): Dune and beach erosion and nourishment.- In: PILARCZYK, K. [eds]: Coastal Protection.- Proc. Delft Univ. of Technology: S. 99-120; Rotterdam.

GRAW, K. U. (1995): Wellenenergie - eine hydromechanische Analyse.- In: KALDENHOFF, H.[eds]: Berichte d. Inst. f. Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, 8: 310 S.; Berlin.

GREENWOOD, B. & DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D. (1975): Marine bars and nearshore sedimentary processes, Kouchibouguac Bay, New Brunswick.- In HAIL, J. & CARR, A. [eds]: Nearshore sediment dynamics and sedimentation: 123-150; London.

GREENWOOD, B. & DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D. (1979): Sedimentation and equilibrium in wave-formed bars: A review and case study.- Can. J. of Earth Sci. 16 (2): 312-332; Ottawa.

GUTSCHE, H. K. (1961): Über den Einfluß von Strandbuhnen auf die Sandwanderung an Flachküsten.- Mitt. Franzius Inst. f. Grund- u. Wasserbau d. TU Hannover 20: 74 - 211; Hannover.

HATTORI, M. & ARAMI, A. (1992): Impact breaking wave pressures on vertical walls.-Intern. Conf. on Coastal Eng., 23: 409-410; Venice (Italy).

HORIKAWA, K. (1988): Nearshore dynamics and coastal processes - Theory, Measurement and predictive Models.-; Tokyo.

HULSBERGEN, C. H.; BAKKER, W. T. & BOCHOVE, G.v. (1976): Experimental verification of groyne theory.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 17 (2): 1439-1458; New York.

HURTIG, Th. (1954): Die Mecklenburgische Boddenlandschaft und ihre entwicklungsgeschichtlichen Probleme - Einbeitrag zur Entwicklungsgeschichte der Ostsee.-148 S.; Berlin.

KACHHOLZ, K.-D. (1979): Sedimenttypen der Flachwasserzone im Ostteil der Kieler Außenförde (Schleswig-Holstein).- Meyniana, 31: 15-24; Kiel.

KACHHOLZ, K.-D. (1982): Statistische Bearbeitung von Probendaten aus Vorstrandbereichen sandiger Brandungsküsten mit verschiedener Intensität der Energieumwandlung.- Diss. Math.- Naturwiss. Fakult. Univ. Kiel: 381 S.; Kiel.

KANA, Th. & WARD, L. G. (1980) Nearshore suspended load during storm and poststorm conditions.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 17 (1): 1158-1174; New York.

KOLP, O. (1958): Sedimentsortierung und -umlagerung am Meeresboden durch Wellenwirkung.- Peterm. Geogr. Mitt., 3: 173-178; Gotha. KOLP, O. (1966): Untersuchungen über die Wirksamkeit von Seebuhnen mit farbigem Sand.-Beitr. z. Meereskunde, 17/18: 61-90; Berlin.

KOLP. O. (1970): Farbsandsversuche mit lumineszenten Sanden in Buhnenfeldern - Ein Beitrag zur Hydrographie der ufernahen Meereszone.- Peterm. Geogr. Mitt., 114: 81-102; Gotha.

KOMAR, P. D. (1977): Selective longshore transport rates of different grain-size fractions within a beach.- J. of Sed. Petrol., 47 (4): 1444-1453; Thulsa/Oklahoma.

KOMAR, P. D. (1983): CRC Handbook of coastal processes and erosion.- 305 S.; Florida.

KÖSTER, E. (1952): Die Veränderungen im Steilufer und in der Strandterrasse des Naturschutzgebietes Stoltera bei Warnemünde.- Die Küste, 2: 153-158; Heide i. Holstein.

KÖSTER, R. (1979a): Die Sedimente im Küstenbereich der Probstei.- Mitt. d. Leichtweiss Inst. f. Wasserbau d. TU Braunschweig, 65: 166-189; Braunschweig.

KRESSNER, B. (1928): Modellversuche über die Wirkung von Brandungswellen und des Küstenstromes auf einen sandigen Meeresgrund und die zweckmäßige Anlage von Strandbuhnen.- In: Mitt. aus der Versuchsanstalt für Wasserbau der Techn. Hochschule Danzig: 16 S.; Diss. T.U. Danzig; Danzig.

KRUMMBEIN, W. C. (1936): Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments.- J. Sed. Petrol., 6 (1): 35-47; Tulsa/Oklahoma.

KRYSTIAN, W. & PILARCZYK. M. Sc. (1996): Novel system for coastal protection - an overview.- In: RUZ, I. E. & REYES, J. A. (Univ. Nacional del Surv / Argentina) [eds]: Proc. of the Bahia Blanca intern. Coastal Symp., 181-192; Argentinien.

LANESKY, D. E.; LOGAN, B. W.; BROWN, R. G. & HINE, A. C. (1979): A new approach to portable vibrocoring under water and on land.- J. Sed. Petrol., 49, 654-657; Tulsa /Oklahoma.

LONGUET-HIGGINS, M. S. (1972): Recent process in the study of longshore currents.-MEYER, R.E. [eds.]: Waves on beaches and resulting sediment transport: 203-248; London, New York.

LUDWIG, A. O. (1964): Stratigraphische Untersuchungen des Pleistozäns der Ostseeküste von der Lübecker Bucht bis Rügen.- Geologie, 13, Beih. 14: 143 S.; Berlin.

LWI (1979): Die Sedimente im Küstenraum der Probstei.- Mitt. d. Leichtweiss Inst. f. Wasserbau d. TU Braunschweig; 65: 427 S.; Braunschweig.

MADISON, O. S. (1988): Use of tracers in the sediment transport studies.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 21 (1): 424-435; New York.

MAYERLE, R.; SCHRÖTER, A. & ZIELKE, W. (1995): Simulation of nearshore wave current interaction by coupling a Boussinesq wave model with a 3d hydrodynamic model.-Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 24 (2): 2340-2364; New York. MEYER, K.-D. (1991): Zur Entstehung der westlichen Ostsee.- Geolog. Jb., 127: 429-446; Hannover.

MEYER, F. & RICKERT, K. (1995): Ausbau der Zufahrt zum Seehafen Rostock.- Hansa - Zentralorgan für Schiffahrt, Schiffbau und Hafen, 132 (8): 88-93, Hamburg.

MINISTERIUM FÜR BAU, LANDESENTWICKLUNG UND UMWELT DES LANDES MECKLENBURG-VORPOMMERN (1994): Umweltbericht 1994.- 20 S.; Schwerin.

MURRAY, S. P. COLEMAN, J. M.; ROBERTS. S. & SALAMA, M. (1980): Eddy currents and sediment transport off the Damietta Nile.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 17 (2): 1681-1699; New York.

NAGAI, S. (1956): Arrangements of groynes on a sandy beach.- Proc. Jour. Waterway and Habours Div. ASCE: 82 S.; New York.

NERSESIAN, G. K.; KRAUS, N. C. & CARSON, F. C. (1992): Functioning of groins at Westhampton Beach, Long Island, New York.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 23 (3): 3357-3370; New York.

NISHIMURA, H. & TAKEWAKA, S. (1990): Experimental and numerical study on solitary wave breaking.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 22 (1): 1033-1045; New York.

NÖTEL, H. (1994): Statistisch-numerische Beschreibung des Wellen- und Strömungsgeschehens in einem Buhnenfeld.- Ber. d. Inst. f. Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen der Univ. Hannover, 39: 146 S.; Hannover.

NORDSTROM, K. F. (1994): Developed coasts.- In: CARTER, R. W. G. & WOODROFFE, C. D. [eds]: Coastal evolution: 477-501; Cambridge.

NODA, H. (1984): Depositional effects of offshore breakwater due to onshore-offshore sediment movement.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 19 (2): 2009-2025; New York.

OEBIUS, H. U. (1979): Modelluntersuchungen über das hydrodynamische Verhalten von oberflächenmarkierten und nicht markierten Sanden.- In: Sandbewegungen im Küstenraum-Rückschau, Ergebnisse und Ausblick.- DFG-Abschlußbericht: 244-251; Boppard.

ORME, A. R. (1980): Energy-sediment interaction around a groin.- In: ORME, A. R.; PRIOR, D. B.; PSUTY, N. P. & WALKER, H. J. [eds]: Coasts under Stress.- Z. f. Geomorphologie, 34: 111-128; Berlin; Stuttgart.

OSTROWSKI, R.; PRUSZAK, Z. & ZEIDLER, R. B. (1990): Multi-scale nearshore & beach changes.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 22 (2): 2101-2115; New York.

PAHLKE, H. (1976): Messungen von Sandbewegungen mit Leitstoffen.- In: Sandbewegungen im Küstenraum- Rückschau, Ergebnisse und Ausblick.- DFG-Abschlußbericht: 273-292; Boppard.

PAHLKE, H. & GRIMM-STRELE, J. (1972): Kritischer Überblick über die im deutschen Küstenbreich mit radioaktiven Tracern durchgeführten Sandwanderungsmessungen.- In: Strahlungs- und Isotopenanwendung im Bauwesen, 1: 217-278; Brüssel.

PETERSEN, M. (1952): Abbruch und Schutz der Steilufer an der Ostseeküste.- Die Küste, 1: 101-152; Heide i. Holstein.

PETERSEN, M. (1961): Das deutsche Schrifttum über Seebuhnen an sandigen Küsten.- Die Küste, 9: 1-57; Heide i. Holstein.

PRICE, W. A. & TOMLINSON, K. W. (1968): The effect of groynes on stable beaches.-Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 11 (1): 518-525; New York.

PRICE, W. A. & TOMLINSON, K. W. (1970): The effect of groynes on eroded beaches.-Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 12 (1): 1053-1058; New York.

PRICE, W. A.; TOMLINSON, K. W. & WILLIS, D. H. (1972): Field tests on two permeable groynes.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 13 (2): 1401-1408; New York.

PRUZSZAK, Z. & ZEIDLER, R. B. (1992): Beach changes and sediment movement in the surf zone.- Intern. Conf. on Coastal Eng., 23: 403-404; Venice (Italy).

PRUZSZAK, Z. & ZEIDLER, R.B. (1994): Sediment transport in various time scales.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 24 (3): 2513-2526; New York.

Quick, M.C. (1991): Onshore-offshore sediment transport on beaches.- Coastal Eng., 15: 313-332; Amsterdam.

RAID, W. J. & JOLLIFFE, I. P. (1961): Coastal experiments with fluorescent tracers.- The Dock & Harbour Authority, 484: 341-347; London.

REINECK, H. E. (1984): Aktuogeologie klastischer Sedimente.- 348 S.; Frankfurt a. M.

RIJN, L. C.v. & KROON, A. (1992): Sediment transport in combined currents and waves.-Intern. Conf. on Coastal Eng., 23: 102-103; Venice (Italy).

ROGGE, H. J. (1959): Beitrag über die geologischen Verhältnisse im Raume Warnemünde unter Berücksichtigung des Hafenbaues.- Ber. Geol. Ges., 4: 237-242; Berlin.

ROY, P. S.; COWELL, P. J.; FERLAND, M. A. & THOM, B. G. (1994): Wave-dominated coasts.- In: CARTER, R.W.G. & WOODROFFE, C.D. [eds]: Coastal Evolution.- 121-186; Cambridge.

RUCK, K.-W. (1967): Erfahrungen mit Sandwanderungsuntersuchungen mittels Luminophoren.- Die Wasserwirtschaft, 10: 363-367; Stuttgart.

SASAKI, T.O.; ASCE, M. & SAKURAMOTO, H. (1984): Effect of rip current barrier on harbor shoaling.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 19 (2): 2091-2105; New York.

SATO, Sh. & TANAKA, N. (1980): Artificial resort beach protected by offshore breakwaters and groins.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 17 (2): 2003-2022; New York.

SCHULZ, W. & PETERS, K. (1989): Geologische Verhältnisse im Steiluferbereich des Fischlandes sowie zwischen Stoltera und Kühlungsborn.- Mitt. d. Forschungsanstalt f. Schifffahrt, Wasser- und Grundbau Berlin, 54: 132-148; Berlin.

SCHWARZER, K. (1989a): Sedimendynamik in Sandriffsystemen einer tidefreien Küste unter besonderer Berücksichtigung von Rippströmen.- Ber.-Reports, Geol. Paläont. Inst. Univ. Kiel, 33; 270 S.; Kiel.

SCHWARZER, K. (1989b): Auswirkungen der Januarflut auf den Sedimenthaushalt des Strand- und Vorstrandbereiches vor der Probsteiküste.- Die Küste, 50: 31-44; Heide.

SCHWARZER, K. (1991): Sedimentverteilung im Strand- und Vorstrandbereich nach einer Sandvorspülung (Probstei/Schleswig-Holstein).- Meyniana, 43: 59-71; Kiel.

SCHWARZER, K. (1994): Auswirkungen der Deichverstärkung vor der Probsteiküste/Ostsee auf den Strand und Vorstrand.- Menyiana, 46: 127-147; Kiel.

SCHWARZER, K.; RICKLEFS, K.; SCHUMACHER, W. & ATZLER, R. (1996): Beobachtungen zur Vorstranddynamik und zum Küstenschutz sowie zum Sturmereignis vom 3./4. 11. 1995 vor dem Streckelsberg/Usedom.- Meyniana, 48: 49-68; Kiel.

SHERMAN, D. J.; BAUER, B. O. NORDSTROM, K. F. & ALLEN, J. R. L. (1990): A tracer study of sediment transport in the vicinity of a groin: New York, U.S.A.- J. of Coastal Research, 6 (2):427-438; Fort Lauderdale/Florida.

SMITH, A. W. & GORDON, A. D. (1980): Secondary sand transport mechanisms.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 17 (2): 1122-1139; New York.

SORENSEN, T. (1961): The development of coast profiles on a receding coast protected by groynes.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 7 (2): 836-847, New York.

STERNBERG, R. W.; SHI, N. C.& DOWNING, J. P. (1984): Field investigations of suspended sediment transport in the nearshore zone. .- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 19 (2): 1782-1796; New York.

STIGGE, H. J. (1995): The local effect of storm surges on the Baltic Coast.- Hydrocoast - International Workshop on Water related Problems in low-laying Coastal Areas.- 130-137; Bangkok/Thailand.

STIGGE, H. J. (1996): Was man über Ostseesturmfluten wissen sollte.- In: REDIECK, M & SCHADE, A. [eds]: Dokumentation einer Sturmflut vom 3. und 4. November 1995 an den Küsten Mecklenburg-Vorpommerns.- 17-19; Rostock.

SUNAMURA, T. (1980): A laboratory study of offshore transport of sediment and a model for eroding beaches.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 17 (2): 1051-1070; New York.

TAMIO, O. & SAKURAMOTO, H. (1984): Effect of rip current barrieron habor shoaling.-Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 19 (2): 2092-2109, New York. TARNOWSKA, M. (1985): Wplyp dlugosci ostrogi na zmiany bathymetryczne strefy brzegowej.- Inzynieria Morska, 1. In: BASINSKI, T. (1994): Wirkungsweise und Konstruktion von Seebuhnen an der polnischen Ostseeküste.- Monographie im Rahmen des KFKI-Themas MTK 0546: 187 S.; Gdynia.

TINIAKOS, L. (1978): Transportdifferentiation von Korngrößen klastischer Sedimentgesteine aus der Westküste Schleswig-Holsteins.- Diss. Math.- Naturwiss. Fakult. Univ. Kiel: 349 S.; Kiel.

TOLA, F.; CAILLOT, A.; COZURTOIS, G.; GOURLEZ, P.; HOSLIN, R.; MASSIAS, J. QUESNEY, M. & SAUZAY, G. (1984): Study of evolution of dredged material dischanges by means of radioactive tracers.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE; 19 (2): 2042-2062; New York.

TOMLINSON, J. H. (1983): Groynes in coastal engeneering - a literature survey and summary of recommended practice.- Hydraulics Research Report IT, 199: 20 S.; Wallingfort.

TUCKER, M. (1996): Methoden der Sedimentologie.- 366 S.; Stuttgart.

WALKER, D. J.; DONG, P. & ANASTASIOU, K. (1991): Sediment transport near groynes in the nearshore zone.- J. Coastal Res., 7 (4): 1003-1011; Fort Lauderdale/Florida.

WATANABE, A.; RIHO, Y. & HORIKAWA, K. (1980): Beach profiles and on-offshore sediment transport. - Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 16 (2): 1106-1121; New York.

WATANABE, A. & ISOBE, M. (1990): Sand transport rate under wave-current action.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 22 (3): 2495-2507; New York.

WEBB, R. & WEGGEL, J. R. (1995): Design of groynes and groin fields: Dimensional consideration.- Proc. of the COPEDEC IV- International Conference on Coastal & Port Eng. in Develop. Countries, 5 (1): 229-245; Rio de Janeiro (Brasil).

WELLS, J. D. (1952): Erosion problems on the Ohio shore of Lake Erie.- Shore and Beach, 20 (1): 5-8; New York.

WEISS, D. (1991a): Einreihige Holzpfahlbuhnen im technischen Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern.- Die Küste, 52: 205-224; Heide i. Holstein.

WEISS, D. (1991b): Küstenschutzbauwerke an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern.- Wasser und Boden, 1: 17-26; Berlin.

WEISS, D. (1992): Schutz der Ostsee von Mecklenburg-Vorpommern.- In: KRAMER, J. & ROHDE, H. [eds]: Historischer Küstenschutz.- 535-567; Stuttgart.

WEISS, D. & BIERMANN, S. (1996): Sturmfluten - Angriff und Gefahr für die Küste unter besonderer Berücksichtigung des 3. und 4. November 1995.- In: REDIECK, M & SCHADE, A. [eds]: Dokumentation einer Sturmflut vom 3. und 4. November 1995 an den Küsten Mecklenburg-Vorpommerns.- 20-30; Rostock.

WIEMER, R. & GURWELL, B. R. (1991): Die Ostseeküste in Mecklenburg-Vorpommern.-Wasser u. Boden, 1: 13-16; Berlin. WHITE, Th. E. & INMAN, D. L. (1989a): Meassuring longshore transport with tracers.- In: SEYMOUR, R. J. [ed]: Nearshore sediment transport.- 287-312; New York.

WHITE, Th. E. & INMAN, D. L. (1989b): Transport determination by tracers - Application of Tracer Theory to NSTS Experiments.- In: SEYMOUR, R. J. [ed]: Nearshore sediment transport.- S. 115-128; New York.

WRIGHT, D. D.; THOM, B. G. & CHAPPELL, J. (1978): Morphodynamic variability of high-energy beaches.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 16 (3): 1180-1194; New-York.

WYRTKI, C. (1953): Die Bilanz des Längstransportes in der Brandungszone.- Dtsch. Hydrogr. Zeit., 6 (2): 65-77, Berlin.

YAMAGUCHI, M, & NISHIOKA, Y. (1984): Numerical simulation on the change of bottom topography by the presence of coastal structures.- Proc. Coastal Eng. Conf. ASCE, 19 (2): 1732-1747; New York.

ZANDER, R. (1934): Die rezenten Änderungen der Mecklenburgischen Küste.- Beiheft Mitt. Geogr. Ges. Rostock, 1: 32 S.; Rostock.

ZANKE, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung.- S. 402; New York, Berlin, Heidelberg.

ZHDANOV, A. M. (1964): Stabilization of shingle alluvial shores by groins of full profile.-U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center Bulletin, 1: 32-40; Ford Belvoir.

Anhang



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes. (V1 Warnemünde, V2 Probstei)



Abb. 2a: Das Untersuchungsgebiet



Abb. 2b: Luftbild des Untersuchungsgebietes



BEACH

OCEAN

Groin

Adjusted

Shoreline



Original | Shoreline



a. Rip current formation due to channeling of longshore current.



b. Circulation within a groin compartment due to variation in longshore setup.



General shoreline configuration for two or more groins.

Direction of Net Longshore Transport

c. Circulation cell within a groin compartment due to energy dissipation at the groins and variable setup.

Abb. 3: Die Wirkung von einfachen Buhnen auf die Wassermassenzirkulation und den Sedimenttransport (CERC 1984)



Abb. 4: Empfohlenes Verhältnis von Buhnenlänge, Abstand, Durchlässigkeit, Schorreneignung und Uferbelastung bei einreihigen Holzpfahlbuhnen (EAK 1994)



Abb. 5: Die Meßbrücke am Strand von Warnemünde.



Abb. 6: Das Buhnensystem östlich der Meßbrücke.


Abb. 7: Lage der Untersuchungsprofile in den Meßfeldern



.





Abb. 9: Gegenüberstellung unterschiedlicher Korngrößenmaße



Abb. 10: Beeinflussung von Uferlinienentwicklung und Riffkammentwicklung durch den Buhnenbau



Abb. 11: Veränderung der Bathymetrie im Buhnenfeld 7-8 (1990-1993; 1990-1996)



Abb. 12: Feinsandkarte (Gew-% Anteil < 0,200 mm)



Abb. 13: Mächtigkeit der Sedimentbedeckung im Untersuchungsgebiet





Abb. 14: Entwicklung von Mittelwert und Sortierung im Buhnenfeld 7-8 von 1991 bis 1996



Abb. 15: Jahreszeitliche Variation in der Sedimentverteilung 5/94 - 10/94



Abb. 16: Entwicklung des Sedimentes im Bereich der Buhne 7 (5/94)



Abb. 17: Entwicklung des Sedimentes im Bereich der Buhne 7 (10/94)



Abb. 18: Entwicklung von Mittelwert und Sortierung im Buhnenfeld 7/8 von 5/94 bis 5/95



Abb. 19: Vergleich halboffene/geschlossene Buhne







Abb. 20: Entwicklung des Sedimentes im Buhnenfeld 2 - 3 von 5/93 - 10/96







Abb. 21: Entwicklung des Sedimentes im Buhnenfeld 2-3 von 5/93 - 10/96, Buhnenprofil 3/10





Abb. 22: Feinsandkarte, Buhnenfeld 2 - 3, November 1995



Abb. 23: Bathymetrische Aufnahme September 1994.



Abb. 24: Bathymetrische Aufnahme Warnemünde Juni 1996.



- a) Ausgabe Tracer: rot ⊕
- b) Ausgabe Tracer: grün 🔺
- 1) Pegel:

Windmessung StAUN Strömungsmessung LWI

2) Strömungsmessung LWI

Abb. 25: Auslagepunkte der Tracer (Oktober 1993)









Abb. 26a: Tracerverteilung im Oktober 1993; 2 u. 17 Std. nach Ausgabe roter und grüner Luminophoren



16.10.1993





Abb. 26b: Tracerverteilung im Oktober 1993; 46 u. 88 Std. nach Ausgabe roter und grüner Luminophoren



Abb. 27: Skizze der Transportrichtung der Tracersande (Okt. 1993, alle Fraktionen, Gesamtzeitraum)



- a) Ausgabe Tracer: orange
- b) Ausgabe Tracer: blau
- 1) Pegel: Windmessung StAUN Strömungsmessung LWI
- 2) Strömungsmessung LWI

Abb. 28: Auslagepunkte der Tracer (Oktober 1994)









Abb. 29: Tracerverteilung im Oktober 1994; 2 u. 21 Std. nach Ausgabe blauer und oranger Luminophoren









Abb. 30: Tracerverteilung im Oktober 1994; 48 u. 96 Std. nach Ausgabe blauer und oranger Luminophoren



Abb. 31: Skizze der Transportrichtung der Tracersande (Okt. 1994, alle Fraktionen, Gesamtzeitraum)



a) Ausgabe Tracer: rot

b) Ausgabe Tracer: grün 🔺

1) Pegel:

Windmessung StAUN Strömungsmessung LWI

2) Strömungsmessung LWI

Abb. 32: Auslagepunkte der Tracer (Juni 1996)



Abb. 33: Tracerverteilung im Juni 1996; 20 Std. nach Ausgabe grüner und roter Luminophoren









Abb. 34: Tracerverteilung im Juni 1996; 45 u. 96 Std. nach Ausgabe grüner und roter Luminophoren



Abb. 35: Skizze der Transportrichtung der Tracersande (Juni 1996, alle Fraktionen, Gesamtzeitraum



Abb. 36: Feinsandkarte November 1996 (B7 - B8)



ADD. 37. Luitona des Rustenvortendes deux



Abb. 38: Der Untersuchungsraum Probstei