Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen Postfach 44 67 - 24043 Kiel Hindenburgufer 247 - 24106 Kiel

E 2 7. Marz 1995 A-18. April 1995

KFKI - Forschungsvorhaben

"Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen"

Teilprojekt des Geologischen Instituts der Universität Kiel

- Sedimentumlagerungen und Schichtstrukturen -

Abschlußbericht

Bearbeiter:

DIPL.- GEOL. OLAF OTTEN

Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum der Universität Kiel Arbeitsgruppe Küstengeologie

Projektleiter:

PROF. DR. R. KÖSTER

Dezember 1994

030965 Sil.-1

Abschlußbericht

des KFKI - Forschungsvorhabens

"Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen - Deckwerk - Systemen"

Teilprojekt des Geologischen Instituts der Universität Kiel

- Sedimentumlagerungen und Schichtstrukturen -

Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel Dezember 1994

Mr. Rilf Sofmer

Prof. Dr. R. Köster

Dipl.-Gepl. O. Otten

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VI
VORWORT	
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. UNTERSUCHUNGSGEBIETE	3
2.1. SEDIMENTOLOGIE, MORPHOLOGIE UND HYDROGRAPHIE	6
2.1.1 Norderney	
2.1.1.1 Strandprofil Buhnenfeld D1 - E1	6
2.1.1.2 Strandprofil Naturstrand "Weiße Düne"	7
2.1.2 Sylt	8
2.1.2.1 Rantum	
2.1.2.2 Kampen	9
3. WAS IST SCHICHTUNG ?	
4. STRANDFORMEN UND GEFÜGESTRUKTUREN (NACH REINECK	1984)12
4.1 Geologisches Strandprofil	
4.1.1 Trockener Strand	
4.1.2 Nasser Strand	
4.1.3 Vorstrand	
4 2 GEFÜGESTRUKTUREN	
4 2 1 Laminierter Sand	
4 2 2 Rinneln	
4.2.2.1 Strömungsrinneln	
4.2.2.7 Submargsrppen	
4.2.2.3 Gegenrippeln	
4.2.2.4 Rhomboederrippeln	
4.2.3 Schill	
4.2.4 Schrägschichten	
4.2.5 Rioturbation	10
4.2.6 Riffstirnschichten	
1 / Blasensand	
4.2.7 Blasensand	

5. ARBEITSMETHODEN	21
5.1 Geländebearbeitung	21
5.1.1 Gewinnung ungestörter Sedimentprofile mit der Stechkastenmethode	
5.1.2 Oberflächenproben	
5.1.3 Oberflächenkartierung	
5.1.4 Umlagerungsbestimmung mit dem Tracerverfahren	
5.1.5 Vibrationsbohrverfahren	
5.2 Beprobungszyklus	23
5.3 Laborbearbeitung	24
5.3.1 Aufbereitung des Probenmaterials	
5.3.1.1 Stechkastenprofile	
5.3.1.2 Oberflächenproben	
5.4 EDV-Auswertung	29
6. ERGEBNISSE	
6.1 SONDIERUNG MIT DEM VIBRATIONSBOHRER	
6.2 OBERFLÄCHENKARTIERUNG	
6.2.1 Norderney	
6.2.1.1 Buhnenfeld D1 - E1	
6.2.1.2 Naturstrand "Weiße Düne"	
6.2.2 Sylt	
6.3 BESTIMMUNG DER UMLAGERUNG.	
6.3.1 Norderney	
6.3.1.1 Buhnenfeld DI - E1	
6.3.1.2 Naturstrand "weiße Dune	
6.4 STECHY ASTENDOEU F	
6.4.1 Untermahungsschiet Noudeman Aufenülbeweich Pubwerfeld D1 El	
6.4.1 August 1002	
6.4.1.2 September 1992	
6.4.1.3 Weitere Beprobungen 1992/93	
6.4.1.4 Abschlußbeprobung März 1994	
6.4.1.5 Abschließende Bemerkungen	
6.4.2 Untersuchungsgebiet Norderney - Naturstrand "Weiße Düne"	
6.4.3 Untersuchungsgebiet Sylt - Aufspülbereich Kampen	56
6.4.4 Untersuchungsgebiet Sylt - Rantum	
6.5 Oberflächenproben	60
6.6 Kurzer Vergleich zwischen Norderney und Sylt	62
7. ERGEBNISSE DES GEMEINSAMEN MEßEINSATZES IM OKTOBER 1993	64
7.1 Sedimentologische Untersuchungen	65
7.1.1 Umlagerungsintensität	65
And the second states of the second states and the second states	

7.1.2 Korngrößenverteilung	
7.1.3 Schichtungsstrukturen	
7.1.4 Oberflächenbeprobung	
7.2 VERSUCH DER VERKNÜPFUNG VON SEDIMENTOLOGIE UND HYDROGRAPHIE	75
8. ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN	76
9. ARBEITSGRUNDLAGEN	80
10. LITERATUR	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 1	Lage der Untersuchungsgebiete in der südlichen Nordsee	3
Abb. 2 1	Lage des Untersuchungsgebietes Norderney	4
Abb. 3 4	Aufspülbereiche Norderney von 1951 bis 1992 (ERCHINGER, TILLMANN 1992)	4
Abb. 4	Lage des Untersuchungsgebietes Sylt mit dem Aufspülbereich Kampen-Nord 1992	5
Abb. 5	Strandprofil D1 - E1 mit Regelprofil für die Aufspülung 1992 (Erchinger, Tillmann 1992)	7
Abb. 6	Strandprofil Rantum (AHRENDT 1994B)	9
Abb. 7	Strandprofil Kampen (AHRENDT 1994A)	10
Abb. 8	Laminae, Schichten und Schichtbänke; nach CAMPELL (1967); aus REINECK (1984)	11
Abb. 9	Grenzen der Strandbereiche (REINECK 1984)	12
Abb. 10	Rippelentstehung in Abhängigkeit von Strömung und Medianwert (REINECK & SINGH 1980)	16
Abb. 11	Stabilitätsfeld von Wellenrippeln und Übergangsbereich zu laminiertem Sand (REINECK 1984)	17
Abb. 12	Schrägschichtungsblätter (REINECK 1984)	19
Abb. 13	Querschnitt eines Strandriffes mit Riffstirnschichten (REINECK 1984)	20
Abb. 14	Bestimmung der Umlagerung (aus: 1. Zwischenbericht des Geol. Inst. Uni Kiel)	22
Abb. 15	Flußdiagramm zur Probenaufbereitung	25
Abb. 16	Unterschiedliche Korngrößenmaßstäbe im Vergleich	26
Abb. 17	Sondierungstiefen im Buhnenfeld D1 - E1 (Oktober 1992)	30
Abb. 18	Buhnenfeld D1 - E1 mit der Probenstationierung	31
Abb. 19	Bohrprofil an der Station W1 (Oktober 1992)	32
Abb. 20	Bohrprofil an der Station W2 (Oktober 1992)	32
Abb. 21	Bohrprofil an der Station W3 (Oktober 1992)	33
Abb. 22	Bohrprofil an der Station M1 (Oktober 1992)	33
Abb. 23	Bohrprofil an der Station M2 (Oktober 1992)	34
Abb. 24	Bohrprofil an der Station M3 (Oktober 1992)	34
Abb. 25	Bohrprofil an der Station O1 (Oktober 1992)	35
Abb. 26	Bohrprofil an der Station O3 (Oktober 1992)	35
Abb. 27	Bohrprofil an der Station O2 (Oktober 1992)	36
Abb. 28	Bohrprofil einer Vorstrandsondierung (Oktober 1992)	36
Abb. 29	Lage und Bezeichnung der Probepunkte im Buhnenfeld D1 - E1	44
Abb. 30	Reliefguß eines Stechkastenprofils, Norderney, August 1992 (See = links))	48
Abb. 31	Sedimentzusammensetzung im westlichen Bereich des Buhnenfeldes D1 - E1 über eine Tide in der	
mo	bilisierten Bodenschicht (m = morgens a= abends)	50
Abb. 32	Sedimentzusammensetzung im Mittenprofil des Buhnenfeldes D1 - E1 über eine Tide in der mobili-	-
sie	rten Bodenschicht (m = morgens a= abends)	50
Abb. 33	Sedimentzusammensetzung im östlichen Bereich des Buhnenfeldes D1 - E1 über eine Tide in der	
ma	bilisierten Bodenschicht (m = morgens $a=abends$)	51

Abb. 34	Sedimentzusammensetzung einer Vorstrandprobe im Buhnenfeld D1 - E1 über eine Tide in der n	nobi-
lisie	erten Bodenschicht (m = morgens a= abends)	51
Abb. 35	Sedimentzusammensetzung eines Bodenprofils an der "Weißen Düne", Norderney	54
Abb. 36	Reliefguß einer Stechkastenprobe; Strandbereich "Weiße Düne", Norderney (See = links)	55
Abb. 37	Reliefguß einer Stechkastenprobe aus dem Aufspülbereich Kampen-Nord, Sylt (See = links)	57
Abb. 38	Reliefguß einer Stechkastenprobe; Strandbereich Rantum, Sylt (See = links)	59
Abb. 39	Sedimentvariabilität zweier Stechkastenprofile im Buhnenfeld D1 - E1	60
Abb. 40	Vergleich der granulometrischen Zusammensetzung einer Oberflächen-(Px-o) und einer Stechko	asten-
pro	be (Px-s); Tiefenstufe 0 bis 6 cm, Aufspülbereich Norderney	61
Abb. 41	Vergleich der granulometrischen Zusammensetzung einer Oberflächen-(Px-o) und einer Stechko	asten-
pro	be (Px-s); Tiefenstufe 0 bis 6 cm, natürlicher Strand, Sylt	61
Abb. 42	Untersuchungsfeld D1 - E1 mit Beprobungsraster, Oktober 1993	64
Abb. 43	Umlagerungsintensität (cm) im küstennormalen Profil am 19.10.1993	66
Abb. 44	Umlagerungsintensität (cm) im küstenparallelen Profil am 19.10.1993	66
Abb. 45	Veränderung der Sedimentzusammensetzung bis 5 cm Tiefe (Küstennormalprofil)	67
Abb. 46	Veränderung der Sedimentzusammensetzung bis 5 cm Tiefe (Küstenparallelprofil)	68
Abb. 47	Reliefguß des Stechkastenprofils Q/L1m (See = links)	70
Abb. 48	Reliefguß des Stechkastenprofils Q/L1a (See = links)	70
Abb. 49	Reliefguß des Stechkastenprofils Q2m (See = links)	71
Abb. 50	Reliefguß des Stechkastenprofils Q2a (See = links)	71
Abb. 51	Sedimentparameter der Oberflächenproben (küstenparalleles Profil), morgens	73
Abb. 52	Sedimentparameter der Oberflächenproben (küstenparalleles Profil), abends	73
Abb. 53	Sedimentparameter der Oberflächenproben (küstennormales Profil), morgens	74
Abb. 54	Sedimentparameter der Oberflächenproben (küstennormales Profil), abends	74

.

V

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Sedimentgefüge im Vorstrand von Norderney (REINECK 1976, 1984)	14
Tab. 2	Unterscheidungsmerkmale im Strandprofil (REINECK 1984)	15
Tab. 3	Beprobungszeiten und Umfang der Arbeiten im Teilprojekt "Schichtung"	23
Tab. 4	Zuordnung der Tracerstationen zu den Stechkastenentnahmestellen	69

- 14*

Vorwort

Der vorliegende Abschlußbericht stellt eine Erläuterung der methodischen Grundlagen sowie eine Zusammenfassung, abschließende Beurteilung und Bewertung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerk-Systemen - Teilprojekt: Sedimentumlagerungen und Schichtstrukturen -" aus sedimentologischer Sicht dar. Im Bericht sind Auszüge aus den regelmäßig erstellten Zwischenberichten enthalten. Weiterführende Erläuterungen sind im Einzelfall im entsprechenden Zwischenbericht nachzulesen.

Ausgangspunkt unserer Untersuchungen war eine Versuchsstrandaufspülung im Mai 1992 auf Norderney. Der Untersuchungsraum erstreckte sich über den Trockenen Strand, den Nassen Strand in den angrenzenden Vorstrandbereich hinein. Darüberhinaus waren Vergleichsuntersuchungen mit Strandaufspülungen auf der Insel Sylt Gegenstand unserer Arbeit.

Für die Mitarbeit und Hilfe in diesem interdiziplinären Forschungsvorhaben danken die Verfasser den am Projekt beteiligten Arbeitsgruppen der verschiedenen Institutionen. Besonderer Dank gebührt den Mitarbeitern der Forschungsstelle Küste, Dezernat Sedimentologie/Morphologie für die Unterstützung bei der Probennahme. Dem Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz sei für die logistische Hilfe und die Bereitstellung von Pegel- und Winddaten gedankt.

Für die stete Diskussionsbereitschaft, die gedanklichen Anregungen und kritischen Bemerkungen sei den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Küstengeologie des Geologisch-Paläontologischen Instituts der Universität Kiel an dieser Stelle ein besonderer Dank ausgesprochen.

1. Einleitung und Zielsetzung

Zur Erhaltung von Stränden werden seit einigen Jahrzehnten verstärkt Strandaufspülungen und -auffüllungen als Küstenschutzmaßnahme eingesetzt. Am Beispiel eines Buhnenfeldes auf der Insel Norderney wurde in dem vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen" die Effektivität von Vorstrand- und Strandauffüllungen als umweltverträgliche Maßnahme des Insel- und Küstenschutzes untersucht. Im Vorhaben arbeiteten unter der Koordination durch die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie folgende Institutionen zusammen:

- das Staatliche Amt für Insel- und Küstenschutz (StAIK) Norden
- das Seewetteramt Hamburg
- der Lehrstuhl für Meerestechnik der TU Hamburg-Harburg
- das Geologische Institut der Universität Kiel
- die Forschungsstelle K
 üste des Nieders
 ächsischen Landesamtes f
 ür Ökologie.

Durch Auftrag vom 28.02.1992 wurde das Geologische Institut der Universität Kiel für den Zeitraum 1992 bis Mitte 1994 mit folgenden Untersuchungen beauftragt:

- 1. Sedimentumlagerungen auf der Grundlage von Analysen der Sedimentzusammensetzung und der Schichtstrukturen zu erfassen, und
- 2. vergleichende Analysen der Sedimentumlagerungen auf Sylt und Norderney durchzuführen.

Die Arbeiten konnten mit dem 1. April 1992 begonnen werden, und waren bis zum 30. Juni 1994 befristet. Für die abschließende Auswertung standen noch 3 weitere Monate zur Verfügung. Die für Feldarbeiten nutzbare Zeit betrug somit weniger als 2 Jahre. Im Bericht konnten nur Querverweise auf andere Teilberichte eingefügt werden, soweit uns diese Berichte zur Verfügung standen.

Die Betrachtung von Erosions-, Sedimentations- und Umlagerungsvorgängen mittels Naturuntersuchungen am Sediment erstreckte sich bisher überwiegend auf die Beschreibung von Korngrößenverteilungen. Modelluntersuchungen führten durch Parameterreduktion zu einer weiteren Vereinfachung der Betrachtungsweise, bei der nur noch

1

einzelne Korngrößen im Vordergrund standen. Die Einflüsse der Verteilungen innerhalb breiter Korngrößenspektren und der unterschiedlichen Schichtungsstrukturen blieben in dieser Betrachtung meist unberücksichtigt.

Schichtungsstrukturen sind ein Abbild von wechselnden Materialzusammensetzungen und entstehen durch verändertes Materialangebot bei unterschiedlicher Höhe des Energieeintrages durch Seegang und Strömung. Sie beinhalten ein breites Spektrum von geschichteten Sanden, deren einzelne Lagen in sich sehr gut sortiert sein können, sich untereinander aber in Korngröße und Sortierungsgrad unterscheiden. Dadurch wird auch die Lagerungsdichte des Sediments, die Rauhigkeit der Oberfläche, das Erosionsverhalten, die kritische Erosionsgrenzgeschwindigkeit u.a. stark beeinflußt.

Die "traditionellen" Methoden zur Probenentnahme im Gelände ergaben Mischproben, so daß die Ergebnisse immer nur die Summe sich überlagernder Prozesse abbilden konnten. Die Grundvorgänge der Sedimentumlagerung wurden dabei nicht erfaßt, sondern nur die Summe von deren Auswirkungen. Um das in diesem Projekt verlangte Auflösungsvermögen der sedimentologischen Daten erreichen zu können, mußten die im nachstehenden Bericht dargestellten aufwendigen Verfahren auf der Grundlage ungestörter Proben eingesetzt werden.

2. Untersuchungsgebiete

Die Nordseeinseln Norderney und Sylt boten sich als Forschungsgebiete an, da auf beiden Inseln bereits seit einigen Jahrzehnten hydrographische und sedimentologische Untersuchungen durchgeführt werden und ein entsprechendes Meßnetz vorhanden ist. Die Sedimente beider Gebiete unterscheiden sich zudem deutlich in den mittleren Korngrößen und der Sortierung. Die hydrographischen Verhältnisse zeigen, bedingt durch die geographische Lage der Inseln innerhalb der Deutschen Bucht (Abb. 1), ebenfalls Unterschiede in den Randbedingungen.



Abb. 1 Lage der Untersuchungsgebiete in der südlichen Nordsee

Die vom 4. Mai bis zum 12. Juni 1992 durchgeführte 7. Wiederholungsaufspülung auf Norderney (Abb. 2) wurde als Versuchsaufspülung geplant. Der aufgespülte Strandbereich erstreckte sich über eine Länge von 2,1 km von der Buhne D bis zur Buhne L1 (Abb. 3), das Volumen des dabei eingespülten Sand/Muschelschillgemisches betrug ca. 500.000 m³. Das Spülmaterial für die Auffüllung wurde am Westrand der Robbenplate entnommen. Die korngrößenanalytische Untersuchung ergab einen mittleren Medianwert (d₅₀) von 0,18 mm (2,45 PHI°) bis 0,20 mm (2,30 PHI°) mit beträchtlichen Muschelschillanteilen.



Abb. 2 Lage des Untersuchungsgebietes Norderney



Abb. 3 Aufspülbereiche Norderney von 1951 bis 1992 (ERCHINGER, TILLMANN 1992)

Im Jahr 1992 wurden von Kampen-Kliffende bis List auf einer Strandlänge von ca. 5,5 km zwei Millionen m³ Sand aufgespült. Vor Kampen-Nord konnte die Aufspülung in Form eines Höftes (19. bis 24. Juni 1992) durchgeführt werden. **(Abb. 4)**. Dabei wurden 125 000 m³ Sand eingespült. Eine Beprobung dieser "Sandnase" erfolgte im Juli 1992, nachdem der Aufspülbereich einige Zeit marin bedingter Umformung ausgesetzt war.





2.1. Sedimentologie, Morphologie und Hydrographie

2.1.1 Norderney

Norderney ist die dritte der ostfriesischen Inseln und erstreckt sich in West-Ost-Richtung über eine Länge von 14 km. Dabei beträgt die durchschnittliche Breite der Insel ca. 2 km. Der Aufspülbereich mit dem Hauptuntersuchungsgebiet liegt am Westkopf der Insel, der mit massiven Küstenschutzwerken (Deckwerk und Buhnen) befestigt ist.

Norderney liegt im mesotidalen Bereich mit einem Tidenhub von 2,4 m im Norderneyer Seegat. Am Westkopf der Insel wirkt das Seegat auf Strand und Buhnenfelder. Am Weststrand entstehen seegangserzeugte Strömungen und verstärkt auch Tideströmungen, die nach NIEMEYER (1987) in den Buhnenfeldern Werte bis zu 30 cm/s erreichen. Diese Gezeitenströmungen fehlen am Nordwest- und Nordstrand fast völlig.

Die Oberflächensedimente am Strand von Norderney bestehen aus Fein- und Mittelsanden mit einem hohen Schillanteil. Dieser Muschelschill dürfte überwiegend durch die Aufspültätigkeit der vergangenen Jahrzehnte an den Strand verfrachtet worden sein. Die hydrodynamischen Randbedingungen führen im Anschluß an Aufspülungen dazu, daß Feinsandmaterial über Selektionsprozesse fortgeführt wird, d.h., es kommt zu einer Vergröberung des anstehenden Sedimentes.

2.1.1.1 Strandprofil Buhnenfeld D1 - E1

Im Bereich des Buhnenfeldes D1 - E1 (Abb. 5) zeigte das Strandprofil während der Projektdauer eine äußerst eintönige Ausprägung der Morphologie. Die Gründe hierfür dürften vielfältiger Natur sein. Durch das dicht unter Land liegende Norderneyer Seegat ist der Strand im Nordwestbereich schmal ausgebildet. Unter natürlichen Bedingungen, d.h. ohne die Maßnahme der Aufspülung, ist der gesamte Küstenabschnitt bei MThw überflutet. Selbst beim mittleren Tidehochwasser (MTnw) liegt nur ein knapp 50 m breiter Sandstreifen über der Wasserlinie. Hier beginnt der Bereich des Mindeststrandprofils, einer Marke, die vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee, Arbeitsgruppe Norderney, im Jahre 1950 zum Schutz von Dünen und Bauwerken empfohlen wurde (ARBEITSGRUPPE NORDERNEY 1952).



Abb. 5 Strandprofil D1 - E1 mit Regelprofil für die Aufspülung 1992 (ERCHINGER, TILLMANN 1992)

Der natürliche Küstenlängstransport ist durch Querbauwerke (Buhnen) unterbrochen. Der äolische Sandtransport kann Verluste durch Abtrag nicht ausgleichen, es entstehen Erosionsmarken. Strukturierungen in der Morphologie treten nur kurzfristig auf. Regenerationsphasen führen annähernd wieder zur Ausgangssituation mit einer seewärtig schwach geneigten Sedimentoberfläche ohne auffällig morphologische Strukturen zurück.

Das Buhnenfeld D1 - E1 bildet vor allem mit dem Feld E1 - F1 den Kern des Divergenzbereiches am Norderneyer Nordwest-Strand. Die vorhandenen Sandmassen in diesem Küstenabschnitt werden in Abhängigkeit von den hydrographischen und meteorologischen Gegebenheiten nach Westen und Osten transportiert. Im Verlaufe des Projektes waren die Massenverluste in diesem Bereich sehr hoch (StAIK 1994), mit der Folge, daß das Strandniveau Anfang 1994 unterhalb der Messungen vor der Versuchsaufspülung von 1992 lag.

2.1.1.2 Strandprofil Naturstrand "Weiße Düne"

Das Strandprofil an der "Weißen Düne" unterscheidet sich deutlich von dem des Buhnenfeldes D1 - E1. Hier findet sich ein klassisches küstennormales Profil eines Küstensandes ohne anthropogenen Eingriff. Die Profilabfolge gliedert sich in folgende Abschnitte:

7

- Stranddüne
- Trockener Strand
- Nasser Strand
- Vorstrand.

Der Stranddüne angelagert erstreckt sich der Trockene Strand über eine Breite von ca. 100 m bis an die MThw-Linie. Die Neigung des Strandes ist leicht seewärtig ausgebildet, ohne nennenswerte morphologische Auffälligkeiten zu zeigen. Im anschließenden Nassen Strand waren während des Untersuchungszeitraumes zwei Strandriffe vorhanden. Der Bereich des Vorstrandes schließt die Sequenz seeseitig ab.

2.1.2 Sylt

Die Sylter Küstenlinie erstreckt sich über eine Länge von ca. 40 km von Norden nach Süden. Dabei wird die Sylter Westküste in einen Süd- und einen Nordteil gegliedert. Der Südteil verläuft nahezu in Nord-Süd-Richtung, während der Nordteil mit ca. 20 Grad nach Osten abknickt (AHRENDT 1989). Daraus ergeben sich unterschiedliche hydrodynamische Einflüsse, die sich in den Sedimentbewegungen niederschlagen. Vor dem Nordteil läuft die küstenparallele Strömung nach Norden, während sie im Südteil südwärts gerichtet ist (AHRENDT 1989). Um diesen unterschiedlichen Randbedingungen gerecht zu werden, wurden zwei Testgebiete ausgesucht, die den Nord- sowie den Südteil der Insel repräsentieren. Im Süden ist dies ein Strandabschnitt in Höhe des Ortes Rantum, im Norden dient ein Strandbereich vor Kampen als Untersuchungsgebiet.

Eine ausführliche Beschreibung der Strandsedimente der Insel Sylt ist bei AHRENDT (1989, 1994) zu finden. Sylt liegt ebenso wie Norderney im mesotidalen Bereich der Nordsee mit einem mittleren Tidenhub von 2 m.

2.1.2.1 Rantum

Nach AHRENDT (1989) stellt der Küstenbereich vor Rantum ein typisches Sylter Strandprofil des Mittelteils der Westküste dar. Das Profil von der Düne ausgehend über den Strand bis in den Vorstrandbereich wird als dynamisches Gleichgewichtsprofil beschrieben, daß sich in Folge der Küstenrückverlagerung unter Beibehaltung der Profilform ostwärts verlagert. Der Strand ist sehr schmal ausgebildet.

Neuere Untersuchungen (AHRENDT 1994B) relativieren die Aussage über das Rantumer Standardprofil. Vielmehr muß jetzt davon ausgegangen werden, daß nur der Bereich Rantum bis Hörnum-Nord, das entspricht ca. 20% der Sylter Westküste, sedimentologisch-morphologisch mit Hilfe des Rantumer Strandprofiles beschrieben werden kann.



Abb. 6 Strandprofil Rantum (AHRENDT 1994B)

2.1.2.2 Kampen

Das Untersuchungsgebiet Kampen liegt vor einem aus bindigem Geschiebelehm aufgebauten Kliff. Im Gegensatz zum Rantumer Dünenkliff herrscht hier ein anderes Materialangebot, das sich im Aufbau des Strandprofiles wiederspiegelt. Gleichzeitig ist die Riffzone schwach bzw. überhaupt nicht entwickelt, ein Zeichen geringen Materialangebots aus dem Kliffbereich. Dem in diesem Bereich nach Norden gerichteten Sediment-

KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"

transport folgend, ist eine immer stärkere Auflösung des Riffes zu beobachten (AHRENDT 1989).



Abb. 7 Strandprofil Kampen (AHRENDT 1994A)

3. Was ist Schichtung?

Nach REINECK (1984) wird eine Schicht definiert als eine Sedimentationseinheit, die im Wesentlichen unter gleichbleibenden oder sich kontinuierlich ändernden Bedingungen und gleichbleibendem oder sich kontinuierlich änderndem Material zum Absatz gelangt. Ein Wechsel innerhalb des Schichtungsaufbaus wird durch unterschiedliche physikalische und biologische Randbedingungen herbeigeführt. Einzelne Schichtpakete werden von Schichtfugen getrennt, an denen die Materialzusammensetzung und das Gefüge wechselt. Dieser Wechsel kann in konkordanter oder diskordanter Form stattfinden, wobei viele Diskordanzen erosiv entstehen. Eine Einteilung der Schichtungsarten nahmen MCKEE & WEIR (1953) in folgender Weise vor:

- Mächtigkeit
- eben oder schräggeschichtet
- Art der unteren Schichtfuge: erosiv oder nicht erosiv
- Gestalt des Schichtpaketes z.B. linsen-, keil-, tafelförmig, unregelmäßig.

Man unterscheidet einfache (gleiches Material und Gefüge) und zusammengesetzte (hier wechselt Material und Gefüge mehrfach) Schichtbänke. Beispiele für verschiedene Schichtungsarten sind in Abb. 8 aufgeführt, weitere Erläuterungen dazu sind in Kapitel 4.2 beschrieben.



Abb. 8 Laminae, Schichten und Schichtbänke; nach CAMPELL (1967); aus REINECK (1984)

4. Strandformen und Gefügestrukturen (nach REINECK 1984)

Jeder an der Küste auftretende Ablagerungsbereich hat sein eigenes Sedimentinventar und Sedimentgefüge. Die mineralische Zusammensetzung weist auf die Sedimentquelle hin, während die Korngröße den Transport und das Gefüge die Ablagerungsart beschreibt.



Abb. 9 Grenzen der Strandbereiche (REINECK 1984)

Die sedimentologisch-morphologischen Untersuchungen im BMFT - Projekt "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen" befassen sich mit dem Küstensand und seiner Aufteilung (Abb. 9) in

- Trockener Strand (über MThw)
- Nasser Strand (MThw bis MTnw)
- Vorstrand (unterhalb MTnw).

Die auftretenden Formen des Küstensandes entstehen in Abhängigkeit von Tidenhub und Wellenenergie. Es werden nach DAVIS (1964)

0	Mikro-	< 1,8 m
0	Meso-	1,8 bis 3,6 m
	Makrotiden	> 3,6 m Tidenhub

sowie nach HAYES (1979)

0	Nieder-	< 0,6 m Welle			
•	Mittel-	0,6 - 1,5 m Welle			

• Hochenergieküsten > 1,5 m Welle

unterschieden.

Das Hauptuntersuchungsgebiet auf Norderney, das Buhnenfeld D1 - E1, ist anthropogen beeinflußt und durch Buhnen- und Deckwerksbauwerke räumlich begrenzt. Das Sedimentinventar ergibt sich überwiegend aus dem Material, welches über Sandvorspülungen eingebracht worden ist.

4.1 Geologisches Strandprofil

Die im folgenden kurz beschriebenen Schichtstrukturen im geologischen Strandprofil sind bei REINECK (1984) ausführlich dargestellt.

4.1.1 Trockener Strand

Der Trockene Strand zeigt im allgemeinen nur eine sehr geringe seewärtige Neigung der Oberfläche. Die auftretenden Schichten sind parallel gelagert und durch flache Diskordanzen getrennt. Die Schichtung entsteht bei erhöhten Wasserständen sowie durch äolischen Sedimenttransport. Hier finden sich die sogenannten Schwermineralseifen und Spülsäume, vereinzelt treten auch kleine Strandriffe und -priele auf.

4.1.2 Nasser Strand

Der im geologischen Profil anschließende Nasse Strand ist Tideströmungen, Seegang und äolischem Einfluß ausgesetzt. Ist die Morphologie gut entwickelt, treten Strandriffe und -priele auf. Die Seeseite eines Strandriffes ist schwach geneigt mit Schichtpaketen aus laminierten Sanden, die durch die Wellenwirkung in der "swash"-Zone entstehen. Die Landseite zeigt ein stärkeres Einfallen der Riffstirnschichten. Es können Gefüge von Rhomboeder-, Gegen- und Großrippeln erkennbar sein. Die Riffe werden durch seeseitge Erosion landwärts verlagert. In den Strandprielen treten bei Wasserrücklauf Strömungsgeschwindigkeiten (Ripströmung) von bis zu 140 cm/s auf (REINECK 1963), die einen hohen Sedimenttransport verursachen. Erkennbare Gefügestrukturen sind Groß-, Klein-, Gegen- und teilweise auch Ozillationsrippeln.

Im Bereich des Nassen Strandes entwickeln sich Sommer- und Winterstrandprofile. Die erhöhte Sturmtätigkeit in den Wintermonaten führt zu einer Einebnung des Strandprofiles (Sturmstrand), wobei der Sand seewärts transportiert wird und die Strandneigung abnimmt. In den ruhigeren Sommermonaten bildet sich wieder ein stärker gegliederter Strand mit Riffen und Prielen.

Eingeschaltet in die Sande des Nassen Strandes sind Muschelschalen und Schillgrus, hervorgerufen durch zeitweise erhöhten Energieeintrag.

4.1.3 Vorstrand

Der nur bei extremen Niedrigwasser teilweise freifallende Strand wird Vorstrand oder Schorre genannt. Er ist stärker geneigt als die vorher beschriebenen Strandabschnitte. Ein bis mehrere Strandriffe untergliedern den Vorstrand. Der nachlassende Einfluß des Seeganges führt zu geringeren Umlagerungstiefen und mit zunehmender Tiefe setzt verstärkt Bioturbation ein (siehe auch Tab.1).

Tab. 1 Sedimentgefüge im Vorstrand von Norderney (REINECK 1976, 1984)

Wassertiefe (m)	Morphologie	Sediment	Großrippel, Riffstirn	Kleinrippel	laminierter Sand	Schlick	Bioturbation
0 - 1,2	Vorstrandriffe	fsmS - mS	häufig	vorhanden	häufig	(vorhanden)	vorhanden
1,2 - 3	Vorstrandriffe	msfS	vorhanden	häufig	sehr häufig	vorhanden	vorhanden
3 - 7,5	Sägezahnriffe	fS	vorhanden	häufig	sehr häufig	selten	häufig
7,5 - 20	1 A A	msfS	häufig	vorhanden	sehr häufig	(vorhanden)	häufig

fS = Feinsand fs = feinsandig mS = Mittelsand ms = mittelsandig Im oberen Vorstrand zeigen sich Schrägschichten (Großrippeln, Riffstirn), während im unteren Bereich laminierter Sand und Bioturbation dominieren.

Im folgenden sind die Unterscheidungsmerkmale der Strandprofilabfolge vom Trokkenen Strand bis in den Vorstrand kurz aufgeführt (Tab.2).

Tab. 2 Unterscheidungsmerkmale im Strandprofil (REINECK 1984)

	Morphologie Gefüge		Schill	Schwermineralien	Bioturbation	
Trockener Strand	Sandecken Strandwälle	lam. Sande, Erosionswannen	selten	sehr häufig	selten	
Nasser Strand	Strandriffe	steile und flache Riff- schrägschichten, Rippelschrägschichten	sehr häufig	selten	selten	
oberer Vorstrand	Vorstrandriffe	Riff- und Rippelschräg- schichten	selten	selten	vorhanden	
unterer Vorstrand		lam. Sande, Seegangsrippeln	sehr häufig	sehr häufig	häufig	

4.2 Gefügestrukturen

Im Folgenden sollen die häufigsten und wichtigsten Gefügestrukturen aufgeführt und erläutert werden, die im Strandbereich auftreten können. Tiefergehende Beschreibungen finden sich bei REINECK (1984).

4.2.1 Laminierter Sand

In der Schwappzone von Stränden ist laminierter, schwach seeseitig geneigter Sand die Regel, wobei flache Diskordanzen die einzelnen Schichtpakete treinen. Die Entstehung von laminierten Sanden erfolgt u.a. bei schießendem oder strömendem Wasser und bei Sturmfluten (Sturmflutsande).

4.2.2 Rippeln

Rippeln sind Oberflächenmarken, die überwiegend durch strömendes Wasser (Strömungsrippeln), oszillierendes Wasser (Seegangs- und Wellenrippeln) und Wind (Wind- und Haftrippeln) entstehen. Sie stellen ein vielfältiges Formeninventar zur Bildung von Schichtbänken.

4.2.2.1 Strömungsrippeln

Strömungsrippeln entstehen in sandigen Sedimenten, die von Wasser überströmt werden. Dabei unterscheidet man mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit zwischen geraden, gewellten, zungenförmigen, bogigen, sichelfömigen und rhomboedrischen Kammformen (Abb. 10). Neben REINECK (1984), REINECK & SINGH (1980) beschreibt auch ALLEN (1968) ausführlich die Erscheinungsformen von Strömungsrippeln.



Abb. 10 Rippelentstehung in Abhängigkeit von Strömung und Medianwert (REINECK & SINGH 1980)

Strömungsrippeln wandern mit der Stromrichtung, indem auf der Luvseite Material aufgenommen und auf der Leeseite durch unterschiedliche Mechanismen wieder abgelagert wird. Je nach Sedimentangebot und Strömungsgeschwindigkeit entstehen Kleinoder Großrippeln.

4.2.2.2 Seegangs- und Wellenrippeln

Der einschwingende Seegang auf den Strand erzeugt bei Grundberührung Wellenrippeln. Dies geschieht in einer Wassertiefe, die ungefähr der halben Wellenlänge entspricht. Wellenrippeln sind symetrisch ausgebildet. Ein Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit am Boden führt zu einer asymetrischen Ausbildung der Rippelkämme. An einem Gezeitenstrand wandern die Rippeln durch das auflaufende Wasser landwärts. Je nach Stärke des Seegangs bleiben sie bei sinkendem Wasserstand erhalten oder werden in der seewärts wandernden Brandung wieder aufgearbeitet.





Wellenrippeln unterscheiden sich von Strömungsrippeln dadurch, daß sich nie stark geschwungene und gebogene Kämme ausbilden. Bei geradem Kammverlauf wird die Klassifizierung dagegen schwieriger, beide Arten können parallel zueinander vorkommen. Hier ist eine eindeutige Unterscheidung am Innengefüge möglich (Abb. 11).

4.2.2.3 Gegenrippeln

Eine weitere Form der Rippelbildung ist die Gegenrippel. Sie tritt u.a. an Gezeitenstränden in Form sehr flacher Sandwellen auf, die bei geringer Wellenlänge auf Flachwasser hindeuten. Eine Gegenrippel kann gegen die Stromrichtung wandern.

4.2.2.4 Rhomboederrippeln

Im Flachwasserbereich des Strandes treten infolge hoher Strömungsgeschwindigkeiten Rhomboederrippeln auf, nach REINECK (1984) schuppenförmige Rippeln mit sehr flacher Luvseite und steiler geknickter Leeseite. Sie erreichen Zentimeter- bis Dezimeter-Größe.

4.2.3 Schill

Als Schill oder Schillbruch (Schillgrus) werden zusammengespülte Anhäufungen von tierischen Hartteilen wie z. B. Muschelschalen und Schneckengehäusen bezeichnet (REINECK 1978). Schille sind Anzeiger für Erosion. Sie reichern sich auf der Erosionsbasis an und bilden sogenannte Schillpflaster (Erosionshorizonte). Brandungsbereiche und Strände können so durch Schillakkumulation gekennzeichnet sein. Im Strandbereich liegen die Schalen überwiegend mit der Wölbung nach oben eingeregelt. Durch die hydrodynamische Belastung im Brandungsbereich enthalten die Schillagen einen hohen Anteil an Schillbruch, besonders mächtige Anreicherungen von Schill lassen sich daher im Nassen Strand finden. Für den Untersuchungsbereich Norderney ist anzumerken, daß der im Strand auftretende Schill und Schillbruch durch die Aufspülungen dorthin transportiert und nicht durch natürliche Randbedingungen dort angereichert wurde.

4.2.4 Schrägschichten

Unter diesem Begriff werden Lamina zusammengefaßt, die sich schräg zur Schichtungsebene entwickelt haben **(Abb. 12)**. Ihre Genese liegt z.B. bei den Rippelschichten (Abschnitt 4.2.2) oder den Riffstirnschichten (Abschnitt 4.2.6).



Abb. 12 Schrägschichtungsblätter (REINECK 1984)

4.2.5 Bioturbation

Bioturbation bezeichnet die Tätigkeit von Organismen im Bodengefüge. Die primären Schichtgefüge werden durch Bioturbation zerstört, es entsteht ein Wühlgefüge (biturbates Gefüge). Bioturbation ist nach REINECK (1967) ein Zeichen für geringe Sedimentation bzw. geringe Umlagerung. Im Strand- und Brandungsbereich zeigt sich biturbates Gefüge fast nur im Vorstrand bei geringer hydrodynamischer Belastung, sodaß in den Untersuchungsbereichen Norderney und Sylt kaum mit Bioturbationsgefügen zu rechnen ist. Vielmehr wird durch die oben angesprochene Schillakkumulation eine Erosionstendenz deutlich, die ein vorhandenes biturbates Gefüge zerstören würde.

4.2.6 Riffstirnschichten

Sand- und Strandriffe gehören zu den häufigsten morphologischen Einheiten im Strandbereich (Abb. 13). Sie bauen sich aus schwach seeseitig geneigten und steiler zum Land hin einfallenden Schichten auf. Die seeseitige Erosion dieser Riffe führt zu einer Verlagerung in Richtung Land, so daß die steiler einfallenden Schichten als Riffstirnschichten bezeichnet werden.





4.2.7 Blasensand

Der Blasensand kommt an Gezeitenstränden vor. Er entsteht durch rasche Überflutung des Strandes, wobei sich die Porenluft im Sediment zu kleinen Blasen zusammenschließt. Dieses Gefüge beschränkt sich durch den zunehmenden Druck in der Sedimentsäule nur auf die oberen 10 bis 20 cm im Bodenprofil, darüber hinaus werden die Poren zusammengedrückt.

4.2.8 Kolke

Im Strömungsschatten von Gegenständen wie z.B. Muschelschalen entstehen Vertiefungen im Sediment, sogenannte Auskolkungen, die bei abnehmender Strömungsgeschindigkeit mit gröberem als dem anstehenden Material wieder verfüllt werden.

5. Arbeitsmethoden

5.1 Geländebearbeitung

5.1.1 Gewinnung ungestörter Sedimentprofile mit der Stechkastenmethode

Der Stechkasten wird als Entnahmegerät benutzt, um ungestörte Sedimentprofile zu erhalten. Die ungestörte Probe ermöglicht die Bestimmung der Schichtstruktur. Dabei sind der Entnahme ungestörter Proben aus wassergesättigten Strandsanden natürliche Grenzen gesetzt. Die verwendeten Stechkästen (REINECK 1957) sind 30 und 40 cm lang, hergestellt aus V2A-Stahl, um Reaktionen des Probenmaterials mit dem Metall möglichst auszuschließen. Sie werden in das Sediment hineingedrückt und mit einem Spaten wieder ausgegraben. Der Spaten verhindert dabei das Herausfließen des Sandes. Ein weiteres Eindringen über die Tiefe von 40 cm hinaus läßt sich mit dieser Methode nur sehr schlecht durchführen, da sich durch das hochmobile Wasser-Sandgemisch ein gegrabenes Loch neben dem Stechkasten sofort wieder verfüllt. Die im Labor durchzuführende Härtung des Profils mit Paraffin fixiert die ungestörte Lagerung der einzelnen Kornlagen.

5.1.2 Oberflächenproben

Als Referenzproben zur Stechkastenbeprobung und zur Bestimmung der zeitlichen Korngrößenentwicklung über einen längeren Zeitraum, wurde mit einem Metallrohr (Durchmesser 6 cm) an den Stationspunkten Material aus den oberen 6 cm der Sedimentsäule entnommen.

5.1.3 Oberflächenkartierung

Die Kartierung der Sedimentoberfläche diente zur Erfassung der morphologischen Strukturen in den Untersuchungsfeldern. Hierbei wurden u.a. Rippelstrukturen, Rinnenverläufe, die Lage von Spülsäumen und Strandwallbildung kartiert. Die Verknüpfung von Oberflächenstrukturen mit den ermittelten Sedimentparametern erlaubt eine genaue Beschreibung der Sedimentveränderungen und eine Zuordnung von Oberflächenstrukturen auf die Schichtung im Bodenprofil.

5.1.4 Umlagerungsbestimmung mit dem Tracerverfahren

Farbsande (Tracer) dienen in erster Linie zur Bestimmung der Sedimentumlagerung. Mit ihnen können Transportvorgänge im Sediment verfolgt und sichtbar gemacht werden. In diesem Forschungsprojekt kommen neben den gefärbten Luminophorensanden auch gehärtete Tracerstäbe zum Einsatz (RUNTE 1989), um Erosions- und Sedimentationstendenzen an einem definierten Punkt zu erfassen.

Hierbei sind besonders die Umlagerungen während einer Einzeltide von Interesse. Dazu werden die in der Länge definierten Tracer vor der zu untersuchenden Tide in das Sediment eingebracht und vermessen. Nach der Tide erfolgt durch vorsichtiges Aufgraben der markierten Position die Bestimmung der Umlagerung. Die noch vorhandene Länge des Stabes sowie die Übersandung wird gemessen und daraus der Grad der Erosion und der Sedimentation ermittelt (Abb. 14).



Abb. 14 Bestimmung der Umlagerung (aus: 1. Zwischenbericht des Geol. Inst. Uni Kiel)

Für längerfristige Messungen müssen die Tracer über eine größere Länge (>30 cm) verfügen, um infolge der hohen Morphodynamik im Strand- und Vorstrandbereich auch stärkere Umlagerungen z.B. durch eine Sturmflut erfassen zu können.

5.1.5 Vibrationsbohrverfahren

Erweiternd zur normalen Probennahme erfolgte eine Kernbeprobung mit einem Vibrations-Bohrgerät, um den sedimentologischen Strandaufbau auch in größere Tiefen verfolgen zu können. Hierbei ist eine leichte Verdichtung des Bodens im oberen Bereich der Sedimentsäule infolge der Vibrationen zu berücksichtigen. Die Bohrungen erfolgten mit einem im Durchmesser 8 cm starken Aluminiumrohr (2 mm Wandstärke), in das ein Kunststoffrohr (PVC-Liner) eingeschoben wurde, um den Sedimentkern aufzunehmen. Im Bodenprofil eingeschaltete Muschellagen sowie bereits stärker kompaktierter Sand behinderten das Eindringen des Aluminiumrohres. Im Labor wurde der PVC-Liner dann der Länge nach aufgetrennt und das Sediment weiter sedimentologisch bearbeitet.

5.2 Beprobungszyklus

Im Untersuchungszeitraum wurden die Strände von Norderney und Sylt in den in Tab. 3 aufgeführten Monaten beprobt.

Tab. 3 Beprobungszeiten und Umfang der Arbeiten im Teilprojekt "Schichtung"

1992 D S 0 N J F Μ A Μ J J A f h b,c d.e g Probenserie a X X X Х Stechkasten 0 0 0 0 Tracer Х X X Х X Х Oberflächenprobe 0 0 0 0 0 0 0 0 0 Kartierung Χ Kernsondierung

↑ Beginn des Teilprojektes

KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"

	1993											
Probenserie	J i	F j	М	A k	М	J	J	A	S	0 1	N	D
Stechkasten Tracer Oberflächenprobe	X	X X		Х						X O X		14
Kartierung Kernsondierung	0	0	0	0		0	0	0		0		0
				199	94							
Probenserie	J	F	М	A m	М	J	J	A	S	0	N	D
Stechkasten				x		x						
Tracer Oberflächenprobe Kartierung				X O		O X O						
Kernsondierung												

↑ Ende Teilprojekt

5.3 Laborbearbeitung

5.3.1 Aufbereitung des Probenmaterials

Die Aufbereitung des Probenmaterials erfolgte nach einer seit vielen Jahren erprobten Methodik (KÖSTER 1979) der Arbeitsgruppe Küstengeologie am Geologisch-Paläontologischen Institut und Museum (GPI) der Universität Kiel in deren Sedimentlabor. Einige Untersuchungen wurden parallel im Bodenlabor der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie (NLÖ) durchgeführt.
Der Analysengang von der Rohprobe bis zur EDV-Auswertung ist in Abb. 15 wiedergegeben.



Abb. 15 Flußdiagramm zur Probenaufbereitung

Die Siebanalyse der Oberflächenproben und der gereinigten Stechkastenproben wurde im Trockensiebverfahren nach ASTM-Norm (American Society of Testing Materials) in 1/4 PHI^o-Stufen durchgeführt. Die PHI^o-Werte sind dimensionslos. Abb. 16 zeigt die Zusammenhänge zwischen einigen gebräuchlichen Korngrößenmaßstäben.

Die Aufarbeitung der paraffinierten Stechkastenproben erforderte einige Vorversuche bis ein Verfahren entwickelt wurde, mit dem die Proben in vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand bearbeitet werden konnten.



Abb. 16 Unterschiedliche Korngrößenmaßstäbe im Vergleich

5.3.1.1 Stechkastenprofile

Die im Gelände entnommenen ungestörten Sedimentprofile wurden in frischem Zustand im Labor weiterbearbeitet. Zur Erhaltung der Schichtstruktur sandiger Profile eignet sich besonders die Reliefgußmethode nach REINECK (1958). Nach vorsichtigem Transport zur Vermeidung von Störungen im Profil wurde die Probe im Stechkasten bei 100°C getrocknet. Dabei wird die Oberfläche der Probe mit saugfähigem Zellstoffpapier abgedeckt, auf dem sich während des Trocknungsvorganges durch die kapillar aufsteigende Porenlösung eine Salzkruste bildet, die anschließend samt dem Zellstoffpapier entfernt werden kann. Eine Entfernung der Salzkruste ist notwendig, da diese sonst als Deckschicht den Trocknungvorgang des Präparates beeinträchtigen würde.

Auf die getrocknete und heiße Probenoberfläche wird eine 2 bis 3 mm dicke Paraffinplatte gelegt, die infolge der Wärme langsam in die Porenräume des Präparates eindringt und dort aushärtet. Die erkaltete Probe wird anschließend wie ein Kuchen aus ihrer Form gestürzt. Das nicht mit dem Paraffin in Berührung gekommene restliche Sediment in der Probe kann im Anschluß mit Wasser herausgespült werden. Das zähe Paraffin dringt entsprechend der Porengröße und Lagerungsdichte in das Sediment ein. Die gröberen Sandlagen treten aufgrund der leichter zu füllenden Porenräume gegenüber den feinkörnigen Sanden im Relief hervor. Das fertige Präparat, ein Reliefguß, ermöglicht nun die Bestimmung des Schichtstrukturaufbaus. Die Auflösung bis in einzelne Kornlagen erlaubt eine Zuordnung der Körner zu Einzelereignissen wie Sturmfluten oder besonderen Windlagen.

Für die weitere sedimentologische Bearbeitung (Bestimmung der Korngröße, Kornverteilung etc.) läßt sich der Paraffinverguß im Anschluß durch Erwärmen und Entfernen des Paraffins in seine einzelnen Kornlagen auflösen.

Es wurden verschiedene Vorversuche gestartet, deren Ziel es war, eine gereinigte Probe mit vertretbarem Zeit- und Kostenaufwand herzustellen. Im folgenden Abschnitt wird das angewandte Verfahren zur Reinigung der paraffinierten Probe näher beschrieben.

A: Verfahren zum "Waschen" der paraffinierten Probe im Wasserbad

- Aufkochen der paraffinierten Probe im 1000 ml Becherglas (alternativ: feuerfeste Glasschüssel) auf der Herdplatte oder im Trockenschrank; ca. 15 min pro Probe bis keine größeren Paraffinklumpen/-tropfen mehr aufsteigen; häufig umrühren.
- 2) Erkalten der Probe bis das Paraffin eine harte Schicht an der Oberfläche bildet; Dauer: 3-5 Stunden; eventuell Wasserbadkühlung.
- Abheben und abspülen (über dem Becherglas; Achtung: Feinanteile!) der gehärteten Paraffinplatte.
- 4) Probe mittels Spritzflasche in eine Auflaufform (feuerfeste Glasschüssel) spülen.
- 5) Aufgießen mit heißem Wasser; Erhitzen der Probe auf der Herdplatte bis das in der Probe verbliebene Paraffin ausgetreten ist.
- 6) Probe einige Minuten (ca. 5 10 min) ruhig stellen, bis die Feinsandanteile mit hoher Wahrscheinlichkeit abgesunken sind.

- 7) An der Oberfläche abgesetzte Paraffintröpfchen sammeln und mit einem Löffel abschöpfen bis dieses Vorgehen im Vergleich zur Fliesabschöpfung (siehe 8) ineffizient wird.
- 8) Abschöpfung des Paraffin mit einem Stück Zellstoff (Flies).
 - Geeignet dimensioniertes Zellstoffflies auf die Wasseroberfläche auflegen. Das Papier muß unbedingt den Beckenrand berühren, da sich das Paraffin am Rand anlagert und verdichtet (andernfalls driftet das Paraffin immer wieder vom Rand auf die Mitte der Wasserfläche und verzögert die Reinigung erheblich!).
 - Papierauflage ca. 10 Minuten ruhenlassen, dann ohne große Wasserbewegung abziehen.
 - Die Schalenränder zwischendurch immer wieder mit einem Papierbausch reinigen.
 - Wiederholung des Papierauflegens und der Randreinigung bis das Paraffin an der Wasseroberfläche eine feste Konsistenz annimmt.
 - Erneutes Erhitzen der Probe unter stetem Umrühren bis eine ölige Konsistenz des verbliebenen Paraffins erreicht ist.
 - Die unter 8 beschriebenen Vorgänge werden so oft wiederholt, bis sich auf der Wasseroberfläche keine Paraffinreste mehr zeigen. Dies kann unter Umständen mehrere Tage dauern.
- 9) Ruhenlassen der gereinigten Probe (ca. 15 min), dann das überschüssige Wasser sehr langsam abgießen, ohne das Sediment aufzuwirbeln! (Feinanteile!!)
- 10) Die Probe wird jetzt in eine Abdampfschale umgefüllt und auf das Wiegen und Schlämmen vorbereitet.

B: <u>Allgemeine Hinweise</u>

- 1) Alle Vorgänge, die die Feinanteile des Sediments aufwirbeln und unerwünschterweise ins Papierflies gelangen lassen, sind zu vermeiden.
- 2) Der Verlust von Sediment beim Umfüllen und Aufkochen ist zu vermeiden.

- 3) Es ist stets der höchste Reinheitsgrad der Probe anzustreben, um eine Beschädigung der Siebe zu vermeiden und um eine korrekte Auswertung der Probe zu ermöglichen.
- 4) Möglichst mehrere Proben parallel bearbeiten das dient der ökonomischen und zeitlichen Effizienz.
- 5) Gereinigte Proben ca. 12 24 Std. (je nach Feuchtigkeit) bei ca. 100°C trocknen.

Die gereinigten Proben wurden im Anschluß nach bewährtem Muster korngrößenanalytisch weiterbearbeitet (vgl. Kap. 5.3.1).

5.3.1.2 Oberflächenproben

Zusätzlich zu den Stechkastenproben wurden Oberflächenproben (bis 6 cm Tiefe) entnommen. Diese Proben dienten als Referenzproben zur Bestimmung der granulometrischen Zusammensetzung des Sandes. Es sollte außerdem geklärt werden, ob durch die Paraffinbehandlung des Sedimentes eine Verschiebung der Korngrößenverteilung stattfindet. Es lag die Vermutung nahe, daß sich eventuell vorhandene Feinanteile im Sediment an das zähe Paraffin anlagern und bei dessen Herauslösung ebenfalls mit abgetrennt würden.

5.4 EDV-Auswertung

Die statistische Auswertung der im Labor bearbeiteten Proben erfolgte über ein innerhalb der "Arbeitsgruppe Küstengeolgie" entwickeltes Makroprogramm auf der Grundlage des Software-Paketes MS-Excel in der Version 4.0. Dieses Makroprogramm ermöglicht es, neben der Ermittlung der gängigen statistischen Parameter wie Perzentile (P1 - P100), Medianwert (d50-Wert), Sortierung und Schiefe auch eine Darstellung der Probe als Summenkurve und Häufigkeitsverteilung vorzunehmen.

6. Ergebnisse

6.1 Sondierung mit dem Vibrationsbohrer

Im Oktober 1992 wurde eine Kernsondierung im Buhnenfeld D1 - E1 durchgeführt, um einen Überblick über den tieferen Strukturaufbau des Spülkörpers zu bekommen. Die Beprobungspunkte orientierten sich an den Standorten W1 bis O3 des hydrographischen Meßnetzes (Abb. 18). Ein weiteres Bohrprofil wurde an der Niedrigwasserlinie (NWL) im beginnenden Vorstrandbereich entnommen.

Bohrpunkt	Lage	Eindringtiefe
W3	HWL	0,60 m
W2	HWL	0,68 m
W1	HWL	0,60 m
M3	MWL	0,90 m
M2	MWL	1,05 m
M1	MWL	1,07 m
O3	NWL	0,72 m
O2	NWL	0,97 m
01	NWL	1,02 m
Vorstrand		0,93 m
HWL = Hochwasserli	nie	
MWL = Mittelwasser	linie	
NWL = Niedrigwasse	rlinie	

Abb. 17 Sondierungstiefen im Buhnenfeld D1 - E1 (Oktober 1992)

Zum Einsatz kam ein Vibrationsbohrgerät, das ein mit einem PVC-Liner bestücktes Aluminiumrohr mittels einer Antriebswelle in Schwingung versetzt. Durch die Vibrationen angeregt, gleitet das Aluminiumrohr in das Sediment. Das vorhandene Porenwasser im Boden wirkt dabei als Gleitmittel. Das PVC-Rohr nimmt die weitgehend ungestörte-Bodenprobe auf und wird anschließend mit Hilfe eines Flaschenzuges aus dem Boden gezogen. Die Eindringtiefe betrug bis max. 1,10 m unter Geländeoberkante (GOK) bei Probenpunkt M1 (Abb. 17). Zahlreiche Muschelhorizonte im Bodenprofil verhinderten eines weiteres Eindringen des Bohrgestänges. Die auftretende Reibung an der Rohraußenseite wurde mit zunehmender Tiefe so groß, daß mit diesem System ein tieferes Eindringen in die anstehenden Strandsedimente nicht möglich war.

In den Abb. 19 bis 28 sind 10 Bohrprofile zeichnerisch dargestellt. Deutlich erkennbar sind die Muschellagen, die in verschiedenen Tiefenstufen auftreten. Die angeführten Medianwerte der dargestellten Profilabschnitte verdeutlichen den heterogenen Aufbau des Spülkörpers.



Abb. 18 Buhnenfeld D1 - E1 mit der Probenstationierung

KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"



Abb. 19 Bohrprofil an der Station W1 (Oktober 1992)



Abb. 20 Bohrprofil an der Station W2 (Oktober 1992)



Abb. 21 Bohrprofil an der Station W3 (Oktober 1992)



Abb. 22 Bohrprofil an der Station M1 (Oktober 1992)



Abb. 23 Bohrprofil an der Station M2 (Oktober 1992)



Abb. 24 Bohrprofil an der Station M3 (Oktober 1992)

34



Abb. 25 Bohrprofil an der Station O1 (Oktober 1992)



Abb. 26 Bohrprofil an der Station O3 (Oktober 1992)

35

•





Abb. 27 Bohrprofil an der Station O2 (Oktober 1992)



Abb. 28 Bohrprofil einer Vorstrandsondierung (Oktober 1992)

6.2 Oberflächenkartierung

Die Kartierung zur Aufnahme der Oberflächenstrukturen wurde schwerpunktmäßig auf das Buhnenfeld D1 - E1 beschränkt, um Daten an einem Ort über einen längeren Zeitraum zu sammeln und damit einen Überblick über die zeitliche Entwicklung geben zu können. Daneben erfolgten einmalige Kartierungen ausgewählter Vergleichsgebiete, um die örtliche Variabilität zu dokumentieren. Zu diesen Vergleichsgebieten gehörten der Küstenabschnitt "Weiße Düne" auf Norderney als natürlich entwickelter Bereich, sowie auf Sylt die Küstenbereiche vor Kampen und Rantum.

Oberflächenstrukturen entwickeln sich neben kurzfristigen, ereignisbezogenen Einflüssen auch in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Nach REINECK (1984) kann man einen Sommer- und Winterstrand unterscheiden. Der Sommerstrand zeichnet sich bei mäßigem Energieeintrag über die Sommermonate durch die Ausbildung von Strandriffen und -prielen aus. Die erhöhten hydrodynamischen Belastungen während der Wintermonate führt dagegen zu einem eingeebneten, flach seewärtig geneigten, aus laminiertem Sand aufgebauten Winterstrand ohne auffällige Strukturierung. Diese Erscheinung ist besonders in den räumlich begrenzten Buhnenfeldern zu erkennen.

Beim Eintreten von starken Sturmereignissen werden durch die Brandungswirkung am Deckwerk hohe Sedimentmobilisierungen hervorgerufen, die mit den damit verbundenen Sedimentumlagerungen in kurzer Zeit neue Oberflächenstrukturen schaffen können. Diese Strukturen sind bei gleichen Randbedingungen in kleinräumigen Buhnenfeldern stärker ausgeprägt als bei großräumigen naturbelassenen Stränden.

6.2.1 Norderney

6.2.1.1 Buhnenfeld D1 - E1

Der Nasse Strand, der Bereich zwischen Tidehochwasser (Thw) und Tideniedrigwasser (Tnw), nimmt den größten Teil des Buhnenfeldes D1 - E1 ein. Dieser Bereich ist Seegang und Tideströmungen besonders stark ausgesetzt. Der äolische Sedimenttransport wirkt am Nassen Strand nur bei Tnw und höheren Windgeschwindigkeiten. Das Hauptbeprobungsfeld D1 - E1, es liegt im Divergenzbereich des Norderneyer Küstenabschnittes, zeigte im Laufe der Untersuchungen eine abweichende morphologische Entwicklung gegenüber den benachbarten Buhnenfeldern. Nach der raschen Umformung des Spülkörpers (Abschlußbericht des StAIK Norden 1994) entwickelte sich eine Sedimentoberfläche, deren Strukturarmut auffällig war. Diese Morphologie stellte sich als leicht seewärts geneigte Fläche dar, in der kleinräumige morphologische Strukturen und deren Änderungen nur kurzfristig auftraten, um anschließend rasch wieder aufgearbeitet zu werden.

In den Sommermonaten 1992 konnten Feinsandlagen kartiert werden, die den äolischen Sandtransport bei höheren Windgeschwindigkeiten dokumentieren. Bei trockener Witterung und entsprechenden Windgeschwindigkeiten erreichten diese Feinsandlagen sogar an der Niedrigwasserlinie eine Mächtigkeit von 5 cm. Beobachtungen an anderen Küstenabschnitten der Inseln Norderney und Juist belegen die hohe Transportkapazität von küstenparallel wirkenden Winden. Hier sei auf die Untersuchungen des StAIK Norden und des AWI Bremerhaven im Rahmen dieses Projektes verwiesen.

Die eintönige Morphologie des Buhnenfeldes wurde von einer steten Höhenabnahme des Geländeniveaus bis Ende 1992 begleitet. Erst in den späten Herbstmonaten konnte eine leichte Zunahme der Oberflächenstrukturierung kartiert werden. Hervorgerufen durch die zunehmende hydrodynamische Belastung des Strandes entwickelten sich schwach ausgeprägte Strandpriele und -wälle vor allem im mittleren Bereich des Nassen Strandes. Schwerpunktmäßig im östlichen Bereich des Buhnenfeldes war eine Rippelbildung im dm-Bereich erkennbar. An den Buhnen zeigten sich Auskolkungen im cm bis dm-Bereich. In den westlich und östlich gelegenen Buhnenfeldern waren diese morphologischen Erscheinungsformen deutlicher entwickelt.

Der Beginn des Jahres 1993 war geprägt von einer Sturmtidenkette, die in ihrer Wirkung die bis zu diesem Zeitpunkt kartierte Morphologie des Buhnenfeldes gründlich aufgearbeitet hat. Die Oberfläche an den Buhnenkörpern war deutlich eingetieft, die Buhnenköpfe weiter freigespült worden. Besonders am Deckwerk konnten die starken Veränderungen dokumentiert werden. Der Deckwerksfuß lag offen und war dem Wellenangriff ohne schützende Sedimentschicht ausgesetzt. Im Vergleich zur Kartierung Ende 1992 lag das Oberflächenniveau unmittelbar am Deckwerk um ca. 1,20 bis 1,50 m tiefer. Die hohe Brandungsbelastung während der Sturm- und Orkanfluten hatte zur Bildung einer 30 bis 50 cm tiefen Rinne am Deckwerksfuß geführt. Die Sedimentoberfläche war stellenweise mit Muschelschillpaketen überdeckt. Am angeschnittenen Luv- und Leehang der Rinne dokumentierte sich diese Wechselschichtung von Schill- und Sandlagen, die infolge wechselnder Energieeinträge entstanden war. Die ausgeprägte Schillakkumulation in Bereichen des Buhnenfeldes, vor allem an der Thw-Linie, konnte im übrigen während der gesamten Untersuchungsdauer festgestellt werden.

Die abnehmende Seegangsbelastung in den Frühjahrsmonaten führte zu einer Regeneration der Sedimentoberfläche. Die Rinnenstruktur verlagerte sich seewärts und verlor dabei an Ausdehnung und Tiefe. Flugsande akkumulierten sich in tiefer gelegenen Bereichen des Buhnenfeldes.

Im Juni 1993 hatte sich wieder eine strukturarme Morphologie gebildet, die mit ihrer schwach seewärtig geneigten Oberfläche eine verblüffende Ähnlichkeit mit der Vorjahresmorphologie aufwies. Unterschiede zeigten sich aber im Geländeniveau des Untersuchungsbereiches, welches sich aufgrund der hohen Sedimentverluste nach unten entwikkelt hatte.

Die folgenden Monate brachten kaum nennenswerte morphologische Entwicklungen. Kurzfristig entstehende Priele und andere Oberflächenformen beschränkten sich auf cm bis dm-Größe und wurden relativ schnell wieder durch Flugsande und Sedimentaufarbeitung durch Welle und Strömung eingeebnet.

Die eintönige Morphologie hatte auch während der interdiziplinären Meßkampagne im Oktober 1993 Bestand. Das flache Relief deutete auf den jahreszeitlich bedingten erhöhten Energieeintrag hin, nur im Bereich der Buhne E1 hatte sich eine kleine Rinne vom Deckwerk bis zur NW-Linie ausgebildet. Die Oberfläche des Buhnenfeldes wies eine seewärtige Neigung auf. Die von der Forschungsstelle Küste während des Meßeinsatzes durchgeführte Vermessung bestätigte die schwach ausgeprägte Morphologie des Untersuchungsgebietes.

Zum Abschluß des Projektes wurde im April 1994 das Buhnenfeld D1 - E1 nochmals kartiert. Zu diesem Zeitpunkt war das gesamte eingespülte Material bereits wieder in starkem Maße ausgeräumt, so daß eine neuerliche Aufspülung unumgänglich erschien (StAIK 1994). Ursache dafür war der sturmflutreiche Winter 1993/94. Leider hatte sich zu diesem Zeitpunkt eine Morphologie im Buhnenfeld entwickelt, die eine ausgeprägtere Strukturierung der Oberfläche zeigte. Die Stechkastenbeprobung bestätigte diesen Eindruck. Der östliche Teil des Buhnenfeldes war stark ausgeräumt, besonders im unmittelbaren Bereich der Buhne E1. Diese Beobachtung konnte auch an anderen Buhnen gemacht werden, wahrscheinlich bedingt durch die vorherrschende Wellenanlaufrichtung aus NW. Die westliche Seite einer Buhne zeigte Erosion, während auf der Ostseite Sedimentationerscheinungen auftraten. Nach Westen hin folgte ein Riffkörper, dessen Niveau ca. 50 cm höher als das umliegende Gebiet lag und der eine schwache seeseitige Neigung aufwies. Daran schloß sich im westlichen Bereich des Feldes eine Ost-West ausgerichtete Rinne an, die an ihren Hängen deutliche Strömungsstrukturen (u.a. Rhomboederrippeln) zeigte. Der Zwickel im Bereich der Buhne D1/Deckwerk stellte einen Akkumulationsbereich dar, der hauptsächlich durch Flugsande aufgefüllt war. An vielen Positionen im Buhnenfeld war das überwiegend aus feinem bis grobem Mittelsand bestehende Sediment mit Schillbruch durchsetzt.

Bedingt durch die notwendig gewordene neuerliche Aufspülung zum Schutz des freigelegten Deckwerkfußes waren weitere Untersuchungen zur morphologischen Entwicklung des Buhnenfeldes unter der zu Beginn des Projektes gestellten Aufgabe leider nicht mehr möglich. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß die im April 1994 kartierte Morphologie nicht mehr Ausdruck des Spülmaterials von 1992 ist. Vielmehr dürfte es sich hierbei um Sedimentstrukturen früherer Aufspülungen handeln, die durch die 92er Versuchsaufspülung überdeckt waren. Erst nachdem das eingespülte Material von 1992 vollständig abgebaut war, konnten Strömungen und Wellen die tiefer gelegenen Strandniveauflächen erreichen und umformen. Eine Bewertung der Morphologie zu diesem Zeitpunkt ist daher mit Rücksicht auf die unterschiedlichen Ausführungen der Aufspülungen, den verschiedenen zur Verfügung stehenden Materialen und den hydrodynamischen Randbedingungen zu verschiedenen Zeiten mit Vorsicht vorzunehmen.

6.2.1.2 Naturstrand "Weiße Düne"

Der als Vergleichsgebiet herangezogene Küstenabschnitt im Bereich der "Weißen Düne" zeigte während der Kartierung im Sommer 1992 die in Kap. 2.1.1.2 dargestellten Oberflächenformen. Dieser Bereich blieb während des gesamten Untersuchungszeitraumes in seiner morphologischen Ausprägung lagestabil. Dies ist dadurch erklärbar, daß der Küstenabschnitt "Weiße Düne" im Platenanlandungsbereich liegt, und in unregelmäßigen Abständen über den Riffbogen mit Material versorgt wird. Variabilitäten waren überwiegend nur in der räumlichen Ausdehnung der morphologischen Formen erkennbar. So zeigten sich die Riffkörper im Nassen Strand je nach Ausprägung der hydrodynamischen Randbedingungen mal stärker, mal schwächer ausgebildet, waren aber im Jahresgang stetig vorhanden. Die Ausbildung von Sommer- und Winterstrand (REINECK 1984) war hier exemplarisch zu beobachten.

6.2.2 Sylt

Die Kartierung der Oberflächenmorphologie erfolgte auf Sylt an zwei unterschiedlichen Küstenabschnitten. Dabei wurde im Bereich Kampen-Nord eine Strandaufspülung in Form eines Höftes in die Betrachtung der Oberflächenmorphologie mit einbezogen. Eine Bewertung der Oberflächenstrukturen des Strandes vor Kampen erscheint an dieser Stelle nicht sinnvoll, da zur Zeit der Kartierung im Juli 1992 die Umformung des Aufspülkörpers noch nicht beendet war. Der marine Einfluß hatte sich, bedingt durch die ruhige Wetterlage seit der Aufspülung, noch nicht in das Sediment eingeprägt. Vorrangig war zu diesem Zeitpunkt die Stechkastenentnahme, in deren Profilen sich die Spültätigkeit in den Schichtungsstrukturen erkennbar widerspiegelte.

Das Strandprofil vor Rantum mit seinen morphologischen Formen entsprach zum Untersuchungszeitpunkt annähernd dem Standardprofil (AHRENDT 1994B). Dem Dünenfuß angelagert erstreckte sich rd. 30 m seewärts der auch bei Hochwasser trocken liegende obere Strandbereich ohne auffallende Strukturierung. Daran anschließend folgte im Bereich des Nassen Strandes ein steiler Strandhang (Höhendifferenz > 2m), der in einen schmalen Strandpriel und abschließend in ein Strandriff mit der Niedrigwasserlinie überging. Nördlich und südlich des Untersuchungsprofiles war als großräumige Strukturform ein "ridge and runnel" - System erkennbar. Weitere Erläuterungen zur morphologischen Erscheinung und Entwicklung des Sylter Strandes sind bei AHRENDT (1989, 1994A,B) nachzulesen.

6.3 Bestimmung der Umlagerung

6.3.1 Norderney

6.3.1.1 Buhnenfeld D1 - E1

Die Benutzung von eingefärbten und gehärteten Sänden (Tracerstäbe) diente der Ermittlung von Umlagerungstiefen. Parallel zu unseren Messungen wurden die bei der Forschungsstelle Küste üblichen Grenzwertanzeiger eingesetzt. Dabei wird ein dünner Stab aus Metall oder Kunststoff in den Boden gedrückt (min. 30 cm) und am oberen Ende mit einer Metallscheibe versehen, die bündig mit der Sedimentoberfläche abschließt. Das obere Ende des Stabes ist farblich markiert und mit einem Ring versehen, damit die Metallscheibe nicht überspringen kann. Der Stab sollte mindestens 20 cm aus dem Boden herausragen, um eine mögliche Sedimentation anzeigen zu können.

• April1992

Bei dem Vergleich beider Meßsysteme im Rahmen eines Vorversuches im April 1992 stellte sich heraus, daß die gemessenen Erosions- und Sedimentationwerte beider Systeme eng beieinander lagen. Zur Ermittlung der Vergleichsdaten wurde im Buhnenfeld ein Beprobungsraster aufgebaut, das aus 3 küstenparallelen Profilen bestand. Der Versuch fand bei ruhigen Witterungsbedingungen über zwei Tiden statt. Aus diesen hydrographischen und meteorologischen Randbedingungen heraus erklären sich die geringen Umlagerungswerte, die gemessen wurden. Obwohl das Hochwasser zweimal über die Untersuchungsfläche stieg, konnten nur Erosionsbeträge von max. 5 cm festgestellt werden. Auch bei der anschließenden Resedimentation wurden nur Werte um 5 cm gemessen, die Bilanz beider Vorgänge (Erosion und Sedimentation) zeigte sich somit ausgeglichen. Diese Feststellung traf für beide Meßsysteme zu.

August 1992

Ein letzter Vorversuch zur Umlagerungstiefe fand im August 1992 statt. Mit Rücksicht auf die im Juli 1992 an der "Weißen Düne" gemachten Erfahrungen mit den Grenzwertanzeigern wurde diesmal auf ihren Einsatz verzichtet, zumal das Buhnenfeld D1 - E1 als stadtnaher Badestrand genutzt wird, und daher für die in Kap. 6.3.1.2 beschriebene Problematik besonders anfällig ist. Im Untersuchungszeitraum zeigte sich das Wetter heiter bis wolkig mit Windstärken von 5 bis 6 Bft. Daraus resultierte eine stärkere Seegangsbelastung des Strandabschnittes als bei den letzten Beprobungen. Die hydrodynamischen Bedingungen führten zu Umlagerungswerten, die im Brandungsbereich deutlich über 10 cm betrugen. Eine genauere Aussage kann hier nicht getroffen werden, da die eingesetzten Tracerstäbe nur 10 cm lang waren und diese Länge sich bei den bisherigen Untersuchungen als ausreichend erwiesen hatte. Diese Erscheinung zeigte sich überall im Profil nahe der Niedrigwasserlinie (NWL). Die Erosion lag in diesem Bereich bei mehr als 10 cm. Die Ermittlung eines Sedimentationswertes war infolge der fehlenden Grundlage nicht mehr möglich. Das von der Umlagerung betroffene Sediment hatte eine Korngröße von im Mittel 1,75 PHI°, entsprechend 0,30 mm.

Im Gegensatz zu diesen starken Erosionswerten an der NWL stellt sich die Situation im Meßprofil nahe des Deckwerkes dar. Hier konnte eine Übersandung der Meßpunkte von bis zu 9 cm festgestellt werden. Die Tracerstäbe waren kaum erodiert, max. 1 cm Verlust trat auf. In den Stechkastenprofilen wurden die oberflächennahen Sedimentschichten als sehr feinkörnige Flugsande (2,65 PHI^o = 0,16 mm) erkannt, eine Beobachtung, die sich auch bei der Oberflächenkartierung bestätigte. Das sedimentierte Material konnte also nicht aus dem unteren Nassen Strand stammen, da dort ein gröberes Sediment vorlag.

September 1992

Am 29. und 30. September 1992 erfolgte die erste großräumige Einzeltidenbeprobung im Buhnenfeld D1 - E1. Durch den gewählten Zeitpunkt war gleichzeitig eine Bestandsaufnahme der sedimentologischen und morphologischen Gegebenheiten vor den stürmischen Wintermonaten gegeben. Abb. 29 zeigt die Lage der Probenpunkte im Buhnenfeld. Die ruhige Witterung mit leichtem SE-Wind führte zu einem Tideniedrigwasser (Tnw), das ca. 50 cm unter dem normalen Mitteltideniedrigwasser (MTnw) lag. Dadurch war es möglich, das Beprobungsraster in den Vorstrand auszudehnen.

Bedingt durch das ruhige Wetter hielten sich die Umlagerungsbeträge in engen Grenzen. Die Stationspunkte nahe des Deckwerkes (W3, M3) wurden nicht vom Hochwasser überflutet und zeigten somit auch keine nennenswerte Umlagerung. Die Stationspunkte in der Mitte der 3 Profile an der mittleren Hochwasserlinie (MHWL) waren gekennzeichnet durch eine positive Sedimentbilanz vor allem im östlichen Bereich des Buhnenfeldes. An der Niedrigwasserlinie (NWL) wurden infolge der längeren Brandungswirkung auf das Sediment Umlagerungstiefen bis zu 5 cm gemessen. Erosion und Sedimentation hielten sich die Waage. Auch hier traten die stärksten Umlagerungen im östlichen Teil des Feldes auf.



Abb. 29 Lage und Bezeichnung der Probepunkte im Buhnenfeld D1 - E1

(Orientierung der Stechkästen: KN = küstennormal; KP = küstenparallel)

W1 = 1/3 KN	W2 = 1/2 KN	W3 = 1/1 KN
M1 = 2/3 KN	M2 = 2/2 KN & 2/2 KP	M3 = 2/1 KN
01 = 3/3 KN	O2 = 3/2 KN & $3/2$ KP	

Oktober 1993

Im Oktober 1993 konnte ein interdiziplinärer Meßeinsatz unter Beteiligung aller Arbeitsgruppen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Umlagerungsuntersuchungen sind in Kap. 7.1.1 beschrieben.

6.3.1.2 Naturstrand "Weiße Düne"

An diesem natürlich entwickelten Strandbereich auf Norderney wurde im Juli 1992 zum ersten Mal die Verknüpfung von Stechkastenprofil und Bestimmung der Umlagerung mittels Tracer über einen Tidezyklus durchgeführt.

Der Strand unterscheidet sich vom Buhnenfeld D1 - E1 durch seine ausgeprägtere Oberflächenstrukturierung (s. Kap. 2.1.1.2) und sein klassisches Strandprofil. Die ausgebildeten Strandriffe wurden jeweils vor und nach der Tide profilmäßig in West-Ost-Richtung beprobt. Die Wetterlage stellte sich als sommerlich mit einem leichten Nordwind der Stärke 3 Bft dar. Das äußere der beiden Strandriffe zeigte infolge der länger einwirkenden Brandung eine leichte Erosionstendenz von im Mittel 2 cm. Das landeinwärts gelegene Strandriff wies in seiner Sedimentbilanz eine deutliche Sedimentation von im Mittel 6,5 cm auf. Dies läßt die Schlußfolgerung zu, daß entweder ein Sedimenttransport vom äußeren Riff landeinwärts stattgefunden haben muß oder das Rippelstrukturen bei beiden Strandriffen durch die Beprobungsstationen gewandert sind. Um diese Frage klären zu können ist die Auswertung und Beurteilung eines Stechkastenprofils und der darin dokumentierten Schichtung sehr hilfreich.

Eine Tatsache soll hier nicht unerwähnt bleiben, die die Untersuchungen in den Sommermonaten bei adäquater Witterung, wie sie für solche Beprobungen unerläßlich ist, problematisch machen. Das angesprochene Problem ist die Neugier und Sammelleidenschaft einiger Mitmenschen, die nun einmal auf einer vom Tourismus lebenden Insel existiert.

Bei den Umlagerungsbestimmungen an der "Weißen Düne" wurden wiederum parallel zu den Tracerstäben die Grenzwertanzeiger der Forschungsstelle eingesetzt. Sehr zum Leidwesen der Beteiligten mußte zum Ende der Untersuchung hin festgestellt werden, daß sämtliche Kunststoffstäbe, die als Grenzwertanzeiger und zur Orientierung fungierten, aus dem Boden herausgezogen und nicht mehr auffindbar waren. Dadurch erschwerte sich auch die Lokalisierung der ins Sediment eingebauten Tracerstäbe, die nicht gesondert gekennzeichnet waren. Dieses Beispiel verdeutlicht die Vorteile der Sandstäbe, die, bei geeigneter Kennzeichnung zur Lokalisierung durch den Bearbeiter, nicht so leicht im Boden zu erkennen sind und dadurch auch nicht die Neugier von Unbefugten erwecken.

45

6.3.2 Sylt

Der Einsatz von Tracermaterial als Umlagerungsindikator wird auf Sylt bereits seit mehreren Jahren angewandt: Die Beprobungsmethodik unterscheidet sich jedoch geringfügig von der in diesem Projekt angewandten Bestimmung. Aufgrund der anders gearteten hydrodynamischen Belastung der Strände auf Sylt im Vergleich zu denen auf Norderney, ist auf Sylt mit größeren Umlagerungsbeträgen zu rechnen. Dies bedeutet, daß auf Sylt nicht bei jeder Wetterlage mit den kurzen Tracerstäben gearbeitet werden kann. Zur Erfassung der Umlagerung muß mehr Material tiefer in das Sediment eingebracht werden. Dazu werden Bohrkerne definierter Länge aus dem Sedimentkörper entnommen und das Bohrloch mit unverfestigtem Tracermaterial wieder aufgefüllt. Der Beprobungspunkt wird vermessen und im Anschluß der Einwirkung von Strömung und Welle ausgesetzt. Zur Bestimmung der Umlagerung wird der gekennzeichnete Standort nach der Tide erneut beprobt, indem mit dem Vibrocorer (s. Kap. 6.1) ein Sedimentkern, der die Reste des eingebrachten Tracermaterials enthält, entnommen wird. Im Labor kann nach Öffnung des Bohrkernes die Bestimmung von Erosion und Sedimentation nach dem unter Kap. 5.1.4 beschriebenen Verfahren vorgenommen werden.

Diese Methodik zur Bestimmung der Umlagerung im Strandkörper ist mit großem logistischen Aufwand verbunden, so daß infolge der begrenzten finanziellen Mittel auch auf Sylt die Tracerstäbe zur Umlagerungsbestimmung benutzt wurden. Diese Nutzung ist an ruhige Wetterlagen gebunden, die die hydrodynamische Belastung der Strände gering halten. Zur Bewertung höherer Belastungen konnte auf Datenmaterial der Arbeitsgruppe Küstengeologie der Universität Kiel zurückgegriffen werden, das in einem früheren Forschungsvorhaben auf Sylt aufgenommen worden war (Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt).

Im Rahmen einer Beprobung am Rantumer Strand wurde ein Profil über Strandhang, Rinne und Strandriff gelegt. Die Beprobungspunkte befanden sich am Standhang, im Bereich Rinne/Leehang des Strandriffes, auf dem Strandriff und an der Niedrigwasserlinie (MTnw). Die hydrodynamische Belastung während des Einsatzes war mäßig, der Tideverlauf entsprach den mittleren Werten für MThw und MTnw.

An der Tidehochwasserlinie (Thw) am steilen Strandhang zeigten die Umlagerungswerte leichte Erosionstendenzen um 2 cm. Am Leehang des Strandriffes trat eine geringe Sedimentation von 2 bis 3 cm auf, während an der Niedrigwasserlinie wiederum Erosion um 3 cm vorherrschte.

6.4 Stechkastenprofile

Hauptuntersuchungsbereich für die Bewertung von Reliefgüssen war das Buhnenfeld D1 - E1 auf Norderney. Hier wurden bis März 1994 die meisten Stechkästen entnommen. Der Spülbereich der 7. Wiederholungsaufspülung erstreckte sich über eine Länge von 2,1 km von der Buhne D bis zur Buhne L1. Die Einbaumenge betrug ca. 500.000 m3. Mit den Schichtungsuntersuchungen konnte nicht unmittelbar nach Abschluß der Spülarbeiten begonnen werden, da sich erst ein quasistationärer Zustand mit einem naturnahen Strandprofil ausbilden sollte. Diese Entwicklung verlief außergewöhnlich schnell und war im August 1992 nahezu abgeschlossen, so daß die ersten Stechkästen entnommen werden konnten.

Als Vergleichsgebiet, um die natürliche Strandsituation ohne anthropogenen Eingriff auf Norderney darzustellen, wurde der östlich vom Buhnenfeld D1 - E1 gelegene Strand "Weiße Düne" im Platenanlandungsbereich des Riffbogens beprobt.

Auf Sylt wurden ebenfalls zwei Untersuchungsgebiete ausgewählt. Kampen-Nord stellt einen Aufspülbereich mit einer höftartigen Ausführung dar. Der Strandabschnitt vor Rantum war bereits seit mehreren Jahren nicht mehr aufgespült worden, so daß von einem natürlichen Strandprofil gesprochen werden kann.

6.4.1 Untersuchungsgebiet Norderney - Aufspülbereich Buhnenfeld D1 - E1

6.4.1.1 August 1992

Die Beprobung im August 1992 erfolgte in einem Mittenprofil des Buhnenfeldes D1 -E1. Ausgehend vom Deckwerk wurde das Profil in seewärtige Richtung ausgelegt und an ausgewählten Stationspunkten Stechkästen entnommen. Die Festlegung der Entnahmepunkte orientierte sich an der Morphologie, den Standpunkten der hydrographischen Meßsonden und dem Stand der Wasserlinie zur drei bestimmten Zeitpunkten:

- Hochwasserlinie (HWL)
- Mittelhochwasserlinie (MHWL)
- Niedrigwasserlinie (NWL).

Abb. 30 zeigt ein typisches Stechkastenprofil aus dieser Beprobung. Es wurde nahe der Meßsonde M2 in der Mitte des Buhnenfeldes entnommen. Erkennbar ist die horizontale Laminarschichtung, die sich über die gesamte Tiefe des Profils erstreckt. Das Profil stellt ein Abbild des Spülvorganges dar, d.h., daß die sichtbaren Strukturen aller Wahrscheinlichkeit nach während des Aufspülens entstanden sind. Durch die Niveauabnahme der Geländeoberkante werden auch tiefere Schichten des Spülkörpers sichtbar.



Abb. 30 Reliefguß eines Stechkastenprofils, Norderney, August 1992 (See = links))

Diese Bereiche sind noch nicht marin überprägt worden, so daß die ursprüngliche Schichtung erhalten geblieben ist. Eingeschaltet sind Muschelschillagen, besonders ausgeprägt in den oberen und unteren 5 cm des Profils. Im Kopfbereich des Profils tritt die laminare Schichtung in den Hintergrund, das Gefüge wirkt zerwühlt und regellos. Hierbei handelt es sich um den Aufarbeitungshorizont der letzten Flut mit einer Anreicherung von Schillresten.

6.4.1.2 September 1992

Die erste große Beprobung zur Erfassung eines Einzeltidenereignisses erfolgte am 29. und 30. September 1992 im Buhnenfeld D1 - E1. Sie erstreckte sich über das gesamte Hauptuntersuchungsgebiet **(Abb. 29)** und konnte gleichzeitig als Bestandsaufnahme der Sedimentverteilung sowie der Schichtungsstrukturen vor den Wintermonaten durchgeführt werden. Die Ausbringung der Stechkästen erfolgte in küstennormaler sowie küstenparalleler Orientierung zur Erfassung eventuell auftretender kleinräumiger Strukturunterschiede. Hilfspositionen zur Lage der Probenpunkte im Gelände lieferte das vorhandene hydrographische Meßnetz. Zusätzlich konnten infolge des extremen Niedrigwassers (0,5 m unter MTnw) zum Zeitpunkt der Untersuchung einige Proben im Vorstrand entnommen werden.

Nach der Präparation der Stechkästen im Labor und der Analyse der Reliefgüsse fiel die unterschiedliche Ausprägung der Schichtstrukturen im Nassen Strand und im Vorstrand auf. Die Vorstrandprofile zeigen keinerlei erkennbare Schichtung, das Sediment ist sehr homogen und regellos verteilt. Die Proben des Nassen Strandes zeigen dagegen ausgeprägte Strukturen, bestehend aus laminierten Sanden mit eingeschalteten Schillhorizonten.

Ein Vergleich der sedimentologischen Zusammensetzung der von der Umlagerung betroffenen Oberflächenproben, die vor und nach dem Tideereignis am Strand entnommen wurden, erfolgt in den Abb. 31 bis 34. Der Beprobungspunkt W3 wurde während des Hochwassers nicht überspült und durfte somit auch keine erkennbaren Unterschiede in der Sedimentzusammensetzung zeigen. Die geringen Differenzen sind auf die natürliche Sedimentvariabilität sowie Aufbereitungs- und Analytikfehler zurückzuführen. Bei W1 zeigt sich eine Verfeinerung des Sedimentes in der mobilisierten Sedimentzone, die allerdings nur bei ca. 1 cm lag. Die Bewertung solcher Umlagerungen ist mit Vorsicht vorzunehmen, da hier im Bereich der Meßgenauigkeit gearbeitet wird.



Abb. 31 Sedimentzusammensetzung im westlichen Bereich des Buhnenfeldes D1 - E1 über eine Tide in der mobilisierten Bodenschicht (m = morgens a= abends)



Abb. 32 Sedimentzusammensetzung im Mittenprofil des Buhnenfeldes D1 - E1 über eine Tide in der mobilisierten Bodenschicht (m = morgens a= abends)

KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"



Abb. 33 Sedimentzusammensetzung im östlichen Bereich des Buhnenfeldes D1 - E1 über eine Tide in der mobilisierten Bodenschicht (m = morgens a= abends)



Abb. 34 Sedimentzusammensetzung einer Vorstrandprobe im Buhnenfeld D1 - E1 über eine Tide in der mobilisierten Bodenschicht (m = morgens a= abends)

Das Profil M3 - M1 steht beispielhaft für die geringe Umlagerungsintensität während des Tideereignisses. Die Differenzen liegen im Bereich der Meßgenauigkeit. Der Probenpunkt O1 in der Nähe der Niedrigwasserlinie repräsentiert einen Bereich mit höherer Umlagerungsintensität. Die stärkere und längere Beanspruchung durch Wellenschlag an der Niedrigwasserlinie führt zu einer Vergröberung des Sedimentes (s. auch Vorstrandprobe). Die Veränderung der Sedimentzusammensetzung korreliert mit den gemessenen Umlagerungsintensitäten im Buhnenfeld. Der östliche Bereich des Buhnenfeldes hat die höchsten Umlagerungswerte und zeigt eine Kornvergröberung des Sedimentes. Die Bereiche, die infolge fehlender Überflutung oder abgeschwächter Seegangsbelastung nur geringe Umlagerungstendenzen erkennen lassen, weisen überwiegend eine Kornverfeinerung auf. Hier wirkt neben der Umlagerung durch Wasserbewegung auch der äolische Sandtransport mit feinkörnigen Flugsanden.

Abschließend bleibt anzumerken, daß die untersuchte Tide für die Beschreibung von Sedimentumlagerungen mittels Schichtungsstrukturen keine idealen Voraussetzungen geboten hat. Die ruhige Wetterlage wirkte sich negativ auf die Umlagerungsintensität aus. Es waren keine nennenswerten Unterschiede im Schichtungsaufbau der Bodenprofile über eine Einzeltide zu erkennen. Die Variabilität des Sedimentaufbaus auf engem Raum erschwert die Interpretation so geringer Umlagerungswerte und der Schichtungsstrukturen zusätzlich.

6.4.1.3 Weitere Beprobungen 1992/93

Die Ergebnisse der Schichtungsuntersuchungen vom Oktober 1993, die in Zusammenhang mit dem großen interdiziplinären Meßeinsatz ermittelt wurden, sind in Kapitel 7.1.3 dargestellt.

6.4.1.4 Abschlußbeprobung März 1994

Die Wintermonate 1992/93 und 1993/94 waren gekennzeichnet durch eine Reihe von Sturmtidenketten. Die außergewöhnlich starke Belastung der Buhnenfelder in diesem Zeitraum führte zu einem Abbau des gesamten Spülkörpers. Im März 1994 lag das Geländeniveau unter dem vor der 92er Aufspülung, so daß eine neuerliche Auffüllung zum Schutz des Deckwerks unumgänglich war. Zeichnete sich der Spülkörper während der gesamten Untersuchungszeit durch kaum oder nur schwach entwickelte Schichtungen aus, traten gegen Ende des Projektzeitraumes im März 1994 in den Bodenprofilen sehr schön differenzierte Schichtstrukturen auf (Rippelstrukturen verschiedener Ausbildung, Laminarschichtung, Schrägschichten). Die durchgeführte Stechkastenbeprobung im März zeigte in ihren Profilen Strukturen, die nicht durch den Aufspülkörper, sondern durch Material, welches in den Jahren vor 1992 dort eingelagert wurde, beeinflußt waren.

6.4.1.5 Abschließende Bemerkungen

Die Ermittlung der Schichtungsstrukturen durch Auswertung von Stechkastenprofilen wurde schwerpunktmäßig im Hauptuntersuchungsgebiet Norderney, Buhnenfeld D1 - E1 durchgeführt. Der Beprobung des Spülkörpers von 1992 sollte Aufschluß über die Sedimentzusammensetzung, die Umlagerungsintensität und die Schichtungsausbildung eines künstlich hergestellten Strandbereiches geben. Die Bodenprofile wurden entsprechend ihrer erkennbaren Schichtung in mehrere Abschnitte unterteilt und auf Strukturen untersucht. Anschließend erfolgte an den einzelnen Abschnitten eine granulometrische Bestimmung sowie die statistische Auswertung der Korngrößenparameter.

Die Untersuchung zeigte, wie stark die Entwicklung einer Schichtung von der Aufspülung selbst und dem angebotenen Material beeinflußt wird. Schon während des Spülvorganges entstand durch den Einfluß des Tidegeschehens eine prägende Schichtstruktur in Form von Parallelschichtung, hervorgerufen durch laminierte Sande und cm- bis dm-mächtige Schillbänke. Der Schill stammt überwiegend aus ehemaligen Rinnenablagerungen im Norderneyer Seegat und wurde durch die wiederholten Aufspülungen der letzten Jahrzehnte an den Strand verfrachtet. Ein Teil der Schillakkumulationen, welche in den Schichtprofilen erkennbar sind, wurden, wie oben bereits erwähnt, durch die Spültätigkeit angelegt. Durch Selektions- und Sortierungsprozesse kommt es darüberhinaus zur Ausbildung von Anreicherungshorizonten bestehend aus Schill und Schillbruch, vor allem im Bereich des Nassen Strandes. Diese Schillhorizonte wurden diskordant von Fein- und Mittelsandlagen überdeckt oder traten mit diesen in Wechsellagerung auf.

Der Nasse Strand zeigte als Schichtstrukturen im Bodenprofil auch nach marin erfolgter Überprägung durch Strömung und Seegang überwiegend laminierte Sande und Schillhorizonte, ausgebildet in Form paralleler Schichtung. Im Bereich der Niedrigwasserlinie bildete sich nach ruhigen Witterungsphasen eine schwache Großrippelstruktur aus, die aber infolge zunehmenden Energieeintrages wieder von einer Laminarschichtung überprägt wurde.

Die Ergebnisse der Schichtstrukturuntersuchungen im Buhnenfeld D1 - E1 zeigen deutlich die entstehende Problematik, wenn ein Fremdkörper, hier die Aufspülung mit ortsfremden Material, in ein bestehendes Gleichgewichtssystem eingebracht wird. Durch den ständigen Abtrag von Sediment, das zudem aus dem System "Buhnenfeld" entfernt wurde, konnte der Spülkörper keine marin beeinflußte Schichtung entwickeln. Die erkannten Schichtungsstrukturen waren überwiegend spülbedingt und durch den hohen Schillanteil als nicht spezifisch für Norderney anzusehen, wie Vergleichsuntersuchungen im Platenanlandungsbereich an der "Weißen Düne" gezeigt haben.

6.4.2 Untersuchungsgebiet Norderney - Naturstrand "Weiße Düne"

Die Auswertungen der Bodenprofile, die im Bereich der "Weißen Düne" entnommen wurden, zeigten exemplarisch den vertikalen Bodenaufbau eines unbeeinflußten Strandbereiches (Abb. 36).





Neben dem Auftreten der aus dem Buhnenfeld D1 - E1 bereits bekannten Laminarschichtung, ist hier sehr schön die Wechsellagerung von Rippelstrukturen und Diskordanzen zu erkennen. Landwärtig geneigte Großrippeln werden von diskordant aufliegenden laminierten Sanden und seewärtig geneigten Rippeln überprägt.

Die über eine Tidephase entnommenen Stechkastenprofile spiegeln den erhöhten Energieeintrag und die damit verbundene Umlagerungsintensität wieder, die während der Beprobung herrschte. Die an der gleichen Position vor und nach der Überflutung entnommenen Stechkästen im Strandriffbereich des Nassen Strandes lassen die Deutung zu, daß das Riff während der Überflutungsdauer seewärts gewandert ist. Diese Vermutung gründet sich auf die gegenläufige Einfallsrichtung einer Rippelstruktur in der gleichen Tiefenstufe beider Reliefgüsse.





Die Zusammensetzung der Strandsedimente im Bereich der "Weißen Düne" weist ein leicht gröberes Sediment als am Nordweststrand aus **(Abb. 35)**. Der Anteil an Schillmaterial ist zu vernachlässigen. Daher ist der Schill auch nicht an der Ausbildung von Schichtstrukturen im Bodenprofil beteiligt.

6.4.3 Untersuchungsgebiet Sylt - Aufspülbereich Kampen

Im Frühjahr 1992 wurde auf der Insel Sylt im Strandbereich Kampen bis List eine Aufspülung durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeiten erfolgte vor Kampen-Nord die Ausführung der Aufspülung in Höft-Form, so daß ein Vergleich mit der Aufspülmaßnahme auf Norderney möglich wurde, da im Buhnenfeld D1 - E1 auf Norderney ebenfalls die Höft-Form als Aufspülkörper gewählt worden war. Die Höftaufspülung fand vor Kampen-Nord im Juni 1992 statt. Die Beprobung der "Sandnase" erfolgte nach kurzer mariner Einflußnahme Anfang Juli 1992.

In Abb. 37 ist im Reliefguß die Ausbildung des Spülkörpers dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die nahezu parallel verlaufende Schichtung im Bodenprofil. Bei genauerer Betrachtung fallen die schwach ausgeprägten Diskordanzen auf, die von laminierten Sandlagen überdeckt werden und meist ein leichtes seewärtiges Einfallen der Schichten zeigen. Diese im Reliefguß beobachteten Strukturen traten in allen Stechkastenprofilen auf, die im Bereich des Spülkörpers entnommen wurden. Die Strukturen sind sehr eintönig entwickelt, laminierte Mittelsande mit leichten Diskordanzen bestimmen das Bild der Schichtung.

Das Sediment des Aufspülkörpers besteht überwiegend aus feinen und groben Mittelsanden mit einem Medianwert von 0,36 mm (1,47 PHI°). Es ist damit wesentlich gröber als das Spülmaterial auf Norderney (0,18 mm = 2,50 PHI°). Schillanteile wurden in den Reliefgüssen nicht gefunden. Sie sind in den Spülsanden, die für die Insel Sylt verwendet werden, nicht vorhanden. Darin besteht ein signifikanter Unterschied zum Spülgut, das auf Norderney verwendet wird. Dort werden seit Jahrzehnten mit den Aufspülungen Muschelschalen und Scullreste an den Strand verbracht, so daß dieses Material einen entscheidenden Einfluß auf die Erosions- und Sedimentationsvorgänge am Strand ausübt.

Eine Begutachtung des Aufspülkörpers einige Monate später zeigte eine Annäherung des Aufspülprofils an die natürlichen Gegebenheiten in diesem Küstenabschnitt. Das Spülmaterial war fortschreitend durch den marinen Einfluß ein- und umgearbeitet worden, und zeigte in seiner Strukturausbildung eine zunehmende Vielfalt der auftretenden Formen. Neben Laminarschichtung waren Rippel- und Schrägschichtungen erkennbar, getrennt durch ausgeprägte Diskordanzen. Das anstehende Sediment hatte sich vermutlich durch Selektionsprozesse leicht vergröbert.



Abb. 37 Reliefguß einer Stechkastenprobe aus dem Aufspülbereich Kampen-Nord, Sylt (See = links)

6.4.4 Untersuchungsgebiet Sylt - Rantum

Der Strand von Rantum liegt in einem Bereich der Sylter Küste, der schon seit mehreren Jahren nicht mehr aufgespült worden ist. Die Strukturen sind zwar nicht so unbeeinflußt wie im Gebiet der "Weißen Düne" auf Norderney, trotzdem kann auch beim Rantumer Strand von einem natürlich überprägten Bereich ausgegangen werden. Wie bereits erwähnt, repräsentiert dieses Strandprofil einen großen Teil der im Süden der Insel gelegenen Westküste Sylts (AHRENDT 1994B). Das anstehende Sediment besteht überwiegend aus groben Mittelsanden und Grobsanden sowie Kiesen (Medianwert > $0,35 \text{ mm} = 1,50 \text{ PHI}^\circ$), ein Zeichen hoher energetischer Belastung. Das steile Strandprofil belegt ebenfalls den starken Energieeintrag über Seegang und Strömung. Schill bildet nur einen verschwindend geringen Anteil am Sedimentaufbau.

Die Reliefgüsse der Stechkastenproben aus diesem Bereich des Nassen Strandes zeigen ausgeprägte Strukturen (Abb. 38). Deutlich erkennbar ist das grobe Sediment. Rippelstrukturen und Schrägschichtungen werden von diskordant aufgelagerten laminierten Mittel- und Grobsänden überdeckt. Es herrscht eine permanente Wechsellagerung von see- und landwärtig geneigten Schichtungen vor, die erosiv gekappt worden sind. Nur vereinzelt treten Muschelschalen im Profil auf, sie sind aber nicht sedimentbildend.

Der Vergleich von zwei an derselben Position entnommenen Proben, nur getrennt durch eine Tide, gestaltete sich aufgrund der natürlichen Sedimentvariabilität schwierig. Eine sichtbare Korrelation der beiden Reliefgüsse über die Schichtstrukturen ist kaum möglich, da in den identischen Tiefenstufen Strukturunterschiede auftauchen. Die mit den Tracerstäben gemessene Umlagerung hat aber gleichzeitig nicht bis in diese Tiefen gewirkt.

Die während der Beprobung herrschenden hydrodynamischen und meteorologischen Randbedingungen führten zu einer Aufarbeitung der oberflächennahen Sedimente bis zu einer Tiefe von ca. 6 cm (Erosions- und Sedimentationswerte). Die in beiden Reliefgüssen auftretende oberflächennahe Schichtung bestand aus laminierten Sanden wechselnder Zusammensetzung, erkennbar an der unterschiedlichen Ausprägung, d.h, dem unterschiedlich starken Heraustreten der einzelnen Schichten. Als Unterschied zeigt der Reliefguß, der nach dem Tideereignis entnommen wurde, eine stärker ausgebildete Laminarschichtung an der Oberfläche, wie sie in der Schwappzone von Stränden typisch ist.

Der Nasse Strand wurde im Untersuchungsgebiet von einer Rinne geteilt. Im Profil zeigte eine am seeseitigen Hang der Rinne entnommene Probe beispielhaft die Ausbildung von Rippelstrukturen, Riffstirnschichten und schräggeschichteten Sanden. Sie dokumentierten die Verlagerung der Rinne über einen längeren Zeitraum.



Abb. 38 Reliefguß einer Stechkastenprobe; Strandbereich Rantum, Sylt (See = links)

6.5 Oberflächenproben und Sedimentvariabilität

Zur Darstellung langfristiger sedimentologischer Entwicklungen im Untersuchungsbereich wurden Oberflächenproben entnommen. Die Entnahme solcher Proben dokumentiert den Bereich von 0 bis 6 cm Tiefe hinsichtlich der granulometrischen Zusammensetzung des Sedimentes und seiner räumlichen Variabilität.



Abb. 39 Sedimentvariabilität zweier Stechkastenprofile im Buhnenfeld D1 - E1

Eine weitere Vorgabe war der Vergleich der Korngrößenverteilung einer Oberflächenprobe mit dem vergleichbaren Probenmaterial aus dem Stechkastenprofil. Untersucht werden sollte die Frage, was mit dem Sand hinsichtlich seiner granulometrischen Zusammensetzung geschieht, wenn Wachs hinzugefügt und später wieder entfernt wird. Ganz eindeutig zu beantworten ist diese Frage nach den Untersuchungen nicht (Abb. 40 und 41). Teilweise überdeckten sich die Ergebnisse sehr gut, d.h., es waren kaum nennenswerte Unterschiede in der Zusammensetzung feststellbar. Einige Proben zeigen aber auch Abweichungen in der granulometrischen Zusammensetzung von 10 bis 20%. Erklärbar wird dies durch die Variabilität des inneren Sedimentaufbaus eines Strandkörpers. Proben, die in unmittelbarer Nähe zueinander entnommen wurden, zeigten teilweise deutlich erkennbare Unterschiede in ihrer granulometrischen Zusammensetzung (Abb. 39). Dieses Phänomen der Variabilität tritt besonders bei den aufgespülten
Untersuchungsbereichen auf. Bei natürlich beeinflußten Stränden (z.B. Sylt-Rantum) fallen die Unterschiede in der Sedimentzusammensetzung geringer aus.



Abb. 40 Vergleich der granulometrischen Zusammensetzung einer Oberflächen-(Px-o) und einer Stechkastenprobe (Px-s); Tiefenstufe 0 bis 6 cm, Aufspülbereich Norderney



Abb. 41 Vergleich der granulometrischen Zusammensetzung einer Oberflächen-(Px-o) und einer Stechkastenprobe (Px-s); Tiefenstufe 0 bis 6 cm, natürlicher Strand, Sylt

Für die Vergleichbarkeit von behandelten (Wachszugabe) und unbehandelten Proben kann davon ausgegangen werden, daß bei fürsorglicher Behandlung des Materials im Labor ein hoher Reinheitsgrad der Probe erreichbar ist, und die feinen Anteile nur in sehr geringem Maße mit dem Wachs entfernt werden. Diese Aussage trifft allerdings nur auf die in diesem Projekt zur Bearbeitung vorliegenden Sedimente zu. Sie bestanden überwiegend aus Fein- und Mittelsanden mit nur sehr geringen Anteilen < 63 μ m. Wattsedimente, die in ihrer Zusammensetzung sehr viel feinkörniger sind, sollten mit der angewandten Reinigungsmethode nicht behandelt werden. Die Fragestellung, ob nicht ein unverhältnismäßig hoher Anteil an feinkörnigem Material mit dem Wachs herausgelöst und fortgeführt wird, ist noch nicht eingehend untersucht worden.

6.6 Kurzer Vergleich zwischen Norderney und Sylt

Ein Aspekt unserer Untersuchungen war der Vergleich und die Gegenüberstellung der Strände von Norderney und Sylt. Beide Inseln unterscheiden sich grundlegend in ihrer Exposition in der südlichen Nordsee. Norderney ist West-Ost ausgerichtet und zeigt infolge der vorherrschenden Hydrographie einen ausgeprägten Küstenlängstransport nach Osten. Sylt erstreckt sich nahezu von Nord nach Süd und ist somit dem vorherrschenden Seegang aus NW stärker ausgesetzt, was zu einem geteilten Sedimenttransport nach Norden und Süden führt (AHRENDT 1989).

Auf Sylt wird der Küstenlängstransport nicht durch Buhnenbauwerke unterbrochen. Auf Norderney kommt dieser Längstransport zum erliegen bzw. er wird weit in den Vorstrandbereich hinausgedrängt, wenn das Strandniveau unter die Oberkante der Buhnen absinkt. Eine Verfrachtung des Sedimentes über die Buhnen hinweg erfolgt nur noch durch äolischen Transport bei fehlender Überflutung. Sedimentbewegung herrscht dann überwiegend nur in küstennormaler Richtung vor, der Nachschub über die anderen Buhnenfelder ist unterbrochen.

Ein weiterer Unterschied liegt in der Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien. Norderney ist eine Barriere-Insel, die sich über das Stadium einer Sandplate zu einer Düneninsel, aufbauend aus Fein- und Mittelsanden, entwickelt hat. Sylt ist dagegen aus der Abtragung eines eiszeitlichen Geestkernes mit grobkörnigen jungtertiären Flußsanden entstanden. Das Sediment, das die Düneninsel Norderney aufbaut, findet sich in den Sylter Außensänden wieder. Die verwendeten Sedimente für die Aufspülungen auf beiden Inseln unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung. Für Norderney steht nur ein relativ feinkörniges Spülmaterial, überwiegend bestehend aus Feinsanden mit Korngrößen um 0,15 bis 0,25 mm (2,70 PHI° bis 2,00 PHI°), in ausreichendem Maße zur Verfügung. Das Sylter Spülgut ist mit 0,36 mm (1,50 PHI°) deutlich gröber ausgebildet. Zudem fehlt auf Sylt fast vollständig die Schillkomponente, die auf Norderney einen beträchtlichen Anteil am Sediment ausmacht. Der durchschnittliche Schillgehalt in den Strandsedimenten der Strände auf den ostfriesischen Inseln liegt um 10%, Norderney dagegen zeigt deutlich höhere Werte in den Untersuchungsbereichen am Nordweststrand. Schill wirkt sich auf das Erosionsverhalten der Sedimentoberfläche aus. Unter Berücksichtigung der Äquivalentkorngrößen der Muschelschalen vergröbert sich das Sediment. Daraus müßte man folglich den Schluß ziehen, daß das vergröberte Sediment weniger stark erodiert wird. Das Verhalten von Schill und Schillbruch ist aber noch nicht so eingehend untersucht worden, um hier allgemeingültige Aussagen zur Erosionsstabilität dieses Materials treffen zu können.

Zum Abschluß noch einige Bemerkungen zur Regenerationsfähigkeit von Stränden. Auf Sylt kann man im Frühjahr immer wieder beobachten, wie mit der abnehmenden hydrodynamischen Belastung der Strand die Verluste der winterlichen Stürme und Sturmfluten auszugleichen vermag. Verluste sind zwar nicht vollständig ersetzbar, in Verbindung mit einer sinnvollen regelmäßigen Aufspülung aber in erträglichen Grenzen zu halten. Der Einfluß des Küstenlängstransportes macht sich positiv bemerkbar. Norderney zeigt in den Buhnenfeldern am West- und Nordweststrand nicht diese ausgeprägte Regenerationsfähigkeit. Bedingt durch denn unterbrochenen Küstenlängstransport wird das eingespülte Material durch den küstennormalen Transport unter Einwirkung von Seegang und Strömung fortgeführt. Dieser Verlust an Material geschah innerhalb der Projektdauer so schnell, daß noch vor Abschluß der Untersuchungen eine neuerliche Aufspülung zum Schutz der Bauwerke notwendig wurde. Allerdings muß angemerkt werden, daß in den Wintern 1992/93 und 1993/94 eine ausgesprochen starke Sturmfluthäufigkeit mit länger andauernden Sturmtidenketten festgestellt wurde.

Folgerungen und Vorschläge, die aus geologischer Sicht für die Aufgaben des Uferschutzes am Westkopf von Norderney relevant sind und zu einer Streckung der Spülintervalle führen könnten, sind in Kapitel 8 nachzulesen.

7. Ergebnisse des gemeinsamen Meßeinsatzes im Oktober 1993

Am 19. und 20. Oktober 1993 konnte erstmalig ein interdiziplinärer Meßeinsatz von Sedimentologie/Morphologie und Hydrographie im Bereich des Nordwest-Strandes auf Norderney im Buhnenfeld D1 - E1 durchgeführt werden. In der Arbeitsgruppensitzung vom 6. Juli 1993 wurde dabei für den Aufgabenbereich des Geologischen Institutes der Universität Kiel folgender Untersuchungsschwerpunkt während des Meßeinsatzes formuliert:

- Bestimmung der maximalen Umlagerungsintensität mit Tracerstäben
- Bestimmung der Schichtungsstrukturen.



Abb. 42 Untersuchungsfeld D1 - E1 mit Beprobungsraster, Oktober 1993

Die Festlegung der Profillinien zur Ausbringung der Tracerstäbe und der Entnahme der Stechkästen erfolgte in Anlehnung an das Untersuchungsfeld (30m x 30m) der Forschungsstelle Küste (3. Zwischenbericht der Forschungsstelle Norderney, Dezember 1993). Es wurde ein küstennormales und küstenparalleles Profil ausgelegt **(Abb. 42)**.

7.1 Sedimentologische Untersuchungen

7.1.1 Umlagerungsintensität

Die Bestimmung der Umlagerung innerhalb der Sedimentsäule erfolgte mit Tracerstäben. Diese aus eingefärbtem Sand hergestellten und anschließend verfestigten Stäbchen ermöglichen eine Aussage über die Erosions- und Sedimentationsraten. Bei der Betrachtung der Sedimentationswerte muß allerdings mit Vorsicht interpretiert werden, da sie nur die Summe von mehreren Erosions- und Sedimentationsvorgängen während einer vollen Tide widerspiegeln.

Die maximale Erosionstiefe war ausschlaggebend für den zu untersuchenden Bereich des Stechkastens, denn neben den Schichtungsstrukturen wurde auch die eventuell unterschiedliche Korngrößenverteilung im umgelagerten Bereich zur Bewertung herangezogen.

Die Tracerstäbe wurden in unmittelbarer Nähe der Stechkastenentnahmestationen ausgebracht. Die maximale Erosionstiefe konnte durch Ausgrabung und Längenbestimmung der Tacerstäbe nach der zu untersuchenden Tide ermittelt und auf die gleichzeitig entnommenen Stechkastenprofile übertragen werden. Der betreffende Bereich des Sedimentprofils im Stechkasten beschrieb die Umlagerung über eine Tide.

Aus den Abb. 43 und 44 sind die Umlagerungsintensitäten für das küstennormale und küstenparallele Profil im Buhnenfeld D1 - E1 erkenntlich. Die Erosionstiefe lag bei maximal 5 cm, während bei der Sedimentation Werte bis zu 6 cm auftraten. Die ermittelten Werte stimmen sehr gut mit den Meßdaten der Sondentürme von Prof. Gust, TU Hamburg-Harburg, überein (Präsentationsfolie v. 16.02.94). Auch hier wurden bei der Auswertung der Sondensignale über die Bodenbewegung Umlagerungen bis zu 5 cm, in Spitzen bis 7 cm gemessen. Auffällig bei der Sondenmessung war die Häufung von Bodenbewegungen während der Ebbphase. Dies legt die Vermutung nahe, daß die von uns

KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"

mit den Tracerstäben ermittelten Umlagerungstiefen bei ablaufendem Wasser entstanden sind.



0 = Keine Daten





0 = Keine Daten



7.1.2 Korngrößenverteilung

Die Umlagerungstiefe betrug während der zu untersuchenden Tide 5 bis 6 cm. In den Abb. 45 und 46 ist die Veränderung der Sedimentzusammensetzung bis 5 cm Tiefe über eine Tide für alle Profilstationen aufgetragen. Dargestellt werden die folgenden Korngrößenfraktionen:

< 0,2 mm	Feinsand	< 2,25 PHI°	
0,2 - 0,35 mm	feiner Mittelsand	2,25 - 1,50 PHI°	
> 0,35 mm	grober Mittelsand.	> 1,50 PHI°	

Im küstennormalen Profil L1 bis L4 ist deutlich eine Abnahme der Korngrößenfraktion < 0,2 mm bei gleichzeitiger Zunahme der gröberen Fraktion > 0,35 mm erkennbar. Der Anteil 0,2 bis 0,35 mm blieb fast unverändert. Das küstenparallele Profil Q1 bis Q4 zeigt eine ähnliche Tendenz. Die Ausnahme bilden die Stationen Q2 und Q3. Der Feinanteil < 0,2 mm nimmt auf Kosten der Grobfraktion > 0,35 mm zu. Ein Feinsandschleier könnte sich in diesem Bereich des Strandes über die Beprobungsstationen gelegt haben. Die ruhigen hydrodynamischen Randbedingungen am Untersuchungstag führten somit offensichtlich zu einem Transport der Korngrößenfraktionen bis 0,2 mm.



Abb. 45 Veränderung der Sedimentzusammensetzung bis 5 cm Tiefe (Küstennormalprofil)

KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"





7.1.3 Schichtungsstrukturen

Die Sedimentverteilung im Buhnenfeld D1 - E1 wird stark geprägt vom Seegang und der Gezeitenströmung. Bei auflaufendem Wasser ist eine hohe Mobilisierung von Material besonders im Brandungsbereich zu beobachten. Dies führt zu einer heterogenen Sedimentverteilung im Boden, wobei kleinräumige Unterschiede in der Sedimentzusammensetzung und -struktur auftreten. Diese Strukturierung ist in den Stechkästen gut zu erkennen.

Bei der Meßkampagne im Oktober 1993 wurden die Stechkastenprofile entlang eines Küstennormal- (Deckwerk - See) und eines Küstenparallelprofils (Buhne D1 - Buhne E1) entnommen **(Abb. 42)**. Die dokumentierte Orientierung der Stechkästen im Gelände erlaubt im späteren Reliefguß die Interpretation der Schichtungsstrukturen.

Zwei Proben, die in unmittelbarer Nähe zueinander entnommen wurden, zeigten deutliche Strukturunterschiede in der Schichtung über das gesamte Bodenprofil. Dies kann bei der Interpretation der Stechkästen dazu führen, daß augenscheinlich das gesamte Profil (30 bzw. 40 cm) durch eine Tide beeinflußt worden ist, obwohl bei einer ruhigen Wetterlage, wie sie am 19. Oktober 1993 vorherrschte, nur die oberen 5 bis 10 cm der Sedimentsäule durch hydrodynamische Prozesse umgelagert wurden. Am Beispiel der Reliefgüsse Q2m (Querprofil 2, morgens) und Q2a (Querprofil 2, abends) sind die erkannten Schillhorizonte in unterschiedlichen Tiefenstufen eingebettet. Q2m zeigt laminierte Fein- und Mittelsandlagen in 10 bis 15 cm Tiefe, während bei Q2a in der gleichen Tiefenstufe Muschelhorizonte vorkommen (Abb. 49 und 50).

Die Profile Q/L1m (Abb. 47) und Q/L1a (Abb. 48) zeigen sehr anschaulich die Wechsellagerung von Schräg- und Horizontalschichtung. Die Schrägschichtungen sind wahrscheinlich auf ein kleinräumiges Strandriff oder Rippelstrukturen zurückzuführen, die im Bereich der Stechkastenentnahme hin und her gependelt sind. Die erkennbaren Fein- und Mittelsandlagen werden durch Schillhorizonte unterbrochen, die auf einen geringfügig erhöhten Energieeintrag schließen lassen, als er bei der Ablagerung von Fein- und Mittelsanden auftritt (REINECK/SINGH 1980).

Für die Stechkastenprofile ergab die Auswertung der Tacer eine maximale Erosionstiefe von 5 - 6 cm, bedingt durch die ruhige Wetterlage zum Untersuchungszeitraum. In **Tab. 4** sind die Umlagerungstiefen den Stechkastenstationen zugeordnet. Zur Interpretation der Stechkastenprofile hinsichtlich des Einflusses der erfassten Tide ist dieser Umlagerungsbereich von Interesse.

Tab. 4 Zuordnung der Tracerstationen zu den Stechkastenentnahmestellen

Stechkastenstation	Tracer	Erosion (cm)	Sedimentation (cm)
0/[1	TT1 TT9	5	5
	T3.T4	4	5
L3	T5,T6	2 - 3	2 - 3
L4	T7	2	3
Q2	T9,T10	4	5 - 6
Q3	T11,T12	3 - 4	5 - 6
Q4	T13	3	5



Abb. 47 Reliefguß des Stechkastenprofils Q/L1m (See = links)



Abb. 48 Reliefguß des Stechkastenprofils Q/L1a (See = links)



Abb. 49 Reliefguß des Stechkastenprofils Q2m (See = links)



Abb. 50 Reliefguß des Stechkastenprofils Q2a (See = links)

Bei der Beprobung eines natürlichen Strandabschnittes auf Norderney (ohne Deckwerk- und Buhnenbauwerke) im Juli 1992 im Bereich "Weiße Düne" zeichneten sich die Stechkastenprofile durch Schillarmut aus. Daraus kann die Schlußfolgerung gezogen werden, daß der Schill im Buhnenfeld D1 - E1 größtenteils durch den Spülvorgang herangeführt worden ist und nicht durch natürliche sedimentologische und hydrologische Vorgänge. Über den gesamten Zeitraum der Untersuchung von August 1992 bis April 1994 verblieb der Großteil des Schillmaterials im Buhnenfeld D1 - E1 und konnte somit begrenzt auf diesen Bereich als Indikator für eine Beurteilung der hydrodynamischen Bedingungen genutzt werden.

Eine über das Buhnenfeld D1 - E1 hinausgehende Bewertung des Energieeintrages mit Hilfe des Schillmaterials ist nur mit großer Vorsicht vorzunehmen. Es wird mit einem natürlichen Tracer gearbeitet, der augenscheinlich von den hydrodynamischen Randbedingungen nicht an diesen Strandbereich gehört.

7.1.4 Oberflächenbeprobung

Parallel zur Entnahme der Stechkästen wurden Referenzoberflächenproben an den Stationspunkten entnommen. Die Oberflächenproben stellen den Bereich bis 6 cm Tiefe dar, um einen Vergleich mit der Sedimentverteilung des oberen Stechkastenprofils zu ermöglichen. Zusätzlich wurde in den Oberflächenproben auch der Kalkgehalt bestimmt, der einen Rückschluß auf den Schillanteil ermöglicht.

In den Abb. 51 bis 54 ist der Medianwert (d50) und der Kalkgehalt jeweils am Morgen und Abend im küstennormalen und küstenparallelen Profil dargestellt. Der vermutete Zusammenhang zwischen Medianwert und Kalkgehalt konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Es war davon ausgegangen worden, daß infolge von größerem Schillund Schillbruchanteil, dargestellt durch den Kalkgehalt, auch die mittlere Korngröße d50 ansteigen muß. Dies ist zwar bei fast allen Stationen der Fall wenn man die Werte vor und nach der Tide in Beziehung setzt. Die Schwankungsbreite der Werte untereinander ist aber so groß, daß eine eindeutige Zuordnung nicht gerechtfertigt erscheint.



Abb. 51 Sedimentparameter der Oberflächenproben (küstenparalleles Profil), morgens





KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"



Abb. 53 Sedimentparameter der Oberflächenproben (küstennormales Profil), morgens





7.2 Versuch der Verknüpfung von Sedimentologie und Hydrographie

Die Zusammenführung von sedimentologischen und hydrographischen Daten stellt, bedingt durch die sehr unterschiedliche Art der Datengewinnung, eine besondere Schwierigkeit dar. Die manuelle Entnahme von Sedimentproben im Gelände kann im Tidebereich nur während der Ebbphase durchgeführt werden, wenn der zu untersuchende litorale Bereich nicht von Wasser bedeckt ist. Eine Probennahme in wasserbedeckten Bereichen ist nur bei extrem ruhigen Witterungsbedingungen und mit großem logistischen Aufwand durchführbar. Ruhige Wetterlagen bringen aber den Nachteil mit sich, kaum meßbare Auswirkungen auf das Sediment (Umlagerungtiefe) zu zeigen, bzw. nur so geringe Veränderungen zu bewirken, daß diese durch Meßungenauigkeiten überdeckt werden.

Sedimentumlagerungen und Veränderungen im Schichtungsaufbau innerhalb der Sedimentsäule während der Überflutung können nur vor und nach einer Flutphase gemessen werden, so daß die ermittelten maximalen Umlagerungsbeträge, die sich aus Erosions- und Sedimentationsvorgängen zusammensetzen, die Summe einer unbekannten Anzahl von Sedimentmobilisierungen widerspiegeln. Die Gesamtumlagerung kann mit dieser Methode festgestellt werden, nicht aber einzelne, kurzfristig prägende Vorgänge während der Überflutung. Die bisher gängigen und erprobten Entnahmemethoden, die mit einem vertretbaren Aufwand an Kosten und Material durchgeführt werden konnten, können bei der oben beschriebenen Problematik keine Abhilfe schaffen. Hier sind der manuellen Probennahme Grenzen gesetzt, die innerhalb eines vernüftigen Kostenrahmens nicht überwunden werden können.

Eine permanente Beobachtung und Aufzeichnung von Sedimentbewegungen durch ein automatisiertes Meßsystem, das jede Sedimentmobilisierung festhält und bei einer späteren Auswertung nachvollziehbar macht, ist eine sinnvolle Ergänzung zur manuellen Probenentnahme im Gelände. Die ideale Verbindung wäre demnach ein System, das, sobald eine nennenswerte Umlagerung gemessen wird, automatisch eine Probennahme veranlaßt. Am Beispiel der Stechkastenprofile wäre dann eine Strukturanalyse möglich, wobei der Aufbau der Schichtungsstruktur bestimmten zeitgleich gemessenen hydrographischen Parametern wie Seegang, Wellenhöhe, Wellenenergie etc. zugeordnet werden kann.

8. Zusammenfassung und Folgerungen

Im Mittelpunkt des geologischen Teiles im Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen" standen sedimentologische Vorgänge bei der Aufarbeitung eines Spülkörpers auf der Düneninsel Norderney. Hier sollten die zeitliche Entwicklung der Prozesse bei der Aufarbeitung des ortsfremden Materiales in einem Testfeld (Buhnenfeld D1 - E1), die Erosionsabläufe und die Umlagerungstiefen verfolgt werden. Auf Norderney werden seit 1951 im Erosionsbereich nahe am Westkopf in unregelmäßigen Abständen Aufspülungen durchgeführt, so daß die allgemeinen Entwicklungstendenzen bekannt sind. An diese Kenntnisse anknüpfend, fanden vor allem die Untersuchungsmethoden der Analyse der Schichtungsprofile mit dem Aufbau der einzelnen Kornlagen und die Bestimmung der Umlagerungstiefen mit Tracerstäben, ergänzt durch andere Verfahren, Verwendung. Für die Feldarbeiten stand leider nur ein Zeitraum von knapp 2 Jahren zur Verfügung.

Vergleichende Untersuchungen fanden, vor allem gestützt auf Daten aus dem Vorhaben "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt", an der Westküste von Sylt statt. Sylt hat sich, im Gegensatz zur Düneninsel Norderney, aus der Abtragung eines eiszeitlichen Geestkernes mit grobkörnigen jungtertiären Flußsanden entwickelt. Dadurch unterscheiden sich die beiden Inseln nicht nur in der Orientierung der Längsachsen und der Exposition, sondern auch in der Zusammensetzung der Sedimente. Die Korngrößen der Sande von Norderney, hervorgegangen aus einer Sandplate mit späterer Dünenentwicklung, sind viel feiner (grober Feinsand bis feiner Mittelsand), als die Strand- und Dünensande von Sylt.

Die beiden Inseln sind zugleich Beispiele für unterschiedliche Gestaltungen der Aufspülkörper. Auf Norderney werden die Auffüllungen bei Unterschreitung eines Mindestprofils (Die Küste, EAK 1993) so durchgeführt, daß eine möglichst naturnahe Strandneigung entsteht. Bei der Aufspülung 1992, deren Aufarbeitung untersucht worden ist, war der Vorstrand in dieses Profil einbezogen. Die neueren Aufspülungen auf Sylt nicht die erste Versuchssandvorspülung - erfolgten auf dem Strand und gliedern sich in einen "Depotbereich" auf dem höheren Strand und ein vorgelagertes "Verschleißteil". Der mittlere Medianwert (d50) der untersuchten Strandsedimente auf Norderney pendelte um 0,30 mm (1,75 PHI^o). Der Sand ist außerdem "sehr gut" sortiert, d.h., das Korngrößenspektrum ist eng. Teilweise hatte das Spülgut sehr hohe Schillgehalte. Bei Berücksichtigung der Äquivalentkorngrößen der Schalen ergeben sich hier deutlich gröbere Vergleichswerte, Medianwerten über 0,50 mm (1,00 PHI^o) entsprechend. Durch Auswaschung der Fein- und Mittelsandanteile infolge Brandung und Strömung entstanden zeitweise ausgedehnte Muschelhorizonte, die sich bei den Geländearbeiten als erhebliches Hindernis erwiesen. Bei den Sondierungen waren sie nur schwer, teilweise überhaupt nicht zu durchdringen.

Als Folge der Auswaschung trat auch insgesamt eine leichte Vergröberung des Korngrößenspektrums ein. Kurz nach Beendigung der Spülarbeiten im Juni 1992 lag der Medianwert überwiegend bei 0,18 bis 0,22 mm (2,47 PHI° bis 2,18 PHI°), das Sediment muß also nach allen sedimentologischen Erfahrungen mit Spülsand als sehr feinkörnig bezeichnet werden. Im Februar/März 1994 hatte dieser Wert auf 0,40 bis 0,45 mm (1,32 PHI° bis 1,15 PHI°) zugenommen. Während dieser Prozesse blieb das Korngrößenspektrum durch weg eng, d.h., die Sortierung sehr gut.

Ein Schwerpunkt der geologischen Untersuchungen lag in der Analyse der Schichtungsstrukturen. Während der Spülarbeiten dürften sich aus dem abfließenden Sand/Wassergemisch überwiegend laminare Schichtungen gebildet haben. In der Folgezeit wurde das Sediment des Spülkörpers marin überprägt. Die Ausbildung der Schichtungsstrukturen beschränkte sich auf wenige Haupttypen:

- laminierte Schichten
- Rippelschichtung
- Muschelschillbänke.

Unerwartet hoch waren die Abtragungsraten und Umlagerungstiefen, die als weiterer Schwerpunkt verfolgt wurden. Diese hatten zur Folge, daß häufig Tracerstäbe nicht wieder aufgefunden werden konnten, die Umlagerungstiefen also gelegentlich die Länge der Tracerstäbe (bis mehrere Dezimeter) überschritt. Diese Schnelligkeit des Ablaufes der Vorgänge hatte Folgewirkungen, durch die sich Einschränkungen der Untersuchungsmöglichkeiten ergaben. In der Regel kam es nicht zur Ausbildung von Oberflächenlagen, die mit den unmittelbar vorhergegangenen "hydrologischen Ereignissen" korrelierbar waren. Vielmehr ging nahezu regelmäßig die Abtragung so weit, daß stets "frisches" Spülgut an die Oberfläche gelangte. Die bei der Konzipierung des Vorhabens erwarteten "Gleichgewichtshorizonte" zwischen Sediment- und Schichtungsausbildung einerseits und den hydrologischen Kräften andererseits kamen so nicht zur Ausbildung.

Im fortgeschrittenen Winter 1993/94 hatte die Abtragung einen solchen Umfang erreicht, daß auch älteres Strandmaterial in der Vorgänge einbezogen wurde. Von nun an hätten bessere Möglichkeiten bestanden, die angestrebten speziellen Untersuchungen durchzuführen. Nun mußte jedoch kurzfristig zur Sicherung der Deckwerke eine neue Vorspülung durchgeführt werden, die bis zum Herbst 1994 schon wieder weitgehend abgetragen war. Aus diesen Gründen hat sich Norderney trotz der günstigen logistischen Voraussetzungen nicht als optimaler Standort für die Bearbeitung der geologischen Fragen bewährt.

Ein Experiment zur Erfassung von Wechselwirkungen zwischen Energieeintrag, Sedimentumlagerung und Morphologie fand im Oktober 1993 statt. Hier zeigte sich, daß selbst bei den sehr ruhigen Witterungsbedingungen des Meßzeitraumes im untersuchten Buhnenfeld D1 - E1 eine Umlagerung der Oberflächensedimente im Mittel bis in 5 bis 6 cm Tiefe stattfand. Somit ist die Wasserbewegung an der überwiegenden Zahl der Tage im Jahr so stark, daß Material der Sandkorngrößen, wie sie im Spülkörper vertreten sind, in Bewegung versetzt wird. Dieses ist die Begründung für die hohen Abtragungsraten und Erosionstiefen. Die angestrebten Korrelierungen zwischen Wasserbewegung und Sedimenteigenschaften waren somit unerreichbar.

Ähnliche Beobachtungen konnten an der Westküste von Sylt gemacht werden. Auch hier war bei beträchtlichen Umlagerungstiefen die Korrelierung zwischen Energieeintrag und Sedimenteigenschaften ein großes Problem. Unter den dortigen Bedingungen hatten auch die unterschiedlichen Zeitskalen von hydrologischer Messung, Sedimentanalyse und Strandvermessung zusätzliche methodische Probleme aufgezeigt. Eine Folgerung ist, daß Detailuntersuchungen zur Korrelierung der Parameter wohl nur in Experimenten unter kontrollierbaren Laborbedingungen möglich sein werden.

Für die Aufgaben des Uferschutzes nahe dem Westkopf von Norderney ergeben sich aus geologischer Sicht die nachstehenden Schlußfolgerungen:

KFKI - FV "VORSTRAND- UND STRANDAUFFÜLLUNGEN IM BEREICH VON BUHNEN-DECKWERKS-SYSTEMEN"

- Es muß angestrebt werden, für die Strandauffüllungen deutlich gröberes Material zu verwenden. Dieses ist nur durch Nutzung von eiszeitlichen Schmelzwassersanden aus dem Untergrund möglich und somit sehr aufwendig. Erfahrungen mit früheren Kiesaufschüttungen besagen aber, daß von dieser Seite alleine die gewünschte Stabilisierung kaum erreichbar sein wird.
- 2. Deshalb wird geprüft werden müssen, ob mit ergänzenden Bauwerken eine Wasserberuhigung im Buhnenfeld erreichbar ist, ohne daß durch die Existenz derartiger Anlagen bereits wieder negative Auswirkungen initiiert werden. Für den Geologen stellt sich die Frage, ob eine Weiterentwicklung des Prinzipes der an der gezeitenfreien Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns bewährten Längswerke an die Bedingungen einer Gezeitenküste oder des vor Kampen bewährten künstlichen Riffes aus Geotextilien ohne bindige Ablagerungen als Basis möglich ist.
- 3. Ferner stellt sich für den Geologen, für den die ständige Veränderung des Naturraumes selbstverständlich ist, die weitere Frage, ob nicht bei der Aufstellung der langzeitlichen Planungen wieder, wie in früheren Jahrhunderten selbstverständlich, berücksichtigt werden muß, daß eine Rücknahme der Uferlinie auf einen günstigeren Verlauf sinnvoll sein kann.

9. Arbeitsgrundlagen

- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE (1992): Sedimentologische und morphologische Untersuchungen zu Einzeltidenereignissen im Buhnenfeld D1 - E1 sowie zu Auswirkungen der Vorstrand- und Strandauffüllung - 1. Zwischenbericht des KFKI-FV "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt Sedimentologie und morphologische Entwicklung; Norderney.
- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE (1993A): Untersuchungen zu sedimentologischen Prozessen im Strandbereich Norderneys - 2. Zwischenbericht des KFKI-FV "Vorstrandund Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt Sedimentologie und morphologische Entwicklung; Norderney.
- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE (1993B): Sedimentologische und morphologische Ergebnisse eines interdisziplinären Meßeinsatzes im Buhnenfeld D1 - E1 am 19. Oktober 1993 sowie die zeitliche Entwicklung der Massenbilanzen.- 3. Zwischenbericht des KFKI-FV "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt Sedimentologie und morphologische Entwicklung; Norderney.
- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE (1994): Analyse hydrodynamischer Naturmessungen im Bereich der Buhnenfelder A - D1 - E1 - F1 am 19. Oktober 1993 - Dokumentation -.
- GEOLOGISCHES INSTITUT (1992A): Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt Phase II. - 2. Zwischenbericht des Forschungsvorhabens.
- GEOLOGISCHES INSTITUT (1992B): 1. Zwischenbericht des KFKI-FV "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt des Geologischen Institutes der Universität Kiel; Kiel.
- GEOLOGISCHES INSTITUT (1993A): Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt Phase II. - 4. Zwischenbericht des Forschungsvorhabens.

- GEOLOGISCHES INSTITUT (1993B): 2. Zwischenbericht des KFKI-FV "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt des Geologischen Institutes der Universität Kiel; Kiel.
- GEOLOGISCHES INSTITUT (1994A): Abschlußbericht der geologischen Untersuchungen im Projekt "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt".
- GEOLOGISCHES INSTITUT (1994B): 3. Zwischenbericht des KFKI-FV "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt des Geologischen Institutes der Universität Kiel; Kiel.
- KÖSTER, R. (1979): Die Bearbeitung von Sedimenten zur Bestimmung der Kornverteilung.- Manuskript Geol.- Paläont. Inst. Univ. Kiel [unveröff.].
- LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE (1992): Luftbilder der Riffbogenbefliegung durch die GTP Stade vom 19. Mai 1992 - Streifen-/Bildnummer: 4/44, 4/48, 4/52.
- SEEWETTERAMT HAMBURG (1992): Dokumentation der meteorologischen Messungen ab Januar 1992 - Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen" - Teilprojekt Naturmessprogramm Meteorologie.
- SEEWETTERAMT HAMBURG (1993): Tätigkeitsbericht des Seewetteramtes für das Jahr 1993 im Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen" auf Norderney.
- STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UNS KÜSTENSCHUTZ (1993): Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt: Versuchaufspülung - Entwicklung und Technik.
- STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UNS KÜSTENSCHUTZ (1994A): Zwischenbericht 2/93 zum Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt: Versuchaufspülung - Entwicklung und Technik.

- STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UNS KÜSTENSCHUTZ (1994B): Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen", Teilprojekt: Versuchaufspülung - Entwicklung und Technik.
- TU HAMBURG-HARBURG ARBEITSBEREICH MEERESTECHNIK I (1993): Zwischenbericht 1993 zum BMFT-Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen" - Unteraufgabe im Teilprojekt "Sohlfluktuationen".
- TU HAMBURG-HARBURG ARBEITSBEREICH MEERESTECHNIK I (1994): Präsentation am 16.2.1994 in Bremen zum BMFT-Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Buhnen-Deckwerks-Systemen" - Unteraufgabe im Teilprojekt "Sohlfluktuationen" - "Schubspannungssonden".

10. Literatur

- AHRENDT, K. (1989): Sedimentdynamik im gezeitenbeeinflußten Bereich der sandigen Brandungsküste Sylts (Deutsche Bucht). - Berichte - Reports, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, 28, 144 S., Kiel.
- AHRENDT, K. (1994A): Experiences with an artificial longshore-bar at the island of Sylt/German Bight. J. Coast. Res., Fort Lauderdale (Manuskript eingereicht).
- AHRENDT, K. (1994B): Geologie und Küstenschutz am Beispiel Sylt. Ber., Forsch. Techn. Zentr. Westküste, 4, Büsum.
- ALLEN, J.R.L. (1968): Current ripples. Their relation to patterns of water and sediment motion, 433p Amsterdam: North Holland Publ. Comp.
- ARBEITSGRUPPE NORDERNEY DES KÜSTENAUSSCHUSSES NORD- UND OSTSEE (1952): Gutachterliche Stellungnahme zu den Untersuchungen über die Ursachen der Abbruchserscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Nordserney sowie zu den zum Schutze der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. - Die Küste 1: 27 - 42; Norderney.

CAMPELL, C. V. (1967): Lamina, laminaset, bed und bedset. Sedimentology 8, 7 - 26.

- DAVIS, J. L. (1964): A morphogenic approach to world shorelines. Z. Geomorph. 8, 27 42.
- EITNER, V.; RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. (1992): Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge. - Die Küste 54: 93 - 110; Heide.
- ERCHINGER, H.F.; TILLMANN, B. (1992): Versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste 54: 143 - 168; Heide.

- HAYES, M. O. (1979): Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMAN, S., ed., Barrier islands, 1 - 27. Academic Press.
- KUNZ, H. & STEPHAN, H.-J. (1992): Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandauffüllungen auf Norderney. Die Küste 54: 23 52; Heide:
- MCKEE, E.D. & WEIR, G. W. (1953): Terminology for stratification and cross stratification in sedimentary rocks. GSA Bull. 64, 381 - 390.
- NIEMEYER, H.-D. (1987): Tidestrommessungen in Buhnenfeldern. Jber. 1986 Forschungsstelle Küste 38: 127 - 150; Norderney.
- NIEMEYER, H.-D. (1992): Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. - Die Küste 54: 53 - 92; Heide.
- REINECK, H.-E. (1957): Stechkasten und Deckweiß, Hilfsmittel des Meeresgeologen. -Natur und Volk, 87: 132-134; Frankfurt a. M.
- REINECK, H.-E. (1963): Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. Abh. senckenbergische naturforsch. Ges. 505, 138 p.
- REINECK, H.-E. (1967): Parameter von Schichtung und Bioturbation. Geol. Rdsch. 56, 420 438.
- REINECK, H.-E. (1976): Primärgefüge, Bioturbation und Makrofauna als Indikatoren des Sandversatzes im Seegebiet vor Norderney (Nordsee). I. Zonierung von Primärgefüge und Bioturbation. Senckenbergiana marit. 8, 155 - 169.
- REINECK, H.-E. (1984): Aktuogeologie klastischer Sedimente Frankfurt a. Main. (Kramer).
- REINECK, H.-E., SINGH, I.B. (1980): Depositional Sedimentary Environments, 2. Aufl., XIX + 549 p. Berlin, Heidelberg, New York: Springer

- RUNTE, K.-H. (1989): Methodische Verfahren zur Quantifizierung von Umlagerungen in intertidalen Sedimenten. Meyniana, 14: 153 165; Kiel.
- SCHMIDT, H. & PÄTSCH, J. (1992): Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. - Die Küste 54: 131 - 142; Heide.
- STREIF, H. (1990): Das ostfriesische Küstengebiet. Samml. Geol. Führer 57, 2. Aufl., 376 S.: Berlin (Bornträger).
- WESTHOFF, T. (1990): Sedimentologische Untersuchungen zur Klärung der Transportvorgänge im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney. - Diss. Univ. Münster, 189 S.; Münster.

•