

Sedimentologische und morphologische Untersuchungen der ersten kombinierten Vorstrand- und Strandauffüllung im Bereich des Bühnen-Deckwerks-Systems von Norderney

Von VOLKER EITNER

Zusammenfassung

Im Frühjahr 1992 wurde auf Norderney erstmals der Vorstrandbereich bei einer Strandauffüllung aufgefüllt. Hierbei wurde rund die Hälfte des Auffüllmaterials in den Bereich unterhalb der MTnw-Linie eingebracht. Die Auswirkungen dieser kombinierten Vorstrand- und Strandauffüllung im Bereich des Bühnen-Deckwerks-Systems des Norderneyer Westkopfes wurden hinsichtlich der Sedimentologie und morphologischen Entwicklung untersucht. Um einen Vergleich zu konventionellen Strandauffüllungen zu erreichen, wurden Daten der vorangegangenen Auffüllung von 1989 bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse mit einbezogen. Die verstärkte Auffüllung des Vorstrandbereiches erbrachte im Vergleich zu konventionellen Strandauffüllungsmaßnahmen aufgrund der erhöhten eingebrachten Gesamtmassen und der Lage des Auffüllkörpers in unmittelbarer Nähe zum Norderneyer Seegat (Rinnenrandlage) keine Verbesserung. Auch der vergleichsweise etwas größere mittlere Korndurchmesser des Aufspülmaterials brachte keine sichtbare Verbesserung mit sich, da diese geringen Korngrößenunterschiede im Vergleich zu den anderen wirksamen Einflußgrößen, wie z. B. Seegangsklima und Aufspülmenge, keine signifikante Rolle hinsichtlich der Verweildauer der Auffüllungen spielen. Des weiteren haben Laborversuche und Berechnungen gezeigt, daß die Korndichte den Transportbeginn weitaus stärker beeinflusst als die Korngröße.

Summary

The shoreface was filled for the first time on Norderney in spring 1992. 50 % of the fill material was placed below the mean tidal low water level. The effects of this combined beach and shoreface replenishment within the area of the groyne-revetment-structures of the western spit of Norderney on sediment distribution and morphology have been examined. Data sets of the 1989 beach replenishment were additionally used for the interpretation of the results in order to obtain a comparison with pure beach fills. The enhanced replenishment of the shoreface was not an improvement compared to conventional beach fill measures because of the higher amount of fill material and the placement close to the main channel of the tidal inlet (Norderneyer Seegat). Also, the slightly coarser fill material (d_{50} : 0.17 mm in 1989 and 0.20 mm in 1992) did not extend the fill longevity because these grain size differences are too small to have a significant effect on the longevity compared to other parameters such as wave climate or fill volume. Moreover, laboratory tests and calculations have shown that grain density has a stronger influence on sediment entrainment than grain size.

Inhalt

1. Einleitung	2
1.1 Lage des Untersuchungsgebietes	2
1.2 Hydrographische Randbedingungen	3
1.3 Sedimentologische Randbedingungen	4
1.4 Geomorphologische Randbedingungen	5
1.5 Strandauffüllungen	5
2. Untersuchungsverfahren	6

3. Ergebnisse	7
3.1 Sedimentverteilung	8
3.2 Sedimenteigenschaften	8
3.3 Morphologische Entwicklung	12
3.3.1 Strandquerprofil	12
3.3.2 Länge des Aufspülkörpers	14
3.3.3 Auffüllvolumen und Massenbilanzen	16
4. Schlußbetrachtungen	19
5. Danksagung	20
6. Schriftenverzeichnis	20

1. Einleitung

Der Strand und Vorstrand einer sandigen Küste stehen in einem sensitiven dynamischen Gleichgewicht von äußeren Einflüssen wie Wind, Tideströmungen und Seegang, der Oberflächenformen sowie der sedimentologischen Beschaffenheit. In der Vergangenheit wurde wiederholt in Form von Küstenschutz- und Stranderhaltungsmaßnahmen in diese natürliche Balance eingegriffen, um anhaltenden Strand- und Dünenabbrüchen im Bereich des Norderneyer Westkopfes zu begegnen. Diese Maßnahmen führten teilweise zu den angestrebten, aber oftmals auch zu unerwünschten Transport- und Sedimentationsverhältnissen.

Um den Inselbereich um die Stadt Norderney zu schützen, begann man bereits Mitte letzten Jahrhunderts mit der Anlage von Inseln Schutzwerken, die die Abbrüche verlangsamen, aber nicht gänzlich verhindern konnten. Künstliche Strandauffüllungen gewährleisteten seit den 50er Jahren die Standsicherheit der Bauwerke (Abb. 1).

In Umsetzung der aus dem vorangegangenen KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ gewonnenen Erkenntnisse über die Transportverhältnisse im Bereich von Vorstrand und Strand (EITNER et al., 1992; ERCHINGER u. TILLMANN, 1992; KUNZ u. STEPHAN, 1992; NIEMEYER, 1992) wurde im Frühjahr 1992 erstmals ein Anteil von 50 % der Aufspülmenge in den Vorstrand verbracht.

Das Verfahren der Vorstrandaufspülungen steht auch im Einklang mit den strandmorphodynamischen Strandmodellen von WRIGHT u. SHORT (1984). Für ein Strandsystem lassen sich nach WRIGHT u. SHORT (1984) anhand von dreidimensionalen Zustandsmodellen verschiedene morphodynamische Entwicklungsstufen ableiten (Tab. 1). Ein dissipativer Strand zeichnet sich durch ein oder mehrere strandparallele Riffe aus. Reflektive Strände weisen hingegen einen flachgeneigten Strand auf. Zwischen diesen Endgliedern werden darüber hinaus noch vier weitere intermediäre Strandzustände unterschieden. Durch die Vorstrandaufspülung wird künstlich eine dissipative Strandmorphologie geschaffen, die einer weiteren Erosion entgegenwirken könnte.

Innerhalb des KFKI-Forschungsvorhabens „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen“ wurden die vorliegenden Untersuchungen als Teilprojekt „Sedimentologie und morphologische Entwicklung“ vom Niedersächsischen Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste – durchgeführt.

1.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt am Westkopf der Insel Norderney und umfaßt den Vorstrand- und Strandbereich. Seewärts wird es durch die NN-5-m-Linie und inselwärts durch das künstliche Deckwerk begrenzt (Abb. 1).

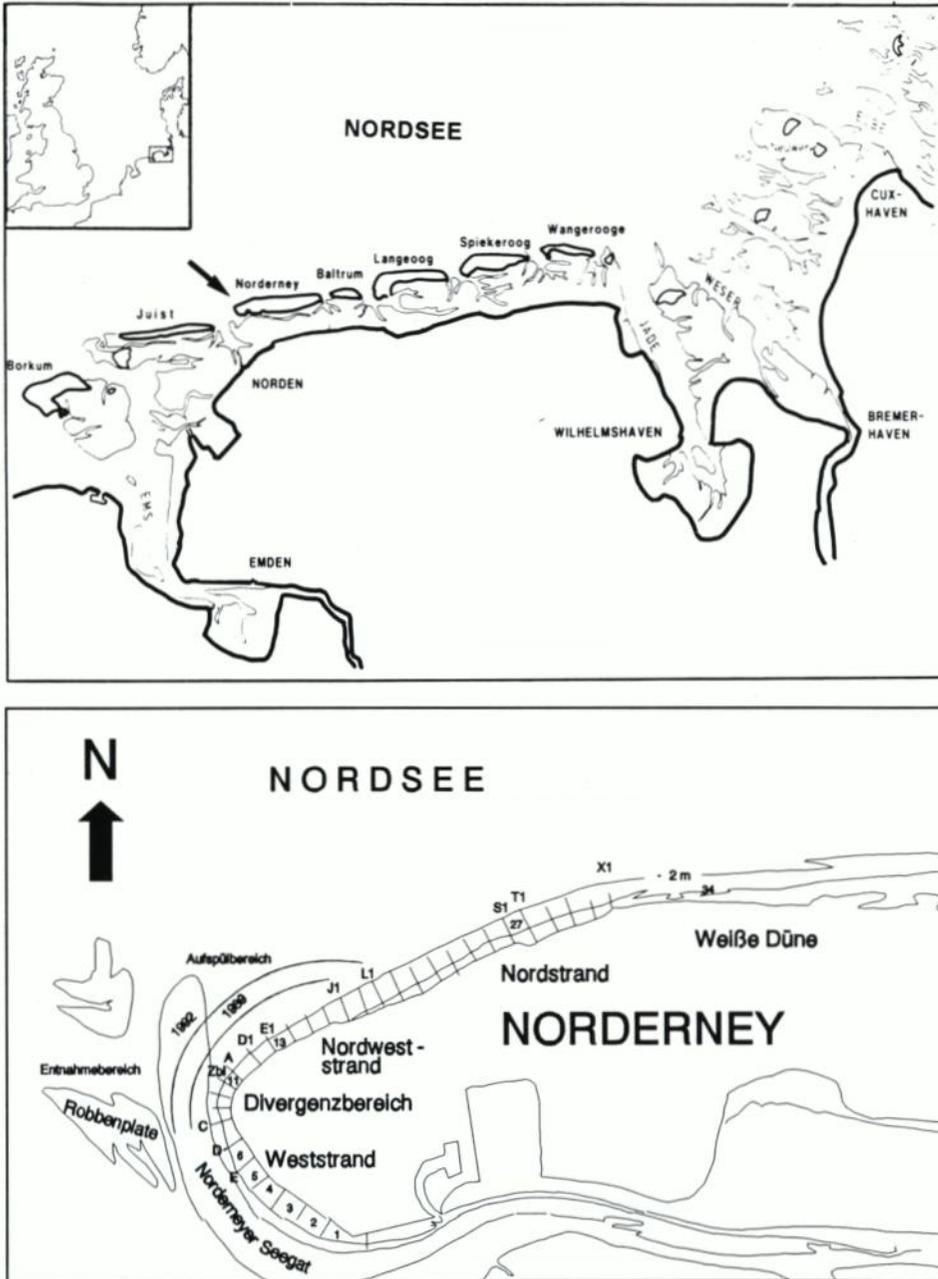


Abb. 1: Lageplan der Insel Norderney und des Untersuchungsgebietes

1.2 Hydrographische Randbedingungen

Die hydrodynamischen Verhältnisse unterliegen den Einflüssen des einschwingenden Seegangs und der Gezeiten. Der mittlere Tidenhub beträgt vor Norderney rund 2,4 m und

Tab. 1: Morphodynamische Strandzustände (nach WRIGHT u. SHORT, 1984), $B_s = H_b/W_s T$

Strandtyp	Morphologie	Abkürzung	B_s -Wert
Dissipative	one or more parallel bars	D	6
Intermediate	Longshore Bar-Trough	LBT	5
	Rhythmic Bar and Beach	RBB	4
	Transverse Bar and Rip	TBR	3
	Ridge and Runnel/ Low Tide Terrace	RR/ LTT	2
	Reflective	smoothly beach face	R

ist somit als mesotidal zu bezeichnen. Die Stärke der Tideströmungen hängt stark von der Lage des Strandabschnittes zum Norderneyer Seegat ab. Am Weststrand erreichen die mittleren Tidestromvektoren Geschwindigkeiten bis zu 30 cm/s und folgen in ihrer Richtung der jeweiligen Tidephase. Am Nordweststrand sind hingegen nur gleichgerichtete mittlere Tidestromvektoren mit Geschwindigkeiten von 0–5 cm/s zu verzeichnen (NIEMEYER, 1987).

Der Seegang im Vorfeld der ostfriesischen Inseln ist im wesentlichen durch den über der Nordsee wirksamen Wind geprägt (NIEMEYER, 1986). Bei Wind aus westlichen Richtungen spaltet sich der Seegang im Bereich des Norderneyer Westkopfes in zwei Systeme mit unterschiedlichen Wellenfortschrittsrichtungen: einerseits in südliche Richtungen und andererseits in nordöstliche Richtungen. Dieser Divergenzbereich befand sich über einen langen Zeitraum zwischen den Bühnen C und A (LUCK, 1970). Gegenwärtig scheint sich jedoch dieser Bereich nach Osten zu verlagern. Im Bereich zwischen den Bühnen D_1 und H_1 sind gegenwärtig die stärksten Strandhöhenabnahmen zu verzeichnen.

1.3 Sedimentologische Randbedingungen

Die Sedimentverteilungen entlang des Norderneyer Westkopfes sind feinkörnig und weisen einen hohen Sortierungsgrad auf (Abb. 2). Mit zunehmender Entfernung vom Seegat verringern sich die Tidestromeinflüsse des Norderneyer Seegats. Im Gegenzug verstärken sich die Seegangseinwirkungen, die eine Sedimentvergrößerung bewirken. Aufgrund des höheren Anteils von Schill und Schillbruch sind die Sedimente des Nordweststrandes weit aus größer und schlechter sortiert. Allgemein nimmt die Korngröße vom Vorstrand zur Hochwasserlinie zu. Die Sedimente des Nordstrandes sind vergleichsweise besser sortiert. Erst im Übergang zum Platananlandungsbereich in Höhe der Weißen Düne steigt die Korngröße wieder an, da aus dem Riffbogen gröberes Sediment in unregelmäßigen Abständen zugeführt wird (WESTHOFF, 1990; EITNER et al., 1992; EITNER, 1993; EITNER u. RAGUTZKI, 1994; EITNER, 1995a). Der mittlere Anstieg der mittleren Korngröße ist in der Regel mit einer Zunahme des Kalkgehaltes verbunden. Die größeren Siebfraktionen (< 0,71 mm) setzen sich größtenteils aus Muschelschill und Schillbruch zusammen. Allgemein steigt der Schwermineralgehalt vom Vorstrand zur Hochwasserlinie an. In strandparalleler Richtung ist ein Anstieg des Schwermineralanteiles vom Weststrand zum Nordweststrand zu erkennen. Im weiteren Verlauf des Strandes nimmt der Schwermineralanteil dann wieder leicht ab.

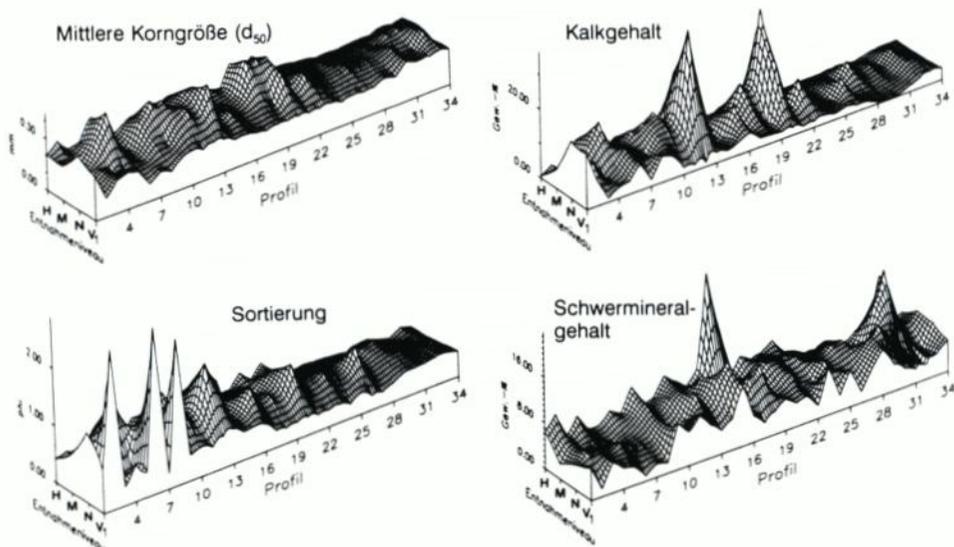


Abb. 2: Sedimentverteilung entlang des buhnenverbauten Strandes des Norderneyer Westkopfes

1.4 Geomorphologische Randbedingungen

Als ein Maß für die Charakterisierung der Strandmorphologie wird häufig die Strandneigung verwendet. STEPHAN (1988) ermittelte die durchschnittliche Strandneigung seit 1951/52 über die Zeit (Abb. 3). Danach sind die Neigungen um die NN-Linie mit 1:25 bis 1:35 für den Norderneyer Westkopf etwa gleichbleibend. Für den intertidalen Strand ergeben sich jedoch stark wechselnde Verhältnisse. Besonders steil sind die Strände im Divergenzbereich zwischen den Bühnen C und A. Beiderseits der Zwischenbühne (Zb) II treten Neigungen von 1:45 auf. Nach Osten und Südwesten werden die Strände mit Werten bis 1:75 flacher. Aufgrund des nahen Riffgats nimmt die Neigung südlich der Bühne N auf etwa 1:25 zu.

Der Norderneyer Strand ist nach der Klassifikation von Wright u. Short (1984) im wesentlichen als intermediär zu bezeichnen, wobei der westliche Teil der Insel einen stärker reflektiven und der östliche Teil einen dissipativeren Charakter aufweisen (EITNER, 1993 und 1995a).

1.5 Strandauffüllungen

Auf Norderney wurde bis einschließlich 1989 das Verfahren der unmittelbaren Strandaufspülung verwendet (Tab. 2). Bei der Auffüllung im Frühjahr 1992 spülte man erstmals nicht nur den Strand unmittelbar auf, sondern bildete im Vorstrandbereich einige Sandlager in buhnenartiger Form. Die Sandbühnen wandelten sich schnell in einen weniger vorspringenden flacheren Sandkörper um, der auch als Sandhöft bezeichnet wird (Abb. 4).

Die Auffüllung des Vorstrandbereiches ist eine relativ neue Technik, die jedoch bereits in Australien, Dänemark und den USA durchgeführt worden ist (BRUUN, 1988).

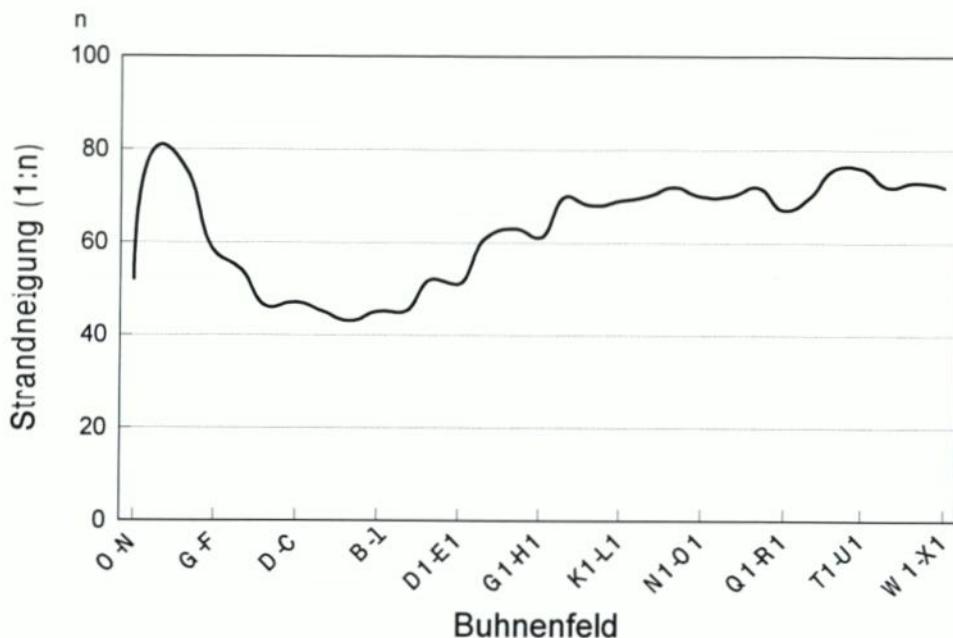


Abb. 3: Strandneigungen entlang des bühnenverbauten Strandes des Norderneyer Westkopfes

Tab. 2: Strandauffüllungen auf Norderney seit 1951/52 (* Kiesauffüllung, ** Trockeneinbau)

Jahr	Künstliche Strandauffüllungen auf Norderney 1951-1992			
	Menge (Mio. m ³)	d ₅₀ (mm)	Auffüllbereich zw. den Bühnen	Entnahme- Bereich
1951/52	1,245	0,10-0,13	O-v ₁	südl. Inselwatt
1961*	(7 200 t)	2,00-30,00	Zbl-B	allochtones Material
1964*	(10 000 t)	1,00-15,00	B-Zbl u. A-D ₁	allochtones Material
1967	0,240	0,15-0,30	E-K ₁	vor Buhne G1
1976	0,400	0,18-0,30	E-E ₁	Robbenplate
1982	0,470	0,17-0,25	C-H ₁	Robbenplate
1983**	0,064		J1-N ₁	E' Weiße Düne
1984	0,410	0,16-0,20	C-J ₁	Robbenplate
1989	0,447	0,15-0,20	D-J ₁	Robbenplate
1990**	0,045	0,15-0,22	J1-N ₁	E' Weiße Düne
1992	0,430	0,15-0,27	D-L ₁	Robbenplate

2. Untersuchungsverfahren

Um die Veränderungen der Sedimentverteilung zu kennzeichnen, wurde der Strand entlang von strandnormalen Profilen ausgewählter Bühnenfelder beprobt. Die Sedimentproben wurden mittels eines 5-cm-Stechzylinders entnommen. Die Entnahme erfolgte jeweils an der Niedrig-, Mittel- und Hochwasserlinie in monatlichen Abständen. Im Labor wurden die Sedimentproben entsalzt und folgende bodenphysikalischen Kennwerte bestimmt: die Korngrößenverteilung mittels Trockensiebung nach DIN 18123, der Kalkgehalt nach DIN 18129 und der Schwermineralgehalt der 0,106-0,125-mm-Kornfraktion mit dem Frantz-Magnetscheider (McANDREW, 1957).

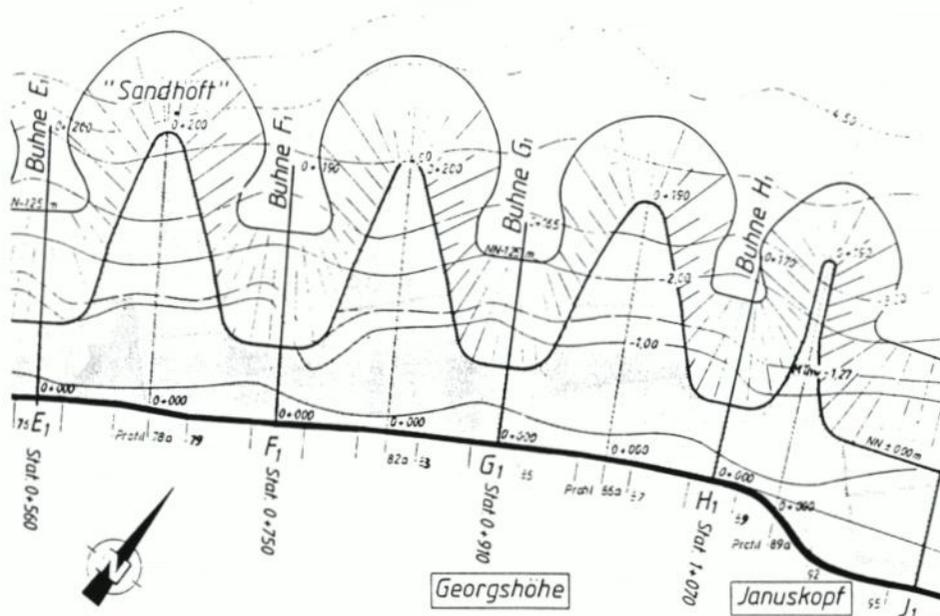


Abb. 4: Morphologische Gestaltung der Vorstrand- und Strandauffüllung (Quelle: Staatl. Amt für Insel- und Küstenschutz)

Auf Norderney sind senkrecht zur Strandlinie verlaufende Meßprofile eingerichtet worden, um das Verhalten, die Verformung und die Umlagerungen der vor den Deckwerken und dem ungeschützten Randdünenbereich gelegenen Inselstrände festzustellen. Die Vermessung des trockenen und nassen Strandes (oberhalb der MTnw-Linie) erweist sich als unproblematisch, da dieser Bereich bei Niedrigwasser nahezu unabhängig von den Seegangsverhältnissen zugänglich ist. Neben der Nivellierung von Meßprofilen, wie sie seit Anfang der 30er Jahre auf Norderney regelmäßig durchgeführt werden, haben sich auch flächenmäßige, tachymetrische Aufnahmen als weniger zeitaufwendige Alternative erwiesen. Diese bieten mit einer maximalen Abweichung von $\pm 1,5$ cm in der Höhe – im Vergleich zum Nivellement ca. $\pm 1,0$ cm – eine ausreichende Genauigkeit. Der Vorstrandbereich (unterhalb MTnw) wird bis etwa 1300 m seawärts der Bühnenstreichlinie von Schiffen mit Echolotung gepeilt. Dabei wird jedoch nicht die Genauigkeit der terrestrischen Vermessung erreicht, was oftmals zu Angleichungsschwierigkeiten im Übergangsbereich führt.

Die topographischen Profilaufnahmen bilden die Grundlage der Sandmassenbilanzierung für die Strände Norderneys. Die Sedimentbilanzen innerhalb der Bühnenfelder werden mit einem an der Forschungsstelle Küste entwickelten Programm „STEAS“ ermittelt und beruhen auf einer EDV-gestützten Berechnung von Teilflächen nach der Gauss'schen Flächenformel. Die Abweichung der Daten für die ermittelten volumetrischen Angaben bewegt sich zwischen $\pm 7,5\%$ (KUNZ u. STEPHAN, 1992).

3. Ergebnisse

Im folgenden sollen die Auswirkungen der Vorstrand- und Strandauffüllung auf die Sedimentverteilung und die morphologische Entwicklung am Beispiel des Hauptuntersu-

chungsgebietes, des Bühnenfeldes D_1-E_1 , beschrieben werden. Daten von der vorangegangenen Strandauffüllung 1989 werden zu Vergleichszwecken mit herangezogen.

3.1 Sedimentverteilung

Die beiden Strandauffüllungen, die 1989 und 1992 durchgeführt wurden, beeinflussen die Sedimentverteilung (s. a. EITNER et al., 1992; EITNER u. RAGUTZKI, 1994). Das im Vergleich zu den natürlichen Sedimenten feinere Aufspülmaterial (d_{50} : $0,17 \pm 0,04$ mm [1989] bzw. $0,20 \pm 0,05$ mm [1992], Abb. 5) zog jeweils eine Verfeinerung der Strandsedimente nach sich, die an den Entnahmeniveaus unterschiedlich stark ausgeprägt war (Abb. 6). Am deutlichsten sind die Veränderungen an der Hochwasserlinie. Hier stellte sich nach der Aufspülung von 1989 erst nach über einem Jahr die ursprüngliche Sedimentverteilung wieder ein. An der Niedrigwasserlinie hingegen wiesen die Sedimente bereits nach wenigen Monaten die gleiche Korngrößenverteilung auf wie vor der Aufspülung. Auch die durch künstliche Auffüllungen stark beeinflussten Strandsedimente sind saisonalen Veränderungen, die auf die jahreszeitlich unterschiedlichen Energieeinträge zurückzuführen sind, ausgesetzt (Abb. 7). So sind eine relative Vergrößerung, schlechtere Sortierung und ein höherer Schwermineralgehalt der Sedimente in den Wintermonaten mit stärkeren Energieeinträgen verknüpft. Allgemein weisen die Sedimente im Bereich der Niedrigwasserlinie eine schlechtere Sortierung auf als im Hochwasserbereich. Die Sedimente des Nordweststrandes sind überwiegend von einer positiven Schiefe gekennzeichnet, d. h. sie besitzen einen relativen Überschuss größerer Bestandteile (vorwiegend Schillmaterial). Ein eindeutiger jahreszeitlicher Trend ist nicht auszumachen.

3.2 Sedimenteigenschaften

In der Vergangenheit wurde versucht, den Einfluß der Korngröße auf die Verweildauer von Strandauffüllungen in Form von Modellrechnungen zu quantifizieren (z. B. KRUMBEIN u. JAMES, 1965; DEAN, 1974; JAMES, 1975; SWART, 1991). Diese Modelle lassen sich jedoch für die Norderneyer Verhältnisse nicht anwenden, oder die Ergebnisse sind mit Feldmessungen nicht zu verifizieren (EITNER, 1993).

Um den Einfluß der Korngröße in einer anderen Art und Weise näher bestimmen zu können, wurden die hydrodynamischen Eigenschaften von Sedimentproben des Norderneyer Strandes untersucht. Dazu wurde die Sinkgeschwindigkeit von Quarz- und Schwermineralen durch Laborversuche ermittelt. Zusätzlich wurde die kritische Schubspannung unter der Verwendung empirischer Formeln berechnet, die der Literatur entnommen wurden (KOMAR u. WANG, 1984). Die Sinkgeschwindigkeit spiegelt als charakteristischen Parameter das Ablagerungsverhalten von Sedimentpartikeln wieder und hängt im wesentlichen von der Korngröße, -form und -dichte ab (Abb. 8). Die kritische Schubspannung gibt den Widerstand der Sedimentkörner gegen den Transportbeginn wieder und hängt hauptsächlich von der Korndichte und nur in sehr geringem Maße von der Korngröße ab, wie dies der flache Verlauf der Kurven in Abb. 9 zeigt. Auch größere Körner weisen nur eine unwesentlich höhere kritische Schubspannung auf. Demnach beeinflusst die Korndichte den Transportbeginn stärker als die Korngröße. Schwerminerale besitzen eine wesentlich höhere kritische Schubspannung als Minerale mit einer geringeren Dichte, wie z. B. Quarzkörner, die eine identische Sinkgeschwindigkeit aufweisen. Schwerminerale reichern sich aufgrund dieser Eigenschaft im Verhältnis zu den Quarzkörnern an. Sedimentpartikel mit einer ähnl-

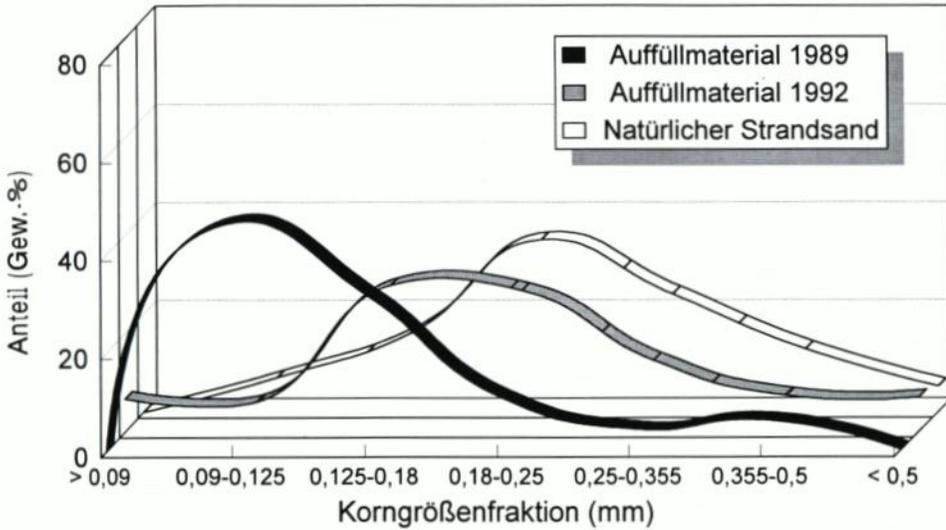


Abb. 5: Korngrößenverteilung des Aufspülmaterials und der natürlichen Strandsedimente im Aufspülbereich (Durchschnittswerte)

Buhnenfeld D₁ - E₁

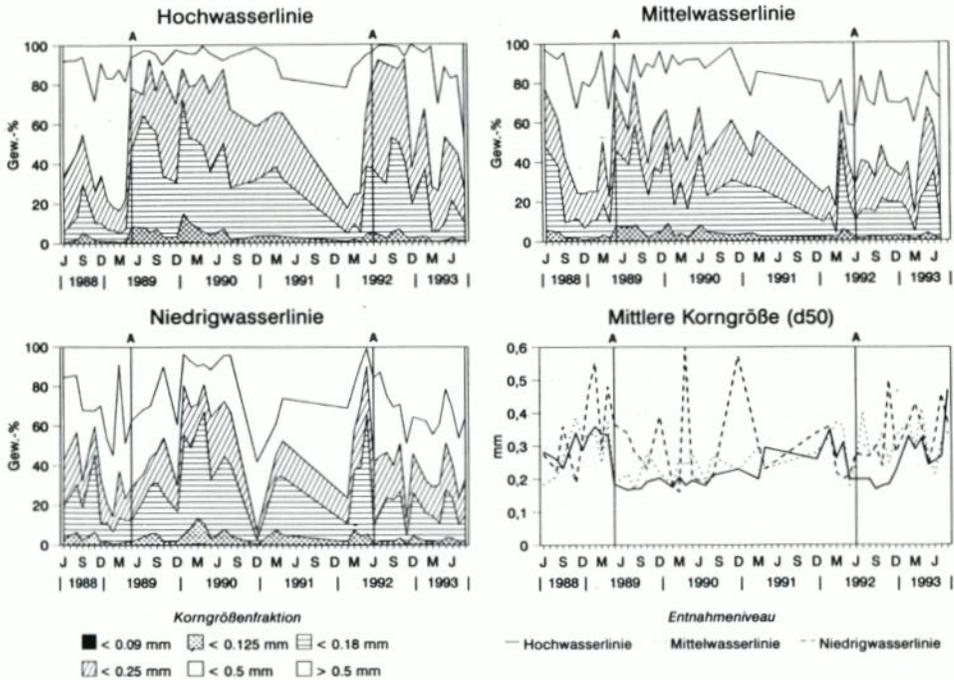


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung (in Gew.-%) im Bereich der Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserlinie sowie des Medianwertes (in mm) im Buhnenfeld D₁-E₁

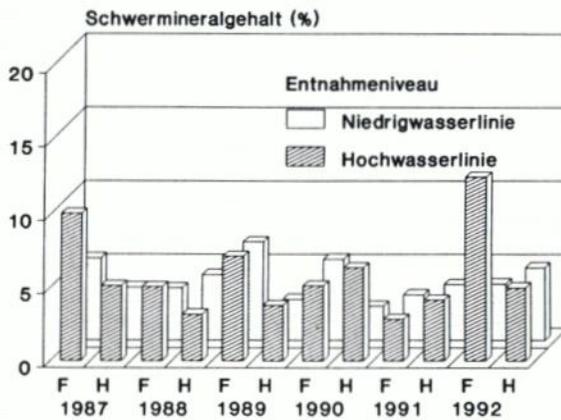
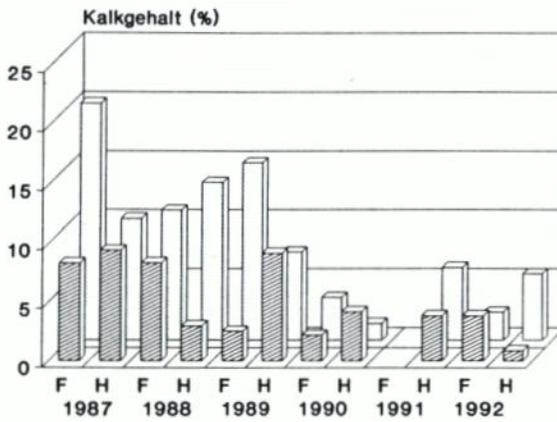
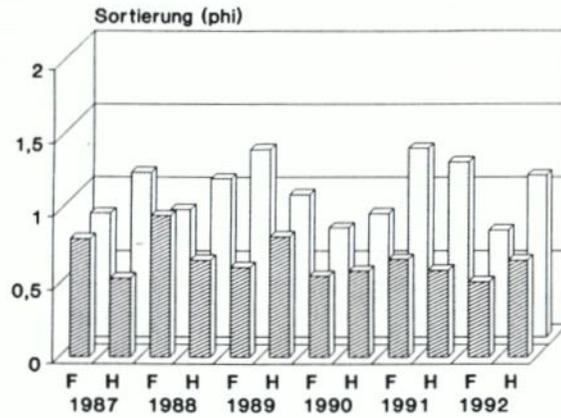


Abb. 7: Saisonale Entwicklung der Sortierung (in phi), des Kalkgehaltes (%) und des Schwermineralgehaltes (Gew.-%) im Bühnenfeld D₁-E₁

chen Sinkgeschwindigkeit lagern sich gemeinsam ab. Der geringe Korngrößenunterschied, der hierbei zwischen den Schwermineralen und den Quarzkörnern besteht und in Abb. 8 zu erkennen ist, läßt sich ebenfalls in den Sedimentproben nachvollziehen; so ist der prozentuale Schwermineralanteil in den feineren Siebfractionen höher als in den größeren Fractionen (EITNER, 1993 und 1995b, c). In Abb. 10 ist die kritische Schubspannung gegen die Sinkgeschwindigkeit aufgetragen. Es fällt auf, daß nur bei Mineralen gleicher Dichte eine Korrelation besteht.

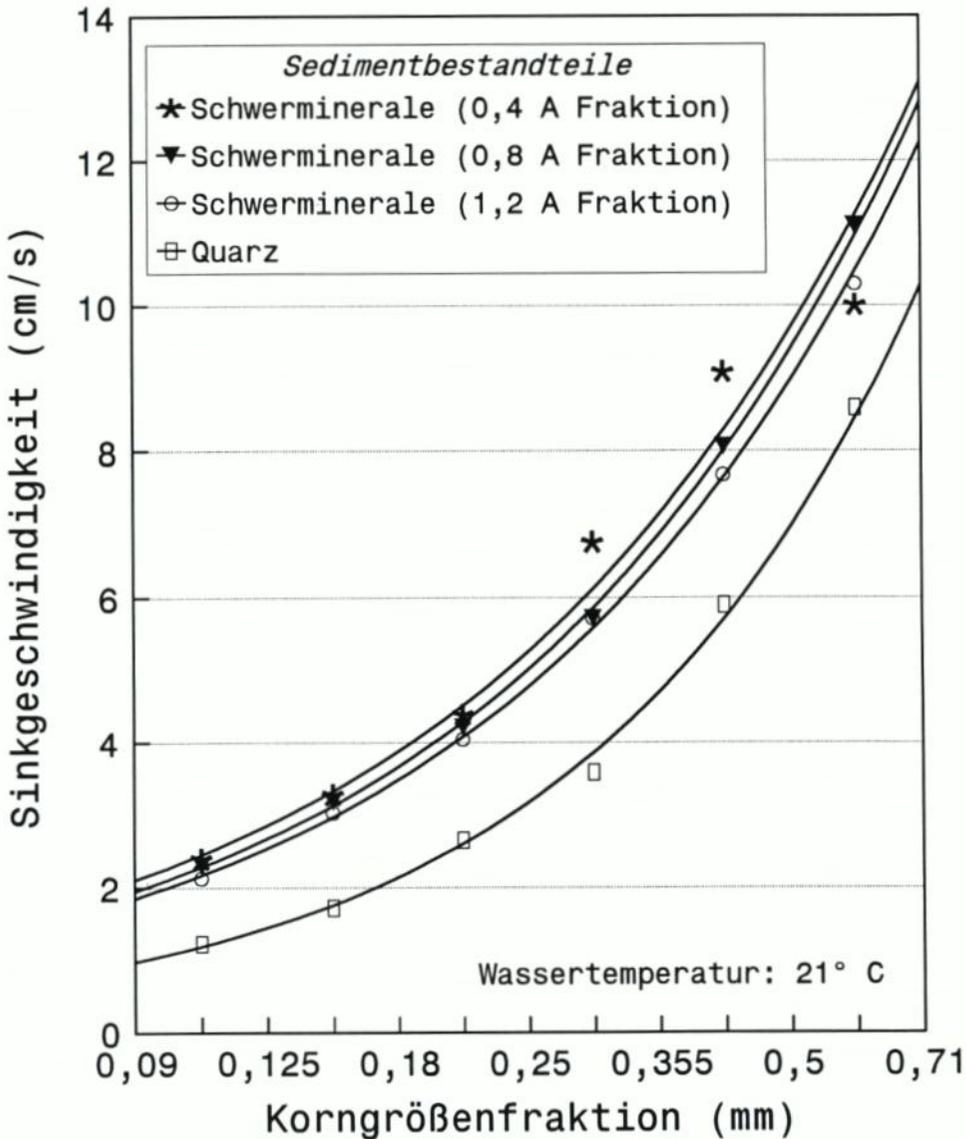


Abb. 8: Sinkgeschwindigkeit von Schwermineralen und Quarz in Abhängigkeit von der Korngröße

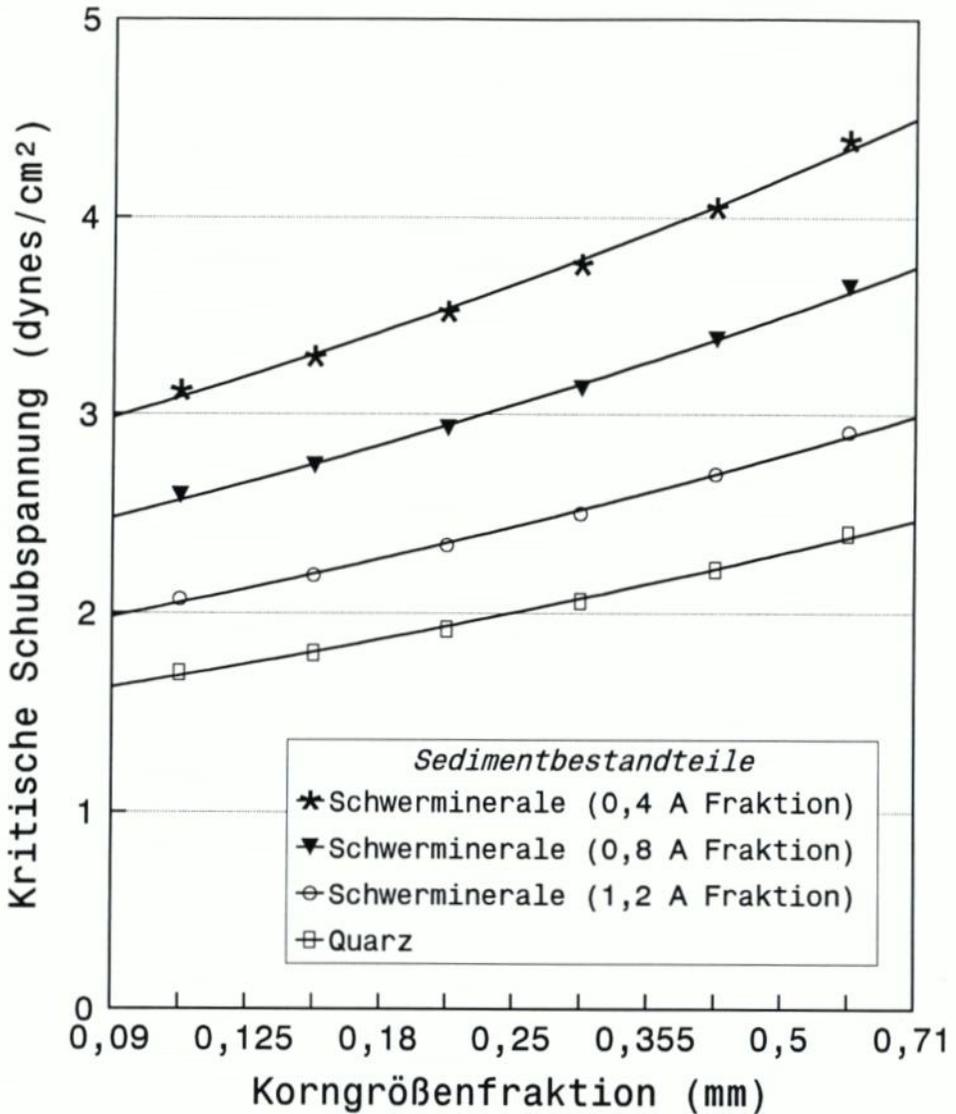


Abb. 9: Kritische Schubspannung von Schwermineralen und Quarz in Abhängigkeit von der Korngröße

3.3 Morphologische Entwicklung

3.3.1 Strandquerprofil

Strandprofile stehen im Gleichgewicht der einwirkenden Kräfte. DEAN (1983, 1991) entwickelte auf der Grundlage von empirischen Untersuchungen für die Profilentwicklung folgende Gleichung:

$$h(y) = Ax^{0,67}$$

$h(y)$ Strandhöhe in der Entfernung von x vom Profilnullpunkt

A Faktor, abhängig von der Korngröße

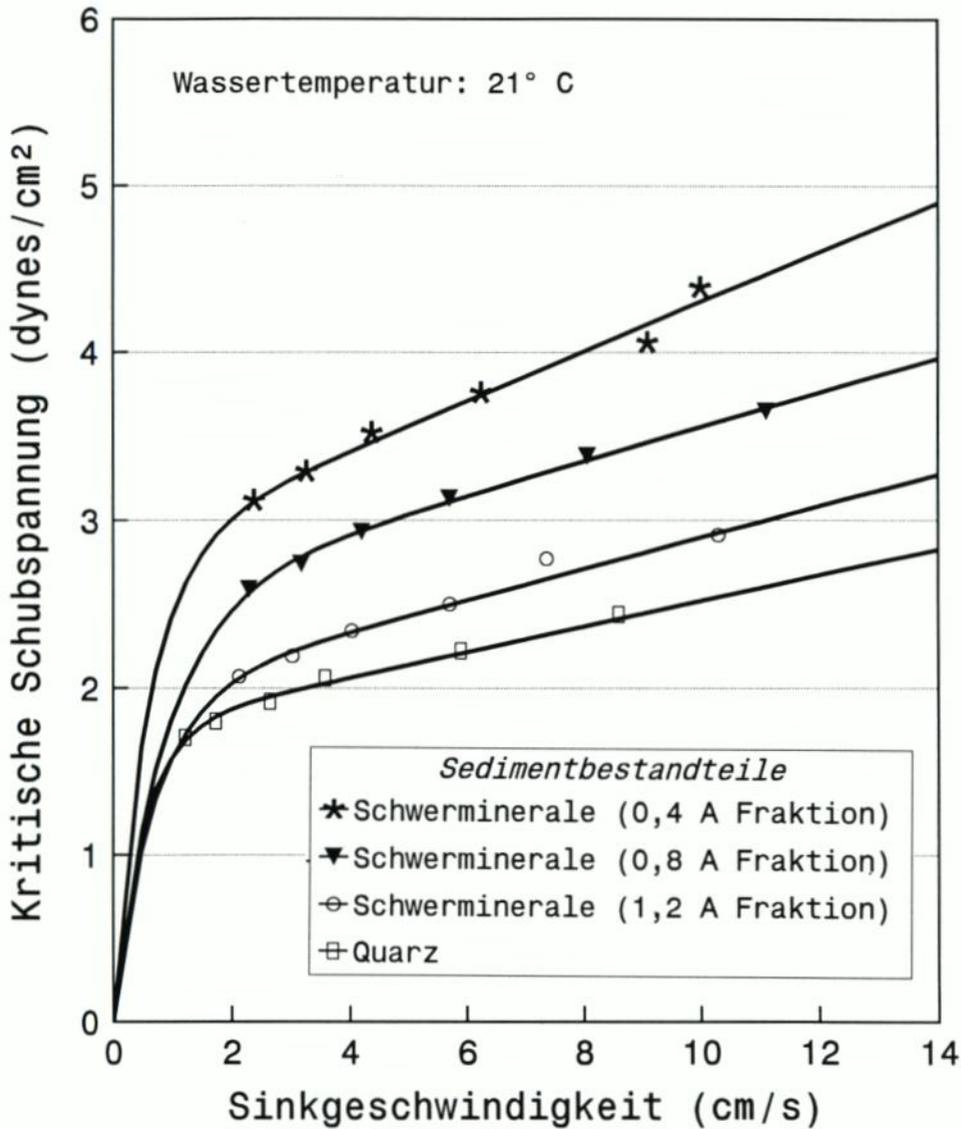


Abb. 10: Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der kritischen Schubspannung

Das Gleichgewichtsprofil kann nach DEAN (1983, 1991) ebenfalls für die Gestaltung von Strandauffüllungen angewandt werden. ERCHINGER u. TILLMANN (1992) modifizieren die Gleichung, um eine bessere Anpassung an die Norderneyer Verhältnisse zu erreichen:

$$h(y) = Ax^{0,67} + B$$

Die Ermittlung der Funktionswerte A und B beruht auf einer Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (KOTZBAUER, 1990). Danach ergeben sich zum Beispiel für das Mittelprofil 79 im Bühnenfeld E₁-F₁ für A ein Wert von -0,097 und für B ein Wert von 1,15.

In der Vergangenheit wurde oftmals der wasserbedeckte Strandabschnitt, der Vorstrandbereich, bei der Betrachtung von Strandauffüllungen vernachlässigt. Unrealistische Strandprofile führten zu erheblichen Verlusten im intertidalen Strandbereich (HANSEN u. LILLYCROP, 1988). Daher ist bei der Gestaltung des Querprofils einer Strandauffüllung auch der sublitorale Bereich bzw. Vorstrand von Interesse. NIEMEYER (1992: 88) zieht folgende Schlüsse aus seinen hydrographischen Untersuchungen für ein verbessertes Aufspülprofil: „Es erscheint hinsichtlich der Dynamik der Transportvorgänge im Vorstrand- und Strandbereich sinnvoller, eine überwiegende Deposition der Auffüllmengen im Vorstrandbereich vorzunehmen als auf dem Strand. Hierdurch werden möglicherweise geringere Anfangsverluste und längere Verweilzeiten zu erreichen sein, da in der ersten Phase ein überwiegend landwärts gerichteter Sedimenttransport zu erwarten ist. Insbesondere gilt dies bei den für das Frühjahr und den Frühsommer, der üblichen Saison für die Ausführungen von Strandauffüllungen, wahrscheinlichen Wasserstands- und Seegangsverhältnissen. Darüber hinaus bedingt eine Deposition im Vorstrandbereich, daß die Auffüllmengen in wesentlich geringerem Maß seegangs- und brandungsinduzierten strandparallelen Längsströmungen und damit der Gefahr endgültiger Verfrachtung in andere Bereiche ausgesetzt sind.“ In Umsetzung dieser Erkenntnisse und weiterer Untersuchungsergebnisse des KFKI-Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ über die Transportvorgänge im Bereich von Vorstrand und Strand (EITNER et al., 1992; EITNER u. RAGUTZKI, 1994; ERCHINGER u. TILLMANN, 1992; KUNZ u. STEPHAN, 1992; NIEMEYER, 1992) wurde im Frühsommer 1992 der Vorstrand zusätzlich mit aufgefüllt.

In Abb. 11 sind beispielhaft für das Bühnenfeld D_1-E_1 die gemessenen Profile vor und nach den letzten beiden Auffüllungen von 1989 und 1992 dargestellt. Das sogenannte „Referenzprofil“ von 1950, d. h. das von Auffüllungen unbeeinflusste Profil, ist zur Verdeutlichung mit ausgewiesen.

Das Referenzprofil von 1950 zeigt, daß im Bühnenfeld D_1-E_1 vor der ersten Auffüllung nahezu der gesamte Strand unterhalb der Niedrigwasserlinie lag. Daher kann eigentlich nicht mehr von einem Strand gesprochen werden, sondern es muß vielmehr der Begriff Vorstrand verwendet werden. Seit Anfang der 50er Jahre hat die Strandhöhe durch die wiederholten Aufspülungen nachhaltig zugenommen. So lag der Strand vor den beiden Auffüllungen 1989 und 1992 deutlich oberhalb des Referenzprofils (maximal 2 m). Die Strandbreite betrug rund 50 m. Beide Auffüllungen resultierten in einer Erhöhung und Verbreiterung des Strandes. Durch die seeseitige Aufspülung einer Sandbühne in der Bühnenfeldmitte (Abb. 11) versuchte man erstmals, vermehrt Sand in Vorstrand einzubringen. Die Sandbühne formte sich in wenigen Wochen unter Sandverlusten und Massenverschiebungen innerhalb des Bühnenfeldes in ein Quasi-Gleichgewichtsprofil um, d. h. zur Zeit der Einzeltidenuntersuchung im August 1992 war dieser Zustand bereits erreicht und von der Sandbühne nichts mehr zu erkennen.

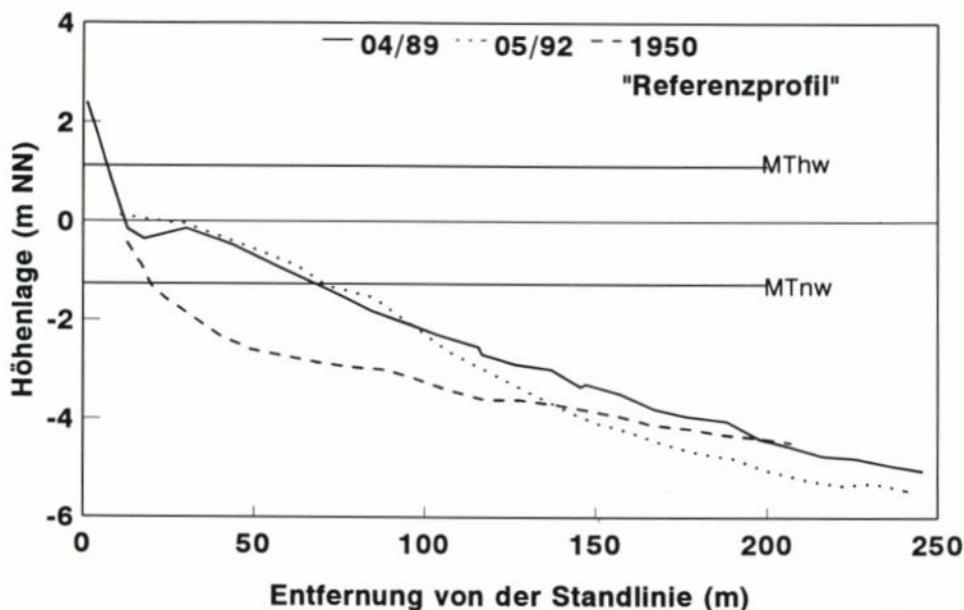
3.3.2 Länge des Aufspülkörpers

Neben der Gestaltung des Querprofils ist auch die Länge des Auffüllkörpers hinsichtlich der Verweildauer der zugeführten Sandmassen wichtig. So bestimmt DEAN (1983) die „Halbwertzeit“ t_{50}^1 eines Auffüllkörpers. Das Modell geht von der Annahme aus, daß die Gesamtheit der Verluste auf Küstenlängstransporte zurückzuführen ist:

$$t_{50} = 0,172 \left(\frac{l_2}{H_b^{2,5}} \right)$$

¹ t_{50} : Zeitraum, bis ein Verlust von 50 % des aufgespülten Materials eingetreten ist (in Jahren)

Bühnenfeld D1-E1 Vor den Strandauffüllungen



Nach den Strandauffüllungen

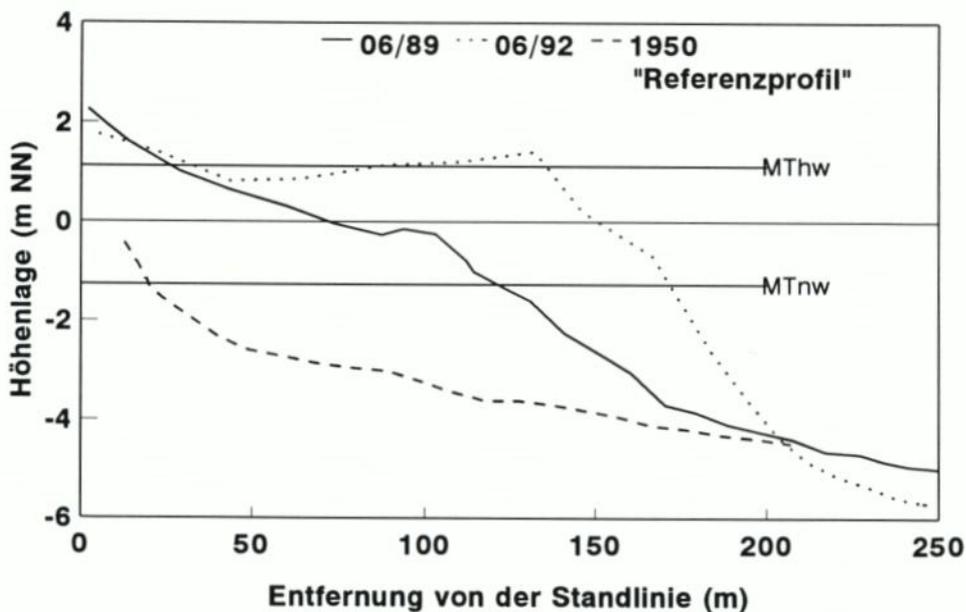


Abb. 11: Strandprofil im Bühnenfeld D₁-E₁ vor und nach den Aufspülungen 1989 und 1992

wobei

l Länge des Aufspülkörpers

H_b Brecherhöhe

Nach diesem Modell erhöht sich die Verweildauer, wenn die Wellenhöhe gering und der Auffüllbereich lang sind. Die über das Jahr gemittelte signifikante Wellenhöhe beträgt auf Norderney zwischen 0,7 und 1,0 m. Die Länge des Aufspülbereiches beträgt zwischen 1,5 und 2,0 km, abhängig davon, ob der Weststrand mit seinen abweichenden hydrodynamischen Randbedingungen miteinbezogen wird oder nicht. Danach ergibt sich eine theoretische „Halbwertzeit“ t_{50} von 0,4 bis 1,7 Jahren.

Weiterhin ist zu beachten, daß Sedimentverluste durch Längstransporte nicht gänzlich verloren sein müssen, sondern zum Teil benachbarte Strandbereiche mit Sand sekundär versorgen. Der Norderneyer Weststrand zum Beispiel profitiert von den Strandauffüllungen am Nordweststrand.

Auf der Grundlage eines Vergleiches der Volumen-Ganglinien des Divergenzbereiches (Buhnenfelder A-C) sowie der angrenzenden Strandabschnitte (A-V₁ und C-N) stellen KUNZ u. STEPHAN (1992) eine verstärkte sekundäre Sandversorgung der nordöstlich und südöstlich anschließenden Buhnenfelder aus dem Divergenzbereich fest. Der südöstliche Strandabschnitt ist übertversorgt. Daher schlagen KUNZ u. STEPHAN (1992) vor, künftig eine verstärkte Auffüllung des Divergenzbereiches durchzuführen, um die sogenannte *feeder beach*-Funktion² dieser Buhnenfelder zu nutzen.

3.3.3 Auffüllvolumen und Massenbilanzen

Wie bereits an mehreren Stellen erwähnt worden ist, steht der Strand in einem dynamischen Gleichgewicht mit den einwirkenden Kräften. Ein Eingriff in Form von Strandauffüllungen stellt eine Störung dieses Gleichgewichts dar.

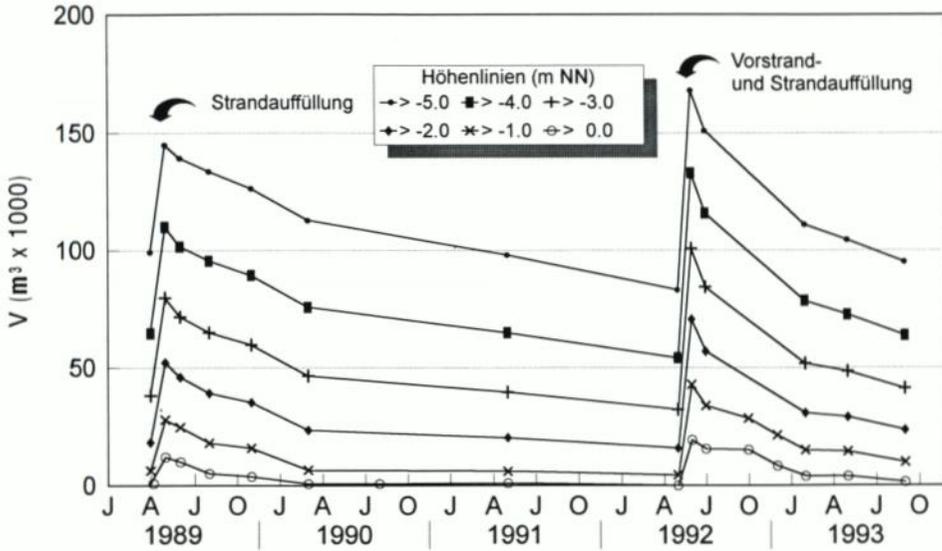
Daher spielt die Menge des aufgefüllten Materials in Bezug auf die Verweildauer des Auffüllkörpers eine entscheidende Rolle. Je mehr Material auf den Strand aufgebracht wird, desto stärker wird das dynamische Gleichgewicht beeinträchtigt.

Die zeitliche Veränderung des Sedimentvolumens wird am Beispiel des Hauptuntersuchungsgebietes (Buhnenfeld D₁-E₁) dargestellt (Abb. 12). Dabei läßt sich erkennen, daß die Volumenänderungen stark von der jeweiligen Bezugstiefe (Tiefenbegrenzung) abhängen; so unterscheiden sich die Halbwertzeit der einzelnen Bezugstiefen voneinander (Tab. 3). Abb. 12 stellt die zeitliche Entwicklung von Teilvolumen zwischen jeweils einen Meter auseinanderliegenden Bezugstiefen nach den Strandauffüllungen 1989 und 1992 dar. Dabei wird deutlich, daß sich anfänglich Sand aus den oberen Strandbereichen in tieferliegende Abschnitte, vorwiegend in den Vorstrand, verlagert hat. Die Verluste im intertidalen Strandbereich nehmen nach einem Jahr signifikant ab. Parallel zu dieser Entwicklung vermindert sich das Sedimentvolumen im Bereich des Vorstrandes ebenfalls.

Nach KUNZ u. STEPHAN (1992) lassen sich für die Beschreibung zeitlicher Volumenänderungen verschiedene Entwicklungsphasen unterscheiden: „Während der Phase A wird innerhalb relativ kurzer Zeit der Aufspülkörper von den Naturkräften so umgeformt, daß er nur noch wenig als „Störung“ wirkt“. Nach dieser Umformungsphase, in der der Aufspülkörper ein vorübergehendes „Quasi-Gleichgewicht“ erreicht, schließt sich eine Phase B an,

² *feeder beach*: aufgefüllter Strandabschnitt, der andere Strandabschnitte über einen resultierenden Längstransport mit Sand versorgt.

Sedimentvolumen oberhalb verschiedener Höhenlinien



Sedimentvolumen zwischen verschiedenen Höhenlinien

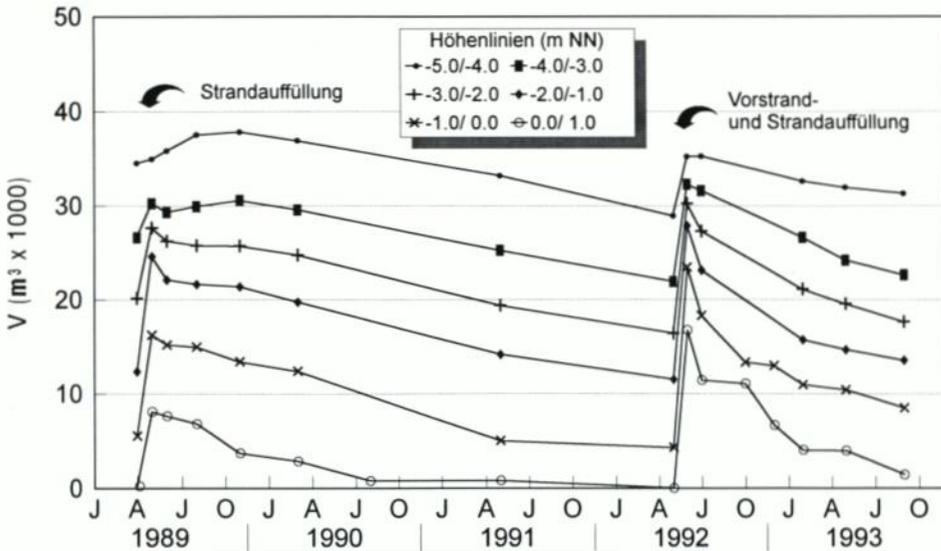


Abb. 12: Zeitliche Entwicklung der Sedimentvolumen im Bühnenfeld D₁-E₁

in der die zeitliche Volumenänderung durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden kann.

Für das Gesamtvolumen kann eine Exponentialfunktion angewendet werden. Betrachtet man jedoch die Veränderungen zwischen den Bezugstiefen, so lassen sich insgesamt drei

Tab. 3: Änderung der Halbwertzeiten mit der Tiefenbegrenzung im Bühnenfeld D_1-E_1 (* Zum Zeitpunkt der Folge-Aufspülung 1992 waren erst weniger als 50 % der ursprünglichen Auffüllmenge abgetragen worden, so daß eine Bestimmung der Halbwertzeit nicht möglich ist; sie hätte jedoch mehr als 1000 Tage betragen)

Oberhalb der Bezugstiefe (in m NN)	Halbwertzeit (in Tagen)	Zwischen den Bezugstiefen (in m NN)	Halbwertzeit (in Tagen)
> -5,0	*	-5,0/-4,0	*
> -4,0	ca. 1000	-4,0/-3,0	*
> -3,0	ca. 780	-3,0/-2,0	*
> -1,0	ca. 500	-2,0/-1,0	ca. 900
> -5,0	ca. 250	-1,0/±0,0	ca. 250
> ±0,0	ca. 75	±0,0/+1,0	ca. 80
> ±1,0	ca. 50		

Phasen erkennen. Zwischen der ersten o. g. Phase A, die in der Regel weniger als vier Wochen umfaßt, und der o. g. Phase B läßt sich eine weitere Phase erkennen, in der Sediment aus dem intertidalen Strand in den Vorstrandbereich transportiert wird. In den oberen Abschnitten sind stärkere Abnahmen zu verzeichnen, die nicht gänzlich verloren sind, sondern vorübergehend für eine weitgehend ausgeglichene Sedimentbilanz im Vorstrand sorgen. Diese zweite Phase (zwischen den o. g. Phasen A und B) beträgt rund ein Jahr. Diese dritte Phase (o. g. Phase B) ist von Verlusten in allen Bereichen gekennzeichnet.

KUNZ (1991) sowie KUNZ u. STEPHAN (1992) formulieren eine stetige Exponentialfunktion, die nicht, wie sonst üblich, im Exponenten eine Konstante (z. B. FÜHRBÖTER et al., 1976), sondern eine von der Zeit abhängige Variable aufweist. Diese Abweichung führen KUNZ u. STEPHAN (1992: 42) auf einen „ursächlichen Zusammenhang (...) mit einer strandstabilisierenden Wirkung der Bühnen“ zurück.

Wenn ein bestimmter Volumenwert überschritten wird, verringert sich der strandstabilisierende Einfluß der Bühnen sehr schnell. KUNZ u. STEPHAN (1992) schlagen ein sogenanntes „Minimalprofil“ vor, das für die Sicherung der massiven Küstenschutzwerke gegen Sturmfluteinwirkungen notwendig ist.

Aber auch für Strände, bei denen die Volumenänderung durch eine Exponentialfunktion mit einer Konstante im Exponenten (d. h. konstanter Halbwertzeit) beschrieben werden kann, steigt die Verlustrate linear in den Minimalvolumen an (KUNZ u. STEPHAN, 1992).

Die Sturmflutkette im Januar 1993 führte zu ausgeprägten Strandhöhenabnahmen, wobei keine signifikanten Unterschiede im Strand- und Vorstrandbereich zu erkennen sind. Bereits 250 Tage nach der 92er Auffüllung lag das Sedimentvolumen im Bühnenfeld D_1-E_1 unterhalb des Wertes, der rund 750 Tage nach der Aufspülung vom Frühjahr 1989 ermittelt wurde (Abb. 12).

Die Vermutung, daß die Auffüllung des Vorstrandes die Verweildauer von Auffüllkörpern erhöhen würde, kann somit nicht bestätigt werden. Der aufgefüllte Sand wird nicht, wie zuvor postuliert wurde, bei Sturmfluten in den Vorstrand verbracht. Auch war der landwärtige Transport, der in den Sommermonaten aus dem Vorstrand heraus in den intertidalen Strand erfolgen sollte, nicht eingetreten. Diese hier beschriebenen morphodynamischen Vorgänge, die für natürliche Strände charakteristisch sind, können auch im Bereich von künstlichen Stränden beobachtet werden. Sie spielen jedoch nur eine sehr untergeordnete Rolle, so daß sie bei Massenbilanzierungen nicht registriert werden. Die sturmflutbedingten Verluste künstlicher Strände sind weitaus größer als die von natürlichen Stränden. Die Verluste von

Auffüllkörpern werden nicht wie bei natürlichen Stränden ruhigerer Wetter- und Seegangsbedingungen durch einen landwärtigen Sedimenttransport wieder ausgeglichen, da aufgespülte Strände nicht im Gleichgewicht stehen.

4. Schlußbetrachtungen

Bei der kombinierten Vorstrand- und Strandauffüllung war das Auffüllmaterial etwas größer als bei der vorangegangenen konventionellen Strandauffüllung. Ein direkter Vergleich ist aufgrund der abweichenden Profile der Auffüllkörper nicht möglich, jedoch kann eine Aussage über die Größenordnung des Korngrößeneinflusses hinsichtlich der Verweildauer getroffen werden. Dieser Einfluß ist im Vergleich zu den morphologischen Einflüssen sehr gering, da die Verluste trotz etwas größeren Aufspülmaterials bei der Vorstrand- und Strandauffüllung größer waren. Diese Feldbeobachtungen stimmen mit den Laboruntersuchungen und Berechnungen zur Sinkgeschwindigkeit und kritischen Schubspannung hinsichtlich des Einflusses der Korngröße überein. Die Korngröße wirkt sich in einem geringeren Maße auf den Erosionswiderstand der Strandsedimente aus als die Korndichte. Ein Aufspülmaterial mit einer höheren Korndichte würde die Verweildauer eines Aufspülkörpers wahrscheinlich erhöhen.

Die Idee, die Verweildauer durch eine Auffüllung des Vorstrandes zu verlängern, basiert auf Ergebnissen von Untersuchungen, die an von künstlichen Auffüllungen unbeeinflussten Stränden durchgeführt worden sind. Im Verlauf von Sturmfluten wird dort Sediment vom Strand in den Vorstrand transportiert. Das Sediment wird anschließend während ruhigerer Seegangsbedingungen wieder langsam auf den Strand hochgearbeitet. Dieser durch die Vorstrandauffüllung angestrebte Effekt trat jedoch nicht ein. Die Anfangsverluste waren nicht geringer als bei konventionellen Strandauffüllungen. Die Sedimente werden im Vorstrandbereich langfristig ebenso abgetragen wie auf den intertidalen Stränden. Es stellt sich somit die Frage, warum die Sedimente während der Sommermonate nicht in signifikantem Maße auf den Strand hochgearbeitet worden sind, bzw. warum die Sedimente aus dem Vorstrandbereich während Sturmfluten erodiert worden sind, obwohl dies eigentlich der Ablagerungsort unter Sturmflutbedingungen hätte sein sollen. Die Antwort ist im unterschiedlichen Verhalten von natürlichen und künstlichen Stränden zu sehen. Die sturmflutbedingten Verluste aufgefüllter Strände sind weitaus größer als die von natürlichen Stränden. Die Verluste von Auffüllkörpern werden nicht wie bei natürlichen Stränden bei ruhigeren Wetter- und Seegangsbedingungen durch einen landwärtigen Sedimenttransport wieder ausgeglichen, da aufgespülte Strände nicht im Gleichgewicht mit den aktiven Kräften stehen. Auch eine Arbeitsgruppe der Duke University (USA) stellt fest, daß sich künstliche Strände nicht wie natürliche Strände nach Sturmfluten wieder regenerieren und aufbauen, sondern auf dem Erosionsniveau verbleiben und sogar noch weiter erodiert werden (PILKEY u. CLAYTON, 1987, 1988; DIXON u. PILKEY, 1989, 1991; LEONARD et al., 1988, 1989, 1990a, b). Die auf Norderney gemachten Beobachtungen stimmen mit den amerikanischen überein. Dissipative Strandzustände lassen sich am Norderneyer Westkopf nicht künstlich durch Vorstrandauffüllungen über einen längeren Zeitraum erhalten.

Minimale Aufspülmengen, wie dies bereits KUNZ u. STEPHAN (1992) vorgeschlagen haben, können die relativen Verluste, besonders in der Anfangsphase, vermindern und vermögen somit die Verweildauer relativ zu verlängern. Eine kontinuierliche Aufspülung mit vergleichsweise geringen Mengen wäre daher zu empfehlen. Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Verfahrens müßte jedoch zuvor ermittelt werden.

Die verstärkte Aufspülung im Divergenzbereich, um die sogenannte *feeder beach*-Funktion dieses Strandabschnittes für die benachbarten Bereiche zu nutzen, sollte jedoch nicht überschätzt werden, da entlang des Norderneyer Strandes der Quertransport gegenüber dem Längstransport dominiert, d. h. die Strandverluste sind vorwiegend dem Quertransport zuzuschreiben. Ein Teil des Sedimentes wird zwar über einen alternierenden Quertransport, der als ein Zick-Zack-Weg entlang des Strandes vereinfacht beschrieben werden kann, dem Strand anderenorts wieder zugeführt. Jedoch sind diese Mengen im Vergleich zu den Verlusten sicherlich als gering zu erachten, oder sie werden an Strandabschnitten abgelagert, wo sie für den Küstenschutz bedeutungslos sind.

Die vergleichsweise starken Verluste im Bereich des Norderneyer Westkopfes sind in Verbindung mit der Lage in unmittelbarer Nähe zur Rinne des Norderneyer Seegats zu sehen (Rinnenrandlage). Seeseitig der Bühnenstreichlinie scheinen im Vorstrandbereich hydrodynamische Bedingungen, insbesondere bei Sturmflutereignissen, zu herrschen, die stark vom Norderneyer Seegat mitgeprägt werden und zu ausgeprägten Sedimentverlusten führen. Die erwartete Ablagerung tritt somit nicht ein. Daher sollten künftig die Transport- und Umlagerungsvorgänge im Vorstrandbereich, auch seeseitig der Bühnenstreichlinie und insbesondere im Verlaufe von Sturmflutereignissen, stärker als bisher untersucht werden.

5. Danksagung

Ich danke dem Bundesminister für Forschung und Technologie für die Förderung des KFKI-Forschungsvorhabens „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen“ (MTK 0545 A9), in dessen Rahmen diese Untersuchungen durchgeführt worden sind. Besonders möchte ich mich bei Herrn R. TADDIGS für die außergewöhnliche Einsatzbereitschaft bei den Feld- und Laboruntersuchungen sowie bei der Datenauswertung bedanken. Des weiteren danke ich dem Obmann der Arbeitsgruppe zum o. g. KFKI-Forschungsvorhaben, Herrn Dr.-Ing. H. KUNZ und dem Leiter des Teilprojektes „Sedimentologie und morphologische Entwicklung“, Herrn Dipl.-Ing. G. RAGUTZKI, für die stete Diskussionsbereitschaft. Ferner gilt mein Dank den Kollegen der Forschungsstelle Küste, Norderney, die die Untersuchungen unterstützt haben.

6. Schriftenverzeichnis

- BRUUN, P.: Beach nourishment – improved economy through better profiling. The Dock and Harbour Authority, 1988
- DEAN, R. G.: Compatibility of borrow material for beach fills. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. (Copenhagen), New York, 1974
- DEAN, R. G.: Principles of beach nourishment. In Komar, P.D. (ed.), CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, 1983
- DEAN, R. G.: Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. Journal of Coastal Research, 7, 1991
- DIXON, K. u. PILKEY, O. H.: Beach replenishment on the U.S. coast of the Gulf of Mexico. Proc. Coastal Zone '89, 1989
- DIXON, K. u. PILKEY, O. H.: Summary of beach replenishment on the U.S. Gulf of Mexico shoreline. Journal of Coastal Research, 7, 1989
- EITNER, V.: Sedimentdynamik im Strandbereich einer brandungsbeeinflussten, mesotidalen Barriere-Insel unter Berücksichtigung der Auswirkungen künstlicher Strandauffüllungen (Norderney, südliche Nordsee). Dissertation, Universität Münster, 1993
- EITNER, V.: Magnetic heavy mineral associations as sediment indicators on a beach of Norderney Island, southern North Sea. Senckenbergiana maritima, 1995a (im Druck)

- EITNER, V.: Sediment dynamics of a mesotidal, mixed-energy barrier island shore (Norderney, southern North Sea). *Sedimentology*, 1995b (im Druck)
- EITNER, V.: The Effects of sedimentary textures on beach longevity. *Journal of Coastal Research*, 11, 1995c (im Druck)
- EITNER, V. u. RAGUTZKI, G.: Effects of artificial beach nourishment on nearshore sediment distribution (Island of Norderney, southern North Sea). *Journal of Coastal Research*, 10, 1994
- EITNER, V., RAGUTZKI, G. u. WESTHOFF, T.: Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge. *Die Küste*, H. 54, 1992
- ERCHINGER, H. E. u. TILLMANN, B.: Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. *Die Küste*, H. 54, 1992
- HANSEN, M. u. LILLYCROP, W. J.: Evaluation of closure depth and its role estimating beach fill values. *Proc. Beach Preservation Technology '88*, S. 107-144, 1988
- JAMES, W. R.: Techniques in evaluating suitability of borrow material for beach nourishment. *CERC, US Army Eng. Waterw. Exp. Stat.*, TM 60, 1975
- KOMAR, P. D. u. WANG, C.: Processes of selective grain transport and the formation of placers on beaches. *J. Geol.*, 92, 1984
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspülprofilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. *Mitt. Leichtweiss Inst., TU Braunschweig*, 105, 1990
- KRUMBEIN, W. G. u. JAMES, W. R.: A lognormal size distribution model for estimating stability of beach fill material. *CERC US Army Eng. Waterw. Exp. Stat.*, TM 16, 1965
- KUNZ, H.: Protection of the island of Norderney by beach nourishment, alongshore structures and groynes. *Proceedings, 3rd Int. Conference Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC) Mombasa (Kenya)*, 1991
- KUNZ, H. u. STEPHAN, H.-J.: Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. *Die Küste*, H. 54, 1992
- LEONARD, L., PILKEY, O. H. u. CLAYTON, T.: An assessment of parameters critical to beach replenishment. In Tait, L.S. (ed.) *Florida Shore and Beach Proc.*, 1988
- LEONARD, L., CLAYTON, T., DIXON, K. L. u. PILKEY, O. H.: U.S. beach replenishment experience: a comparison of beach replenishments on the U.S. Atlantic, Pacific and Gulf coasts. *Proc. Coastal Zone 89*, 1989
- LEONARD, L., CLAYTON, T. u. PILKEY, O. H.: A comparison of beach replenishments on the U.S. Atlantic, Pacific and Gulf of Mexico coasts. *Journal of Coastal research*, Spec. Issue, 6, 1990a
- LEONARD, L., CLAYTON, T. u. PILKEY, O. H.: An analysis of beach design parameters on U.S. east coast barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 6, 1990b
- LUCK, G.: Die zweite Strandaufspülung von Norderney. *Jahresbericht 1968 der Forschungsstelle für Insel- und Küstenschutz*, 20, 1970
- MCANDREW, J.: Calibration of a Frantz Isodynamic Separator and its application to mineral separation. *Proc. I.M.M.*, 181, 1957
- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. *Jahresbericht 1985 der Forschungsstelle Küste*, H. 37, 1986
- NIEMEYER, H. D.: Tidestrommessungen in Bühnenfeldern. *Jahresbericht 1986 der Forschungsstelle Küste*, H. 38, 1987
- NIEMEYER, H. D.: Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. *Die Küste*, H. 54, 1992
- PILKEY, O. H. u. CLAYTON, T.: Beach replenishment: The national solution?. *Proc. Coastal Zone '87*, 1987
- PILKEY, O. H. u. CLAYTON, T.: Summary of beach replenishment experiences on east coast barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 5, 1988
- STEPHAN, H.-J.: Fünf Strandaufspülungen auf Norderney. *Ergebnisse morphologischer Untersuchungen. Interner Bericht, Forschungsstelle Küste*, 1988, unveröff.
- SWART, D. H.: Beach nourishment and particle size effect. *Coast. Eng.*, 16, 1991
- WESTHOFF, T.: Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderneys. *Dissertation, Universität Münster*, 1990
- WRIGHT, L. D. u. SHORT, A. D.: Morphodynamic variability of surf zones and beaches, a synthesis. *Marine Geology*, 56, 1984⁵