

Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge

VON VOLKER EITNER, GÜNTHER RAGUTZKI UND THEO WESTHOFF

Zusammenfassung

Im Vorfeld sowie im Anschluß an eine künstliche Strandauffüllung wurden umfangreiche sedimentologische Untersuchungen im Strand- und Vorstrandbereich der Insel Norderney ausgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, Aussagen über die Sedimenttransportvorgänge zu treffen, um die Wirksamkeit künftiger Strandaufspülungen zu optimieren. Es wurden verschiedene sedimentologische Parameter bestimmt, die zur Klärung der Transportprozesse beitragen. Neben der Korngrößenverteilung sind der Kalkgehalt und der Schwermineralgehalt ermittelt worden. Darüber hinaus erwiesen sich besonders Luminophoren als künstliche Tracer zur Kennzeichnung von kleinräumigen Transportvorgängen als erfolgreich. Die kurzfristigen Umlagerungsintensitäten konnten durch tachymetrische Aufnahmen sowie durch Grenzwertanzeiger und Farbsandversuche quantifiziert werden. Die beiden letzteren Methoden erlauben darüber hinaus eine explizite Bestimmung der Erosions- und Sedimentationsstärken.

Summary

Intensive sedimentological studies of the beach and nearshore areas of Norderney Island were conducted both during the planning of and following artificial sand nourishment. The goal of these studies was to characterize the sediment transport process and thus optimize the sand nourishment. Sedimentological parameters involved in the transport process were investigated. The calcium and heavy metal contents as well as the particle distribution were determined. In addition, Luminophor was found to be a good artificial tracer for following small scale transport processes. Short term redistribution intensities could be quantified from tachymetric measurements, base level records and dyed sand investigations. The latter two methods additionally allowed an explicit determination of erosion and sedimentation rates.

Inhalt

1. Einleitung	94
2. Untersuchungsverfahren	94
3. Ergebnisse	95
3.1 Sedimentverteilungen	95
3.1.1 Ebbdelta des Norderneyer Seegats	95
3.1.2 Strand- und Vorstrandbereich	95
3.1.2.1 Einflüsse aus Bühnen- und Deckwerksabfolgen	102
3.2 Einzeltidenereignisse	103
3.2.1 Sedimentverteilungen	103
3.2.2 Sedimentumlagerungsintensitäten	104
3.2.3 Luminophorenversuche	105
4. Folgerungen	108
5. Schriftenverzeichnis	109

1. Einleitung

Als Teilprojekt des KFKI-Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ wurden zur Klärung der hydrodynamisch-morphologischen Vorgänge bei Strandauffüllungen am Anwendungsbeispiel Norderney auch sedimentologische Untersuchungen ausgeführt. Während bei den vorhergehenden fünf Norderneyer Strandauffüllungen (KUNZ, 1991) – die erste erfolgte 1951/52 (KRAMER, 1958/59) – Sedimentkennwerte nur zu Teilfragen ermittelt wurden, sollten bei der sechsten, im Frühjahr 1989 vorgenommenen Aufspülung in Ergänzung zu hydrometrischen und morphologischen Untersuchungen Ergebnisse zu folgenden Aufgabenstellungen erarbeitet werden:

- Erfassung der langfristigen und großräumigen Sedimentverteilungen und deren Wechselbeziehung zu den Sedimenten im Auffüllbereich
- Bestimmung kurzfristiger Umlagerungen in Zuordnung zu morphologischen und hydrologischen Randbedingungen

Nachfolgend wird über Verfahren und Ergebnisse dieser Sedimentuntersuchungen im Rahmen des o. g. Forschungsvorhabens von 1986 bis 1991 berichtet. Einzelheiten der Untersuchungen sind ferner in fünf Zwischenberichten und einer umfassenden Arbeit dargestellt (RAGUTZKI u. WESTHOFF, 1987–1990; WESTHOFF, 1990).

KUNZ (1992) und KUNZ/STEPHAN (1992) sowie NIEMEYER (1992) diskutieren über diese Ausführungen hinaus die Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt bzw. die Ergebnisse der morphologischen und hydrodynamischen Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney.

2. Untersuchungsverfahren

Der Strand und Inselvorstrand wurden in halbjährlichen Abständen entlang von 34 küstennormalen Profilen beprobt, um ein Gesamtbild längerfristiger Änderungen der Sedimentverteilung zu erhalten. Die monatliche Entnahme von Sedimentproben entlang von sieben Profilen ermöglichte die Erfassung von kurzfristigen Veränderungen. Der Schwerpunkt lag auf den Problembereichen mit besonders starken Strandhöhenverlusten.

Die Sedimentprobenentnahme erfolgte mit einem Stechzylinder (Höhe und Durchmesser jeweils 5 cm) ungestört an der Niedrigwasserlinie (NWL), an der Mittelwasserlinie (MWL), an der Hochwasserlinie (HWL) und am Trockenen Strand (TST), soweit dieser ausgebildet war. Bei der sedimentologischen Aufnahme des Aufspülkörpers ist von dieser Probenentnahmetechnik abgewichen worden; hier wurden jeweils 9 Proben pro Bühnenfeld mit einem 12 cm tief reichenden Stechzylinder entnommen

Die Beprobung des Inselvorstrandes und des Ebbdeltas des Norderneyer Seegats erfolgte vom Schiff aus durch einen Van-Veen-Greifer, der jedoch nur gestörte Sedimentproben liefert. Die Vorstrandproben wurden 50 m seeseitig der Bühnenköpfe entlang der sogenannten Bühnenstreichlinie (BSL) gewonnen.

Die Umlagerungsintensität einzelner Tiden wurde beispielhaft im Bühnenfeld D₁–E₁ mit Farbsandkörpern bzw. mit sogenannten Grenzwertanzeigern bestimmt; letztere sind ca. 20 cm lange Drähte mit jeweils einer Ringscheibe (Durchmesser von ca. 30 mm). Sie bieten gegenüber der topographischen Vermessung den Vorteil, nicht nur die Netto-Umlagerung, sondern zusätzlich die Erosionstiefe und Sedimentationshöhe anzugeben.

Auf der Grundlage von bestimmten Sedimentparametern (Korngrößenverteilung, Sortierung, Karbonatgehalt, Schwermineralgehalt u. a.) konnten einige Transportprozesse qualitativ erfaßt werden. Für Untersuchungen kleinräumlicher Transportvorgänge haben sich darüber hinaus auch Luminophorenversuche als hilfreich erwiesen.

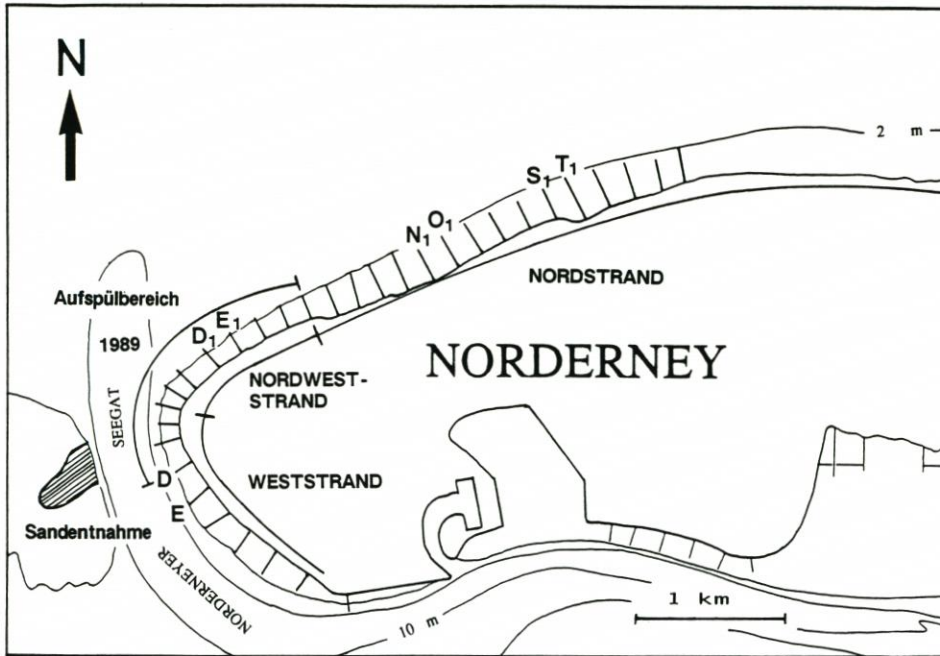


Abb. 1. Lageplan des Untersuchungsgebietes

3. Ergebnisse

3.1 Sedimentverteilungen

3.1.1 Ebbdelta des Norderneyer Seegats

Bereits in der Vergangenheit war das Ebbdelta des Norderneyer Seegats Gegenstand intensiver Untersuchungen hinsichtlich der Erfassung der Transportvorgänge (z. B. KRAUSE, 1950; DECHEND u. RICHTER, 1953; AKKERMANN, 1956; HOMEIER u. KRAMER, 1957; NUMMEDAL u. PENLAND, 1981). Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die Sedimentverteilung im Bereich des Ebbdeltas und deren zeitlichen Änderungen von WESTHOFF (1990) eingehend untersucht und dargestellt.

Der Sedimenttransport in den Rinnen des Ebbdeltas erfolgt fast ausschließlich durch Tideströmungen. Auf den Platen überwiegen dagegen seegangsinduzierte Strömungen als Transportmedium. In Abb. 2 sind die unterschiedlichen Transportmedien und ihre Richtungen im Ebbdelta des Norderneyer Seegats von WESTHOFF (1990) unter Einbeziehung der Untersuchungsergebnisse der o. g. Autoren dargestellt.

3.1.2 Strand- und Vorstrandbereich

Bei allen bisherigen Strandauffüllungen wurden Sedimente im Fein-/Mittelsandbereich (überwiegend $d_{50} \approx 0,2$ mm) mit wechselnden Grobsandanteilen – im wesentlichen Schill-

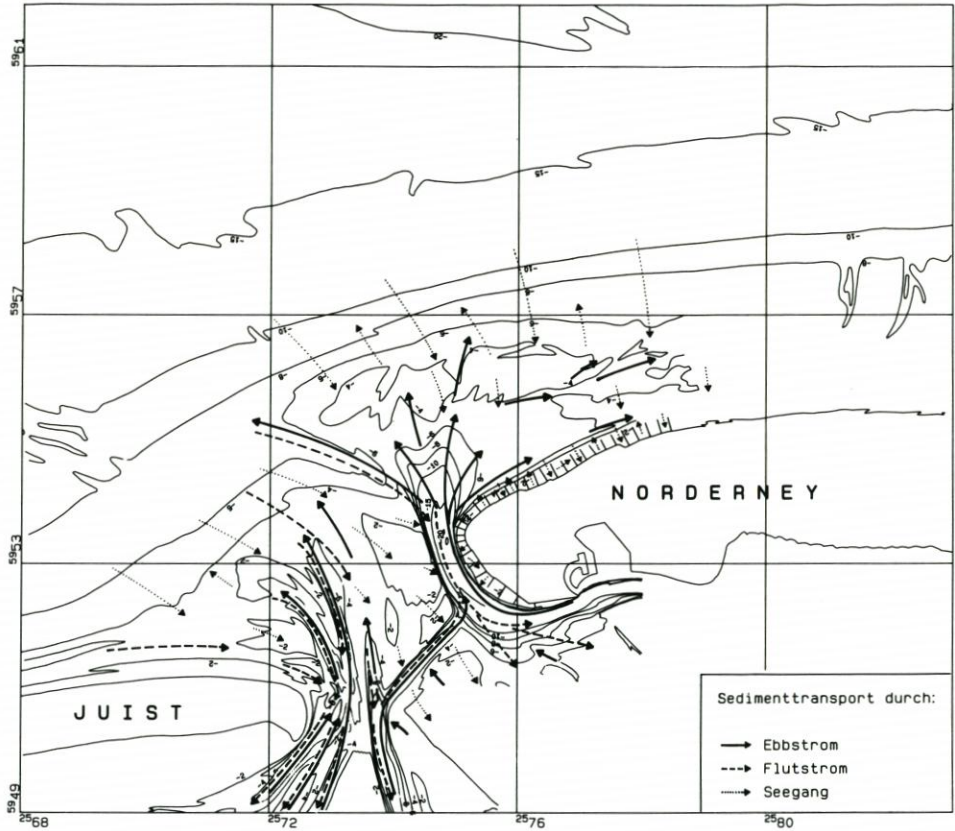


Abb. 2. Sedimenttransport im Ebbdelta des Norderneyer Seegats (aus WESTHOFF, 1990)

bruch – aufgespült (KUNZ, 1991). Selektionsprozesse, die im Anschluß an die Auffüllungen feineres Material aussortierten, hatten eine Vergrößerung zur Folge.

Da es sich bei dem aufgespülten Material um „Fremdmaterial“ handelt, kann aus diesem Umstand auch ein Vorteil hinsichtlich der Beurteilung von Transportvorgängen gezogen werden. Das zu feinkörnige Material hebt sich von den ursprünglichen Strandsedimenten ab und kann somit als natürlicher Tracer genutzt werden. Auch die Schwermineralanteile boten als natürlicher Tracer die Möglichkeit, einige Transportvorgänge zu verdeutlichen (WESTHOFF, 1990).

Die Strände des Westkopfes der Insel Norderney unterscheiden sich durch verschiedene hydrodynamisch-morphologische Einflußgrößen. Dabei ist zu vergegenwärtigen, daß der Seegang und die dadurch induzierten Wirkungen stark von den jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten abhängen (NIEMEYER, 1986). Die Sedimentbilanz wird seit 1951 wesentlich von den Strandauffüllungen beeinflusst (KUNZ, 1991). Die im folgenden verwendeten Ortsbezeichnungen sind der Abb. 1 zu entnehmen.

Der Weststrand unterscheidet sich hinsichtlich der Verteilung der d_{50} -Werte durch abweichende hydrodynamische Einwirkungen des Norderneyer Seegats von den anderen Strandabschnitten (Abb. 3). Neben den seegangserzeugten Strömungen wirken hier in verstärktem Maße zusätzlich auch Tideströmungen. Nach NIEMEYER (1987) können diese in den

Buhnenfeldern bis zu 30 cm/s erreichen. Aufgrund dieser Gezeitenströmungen, die in den anderen Buhnenfeldern am Nordwest- und Nordstrand nahezu vernachlässigbar sind, und deren Überlagerung mit seeganginduzierten Strömungen (NIEMEYER, 1991) stellen sich stark veränderliche Kornspektren ein. Das Sediment weist wechselnde Anteile von Schill oder Schluff bzw. Ton auf. Dies gilt insbesondere für den Vorstrand- und den MTnw-Bereich. Weiterhin zeigt das Sediment in der Regel einen hohen Sortierungsgrad. Der Karbonatgehalt und die mittlere Korngröße (d_{50}) hingegen sind geringer im Vergleich zu den Sedimenten des weiter östlich gelegenen Strandes. Die Sedimente am Nordweststrand sind auch aufgrund des höheren Anteils von Schillbruch weitaus gröber und schlechter sortiert (WESTHOFF, 1990), ursächlich zurückzuführen auf stärkere seegangserzeugte Strömungen. Allgemein ist aufgrund des verstärkten Turbulenzeintrages und der Reflektion des Seegangs am Deckwerk eine Korngrößenzunahme von der Niedrigwasser- zur Hochwasserlinie festzustellen. Die größten Sedimente befinden sich jedoch in der Regel im Bereich der Mittelwasserlinie.

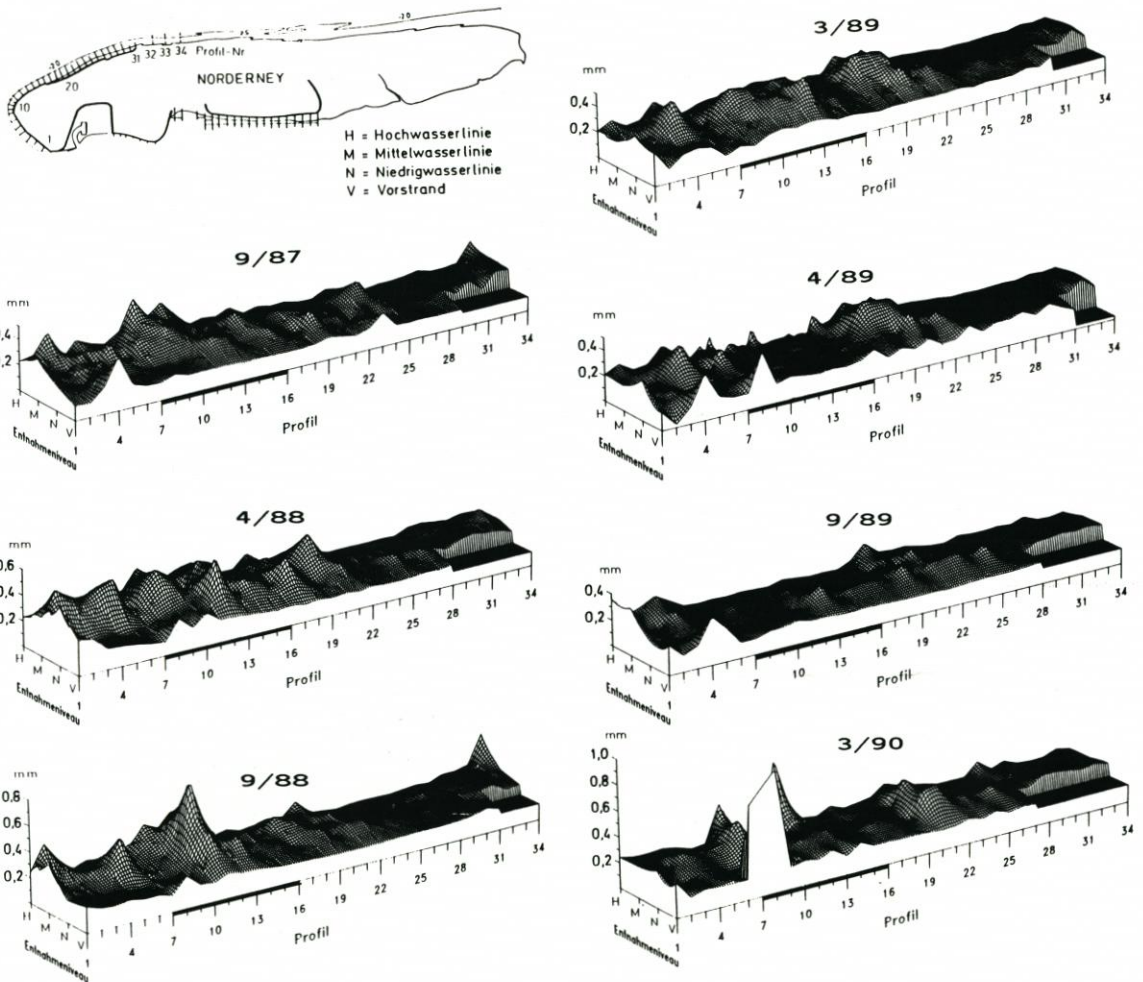


Abb. 3. Verteilung des d_{50} -Wertes des Strand- und Vorstrandbereiches (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

Die Sedimente des Nordstrandes sind im westlichen Abschnitt feinkörniger als die des Nordweststrandes. Die Veränderung des Korngrößenspektrums ist hier von zwei sedimentdynamischen Effekten geprägt. Zum einen wird künstlich aufgespülter Sand vom Nordweststrand eingetragen, und zum anderen wird der Nordstrand bei Ostwindlagen durch Sedimentverdriftung mit Sand aus dem Platananlandungsbereich aus dem Osten versorgt. Die Morphologie ist mit Strandriffen und -prielen stark saisonal geprägt. Auch in den Korngrößenverteilungen lassen sich jahreszeitliche Veränderungen erkennen. In den Wintermonaten nimmt die Korngröße in der Regel gleichlaufend mit erhöhten Energieeinträgen zu, d. h., es verstärken sich Selektionsprozesse durch Auswaschung feinerer Korngrößen. Aber auch bestimmte Wetterlagen, insbesondere anhaltende Ostwindlagen, führen zu einer Korngrößenzunahme der Sedimente, da aus dem Bereich positiver Sandbilanz, d. h. aus dem Bereich der Platananlandung des Riffbogens, gröbere Sedimente eingetragen werden. Der Übergang vom Bereich ausgeglichener zum Bereich positiver Sedimentbilanz zeichnet sich durch eine Vergrößerung in der Korngrößenzusammensetzung ab, die durch den Eintrag von überwiegend Mittelsand- mit Grobsand- bzw. Schillanteilen aus dem Riffbogen verursacht wird (Abb. 6, 7).

Buhnenfeld E - D

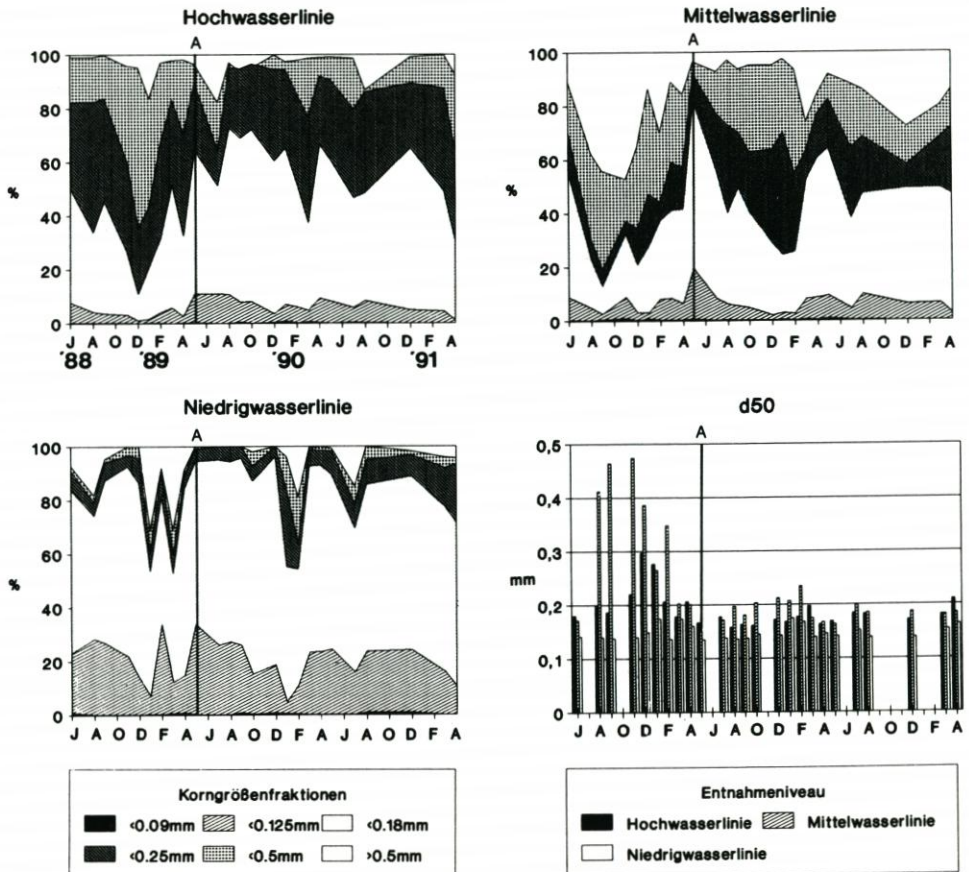


Abb. 4. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des d_{50} -Wertes im Buhnenfeld E-D (A: Aufspülung Mai 1989)

Buhnenfeld D1 - E1

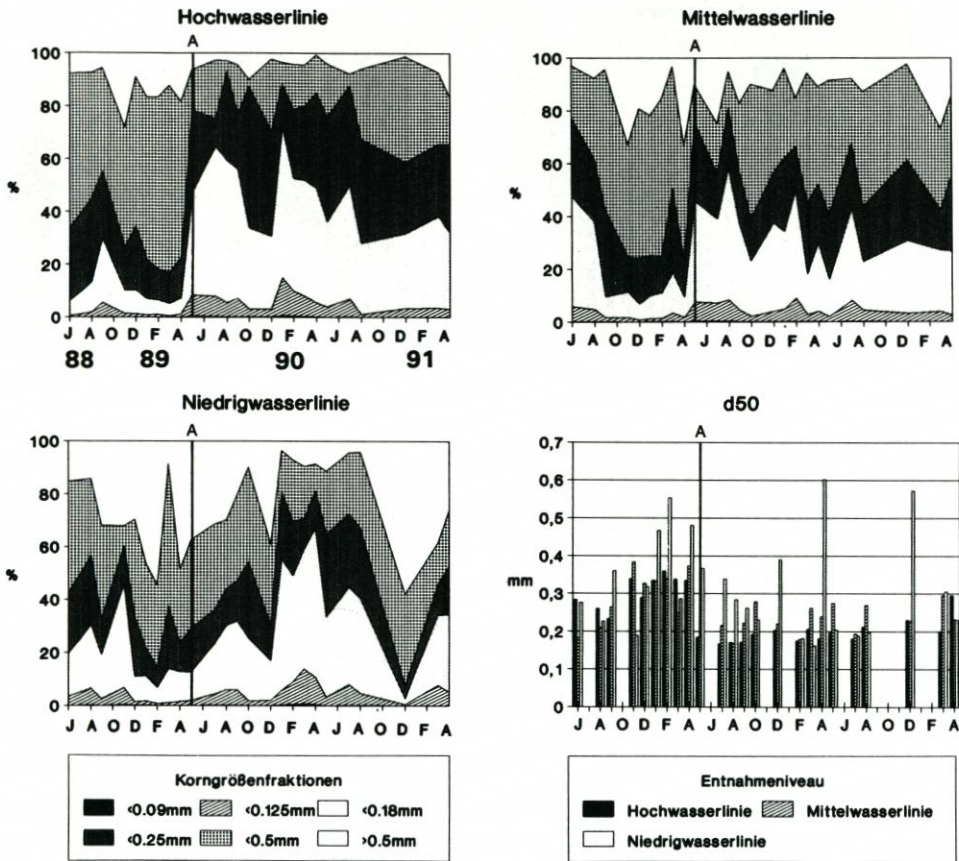


Abb. 5. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des d_{50} -Wertes im Buhnenfeld D₁-E₁ (A: Aufspülung Mai 1989)

Bei der Aufspülung im Frühjahr 1989 wurden vorwiegend Feinsande mit einem mittleren d_{50} -Wert von 0,17 mm auf den Strand aufgebracht. Dadurch wurde gegenüber der ursprünglichen Verteilung eine Verfeinerung des Korngrößenspektrums vorgegeben, die jedoch an den verschiedenen Entnahmeniveaus der Beprobungen unterschiedlich stark ausgeprägt ist (Abb. 3-7). Am stärksten werden die Veränderungen an der Hochwasserlinie sichtbar. Auch nach der Aufspülung ist eine relative Vergröberung der Sedimente mit stärkeren Einträgen in den Wintermonaten verknüpft (Abb. 4, 5).

In Tabelle 1 ist die zeitlich-räumliche Variabilität für den gesamten Aufspülbereich vor und nach der Aufspülung aufgeführt. Die Sedimente sind nach der Aufspülung nicht mehr als Mittelsande, sondern nunmehr als Feinsande zu bezeichnen. Auffällig ist, daß sich die Minimum-Werte im Gegensatz zu den Maximum-Werten nur geringfügig geändert haben. Die Aufspülung führte zu einer besseren Sortierung der Strandsedimente. Konnten die Sedimente zuvor als mäßig gut sortiert bezeichnet werden, sind sie im Anschluß als gut sortiert zu klassifizieren. Hier sind Veränderungen besonders im Minimum-Bereich zu

Buhnenfeld N1 - O1

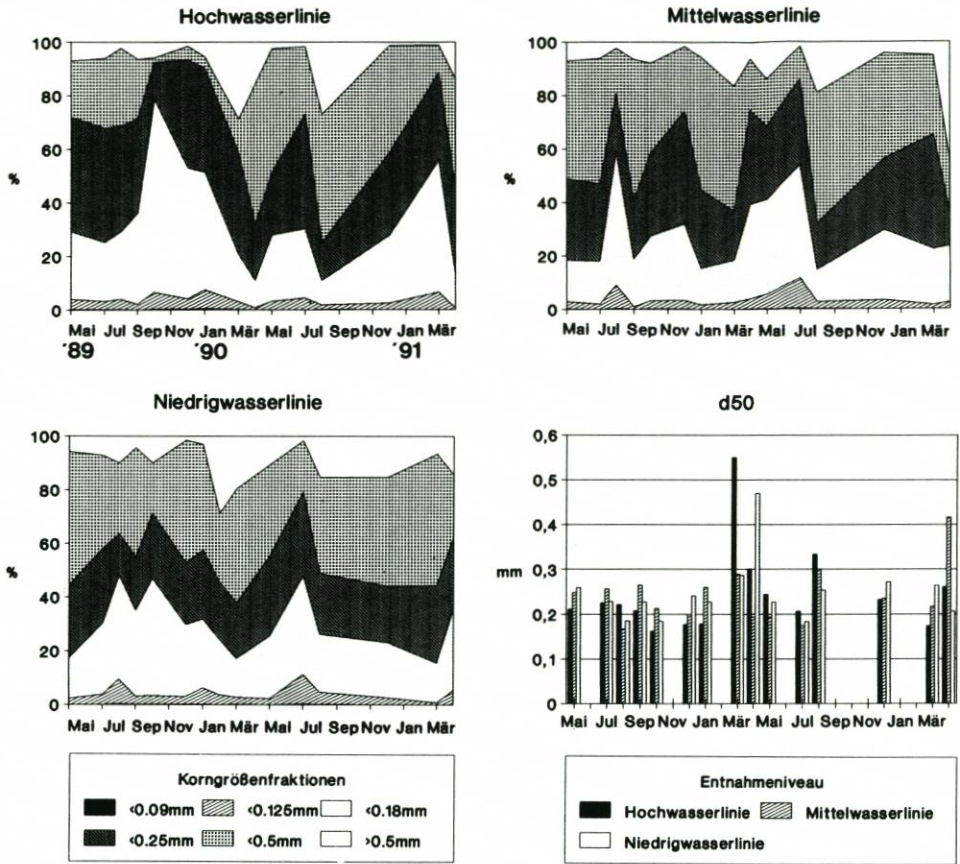


Abb. 6. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des d_{50} -Wertes im Buhnenfeld N₁-O₁ (A: Aufspülung Mai 1989)

verzeichnen. Das heißt, daß das relativ homogene Aufspülmaterial die Variabilität der Strandsedimente vermindert hat.

Neben den Korngrößenverteilungen haben sich auch die Schwermineralgehalte der Strandsedimente als ein weiterer Indikator zur Deutung der Transportvorgänge erwiesen (WESTHOFF, 1990). Zur Bestimmung der Schwerminerale aus den Sedimenten wurde die magnetische Abtrennung mit dem FRANTZ-Magnetscheider angewandt, die eine Bearbeitung größerer Probenserien ermöglicht. Hierbei wurden jeweils von der Korngrößenfraktion 0,106–0,125 mm drei Schwermineralfraktionen (bei 0,4 Ampere, 0,8 A und 1,2 A) abgetrennt (VEENSTRA u. WINKELMOLEN, 1976).

Allgemein kennzeichnend ist ein Anstieg der Schwermineralgehalte vom Vorstrand zum trockenen Strand, der durch stärkeren äolischen Einfluß in den höhergelegenen Strandabschnitten, die nur kurzfristig bzw. selten wasserbedeckt sind, verursacht wird. Der Wind bedingt einen Selektionsprozeß, der eine Anreicherung der Minerale mit einer höheren Dichte zur Folge hat. Die Schwermineralgehalte der Strandsedimente nehmen von West nach Ost ab. Parallel dazu vermindert sich die Differenz der Schwermineralanteile der Sedimente, die an

Buhnenfeld S1 - T1

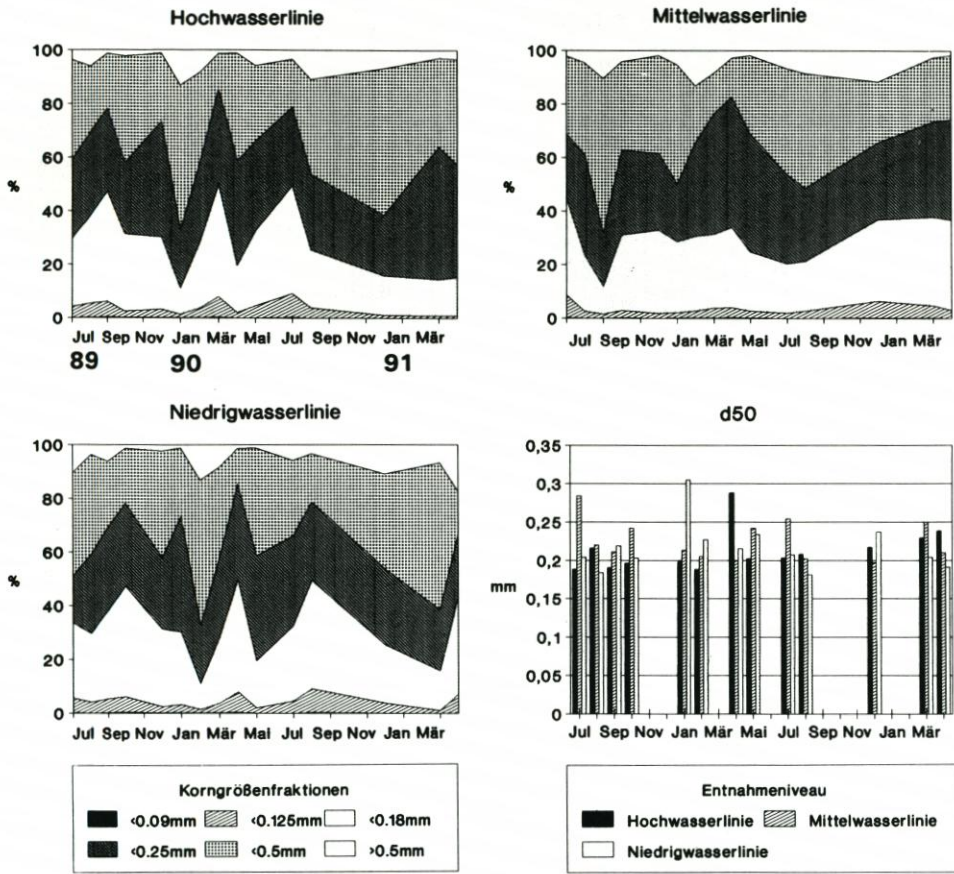


Abb. 7. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des d_{50} -Wertes im Buhnenfeld S_1-T_1 (A: Aufspülung Mai 1989)

Tabelle I. Zeitlich-räumliche Variabilität der Sedimentkennwerte des Aufspülbereiches vor (04/88; 09/88) und nach der Aufspülung (04/89)

	Mittlere Korngröße (d_{50})			Sortierung (So) nach FOLK & WARD (1959)		
	März 1988	Sept. 1988	April 1989	März 1988	Sept. 1988	April 1989
Probenzahl (Aufspülbereich)	27	26	81	22	20	75
Minimum (mm)	0,19	0,15	0,14	0,37	0,22	0,33
Maximum (mm)	0,56	1,70	0,31	0,97	1,01	1,02
Arithmetisches Mittel (mm)	0,31	0,34	0,17	0,68	0,64	0,46
Geometrisches Mittel (mm)	0,30	0,28	0,17	0,65	0,61	0,42
Standardabweichung (mm)	0,09	0,31	0,04	0,18	0,18	0,22

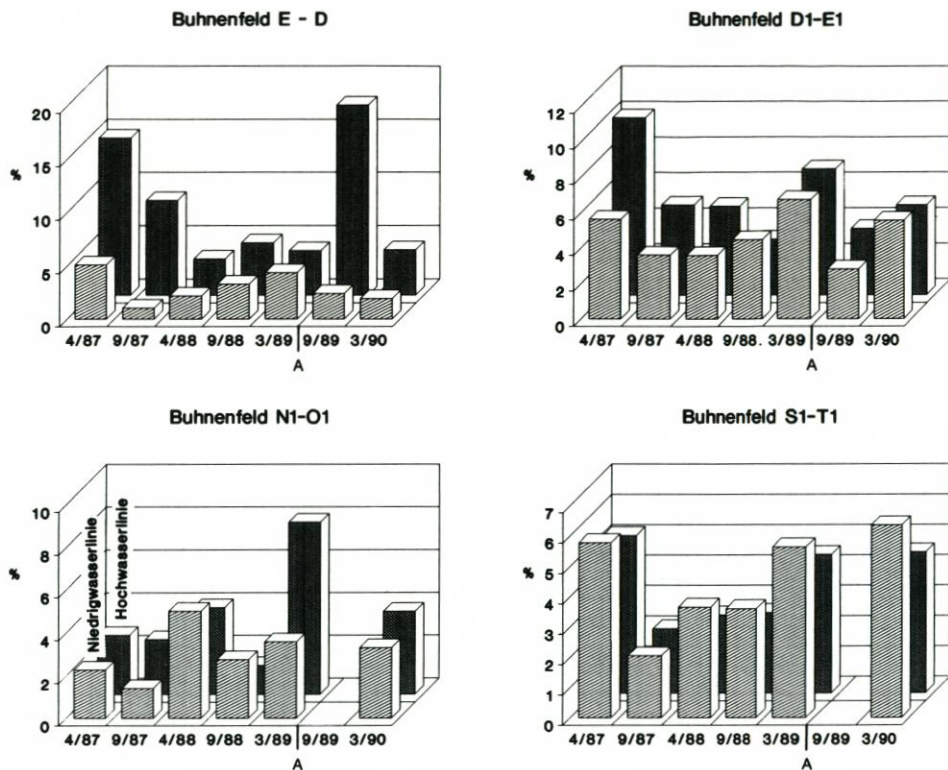


Abb. 8. Jahreszeitlich bedingte Variabilität der Schwermineralgehalte

der Hochwasser- und an der Niedrigwasserlinie entnommen worden sind. Sehr deutlich sind die saisonalen Schwankungen zu erkennen. In der Regel steigt der Schwermineralanteil in den Wintermonaten deutlich an (Abb. 8).

3.1.2.1 Einflüsse aus Buhnen- und Deckwerksabfolgen

Das Norderneyer Deckwerk wurde während der verschiedenen Bauabschnitte aufgrund fortschreitender Strand- und Dünenabbrüche nicht durchgehend in östlicher Richtung verlängert, sondern in gewissen Abständen um einige Zehnermeter inselwärts verlagert, um Lee-Erosion zu verhindern (KUNZ, 1987). Im östlich sich anschließenden Platananlandungsbereich kann die Sedimentbilanz im Mittel als ausgeglichen bezeichnet werden. Eine zunehmende Verbreiterung der Strände, die nach Osten zu erkennen ist, wird allein durch die Anpassung der künstlichen an die natürliche Strandlinie erreicht. Die Buhnen tragen nur unwesentlich dazu bei. Dies wird durch den Verlauf der NN-2m-Linie deutlich, die von der Buhnenstreichlinie abweicht. Signifikante Einflüsse auf die Sedimentverteilungen sind nicht erkennbar.

3.2 Einzeltidenereignisse

Zur Erfassung kurzfristiger Umlagerungsvorgänge wurden im Rahmen der Untersuchungen auch Messungen über die Dauer von jeweils zwei bis vier ausgewählten Einzeltiden im Hauptmeßfeld, dem Bühnenfeld D₁-E₁, durchgeführt. Im folgenden werden einige Einzeltidenereignisse beispielhaft dargestellt.

3.2.1 Sedimentverteilungen

Die Sedimentverteilung im Bühnenfeld D₁-E₁ stellte sich bei einer Einzeltidenuntersuchung im Juli 1988, deren meteorologischen und hydrographischen Randbedingungen in Tabelle 2 zusammengefaßt sind, wie folgt dar: Die größten Sedimente befinden sich im zentralen Bereich des Bühnenfeldes. In Richtung auf das Deckwerk, auf die Bühnen sowie auf den Vorstrand werden die Sedimente feinkörniger. In Abbildung 9 sind die Veränderungen

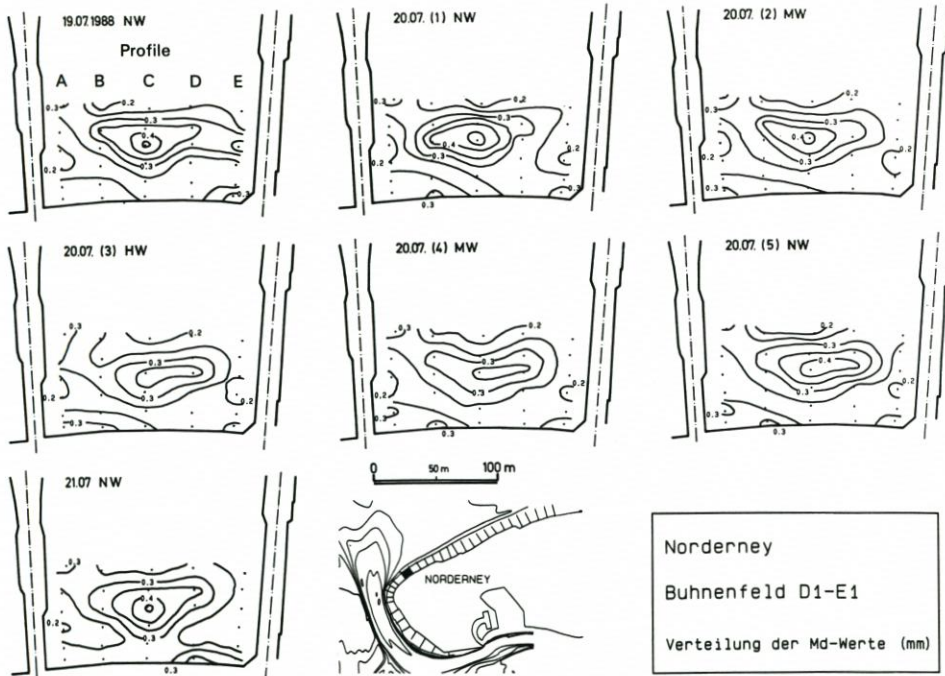


Abb. 9. Verteilung der Median-Werte im Bühnenfeld D₁-E₁ über 3 Tiden (aus WESTHOFF, 1990, leicht modifiziert)

der Sedimente durch die Verteilung der Median-Werte dargestellt. Dabei wird eine Abnahme der mittleren Korngröße um ca. 0,1 mm mit ablaufendem Wasser deutlich. Mit auflaufendem Wasser erreicht das Sediment wieder die Ausgangsverteilung (Abb. 10).

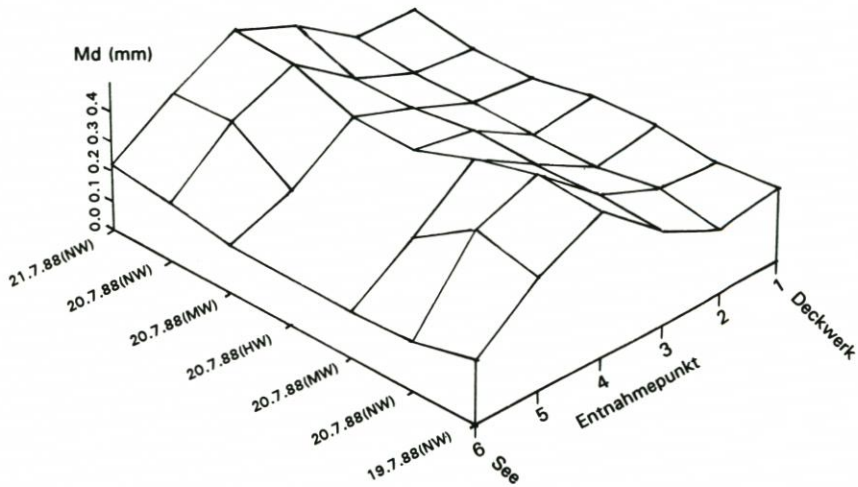


Abb. 10. Zeitliche Änderung der Median-Werte im Profil C (aus WESTHOFF, 1990)

Tabelle 2. Meteorologische und hydrographische Randbedingungen der Einzeltidenuntersuchungen vom 18. 7. bis 21. 7. 1988 im Bühnenfeld, D₁-E₁ (Winddaten der Wetterstation Norderney) (H_s: signifikante Wellenhöhe, T_s: signifikante Wellenperiode)

Datum	Tide	V _{Wind} (m/s)	Wind- richtung	H _s (m)	T _s (s)
18. 7. 1988		10,1	W-WNW		
19. 7. 1988	NW	7,3	WNW	0,47	4,2
	HW	3,5	WNW-WSW	0,46	4,5
20. 7. 1988	NW	5,0	WSW-WNW	0,17	4,0
	HW	5,2	W-WNW	0,15	3,5
21. 7. 1988		1,9	WNW-S		

3.2.2 Sedimentumlagerungsintensitäten

Die Umlagerungsintensitäten können auf verschiedenen Wegen bestimmt werden. Eine Möglichkeit ist die tachymetrische Aufnahme der Strandhöhen. Im Rahmen der Einzeltidenuntersuchungen im Juli 1988 (Tab. 2) wurde zeitgleich auch die Topographie des Bühnenfeldes D₁-E₁ tachymetrisch aufgenommen. Das Ergebnis der Massenbilanzierungen, die auf diesen Vermessungen beruhen, ist in Tabelle 3 zusammengefaßt. Obgleich Zunahmen während der ersten Tide bzw. Verluste sich in den beiden darauffolgenden Tiden ergeben, sind die Veränderungen in bezug auf die Gesamtmenge als gering zu werten. Der Nachteil dieser Methode ist, daß nur das Endresultat der Umlagerungsvorgänge ermittelt werden kann. Aussagen über die Sedimentations- und Erosionsprozesse können nicht getroffen werden. Durch sogenannte Grenzwertanzeiger können dagegen diese Prozesse quantifiziert werden. In dieser auf GREENWOOD et al. (1979) zurückgehenden Methode kann die Erosionstiefe sowie die Sedimentationshöhe bestimmt werden. Für das Bühnenfeld D₁-E₁ bestimmte WESTHOFF (1991) im August 1990 bei einer weiteren beispielhaften Einzeltidenuntersuchung (Tab. 5, 6) eine durchschnittliche Umlagerungstiefe von ca. 4 cm. Die Umlagerung reicht

Tabelle 3. Massenbilanzen (in m³) im Bühnenfeld D₁-E₁ vom 19. 7. bis 21. 7. 1988 (nach WESTHOFF, 1990)

Höhe m (NN)	19. 7.	20. 7. (1)	20. 7. (2)	21. 7.
-1,1 - -1,1	1078,78	+0,47	- 0,66	- 9,92
-1,0 - -0,9	1004,09	+5,01	- 4,52	-12,44
-0,9 - -0,8	925,96	+5,03	-11,84	-13,24
-0,8 - -0,7	842,71	+2,76	-12,80	-14,10
-0,7 - -0,6	756,00	-0,22	- 9,50	-14,52
-0,6 - -0,5	663,49	-0,43	- 9,51	- 8,50
-0,5 - -0,4	554,56	-0,89	- 6,90	- 7,93
-0,4 - -0,3	394,45	+6,13	-31,63	+ 9,35
-0,3 - -0,2	207,62	+8,56	-26,77	+ 4,53
-0,2 - -0,1	97,19	-0,03	+ 3,85	-17,29
-0,1 - -0,0	58,75	-2,66	+ 2,89	-11,99
0,0 - -0,1	35,12	-3,63	- 0,53	- 3,52
0,1 - -0,2	18,39	-2,45	- 0,79	- 0,07
0,2 - -0,3	6,81	+0,20	+ 0,07	- 0,23
0,3 - -0,4	1,78	+0,37	+ 0,72	- 0,18
0,4 - -0,5	0,26	+0,22	+ 0,56	- 0,15
Erosion/ Sedimentation		+18,36	-107,36	-100,10
Gesamt	6645,96	6664,35	6457,12	6456,95

jedoch in den verschiedenen Bereichen des Bühnenfeldes unterschiedlich tief (Abb. 11, 12). Zu beachten ist, daß bei Sturmflutereignissen sich wesentlich größere Umlagerungstiefen ergeben (HOMEIER, 1976).

Farbsandversuche geben in analoger Weise die Umlagerungsvorgänge wieder. Dazu wird ein länglicher Farbsandkörper in die Sedimentoberfläche eingebaut. Die Längenänderung dieses Körpers sowie die Mächtigkeit des ihn überlagernden Sedimentes lassen auf die Sedimentations- und Erosionsstärken schließen. WESTHOFF (1990) wandte diese Methode an der Niedrigwasserlinie im Bühnenfeld D₁-E₁ an, um die Stärke der Umlagerungen über einige Tiden zu bestimmen (Tab. 4).

3.2.3 Luminophorenversuche

Zur Klärung von Transportvorgängen können natürliche Tracer (Korngröße, Schwerminerale), aber auch künstliche Tracer eingesetzt werden. Dabei haben sich mit einem luminiszierenden Farbstoff angefärbte Sande, sogenannte Luminophoren, als gut geeignet erwiesen (z. B. AJBULATOV, 1957; GRIESEIER, 1959; MÜLLER et al., 1965).

Im Sommer 1990 wurde im Bühnenfeld D₁-E₁ ein Luminophorenversuch über zwei Tidenzyklen durchgeführt und ein Transportmodell erstellt (WESTHOFF, 1991). Die hydrodynamischen Randbedingungen sind in den Tabellen 5 und 6 zusammengefaßt. Eine Erklärung gefundener sedimentologischer Ergebnisse wird durch die Ergebnisse zuzuordnender hydrographischer Untersuchungen möglich (NIEMEYER, 1991). Die alternierenden seegangsinduzierten Strömungen verfrachteten die Luminophoren sowohl in see- als auch landwärtige Richtung (A u. B), wobei der landgerichtete, strandnormale Sedimenttransport vorherrscht (Abb. 13). Aus dem alternierenden Quertransport resultiert zusätzlich ein nach Westen auf

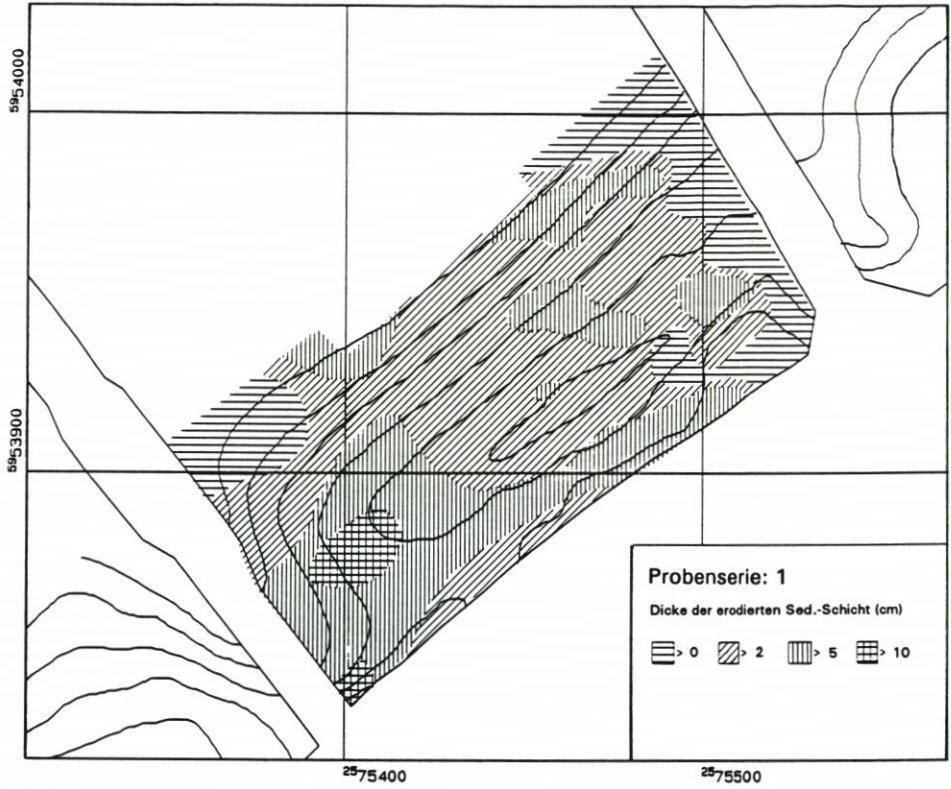


Abb. 11. Verteilung der Erosionsraten (aus WESTHOFF, 1991)

Tabelle 4. Ermittlung der Umlagerungsintensitäten durch eingebaute Farbsandkörper an der Niedrigwasserlinie im Bühnenfeld D₁-E₁ (nach WESTHOFF, 1990)

Profil	2. Tide (20. 7. 1988)		3. Tide (20.-21. 7. 1988)	
	Erosion	Sedimentation	Erosion	Sedimentation
A	2,8 cm	3,8 cm	4,7 cm	3,7 cm
B	0,5 cm	2,0 cm	4,6 cm	3,3 cm
C	3,8 cm	1,3 cm		

Tabelle 5. Wasserstandsdaten des Pegels Norderney, Riffgat am 23. u. 24. 8. 1990

Tag	Tidenniedrigwasser		Tidenhochwasser	
	MEZ	cm (PN)	MEZ	cm (PN)
23. 8. 90	07.20	358	01.08	626
	19.57	329	13.09	640
24. 8. 90	08.00	326	01.45	598
	20.21	332	13.55	622

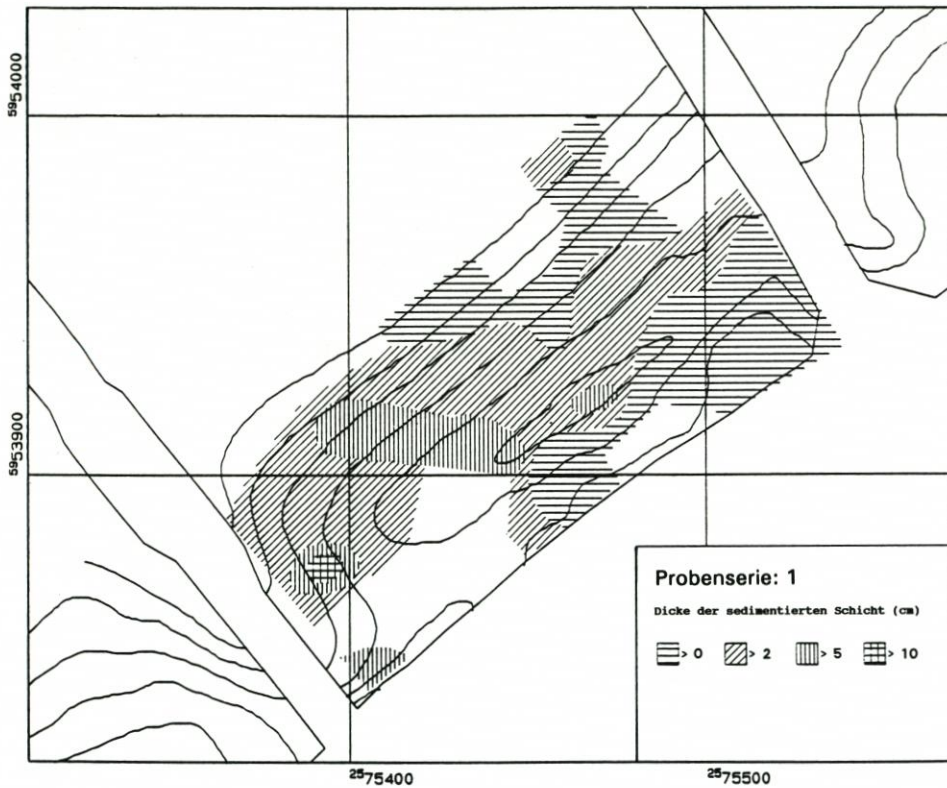


Abb. 12. Verteilung der Sedimentationsraten (aus WESTHOFF, 1991)

das Strandriff gerichteter Längstransport (C). Die dominierende landwärtige Transportrichtung wird in der Nähe des Deckwerkes durch das Bauwerk selbst in eine strandparallele Richtung abgelenkt (D). Im westlichen Teil des Bühnenfeldes kommt es dann zu einer Auffächerung des Sedimenttransportes in vorwiegend seewärtige Richtungen (E).

Tabelle 6. 20minütige Mittel aus Seegangdaten des Untersuchungszeitraumes an der Meßposition M1 (H_S : signifikante Wellenhöhe, T_M : mittlere Wellenperiode, V_x : strandparallele Geschwindigkeit, V_y : strandnormale Geschwindigkeit, V_r : resultierende Geschwindigkeit)

Tag	Zeit	Tide	H_S (m)	T_M (s)	V_x (m/s)	V_y (m/s)	V_r (m/s)	Richt. Grad
23. 8.	07.14	NW	0,02	3,13	-0,01	0,00	0,01	351
	10.17	MW	0,80	4,93	-0,05	0,11	0,12	271
	13.20	HW	0,98	5,71	-0,08	0,13	0,15	278
	16.23	MW	0,03	4,44	-0,03	0,33	0,33	251
	22.39	MW	0,57	4,52	-0,02	0,01	0,02	188
24. 8.	04.45	MW	0,01	0,94	0,10	0,07	0,12	190
	07.48	NW	0,01	2,56	-0,57	0,14	0,59	322
	13.54	HW	0,39	7,03	-0,02	-0,02	0,03	31

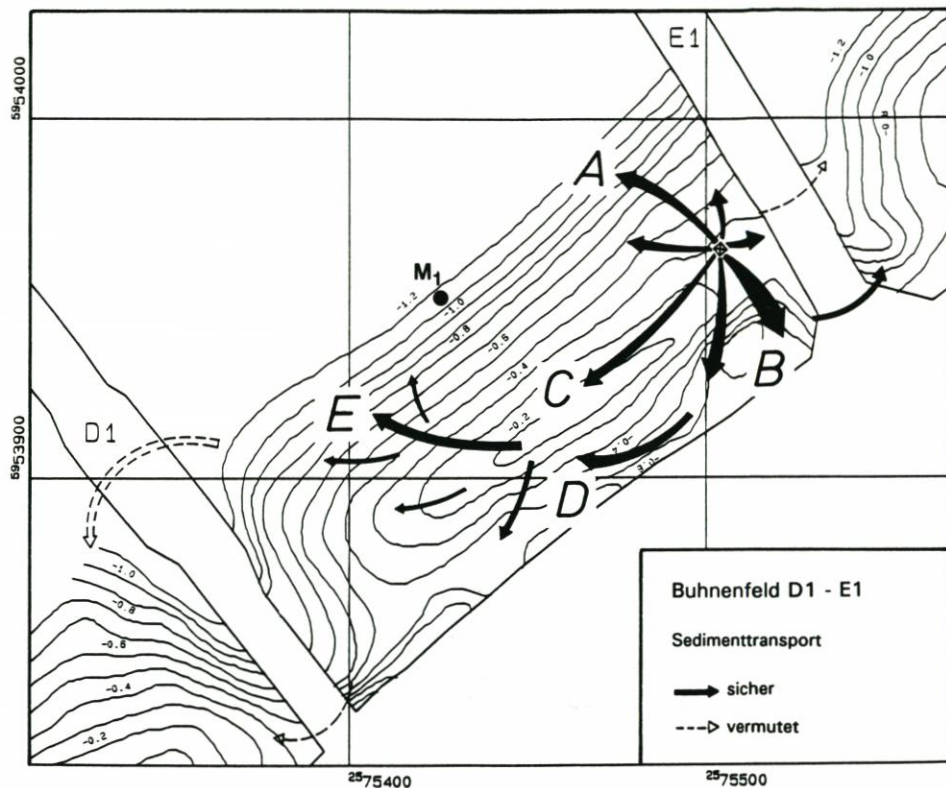


Abb. 13. Sedimenttransportmodell für das Buhnenfeld D₁-E₁, beruhend auf einem Luminophorenversuch (aus WESTHOFF, 1991, verändert)

4. Folgerungen

Entgegen der ursprünglichen Zielsetzung führte die Aufspülung zu einer Verfeinerung der Strandsedimente, weil kein ausreichend grobes Material eingespült werden konnte. Ein Korngrößenspektrum, wie es vor der Auffüllung bestanden hat, stellte sich als Folge der Auswaschung feiner Korngrößen nur langsam wieder ein. Nach einem Jahr war der ursprüngliche Zustand noch nicht wieder erreicht. In diesem Zeitraum ist eine beträchtliche Strandhöhenabnahme eingetreten. Die vom StAIK (1990) geäußerte Begründung, rauhe Herbstwetterlagen wären für diese starken Strandverluste verantwortlich, halten RAGUTSKI u. WESTHOFF (1990) für eher unwahrscheinlich, da im Zeitraum von der Aufspülung bis zum Jahresende nur wenige Tiden einen leicht erhöhten Wasserstand aufwiesen. Sie sehen vielmehr in dem zu feinkörnigen Aufspülmaterial die vermutliche Ursache für die starken Abnahmen der Strandhöhen.

Der Selektionsprozeß spielt eine wichtige Rolle, jedoch darf die Korngröße im Zusammenhang mit Strandaufspülungen nicht überinterpretiert werden. Selbst wenn das aufgespülte Material ein gröberes Korngrößenspektrum gehabt hätte, das dem natürlichen entspräche, wären Strandhöhenänderungen zu verzeichnen gewesen. Die herrschenden hydrodynamischen

sehen Randbedingungen bedingen nicht nur eine charakteristische Korngrößenverteilung, sondern auch eine charakteristische Morphologie.

Durch die Wahl eines bestimmten Aufspülprofils (insbesondere Höhenlage) und einer bestimmten Korngrößenzusammensetzung des Aufspülmaterials bestände die Möglichkeit, die Verlustmengen zu verringern. Die bisherige Auffüllmethode, die von einer Depotwirkung ausgeht und entsprechend hochgezogene Strandprofile erfordert, hat große Anfangsverluste zur Folge. Durch eine Minimierung der Strandhöhen in Kenntnis der maximalen Belastbarkeit der Inselschutzbauwerke würden sich die Verluste deutlich verringern lassen (KUNZ, 1991).

5. Schriftenverzeichnis

- AJBULATOV, N.: New investigations on the movement of sands along coasts. – Bull. Ocean. Com. U.S.S.R. 1; Moscow, 1957.
- AKKERMAN, M.: Bericht über die sedimentologischen Untersuchungen zur Frage der Umlagerungen des Sandes. – Jber. 1952, Forschungsstelle Norderney 4; Norderney, 1953.
- DECHEND, W. u. RICHTER, K.: Geologische Untersuchungen zur Frage der Materialumlagerungen im Norderneyer Seegat. – Arbeiten aus der Forschungsstelle Norderney Nr. 1; Norderney (unveröff.), 1953.
- FOLK, R. L. u. WARD, W. C.: Brazos river bar, a study in the significance of grain-size parameters. – J. Sed. Petrol. 27, 1957.
- GREENWOOD, B., HALE, P. B. u. MITTLER, P. R.: Sediment Flux Determination in the Nearshore Zone: Prototype Measurements. – Workshop on Instrumentation for Currents and Sediments in the nearshore Zone. Natl. Res. Council, Ottawa, 1979.
- GRIESEIER, H.: Verwendung von Luminophoren beim Studium der litoralen Materialbewegung. – Acta Hydrophy. 6 (1), Berlin, 1959.
- HOMEIER, H.: Die Auswirkungen schwerer Sturmzeiten auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. – Jber. 1975 Forschungsstelle f. Insel- u. Küstenschutz 27, Norderney, 1976.
- HOMEIER, H. u. KRAMER, J.: Verlagerung der Platen im Riffbogen vor Norderney und ihre Anlandung an den Strand. – Jber. 1956 Forschungsstelle Norderney 8, 1957.
- KRAMER, J.: Die Strandaufspülung Norderney (1951/52) und ein Plan zu ihrer Fortführung. – Die Küste, Jg. 7, 1958.
- KRAUSE, H. R.: Bericht über die Ergebnisse der Schilluntersuchungen im See- und Wattgebiet von Norderney und Juist. – Interner Bericht Forschungsstelle Norderney, Norderney (unveröff.), 1950.
- KUNZ, H.: History of seawalls and revetments on the island of Norderney. – Proc. Coastal Sediments '87, 1987.
- KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. – Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), New York (ASCE), 1991.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- KUNZ, H. u. STEPHAN, H.-J.: Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. Die Küste, H. 54, 1992.
- MÜLLER, C.-D., NACHTIGALL, K.-H., REINECK, H.-E., SEIBOLD, E. u. VOLBRECHT, K.: Der Knechtsand – Eine Untersuchung über Material und Materialtransport mit der Lumino-phorenmethode und anderen vergleichenden Methoden. – Jber. 1964 Forschungsstelle Norderney, 16, Norderney, 1965.
- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. – Jber. 1985 Forschungsstelle Küste, 38, Norderney, 1986.
- NIEMEYER, H. D.: Tidestrommessungen in Bühnenfeldern. – Jber. 1986 Forschungsstelle Küste, 38, Norderney, 1987.
- NIEMEYER, H. D.: Field measurements and analysis of wave induced nearshore currents. – Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), New York (ASCE), 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. Die Küste, H. 54, 1992.

- NUMMEDAL, D. u. PENLAND, S.: Sediment dispersal in Norderneyer Seegat, West Germany. – Spec. Publ. Int. Ass. Sedimentology 5, Oxford, 1981.
- RAGUTZKI, G. u. WESTHOFF, T.: Fünf Zwischenberichte zu den sedimentologischen Untersuchungen des Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und mariner Umwelt“. – Interner Bericht Forschungsstelle Küste, Norderney (unveröff.), 1987–1990.
- STAATLICHES AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ (StAIK): Strandmorphologische Veränderungen auf den ostfriesischen Inseln. – Jahresbericht 1989, Dienstbericht, Norden (unveröff.), 1990.
- VEENSTRA, H.J. u. WINKELMOLEN, A.M.: Size, shape and density around two barrier islands along the north coast of Holland. – Geol. Mijnb. 55 (1/2), s'Gravenhage, 1976.
- WESTHOFF, T.: Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney. – Diss. Univ. Münster, 1990.
- WESTHOFF, T.: Markierungsversuch mit Luminophorensanden zur Kennzeichnung des Sedimenttransportes in einem Bühnenfeld. – Interner Bericht Forschungsstelle Küste, Norderney (unveröff.), 1991.