

# Die Küste

ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE  
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY  
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST



3950-A-2012-00000050

# Die Küste

ARCHIV  
FÜR FORSCHUNG UND TECHNIK  
AN DER NORD- UND OSTSEE

ARCHIVE  
FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY  
ON THE NORTH SEA AND BALTIC COAST

HERAUSGEBER:  
KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN

Heft 54 – 1992

DRUCK UND KOMMISSIONSVERLAG:  
WESTHOLSTEINISCHE VERLAGSANSTALT BOYENS & CO. HEIDE I. HOLST.

ISSN 0452-7739  
ISBN 3-8042-0621-2

Anschriften der Verfasser dieses Heftes:

COLDEWEY, HANS-GERD, Dipl.-Ing., Gartenweg 12, 2984 Hage; EITNER, VOLKER, Dipl.-Geol., An der Mühle 5, 2982 Norderney; ERCHINGER, HEIE F., Dipl.-Ing., Heinrich-Heine-Str. 23, 290 Norden; HOLZ, KLAUS-PETER, Prof. Dr.-Ing., Löwenstr. 13, 3000 Hannover 1; KUNZ, HANS, Dr.-Ing., An der Mühle 5, 2982 Norderney; NIEMEYER, HANZ DIETER, Dipl.-Ing., Fledderweg 25, 2980 Norddeich; NÖTHEL, HERWIG, Dipl.-Ing., Ostwender Str. 8, 3000 Hannover 1; PÄTSCH, JOHANNES, Dipl.-Met., Hauptstr. 20, 2082 Heidgraben; RAGUTZKI, GÜNTHER, Dipl.-Ing., An der Mühle 5, 2982 Norderney; SCHMIDT, HEINER, Dipl.-Met., Treptowerstr. 140, 2000 Hamburg 73; STEPHAN, HANS-JOACHIM, Dr.-Ing., An der Mühle 5, 2982 Norderney; SUNDAR, VALLAM, Ass.Prof., D 11/6, 2nd Link Road I.I.T., Madras 600036, India; TILLMANN, BURKHARD, Dipl.-Ing., Glatzer Str. 2, 2943 Esens; WESTHOFF, THEO, Dr., An der Mühle 5, 2982 Norderney

---

Die Verfasser sind für den Inhalt der Aufsätze allein verantwortlich. Nachdruck aus dem Inhalt nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen.

Vorsitzender: Ministerialrat Gerhard Krause, Archivstr. 2, 3000 Hannover 1

Geschäftsführer: Dr.-Ing. HEINZ WISMER, Hindenburgufer 247, 2300 Kiel.

Schriftleiter: Dr.-Ing. HARALD GÖHREN, Dalmannstraße 1-3, 2000 Hamburg 11.

## Inhaltsverzeichnis

KUNZ, HANS, Dipl.-Ing. Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ . . . . .	1
KUNZ, HANS, Dr.-Ing. STEPHAN, HANS-JOACHIM, Dr.-Ing. Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Nor- derney . . . . .	23
NIEMEYER, HANS DIETER, Dipl.-Ing. Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen . . . . .	53
EITNER, VOLKER, Dipl.-Geol. RAGUTZKI, GÜNTHER, Dipl.-Ing. WESTHOFF, THEO, Dr. Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auf- füllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge . .	93
NÖTHEL, HERWIG, Dipl.-Ing. SUNDAR, VALLAM, Ass.Prof. HOLZ, KLAUS-PETER, Dr.-Ing. Statistische Analyse von Meßdaten aus einem Buhnenfeld . . . . .	111
SCHMIDT, HEINER, Dipl.-Met. PÄTSCH, JOHANNES, Dipl.-Met. Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen . . . . .	131
ERCHINGER, HEIE F., Dipl.-Ing. TILLMANN, BURKHARD, Dipl.-Ing. Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989 . . . . .	143
COLDEWEY, HANS-GERD, Dipl.-Ing. ERCHINGER, HEIE F., Dipl.-Ing. Deichvorland: Seine Entwicklung zwischen Ems und Jade und die Untersuchungen im Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ . . . . .	169

# Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungs- vorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“

Von Hans KUNZ

## Zusammenfassung

Der Westkopf der Insel Norderney wird durch Küstenbauwerke gegen die Einwirkungen des Meeres geschützt. Die Strände dieses Abschnitts sind durch die Natur nicht ausreichend mit Sand versorgt und weisen Erosionstendenzen auf. Seit Anfang der fünfziger Jahre wird daher ein Teil der Bühnenfelder von Zeit zu Zeit mit Seesand aufgespült, um die Bauwerke vor Zerstörungen durch Sturmfluten zu bewahren. Die Strandaufspülung des Jahres 1989 wurde als Versuchsstrandaufspülung ausgeführt und durch das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ begleitet. Das Vorhaben erstreckte sich auf die Jahre 1986 bis 1992; eine KFKI-Projektgruppe war ihm zugeordnet. Es wurde durch die Förderung des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT) ermöglicht.

Das Forschungsvorhaben setzt sich aus vier miteinander verkoppelten Teilvorhaben zusammen. In diesem Beitrag werden die Gliederung des Projektes dargestellt, die Forschungsziele angesprochen, Zusammenarbeiten aufgezeigt und auf Ergebnisse hingewiesen, ohne diese näher vorstellen oder bewerten zu wollen. Bereits vorliegende Berichte und Veröffentlichungen zu dem Forschungsvorhaben sind in einem Anhang zusammengestellt, der einen Überblick geben und den Zugang erleichtern soll.

## Summary

*The western spit of Norderney-island is protected against the impact of tides and waves by seawalls and groynes. The natural sand supply is not sufficient to prevent the beaches within the groyne-fields from erosion. In 1951/52 a first artificial beach nourishment was implemented to effect an active protection of the coastal structures against damage during storm flood events. The beach fill in 1989 had been combined with the interdisciplinary KFKI-research project „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. The project had been joined by a group of the „Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)“ and had been funded by the „Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT)“. The research work had been carried out from 1986 to 1992. This paper reviews the research project and provides a general description of the organisation, the targets, and results. An attached list of reports and publications facilitates the access to more detailed information on the research-project.*

## Inhalt

1. Veranlassung . . . . .	2
2. Organisation und Aufgabe des KFKI-Verbundforschungsvorhabens . . . . .	3
3. Strandvorspülungen und Küstenschutzwerke auf Norderney . . . . .	4
4. Zur Wahl des Standortes Norderney für das KFKI-Verbundforschungsvorhaben . . . . .	6
5. Forschungsfelder . . . . .	6
6. Forschungsaufgaben der Teilvorhaben/Teilprojekte . . . . .	9
7. Forschungsziele und deren Vernetzung zu Ergebnissen, Ausblick . . . . .	12
8. Schriftenverzeichnis . . . . .	15
Danksagung . . . . .	16

Anlage 1 . . . . .	16
Teilvorhaben/Teilprojekte des KFKI-Verbundforschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ mit Bezeichnung der ausführenden Stellen, Namen der wissenschaftlichen Leitung und Anschrift	
Anlage 2 . . . . .	17
Mitglieder der KFKI-Projektgruppe zum Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“	
Anlage 3 . . . . .	17
Berichte und Veröffentlichungen zum KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“	

## 1. Veranlassung

Sandige Küsten der Erde befinden sich im Abbruch. Als Folgen der als wahrscheinlich beurteilten Änderungen des Weltklimas durch den Menschen ist mit einer Vergrößerung der Abbruchtendenzen zu rechnen. Die Strandvorspülung hat sich weltweit als eine technische Methode bewährt, mit der erodierte Strände wieder aufgefüllt und Küstenrückgänge verhindert oder wenigstens verlangsamt werden können. In großem Maßstab wurde dieses Verfahren erstmals in Europa während der Jahre 1951/52 zur Sicherung der Küstenschutzwerke auf der ostfriesischen Düneninsel Norderney angewendet, wo seit Mitte des vorigen Jahrhunderts deren westlicher Teil mit aufwendigen Bauwerken (Strandmauern, Deckwerke, Bühnen) gegen Abbrüche gesichert worden war (KRAMER, 1958). Die Technik der Strandvorspülung (Strandaufspülung), auch als Strandauffüllung bezeichnet (AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE, 1977; 1981), stellte damals eine „weiche“, umweltschonende Alternative zu der sonst notwendig gewordenen erneuten Verstärkung der „soliden“ Bauwerke dar. Die Verhältnisse auf Norderney sind ein Beispiel für die an zahlreichen Küstenabschnitten vorhandene Situation, bei der den Abbrüchen als Folge der einwirkenden Naturkräfte nur durch ein „Kombiniertes System aus dauerhaften Küstenschutzwerken und regelmäßig zu wiederholenden Strandaufspülungen“ Einhalt geboten werden kann.

Seit dem Beginn der fünfziger Jahre erfolgten auch an anderen Abschnitten der deutschen Küste zahlreiche Strandaufspülungen. Inzwischen sind diejenigen zur Sicherung der nordfriesischen Insel Sylt, als Festlandsrest besonders abbruchgefährdet, die umfangreichsten geworden. Bis heute wurden an der deutschen Nordseeküste insgesamt etwa 25 Mio m<sup>3</sup> Meeressand vorgespült (DETTE et al., 1988, 1992). Dabei konnte man vielerorts Ziele des Insel- und Küstenschutzes mit Interessen des Tourismus verbinden.

Die mit Strandvorspülungen an der deutschen Nordseeküste gemachten Erfahrungen zeigten, daß man das Naturgeschehen noch nicht ausreichend kennt, um die Maßnahmen optimal planen und durchführen zu können. Dem sich damit ergebenden Bedarf nach praxisbezogener Forschung folgend, faßte das *Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)* den Beschluß, ein interdisziplinäres Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ durchzuführen. Die Umsetzung dieses Beschlusses in den Jahren 1986 bis 1992 wurde durch die Förderung des *Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT)* ermöglicht. Zum Vorhaben wurde eine „KFKI-Projektgruppe“ eingerichtet (Mitglieder: siehe Anlage 2), die es begleitete und die Verbindung zum KFKI gewährleistete.

## 2. Organisation und Aufgabe des KFKI-Verbundforschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ (im folgenden kurz: FV „Wechselwirkungen“) ist in Verbindung zu sehen mit dem KFKI-Forschungsvorhaben „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“. Beide Vorhaben befassen sich mit Problemen der Strandvorspülungen; sie ergänzen sich, und es findet eine Zusammenarbeit statt. Einige der Wissenschaftler wirken in beiden KFKI-Projektgruppen mit, wodurch der Wissensaustausch, die methodische Abstimmung und die rationelle Bearbeitung begünstigt wird.

Das interdisziplinäre Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen“ faßt die folgenden Teilvorhaben (TV) mit Teilprojekten (TP) zusammen (siehe auch Anl. 1):

1. TV „Naturuntersuchungen“ (Forschungsstelle Küste, Norderney) mit den folgenden Teilen:
  - 1.1 TP „Hydrographie“
  - 1.2 TP „Sedimentologie/Morphologie“
  - 1.3 Teilaufgabe „Schubspannungsmessungen“ (Prof. Gust, TU Hamburg-Harburg)
  - 1.4 TP „Meteorologische Untersuchungen“ (Seewetteramt des DWD, Hamburg)
2. TV „Versuchsorientierte Strandaufspülung“ (Staatliches Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden)
3. TV „Hydraulische Modelle, Dokumentationen“ (Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig)
4. TV „Mathematisches Modell“ (Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover)

Die zu untersuchenden Forschungsfelder sind in Kap.5 und die Forschungsaufgaben der Teilvorhaben/Teilprojekte sind in Kap.6 dargestellt.

Das FV „Wechselwirkungen“ dient dem Ziel, den Wissensstand über die in komplexer Wechselbeziehung zueinander stehenden hydrographischen, morphologischen und sedimentologischen Vorgänge an Sandküsten zu erweitern, darüber die Wechselwirkungen zwischen Strand und Küstenbauwerken besser zu verstehen und darauf aufbauend die Entwicklung von Berechnungsmodellen voranzutreiben. Aus den gewonnenen Erkenntnissen und Berechnungsergebnissen waren Grundsätze für eine Minimierung der Verluste aus Sandvorspülungen herzuleiten und mit Untersuchungen zu technischen Fragen der Sandgewinnung und Sandverspülung auf Stränden so zu verknüpfen, daß damit vertiefte Kenntnisse zur Minimierung der Kosten von Strandvorspülungen zu gewinnen sind.

Auf Abb.1 ist ausgewiesen, wie die internen thematischen Verknüpfungen der am KFKI-Verbundvorhaben „Wechselwirkungen“ beteiligten Fachdienststellen und Hochschulinstitute informell miteinander verkoppelt sind. Die Pfeile geben die gerichteten Informations- und Datenflüsse an.

Die aktive Zusammenarbeit der Teilvorhaben und ihrer Teilbereiche mit außenstehenden Institutionen und Forschungsvorhaben gibt Abb.2 wieder. In die Darstellung wurde eine Zusammenarbeit aufgenommen, wenn diese institutionalisiert war, wenn sie gemeinsame Meßeinsätze in erheblichem Umfang aufwies oder wenn größere Datenmengen bzw. Ergebnisse in das Verbundvorhaben einfließen. Die Kooperation mit dem thematisch verwandten KFKI-Vorhaben „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ ist einzeln ausgewiesen.

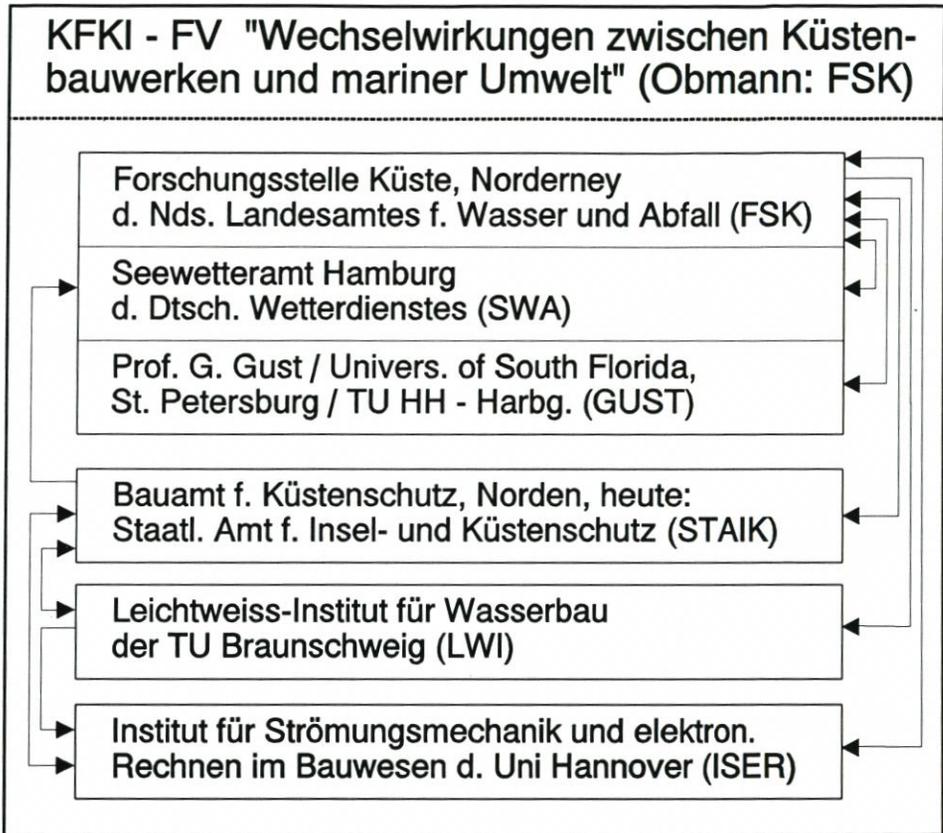


Abb. 1. Am KFKI-FV „Wechselwirkungen“ beteiligte Fachbehörden und Hochschulen und deren interne informelle Verkoppelung (Richtungspfeile)

### 3. Strandvorspülungen und Küstenschutzwerke auf Norderney

Mit Strandvorspülungen sind die großräumigen Ursachen für Strandabbrüche nicht zu beeinflussen und ist die natürliche Sandzuwanderung nicht zu vermehren: der Sand wird wieder abgetragen, so daß Vorspülungen in gewissen Zeitabständen wiederholt werden müssen. Sie sind somit wie Unterhaltungsmaßnahmen anzusehen, die ständige Aufwendungen erfordern, solange das jeweils vorgegebene Ziel aufrechterhalten wird.

Die für eine Strandaufspülung zu wählende Methode hängt wesentlich von dem Ziel und den örtlichen Gegebenheiten ab. Prinzipiell zu unterscheiden sind:

- Die Wiederherstellung (Restauration) eines erodierten Strandes in einen Zustand, der die gewünschte Nutzung ermöglicht.
- Sicherung von Randdünen/Kliffs gegen Erosionen durch Sturmfluteinwirkungen mit hochgelegem Sanddepot.
- Schutz von Küstenbauwerken gegen Zerstörungen während Sturmfluten durch die Gewährleistung von ausreichenden Strandprofilen.

Auf Norderney dienen die Strandvorspülungen der Sicherung der Küstenschutzwerke; sie

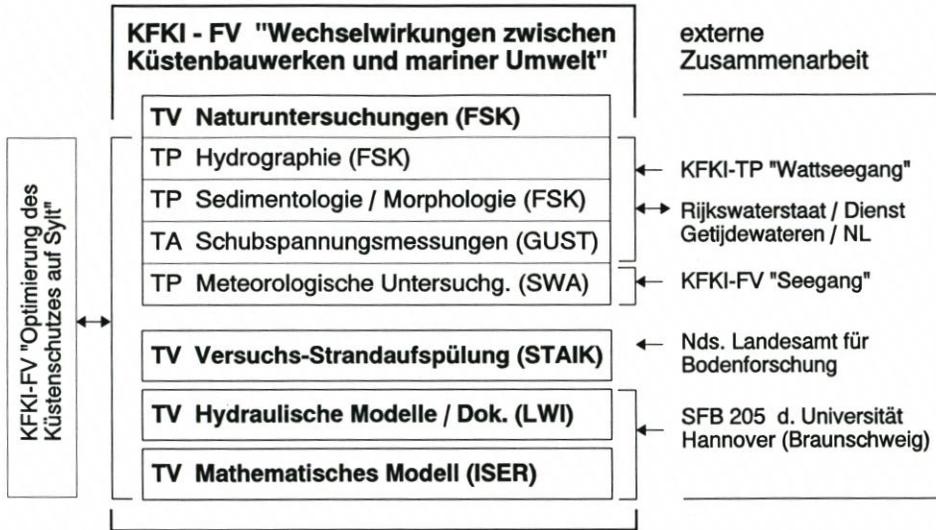


Abb. 2. Teilvorhaben (Teilprojekte, Teilaufgaben) des KFKI-FV „Wechselwirkungen“ und deren Zusammenarbeit mit externen Vorhaben und Institutionen

sind somit dem letztgenannten der unterschiedenen Ziele zuzuordnen. Das sechs Kilometer lange Schutzwerk, das seit Mitte des vorigen Jahrhunderts zur Sicherung des Westkopfes der Insel Norderney errichtet wurde, besteht aus den folgenden Bestandteilen:

### 1. Längswerke

Dünen- bzw. Uferschutzwerke, die den an die See angrenzenden Inselbereich gegen Abbrüche bei höheren Wasserständen (Sturmfluten) schützen.

### 2. Querwerke (Buhnen)

2.1 Strombuhnen zum Abweisen der starken Tidenströmungen des Seegats vom Inselsockel (Verhinderung einer Ostverlagerung der tiefen Rinne des Norderneyer Seegats),

2.2 Strandbuhnen zur Verminderung von Längsströmungen (Stabilisierung von Strandabschnitten).

### 3. Strandvorspülungen

Auffüllen von Bühnenfeldern mit Seesand im Bereich großer Seegangbelastungen und negativer Sandbilanzen (Schutz vor Unterspülungen der Fußsicherungen von Bühnen- und Längswerken).

Die Ursachen für die Abbruchserscheinungen im Westteil Norderneys sind, insbesondere aufgrund der langjährigen Naturuntersuchungen der Forschungsstelle Küste, grundsätzlich bekannt. Wesentliche Wirkungen gehen von Tide- und Seegang sowie vom Sandtransportgeschehen aus. Über die Schutzwerke selbst gibt es ein umfangreiches Schrifttum; eine neuere Zusammenfassung unter Einbeziehung der Strandvorspülungen wurde von KUNZ (1987) veröffentlicht. Der Ausbau des Schutzsystems ist im Zusammenhang mit der parallel laufenden Entwicklung des Seebades Norderney zu sehen.

Das kombinierte Längswerk-Buhnen-Schutzsystem war bis jetzt in der Lage, Dünenabbrüche und Verluste des Inselsockels zu verhindern; es vermochte aber nicht die Rückgänge des Strandes als Folge der natürlichen Unterversorgung (negative Sandbilanz) im Zusammenhang mit den Krafteinwirkungen (insbesondere Seegang) aufzuhalten. Die Methode der Strandauffüllung, seit 1951/52 als Alternative gegenüber einer Fortführung der bisherigen

Technik „Verstärkung der Bühnen und Längswerke“ angewendet, hat bisher im jährlichen Mittel 85 000 m<sup>3</sup> Sand erfordert, um die gewünschten Strandlagen in den Bühnenfeldern zu gewährleisten. Dazu wurden bislang insgesamt sieben Aufspülungen ausgeführt (TILLMANN/ ERCHINGER, 1992).

#### 4. Zur Wahl des Standortes Norderney für das KFKI-Verbundforschungsvorhaben

Das KFKI-FV „Wechselwirkungen“ nutzt die auf Norderney gegebenen Möglichkeiten, um allgemeingültige Aussagen zur aktuellen Thematik „Strandvorspülungen“ und „Wechselwirkungen“ zu gewinnen. Der Standort Norderney bietet dafür günstige Voraussetzungen:

Die Versuchsstrandaufspülung kann mit Maßnahmen des Küstenschutzes so verbunden werden, daß den Ansprüchen des Forschungsvorhabens an deren Ausführung und Gestaltung weitgehend zu entsprechen ist. Für die Planung und Ausführung der Strandvorspülung sowie für Untersuchungen des „Aufspülkörpers“ steht mit dem Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz (StAIK) in Norden eine ortsnahe, praxiserfahrene Dienststelle zur Verfügung.

Auf Norderney ist die Forschungsstelle Küste (FSK) ansässig, eine Außenstelle des Niedersächsischen Landesamtes für Wasser und Abfall (seit 01. 10. 1992: des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie). Sie verfügt über die technischen Infrastrukturen, das Fachpersonal und die Erfahrungen, um Datenerfassung und Auswertung für Untersuchungen zur Hydrographie, Morphologie, Sedimentologie zu übernehmen.

Die rund um den Westkopf von Norderney ausgebauten Inselchutzwerke bieten gute Voraussetzungen für Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen hydrodynamisch-morphologischen Parametern und den Bauwerken (Strandmauer, Bühnen), die drei weitgehend „geschlossene Ränder“ bilden.

Die vielfältig zu bestückenden „Meßfelder“ sind gut erreichbar und zu versorgen. Dies ermöglicht den Betrieb von hochauflösenden Meßeinrichtungen und begünstigt die zeitgleiche Ausführung interdisziplinärer Meßkampagnen.

Im Bereich des Norderneyer Westkopfes betreibt die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung einen eingestuften Tidepegel, dessen Wasserstandsdaten den Meßfeldern zuzuordnen sind. Der Deutsche Wetterdienst hat auf Norderney eine Wetterstation; von einer benachbarten Wattenmeerstation der Forschungsstelle Küste stehen ebenfalls fortlaufend meteorologische Daten zur Verfügung. Zudem sind die infrastrukturellen Voraussetzungen für die Errichtung und den Betrieb eines meteorologischen Ergänzungsmessnetzes günstig.

Die Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen des Standortes Norderney auf andere Gebiete kann gewährleistet werden.

#### 5. Forschungsfelder

##### a) Ermittlung der von See her bestimmten natürlichen Einflußgrößen

Auf die durch Strandvorspülungen künstlich versorgten Küsten/Inselabschnitte wirken die von der Nordsee her bestimmten Tide- und Seegangsrößen ein. Um deren Ausprägung an der seeseitigen Begrenzung des „offenen Randes des Untersuchungsgebietes“ (sogenannte „Bühnenstreichlinie“) durch ein mathematisches Modell beschreiben zu können, müssen Tide und Seegang im Bereich des tiefen Wassers vor der Küste bekannt sein. Die Berechnung des

Seegangs kann über die dort maßgebenden Windgrößen erfolgen. Vom Seewetteramt (TP 1.4) wurde ein allgemein verwendbares Verfahren entwickelt, mit dem – ausgehend von Meßstationen auf Land (Metznetz für FV) – der maßgebende Wind vor der Küste zu berechnen ist (SCHMIDT/PÄTSCH, 1992). Tidewasserstände und Wellenhöhen am „offenen Rand des Aufspülbereiches“ (Bühnenstreichlinie) wurden im TV 4 über numerische Modelle ermittelt (HOLZ/NÖTHEL, 1992).

#### b) Untersuchungen zur „Physik der Prozesse“ im aufgespülten Strandabschnitt

Zentraler Bestandteil der Naturuntersuchungen waren die in drei Bühnenfeldern eingerichteten hydrographischen Meßsysteme zur Erfassung des Tide- und Seegangsgeschehens sowie der dadurch verursachten Strömungen. Die Aufzeichnung und Analyse der mit hoher zeitlicher Auflösung erhobenen Daten (TP 1.1) ermöglichte eine realistische Wiedergabe und Deutung hochfrequenter Vorgänge in der Brandungszone bis hin zu Turbulenzstrukturen der von Seegang und Brandung verursachten Strömungen (NIEMEYER, 1991). Die Strömungen transportieren das Sandmaterial im sohnahen Bereich. Die diese Vorgänge verursachenden Schubspannungen konnten durch den Einsatz von Prototypen einer fortgeschrittenen Meßtechnik erstmals in der Natur gemessen werden (TA 1.3); Strömungsgeschwindigkeiten und Sandbewegungen wurden synchron erfaßt (Yu et al., 1991). Die Umlagerungsvorgänge im gesamten Meßfeld waren darzustellen durch tachymetrische Aufnahmen, Grenzwertanzeiger sowie Luminophoren-Untersuchungen (EITNER et al., 1992). Ein erheblicher Anteil des Sandes wird infolge des Zusammenwirkens von Turbulenz und Strömung als Schwebstoff (Suspension) bewegt. Zur Beschreibung dieser Vorgänge wurden Ergebnisse von Modellversuchen ausgewertet, die man im Großen Wellenkanal in Hannover (Sonderforschungsbereich „Küsteningenieurwesen“ – SFB 205) gewonnen hatte (DETTE/ULICZKA, 1989). Mit den Sandumlagerungen verändert sich die Zusammensetzung des Sedimentes. Dies konnte durch zugeordnete kleinskalige Sedimentanalysen, einschließlich Schwermineralbestimmungen, untersucht und gedeutet werden (WESTHOFF, 1990). Die Auswertungen, mit denen alle erfaßten Parameter miteinander verknüpft wurden, erweitern den Wissensstand über die komplexen Vorgänge von Sandbewegungen, auch solchen, die durch Wechselwirkungen mit Bauwerken beeinflusst sind. Dies ermöglicht Verbesserungen der Parametrisierungen, die in mathematischen Modellen zu den jeweils nachgebildeten Prozessen enthalten sind.

#### c) Untersuchungen zum Materialaustausch zwischen aufgespülten Strandbereichen und dem marinen Umfeld

Die zeitliche Veränderung resultierender Sandmengen im Aufspülbereich und den benachbarten Strandabschnitten sowie der damit einhergehenden Strandprofiländerungen wurde im TV 2 auf der Grundlage terrestrischer Vermessungen und Peilungen untersucht (KOTZBAUER, 1990; TILLMANN/ERCHINGER, 1992). Durch morphologische Untersuchungen (TP 1.2) konnten Sandtransporte analysiert und durch die Einbindung hydrographischer sowie sedimentologischer Untersuchungsergebnisse gedeutet werden (KUNZ, 1991a, 1991b; KUNZ/STEPHAN, 1992). Sedimentologische Analysen der Bühnenbereiche und des großräumig zugeordneten marinen Umfeldes (TP 1.2) erfaßten die morphologisch-hydrographischen Wechselwirkungen und trugen zu deren Deutung bei (EITNER et al., 1992). Die Einbeziehung

der hydrographischen Messungen im Rahmen dieses Projektes in Verbindung mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen der Forschungsstelle Küste zu Tideströmungen und Seegang in Bühnefeldern und dem großräumigen marinen Umfeld (NIEMEYER, 1987, 1991, 1992) ermöglichte Deutungen und Rückschlüsse auf den längs- und quengerichteten Sandtransport einschließlich der natürlichen Erosions- und Regenerations-Vorgänge (TP 1.1, TP 1.2).

d) Parametrisierungen und mathematische Modelle  
für Strömungen und Sandbewegungen von sandigen  
Strandabschnitten mit Küstenschutzwerken

Die Meßdaten, die die hochfrequenten Naturvorgänge (Seegang, Strömung) beschreiben, müssen parametrisiert werden, bevor man sie dann in mathematischen Modellen verwenden kann. Dies erforderte umfangreiche und grundlegende Untersuchungen (TP 1.1, TV 4). Die Kenntnisse wurden erweitert, konnten aber noch nicht in vollem Umfang modelltechnisch umgesetzt werden, weil man die zugrundeliegenden Naturprozesse noch nicht hinreichend versteht, folglich auch nicht als Nachbildung der Physik vollständig modellieren kann. Die im TP 1.1 hochfrequent erfaßten Naturvorgänge wurden im TV 4 mit Verfahren der Statistik zu Mittelwerten (Tide, Seegang, Geschwindigkeiten) von längeren Zeitspannen vereinfacht (NÖTHEL et al., 1992). Die Tidedynamik und die sich dadurch ergebenden Wasserstände und Strömungsverhältnisse konnten über eine Modellfamilie (Nordsee/Deutsche Bucht/Norderney) gut simuliert werden. Eine befriedigende Übereinstimmung zwischen physikalischem und mathematischem Modell wurde ebenfalls bei der kleinräumigen Modellierung der durch monochromatische Wellen verursachten Wirkungen erreicht (als Eingabedaten zu Wellen und Strömungen wurden die Ergebnisse der hydraulischen Modellversuche mit fester Sohle (TV 3) verwendet). Das durch Brandung des natürlichen Seegangs im Bühnfeld erzeugte Geschehen konnte noch nicht durch ein mathematisches Modell dargestellt werden. Für die sedimentologischen Untersuchungen wurden zwei Transportmodelle entwickelt; die Berechnungen mußten auf eine großräumige Anwendung „ingenieurpraktisch erprobter“ Formeln ohne Berücksichtigung der Wirkungen des Seegangs beschränkt bleiben (HOLZ/NÖTHEL, 1992).

e) Untersuchungen zur Gestaltung des Aufspülkörpers  
einschließlich stützender Verwaltung

Die Untersuchungen zur Gestaltung des Aufspülkörpers im TV 2 konnten auf umfangreiche Vermessungsdaten des Strandes und Vorstrandes seit 1951 gestützt werden; sie ergaben Empfehlungen zu Gestaltungsgrundsätzen, sowohl für Strandneigungen als auch für Höhenlagen der Profile (TILLMANN/ERCHINGER, 1992; ERCHINGER, 1991). Die Analyse der zeitlichen Entwicklungen von Strandprofilen nach der Versuchsaufspülung (April 1989) führte zu Empfehlungen zur Gestaltung eines Aufspülkörpers mit Strandneigungen, die sich an natürlichen Profilen orientieren (LAUE/ERCHINGER, 1990). Morphologische Untersuchungen zum längerfristigen Verhalten der Strände im Anschluß an die anfängliche Umformungsphase (Aufspülkörper hat sich durch die natürliche Kraftentfaltung in einen an die örtlichen Randbedingungen angepaßten „Ausgangszustand“ umgestaltet), ergaben funktionale Abhängigkeiten, die auch den Einfluß der Bühnen mit erfaßten. Die Einbeziehung von Ergebnissen der hydrographischen und der sedimentologischen Untersuchungen ermöglichte ursächliche Deutungen, den Nachweis der hydrodynamischen Wirksamkeit von Strandbühnen und die

Herleitung von Grundsätzen zur Minimierung von Sandverlusten (KUNZ, 1991; KUNZ/STEPHAN, 1992; NIEMEYER, 1992). Die hydraulischen Modellversuche (TV 3) bestätigten, daß man mit stationären Strömungszuständen die komplizierten Naturverhältnisse in den Bühnenfeldern nicht ausreichend gut darzustellen vermag (FÜHRBÖTER et al., 1988); diese Einschätzung wird durch die Ergebnisse der Naturmessungen bekräftigt. Die Ergebnisse der Modelluntersuchungen wurden als Eingabedaten für die mathematischen Modellstudien mit monochromatischen Wellen verwendet (TV 4).

#### f) Untersuchungen zur Technik der Sandentnahme, des Transportes und der Aufspülung

Im Zusammenhang mit der Versuchsstrandaufspülung 1989 wurden am Beispiel der Norderney-Verhältnisse im TV 2 umfangreiche Untersuchungen zur Frage der Erkundung von geeigneten Sandvorkommen (STREIF, 1988) und zu technischen Möglichkeiten der Entnahme, des Transportes und des Einbaus (Spülleitungen, Hopper) ausgeführt (Teilberichte Nr. 1 bis 6 des STAIK u. TILLMANN/ERCHINGER, 1992). Die gewonnenen Erkenntnisse sind zum Teil standortspezifisch; viele davon lassen sich jedoch übertragen. In Verbindung mit den Ergebnissen aus Untersuchungen zu den Sandverlusten des Aufspülkörpers (während des anfänglichen Umformungsvorgangs und während der dann nachfolgenden Zeit) wurden Grundsätze für eine Kostenminimierung abgeleitet. Dies führte auch zum Wunsch nach technischen Lösungen, mit denen wiederholt kleine Sandmengen kostengünstig aufzuspülen sind (TP 1.2, TV 2).

#### g) Dokumentation zu Strandvorspülungen, Untersuchungen zu besonderen Einzelproblemen

Im Rahmen dieses Vorhabens (TV 3) wird eine umfassende Dokumentation über alle bislang in Deutschland ausgeführten Strandvorspülungen erstellt (DETTE et al., 1988, 1992). Seegangsdaten liegen, wenn überhaupt, stets lückenhaft vor. Mit Daten aus dem Sylter KFKI-Vorhaben (Franzius-Institut der Universität Hannover) wurde im TV 3 ein Berechnungsverfahren kalibriert und angewendet, mit dem man lückenlose Zeitreihen erzeugen kann (DETTE et al., 1991). Die grundsätzliche Eignung und Aussagefähigkeit eines Energieflußansatzes als praktisches Verfahren zur Beurteilung der Wirksamkeit von Sandvorspülungen wurde im TV 3 mit der für die Insel Sylt berechneten kontinuierlichen Zeitreihe von Seegangsdaten dargestellt (DETTE et al., 1991). Der durch Wind verursachte Sandflug (äolischer Sandtransport) kann immer dann zu größeren Verlusten (und Problemen für Mensch und Natur) führen, wenn große Flächenanteile des Strandes trocken liegen (SCHMIDT, 1988). Aufgrund von Naturmessungen wurde im TV 2 die Eignung von Berechnungsformeln für die Größe des äolischen Sandtransports überprüft (TILLMANN/ERCHINGER, 1992).

### 6. Forschungsaufgaben der Teilvorhaben/Teilprojekte

Die von den Teilvorhaben/Teilprojekten des KFKI-Verbundforschungsvorhabens „Wechselwirkungen“ ausgeführten Untersuchungen lassen sich im wesentlichen den folgenden Fragestellungen zuordnen (detailliertere Angaben sind den in der Anlage 3 zusammengestellten Berichten und Veröffentlichungen zu entnehmen):

## 1. Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“

### 1.1 Teilprojekt „Hydrographie“ (Forschungsstelle Küste)

Einrichtung und Betrieb von drei hydrographischen Meßfeldern (Hauptfeld, 2 Nebenfelder) zur Erfassung der Wasserstände und des Seegangs sowie der Strömungsgeschwindigkeiten mit hoher zeitlicher Auflösung (etwa 12 Hertz) mit der Möglichkeit quasi-kontinuierlicher, DV-gestützter Aufzeichnung.

Analyse und Bewertung der Gesamtwirkung der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen unter verschiedenen hydrographischen Bedingungen (Sturmflut, Dünung usw.).

Darstellung von Richtungsspektren der Energiedichte.

Naturmessungen der Sandkonzentrationen im Grenzschichtbereich (in Zusammenarbeit mit Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren, Niederlande) und Analyse seegangsbedingter Erosions- und Regenerationsvorgänge.

Untersuchungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit von Bühnen.

### 1.2 Teilprojekt „Sedimentologie/Morphologie“ (Forschungsstelle Küste)

Darstellung eines Gesamtbildes von Strand und Vorstrand des Bereichs westlich von Norderney einschließlich des Riffbogens durch sedimentologische Kenngrößen.

Sedimentologische Untersuchungen des Aufspülkörpers und der Bereiche, die durch dessen Umlagerung beeinflusst sind.

Schwermineralbestimmungen zur Untersuchung von Sandumlagerungen (längs und quer zum Strand gerichtet).

Analyse der räumlichen und zeitlichen Verteilungen der sedimentologischen Kenngrößen im Hinblick auf langfristige großräumige und kurzfristige kleinräumige (Aufspülbereich) Umlagerungen unter Berücksichtigung der Wechselbeziehungen zu den hydrographischen und morphologischen Gegebenheiten.

Untersuchungen zu kleinräumigen und kurzzeitigen Sedimentumlagerungsintensitäten.

Tracer-Untersuchungen zum Sandtransportgeschehen.

Volumetrische Analysen von allen bisherigen Strandaufspülungen auf Norderney zur Beschreibung und Deutung des morphologischen Naturgeschehens in dem von den Vorspülungen beeinflussten Inselbereich.

Vorschläge zur Minimierung der Sandverlusten aus bereits primär umgelagerten Aufspülkörpern (Ausgangszustand nach anfänglicher Umformung in den auf die natürlichen Gegebenheiten angepaßten Zustand).

### 1.3 Teilaufgabe „Schubspannungsmessungen im Strandbereich“ (Prof. G. Gust, University of St. Petersburg, USA/TU HH-Harburg in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle Küste)

Entwicklung von Sonden- und Meßsystemen, mit denen innerhalb der Brandungs- und Swash-Zone sandiger Strände sowohl Geschwindigkeiten in unmittelbarer Bodennähe (Höhe < 10 cm) als auch Bodenschubspannungen gemessen werden können.

Einsatz von Prototypen in Meßkampagnen, die gemeinsam mit der FSK durchgeführt werden. Räumlich und zeitlich hochauflösende Erfassung der hydrodynamischen Vorgänge im Grenzschichtbereich „Boden - Wasser“.

Untersuchungen zur Darstellung des hochfrequenten bodennahen Sedimenttransportes und dessen Berücksichtigung bei der Erfassung der Bodenschubspannungen.

#### 1.4 Teilprojekt „Meteorologie“ (Seewetteramt des DWD, Hamburg)

Entwicklung einer Methode zur Berechnung des „Windes auf See“ über eine Korrektur der landgeschützten (vom Land selbst beeinflussten) Windmessungen.

Aufbau und Betrieb (zusammen mit der FSK) eines meteorologischen Meßsystems im Westteil der Insel Norderney unter Einbeziehung bestehender Stationen.

Anpassung des MKW/SWA-Modells (SCHMIDT/PÄTSCH, 1992) auf die besonderen Verhältnisse Norderneys und Optimierung des Modellverhaltens im Fernfeld (Vergleich mit GESIMA der GKSS) sowie im Nahfeld (Windmessungen auf Norderney).

Ableitung der Übertragungsfaktoren (richtungsabhängig) zur Berechnung der Windverhältnisse auf der „freien See“ (fiktiver Bereich etwa 4–10 km nördlich Norderney) ausgehend von Landmeßstellen.

Berechnung raumdeckender Mittelwerte des Windes für den Westteil der Insel Norderney als Anwendungsbeispiel für das meteorologische Modell.

#### 2. Teilvorhaben „Versuchsorientierte Strandaufspülung“ (Staatliches Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden)

Auswertung der bisher auf Norderney ausgeführten fünf Strandaufspülungen im Hinblick auf die Planung der versuchsorientierten Aufspülung in 1989.

Untersuchungen zur Umgestaltung aufgespülter Profile in einen den örtlichen Gegebenheiten angepaßten Zustand („Ausgleichsprofil“), insbesondere für die versuchsorientierte Strandaufspülung von 1989.

Berechnung der Nullpunkte und Neigungen von „Ausgleichsprofilen“ und deren Annäherung durch lineare Funktionen.

Anwendung der Erkenntnisse zu den Ausgleichsprofilen auf die räumliche Gestaltung der „Versuchsorientierten Aufspülung“.

Voruntersuchungen zur Sandentnahme und Bauausführung.

Auswertung der Bauausführung mit Saugbagger und Hopperbagger – Direktverspülung.

Untersuchungen zum äolischen Sandtransport.

#### 3. Teilvorhaben „Hydraulische Modelle, Dokumentation“ (Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Braunschweig)

Erfassung, Analyse und Dokumentation von ausgeführten Sandvorspülungen an der deutschen Nordseeküste.

Modelluntersuchungen zu Strömungen in einem Bühnenfeld (Norderney), verursacht durch die Wirkung monochromatischer Wellen (Physikalisches Modell: Längen/Höhen 1:50, feste Sohle mit Neigung 1:30).

Experimentelle Untersuchungen im physikalischen Modell zur Wirksamkeit von baulichen Maßnahmen als Stabilisatoren von Strandaufspülungen (u. a. Verlängerung der Verweilzeit des Sandes im Vorspülbereich).

Umsetzen von naturmaßstäblichen Grundlagenuntersuchungen im GROSSEN WELLENKANAL (Teilprojekt des SFB 205 „Küsteningenieurwesen“ an der Universität Hannover) auf anwendungsorientierte Aufgabenstellungen beim Küstenschutz (u. a. Geometrie von Sandvorspülungen, Dünen- und Stranderosion, Küstenlängs- und Küstenquertransport).

Korrelationsberechnungen zur Erstellung einer mehrjährigen Zeitreihe von Seegangsdaten aus lückenhaften Messungen.

Methodische Ansätze zur Beurteilung der Wirksamkeit von Sandvorspülungen (Beweissicherung, Erfolgskontrollen).

Hinweis: die drei letztgenannten Schwerpunkte wurden in Verbindung mit dem ebenfalls mit Mitteln des BMFT geförderten KFKI-Forschungsvorhabens „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt – Phase I“ sowie eines Teilprojektes des Sonderforschungsbereichs 205 an der Universität Hannover bearbeitet.

#### 4. Teilvorhaben „Mathematisches Modell“ (Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Hannover)

Numerische Simulation des mittleren Tidegeschehens im westlichen Bereich um Norderney (Submodell Norderney) zur Ermittlung der Randwerte (Wasserstände, Durchflüsse) für die „Buhnenstreichlinie“.

Entwicklung eines Wellenmodells unter Einschluß der Effekte von Shoaling, Diffraktion, Refraktion, Brechen zur Ermittlung von Wasserständen und brandungsinduzierten Strömungen und Anwendung auf monochromatische Wellen sowie Verifikation mittels Ergebnissen der hydraulischen Modelluntersuchungen des Leichtweiß-Instituts (wellenerzeugte Strömungen in einem Bühnenfeld).

Prinzipstudie (Mehrschichtenmodell) zur Überlagerung von Wind-, Tide- und Welleneinflüssen.

Prinzipstudien zu Sedimentation und Erosion. Entwicklung eines „Tracer-Modells“ (unter Einschluß zeitlich verzögerter Absetzvorgänge) und dessen Anwendung auf den westlichen Bereich vor Norderney mittels „ingenieurpraktisch erprobter Sedimenttransportformeln“.

Statistische Analyse von Naturmeßdaten (im Bühnen-Hauptmeßfeld (D1-E1) von der FSK erhoben) mit dem Ziel, Informationen zur Steuerung und Verifikation der numerischen Modelle zu erhalten (Parametrisierung zu Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit, Wellenaufrichtung).

#### 7. Forschungsziele und deren Vernetzung zu Ergebnissen, Ausblick

Die in Kap. 5 und 6 beschriebenen Untersuchungen sind als Diagramme in den Abb. 3 und 4 so verknüpft worden, daß die Zuordnung zu den übergeordneten Forschungsfeldern erkennbar wird.

In Abb. 3 steht die Erweiterung unserer Kenntnisse zur „Physik der Prozesse“ im



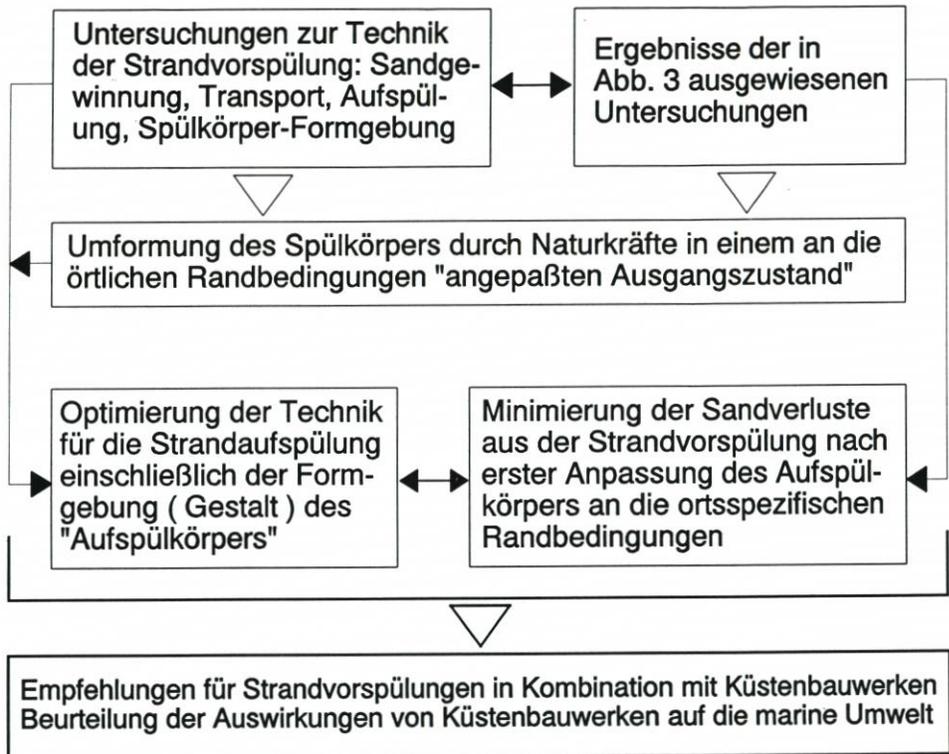


Abb. 4. Diagramm zur Einbindung der Untersuchungen zur Technik der Strandvorspülungen einschließlich anfänglicher Umformungen des Aufspülkörpers in das Gesamtvorhaben „Wechselwirkungen“

Buhnen-Deckwerks-Systemen“, das wiederum in erheblichem Umfang durch den BMFT gefördert wird, sind noch nicht beantwortete Fragen weiter zu untersuchen. Bei der dazu im Frühsommer 1992 im Rahmen des niedersächsischen Küstenschutzprogramms auf Norderney ausgeführten Versuchsstrandvorspülung konnten bereits Ergebnisse aus dem hier beschriebenen Forschungsvorhaben praktisch umgesetzt werden. Bei der EG ist für MAST-2 (Marine and Science Technology) das Vorhaben „NOURTEC“ (Innovative Nourishment Techniques Evaluation) beantragt worden (Niederlande, Dänemark, Deutschland). Durch die Beteiligung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) und der Forschungsstelle Küste, Norderney (FSK) wird im Falle einer Bewilligung des Antrages die Verbindung mit den laufenden KFKI-Forschungsvorhaben gewährleistet.

Sollten die erwarteten Änderungen des Weltklimas eintreten, dann müssen wir uns auf weitere Rückgänge der Strände und zunehmende Küstenabbrüche einstellen. An vielen Abschnitten der Nordseeküste Deutschlands, die großen Kräfteinwirkungen des Meeres (Tide und Seegang) ausgesetzt sind, werden auch zukünftig massive Bauwerke ein unverzichtbarer Bestandteil des Schutzsystems immer dort sein, wo gesellschaftlicher Konsens darüber besteht, daß Abbrüche (Strand- oder Landverluste) nicht hingenommen werden sollen. Eine Kombination von Küstenbauwerken und zu wiederholende Strandvorspülungen können dann kostengünstige, die Umwelt weniger beeinträchtigende technische Lösungen ermöglichen. Die Bedeutung von Strandvorspülungen, insbesondere auch in Verbindung mit massiven Küstenbauwerken, wird daher in Zukunft vermutlich noch zunehmen.

Hinweis: Die Ergebnisse des KFKI-Verbundforschungsvorhabens „Wechselwirkungen“ sind in Forschungsberichten und bereits auch in zahlreichen Veröffentlichungen mitgeteilt worden (siehe Anl. 3).

## 8. Schriftenverzeichnis

- AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE der HTG und DGEG: Empfehlungen für Strandauffüllungen als Küstenschutz. Naßbaggerberichte Bd. 5, 1977 und Die Küste, H. 36, 1981.
- DETTE, H. H., SCHULZE, M. u. LAUE, M.: Zur Dokumentation von Sandvorspülungen – Stand April 1988. Bericht Nr. 660 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig (unveröffentl.), 1988.
- DETTE, H. H. u. ULICZKA, K.: Rechnerische Abschätzung des Diffusionskoeffizienten aus Suspensionsmessungen im Großen Wellenkanal. Bericht Nr. 676 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig (unveröffentl.), 1989.
- DETTE, H. H., NEWE, J. u. SPINGAT, F.: Zur Erstellung einer mehrjährigen Zeitreihe von Segangsdaten aus Messungen und Korrelationsberechnungen. Bericht Nr. 711 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig (unveröffentl.), 1991.
- DETTE, H. H., SCHULZE, M. u. LAUE, M.: Sedimentologische Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt. Schlußbericht Teil „Sedimentologie“ des TV „Naturuntersuchungen“; Forschungsstelle Küste, Norderney (unveröffentl.), 1992.
- 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. F.: Beach Replenishment in consideration of natural processes and profiles. Proc. Conference of River and Coastal Engineers, Loughborough University, MAFF, 1991.
- ERCHINGER, H. F. u. TILLMANN, B.: Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste, H. 54, 1992.
- FÜHRBÖTER, A., DETTE, H. H. u. SCHULZ, K. P.: Modelluntersuchungen zu wellenerzeugten Strömungen in einem Bühnenfeld. Bericht Nr. 679 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig (unveröffentl.), 1988.
- HOLZ, K. P. u. NÖTHEL, H.: Abschlußbericht zum Teilvorhaben „Mathematische Modelle“. Institut f. Strömungsmechanik, Uni Hannover (unveröffentl.), 1992.
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, H. 105/89, 1990.
- KRAMER, J.: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52. Jber. 1957, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 9, Norderney, 1958.
- KUNZ, H.: History of Seawalls and Revetments on the Island of Norderney. Coastal Sediments '87, Proc. vol. 1, ASCE, New York, 1987.
- KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 3; ASCE, New York, 1991a.
- KUNZ, H.: Protection of the Island of Norderney by Beach nourishment, alongshore Structures and Groynes. Third Int. Conf. o. Coastal a. Port Eng. in Devel. Countries, Proc. Bd. 1, COPEDEC, Mombasa, 1991b.
- KUNZ, H. u. STEPHAN, H. J.: Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. Die Küste, H. 54, 1992.
- LAUE, M. u. ERCHINGER, H. F.: 5. Teilbericht „Zeitliche Entwicklung der Strandprofile nach der 6. Strandaufspülung und Empfehlungen zur Gestaltung des Aufspülkörpers“. StAIK, Norden (unveröffentl.), 1990.
- NIEMEYER, H. D.: Tidestrommessungen in Bühnenfeldern. Jber. 1986, Forschungsstelle Küste, Bd. 38, Norderney, 1987.
- NIEMEYER, H. D.: Field measurements and analysis of wave-induced nearshore currents. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. Die Küste, H. 54, 1992.
- NÖTHEL, H., SUNDAR, V. u. HOLZ, K. P.: Statistische Analyse von Meßdaten aus einem Bühnenfeld. Die Küste, H. 54, 1992.

- SCHMIDT, H. J.: Eine Abschätzung des äolischen Sandtransportes infolge einer hoch an das Deckwerk der Insel Norderney reichenden Strandvorspülung. Bericht SWA Hamburg (unveröffentl.), 1988.
- SCHMIDT, H. u. PÄRSCH, J.: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, H. 54, 1992.
- STREIF, H.: Lagerstättenkundliche Auswertung von Bohrungen auf der Robbenplate. Bericht Nieders. Landesamt f. Bodenforschung, Hannover (unveröffentl.), 1988.
- TILLMANN, B. u. ERCHINGER, H. F.: 6. Teilbericht „Überlegungen zu Bauverfahren und Formgebung künftiger Strandaufspülungen“. StAIK Norden (unveröffentl.), 1991.
- TILLMANN, B. u. ERCHINGER, H. F.: Schlußbericht zum Teilvorhaben „Versuchsorientierte Strandaufspülung“. StAIK, Norden (unveröffentl.), 1992.
- WESTHOFF, T.: Sedimentologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten; Diss. Univ. Münster, 1990.
- YU, Z., NIEMEYER, H. D. u. BAKKER, W. T.: Site investigation on sand concentration in the sheetflow layer. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.

### Danksagung

Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ wurde vom Bundesminister für Forschung und Technologie gefördert. Hierfür und für die Begleitung des Vorhabens von der Antragstellung bis zu dessen Abschluß hin wird an dieser Stelle noch einmal gedankt.

### Anlage 1

*Teilvorhaben/Teilprojekte des KFKI-Verbundforschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ mit Bezeichnung der ausführenden Stellen, Namen der wissenschaftlichen Leitung und Anschrift*

1. Teilvorhaben „*Naturmessungen*“ (Wiss. Leitg.: Dr.-Ing. Kunz, Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Wasser und Abfall (ab 01. 10. 1992: des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie), An der Mühle 5, 2982 Norderney
  - 1.1 Teilprojekt „*Hydrographie*“ (Wiss. Leitg.: Dipl.-Ing. Niemeyer/Dr.-Ing. Kunz), Forschungsstelle Küste
  - 1.2 Teilprojekt „*Sedimentologie/Morphologie*“ (Wiss. Leitg.: Dipl.-Ing. Ragutzki/Dr.-Ing. Kunz), Forschungsstelle Küste
  - 1.3 Teilaufgabe „*Schubspannungsmessungen*“ (Prof. Gust), Arbeitsbereich Meerestechnik I, TU Hamburg-Harburg, Lauenbruch Ost 1, 2100 Hamburg 19
  - 1.4 Teilprojekt „*Meteorologische Untersuchungen*“ (Wiss. Leitg.: Dipl.-Met. Schmidt), Seewetteramt des DWD, Bernhard-Nochtstr. 76, 2000 Hamburg 36
2. Teilvorhaben „*Versuchsorientierte Strandaufspülung*“ (Wiss. Leitg.: Dipl.-Ing. Erchinger), Staatl. Amt für Insel- und Küstenschutz, Jahnstr. 1, 2980 Norden
3. Teilvorhaben „*Hydraulische Modelle, Dokumentationen*“ (Wiss. Leitg.: Dr.-Ing. Dette), Leichtweiß-Institut f. Wasserbau d. Technischen Universität Braunschweig, Beethovenstr. 51a, 3300 Braunschweig
4. Teilvorhaben „*Mathematisches Modell*“ (Wiss. Leitg.: Prof. Holz), Institut f. Strömungsmechanik u. Elektronisches Rechnen im Bauwesen d. Universität Hannover, Appelstr. 9A, 3000 Hannover 1.

## Anlage 2

*Mitglieder der KFKI-Projektgruppe zum Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“*

- Dr.-Ing. H. H. DETTE, Akademischer Direktor; Leichtweiß-Institut f. Wasserbau d. TU Braunschweig (TV 3)
- Dipl.-Ing. O. FRANZIUS, Baudirektor; Wasser- und Schiffahrtsdirektion Aurich
- Dipl.-Ing. H. F. ERCHINGER, Ltd. Baudirektor; Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden (TV 2)
- Dipl.-Ing. J. GÄRTNER, Oberregierungsbaurat; Amt f. Land- u. Wasserwirtschaft, Heide
- Dr.-Ing. K.-P. HOLZ, Professor; Institut f. Strömungsmechanik u. Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover (TV 4)
- Dr.-Ing. H. KUNZ, Baudirektor; Forschungsstelle Küste, Norderney (TV 1) – Obmann seit Februar 1988
- Dr.-Ing. G. LUCK; Forschungsstelle Küste, Norderney (TV 1) – Obmann bis Januar 1988
- Dipl.-Ing. H. NIEMEYER; Forschungsstelle Küste, Norderney (TP 1.1)
- Dipl.-Ing. G. RAGUTZKI; Forschungsstelle Küste, Norderney (TP 1.2)
- Dipl.-Ing. D. SCHALLER; Amt f. Land- u. Wasserwirtschaft, Husum (als Vertreter des KFKI-Projektes „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“, seit 1990)
- Dipl.-Met. H. SCHMIDT, Regierungsdirektor; Seewetteramt des Deutschen Wetterdienstes, Hamburg (TP 1.4)

## Anlage 3

*Berichte und Veröffentlichungen zum KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“*

Vorbemerkung:

Zwischenberichte werden nur dann mit Nennung des gesamten Titels bzw. mit Hinweisen zum Inhalt aufgeführt, wenn sie nicht in dem Schlußbericht des jeweiligen Teilvorhabens aufgenommen wurden. In den anderen Fällen ist nur ein kurzer Hinweis gegeben; Tischvorlagen sind nicht mit aufgenommen.

### *1. TV „Naturuntersuchungen“*

*Teilprojekte 1.1 „Hydrographie“ und 1.2 „Sedimentologie/Morphologie“, Forschungsstelle Küste, Norderney*

Berichte:

- NIEMEYER (1990): Zwei Dokumentationen zum hydrographischen Meßsystem, ein Auswertungsbeispiel für Seegang- und Strömungsmessungen.
- RAGUTZKI/WESTHOFF (1987–1990): Fünf Zwischenberichte zu den sedimentologischen Untersuchungen.
- STEPHAN (1988): Fünf Strandauffüllungen vor Norderney – Ergebnisse morphologischer Untersuchungen, Zwischenbericht.
- WESTHOFF (1991): Markierungsversuch mit Luminophoren zur Kennzeichnung des Sedimenttransportes in einem Bühnenfeld, Zwischenbericht.

- EITNER/RAGUTZKI/WESTHOFF (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“, Teil „Sedimentologie“.
- KUNZ/STEPHAN (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“, Teil „Morphologie“.
- NIEMEYER (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“, Teil „Hydrographie“.
- KUNZ (1992): Zusammenfassender Schlußbericht zum Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“.

#### Veröffentlichungen

- EITNER, V., G. RAGUTZKI, T. WESTHOFF (1992): Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge. Die Küste, H. 54.
- EITNER, V., G. RAGUTZKI (1992): The effect of artificial beach nourishment on sediment dynamics of a mesotidal barrier island (Norderney, southern North Sea). Proceedings TIDAL CLASTICS '92, Wilhelmshaven; Druck i. Vorber.
- EITNER, V., G. RAGUTZKI (1992): Some results concerning the problematic nature of tidal flat sediments. Proceedings TIDAL CLASTICS '92, Wilhelmshaven; Druck in Vorber.
- EITNER, V., G. RAGUTZKI (1992): Sediment variability – an important element in the evolution of tidal flats. Proc. Int. Coast. Congr. 1992, Kiel; Druck in Vorber.
- KUNZ, H. (1991): Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. – Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 3; ASCE, New York.
- KUNZ, H. (1991): Protection of the Island of Norderney by Beach Nourishment, alongshore Structures and Groynes. Third Intern. Conf. on Coastal a. Port Eng. in Devel. Countries, Proc. Bd. 1; COPEDEC, Mombasa.
- KUNZ, H., H. J. Stephan (1992): Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. Die Küste, H. 54.
- NIEMEYER, H. D. (1987): Tidestrommessungen in Bühnenfeldern. Jber. 1986, Forsch.-Stelle Küste, Bd. 38.
- NIEMEYER, H. D. (1991): Field measurements and analysis of wave-induced nearshore currents. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York.
- NIEMEYER, H. D. (1992): Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. Die Küste, H. 54.
- WESTHOFF, T. (1990): Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten. Diss. Univ. Münster.
- YU, Z., H. D. NIEMEYER, W. T. BAKKER (1991): Site investigation on sand concentration in the sheetflow layer. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York.

#### *Teilaufgabe 1.3 „Schubspannungsmessungen“, G. Gust, Techn. Universität Hamburg-Hamburg*

##### Berichte:

- GUST (1992): Sonderaufgabe „Schubspannungsmessungen“, Kurzbericht.
- GUST (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“, Teilaufgabe „Schubspannungsmessungen“.

#### *Teilprojekt 1.4 „Meteorologische Untersuchungen“, Seewetteramt Hamburg des DWD*

##### Berichte:

- SCHMIDT (1988): Eine Abschätzung des äolischen Sandtransportes infolge einer hoch an das Deckwerk der Insel Norderney reichenden Strandvorspülung. Bericht.

SCHMIDT (1988 bis 1991): Zwischenberichte Meteorologie und Dokumentationen zu den meteorologischen Messungen.

SCHMIDT (1989): Dokumentationen zu den Windmeßstellen auf Norderney.

SCHMIDT/PÄTSCH (1992): Abschlußbericht „Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen“.

Veröffentlichungen:

SCHMIDT, H. J., PÄTSCH, J. (1992): Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. Die Küste, H. 54.

2. TV „Versuchsorientierte Strandaufspülung“, Staatliches Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden

Berichte:

KOTZBAUER/ERCHINGER (1989): 1. Teilbericht „Planung und Vorbereitung der Strandaufspülung 1989“.

LAUE/ERCHINGER (1989): 2. Teilbericht „Beschreibung der Profilanalyse und des Aufspülprofils sowie weitergehender Auswertungsverfahren“.

LAUE/ERCHINGER (1989): 3. Teilbericht „Ausschreibung und Vergabe zur 6. Strandaufspülung“.

LAUE/ERCHINGER (1990): 4. Teilbericht „Durchführung der 6. Strandaufspülung“.

LAUE/ERCHINGER (1990): 5. Teilbericht „Zeitliche Entwicklung der Strandprofile nach der 6. Strandaufspülung und Empfehlungen zur Gestaltung des Aufspülkörpers“.

STREIF (1988): Lagerstättenkundliche Auswertung von Bohrungen auf der Robbenplate. Bericht, Nds. Landesamt f. Bodenforschung, Hannover.

TILLMANN/ERCHINGER (1991): 6. Teilbericht „Überlegungen zu Bauverfahren und Formgebung künftiger Strandaufspülungen“.

TILLMANN/ERCHINGER (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben „Versuchsorientierte Strandaufspülung“.

Veröffentlichungen:

ERCHINGER, H. F. (1991): Beach Replenishment in consideration of natural processes and profiles. Proc. Conference of River and Coastal Engineers; Loughborough University, MAFF.

KOTZBAUER, U. (1990): Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, H. 105/89.

ERCHINGER, H. F., TILLMANN, B. (1992): Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste, H. 54.

3. TV „Hydraulische Modelle, Dokumentationen“, Leichtweiß-Institut der Tech. Universität Braunschweig

Berichte:

DETTE/SCHULZE/LAUE (1988): Zur Dokumentation von Sandvorspülungen – Stand April 1988. Bericht Nr. 660.

DETTE/ULICZKA (1989): Rechnerische Abschätzung des Diffusionskoeffizienten aus Suspensionsmessungen im Großen Wellenkanal. Bericht Nr. 676.

FÜHRBÖTER/DETTE/SCHULZ (1988): Modelluntersuchungen zu wellenerzeugten Strömungen in einem Buhnenfeld. Bericht Nr. 679.

DETTE/NEWE/SPINGAT (1991): Zur Erstellung einer mehrjährigen Zeitreihe von Seegangsdaten aus Messungen und Korrelationsberechnungen. Bericht Nr. 711.

DETTE/SCHULZE/LAUE (1992): Sandvorspülungen an der Deutschen Nordseeküste (1951-1991). Bericht Nr. 744.

DETTE (1992): Probleme der Sandvorspülungen; Schlußbericht zum Teilvorhaben „Hydraulische Modelle, Dokumentationen“. Bericht Nr. 746.

Anmerkung: Der zweit- und viertgenannte Bericht wurden durch die Verbindung mit anderen Forschungsvorhaben ermöglicht.

#### Veröffentlichungen:

DETTE, H. H. (1991): Experiences with Beach Nourishments as Longterm Coastal Protection. Proc. 4th Annual National Conference on Beach Preservation Technology, Charleston, South Carolina, USA.

DETTE, H. H., A. J. RAUDKIVI (1991): Model for Littoral Transport. Proc. IAHR Symposium on the Transport of Suspended Sediments and its Mathematical Modelling; Florence, Italy.

RAUDKIVI, A. J., H. H. DETTE (1991): Ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Suspensionsfracht außerhalb der Brandung. HANSA; 128. Jg. (23/24).

RAUDKIVI, A. J., H. H. DETTE (1991): Ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung der Suspensionsfracht außerhalb der Brandung (mit Anhang: Dokumentation der experimentellen Daten). Mitt. Leichtweiß-Institut d. TU Braunschweig, H. 111.

Anmerkung: Die aufgeführten Veröffentlichungen sind unter Mitverwendung von Ergebnissen aus dem FV „Wechselwirkungen“ entstanden.

#### 4. TV „Mathematisches Modell“, Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover

##### Berichte:

FEIST/NÖTHEL/HOLZ (1988 bis 1991): Fünf Zwischenberichte zum Teilvorhaben „Numerische Modelle“: Numerische Modellierung der hydrologischen Simulation der strandnahen Buhnenfelder mit einem hydrodynamisch-numerischen Strömungsmodell für stationäre Vorgänge und ausgewählte Tidezyklen. Anwendung, Berechnung und teilweise Verifikation des Modells für Buhnenfelder, von denen Meßdaten vorlagen. Großräumige Simulation des Tidegeschehens bis zum Riffbogen von Norderney zur Schaffung besserer Randbedingungen für die lokalen Modelle der Testfelder. Berechnung der seewärtigen Eingangswerte des Modells aus einer Modellfamilie, die ein Deutsche Bucht Modell und ein Nordsee Modell mit umfaßte; Verifikation für mittleres Tidegeschehen anhand von vorhandenen Meßdaten. Entwicklung eines Wellenmodells zur Simulation der seegangsbedingten Vorgänge im Küstenvorfeld, das die Ausbreitung von Wellen im Flachwasser berechnet. Entwicklung von zwei Transportmodellen, je eines für die Berechnung der morphologischen Veränderungen im lokalen sowie im großräumigen Bereich. Mehrschichtenuntersuchungen mit einem 2D-Strömungsmodell. Statistische Auswertung hydrographischer Natur-Meßdaten.

#### Veröffentlichungen:

NÖTHEL, H., V. SUNDAR, K. P. HOLZ (1992): Statistische Analyse von Meßdaten aus einem Buhnenfeld. Die Küste, H. 54.

- SUNDAR, V., H. NÖTHEL, K. P. HOLZ (1992): Wave Climate in a Groin Field; zur Veröffentlichung akzeptiert im Ocean Engineering.
- SUNDAR, V., H. NÖTHEL, K. P. HOLZ (1992): Wave Kinematics in a Groin Field – Frequency Domain Analysis; zur Veröffentl. akzeptiert beim Coastal Engineering.
- SUNDAR, V., H. NÖTHEL, K. P. HOLZ: Wave Kinematics in a Groin Field – Time Domain Analysis; zur Veröffentl. eingereicht beim Journal of Coastal Research, 1992.
- SUNDAR, V., H. NÖTHEL, K. P. HOLZ: Asymmetrics in Waves and Velocities in a Groin Field; zur Veröffentl. eingereicht im Ocean Engineering, 1992.
- SUNDAR, U., H. NÖTHEL, K. P. HOLZ: Wave Directions in a Groin Field; zur Veröffentl. eingereicht beim Journal of Physical Oceanography, 1992.

# Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney

Von Hans KUNZ und Hans-Joachim STEPHAN

## Zusammenfassung

Zur Sicherung des Westkopfes der ostfriesischen Düneninsel Norderney ist seit Mitte des vorigen Jahrhunderts ein ausgedehntes Schutzwerk aus Strandmauern, Dünendeckwerken und Buhnen errichtet worden. Seit 1951/52 werden Strandvorspülungen ausgeführt, um die natürlichen Sandverluste auszugleichen. Hierdurch ist zu gewährleisten, daß die Strände in den Bühnenfeldern so hoch liegen, daß die Küstenbauwerke vor Zerstörungen während Sturmfluten ausreichend geschützt sind. Die Strandvorspülung des Jahres 1989 wurde in das KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ eingebunden. Dadurch waren die Voraussetzungen gegeben, daß morphologischen Fragestellungen in Verbindung mit hydrographischen und sedimentologischen Naturuntersuchungen nachgegangen werden konnte. Mit dieser Arbeit werden Ergebnisse vorgestellt zu Volumen-Zeitfunktionen, zu Verlustraten, zur strandstabilisierenden Wirkung von Buhnen und zu Grundsätzen für die Minimierung von Sandverlusten und Kosten von Strandvorspülungen.

## Summary

*Norderney Island is one of the East Frisian Islands in Germany. After 1800, a health resort developed on Norderney. Subsequently, the number of buildings on the west end rapidly increased. Severe dune erosion jeopardized the settlement and necessitated the use of coastal protection structures after 1850. Since then, these structures have been extended, strengthened, and altered to the point that one hundred years later they have reached, a length of approximately six kilometers. Even though these structures were successful in preventing further dune erosion, they were not able to stabilize the beaches. Thus, the first artificial beach nourishment project in Germany was initiated for Norderney in 1951/52. Since then, six further beach fills were necessary to afford protection by shifting the zone of wave attack seawards. The scouring of the replenished groyne fields and adjacent areas has been investigated. The 1989 beach restoration was accompanied with the interdisciplinary KFKI-research project "Interaction between Coastal Protection Structures and the marine Environment". Thus it was possible to combine the morphological investigations with hydrographical and sedimentological aspects thus improving knowledge of these processes substantially. It has been proven, that on Norderney beach nourishment is an appropriate solution to protect the existing structures from failure during severe storm-surges. To lower the amount of losses, beach nourishment should not be higher than necessary to achieve the protection goals. Above a "critical beach profile" the losses of replenished material out of the groyne-fields increase considerably with height. A "low-cost-technique" for a "lowrate-beach-nourishment" should be developed.*

## Inhalt

1. Inselfchutz für den Westkopf von Norderney . . . . .	24
2. Strandaufspülungen auf Norderney zwischen 1951 und 1989 . . . . .	25
3. Interdisziplinäre Einbindung der morphologischen Untersuchung auf Norderney . . . . .	28
4. Zielvorgaben für Strandaufspülungen . . . . .	30
5. Definition der Grenzen von Bilanzräumen für die Ermittlung von Strandvolumen . . . . .	31
6. Berechnung der Volumen-Größe aus Strandprofilen . . . . .	33
7. Definition des Startzeitpunktes für Untersuchungen zur Änderung von Aufspülvolumen mit der Zeit . . . . .	34

8. Volumenberechnungen für Norderney . . . . .	36
9. Volumen-Zeit-Funktionen . . . . .	40
10. Längstransport von Sandverlusten aus dem Divergenzbereich in benachbarte Strandabschnitte . . . . .	47
11. Erkenntnisse zur Optimierung von Strandvorspülungen, Zusammenfassung, Ausblick . . .	48
12. Schriftenverzeichnis. . . . .	50

## 1. Inselschutz für den Westkopf von Norderney

Die Insel Norderney ist als Düneninsel durch das Zusammenwirken der Kräfte des Meeres und des Windes aus den Sanden der Nordsee geformt. Für die zurückliegenden drei Jahrhunderte ist die morphologische Entwicklung der Insel gut bekannt (FORSCHUNGSSTELLE, 1964). Gegen Mitte des 17. Jahrhunderts befand sich zwischen den Inseln Juist und Norderney noch die kleine Düneninsel Buise; beidseitig verliefen zwei Seegattungen mit etwa gleichwertigen hydraulischen Querschnitten. In der Folgezeit verschwand Buise, und es bildete sich eine starke Rinne im östlichen Teil des Seegats aus, die im vorigen Jahrhundert den Sockel der Insel Norderney wegzuspülen begann und dazu beitrug, daß Strände und Dünen abbrachen, der Riffbogen weiter seewärts ausgelenkt wurde und sich dadurch der Anlandungsbereich der Sandplaten nach Osten verlagerte mit der Folge, daß der Westteil der Insel nicht mehr ausreichend mit Sand aus dem resultierenden Küstenlängstransport versorgt wurde (THILO/KURZACK, 1952; HOMEIER, 1964).

Im Jahre 1857 begann man mit dem Bau eines massiven Schutzsystems, bestehend aus Strandmauern, Dünendeckwerken und daran angebundenen Buhnen. Der Ostwärtsverlagerung des Seegats konnte aber erst Einhalt geboten werden, als um die Jahrhundertwende die Buhnen bis zu einer Tiefe von etwa zwanzig Metern in das Seegat hinein verlängert wurden. Seitdem ist das Schutzsystem auf insgesamt 6 km ausgedehnt worden. Das kombinierte Längswerk-Buhnensystem war in der Lage, weitere Dünenabbrüche und Verluste des Inselsockels zu verhindern; die Rückgänge des Strandes als Folge der Unterversorgung konnte es aber nicht aufhalten. Man sah sich daher mehrfach gezwungen, dem sich vertiefenden Strand mit weiteren Verbreiterungen und Verstärkungen der Fußbefestigungen zu folgen.

Während des zweiten Weltkrieges konnten die Unterhaltungsarbeiten nicht in erforderlichem Umfang ausgeführt werden. Der Zustand des Schutzsystems war daher so schlecht, daß nach Kriegsende eine Arbeitsgruppe eingerichtet wurde, die sich mit Möglichkeiten einer Sanierung befaßte. Als eine Alternative wurde auf der Grundlage umfangreicher Untersuchungen der FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY (1950) von der ARBEITSGRUPPE NORDERNEY (1952) des Küstenausschusses Nord- und Ostsee (Vorgänger des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen, KFKI) vorgeschlagen, anstelle einer erneuten Anpassungsverstärkung der massiven Küstenbauwerke nunmehr ausreichend hohe Strandprofile herzustellen, und zwar durch die Methode der künstlichen Strandauffüllung mit eingespültem Sand. Diesem Vorschlag folgend ist auf Norderney in den Jahren 1951/52 eine umfangreiche Strandauffüllung ausgeführt worden, erstmals in Europa.

Strandauffüllungen (Aufspülungen) auf Norderney sind als technische Maßnahmen zu werten, mit denen das Buhnen- und Deckwerkssystem gegen Zerstörungen während schwerer Sturmfluten gesichert wird. Sie gleichen Verluste aus, können diese aber nicht verhindern. Die ARBEITSGRUPPE bezeichnete die Strandauffüllung daher als „Unterhaltungsmaßnahme“, die von Zeit zu Zeit wiederholt werden muß, und schätzte bereits damals die dafür im langjährigen Mittel benötigten Sandmengen zutreffend ab. Seit der ersten Aufspülung sind bisher weitere sechs erforderlich geworden, die letzte im Frühsommer 1992.

Diese Arbeit befaßt sich mit der Frage, wie sich die in Buhnenfeldern auf Norderney seit 1951 eingespülten Sandmassen räumlich und zeitlich veränderten. Sie beschränkt sich im wesentlichen auf Ergebnisse, die aus der Analyse von volumetrischen Berechnungen gewonnen werden konnten; zur Deutung der Ergebnisse wird aber auch auf Erkenntnisse der Hydrographie, der Sedimentologie und der anfänglichen Umformung des Strandes nach Aufspülung zurückgegriffen. Ausgehend von den Ergebnissen werden grundsätzliche Empfehlungen für weitere Aufspülungen begründet.

## 2. Strandaufspülungen auf Norderney zwischen 1951 und 1989

Die Lage Norderneys in der Kette der Ostfriesischen Inseln zeigt Abb. 1. Die morphologische und hydrographische Situation des westlichen Teiles der Insel ist auf Abb. 2 skizziert. Das linke Bild weist den Verlauf der Tiefenlinien im Bereich des Seegats bis hin zum Riffbogen

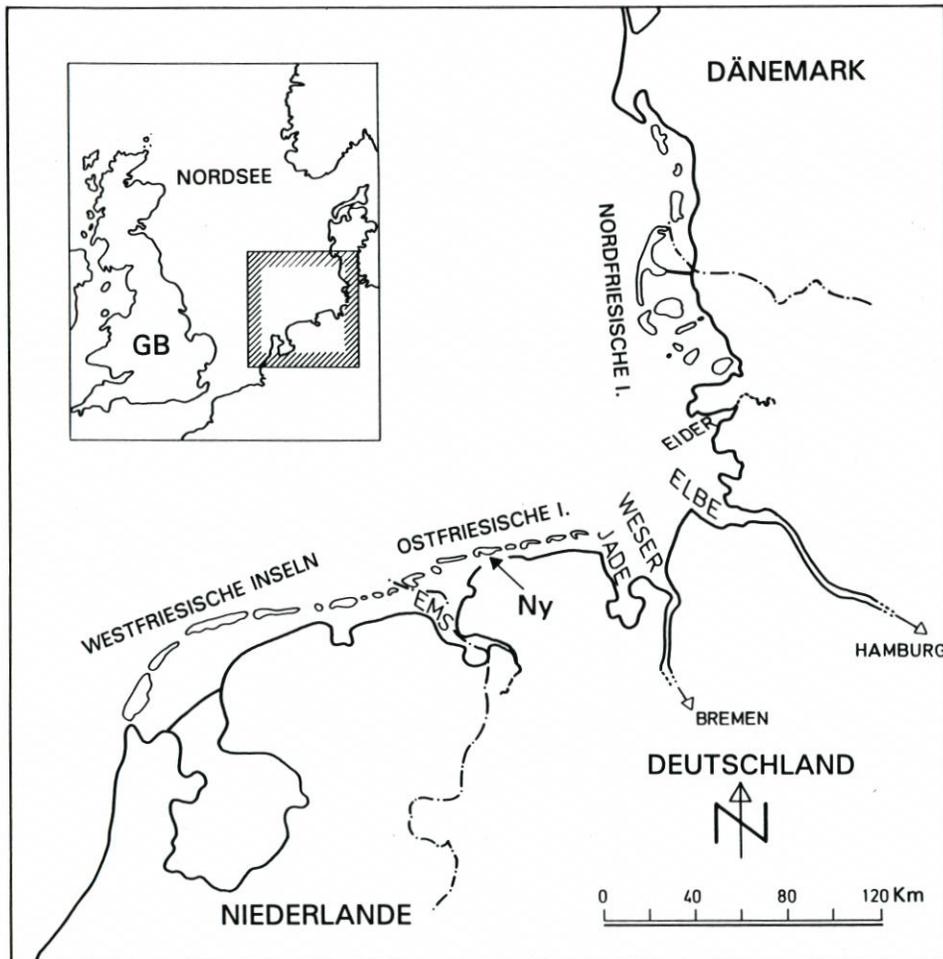


Abb. 1. Lageplan Ostfriesische Inseln und Norderney

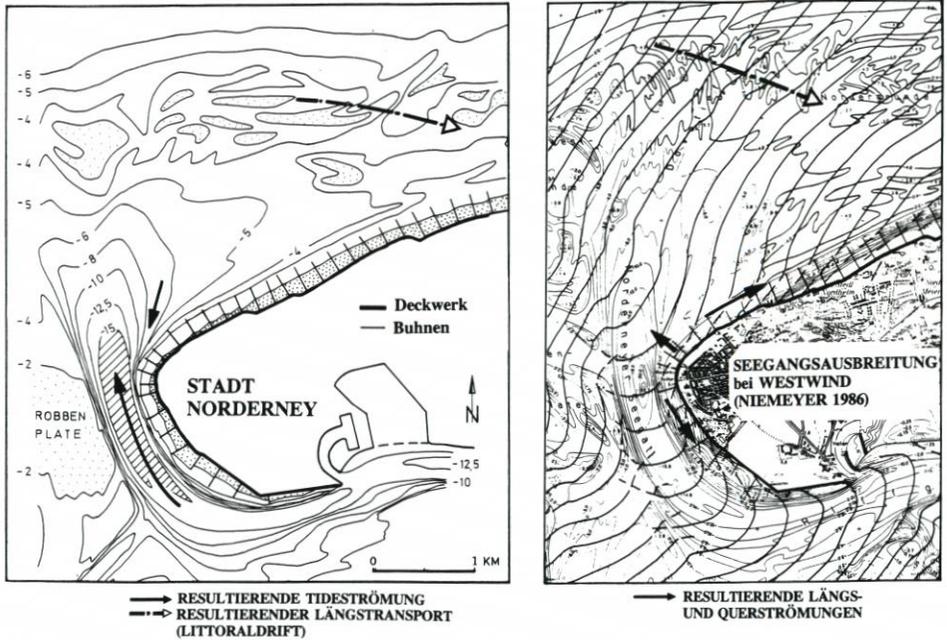


Abb. 2. Skizzen zur hydrographischen und morphologischen Situation Norderneys

aus. Die im Riffbogen eingelagerten Platen und die küstenparallel gerichtete resultierende Sandbewegung (litoral drift) sind dort gekennzeichnet. Beide sind entscheidend für die Sandversorgung der Insel Norderney (HOMEIER u. KRAMER, 1957). Der Platananlandungsbe- reich befindet sich östlich des befestigten Inselteiles; ausgehend von diesem, sich örtlich ständig verändernden Bereich erfolgt der Sandtransport überwiegend in östlicher Richtung; nur bei andauernden Ostwind-Wetterlagen kehrt sich die Transportrichtung um, und es gelangen auch Sandmengen bis in die Buhnenbereiche.

Resultierende Tideströmungen sind für den Westkopf der Insel in vereinfachter Form mit angegeben. Die halbtägigen Tiden schreiten von West nach Ost fort, der mittlere Tidehub beträgt etwa 2,4 m (mittleres Tideniedrigwasser: NN = -1,27 m, mittleres Tidehochwasser: NN = + 1,12 m). Die Strömungsverhältnisse und die Morphologie der tiefen Rinne (Norderneyer Seegat) werden durch die Dominanz des Ebbstroms geprägt. Die mittleren Stromgeschwindigkeiten für beide Halbzeiten betragen etwa 0,7 m/s mit Maximalwerten von etwa 1,2 m/s (Normaltiden). Spitzenwerte erreichen 1,4 m/s (Flutstrom) bzw. 2,0 m/s (Ebbstrom - KOCH/NIEMEYER, 1978).

Das rechte Bild zeigt als Beispiel für den Seegang ein Refraktionsdiagramm für westliche Winde beim Wasserstand von MThw+3,0 m (nach NIEMEYER, 1986). Energiereicher Seegang tritt im Bereich der Ostfriesischen Inseln bei auflandigen Starkwind- und Sturmweatherlagen aus dem Sektor West bis Nordost auf; dieser wird durch Refraktion bis hin zum Inselvorstrand verengt und in westliche Richtung gedreht. Der das Westende von Norderney umspannende Riffbogen schattet dieses wirksam gegen den energiereichen Seegang aus dem Küstenvorfeld ab (Umwandlung der Energie durch Brechen auf den Platen - NIEMEYER, 1987).

Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern (längs und quer zur Küste gerichtet) werden ganz überwiegend durch brechenden Seegang verursacht (NIEMEYER, 1991)

und bestimmen somit die Sandbewegungen in den Bühnenfeldern. Durch Pfeile ist in vereinfachter Weise angedeutet, wie, ausgehend vom „Divergenzbereich“, die resultierenden längs- und quergerichteten Strömungen und die dadurch bedingten Sandtransporte verlaufen.

Das Küstenschutzsystem zur Befestigung des Norderneyer Westkopfes ist auf Abb. 3 skizziert. Es besteht aus den folgenden Einheiten:

1. Deckwerke und Strandmauern (Längswerke), die die Dünenabschnitte gegen Erosion bei Sturmfluten schützen.
2. Senkrecht zu den Längswerken verlaufende Bühnen.
  - 2.1 Bühnen, die verhindern, daß die Tideströmung des Seegats den Inselsockel angreift und
  - 2.2 Bühnen zur Stabilisierung von Strandabschnitten.
3. Strandauffüllungen in Bühnenfeldern, die sich beidseits des „Divergenzbereichs“ erstrecken.

Die Bereiche, in denen auf Norderney die sechs Strandaufspülungen (Strandauffüllungen) zwischen 1951 und 1989 ausgeführt wurden, sind aus der Abb. 3 mit dargestellt; die Strandauffüllung von 1992 erstreckte sich auf den Abschnitt D bis L<sub>1</sub>.

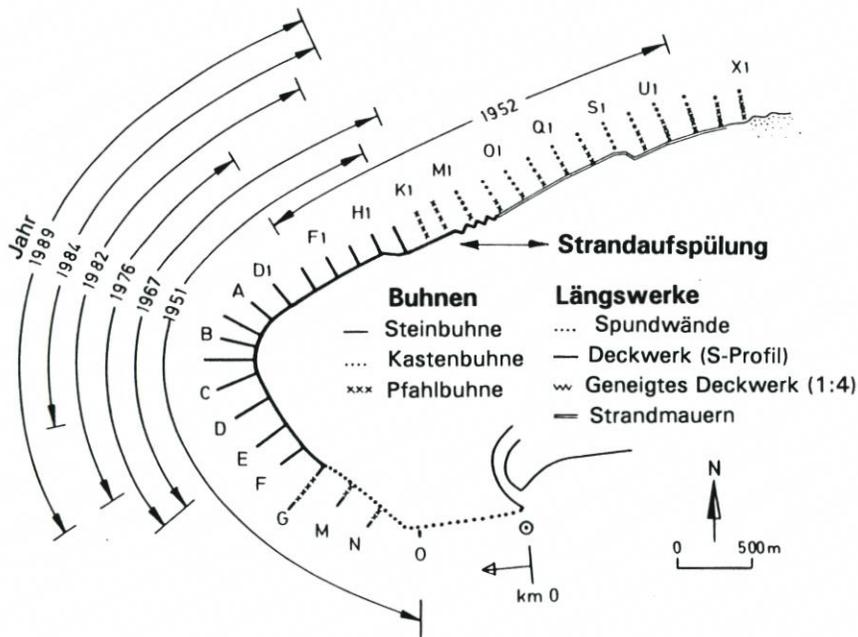


Abb. 3. Bauwerke und Strandaufspülungen (1951 bis 1989) zum Schutz des Westkopfes der Insel Norderney

Abb. 4 weist aus, wo das Material für die Strandaufspülungen zwischen 1951 und 1989 entnommen wurde; sie enthält zudem Informationen zu den jeweils aufgespülten Sandmengen und deren mittlere Korndurchmesser ( $d_{50}$ ) sowie Hinweise zur Literatur. (Auf die Aufspülung 1992 wird hier nicht eingegangen, denn sie war noch nicht Gegenstand der Untersuchungen.)

Die mittlere jährliche Aufspülmenge während des Zeitraumes von 1951 bis 1989 betrug etwa 85 000 m<sup>3</sup>.

Für die erste Strandauffüllung wurde der Sand wattseitig entnommen; hierdurch erklärt

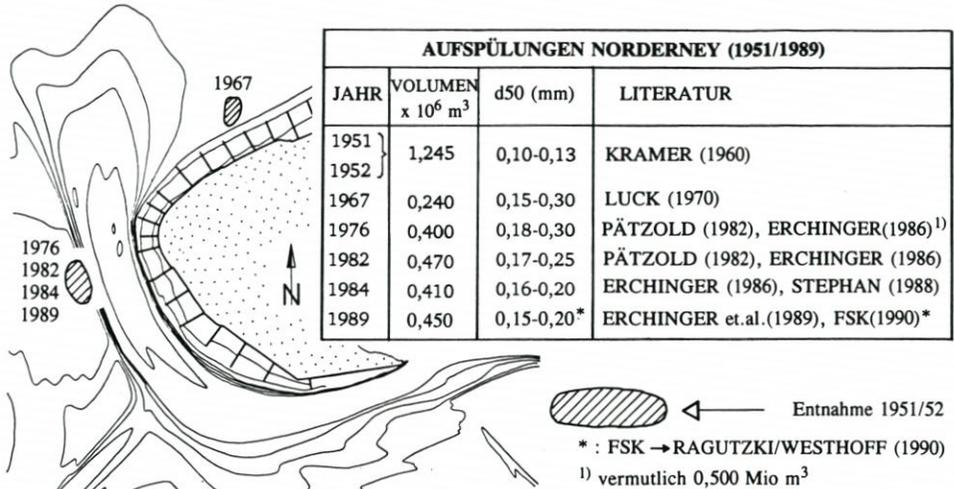


Abb. 4. Angaben zur Entnahme, zu den Aufspülmengen und den Korngrößen für die Norderneyer Strandaufspülungen zwischen 1951 und 1989

sich das sehr feine Material mit einem mittleren Durchmesser ( $d_{50}$ ) von nur etwa 0,1 mm (KRAMER, 1960). Das relativ grobe Material mit einem mittleren Durchmesser von 0,25 mm wurde 1967 in Bereichen vor dem Kopf der Buhne  $G_1$  gewonnen (LUCK, 1970). Für die Aufspülungen seit 1976 erfolgt die Entnahme von der Robbenplate, einem Akkumulationsgebiet westlich des Norderneyer Seegats (ERCHINGER, 1986); die als  $d_{50}$ -Werte ausgewiesenen Korndurchmesser belegen, daß auch in diesem Bereich nicht so grobes Material ansteht, wie man es gerne in die Bühnenfelder einspülen würde (KUNZ, 1987).

Nach einer Aufspülung verändern sich die Korngrößenverteilungen des aufgespülten Sandes in den Bühnenfeldern in charakteristischer Weise: Zunächst wird diese bestimmt durch die Art der Aufspülung und durch das Material selbst. Damals fanden, insbesondere durch Seegangseinwirkungen, Umsortierungen statt, die Gesetzmäßigkeiten aufwiesen (WESTHOFF, 1990).

Die Abb. 5 und 6 zeigen Ergebnisse sedimentologischer Untersuchungen zum quer- und längsgerichteten Sandtransport, die der Aufspülung des Jahres 1989 zugeordnet wurden. Aus Abb. 5 ist zu erkennen, wie sich innerhalb des Hauptmeßfeldes (Bühnenfeld  $D_1-E_1$ ) in Querrichtung die Korngrößenverteilungen ( $d_{50}$ ) in der Zeit vor und nach der Aufspülung vom April 1988 in unterschiedlichen Höhenlagen des Strandes (Niedrig-, Mittel-, Hochwasserbereich) veränderte. Abb. 6 weist demgegenüber aus, wie sich in Längsrichtung die  $d_{50}$ -Werte für das Hauptmeßfeld den benachbarten Bereichen des Westkopfes zuordnen. Dargestellt ist eine „Momentaufnahme“ für den September 1987, also gut drei Jahre nach der Aufspülung vom Februar 1984. Den mittleren Korndurchmessern sind mit dem oberen Bild die Calcium-Carbonat-Gehalte als Indikator für den Muschelbruchanteil (Schill) zugeordnet.

### 3. Interdisziplinäre Einbindung der morphologischen Untersuchungen auf Norderney

Das KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ (KUNZ, 1992) erbrachte durch interdisziplinäre Verbundforschungen ein

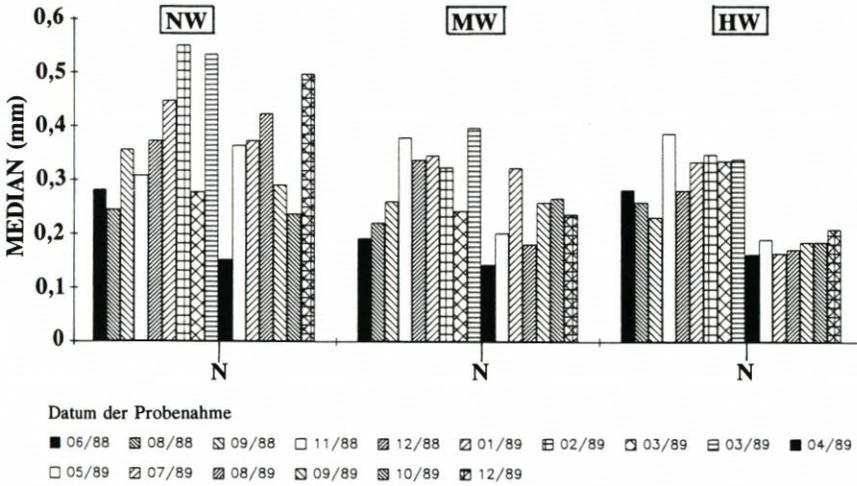


Abb. 5. Korngrößen des Materials (Sand, Schill) im Bühnenfeld (D1-E1) für die Niedrig-, Mittel- und Hochwasser-Linie vor und nach der Aufspülung (N) vom April 1989 – nach WESTHOFF (1990)

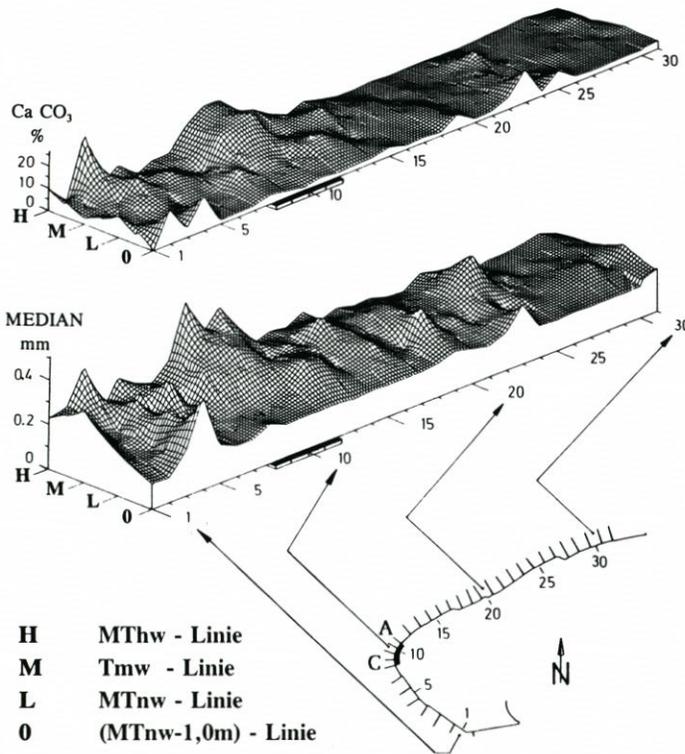


Abb. 6. Korngröße (d<sub>50</sub>) und Kalkgehalte (CaCO<sub>3</sub>) in den Bühnenfeldern des Norderneyer Westkopfes zwischen NN -1,0 m und Mitteldehochwasser; Beprobung vom Sept. 1987 – nach WESTHOFF (1990)

verbessertes Verständnis zu den Sandbewegungen, insbesondere auch solchen in Wechselwirkung mit Bauwerken (Buhnen, Strandmauer). Teil des Vorhabens waren hydrographische Untersuchungen in Bühnenfeldern des Divergenzbereichs, in denen eine Vielzahl von Messungen zu Seegang und Geschwindigkeit (Richtung, Größe) ausgeführt wurden (NIEMEYER, 1991, 1992). Durch eine in das Vorhaben mit eingebundene deutsch-niederländische Kooperation konnten auch Messungen des Sandtransportes in den obersten Schichten des Strandes (Sheet-flow) gemacht werden (YU, NIEMEYER u. BAKKER, 1991), die nachfolgend dann durch Schubspannungs- und sohlnahe Geschwindigkeitsmessungen (GUST, 1992) ergänzt wurden. Die sedimentologischen Untersuchungen zu dem in den Bühnenfeldern befindlichen Sand- und Muschelbruchmaterial (WESTHOFF, 1990 und EITNER/RAGUTZKI/WESTHOFF, 1992) ergaben Gesetzmäßigkeiten, die durch eine Verknüpfung mit den hydrographischen und den morphologischen Untersuchungen im Hinblick auf Sandbewegungen ursächlich zu deuten sind.

Die ausgeführten morphologischen Untersuchungen lassen sich generell zwei Zeitabschnitten zuordnen: Der erste Abschnitt erfaßt den Aufspülkörper und dessen anfängliche Umformungen, bis der eingebrachte „Störkörper“ durch die angreifenden Naturkräfte im wesentlichen so umgeformt wurde, daß seine Gestalt zu den hydrodynamisch-morphologischen Standortgegebenheiten paßt (wird fortan als „Ausgangszustand“ bezeichnet). Je nach Wetterlage kann dieser Umformungsvorgang auf Norderney bereits innerhalb weniger Monate überwiegend zum Abschluß gekommen sein. Der zweite Untersuchungsabschnitt setzt ab dem Zeitpunkt ein, zu dem sich der „Ausgangszustand“ im wesentlichen ausgebildet hat, und verfolgt dann die morphologischen Veränderungen bis hin zur nächsten Strandauffüllung.

Die erstgenannten Untersuchungen zielen darauf ab, die Ausbildung des Aufspülkörpers so zu optimieren, daß die Anfangsverluste aus dem aufzufüllenden Strandabschnitt möglichst gering werden (KOTZBAUER, 1990). Die zweitgenannten Untersuchungen sollen Einblicke in den quer- und längsgerichteten Prozeß des Sandtransportes in den Bühnenfeldern selbst und in den benachbarten Bereichen geben. Ein Teil dieser Untersuchungen ist dabei ausgerichtet auf das Ziel, zeitlich räumliche Abhängigkeiten der Volumina in definierten Bilanzräumen zu analysieren und zu deuten (KUNZ, 1991a). Mit dieser Frage befaßt sich diese Arbeit im wesentlichen.

#### 4. Zielvorgaben für Strandaufspülungen

Mit Strandaufspülungen werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Sie bestimmen Art und Umfang einer Vorspülung. Ist beispielsweise eine zu schwache Randdüne gegen Sturmfluten zu schützen, dann wird man vor dieser hinreichend große Volumenanteile als „Sanddepot“ aufbringen und eine Strandauffüllung zuordnen, die zu der Ausbildung des Verschleiß- und Reserveteils paßt (KAMP, 1991). Will man hingegen durch eine Aufspülung einen Strand für die Aufstellung von Strandkörben schaffen, dann wird möglichst viel Sand in einem schmalen Höhenbereich oberhalb der im Sommer häufiger zu erwartenden Hochwasserstände gewünscht. Wieder anders sieht es aus, wenn lediglich zur Überbrückung einer Gefahrensituation für relativ kurze Zeit eine Aufspülung vorzunehmen ist, wie beispielsweise an Strandabschnitten von Norderney und Langeoog geschehen (ERCHINGER, 1986).

Auf Norderney dient die Strandaufspülung in erster Linie der Sicherung gegen Unterspülungen von Schutzwerken (Strandmauern, Dünendeckwerken, Buhnen). Dadurch richtet sich das Interesse auf Strandvolumen oberhalb der NN -5,0-m-Tiefenbegrenzung, wobei dann gleichzeitig die Auffüllung von ebenfalls unterversorgten Strandabschnitten in der Nachbar-

schaft durch einander überlagernde Längs- und Quertransporte der „Verlustmengen aus dem Bilanzvolumen“ mit zu bewerten ist.

Der Erfolg einer ausgeführten Aufspülung wird danach beurteilt, wie lange und in welchem Ausmaß sich aufgespülter Sand dort hält, so man ihn für das jeweils verfolgte Ziel benötigt. Dies klingt banal, ist es aber nicht, denn recht oft werden Erfolg oder Mißerfolg aufgrund des sichtbaren Strandbereiches bewertet. So befassen sich zum einen viele veröffentlichte Beiträge zu Strandvorspülungen (Strandaufspülungen) mit der zeitlichen Änderung von Volumen des über Niedrigwasser gelegenen Strandes, ohne die festgesetzten Randbedingungen für die volumetrischen Untersuchungen im Zusammenhang mit den Zielen der Strandvorspülung zu begründen. Zum anderen macht es aber auch verständlich, warum man sich überwiegend auf die Zuordnung des Aufwandes (Aufspülmengen) und des sichtbaren Erfolges (Standzeiten) konzentriert, ohne die jeweils vorgenommene „Abgrenzung des Bilanzraumes“ und deren Einfluß auf die verwendeten Ergebnisse der Volumenberechnungen zu überprüfen und bei vergleichenden Auswertungen zu berücksichtigen (VAN DE GRAAFF, 1991). Werden aber die „Bilanzräume“ in Kenntnis der jeweiligen hydrodynamisch-morphologischen Einflußgrößen orts- und zeitspezifisch festgelegt und wird zudem der anfängliche Umformungsvorgang in den „Ausgangszustand“ abgetrennt, dann können aus den geometrischen Untersuchungen (Volumenbestimmungen) durchaus weiterführende Erkenntnisse zum Sandtransport gewonnen werden. Diese lassen zudem Rückschlüsse auf die „Physik der Prozesse“ immer dann erwarten, wenn man den Massenermittlungen geeignete Parameter zur Beschreibung der hydrographischen, morphologischen und sedimentologischen Gegebenheiten zuzuordnen vermag.

##### 5. Definition der Grenzen von Bilanzräumen für die Ermittlung von Strandvolumen

Das Strandvolumen kann in unterschiedlicher Weise berechnet werden: entweder oberhalb einer horizontal verlaufenden Tiefenbegrenzung ( $V$  nach Abb. 7.1) oder oberhalb eines „Referenzprofils“ in Verbindung mit einer horizontalen Tiefen-Grenzlinie ( $\Delta V$  nach Abb. 7.2). Es bietet sich an, als Referenzprofil das sogenannte „Gleichgewichtsprofil“ zu verwenden, falls dieses hinreichend genau festzulegen ist.

Nach einer Aufspülung wird sich das Strandvolumen (die aufgespülte Menge ist in Abb. 7 gestreift dargestellt) durch Sandverluste (Quer- und Längstransport) so lange verringern, bis das Gleichgewichtsprofil erreicht ist.

Bezieht man sich auf das Volumen oberhalb einer horizontalen Grenzlinie ( $V$ ), dann würde sich die im Bilanzraum verbliebene Aufspülmenge mit der Zeit bis zu dem Volumenwert verringern, der durch das „Referenzprofil“ und die Tiefen-Grenzlinie ( $h$ ) festgelegt ist (siehe weiß dargestellte Fläche oberhalb der  $h$ -Grenzlinie in Abb. 7.2). Entsprechend würden  $\Delta V$ -Werte mit der Annäherung des Strandes an das Referenzprofil gegen Null gehen.

Für Untersuchungen zur Verlagerung von Sand in tiefere Schichten bietet es sich an, das Gesamtvolumen in Teilvolumina zwischen horizontalen Höhen-Grenzlinien aufzuteilen. Dies ist auf der Abb. 7.1 beispielhaft skizziert (gepunktete Fläche mit der Lamellen-Höhe  $\Delta h$ ). Eine entsprechende Aufteilung ist ebenfalls für die  $\Delta V$ -Volumenwerte möglich.

Es ist gebräuchlich, die Abnahme des Volumens eines Bilanzraumes als „Verlust“ von aufgespültem Strandmaterial auszuweisen. Dieses ist nur zutreffend, wenn die Grenzen des Bilanzraumes so festgelegt wurden, daß außerhalb von diesem das aufgespülte Material für das jeweilige Ziel keinen Nutzen mehr bringt.

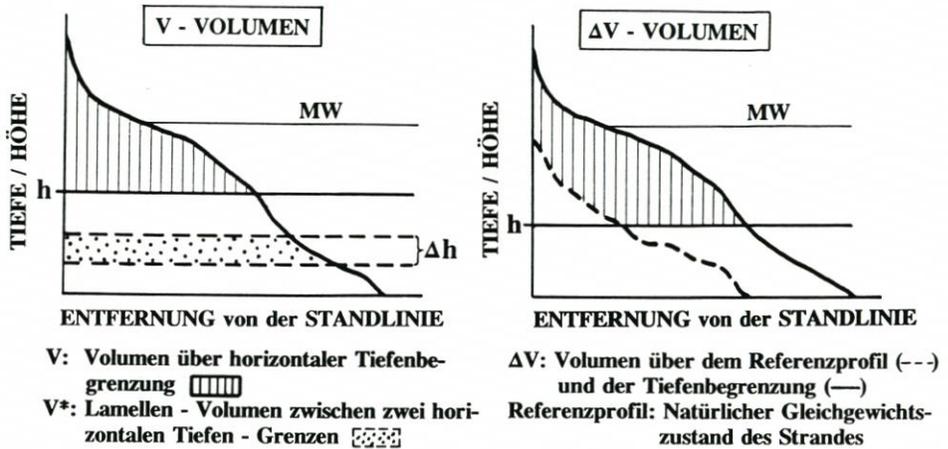


Abb. 7. Skizzen zur Abgrenzung des „Bilanzraumes“ für Volumenberechnungen  
 Abb. 7.1. Volumen oberhalb einer horizontalen Begrenzung (V) und zwischen zwei horizontalen Tiefen-Grenzlinien (V\*)

Abb. 7.2. Volumen oberhalb eines Referenzprofils und einer horizontalen Tiefenbegrenzung (ΔV)

Als Tiefengrenzlinie (h) wird häufig ein Wert wenig unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw) verwendet, weil dieser es ermöglicht, auf Peilungen zu verzichten und lediglich die mit wesentlich geringerem technischen Aufwand zu erhebenden Daten der terrestrischen Vermessung zu nutzen. In vielen Fällen ist aber davon auszugehen, daß auch tiefere Strandabschnitte in die Betrachtungen mit einzubeziehen sind, weil die dorthin gelangenden Sandmengen ebenfalls eine positive Wirkung hinsichtlich des mit der Aufspülung verfolgten Zieles haben, somit nicht als „Verluste“ zu werten sind. Prinzipiell ist es so, daß die einer Strandauffüllung als Verlust zuzuweisenden Mengen um so geringer sind, je tiefer man die Tiefen-Grenzlinie (h) für die Volumenberechnungen (V oder ΔV) vorgibt (VAN DE GRAAFF, 1991, KUNZ, 1991b). Im Falle Norderneys, wo die Strandauffüllung eine Maßnahme zur Sicherung der Schutzwerke gegen Auskolkungen infolge von Seegang (insbesondere während Sturmfluten) ist, wäre die untere Grenze (Horizontale h) bei etwa SKN -3,50 m (entspricht etwa NN -5,00 m) festzulegen (THILO/KURZACK, 1952).

Die Abb. 8, linkes Bild, zeigt am Beispiel Norderneys, wie sich in dem ersten Jahr nach einer Strandaufspülung die Volumen (V) von Bilanzräumen mit unterschiedlich tiefen Begrenzungshorizontalen (h zwischen NN und NN -5,0 m – siehe Abb. 7.1) veränderten. Das Bild läßt unmittelbar erkennen, daß die relativen Änderungen des Volumens, bezogen auf den Anfangswert, stark von der Festlegung der Tiefen-Grenzlinie (h) abhängen. Betrachtet man beispielsweise den Zeitpunkt, zu dem die Hälfte des Anfangsvolumens aus dem Bilanzraum herausgelangte (Halbwertszeit), so ist dies für den Bereich oberhalb der Tiefen-Grenzlinie NN = 0,0 m nach etwa 100 Tagen und für den oberhalb der NN -2,0-m-Grenzlinie erst nach etwa 300 Tagen der Fall. Die Änderung der Halbwertszeit mit der Tiefenbegrenzung des Bilanzvolumens wurde zur Veranschaulichung als  $t_h$ -Kurve in die Abb. 8, linkes Bild, eingetragen.

Das rechte Bild der Abb. 8 weist Teilvolumen (V\*) zwischen den jeweils einen Meter auseinanderliegenden Grenzhorizontalen (siehe Δh in Abb. 7.1) als Funktion der Zeit nach der Aufspülung aus. Die höchstgelegene Lamelle (NN ± 0,0 m bis NN -1,0 m) läßt erkennen, daß von Anbeginn an Verluste, also Sandabgaben in tiefere Lamellen, eintraten. Die tiefste der dargestellten Lamellen (NN -4,0 m bis NN -5,0 m) hingegen erhält zunächst mehr

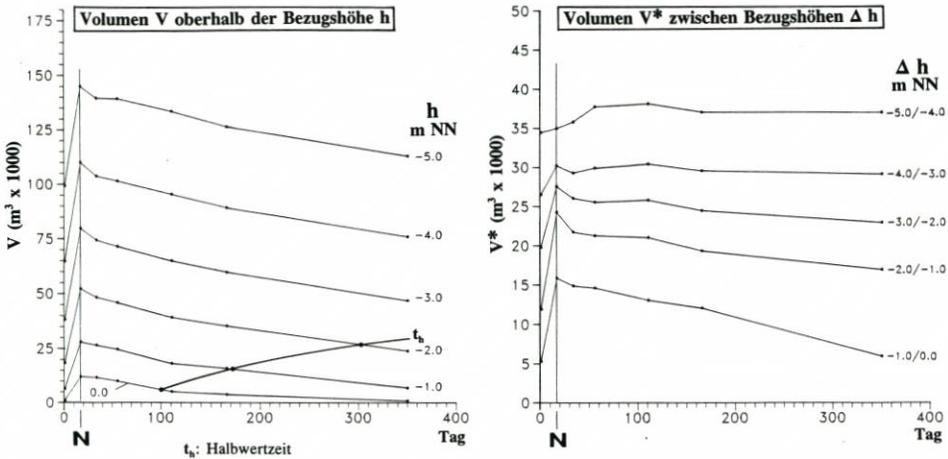


Abb. 8. Zeitliche Veränderung der Volumen-Größen ( $V$ ,  $V^*$  nach Abb. 7) in den ersten 400 Tagen nach der Aufspülung (N) des Feldes (D1-E1) im April 1989 – Vermessungsdaten aus ERCHINGER/LAUE (1990)

Sand aus höherliegenden Abschnitten, als aus ihr selbst in tiefere Bereiche abwandern. Nachfolgend gleichen sich diese Mengen in etwa aus, so daß sich ein nahezu horizontaler Verlauf einstellt.

## 6. Berechnung der Volumen-Größe aus Strandprofilen

Bei den Bilanzierungen der Sandmengen für die Strände auf Norderney sind bisher unterschiedliche Verfahren benutzt worden. Grundlage waren immer Profilaufnahmen. Allen bisherigen Strandaufspülungen waren Strand- und Seevermessungen zugeordnet worden. Sie ergänzten die Routinestrandaufnahmen, von denen bis in das letzte Jahrhundert zurückreichende Ergebnisse vorliegen. Gestützt auf die bisher gewonnenen Erfahrungen wurden bei der Versuchsstrandaufspülung von 1989 die terrestrischen Vermessungen und Peilungen räumlich und zeitlich verdichtet. Sie erstreckten sich auf den Aufspülbereich sowie auf beidseitig angrenzende Strand- und Vorstrandabschnitte.

Bei der ersten Strandauffüllung (KRAMER, 1958; 1958/59; 1973) wurden die Sandmengen berechnet, indem man die Differenzfläche zwischen den Profilen nach und vor der Aufspülung ( $\Delta F$ ) mit der zugehörigen mittleren Strandbreite ( $b_m$ ) multiplizierte. Die Summierung ergibt die Volumengröße ( $\Delta V$ ) je Bühnenfeld. Als Bezugshorizonte wurden die MTnw- und die Tiefenlinie NN  $-5,0$  m verwendet – siehe Abb. 9.1.

Die Bilanzierung der zweiten Strandauffüllung (LUCK, 1970) erfolgte, indem man die Höhenschichtflächen ( $F_i$ ) mit den zugeordneten Tiefenwerten ( $h_i$ ) multiplizierte (Planimetrierungen). Die Berechnungen wurden auf die MTnw-Linie bezogen; sie ergaben durch Aufsummierung das Gesamtvolumen ( $V$ ) – siehe Abb. 9.2.

Die Berechnungen für die dritte und vierte Strandaufspülung (PÄTZOLD, 1982 sowie STEPHAN, 1988) entsprachen der Methode nach Bild 9.1, jedoch EDV-gestützt und ohne Differenzbildung, sondern mit Bezug auf die Tiefenbegrenzung NN  $-1,5$  m (siehe Bild 8.3). Die unterschiedliche Geometrie der Bühnenbauwerke und des Deckwerksfußes wurde dabei nicht besonders berücksichtigt.

Das von der Forschungsstelle Küste in FORTRAN-77 entwickelte Programm zur Massen-

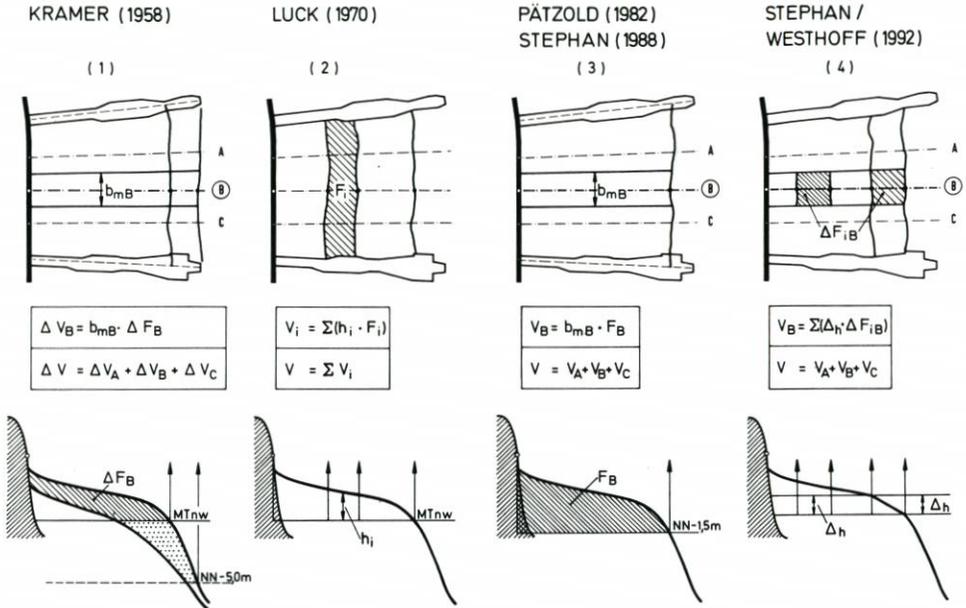


Abb. 9. Skizze zu den bisher verwendeten Berechnungsmethoden für die Strandvolumen der Bühnenfelder Norderneys

bilanzierung (STEPHAN/WESTHOFF, 1992) beruht auf einer EDV-gestützten Berechnung von Teilflächen nach der Gauss'schen Flächenformel. Die Sandmassenermittlung erfolgt oberhalb von bis zu zehn frei wählbaren Höhenniveaus. Die jeweiligen Deckwerkskonfigurationen sowie die unterschiedlichen Bühnenkörper sind berücksichtigt. Die Querschnittsflächen oberhalb der gewählten Bezugshorizonte ( $F_i$ ) werden für jedes einzelne Profil innerhalb eines Bühnenfeldes aus Teilflächen berechnet und mit der zugeordneten Strandbreite ( $b_i$ ) multipliziert. Die Aufsummierung der berechneten Sandmassen oberhalb des jeweiligen Bezugsniveaus in den verschiedenen Strandabschnitten pro Bühnenfeld ergibt das Gesamtvolumen ( $V$ ) (siehe Abb. 9.4).

Liegt pro Bühnenfeld nur das Mittelprofil vor, so erfolgt die Berechnung in allen Fällen in der beschriebenen Weise über die gesamte Bühnenfeldbreite.

Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurde das Verfahren nach Bild 9.4 angewendet, indem man die Volumendifferenz-Größe ( $\Delta V$ ) aus den entsprechend Abb. 7.2 einander zugeordneten Volumengrößen ( $V$ ) berechnete.

## 7. Definition des Startzeitpunktes für Untersuchungen zur Änderung von Aufspülvolumen mit der Zeit

Stränden mit ausgeglichener Sandbilanz lassen sich sogenannte „Gleichgewichtsprofile“ zuordnen, die definierte mittlere Zustände repräsentieren – beispielsweise FENNEMAN (1902), BRUUN (1954), DEAN (1977). Würde ein derartiger Strand durch künstliche Sandauffüllung über das Gleichgewichtsprofil erhöht, dann wiese er nachfolgend so lange Sandverluste auf, bis er den Gleichgewichtszustand wieder erreicht hat. Bezieht man eine Volumenberechnung entsprechend Abb. 7.1 auf dieses Gleichgewichtsprofil, dann läßt sich die zeitliche Volumen-

änderung durch eine e-Funktion annähern (AUSSCHUSS KÜSTENWERKE, 1977/1981; FÜHRBÖ-  
TER et al., 1976; PÄTZOLD, 1982).

Strandaufspülungen werden durchweg in Küstenabschnitten mit negativer Sandbilanz  
ausgeführt, und man will damit dauerhafte Strandlagen gewährleisten, die oberhalb des  
Zustandes liegen, dem der Strand natürlicherweise zustrebt. Für derartige Fälle ist nicht von  
vornherein zu unterstellen, daß die Änderung des aufgespülten Volumens mit der Zeit von  
Gesetzmäßigkeiten bestimmt wird, die man jeweils durch eine e-Funktion darzustellen  
vermag. Prinzipiell sind für eine Beschreibung zeitlicher Volumenänderungen zwei Zeitab-  
schnitte zu unterscheiden:

Phase A: Ende der Aufspülung bis zum Abschluß der Umformung des Aufspülkörpers  
(Bilanzkörper) in den „Ausgangszustand“, der etwa den natürlichen Bedingungen  
entspricht – beispielsweise für Norderney ( ERCHINGER/TILLMANN, 1992).

Phase B: Die sich an die Anfangs-Phase A anschließende Zeitspanne.

Während der Phase A wird innerhalb relativ kurzer Zeit der Aufspülkörper von den  
Naturkräften so umgeformt, daß er nur noch wenig als „Störung“ wirkt. Bei sehr großer  
Seegangseinwirkung können die Umformungen im flacheren Teil des Strandes (oberhalb  
MTnw abzüglich einiger Meter) bereits nach Tagen, spätestens aber nach wenigen Wochen zu  
einem großen Teil erfolgt sein. Für die Umformungen des aufgespülten „Störkörpers“ sind  
e-Funktionen um so weniger sinnvoll darzustellen bzw. aussagefähige „Halbwertzeiten“ zu  
ermitteln, als die aufgespülten Gebilde von natürlichen Formgebungen für den jeweiligen  
Standort abweichen. Hinzu kommen Gesichtspunkte der relativen Höhe des Aufspülkörpers  
zu eintretenden Wasserständen, weil von den aufgespülten Volumenanteilen ( $V$  oder  $\Delta V$  nach  
Abb. 7) nur die vom Wasser erreichten Anteile umgelagert werden können. In solchen Fällen  
sind die in Kap. 5 beschriebenen Gesichtspunkte zur Abgrenzung des Bilanzkörpers von  
besonderer Bedeutung.

Auf Abb. 10 ist für prinzipiell unterschiedliche Fälle von Strandauffüllungen skizziert,

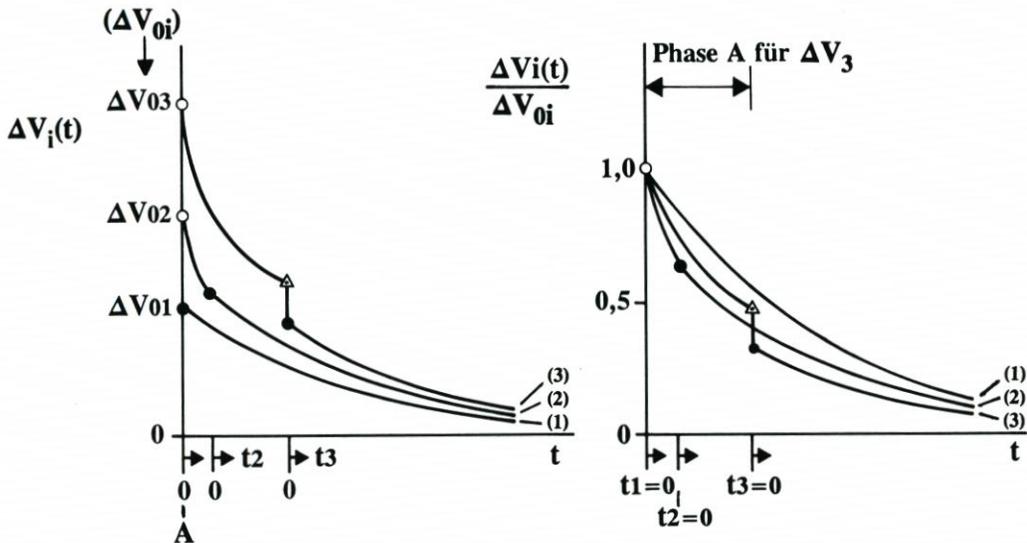


Abb. 10. Skizzen zur Festlegung des Beginns der Phase B ( $t = 0$ ) zur Ermittlung von Volumen-Zeit-  
Funktionen für unterschiedliche Aufspülkörper (Nr. (1) bis Nr. (3)); links: Volumenwerte ( $\Delta V_i(t)$ );  
rechts: Relativwerte ( $\Delta V_i(t)/\Delta V_{0i}$ )

wie sich Volumen mit der Zeit ändern, und wie der Nullpunkt für die Zeitskala der Phase B festgelegt werden sollte.

Das linke Bild weist die Volumen als  $\Delta V$  nach Abb. 7.2 aus für:

1. eine Strandaufspülung, bei der sofort die natürliche Profilgestalt geformt wird (Phase A entfällt);
2. eine Strandaufspülung mit einer von natürlichen Profilen abweichenden Formgebung (fülliger im oberen Bereich), die nicht wesentlich höher reicht als die Tidehochwasserstände;
3. eine Strandaufspülung mit einem Sanddepot, das wesentlich über dem Niveau des mittleren Hochwassers liegt.

Beim erstgenannten Fall (1) kann sofort nach der Aufspülung, beginnend mit  $\Delta V_{01}$ , ein exponentieller Verlauf erwartet werden. Bei (2) sind die Verluste aus dem Bilanzkörper infolge der natürlichen Umformungen in den „Ausgangszustand“ groß; erst ab  $t_2 = 0$  (schwarzer Kreis) kann ein repräsentatives Ergebnis über die  $\Delta V$ -t-Funktion erwartet werden. Bei (3) wird das Sanddepot während einer Sturmflut zu einem mit dem Dreieck gekennzeichneten Zeitpunkt vollständig umgeformt; erst danach ( $t_3 = 0$ ) ist eine den anderen Fällen vergleichbare Untersuchung der Phase B möglich.

Das rechte Bild zeigt die entsprechenden Gegebenheiten in einer Darstellung, bei der alle Volumen auf den jeweiligen Betrag am Ende der Aufspülung ( $\Delta V_{oi}$ ) bezogen sind. Aufgrund der unterschiedlichen Verluste aus dem Bilanzkörper durch Umformungen während der Phase A weichen die Kurven systematisch voneinander ab.

## 8. Volumenberechnungen für Norderney

Die Volumenberechnungen für die Norderney-Situation erfolgte getrennt für Bühnenfelder auf der Grundlage von Profilmessungen. Eine Verwendung von Profilen setzt voraus, daß diese die Oberflächengestalt des jeweils zugeordneten Strandbereichs repräsentieren. Es wurden Voruntersuchungen zu der Frage ausgeführt, wie sich das Ergebnis der Volumenberechnung mit der Anzahl der dafür verwendeten Profile ändert. Ein Ergebnis ist auf Abb. 11 wiedergegeben. Die insgesamt erreichte Zuverlässigkeit der Daten für die hier mitgeteilten volumetrischen Angaben bewegt sich zwischen  $\pm 7,5\%$ .

Für Norderney gibt es Zeitreihen von Strandprofilmessungen, die bis in das zurückliegende Jahrhundert reichen. Darauf gestützt wurde der Zustand vor der ersten Strandaufspülung als „Referenzprofil“ nach Abb. 7.2 eingeführt; es wird hier als „1950“ bezeichnet und ist beispielsweise in der Abb. 12 mit dargestellt. Dieses „Referenzprofil“ kann als Näherung für das „Gleichgewichtsprofil“ gelten, auch wenn langfristig der Strand ohne künstliche Sandzufuhr wegen der negativen Sandbilanzen noch tiefere Lagen erreichen dürfte.

Die für Untersuchungen zur Standfestigkeit der Bühnen auf Norderney zu berücksichtigende Tiefe wird von THILO/KURZACK (1952) mit SKN  $-3,50$  m (etwa NN  $-5,0$  m) angegeben. Dieser Wert würde sich als „Tiefenbegrenzung“ anbieten. Für die gesamte Zeit aller Strandaufspülungen (seit 1951) liegen aber nicht ausreichend viele Strandprofilmessungen vor, die bis in diese Tiefe reichen (STEPHAN, 1988). Die Zielsetzungen des Forschungsvorhabens (Wechselwirkungen zwischen dem Küstenschutzsystem, dem Strand und den marinen Wirkgrößen) gestatten es, die Tiefenbegrenzung auf NN  $-1,50$  m (etwa  $0,25$  m unter MTnw) anzuheben.

Die Abb. 12 zeigt Beispiele für Strandprofile. Dargestellt sind für das Bühnenfeld (A-D1) die gemessenen Profile „vor“ und „nach“ den sechs Aufspülungen von 1951 bis 1989. Das

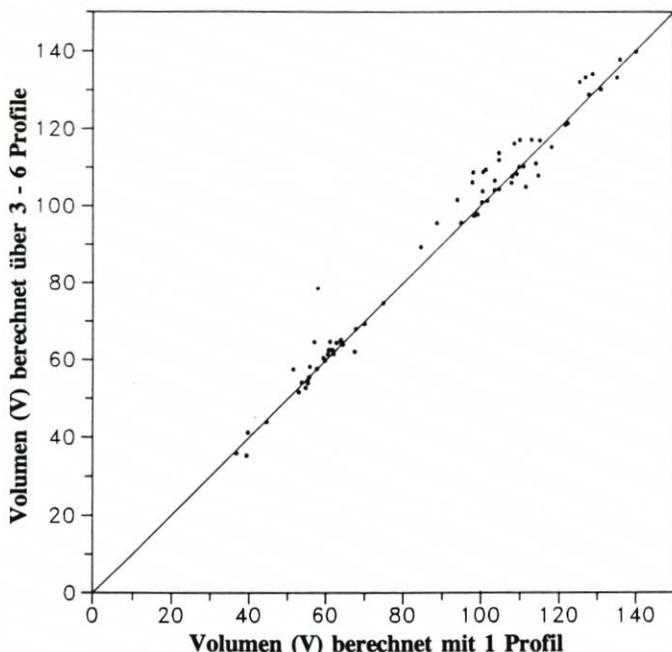


Abb. 11. Gegenüberstellung von Strandvolumenwerten (V) für Bühnenfelder auf Norderney, die mit allen verfügbaren Profilen (3 bis 6 Profile) oder nur dem Mittelprofil (1 Profil) berechnet wurden; horizontale Tiefenbegrenzung ist NN -4,0 m

„Referenzprofil (1951)“ ist auf dem unteren Bild mit ausgewiesen. Auch wenn einige Profile nur bis zu NN -1,50 m reichen, so wird doch erkennbar, daß die Aufspülungen, ausgehend von recht verschiedenen Strandlagen, vorgenommen und jeweils unterschiedliche Profile hergestellt wurden (Schrifttum: siehe Angaben auf der Abb. 4).

Bedingt durch die Gestalt und die Lage des Westkopfes der Insel Norderney sind die Küstenschutzwerke (Bühnenfelder) den Einwirkungen der natürlichen Umwelt in unterschiedlicher Weise ausgesetzt (Kap. 2, Abb. 2). Will man die Ergebnisse volumetrischer Berechnungen ursächlich deuten, verschiedene Standorte miteinander vergleichen und zu allgemeinen Erkenntnissen gelangen, so muß eine räumliche Zuordnung des Untersuchungsgebietes zu den großräumig sich entfaltenden Gestaltungsprozessen erfolgen. Dies war möglich, weil die dafür maßgebenden hydrographischen und morphologischen Gegebenheiten aufgrund vorliegender Untersuchungen weitgehend bekannt sind.

Wie auf Abb. 2 skizziert, gibt es einen Bereich, von dem aus die durch Seegang verursachten Bewegungsvorgänge in entgegengesetzte Richtungen gehen (Divergenzbereich). Ausgeführte Untersuchungen bestätigen, daß das seegangsinduzierte Geschehen für die hier zu betrachtenden Bühnenfeldbereiche maßgebend ist und die bereits von THILO/KURZACK (1951) begründete Festlegung des „Divergenzbereichs“ auf den westlichsten Teil des Inselkopfes (etwa zwischen den Bühnen A und C) auch heute noch zutrifft (NIEMEYER, 1991; DEN ADEL, 1991; WESTHOFF, 1990).

Der Divergenzbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß die Transporte in den Bühnenfeldern ganz überwiegend in Querrichtung verlaufen und keine größeren Materialzuführungen aus benachbarten Feldern vorhanden sind. Das erklärt, warum sich der Divergenzbereich in

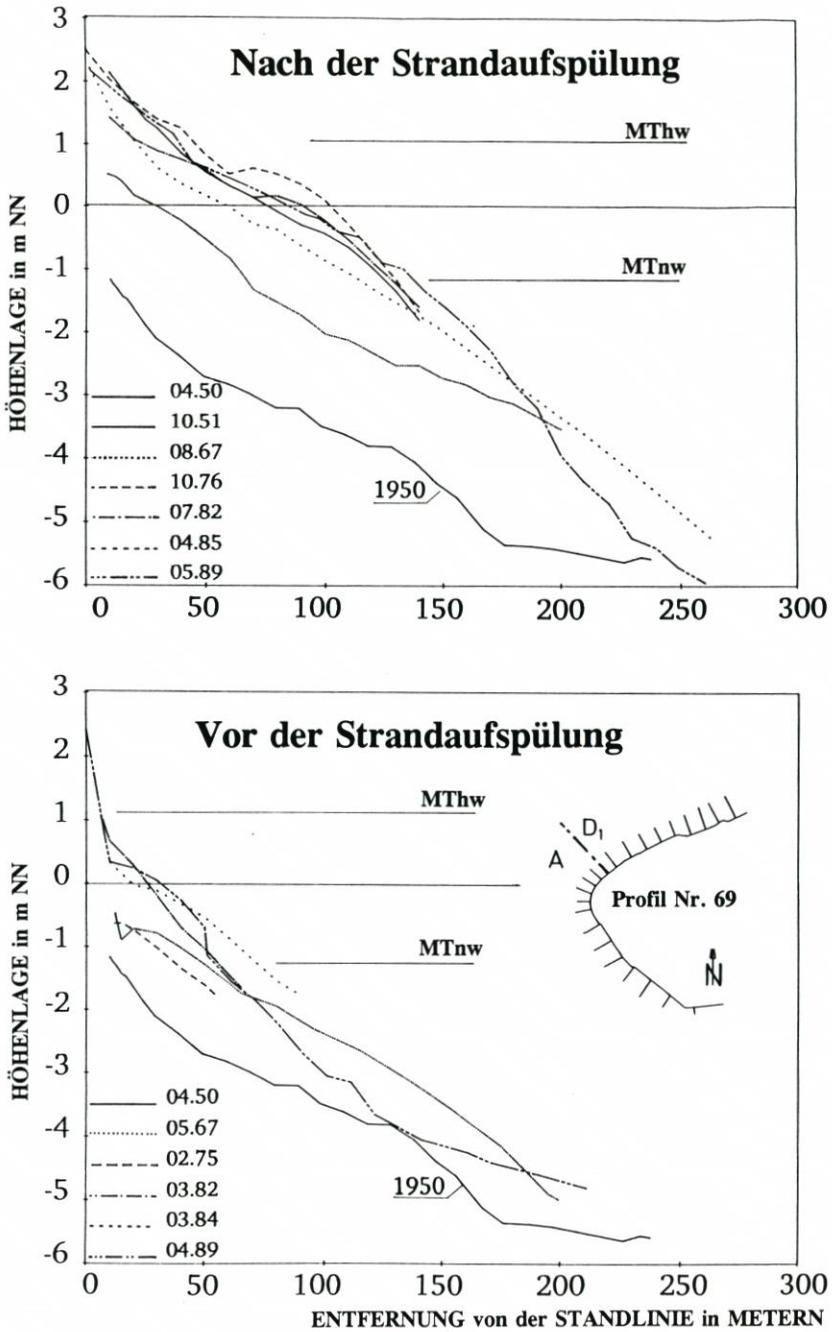


Abb. 12. Strandprofile im Bühnenfeld (A-D<sub>1</sub>) für den Zustand vor und nach den Aufspülungen

den Kornverteilungen der Abb.6 deutlich heraushebt. Da es im Schrifttum voneinander abweichende Aussagen zur Lage des Divergenzbereiches auf Norderney gibt, wird angemerkt, daß dieser nicht durch die größten relativen Verluste aufgespülter Sandmengen oder tiefste Strandlagen gekennzeichnet ist (siehe auch FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY, 1950).

Wegen der beschriebenen Eigenschaften wurde für die im Rahmen des Forschungsvorhabens vorgesehenen speziellen volumetrischen Untersuchungen der Bereich zwischen den Bühnen A und C (siehe Abb. 3) gewählt.

Um beidseitig des Divergenzbereichs weitere „Bereichseinheiten“ festlegen zu können, wurden die Volumeneinheiten ( $\Delta V$ ) für sämtliche Bühnenfelder ab 1951 berechnet und ausgewertet. Die Abb. 13 zeigt ein Ergebnis; die Strandvorspülungen sind durch die senkrechten Linien gekennzeichnet. Mit Verweis auf KUNZ (1991a) braucht hier nicht auf Einzelheiten eingegangen zu werden; der unterschiedliche Verlauf der Volumen-Zeitkurven, insbesondere auch die Auswirkungen der Aufspülungen, sind unmittelbar erkennbar. Gestützt auf das Ergebnis der Untersuchungen für einzelne Bühnenfelder wurden die sich beidseits des „Divergenzbereichs“

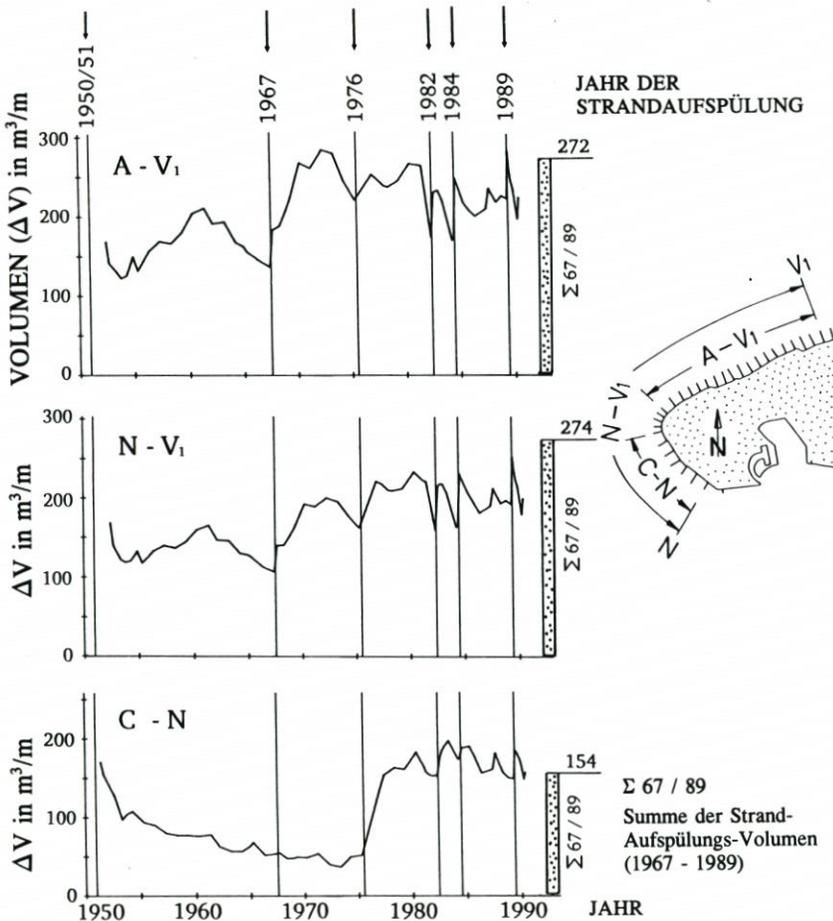


Abb. 13. Ganglinien von 1951 bis 1990 für Volumen ( $\Delta V$ ) von fünf Bühnenfeldern auf Norderney; oberhalb des Referenzprofils (1950) und der horizontalen Tiefenbegrenzung von NN -1,50 m

anschließenden Strandabschnitte in vergleichende Betrachtungen mit einbezogen. Ein Beispiel für die Bereiche C-N und A-V<sub>1</sub> ist auf Abb. 20 dargestellt.

### 9. Volumen-Zeit-Funktionen

Art und Korngröße des Strandmaterials beeinflussen das Transportverhalten und sind mitbestimmend für die Gestalt der Strandprofile. Im Bereich Norderney war kein größerer Sand zu gewinnen, so daß keine aussagefähigen Untersuchungen zur Abhängigkeit der Volumenänderungen (Strandverluste) vom Korndurchmesser ausgeführt werden konnten. Die auf den Abb. 5 und 6 enthaltenen Angaben geben Hinweise auf den Schwankungsbereich der  $d_{50}$ -Werte; bei den Angaben zum eingespülten Material ist zu berücksichtigen, daß während der anfänglichen Umformung des Aufspülkörpers ein überproportionaler Austrag von feinerem Material stattfindet. Aus veröffentlichten Ergebnissen läßt sich rückschließen, daß die Korndurchmesser des Strandmaterials in den aufgespülten Strandabschnitten von Norderney nicht so unterschiedlich sind, als daß man bei der Analyse der zeitlichen Volumenänderungen materialspezifische Korrekturen vornehmen müßte (SWART, 1992). Dies trifft grundsätzlich auch zu, wenn man die umlagerungs-bedingten Korngrößen-Sortierungseffekte in die Betrachtungen mit einbezieht. Die Umlagerungen des frisch aufgespülten Materials (Phase A nach Kap. 7) werden zunächst noch von den durch die Aufspülung erzeugten sedimentologischen Anfangsbedingungen mit beeinflußt. Bei allen Angaben zum Korndurchmesser ist zu vergegenwärtigen, daß das untersuchte Material unterschiedliche Schillanteile (Muschelbruch) enthält, was aber auf das Ergebnis der volumetrischen Untersuchungen keinen signifikanten Einfluß zu haben scheint (WESTHOFF, 1990).

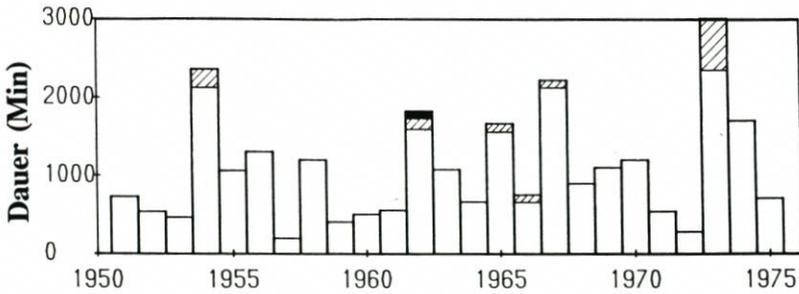
Auf Norderney wurden nach 1976 die Strandaufspülungen in so kurzen Zeitabständen wiederholt, daß lediglich für die davorliegende Zeitspanne die Beziehung zwischen Volumen und Zeit über mehr als fünf Jahre zu untersuchen ist. Auf den Untersuchungsbereich (A-C) wirkte sich die kleinvolumige Aufspülung des Jahres 1967 nur wenig aus, so daß die Zeitspanne zwischen 1951 und 1967 (16 Jahre) insgesamt ausgewertet werden kann.

Für Untersuchungen zum Verhalten während der ersten fünf Jahre nach Aufspülung können Daten aller Aufspülungen verwendet werden. Voruntersuchungen ergaben, daß dabei die Aufspülung des Jahres 1967 wegen zu geringer Mengen und diejenige des Jahres 1982 wegen unzureichenden Datenumfangs (1984 war bereits die nächste Aufspülung) nicht mit einzubeziehen sind.

Alle Volumenermittlungen erfolgten als  $\Delta V$  nach Abb. 7.2 in dem „Bilanzraum“, der durch das „Referenzprofil von 1950“ und durch die „Tiefenbegrenzung NN -1,50 m“ festgelegt ist.

Das Ergebnis für die Zeitspanne 1951 bis 1976 ist auf dem unteren Bild der Abb. 14 dargestellt. Die Meßpunkte wurden geradlinig zu einem Kurvenzug verbunden, dessen Gestalt auch von den Zufälligkeiten der zugrundeliegenden „Momentaufnahmen“ bestimmt wird. Die dargestellte Zuordnung von Jahreswerten für Verweilzeiten und Eintrittshäufigkeiten von Sturmflutwasserständen (Klassifikation nach NIEMEYER, 1986) ermöglichte keine Rückschlüsse; erst Untersuchungen in kleinskaligem Zeitmaßstab, wie sie für Norderney von HOMEIER (1975) veröffentlicht wurden, lassen die Abnahme und die nachfolgende erneute Zunahme der  $\Delta V$ -Werte infolge sturmflutzeugter Profulumformungen erkennen. Entsprechendes gilt allgemein für die saisonalen Anpassungen an das jeweilige Seegangsklima, das vereinfacht durch die Begriffe „Sommer- und Winterprofile“ beschrieben wird (BASCUM, 1954). Die Einbeziehung integrierter Wellenenergiegrößen ermöglicht auch mit den Nor-

### ÜBERSCHREITUNGSDAUER VON GRENZWASSERSTÄNDEN



### STUMRFLUTEN je JAHR

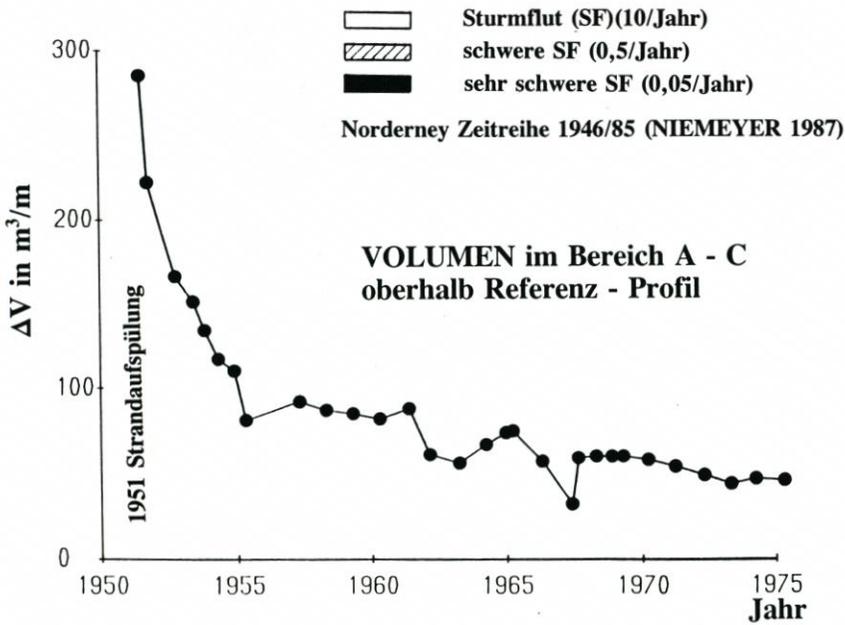
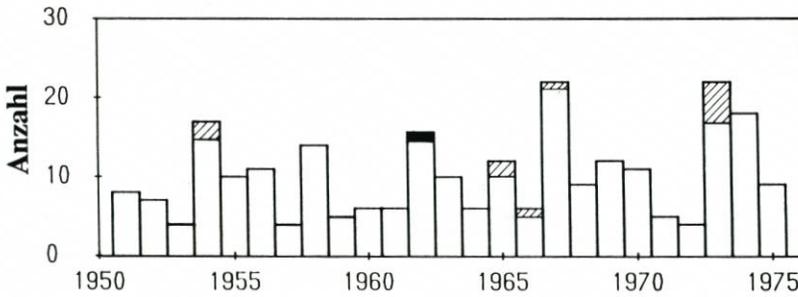


Abb.14. Zuordnung der Überschreitungsdauern von Grenzwasserständen nach DIN 4049 sowie der Anzahl von Sturmfluten pro Jahr (Pegel Norderney, 1946/85) zur Veränderung der Volumengröße  $\Delta V$  für den Bühnenbereich (A-C) in der Zeit von 1951 bis 1976

derney-Daten einen empirischen Nachweis von Beziehungen zu Verlust-Volumen (PÄTZOLD, 1882). Im KFKI-Forschungsvorhaben „Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt“ konnten dazu Ergebnisse auf der Grundlage umfangreicherer Daten gewonnen werden (DETTE, 1991).

Für Strandabschnitte ohne eingebaute Querwerke (Buhnen) wird davon ausgegangen, daß sich die „Verlustmengen aus einem an die jeweiligen Verhältnisse angepaßten Bilanzgebiet“ und die „verstrichene Zeit bezogen auf den Nullpunkt der zuzuordnenden Zeitskala“ – siehe ( $t_0$ ) für die Phase B nach Abb. 10 – annähernd einer e-Funktion zuordnen lassen (AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE, 1977, 1981; FÜHRBÖTER et al., 1976). Die Abb. 15, linkes Bild, weist im semilogarithmischen Maßstab aus, daß dieses nicht für die bereits mit der Abb. 14 vorgestellten Daten von Norderney möglich ist. Es sind wenigstens zwei Zeitabschnitte zu unterscheiden; in der Abbildung wurden dafür I (1951–1955) und II (1956–1976) gewählt. Die angepaßten e-Funktionen sind ausgewiesen; die zugeordneten „Halbwertzeiten“ betragen für I etwa 29 Monate und für II etwa 210 Monate. Hätte man bereits 1956 eine erneute Aufspülung erwogen, so hätte man sich dabei auf die Funktion  $\Delta V_I$  mit der viel zu kleinen Halbwertzeit gestützt, wäre somit von zu großen Verlusten ausgegangen.

Um für die Zeitspanne von fünf Jahren alle vier dafür verwertbaren Aufspülungen in eine Beziehung einordnen zu können, wurden die  $\Delta V$ -Werte auf eine einheitliche Zeitachse transformiert. Die iterativ durchgeführte Transformation berücksichtigte die unterschiedliche Größe der Auffüllung des Bühnenfeldes durch die jeweilige Aufspülung über speziell darauf abgestimmte Zeitzuordnungen (KUNZ, 1991a). Das linke Bild der Abb. 15 zeigt das Ergebnis. Der ausgewiesenen e-Funktion ( $\Delta V_{60}$ ) ordnet sich eine Halbwertzeit von 37 Monaten zu. Diese Exponential-Funktion würde als maßgebend zugrunde gelegt worden sein, wenn für Norderney nicht die auswertbare lange Datenserie von 1951 bis 1976 verfügbar wäre. Bei einer Extrapolation über die belegten fünf Jahre hinaus überschätzte man dadurch die Größe der Verluste etwa um den Faktor sieben. Werden diese mit  $\Delta$  bezeichnet und verwendet man die in der Abb. 15 eingetragenen Funktionen in einer die Halbwertzeit als Konstante im Exponenten ausweisenden Form, so ergäbe sich die Verlustüberschätzung in Abhängigkeit von der Zeit  $\Delta(t)$  zu:

$$\Delta(t) = \Delta V_{60} - \Delta V_I = 110 (2^{-t/210}) - 233 (2^{-t/37})$$

$$\Delta(t) \text{ in m}^3/\text{m}; \quad t \text{ in Monaten mit } t > 60$$

Die Größe  $\Delta$  ist in Zusammenhang mit der Wirkung der Buhnen zu bringen; hierauf und auf die Frage einer Verallgemeinerung wird weiter unten zurückgekommen.

Die mit der Abb. 15, linkes Bild, vorgestellte Anpassung durch zwei Funktionen ist unbefriedigend; sie ergibt eine Unstetigkeitsstelle (Knick im Schnittpunkt). Es wurde daher eine stetige Exponential-Funktion angepaßt, die aber im Exponenten nicht mehr eine Konstante, sondern eine von der Zeit abhängige Variable aufweist. Die Abb. 16 zeigt das Ergebnis nach KUNZ (1991a). Der unteren Darstellung der Halbwertzeit-Funktion  $t_h(\Delta V_{III})$  sind die konstanten Halbwertzeiten für die mit den Abb. 15 vorgestellten e-Funktionen zugeordnet. Ein ursächlicher Zusammenhang der dargestellten systematischen Abweichungen von konstanten Exponenten (Halbwertzeiten) mit einer strandstabilisierenden Wirkung der Buhnen läßt sich durch die Verknüpfung mit Erkenntnissen aus den zuzuordnenden hydrographischen und sedimentologischen Teilprojekten belegen (NIEMEYER, 1991; WESTHOFF, 1990).

Für praktische Fragestellungen ist die Änderung der „Halbwertzeit“ und der „Verlustrate aus dem Bilanzgebiet“ in Abhängigkeit vom Strandvolumen ( $\Delta V$ ) von Interesse. Die Abb. 17 zeigt hierzu das Ergebnis für die in der Abb. 16 dargestellten Größen. Für den Divergenzbereich (A–C) läßt sich aus der Kurve (2) der Abb. 17 unmittelbar ablesen, daß sich die Verluste enorm vergrößern, sobald man das Volumen des „Bilanzkörpers“, also des Strand

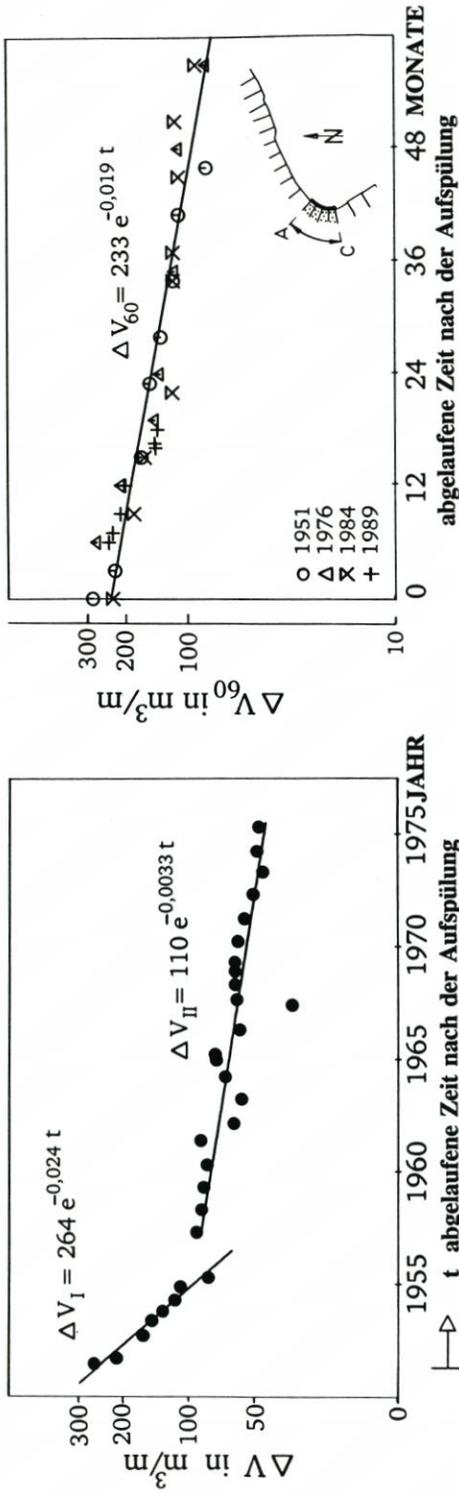


Abb. 15. Semi-logarithmische Darstellung für die Abhängigkeit der Volumengröße  $\Delta V$  des Bühnenbereichs (A-C) von der Zeit; links: 1951 bis 1976 (Strandaufspülung 1951/52); rechts: bis zu 60 Monate, bezogen auf eine normierte Zeitskala für die Aufspülungen der Jahre 1951, 1976, 1984, 1989

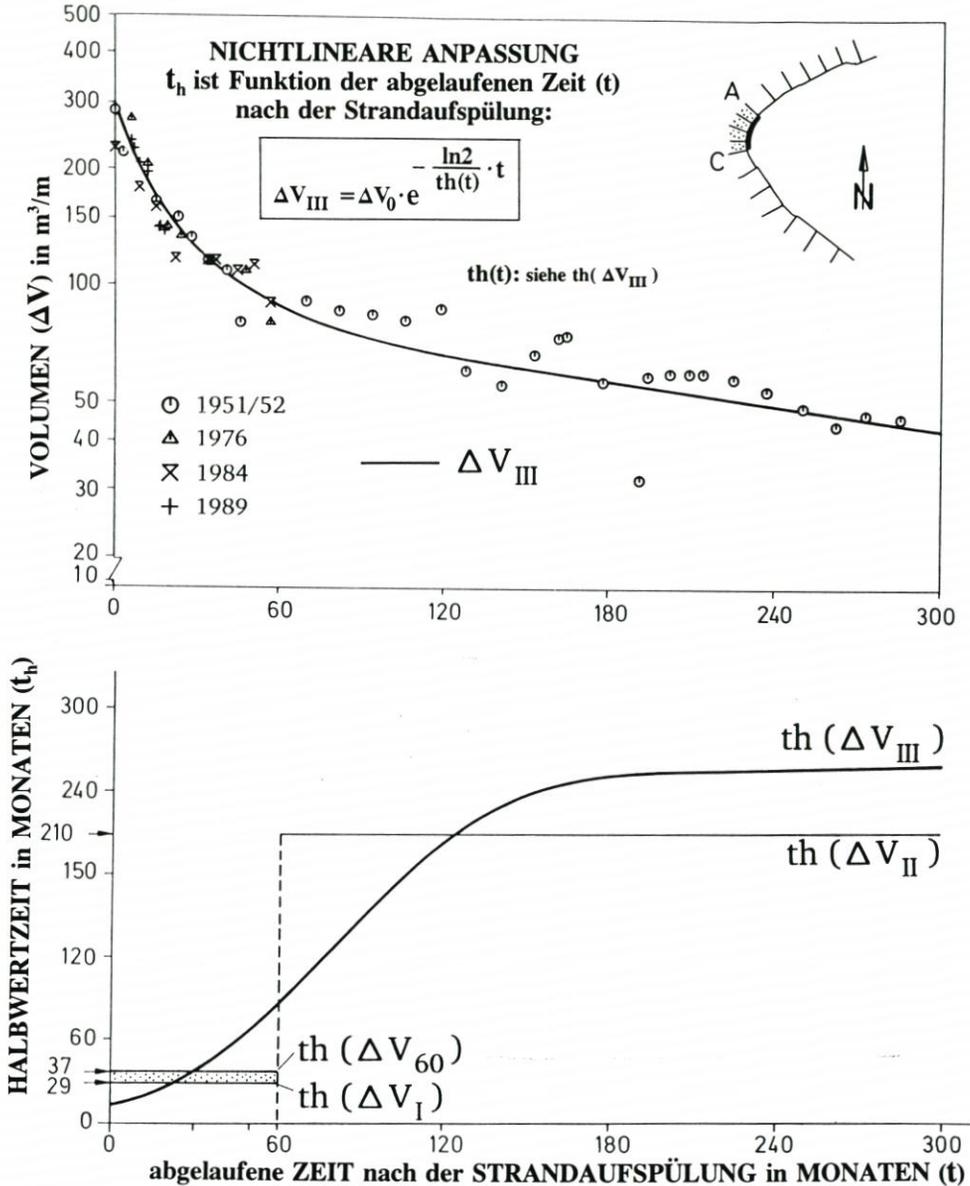


Abb. 16. Semi-logarithmische Darstellung für die Änderung der Volumengröße  $\Delta V(III)$  mit der Zeit für alle auswertbaren Strandaufspülungen von 1951 bis 1989 sowie Ausgleichsfunktion mit  $th(t)$  im Exponenten (oberes Bild); Halbwertzeit als Funktion der Zeit ( $t_h(t) = th(\Delta V_{III})$ ) und Konstanten nach Abb. 15 (unteres Bild)

bereichs oberhalb des Referenz-Profiles (1951) und der NN -1,50-m-Begrenzung, über den Wert von etwa  $70 m^3/m$  erhöht. Oberhalb dieses Volumenwertes, also mit höheren Strandlagen, verringert sich der strandstabilisierende Einfluß der Bühnen zunächst sehr schnell. Daher ist für eine Minimierung der Sandverluste besonders entscheidend, daß der Strand nicht

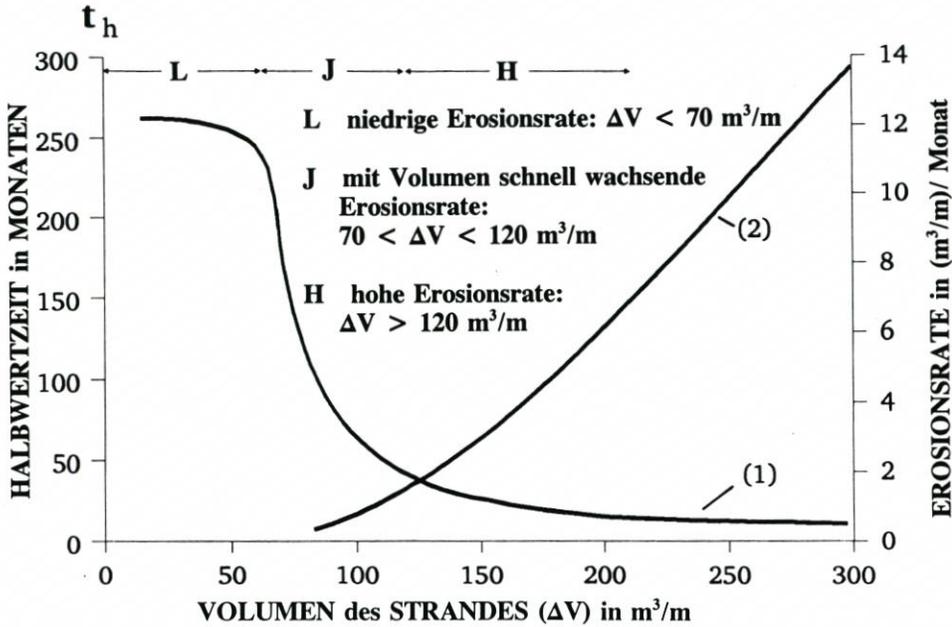


Abb. 17. Halbwertszeit (1) und Erosionsraten/Verlustraten (2) als Funktion des Strandvolumens ( $\Delta V$ ); Bühnenbereich (A-C)

in einer höheren Profillage gehalten wird, als dies für die Sicherung der Küstenschutzwerke gegen Sturmfluteinwirkungen notwendig ist (Minimalvolumen  $\Delta V_{\min}$ ).

Für Strände, bei denen man die Änderung der Volumengröße  $\Delta V$  von der Zeit durch eine e-Funktion mit konstanter Halbwertszeit ( $t_h$ ) beschreiben kann, steigt die Verlustrate linear mit dem  $\Delta V_{\min}$  an. FÜHRBÖTER (1991) beschreibt anschaulich die Gesetzmäßigkeiten dieses Sonderfalls, wobei er die Betrachtungen auf Volumen oberhalb einer horizontalen Tiefenbegrenzung ( $V$  nach Abb. 7.1) bezieht. Ausgehend von diesen Kenntnissen hat bereits vor über 30 Jahren KRAMER (1958) vorgeschlagen, man solle möglichst geringe Mengen aufbringen, also kontinuierlich aufspülen.

Das in der Abb. 17 ausgewiesene Strandvolumen  $\Delta V$  darf ein festzulegendes Minimalvolumen ( $\Delta V_{\min}$ ) nicht unterschreiten. Nur oberhalb dieses Wertes kann man daher über die Menge der Strandvorspülung die davon abhängigen Verlustraten ( $V_R$ ) beeinflussen. Das  $\Delta V_{\min}$  ergibt sich aus der Zielvorgabe für die jeweilige Sandvorspülung (Nutzung, Schutz). Durch die Menge der Strandvorspülung ( $V_A$ ) wird bestimmt, um welchen Betrag sich das Bilanzvolumen ( $\Delta V$ ) über das  $\Delta V_{\min}$  erhöht. Das in der Abb. 17 ausgewiesene Volumen teilt sich damit auf in  $\Delta V = \Delta V_{\min} + V_A$ .

Das zur Gewährleistung der Schutzwirkung erforderliche Minimalvolumen ( $\Delta V_{\min}$ ) ist auf Norderney für jedes Bühnenfeld aufgrund küstenschutztechnischer Überlegungen festzulegen. Dies führt zu Fragestellungen einer Kostenoptimierung zwischen Aufspülmengen ( $V_A$ ) und den von der Gestaltung und dem Erhaltungszustand der Küstenschutzbauwerke abhängigen Größen des Minimalvolumens ( $\Delta V_{\min}$ ).

Die Optimierung setzt voraus, daß man weiß, wie sich die Verluste aufgespülter Sandmengen mit den Variablen ( $\Delta V_{\min}$ ) und ( $V_A$ ) ändern. Dies ist für den Bereich (A-C) auf Abb. 18 dargestellt. Nach KUNZ (1991b) wurde dafür die funktionale Abhängigkeit zwischen

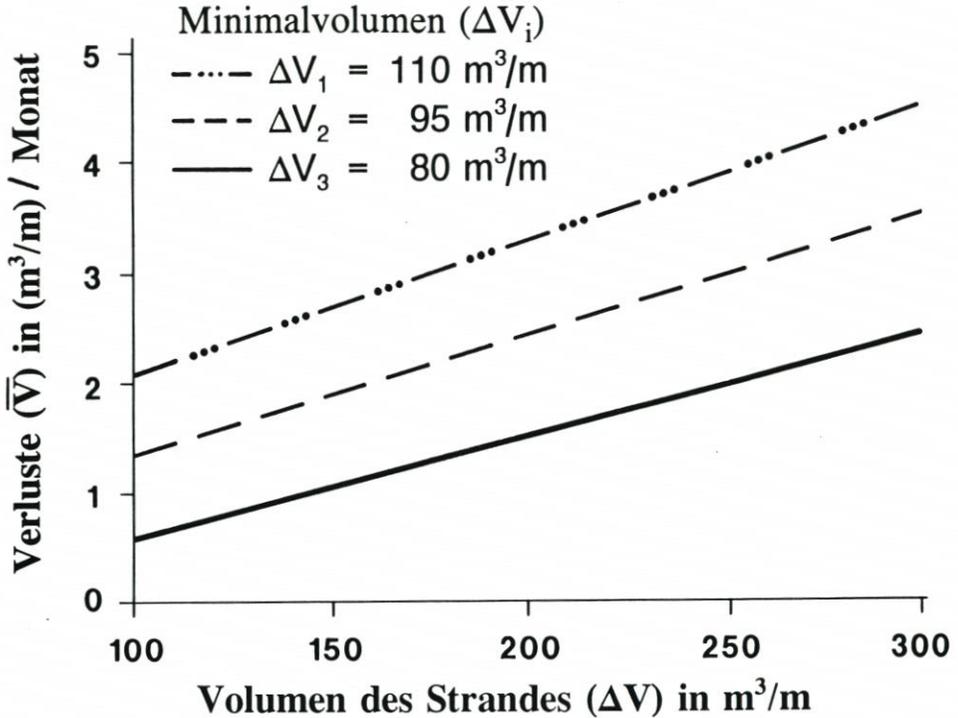


Abb. 18. Größe der Verlustraten ( $\bar{V}$ ) als Funktion des Strandvolumens ( $\Delta V$ ) oberhalb des Referenzprofils (Gleichgewichtsprofils) und dreier vorgegebener Größen des Minimalvolumens ( $\Delta V_i$ ) für Wiederholungsaufspülungen – Bühnenfelder (A–C), Norderney

der Verlustrate  $V_R$  und der Volumengröße  $\Delta V$  verwendet, die in Abb. 17 ausgewiesen ist. Als  $\min \Delta V_i$  sind drei Beträge für das „Minimalvolumen“ (80, 95, 110  $\text{m}^3/\text{m}$ ) vorgegeben worden; die im „Bilanzgebiet“ nach Aufspülung vorhandenen Volumen ( $\Delta V$ ) wurden auf den Bereich bis 300  $\text{m}^3/\text{m}$  begrenzt. Damit ergeben sich maximale Aufspülmengen ( $V_A$ ) zwischen 190 und 220  $\text{m}^3/\text{m}$ .

Die Sandverluste wurden für jeweils vorgegebene  $\Delta V_{\min}$ - und  $V_A$ -Werte über die Zeitspanne berechnet, die zwischen einer Aufspülung und der mit Erreichen des Minimalprofils nachfolgend erneut erforderlichen Aufspülung (Wiederholungsintervall) liegt. Die über das Wiederholungsintervall gemittelten Sandverluste sind auf der Ordinate der Abb. 18 als  $\bar{V}$  ausgewiesen. Der Berechnung lagen somit analoge Überlegungen zugrunde, wie sie auch von FÜHRBÖTER (1991) auf Daten von Sylt angewendet wurden, allerdings unter Verwendung der in der Abb. 16 ausgewiesenen Exponentialfunktion für die Norderney-Situation. Die dort mitgeteilten allgemeinen Ansätze gehen von Exponentialfunktionen mit konstanter Halbwertszeit aus, die auf die Norderney-Verhältnisse für größere Wiederholungsintervalle nicht und für kürzere Intervalle nur eingeschränkt anwendbar sind. Bei Vergleichen ist dieser methodische Unterschied zu beachten. So steigt beispielsweise die Verlustrate beim  $\Delta V_{\min}$  nicht mit dessen Größe linear an, sondern liegt bei den Beispielen der Abb. 18 mit 2,6 (anstelle  $110/80 = 1,4$ ) und 2,0 (anstelle  $95/80 = 1,2$ ) wesentlich höher.

Werden die mit dem Hauptmeßfeld ( $D_1-E_1$ ) im Rahmen des Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ ermittelten seegangs-

induzierten Strömungen und deren Beeinflussung von den Buhnen, die das Feld begrenzen, auf die Felder (A-C) prinzipiell übertragen, dann läßt sich daraus rückschließen, daß die dargestellte Abhängigkeit der Halbwertzeit wesentlich durch die Buhnen bewirkt ist. Eine der wichtigen Einflußgrößen scheint dabei der Höhenunterschied zwischen mittlerem Wasserstand und Strand zu sein (NIEMEYER, 1991).

Die am Beispiel des Divergenzbereichs der Norderneyer Strandsituation ermittelten Zahlenangaben sind fallspezifisch; dennoch lassen sich Erkenntnisse aus den Untersuchungen ableiten, die verallgemeinert werden können (siehe Abschnitt 11).

#### 10. Längstransport von Sandverlusten aus dem Divergenzbereich in benachbarte Strandabschnitte

Die vorgestellten volumetrischen Untersuchungen für den „Divergenzbereich“ wurden in vergleichende Betrachtungen für die benachbarten Strandabschnitte eingebunden (Kap. 8, Abb. 13). Teile der Untersuchungen befaßten sich mit der Frage, welche Verlustmengen aus dem „Bilanzvolumen“ durch Längstransporte in andere Bühnenfelder gelangen und damit wiederum für den Schutz der Küstenbauwerke verfügbar sind.

Abb. 19 zeigt ein Ergebnis. Einander zugeordnet sind die Volumenentwicklungen von 1951 bis 1991: für die sich in nord-östlicher und süd-östlicher Richtung anschließenden Bereiche (A-V<sub>1</sub> und C-N); für den Gesamtbereich (N-V<sub>1</sub>). Auf der rechten Seite der Abbildung sind als vertikale Balken die Mengen ausgewiesen, die nach der ersten Aufspülung (1951/52) dann ab 1967 insgesamt den unterschiedenen Bereichen zugeführt wurden. Ein Vergleich der Volumen-Ganglinien ermöglicht unmittelbar einige Feststellungen:

- Ab 1976 wurden im Gesamtabschnitt (N-V<sub>1</sub>) künstlich die Gesamtvolumen auf höherem Niveau (zunehmende Tendenz) gehalten, als das nach der ersten Strandaufspülung von 1951/52 der Fall war.
  - Der Divergenzbereich versorgte beide angrenzenden Bereiche (A-V<sub>1</sub> und C-N) mit Sand (Längstransport).
  - Der süd-östliche Abschnitt (C-N) ist überversorgt. Das Gesamtvolumen wird durch die Aufspülungen ebenfalls auf einem hohen Niveau gehalten.
- Verbindet man diese Feststellungen mit den in den vorherigen Kapiteln dargestellten funktionalen Abhängigkeiten der Sandverluststraten von den Aufspülmengen und den Wiederholungsintervallen, so läßt sich für die Verringerung der Sandverluste folgendes rückschließen:
- Die Sandmengen pro Aufspülung sollten reduziert und der Aufspülbereich sollte noch mehr auf die Bühnenabschnitte des Divergenzbereichs selbst, sowie eines nord-östlich angrenzenden Teilbereichs beschränkt werden (feeder-beach-Funktion).
  - Der Strand in den einzelnen Bühnenfeldern sollte nicht wesentlich höher aufgespült werden als dies jeweils erforderlich ist, um das Ziel der Aufspülung (Sicherung der Inselschutz-Bauwerke gegen Zerstörung durch Sturmfluten) zu gewährleisten.

Ob die dargestellten Grundsätze für die Verringerung der Sandverluststraten zu einer Optimierung auch unter Kostengesichtspunkten führen, das hängt wesentlich mit davon ab, zu welchen Einheitspreisen (DM/m<sup>3</sup> Sand) man unterschiedlich große Sandmengen mit den jeweils verfügbaren Spültechniken bereitstellen kann. Dies wird im folgenden Schlußkapitel noch kurz angesprochen.

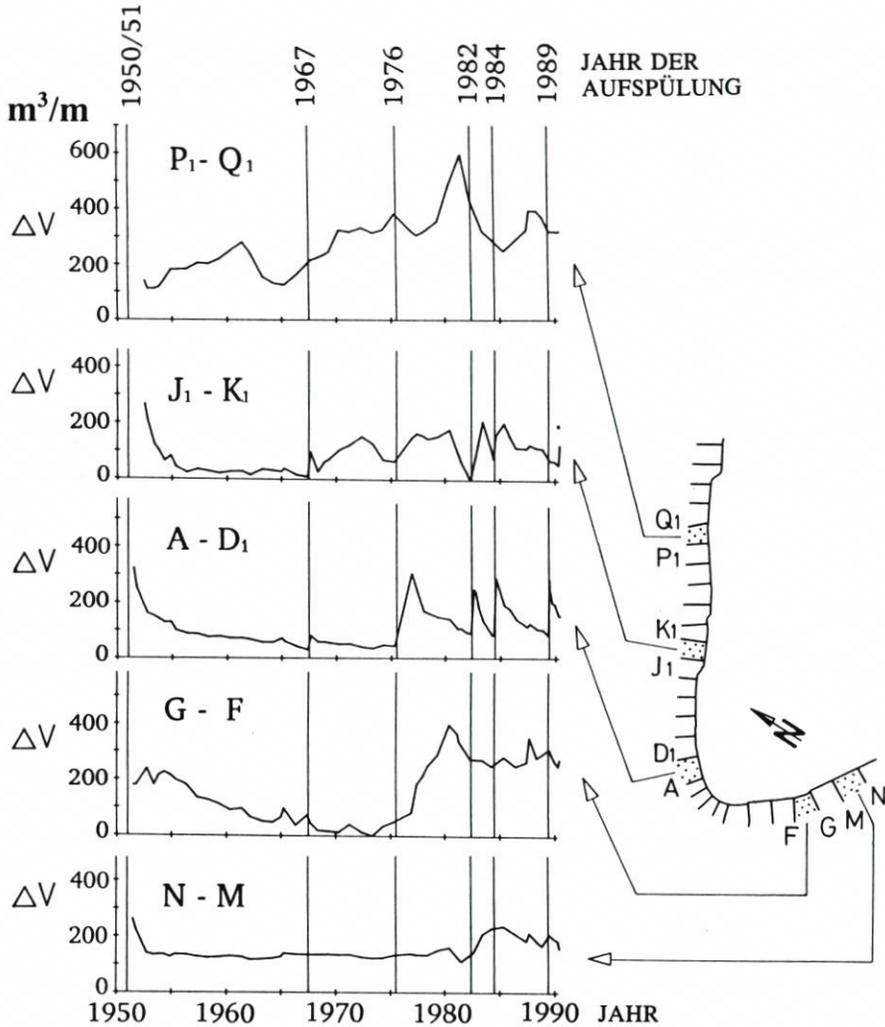


Abb. 19. Strandvolumen im definierten „Bilanzraum“ für die Bühnenstreifen (N-C), (A-V1), (N-V1) auf Norderney von 1951 bis 1990 mit Angaben zu den aufgespülten Volumen-Summen (67/69)

### 11. Erkenntnisse zur Optimierung von Strandvorspülungen, Zusammenfassung, Ausblick

Volumen(Verlust)-Zeit-Beziehungen für ausgewählte Strandabschnitte können unsere Kenntnisse über die ablaufenden Transportprozesse erweitern und lassen Rückschlüsse auf die Optimierung von Strandvorspülungen (Aufspülungen) natürlicher oder mit Schutzwerken verbauter Küsten zu. Dies gilt insbesondere dann, wenn den volumetrischen Erhebungen die Ergebnisse von Untersuchungen zur Erfassung der Naturkräfte und der davon ausgehenden Wirkungen auf den Massentransport zugeordnet werden können. Voraussetzung ist, daß für die Volumenberechnungen die „Bilanzräume“ so abgegrenzt werden, daß sie den jeweiligen

örtlichen Gegebenheiten und den mit der Strandvorspülung verfolgten Schutz- oder Nutzungskonzepten richtig angepaßt sind.

Zur Abgrenzung des „Bilanzraumes“ ist zusätzlich zu einer horizontalen Tiefenbegrenzung noch ein „Referenzprofil“ (Gleichgewichtsprofil) vorzugeben, sofern man Funktionen erhalten will, bei denen die Größe des Strandvolumens mit fortschreitender Zeit gegen Null geht.

Für Fragestellungen der Praxis sind durchweg zu unterscheiden:

- Bilanzraum, mit dem die anfänglichen Umformungen des Aufspülkörpers in einen an die Naturverhältnisse „angepaßten Ausgangszustand“ zu beschreiben sind.
- Bilanzraum, der geeignet ist, die weitere zeitliche Entwicklung des in den „Ausgangszustand“ bereits umgeformten Aufspülbereichs zu analysieren.

Die Herleitung von Volumen-Zeit-Funktionen hat für die anfängliche Umformung des aufgespülten „Störkörpers“ und die nachfolgende Strandentwicklung getrennt zu erfolgen: Dazu sind unterschiedliche Nullpunkte für die Zeitskalen einzuführen. Dies wird vielfach nicht beachtet. Es werden dann nicht zueinander passende Daten miteinander verglichen und als homogene Datenmenge behandelt, was dazu führt, daß anfängliche Umformungen des als „Störung“ eingebrachten Aufspülkörpers in einen den natürlichen Gegebenheiten angepaßten Zustand (Ausgangszustand) als „Verluste“ mißgedeutet werden. Hiermit begründet man dann die folgende, nicht zutreffende Erwartung: bei vorgegebener Aufspülmenge sei die Größe der Verlustrate (aus dem letztlich für den Erfolg einer Aufspülung maßgebenden „Strand nach Umformung in den angepaßten Ausgangszustand“) durch die anfängliche Formgebung des Aufspülkörpers wesentlich zu beeinflussen. Anmerkung: Die aufgezeigte Fallunterscheidung ist prinzipiell auch von Bedeutung, wenn der Aufspülkörper nicht nur Sand zuführen, sondern auch über längere Zeit als „Bauwerk“ wirken und das hydrodynamisch-morphologische Geschehen großräumig beeinflussen soll (FÜHRBÖTER, 1976; RAUDKIVI, 1991).

Die Annahme, daß das Volumen eines aufgespülten Strandes mit der Zeit entsprechend einer Exponentialfunktion mit konstantem Exponenten (Halbwertzeit) sich verringere, sollte jeweils durch Naturmessungen überprüft werden. Im Falle Norderney konnte durch Untersuchungen des Divergenzbereichs gezeigt werden, daß die Annahme konstanter Halbwertzeiten nicht zutrifft. Wird eine e-Funktion angepaßt, dann weist diese im Exponenten eine Halbwertzeit auf, die sich mit der Zeit vergrößert.

Vergleiche mit hydrographischen und sedimentologischen Untersuchungsergebnissen zeigen, daß die zeitabhängige Zunahme der Halbwertzeit im Zusammenhang zu sehen ist mit einer strandstabilisierenden, sandverlustmindernden Wirkung der Buhnen, die von der relativen Höhe zwischen Strand, Wasserstand und Bühnenkrone abzuhängen scheint (WESTHOFF, 1990; KUNZ, 1991a; NIEMEYER, 1991).

Bei einer Küste, die durch Buhnen stabilisiert ist, können die Verlustraten in wesentlichem Ausmaß nur durch die Größe der strandlängen-normierten Aufspülmenge beeinflusst werden. Im Fall Norderney vergrößern sich die Verlustraten überproportional mit der Sandmenge, die oberhalb des Minimalprofils ( $\Delta V_{\min}$ , das ist die Sandmenge, die im Bilanzraum mindestens vorhanden sein muß, um das Schutzziel zu gewährleisten) aufgebracht wird (maßgebend ist der Zustand nach Abschluß der anfänglichen Umformung des Aufspülkörpers in den „Ausgangszustand“, der den örtlichen Naturwirkungen entspricht); die  $\Delta V_{\min}$ -Werte ergeben sich aus dem Ziel „Sicherung der Schutzwerke gegen Zerstörung bei der Bemessungssturmflut“.

Die Aussage, daß eine Minimierung der Sandverluste aus dem „Ausgangszustand“ durch wiederholtes Aufspülen möglichst kleiner Sandmengen ( $m^3/m$ ) zu erreichen ist, gilt analog auch für Strände ohne Buhneneinbauten, bei denen die zeitliche Entwicklung von Strandvolu-

men (definierter Bilanzraum) durch eine e-Funktion mit konstanter Halbwertszeit beschrieben werden kann. In welchem Maße sich die Verlustraten mit den strandlängen-normierten Volumeninhalten ändern, das hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab. Bei vorgegebenem Minimalprofil ( $\Delta V_{\min}$ ) ist die Halbwertszeit (Konstante oder Funktion der Zeit) die wesentliche Einflußgröße. Die geringsten Verlustraten, mit denen man durch die Strandauffüllung ausreichende Strandprofile gewährleistet, sind zu erreichen, indem gerade eben das „Minimalprofil“ durch eine kontinuierliche künstliche Sandzufuhr erhalten wird. Dies hat bereits KRAMER (1960) für Norderney vorgeschlagen.

Um zu einer Minimierung der Gesamtkosten einer Strandaufspülung zu gelangen, sind „Sandverlustraten ( $m^3/m$  Strand)“ und „Vorspülkosten ( $DM/m^3$ )“ im Zusammenhang zu betrachten. Verlustraten und volumenspezifische Kosten hängen in unterschiedlicher, zumeist entgegengerichteter Weise von dem strandlängen-normierten „Volumen der Auffüllung ( $\Delta V - \Delta V_{\min}$ )“ ab. Das Ergebnis dieser Verlustmengen-Kosten-Optimierung wird wesentlich von standortspezifischen Faktoren bestimmt.

Beim Einbringen des Aufspülkörpers unterhalb des Tidehochwassers kann durchweg auf eine Anpassung an natürliche Strandprofile verzichtet werden. Vielmehr gilt es, die benötigten Sandmengen möglichst preisgünstig einzubringen. Der so aufgespülte „Störkörper“ formt sich dann durch die Einwirkungen der Naturkräfte derart um, daß sich die natürlichen Strandneigungen durch Sandverlagerungen ausbilden. Die Größe der dabei umgelagerten Sandmengen hängt von der Form des Aufspülkörpers ab. Die gebräuchliche Methode einer vom trockenen Strand ausgehenden Aufspülung erbringt durchweg Austräge aus dem „Bilanzkörper“, während Auffüllungen tieferer Vorstrandbereiche zu Einträgen führen können. Entscheidend ist, welcher Anteil der verspülten Sandmenge nach der anfänglichen Umformung dann zunächst in den aufzufüllenden Strandquerschnitt (Volumenerhöhung des Bilanzkörpers) gelangt ist und was dieser kostet. Daher wurde bei der „versuchsorientierten Strandvorspülung 1992“ (KFKI-Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen in Bühnen-Deckwerks-Systemen“) auf Norderney die Versuchsaufspülung in Form von „Sandhöften“ ausgeführt (ERCHINGER, 1991), um deren Eignung als eine preiswerte Methode zur Auffüllung tieferer Strandprofilbereiche zu erkunden.

*Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des KFKI-Verbundforschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ ausgeführt. Sie waren eingegliedert in das Teilvorhaben „Naturuntersuchungen“ der Forschungsstelle Küste, Norderney. Das Vorhaben ist vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) unter MTK 0385 gefördert worden.*

## 12. Schriftenverzeichnis

- ARBEITSGRUPPE NORDERNEY: Gutachtliche Stellungnahme des Küstenausschusses Nord- und Ostsee...; Die Küste, Jg. 1. H. 1, 1952.
- AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE der HTG und DGEG: Empfehlungen für Strandauffüllungen als Küstenschutz; Naßbaggerberichte Bd. 5, 1977 und Die Küste, H. 36, 1981.
- BASCOM, W. H.: Characteristics of natural beaches. Proc. 4th Conf. o. Coast. Eng., ASCE, 1954.
- BRUUN, P.: Coastal Erosion and Development of Beach Profiles. Beach Erosion Board Technical Memorandum No. 44 Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 1954.
- DEAN, R. G.: Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Department of Civil Engineering Report No. 12 Newark: University of Delaware, 1977.
- DEN ADEL, J. D. et al.: Wave model application in a Wadden Sea Area. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.

- DETTE, H. H.: Energetische Betrachtungen zu seegangserzeugten Änderungen der Küstenmorphologie. Statusseminar Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, BMFT, Bonn, 1991.
- 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. F.: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog; Die Küste, H. 43, 1986.
- ERCHINGER, H. F. u. LAUE, M.: Sechste Strandaufspülung mit besonderer Berücksichtigung der Sandentnahme und Transporttechniken. Zwischenbericht zum KFKI-FV „Wechselwirkungen“, Staatl. Amt f. Insel- und Küstenschutz, Norden, 1989.
- ERCHINGER, H. F.: Beach Replenishment in consideration of natural process and profiles. Proc. Conf. o. River a. Coast. Eng., Loughborough University, MAFF., 1991.
- ERCHINGER, H. F. u. KOTZBAUER, U.: Schlußbericht zum KFKI-FV „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“, Teilvorhaben „Versuchsorientierte Strandaufspülung“. StAIK Norden, 1992.
- ERCHINGER, H. F. u. TILLMANN, B.: Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste, H. 54, 1992.
- FENNEMAN, M. M.: Development of the profile of equilibrium of the subaqueous shore terrace. J. Geol. 6(4), 1902.
- FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY: Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordwest-Strand der Insel Norderney: Jber. 1949, Forsch.-Stelle Norderney, Bd. I u. II, Norderney, 1950.
- FORSCHUNGSSTELLE FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ: Niedersächsische Küste, Historische Karte Nr. 5, 1 : 50 000. Norderney, 1964.
- FÜHRBÖTER, A. et al.: Beurteilungen der Sandaufspülungen 1972 und Empfehlungen für die künftige Stranderhaltung am Weststrand der Insel Sylt. Die Küste, H. 29, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen. Die Küste, H. 52, 1991.
- GRAAF, J. VAN DE: How to analyse beach profile measurements? Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- GUST, G.: Schlußbericht des KFKI-FV „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“, Teilaufgabe „Schubspannungsmessungen“, Hamburg-Harburg, 1992.
- HOMMEIER, H. u. KRAMER, J.: Verlagerung der Platen im Riffbogen vor Norderney und ihre Anlandung an den Strand. Jber. 1956, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 8, Norderney, 1957.
- HOMMEIER, H.: Beiheft zur Historischen Karte Nr. 5. Forsch.-Stelle für Insel- u. Küstenschutz, Norderney, 1964.
- KAMP, W. D.: Küstenschutzmaßnahmen des Landes Schleswig-Holstein an der Westküste Sylt; Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. BMFT-Statusseminar, BMFT, Bonn, 1991.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, H. D.: Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats. Jber. 1977, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 29, Norderney, 1978.
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, H. 105, 1990.
- KRAMER, J.: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52. Jber. 1957 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 9, Norderney, 1958.
- KRAMER, J.: Beach-Rehabilitation by use of Beach Fills and further Plans for the protection of the Island of Norderney. Proc. 7th ICCE, vol. 2, ASCE, New York, 1960.
- KUNZ, H.: History of Seawalls and Revetments on the Island of Norderney. Coastal Sediments '87, proc. vol. 1, 1987.
- KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd ICCE Delft, ASCE, New York, 1991a.
- KUNZ, H.: Protection of the island of Norderney by Beach Nourishment, Alongshore Structures and Groynes. Proc. 3. Intern. Conf. on Coastal & Port Engineering in Developing Countries, Bd. 1, COPEDEC, Mombasa, 1991b.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- LUCK, G.: Die zweite Strandaufspülung von Norderney. Jber. 1968, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 20, Norderney, 1970.

- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. Jber. 1985, Forsch.-Stelle Küste, Bd. 37, Norderney, 1986.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Klassifikation und Häufigkeit von Sturmzeiten. Jber. 1986, Forsch.-Stelle Küste, Bd. 38, Norderney, 1987.
- NIEMEYER, H. D.: Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. Proc. 20th Intern. Conf. o. Coast. Eng. Taipei, ASCE, New York, 1987a.
- NIEMEYER, H. D.: Field measurements and analysis of wave-induced nearshore currents. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen; Die Küste, H. 54, 1992.
- PÄTZOLD, U.: Bilanz und Verformung aufgespülter Sandstrände. Jber. 1980, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 32, Norderney, 1982.
- RAUDKIVI, A. J.: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt im Rück- und Ausblick. BMFT-Status-Seminar, BMFT, Bonn, 1991.
- STEPHAN, H.-J.: Fünf Strandauffüllungen vor Norderney – Ergebnisse morphologischer Untersuchungen. Bericht Forsch.-Stelle Küste, Norderney, 1988.
- STEPHAN, H.-J. u. WESTHOFF, T.: Zur Ermittlung der Sandmengen vor Norderney. Jber. Forsch.-Stelle Küste (i. Vorbereitg.), Norderney, 1992.
- SWART, D. H.: Beach nourishment and particle size effects. Coastal Engineering, 16, Elsevier, Amsterdam, 1991.
- THILO, R. u. KURZAK, G.: Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordwest-Strand der Insel Norderney; Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- WESTHOFF, T.: Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney. Diss. Universität Münster, 1990.
- YU, Z., NIEMEYER, H. D. u. BAKKER, W. T.: Site investigation on sand concentration in the sheetflow layer. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.

# Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen

VON HANZ DIETER NIEMEYER

## Zusammenfassung

Mit Hilfe von hydrographischen Naturmessungen werden durch Anwendung geeigneter Auswerteverfahren Transportphänomene im Bereich von Vorstränden und Stränden ursächlich gedeutet. Auf dieser Grundlage ist es möglich, die Erosion von Stränden bei Sturmfluten ebenso wie deren nachfolgende Regeneration zu erklären. In Orientierung an diesen Erkenntnissen wird vorgeschlagen, die Materialeinbringung bei künstlicher Wiederauffüllung unterversorgter Strandbereiche in den Vorstrand zu verlagern. Weiterhin lassen aus den Datenanalysen herleitbare Einblicke in die hydrodynamische Wirksamkeit von Strandbuhnen darauf schließen, daß deren Wirkung gegenüber Längsströmungen mit der Höhe der Auffüllung im Bauwerksbereich abnimmt.

## Summary

*Field measurements of waves and wave-induced currents have been carried out on the beaches of the East Frisian island of Norderney in order to evaluate the effectiveness of artificial beach nourishments. The results give a good indication of the driving hydrodynamical forces governing storm surge induced erosion and subsequent recovery of beaches with revetments and groynes. It is evident that a toward shore increasing tendency of net seaward directed currents generates enormous scour which becomes especially visible in front of revetments after storm surges. It is also apparent that their seawardly decreasing overbalance allows sedimentation of the eroded beach material on the shoreface. It seems to be reasonable that an overbalance of seaward directed currents can be explained as undertow effects created by breaking waves. Due to high turbulence in the surf zone sediment transport does not only occur as bed load but also as suspension which intensifies its efficiency thus leading to high erosion rates on the beach and correspondently high deposition rates on the shoreface.*

*The high nonlinearity of steep shoaling but still non-breaking waves creates drift effects which could effect onshore directed bed load transport. But its capacity is much lesser than that of combined suspension and bed load due to undertow currents in the surf zone. This might be a sufficient explanation for the much longer duration of the recovery process when compared with the short time event of storm surge erosion. Furthermore the data discussed here give the impression that the effectiveness of groynes depends primarily on the relative reduction of the total water column due to the groyne elevation above the beach and not on the water depth above the groyne crest.*

*The application of these results to future beach nourishments implies that the deposition of material on the shoreface is more effective than on the beach itself. A replenishment on the beach reduces the groyne elevation above its bottom and consequently the relative reduction of the water column. This would again lead to a diminished effectiveness of the groynes with respect to longshore transport and would increase material losses in the first period after the execution of the nourishment. This process decreases with increasing erosion. Furthermore a nourishment on the shoreface might be better adjusted to natural transport phenomena. The provoked sediment transport due to the disturbance of the existing dynamical equilibrium by artificial deposition of additional material is initially mainly directed onshore after the execution of the nourishment. As this event usually takes place in late spring or early summer, there will be a shift of material from the shoreface to the beach. This is expected to build up a slowly growing deposit for the erosion due to autumn and winter events with strong sea conditions including storm surges. The main advantage is that it takes a certain period of time to build up the deposit. Within this period the nourished material will be mainly in a position where it is less sensitive to erosion by longshore currents. In contrast a nourishment on the beach itself would expose the material from the beginning totally to their eroding capacity. Additionally, the water depth reduction would provoke*

*the breaking of even relative small waves and intensify suspension and erosion. Therefore a nourishment on the shoreface might be a successful solution for reducing the high losses in the first phase after the execution and to extend the period of its effectiveness.*

## Inhalt

1. Einführung und Problemstellung . . . . .	54
2. Hydrographische Naturuntersuchungen . . . . .	56
2.1 Hydrographische Randbedingungen . . . . .	56
2.2 Das hydrographische Meßprogramm . . . . .	60
2.3 Analyse der Meßdaten . . . . .	64
3. Erosions- und Regenerationsvorgänge an Stränden . . . . .	65
4. Analyse seegangs- und strömungsgeprägter Transportbedingungen . . . . .	68
4.1 Vorgehensweise . . . . .	68
4.2 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Sturmflut . . . . .	69
4.3 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei Dünung . . . . .	78
5. Hydrodynamische Wirksamkeit von Strandbuhnen . . . . .	82
6. Schlußfolgerungen und Ausblick . . . . .	88
7. Danksagung . . . . .	89
8. Schriftenverzeichnis . . . . .	89

### 1. Einführung und Problemstellung

Der Gestaltwandel von Seegaten bewirkt zusammen mit der örtlich wirksamen Hydrodynamik und dem daraus resultierenden Küstenquer- und -längstransport topographische Veränderungen auf den angrenzenden Düneninseln. Die Richtigkeit dieser Aussage ist auch für den Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste langfristig nachweisbar und im historischen Kartenwerk der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE (HOMEIER, 1962; HOMEIER u. LUCK, 1968) eindrucksvoll dokumentiert. In früheren Zeiten hatten die Inselbewohner derartige naturgegebene Änderungen als Schicksal zu ertragen und sich an die veränderten Randbedingungen anzupassen. So sind im Verlauf der letzten Jahrhunderte auf Ostfriesischen Inseln mehrfach Siedlungen aufgegeben und an anderer – zu dem Zeitpunkt noch als sicher angesehener – Stelle wieder aufgebaut worden.

Insbesondere das durch den zunehmenden Fremdenverkehr bedingte Schaffen wachsender materieller Werte verstärkte nicht nur den Wunsch der Inselbewohner, durch gestaltende Eingriffe deren Erhalt zu erreichen. Es gab diesem Verlangen auch eine hinreichende rationale Grundlage, um auf die politische Ebene erfolgreich einwirken zu können. Die Obrigkeit sah sich veranlaßt, durch stützende bauliche Eingriffe den Erhalt der Siedlungen auf den Inseln zu gewährleisten. Anfänglich wurde dies mit konventionellen Mitteln der Dünenstabilisierung sowie des Anlegens von Buschschlengen und Palisadenzäunen versucht. Fortschreitende Abbrüche und die Gefährdung besiedelter Gebiete zwangen die Provinz Ostfriesland des seinerzeitigen Königreichs Hannover 1857 auf Norderney – die damaligen technischen Möglichkeiten bis an die Grenzen nutzend – mit dem Bau massiver Deckwerke und Strandbuhnen (TOLLE, 1864) zu beginnen, was damals eine neuartige Form des Insel schutzes darstellte. Im Laufe der Zeit mußten diese Bauwerke sowohl in ihren Querschnitten als auch in ihrer räumlichen Ausdehnung erheblich erweitert werden (PEPER, 1955; WITTE, 1970; KUNZ, 1991b). Mit dem Bau der Schutzwerke konnte – insbesondere nach der Errichtung von Strombuhnen um die Jahrhundertwende am Prallhang der tiefen Rinne – das Seegat festgelegt und weiterer Verlust von Inselgebieten vermieden werden, so daß die wesentliche Zielsetzung

der Eingriffe erreicht werden konnte. Mit diesen baulichen Eingriffen war gleichzeitig die Fixierung eines Übergangszustandes verbunden (LUCK, 1975), der durch einen in Richtung des Längstransportes weit vom Seegat verschobenen Anlandungspunkt des Riffbogens am Inselstrand gekennzeichnet ist (Abb. 1). Hierdurch wurden die Strände oberhalb des Anlandungsbereiches von der natürlichen Sedimentzufuhr des Küstenlängstransportes abgeschnitten; Seegang und Brandung bewirkten dort somit eine fortlaufende Erosion (KURZAK et al., 1949; THILO u. KURZAK, 1952). In deren Gefolge waren wiederum mehrfach Erweiterungen der Querschnitte der Deckwerke und Bühnen erforderlich, um sie sowohl an die abnehmenden Höhenlagen der Strände anzupassen als auch an die damit verbundene stärkere Belastung aus dem Auflaufen entsprechend höherer Wellen. Diese Arbeiten wurden auch ironischerweise als „Schutz der Schutzwerke“ bezeichnet. Es ist aber festzustellen, daß sich hierzu keine technischen Alternativen boten, bis die Entwicklung einer leistungsfähigen Naßbagertechnik die künstliche Wiederauffüllung erodierter Strände ermöglichte.



Abb. 1: Riffbogen vor dem Norderneyer Seegat und Inselvorstrand mit leichter Brandung. Der Anlandungsbereich liegt in Driftrichtung etwa ein Drittel der Insellänge westlich des Seegats

Folgerichtig hat dann auch die vom damaligen Küstenausschuß Nord- und Ostsee eingesetzte ARBEITSGRUPPE NORDERNEY (1952) zur nachhaltigen Verbesserung der Strandverhältnisse die Ausführung der ersten Strandauffüllung in Europa vorgeschlagen. Der Erfolg dieses Vorhabens (KRAMER, 1957, 1958, 1960) führte zu mehrfachen Wiederholungen (LUCK, 1970; PÄTZOLD, 1982; ERCHINGER, 1986; STEPHAN, 1988; KUNZ, 1991a). Insofern haben sich Strandauffüllungen im Fall von Norderney, ebenso wie an vielen anderen sandigen Küsten in der Welt, als wirksames und zugleich wirtschaftliches Instrument des Insel- und Küstenschut-

zes erwiesen. Unbeschadet von dieser positiven Beurteilung bestand und besteht der Wunsch nach einer Optimierung. Aus diesem Grunde wurde auf Initiative des BUNDESMINISTERIUMS FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE das KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ begonnen, in dessen Rahmen sowohl Naturmessungen als auch Untersuchungen mit Hilfe physikalischer und mathematischer Modelle vorgenommen wurden. An dieser Stelle wird über Ergebnisse des Naturmeßprogramms auf Norderney berichtet, wobei auf der Grundlage repräsentativer Datensätze Transportphänomene im Vorstrand- und Strandbereich im Hinblick auf die verursachenden hydrodynamischen Erscheinungen analysiert und gedeutet werden. Hieraus werden Empfehlungen für die künftige Gestaltung von Strandauffüllungen abgeleitet, die zwar an den spezifischen Randbedingungen der Strände auf Norderney orientiert, aber bei sorgfältiger Beachtung der Randbedingungen als übertragbar anzusehen sind.

## 2. Hydrographische Naturuntersuchungen

### 2.1 Hydrographische Randbedingungen

Der mittlere Tidehub beträgt im See- und Wattengebiet von Norderney etwa 2,4 m, der Variationsbereich infolge von Spring- und Nippwirkung liegt bei  $\pm 0,7$  m (BSH, 1991). Die mittlere Dauer der Ebbe ist geringfügig länger als diejenige der Flut: Für den Zeitraum 1982/86 betrug der Unterschied 15 Minuten (Abb. 2). Das Tidemittelwasser (LASSEN, 1991) liegt für dieselbe Meßreihe bei NN -3,1 cm. Der höchste, bisher gemessene Stau am Pegel Norderney

### Mittlere Tidekurve

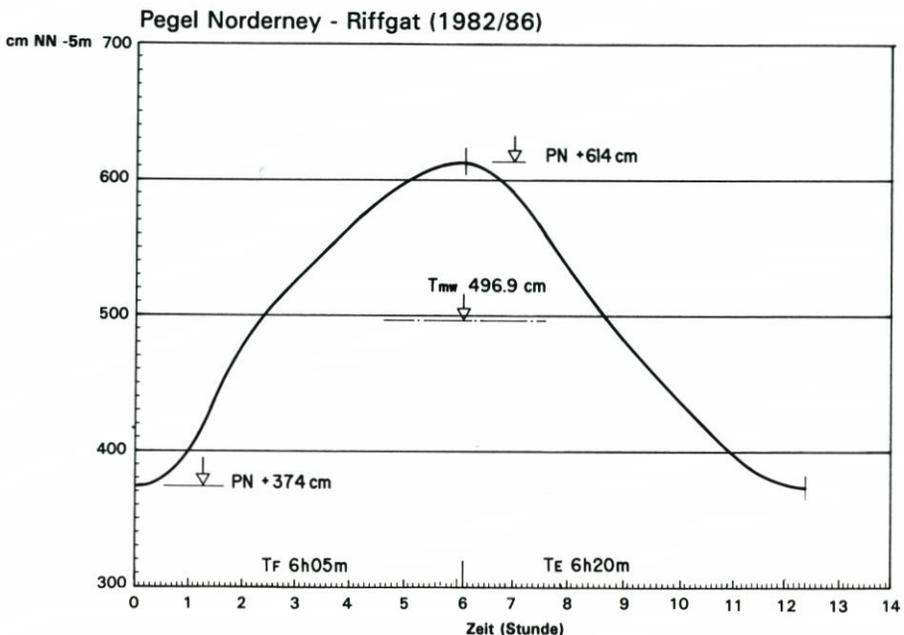


Abb. 2: Mittlere Tide am Pegel Norderney-Riffgat nach LASSEN u. SIEFERT (1991)

trat bei der Sturmflut am 16./17. Februar 1962 mit 2,87 m über MThw auf. Nach der Einmessung von Hochwassermarken und der Berücksichtigung des säkularen Anstiegs des mittleren Tidehochwassers nach ROHDE (1977) hat sich bei der Sturmflut vom 4. Januar 1855 sogar ein Stau von mehr als 3,3 m über MThw ausgebildet (NIEMEYER, 1976). Die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmfluten nach DIN 4049 (RHODE, 1979) liegen auf der Grundlage einer Zeitreihe von 40 Jahren für den Pegel Norderney-Riffgat bei folgenden Höhenstufen (NIEMEYER, 1987a):

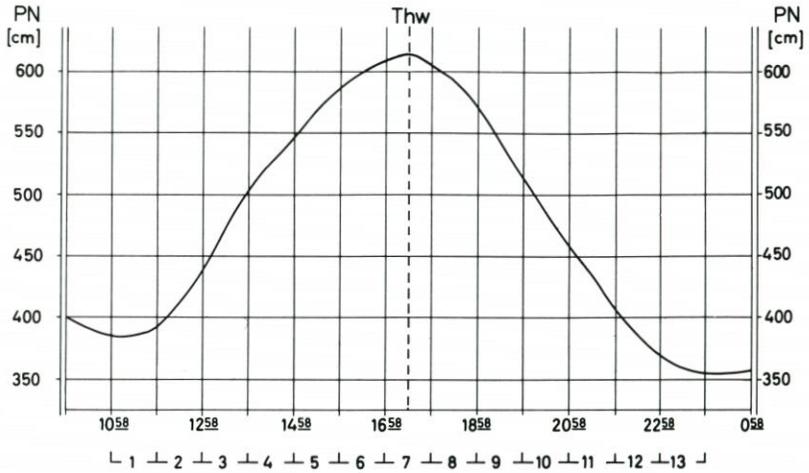
Windfluten:	MThw + 0,93 m
Sturmfluten:	MThw + 1,95 m
Orkanfluten:	MThw + 2,86 m

Strömungsverhältnisse und Morphologie der tiefen Rinne des Norderneyer Seegats sind durch eine ausgeprägte Dominanz des Ebbstroms geprägt; in Ausnahmefällen sind kontinuierliche Ebbstromdauern von mehr als 21 Stunden festgestellt worden (KOCH u. NIEMEYER, 1978). Die mittleren Stromgeschwindigkeiten betragen für beide Halbzeiten bei Normaltiden etwa 0,7 m/s, die Maximalwerte etwa 1,2 m/s. Absolute Spitzenwerte sind für Flutstrom 1,4 m/s und für Ebbstrom 2,0 m/s (KOCH u. NIEMEYER, 1978). Im mittleren Bereich des Rinnenhangs betragen die mittleren Geschwindigkeiten bei Flutstrom etwa 0,25 m/s und bei Ebbstrom 0,34 m/s (NIEMEYER, 1987b). Die Tideströmungen auf den Stränden von Norderney sind erheblich schwächer, wobei deren Intensität mit Entfernung vom Seegat abnimmt. Zur Veranschaulichung der Strömungsverhältnisse auf den Stränden sind die Ergebnisse synchroner Tidestrommessungen im Hang der tiefen Seegatrinne und an vier Positionen auf den Stränden des Auffüllungsbereichs für eine etwa den mittleren Verhältnissen entsprechende Tide dargestellt (Abb. 3). Hieran wird deutlich, daß insbesondere in den Bereichen mit starker Erosionstendenz Tideströmungen von nachrangiger Bedeutung sind.

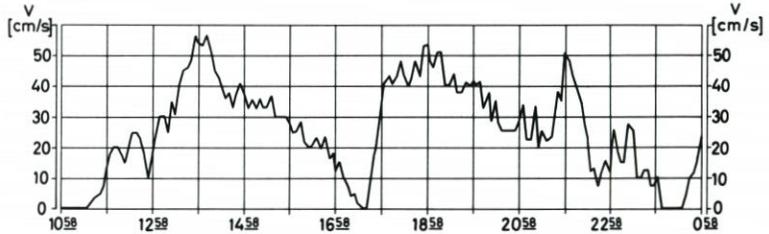
Aus den Erkenntnissen über die Strömungsverhältnisse auf den Stränden von Norderney (NIEMEYER, 1987b) und der Lage primärer Erosionsbereiche kann gefolgert werden, daß die Erosions- und Sedimentationsvorgänge auf den Stränden von Norderney im wesentlichen durch Seegang und Brandung bestimmt sind. Energiereicherer Seegang tritt im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste bei auflandigen Stark- und Sturmweatherlagen aus dem Sektor West bis Nordost auf. Infolge von Refraktion verengt sich dieser Sektor vom Küstenvorfeld bis zum Inselvorstrand für mittlere Tideverhältnisse von 135° auf 85° (NIEMEYER, 1983). Vorherrschend sind dabei Windsee und Dünnung aus westlichen und nordwestlichen Richtungen, die in Wechselwirkungen mit der Inseltopographie auf den Stränden ein in zwei Hauptrichtungen wirkendes System von Brandungsströmungen mit gleichgerichtetem strandparallelen Küstenlängstransport erzeugen (Abb. 4 u. 5), das sich im Divergenzbereich nordöstlich von der tiefen Seegatrinne am Nordweststrand in ein nordöstlich gerichtetes und auf den seegatnahen Stränden in ein südöstlich gerichtetes Teilsystem aufspaltet (NIEMEYER, 1986).

Das Überlappen des Riffbogens über die westlichen und nordwestlichen Inselstrände bis zu seinem Anlandungsbereich (Abb. 1) bedingt zum einen ein strukturelles Sedimentdefizit in diesen Bereichen, aber zum anderen auch eine wirksame Abschattung gegen den energiereichen Seegang aus dem Küstenvorfeld. Aus der Nordsee einschwingender energiereicher Seegang wird auf den Platen des Riffbogens gebrochen, wobei ein erheblicher Anteil der Energie umgewandelt wird: Nach Naturmessungen beträgt die Energiedissipation infolge Riffbrandung bei auflandigen Starkwind- und Sturmweatherlagen im Mittel vor dem Inselvorstrand 70 % und vor dem Seegat 92 %. Diese intensive Energieumwandlung führt nicht nur zu einer deutlichen Abnahme der Wellenhöhen und Veränderung der Wellenperioden und

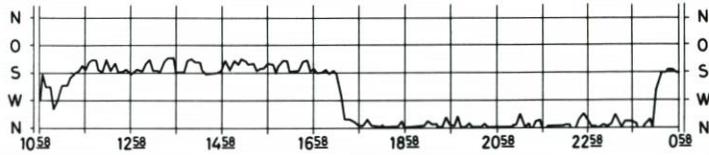
**Ganglinie des Tidewasserstandes mit Phaseneinteilung zur Bestimmung der Stromvektoren sowie der Strömungen im Seegat**



**Strömungsgeschwindigkeiten**



**Strömungsrichtungen**



**Tidestrommessungen**

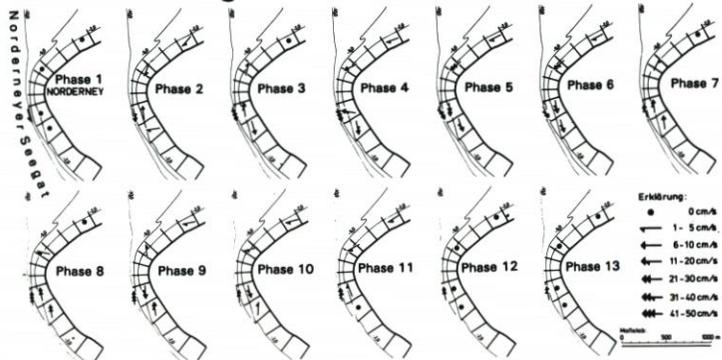


Abb. 3: Tideströmungen bei einer Normaltide im Seegat und auf den westlichen und nordwestlichen Stränden; a: Ganglinien der Wasserstände, Stromgeschwindigkeiten und -richtungen im Seegat; b: Stundennmittel der Stromvektoren im Seegat und auf den Stränden



Abb. 4: Seegangsausbreitung im Bereich des Norderneyer Seegats (Windrichtung: West; Wasserstand MThw)

-längen, sondern auch zu einer relativen Verlagerung von Energieanteilen in höherfrequente Bereiche und zu einem Zerfall der Energiekonzentration im Peakbereich (Abb. 6) (NIEMEYER, 1987c). Untersuchungen mit dem mathematischen Seegangmodell HISWA (BOOIJ u. HOLT-HUIJZEN, 1987) haben mittlerweile die auf der Grundlage phänomenologischer Analysen von Naturmessungen gewonnenen Erkenntnisse zum Seegangsklima im Einzugsbereich des Norderneyer Seegats weitgehend bestätigt (DEN ADEL et al., 1991).

Nach den Kriterien der hydrodynamischen Klassifikation von HAYES (1975, 1979) ist das Norderneyer Seegat bei einem mittleren Tidehub von etwa 2,4 m und einer über das Jahr

gemittelten signifikanten Wellenhöhe von  $0,7 \leq H_S \leq 1,0$  m als tide- und seegangsgeprägtes Seegat mit überwiegender Tideeinwirkung zu klassifizieren (NIEMEYER, 1990).

## 2.2 Das hydrographische Meßprogramm

Erfolgskontrollen von Strandauffüllungen hatten sich in der Vergangenheit zumeist auf die Erfassung von Umlagerungsvorgängen und die damit verbundenen Volumenentwicklungen beschränken müssen. Fortschritte in der Meßtechnik (NIEMEYER, 1979a, 1979b) gestatte-



Abb. 5: Seegangsausbreitung im Bereich des Norderneyer Seegats (Windrichtung: Nordwest; Wasserstand MThw)

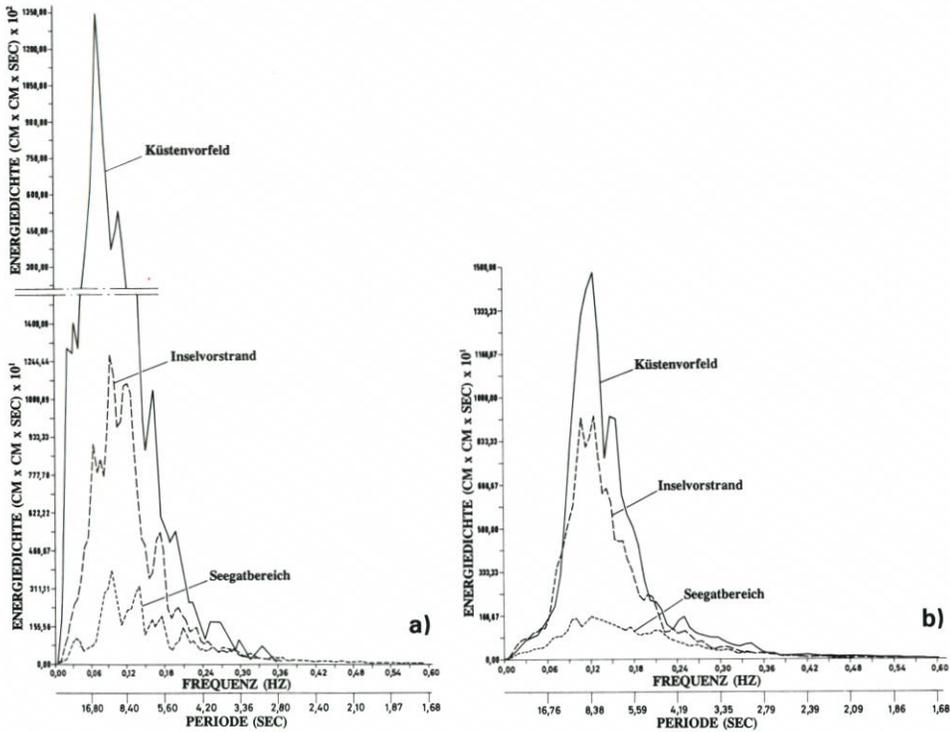


Abb. 6: Energiespektren des Seegangs im Küstenvorfeld, auf dem Inselvorstrand und im Seegat; a: bei auflandigem Sturm; b: bei auflandigem Starkwind

ten es zwar, in jüngerer Zeit auch die verursachenden hydrodynamischen Vorgänge zu erfassen, doch konnten derartige Meßprogramme wegen des damit verbundenen außerordentlich hohen Aufwands an Personal und Technik – wenn überhaupt – nur in sehr begrenztem Umfang vorgenommen werden (ROELSE, COOSEN u. MINNEBOO, 1991). Bei dem KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ war von Anbeginn wesentliche Zielsetzung, die gestaltenden hydrodynamischen Kräfte im Bereich der Auffüllung so weitgehend wie möglich repräsentativ zu erfassen. Bereits die Planungsphase zeigte aber, daß trotz erheblichen personellen und technischen Aufwandes diese Zielsetzung nicht umfassend erreichbar ist.

Unter Verfolgung gesetzter Prioritäten wurden daher ein Haupt- und zwei Nebenmeßfelder im Auffüllungsbereich der Norderneyer Strände vorgesehen und errichtet (Abb. 7). Ein Nebenmeßfeld mit drei strandnormal in einem Profil angeordneten Meßstationen wurde jeweils in einem Strandabschnitt am Seegat und im Divergenzbereich installiert. Entgegen ursprünglichen Annahmen ließen sich die seewärtigen Randbedingungen nicht aus den im Rahmen des Projekts zu entwickelnden Modellen gewinnen. Daher wurde in der Schlußphase zusätzlich eine Meßstation auf dem Vorstrand vor dem Hauptmeßfeld errichtet. Das Hauptmeßfeld wurde in dem am stärksten von Erosionen betroffenen Teil des Nordweststrandes installiert, mit neun Stationen in einem Bühnenfeld, die von jeweils drei Stationen in den angrenzenden Bühnenfeldern flankiert wurden, um die Lee- und Luvwirkung auf die Brandungsströmung erfassen zu können (Abb. 7). Die beiden Nebenmeßfelder umfassen drei in Bühnenfeldmitte strandnormal angeordnete Stationen (Abb. 7). Die Sensoren werden dabei in

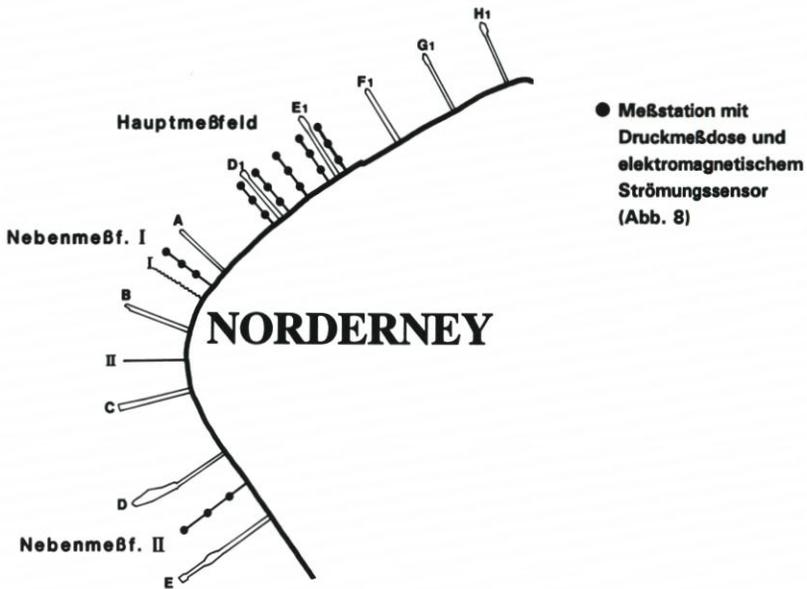
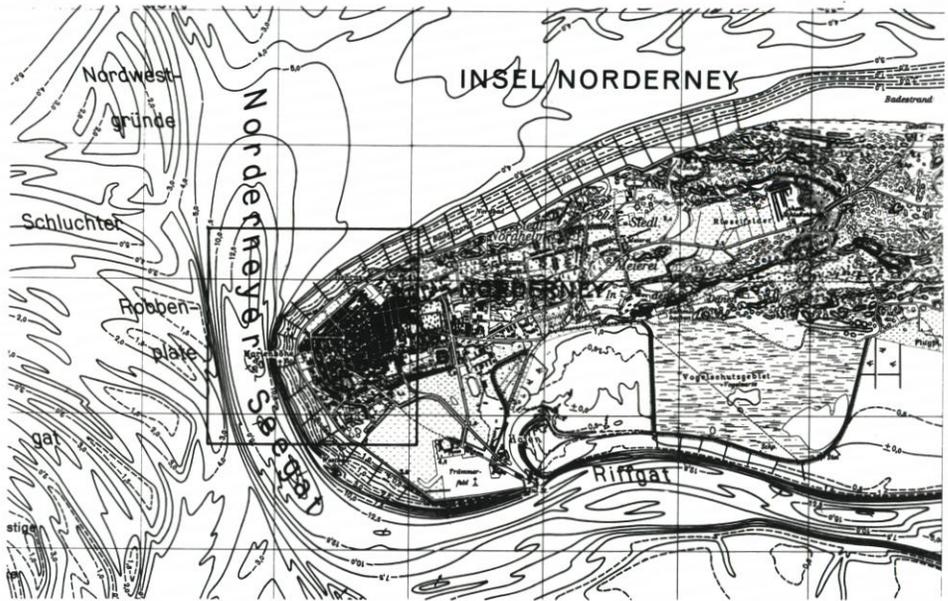


Abb. 7: Lage der Meßfelder auf den Inselstränden und Anordnung der Meßstationen

Sohlhöhe angebracht und entsprechend deren Fluktuationen bei Trockenfall unter Feststellung der Höhenlage vertikal versetzt.

In jeder Station sind jeweils ein Drucksensor zur Erfassung der Wasserstände und des Seegangs sowie ein elektromagnetischer Zweikomponenten-Strömungssensor angebracht (Abb. 8), die Kabelverbindung zum Land haben. Hiermit wird sowohl die Energieversorgung

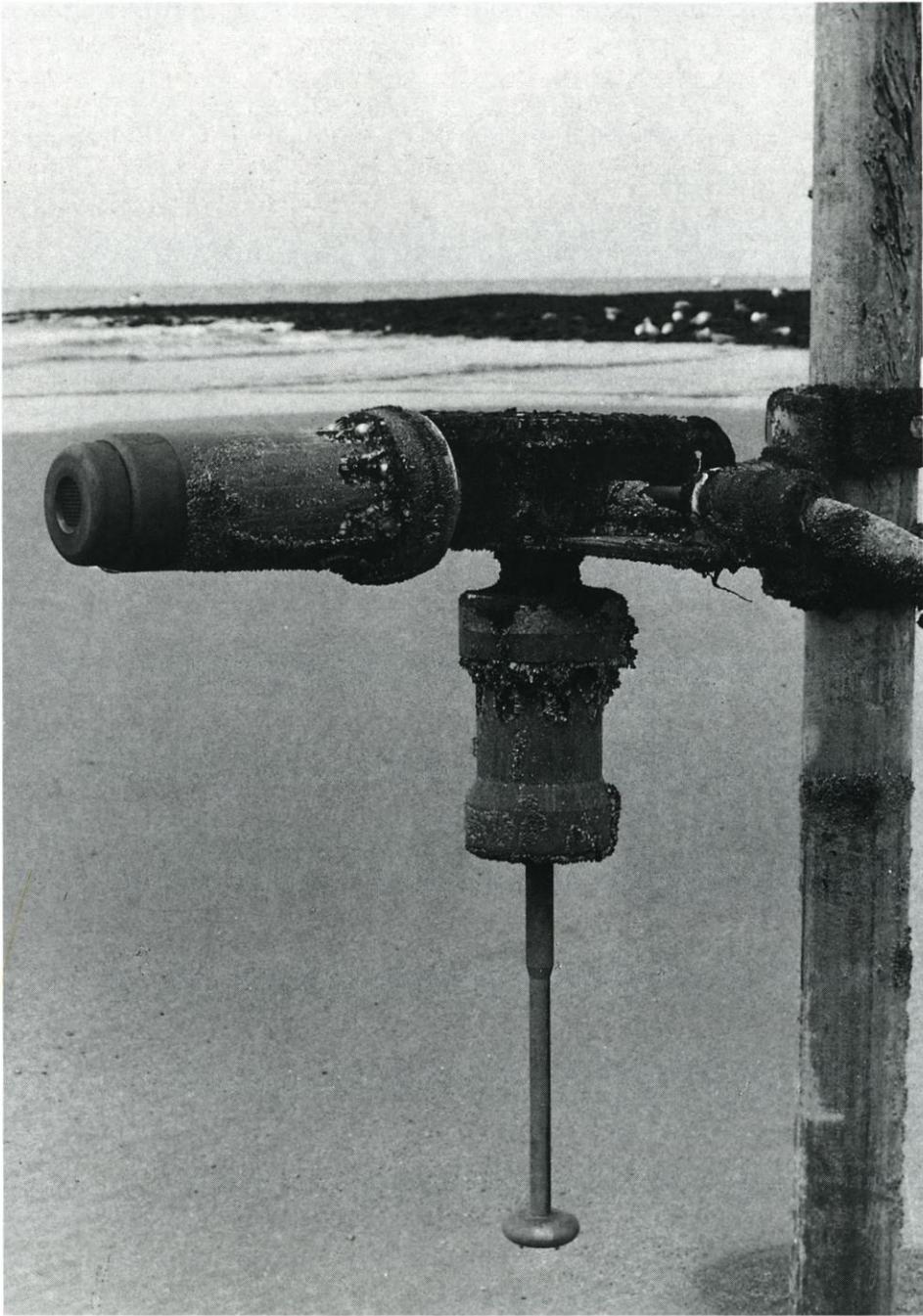


Abb. 8: Meßstation auf dem Strand mit Druckaufnehmer-Wellenpegel und Strömungssensor nach dem Induktionsprinzip

der Sensoren als auch der kontinuierliche Datentransfer an Land sichergestellt. Die Daten werden an den jeweiligen Landstationen (Abb. 7) in eine rechnergesteuerte Datenfernübertragung eingespeist und in die Meßnetzzentrale im Dienstgebäude der Forschungsstelle Küste per Funk übertragen. Die Konzeption der rechnergesteuerten Datenfernübertragungsanlage erlaubt darüber hinaus die flexible Steuerung des Meßnetzes in Abhängigkeit von kurzfristig eintretenden Ereignissen. Die Kapazität der Datenerfassung erlaubt im Bedarfsfall die quasi-kontinuierliche Aufzeichnung aller Rohdaten über die Dauer mehrerer Tiden.

### 2.3 Analyse der Meßdaten

Die Aufzeichnungen der Meßdaten mit hoher zeitlicher Auflösung gestattet auch eine realistische Reproduktion hochfrequenter Vorgänge in der Brandungszone bis hinein in Bereiche der Turbulenzstrukturen bei seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen (Abb. 9). Die Datenfülle erschwert jedoch gleichzeitig die Interpretation der hydrodynamischen

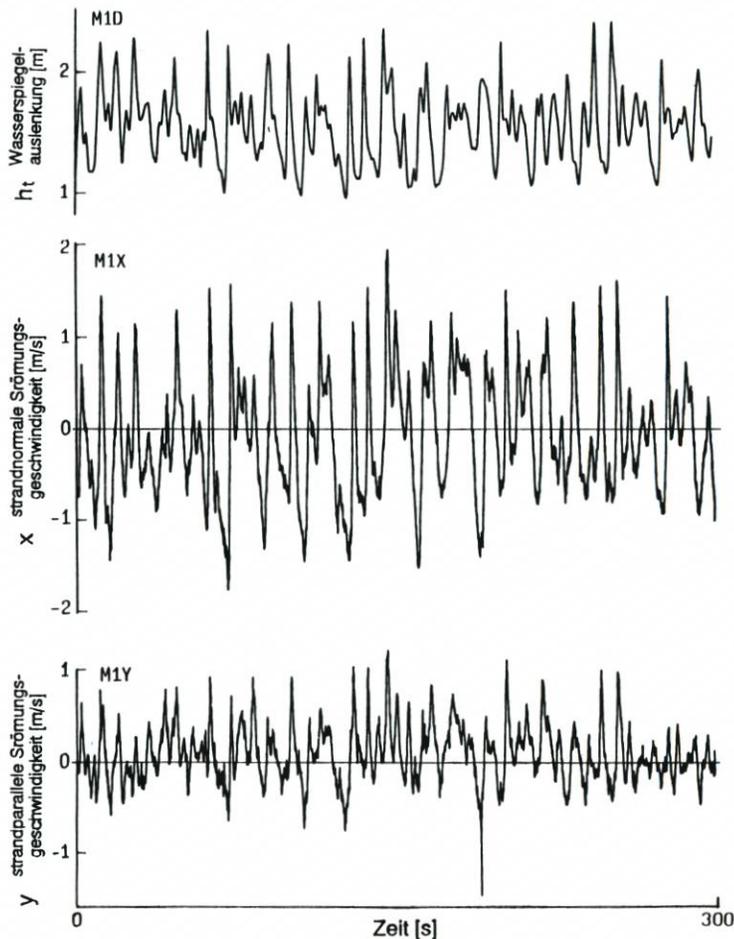


Abb. 9: Ganglinien der Wasserspiegelauslenkungen und Strömungskomponenten an einer Station auf dem Strand

schen Gesamtwirkung über Zeitbereiche von Viertelstunden oder mehr. Die für die Analyse von Zeitreihen von Seegang oder Tideströmungen üblichen Reduktionen auf kennzeichnende Parameter werden hierfür als nicht geeignet angesehen, da alle Formen von Mittelungen wegen der starken Variabilität der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungsfelder auf Stränden mit hohen Informationsverlusten verbunden sind.

In Orientierung an der primären Aufgabenstellung, Optimierungsmöglichkeiten für künftige Strandauffüllungen zu erarbeiten, war es erforderlich, zu einer hinsichtlich ihrer Gesamtwirkung bewertbaren Analyse der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen zu gelangen (NIEMEYER, 1991). Hierfür sind die üblichen Analyseverfahren mit der Zielsetzung, Zusammenhänge zwischen verursachendem Seegang und induzierten Strömungen erkennbar zu machen, untauglich. Es wurden für Zeitreihen von zwanzig Minuten richtungs-klassifizierte Geschwindigkeitsverteilungen aller mit 11,8 Hz Auflösung erfaßten Strömungsvektoren für Sektoren von  $22,5^\circ$  erstellt und graphisch in Form von Stromstärkerosen aufgetragen (Abb. 19 u. 28). Dieses Verfahren gestattet es, ohne filternde Mittelung die Gesamtwirkung der seegangserzeugten Strömungsfelder für – hinsichtlich der Variation herrschender Randbedingungen – angemessene Zeitreihenlängen in Bezug zu der primären Fragestellung interpretierbar darzustellen. Darüber hinaus wurden zur Verdeutlichung der richtungsmäßig überwiegender Wirkung der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen resultierende Stromstärkerosen erstellt (Abb. 20 u. 29). Hierbei werden die jeweils um  $180^\circ$  entgegengerichteten Geschwindigkeitsverteilungen (Abb. 19 u. 28) voneinander subtrahiert. Hierdurch wird der Anteil gleichstarker gegenläufiger Strömungen näherungsweise eliminiert (Abb. 20 u. 29).

Als eine weitere Möglichkeit zur Darstellung der räumlichen Verteilung der Strömungsintensität wurden Richtungsspektren der Energiedichte ermittelt (Abb. 21 u. 30). Für Sektoren von  $5^\circ$  werden Energiedichtespektren berechnet und anschließend deren Gesamtenergie durch Integration über den Frequenzbereich bestimmt. Auf diese Weise läßt sich für die Meßorte die Strömungsenergie in ihrer Variation über die Kompaßrose darstellen. Hiermit sollen – ebenso wie mit den Stromstärkerosen – aus den Meßdaten Indikationen auf Transportvorgänge gewonnen werden, um ursächliche Deutungen von Umlagerungsvorgängen vornehmen zu können.

Die Analyse der Seegangsdaten erfolgt sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich. Hier wird mit Parametern der Zeitreihenanalyse gearbeitet, wobei die Bestimmung der individuellen Wellen nach dem Tal-Kamm-Verfahren (SCHÜTTRUMPF, 1973) vorgenommen wird, einer Variante des ursprünglichen Wellenkamm-Verfahrens nach PUTZ (1952). Für Energiebilanzen wird das Verfahren der energetisch repräsentativen Welle (NIEMEYER, 1986, 1987c) genutzt.

### 3. Erosions- und Regenerationsvorgänge an Stränden

Die saisonale Anpassung von Stränden an das jeweilige Seegangsklima ist ein im internationalen Schrifttum seit langem bekanntes Phänomen, das in der Literatur zumeist durch die Begriffe „Sommer- und Winterprofile“ umschrieben wird (BASCUM, 1954). Trotz dieser Erkenntnisse werden aber die unmittelbar nach dem Auftreten von Sturmfluten erfaßbaren Erosionen häufig – und nicht nur von Fachfremden – dramatisiert. Es läßt sich aber selbst für derart einschneidende Ereignisse wie die Holland-Orkanflut von 1953 nachweisen, daß deren Auswirkungen nur von vorübergehender Bedeutung sind und auf Dauer den langfristigen Trend nicht verändern können.

Auch für den Bereich der Ostfriesischen Inseln konnte dieses Phänomen der kurzfristig eintretenden Erosion nach Sturmfluten und nachfolgender allmählicher Regeneration nachgewiesen werden. Entsprechende Untersuchungen sind erstmals von HOMEIER (1976) für die Sturmflutketten von 1973 und 1976 vorgenommen worden. Er hat dabei nachgewiesen, daß eine Regeneration von Stränden und Dünen auf Juist, Memmert und Norderney unbeschadet erheblicher Unterschiede in den baulichen und morphologischen Randbedingungen stattfinden kann. Hinsichtlich des Insel-schutzes auf Norderney ist dabei von wesentlicher Bedeutung, daß auch die einer kontinuierlichen Erosion unterliegenden, bauwerksgeschützten Strände am West- und Nordweststrand von Norderney nach sturmflutbedingten Erosionen eine bemerkenswerte Regeneration erfahren (Abb. 10). Diese für die Gestaltung des Insel-

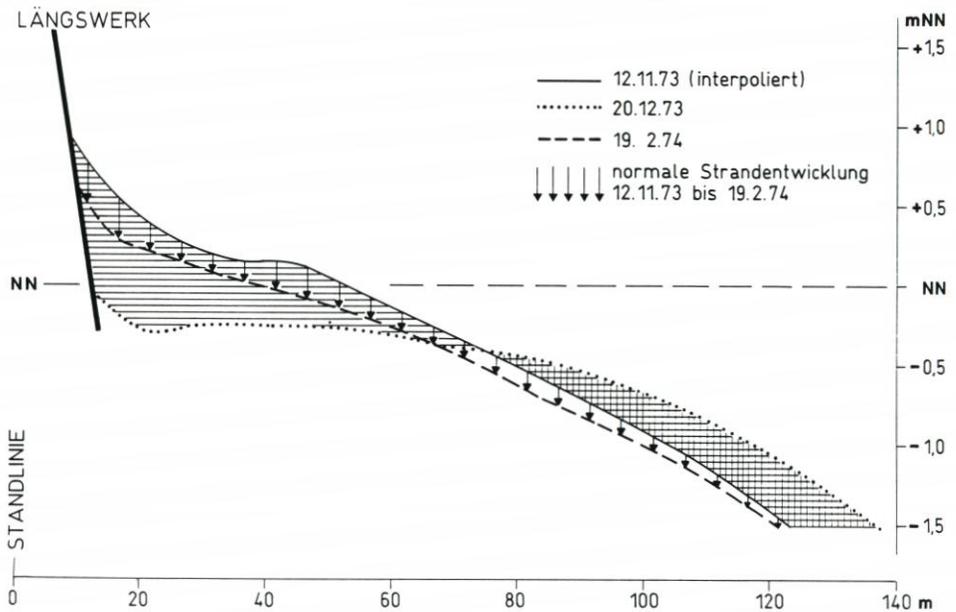


Abb. 10: Erosion und Regeneration von Stränden nach HOMEIER (1976)

schutzes grundlegenden Erkenntnisse von HOMEIER (1976) konnten für spätere Ereignisse erneut bestätigt und weiter objektiviert werden (Abb. 11 u. 12): Für die Sturmfluten vom 24. 11. 1981 mit Scheitelwasserständen von PN + 856 cm und PN + 843 cm sowie gemessenen maximalen Wellenhöhen auf dem Vorstrand mit  $H_{\max} = 5,0$  m ist unmittelbar nach den Sturmfluten eine erhebliche Erosion in einem Profil am Nordweststrand der Insel festzustellen, das aber nach etwa vier Monaten eine bemerkenswerte Regeneration erfahren hat (Abb. 11). Eine Approximation der Profile in Anlehnung an die Formel von DEAN (1983) für Gleichgewichtsprofile an Stränden durch eine lineare Regression (KOTZBAUER, 1989) macht auch die – von HOMEIER (1976) bereits qualitativ beschriebene – Veränderung der Strandgeometrie deutlich. Unmittelbar nach den Sturmfluten ist die Neigung des Strandes wesentlich steiler als vorher, was durch den Faktor  $a$  der Regression repräsentiert wird (Abb. 12). Gleichzeitig zeigt die Konstante  $c$  der Regression die Auskolkung vor dem Deckwerk an (Abb. 12). Mit der Regeneration des Strandes nähern sich beide Parameter, insbesondere aber der für die Strandneigung repräsentative Faktor  $a$ , wieder den Werten an, die für Gleichgewichtszustände charakteristisch sind (Abb. 12).

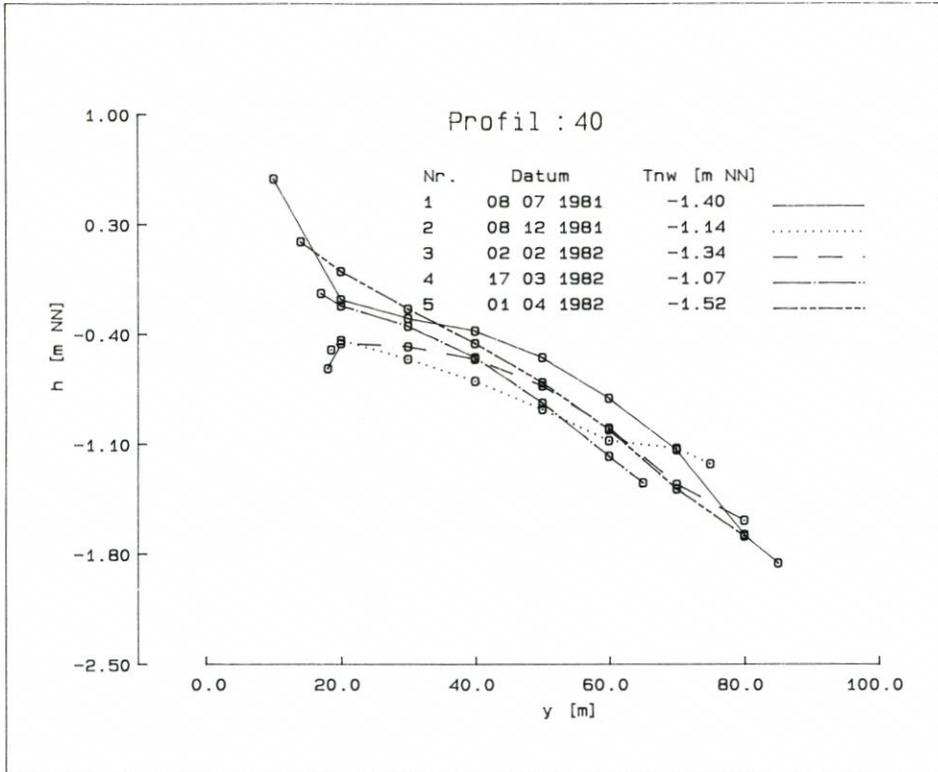


Abb.11: Erosion infolge der Sturmfluten vom 24. 11. 1981 und nachfolgende Regeneration eines Strandabschnittes auf Norderney (Profil 40)

Diese Vorgänge zeigen, daß mit Profilierungen aufgefüllter Strände in Annäherung an örtliche Gleichgewichtsprofile für mittlere Verhältnisse – wenn überhaupt – nur eine äußerst begrenzte Verringerung der Anfangsverluste erreichbar ist. Die örtlichen hydrodynamischen Randbedingungen erzwingen unabhängig vom Ausgangsprofil die Restauration eines dynamischen Gleichgewichts, ohne daß dabei mittelfristig Verlustraten entstehen, die über der durchschnittlichen Erosionstendenz liegen. Es erschien dennoch naheliegend, derartige Umlagerungsvorgänge hinsichtlich der wirksamen hydrodynamischen Vorgänge zu untersuchen, um die hierbei zu gewinnenden Erkenntnisse daraufhin zu prüfen, ob sie als Grundlage für Optimierungen künftiger Strandauffüllungen nutzbar sind. Im Gegensatz zu einem geometrisch-statischen Ansatz, wie beispielsweise durch Anpassung an mittlere Verhältnisse über ein Gleichgewichtsprofil, soll hier eine Orientierung an der Dynamik der Transportvorgänge im Strandbereich erfolgen.

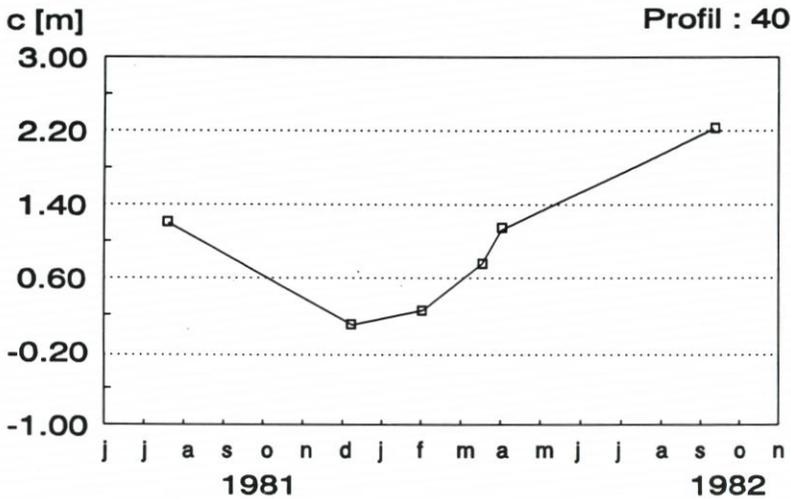
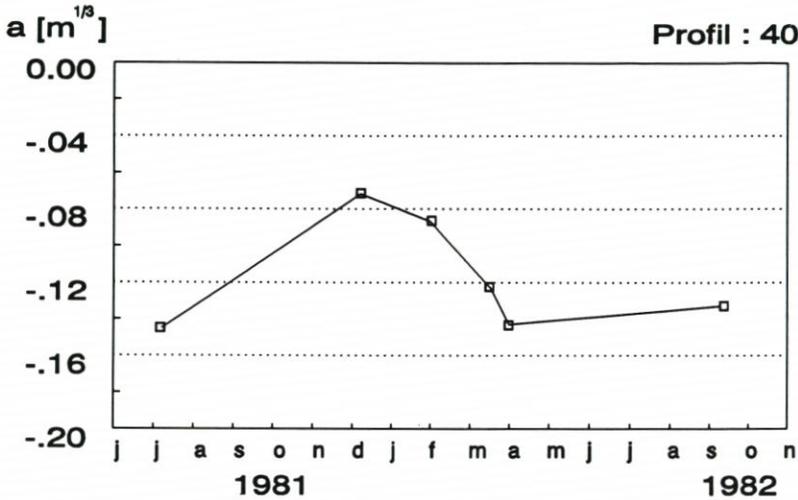


Abb. 12: Verlauf der Parameter der Regressionsgleichung zur Approximation des Strandprofils in Abhängigkeit von Strandumlagerungen (Abb. 11)

#### 4. Analyse seegangs- und strömungsgeprägter Transportbedingungen

##### 4.1 Vorgehensweise

Im folgenden werden exemplarisch Zeitreihen von Seegang und seegangsinduzierten Strömungen auf dem Strand analysiert, die als repräsentativ hinsichtlich der Ausprägung bestimmter Transportbedingungen anzusehen sind. Der Rückgriff auf Zeitreihen für charakteristische Verhältnisse wurde gewählt, um zu eindeutigen Erkenntnissen zu gelangen. Sich überlagernde Bedingungen mit wechselnder resultierender Dominanz von Transportfaktoren

sind wesentlich häufiger als deren ausgeprägtes Auftreten. Aber die Analyse derartiger, durch sich überlagernde Faktoren bedingter Vorgänge ist nicht nur erheblich schwieriger und aufwendiger als diejenige, die durch weitgehend einheitliche Bedingungen gekennzeichnet sind, sondern verhindert oder erschwert zumindest das Erkennen der Wechselwirkungen von Ursache- und Wirkungsmechanismen. Daher wird hier zum einen eine Zeitreihe für Sturmflutbedingungen mit starker Windsee und zum anderen eine für mittlere Tideverhältnisse mit ausgeprägter Dünung analysiert. Zielsetzung der Vorgehensweise ist, grundsätzliche Einsichten in vertiefter Form über seegangs- und strömungsgeprägte Transportbedingungen und -vorgänge auf Stränden zu gewinnen. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wird die Betrachtung auf die neun Stationen zwischen den Bühnen D 1 und E 1 des Hauptmeßfeldes begrenzt (Abb. 7).

#### 4.2 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Sturmflut

Bei Sturmfluten führen die meteorologischen Randbedingungen in der Regel zur Ausbildung energiereichen Seegangs, der sich infolge erhöhter Wasserstände weiter landwärts ausbreiten kann als unter normalen Bedingungen. Daher findet dann auf Stränden eine intensive Energieumwandlung durch brandenden Seegang statt. Auf dem Nordweststrand von Norderney, dem am stärksten durch strukturelle Erosion betroffenen Abschnitt auf der Insel, bildet sich unter diesen Bedingungen eine breite Brandungszone aus. Der Seegang pflanzt sich überwiegend unter ständiger Energiedissipation durch teilweises Brechen in Form borenartiger weißer Roller an der Oberfläche bis an die Deckwerke fort (Abb. 13), wo die endgültige



Abb. 13: Ausgeprägte, breite Brandungszone am Nordweststrand von Norderney bei einer Sturmflut mit borenartigen weißen Rollern

Energieumwandlung zumeist in Form von Sturzbrechern stattfindet. Vereinzelt treten auch Fontänenbrecher auf, wenn durch Wechselwirkungen von einlaufenden weißen Rollern oder Sturzbrechern mit dem Deckwerk oder mit dem Rücklaufschwalm vom Deckwerk die Energieumwandlung durch vertikalen Transport der Wassermassen in die Luft erfolgt.

Im folgenden werden die Daten einer Zeitreihe näher betrachtet, die um die Zeit des Thw-Eintritts bei der Sturmflut vom 24. Dezember 1988 erfaßt werden konnten. In den letzten drei Stunden vor Thw lagen die für die Ausbildung der Windsee im Küstenvorfeld bestimmenden Windgeschwindigkeiten (NIEMEYER, 1983) zwischen 15 m/s und 16 m/s aus Richtungen um 290°; der Stau am Pegel Norderney-Riffgat betrug etwa 1,5 m bezogen auf MThw. Für die untersuchte Zeitreihe wurden im Hauptmeßfeld aus etwa 315° einschwingender Seegang mit signifikanten Wellenhöhen von  $H_s = 1,62$  m an der Station  $w_3$  nahe dem Deckwerk bei einer Wassertiefe von  $h = 2,4$  m bis zu  $H_s = 2,32$  m an der Station  $o_1$  in der seeseitigen Meßreihe des Feldes mit einer Wassertiefe von  $h = 3,7$  m gemessen (Abb. 7, 14 u. 15). Die Daten zeigen deutlich (Tab. 1), daß das Brecherkriterium für Flachwasser in allen Bereichen des Hauptmeßfeldes nach der Formulierung von MC COWAN (1894) in der Quantifizierung von FÜHRBÖTER (1974) für Naturstrände ebensowenig erfüllt ist wie das von MICHE (1944). Einschränkend ist allerdings anzumerken, daß hinsichtlich der Wassertiefen stets Unsicherheiten bestehen bleiben, da zum einen nicht immer aktuelle Strandvermessungen vorliegen und zum anderen in jedem Fall die – insbesondere bei Sturmfluten oft erheblichen – Umlagerungen während der Tide nicht erkennbar sind. Aus diesem Grunde waren bei früheren Veröffentlichungen (NIEMEYER, 1991) nur die eindeutig erfaßbaren Wassertiefen oberhalb der Sensoren aufgeführt worden, was aber als wenig aussagekräftig angesehen wird. Daher werden hier die – mit Unsicherheiten behafteten – Wassertiefen auf dem Strand angeführt.

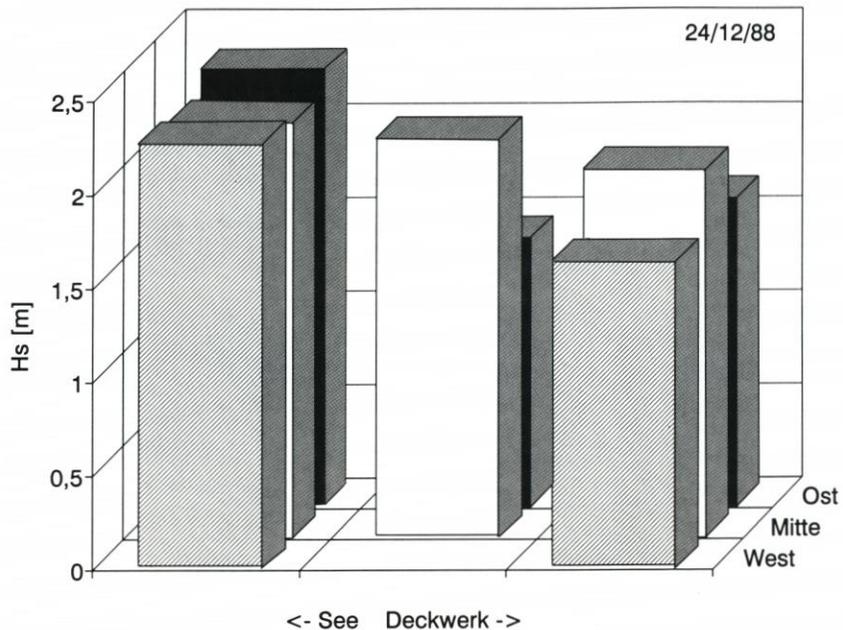


Abb. 14: Signifikante Wellenhöhen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

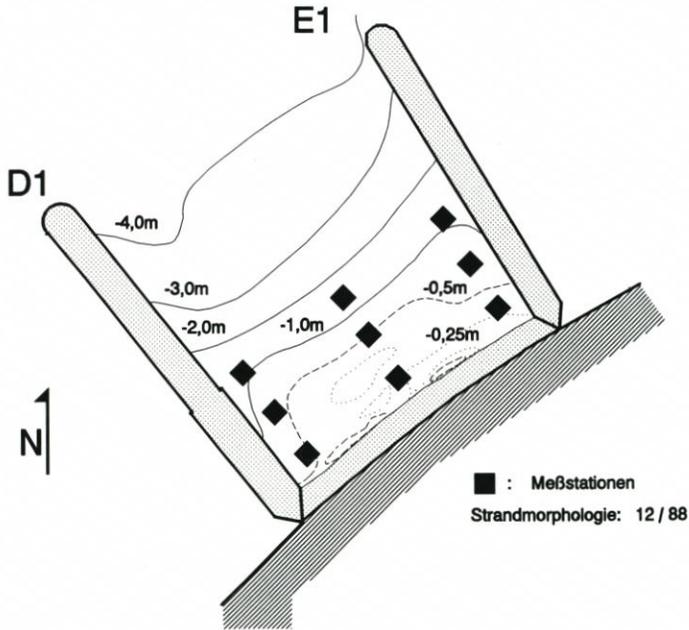


Abb. 15: Tiefenlinien im Bühnenfeld D1/E1 im Dezember 1988

Trotz dieses Vorbehalts charakterisieren die gemessenen Seegangparameter nachvollziehbar die sich auf dem Strand über die Brandungszone fortpflanzenden borenartigen weißen Roller. Untersuchungen zum Verhalten borenartiger Brecher auf Stränden (SAWARAGI u. IWATA, 1975; SUHAYDA u. PETTIGREW, 1977) weisen aus, daß die Wellenhöhen auf Stränden nach dem Brechen weniger von der Wassertiefe, sondern wesentlich von der turbulenzbedingten Dissipation durch die Entfernung zum äußeren Brechpunkt bestimmt werden. PEREGRINE (1966) hat zudem festgestellt, daß die steilen Flanken der Boren bereits in einem Bereich von Wellenhöhen/Wassertiefen-Verhältnissen von  $0,28 < H/h < 0,7$  brechen, wobei sich aber sekundäre Wellen weiter fortpflanzen können. Zudem hat sich in vielen Untersuchungen gezeigt, daß weder Quantifizierungen noch Parametrisierungen der klassischen Brecherkriterien in allen Fällen als absoluter Maßstab gelten können (GALVIN, 1968; BATTJES, 1988), da sie Variationen der Ausgangsteilheit des Seegangs und der Strandneigung nicht berücksichtigen.

Die Intensität der Energieumwandlung nimmt dabei – parametrisiert durch die Wellenhöhen/Wassertiefen-Relationen (Tab. 1) – in der Mitte des Bühnenfeldes landwärts deutlich zu (Abb. 16), an den Seiten hingegen ab. Die signifikanten Wellenperioden (Abb. 17) nehmen dort ebenfalls in unterschiedlicher Stärke ab, während in Feldmitte eine geringfügige Zunahme festzustellen ist. Diese Beobachtung bestätigt die aus den Wellenhöhen/Wassertiefen-Relationen abgeleiteten Aussagen über die örtlichen Unterschiede der Zu- oder Abnahme der strandnormalen Energiedissipation in der Brandungszone: Je intensiver die Energieumwandlung, desto ausgeprägter ist die Abnahme der Seegangsteilheiten (Abb. 18). Insgesamt kann aus den Veränderungen der Seegangparameter gefolgert werden, daß in der Mitte des Bühnenfeldes die Energieumwandlung des einschwingenden Seegangs weiter landwärts erfolgt als an den Seiten. Dort treten naturgemäß wegen der zur strandnormalen schrägen mittleren Anlaufrichtung des Seegangs von etwa  $315^\circ$  Unterschiede an den Seiten des Bühnenfeldes auf, die in Seegangslee oder -luv liegen. Es besteht kein Anlaß, die hier erfaßten Phänomene als

Tabelle 1.

Messung vom 24. 12. 88		w	m	o
Station 1	$H_s$	2,26	2,21	2,32
	$T_{Hs}$	7,81	6,24	5,82
	h	3,79	4,24	3,64
	$H_{rms}$	1,44	1,42	1,40
	L	45,63	37,29	32,26
	$H_s/h$	0,596	0,521	0,637
	$h/L_0$	0,040	0,070	0,069
	$H_s/L_{Hs}$	0,050	0,059	0,072
	Miche-Wert	0,067	0,086	0,085
	E [kW/m]	12,13	12,40	10,36
	E/Std[kW/mh]	7766,7	7582,2	7730,8
Station 2	$H_s$		2,12	1,43
	$T_{Hs}$		6,87	5,33
	h		3,60	3,19
	$H_{rms}$		1,35	1,26
	L		38,73	27,56
	$H_s/h$		0,588	0,448
	$h/L_0$		0,049	0,072
	$H_s/L_{Hs}$		0,055	0,052
	Miche-Wert		0,074	0,087
	E [kW/m]		10,16	8,15
	E/Std[kW/mh]		7005,0	6234,1
Station 3	$H_s$	1,63	1,96	1,64
	$T_{Hs}$	6,41	6,44	5,76
	h	3,11	3,32	3,41
	$H_{rms}$	0,99	1,19	1,02
	L	33,6	34,77	31,01
	$H_s/h$	0,524	0,590	0,481
	$h/L_0$	0,049	0,051	0,066
	$H_s/L_{Hs}$	0,049	0,056	0,053
	Miche-Wert	0,073	0,075	0,084
	E [kW/m]	4,87	7,13	5,27
	E/Std[kW/mh]	3916,9	5635,7	4170,4

örtliche Besonderheit anzusehen. Vielmehr ist wahrscheinlich, daß – bei Vorliegen ähnlicher Randbedingungen – die Prozesse qualitativ gleichartig ablaufen. Auf jeden Fall erscheint es angemessen, diese Annahme für die Bühnenfelder westlich des Divergenzbereiches am Nordweststrand von Norderney als zutreffend anzusehen.

Die Strömungsdaten in ihrer Gesamtheit belegen die hohe Transportkapazität der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen auf Stränden. Während Tidenströmungen hier nur sehr geringe Geschwindigkeiten aufweisen (NIEMEYER, 1987c), weisen die seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen nennenswerte Anteile im Geschwindigkeitsbereich von 1,5 m/s bis 2,5 m/s auf, die somit von gleicher Größenordnung oder sogar höher sind (Abb. 19) als die Maximalwerte der Tidenströmung (KOCH u. NIEMEYER, 1978) in der tiefen Rinne des Seegats.

Die Stromstärkerosen für die Zeitreihe zeigen ein landwärts zunehmendes Überwiegen seeseitig gerichteter Strömungen (Abb. 19). Dieser Effekt wird noch offensichtlicher bei Darstellung der Strömungsverhältnisse in Form resultierender Stromstärkerosen (Abb. 20). So sind in der inneren Linie des Meßfeldes in der Nähe des Deckwerks ( $w_3$ ,  $m_3$ ,  $o_3$ ) nur noch

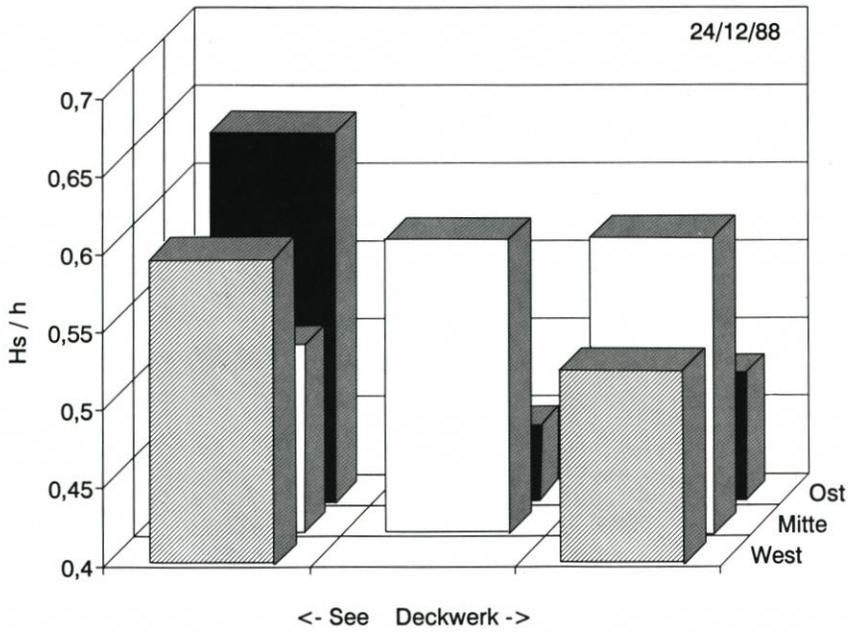


Abb. 16: Verhältnis der signifikanten Wellenhöhen und Wassertiefen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

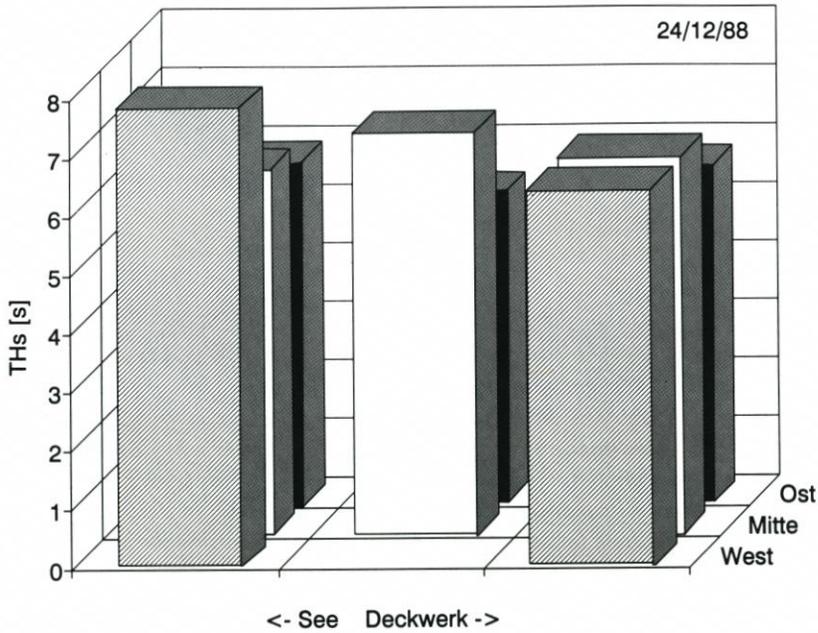


Abb. 17: Signifikante Wellenperioden an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

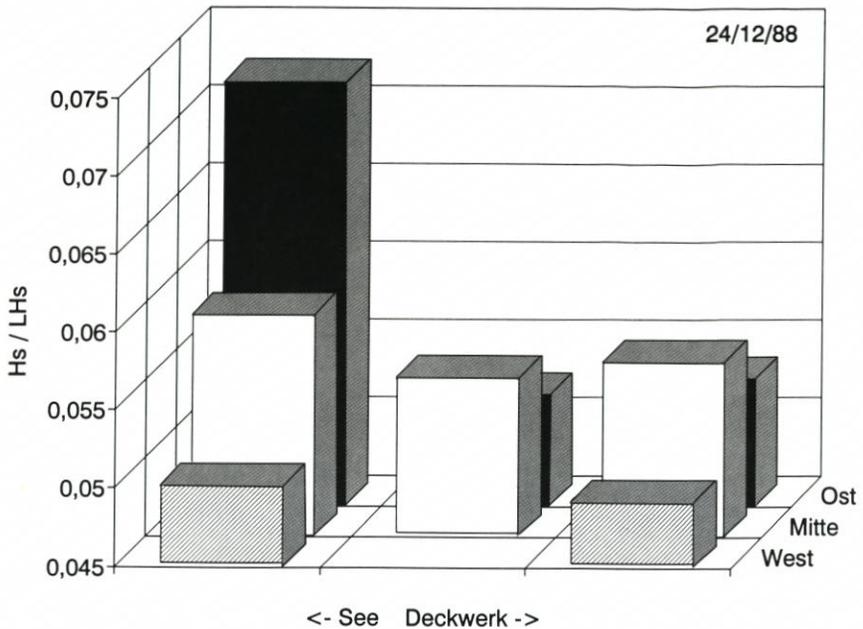


Abb. 18: Signifikante Wellensteilheiten an den Stationen im Bühnfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

resultierende Komponenten in strandnormal seewärtiger und in strandparallel unterdriftiger Richtung mit einem erheblichen Anteil hoher Geschwindigkeiten vorhanden. Eine Analyse der Meßdaten mit Hilfe von Richtungsspektren führt zu übereinstimmenden Resultaten (Abb. 21). Es wird zudem deutlich, daß die strandparallelen Brandungsströmungen im Vergleich zu den strandnormalen Strömungen sowohl von der Häufigkeit als auch von den absoluten Geschwindigkeiten her als weniger bedeutend anzusehen sind.

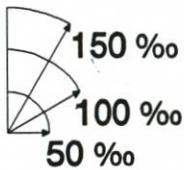
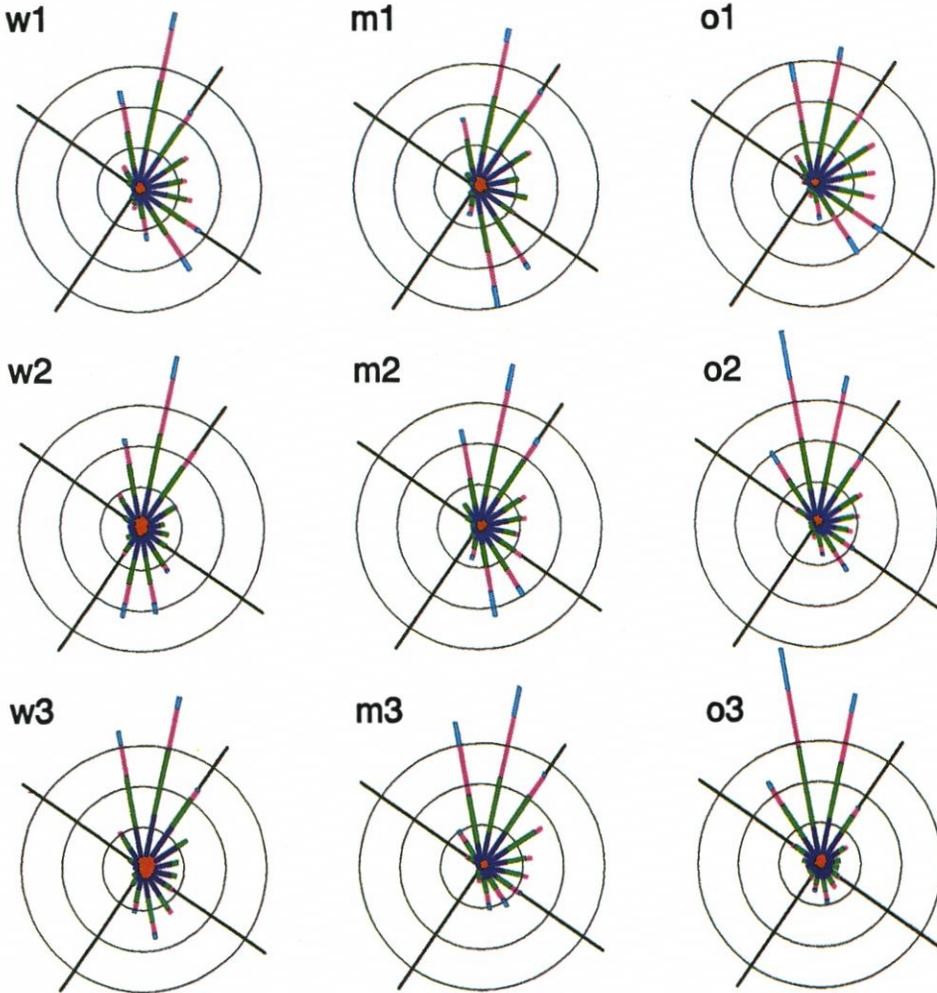
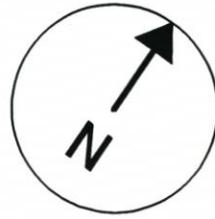
Die deutliche Dominanz seewärts gerichteter Strömungen in Sohlhöhe ist typisch für Trecker, wie sie schon HAGEN (1863) beschrieben hat und die im modernen internationalen Schrifttum über Brandung als „undertow“ (SVENDSEN, 1984; STIVE u. WIND, 1986; BATTJES, 1988) analysiert und bezeichnet werden (Abb. 22). Sie treten als Folge brechender Wellen insbesondere dann auf, wenn – wie hier bereits für die Verhältnisse der Norderneyer Strände dargestellt – über die gesamte Breite der Brandungszone die Energieumwandlung in Form borenartiger weißer Roller erfolgt. Deren landwärts gerichteter Massentransport kann nur durch einen „relativ starken, seewärts gerichteten Strom unterhalb der Wellentäler“ (BATTJES, 1988) kompensiert werden. Die hohe Turbulenz in der Brandungszone bewirkt eine erhebliche Suspension von Sedimenten, so daß die hohen Transportkapazitäten der Trecker nicht nur auf sohlnahe Geschiebefrachten zurückzuführen sind. Wie wirksam aber allein schon sohlnaher Geschiebetransport sein kann, haben Naturmessungen im Grenzschichtbereich der Strandsohle an der Tidemittelwasserlinie gezeigt: Bei Geschwindigkeiten von 1,3 m/s und mehr wurden Sheetflowerscheinungen in Schichten von 2 bis 5 mm mit Erosionsraten bis zu 5,5 cm pro Stunde festgestellt (YU, NIEMEYER u. BAKKER, 1991).

Die Ergebnisse der Datenanalyse liefern in Zusammenhang mit theoretischen und experimentellen Erkenntnissen (SVENDSEN, 1984; STIVE u. WIND, 1986; BATTJES, 1988; VAN RHIJN, 1990) eine plausible Erklärung für die nach Sturmfluten festzustellenden starken

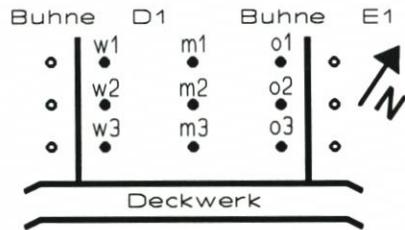
# STROMSTÄRKERROSEN

Datum: 24.12.1988

Meßzeitraum: 11:34 bis 11:54



**0,00 bis 0,30 m/s**  
**0,30 bis 0,60 m/s**  
**0,60 bis 1,00 m/s**  
**1,00 bis 1,50 m/s**  
**1,50 bis 2,50 m/s**  
**2,50 bis Vmax**



Häufigkeiten

Geschwindigkeitsklassen

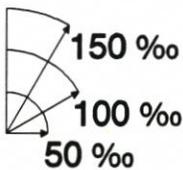
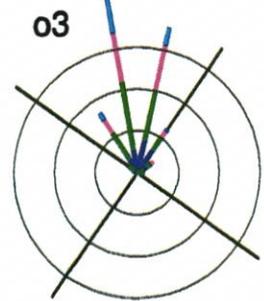
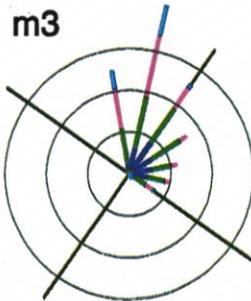
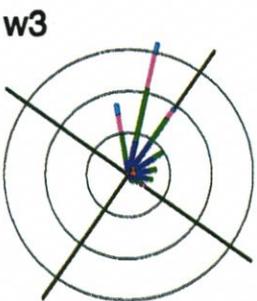
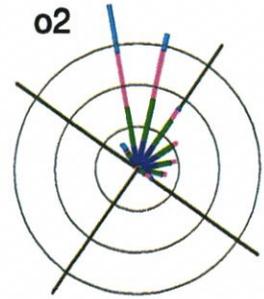
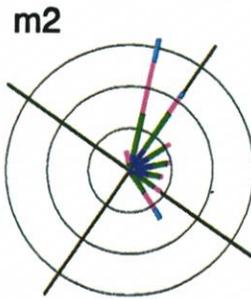
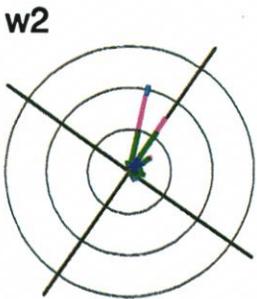
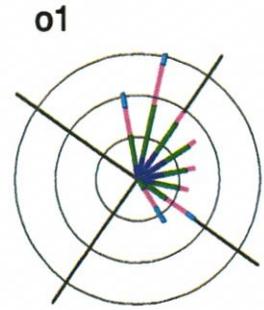
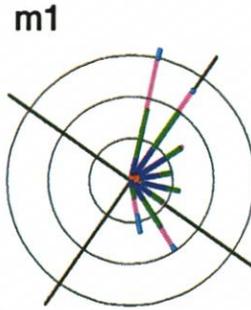
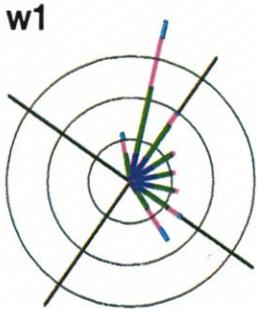
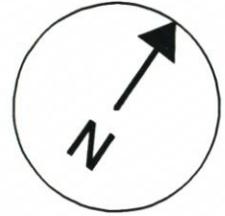
Lage der Meßstationen

Abb. 19: Stromstärkerosen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

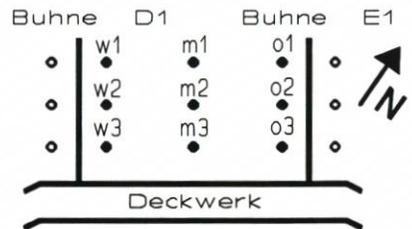
# RESULTIERENDE STROMSTÄRKEROKEN

Datum: 24.12.1988

Meßzeitraum: 11:34 bis 11:54



0,00 bis 0,30 m/s  
 0,30 bis 0,60 m/s  
 0,60 bis 1,00 m/s  
 1,00 bis 1,50 m/s  
 1,50 bis 2,50 m/s  
 2,50 bis Vmax



Häufigkeiten

Geschwindigkeitsklassen

Lage der Meßstationen

Abb. 20: Resultierende Stromstärkeroken an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

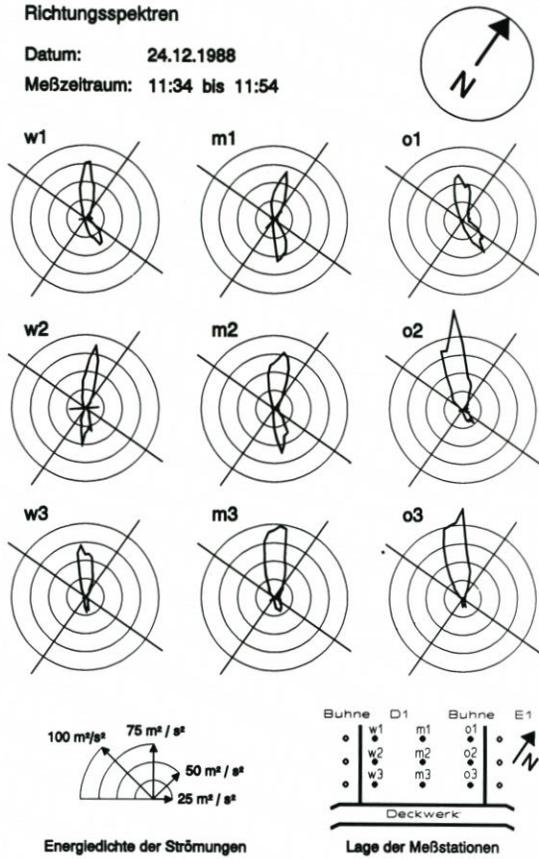


Abb. 21: Richtungsspektren an den Stationen im Bühnengebiet D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

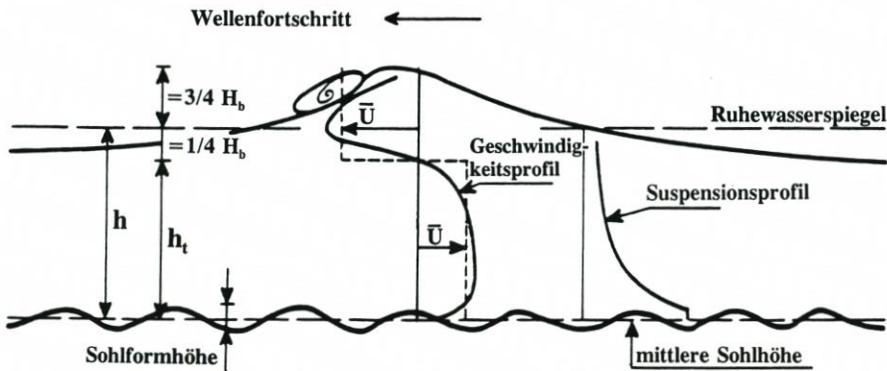


Abb. 22: Schematische Darstellung eines Treckers (undertow) in der Brandungszone und des Sedimenttransports (VAN RHIJN, 1990)

Erosionen an Stränden. Die resultierend seewärts gerichteten küstennormalen Strömungen mit hohen Geschwindigkeiten verfügen über eine hohe Transportkapazität, der durch die hohe Turbulenz in der Brandungszone zusätzlich Material zugeführt wird. Hierdurch werden erst die hohen Erosionsraten durch Sturmfluten möglich. Der strandnormale Gradient der Strömungen mit Abnahme nach See hin erklärt zudem sowohl die starken Auskolkungen vor den Deckwerken als auch die Ablagerung des erodierten Materials auf dem Vorstrand. Die wesentlich geringere Transportkapazität der strandparallelen Brandungsströmung macht die Ursachen dafür deutlich, daß die Umlagerungsvorgänge bei Sturmfluten überwiegend strandnormal und nicht küstenparallel (VAN DE GRAAFF, NIEMEYER u. VAN OVEREEM, 1991) erfolgen.

#### 4.3 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei Dünung

Im Gegensatz zu Sturmflutverhältnissen mit einer breiten Brandungszone findet die Energieumwandlung des einschwingenden Seegangs auf dem Strand in einem engen Brandungsbereich mit anschließender Auflauf- oder Swashzone vor dem Deckwerk (Abb.23) statt. Der Seegang auf dem Vorstrand und Strand wird infolge Shoaling vor dem Brechen stark aufgesteilt. Die Energieumwandlung erfolgt dann zumeist in Form von Sturzbrechern, deren Wassermassen sich in einem borenartigen Auflaufschwall auf dem Strandbereich oberhalb des Ruhewasserspiegels fortpflanzen.

Zur Charakterisierung derartiger Verhältnisse wird hier eine Zeitreihe um den Thw-Eintritt der Abendtide vom 17. Februar 1989 herangezogen. Es herrschte ablandiger Wind mit Geschwindigkeiten um 5 m/s; der Flutscheitel lag um etwa 0,3 m unter dem MThw. Die



Abb.23: Schmale Brandungszone auf dem Nordweststrand von Norderney vor dem Deckwerk

signifikanten Wellenhöhen variierten im gesamten Meßfeld zwischen  $H_s = 1,03$  m in der Station  $o_1$  und  $H_s = 0,60$  m in der Station  $o_3$  (Abb. 24), die signifikanten Wellenperioden zwischen  $4,9 \text{ s} \leq T_{H_s} \leq 8,6 \text{ s}$  (Abb. 26). Die aus etwa  $315^\circ$  in das Bühnenfeld einschwingende Dünung weist in der seewärtigen Meßreihe am Übergang zum Vorstrand weder hinsichtlich des Wellenhöhen/Wassertiefen-Verhältnisses noch in bezug auf die Steilheit annähernd Werte auf (Abb. 25 u. 27), die auf Brandungsvorgänge schließen lassen (Tab. 2). Bis zur mittleren

Tabelle 2.

Messung vom 17. 2. 89		w	m	o
Station 1	$H_s$	0,98	0,93	1,03
	$T_{H_s}$	7,52	5,79	6,18
	h	2,67	2,97	2,12
	$H_{rms}$	0,64	0,53	0,60
	L	37,27	29,39	27,14
	$H_s/h$	0,367	0,313	0,486
	$h/L_0$	0,030	0,057	0,036
	$H_s/L_{H_s}$	0,026	0,032	0,038
	Miche-Wert	0,059	0,079	0,064
	E [kW/m]	2,03	1,46	1,53
	E/Std[kW/mh]	1575,5	1061,6	1372,0
Station 2	$H_s$	0,91	0,94	0,78
	$T_{H_s}$	4,87	5,78	6,73
	h	1,73	1,73	1,31
	$H_{rms}$	0,54	0,55	0,43
	L	19,08	22,98	23,65
	$H_s/h$	0,526	0,543	0,595
	$h/L_0$	0,047	0,033	0,019
	$H_s/L_{H_s}$	0,048	0,041	0,033
	Miche-Wert	0,072	0,062	0,047
	E [kW/m]	1,08	1,30	0,59
	E/Std[kW/mh]	1143,1	1187,2	724,4
Station 3	$H_s$	0,67	0,66	0,6
	$T_{H_s}$	5,45	7,27	8,64
	h	1,40	1,19	1,05
	$H_{rms}$	0,41	0,37	0,29
	L	19,55	24,47	27,47
	$H_s/h$	0,479	0,555	0,571
	$h/L_0$	0,030	0,014	0,009
	$H_s/L_{H_s}$	0,034	0,027	0,022
	Miche-Wert	0,059	0,041	0,033
	E [kW/m]	0,57	0,42	0,24
	E/Std[kW/mh]	655,9	561,3	338,2

Meßreihe erfolgt dann eine deutliche Zunahme dieser beiden Werte, woraus auf eine wachsende Neigung zum Brechen geschlossen werden kann. Erst zwischen der mittleren und landseitigen Meßreihe ist das Einsetzen der Brandung erkennbar, da die kennzeichnenden Relationen (Tab. 2) partielle Dissipation erkennen lassen (Abb. 25 u. 27).

Die Stromstärkerosen (Abb. 28) weisen für das Bühnenfeld D1/E1 ebenso wie die Richtungsspektren (Abb. 30) und die resultierenden Stromstärkerosen (Abb. 29) ein wesentlich uneinheitlicheres Bild aus, als es für die Sturmflut vom 24. 12. 1988 festgestellt werden konnte. In der Mitte des Bühnenfeldes und insbesondere in seinem östlichen Teil treten

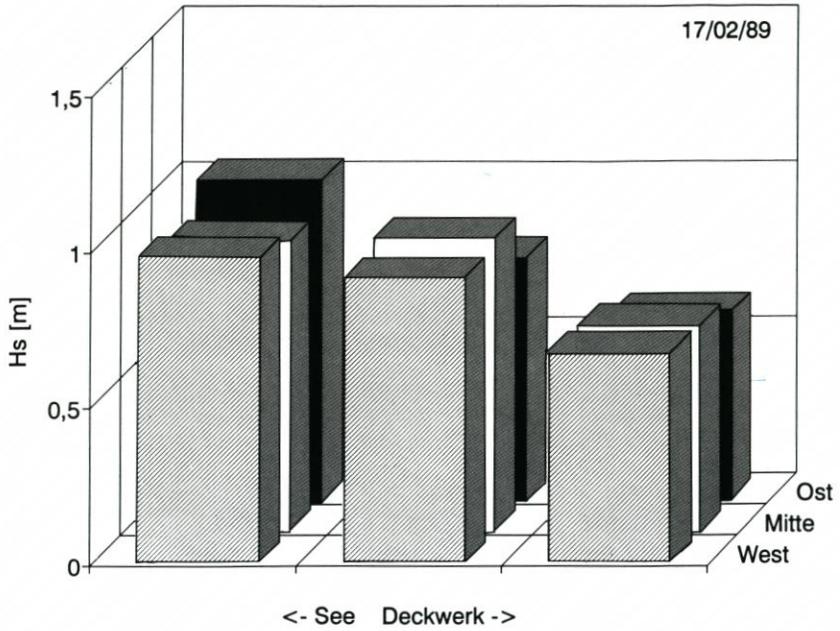


Abb.24: Signifikante Wellenhöhen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

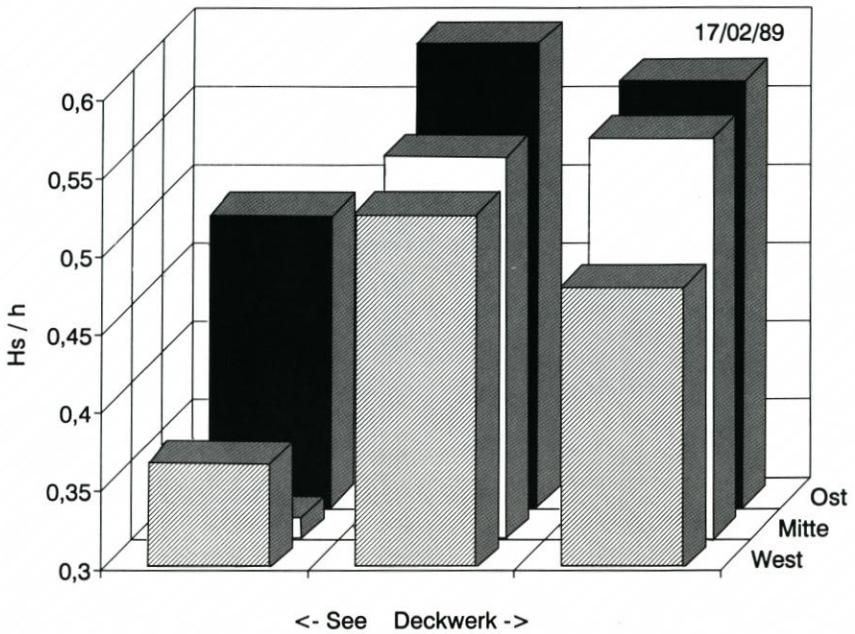


Abb.25: Verhältnis der signifikanten Wellenhöhen und Wassertiefen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

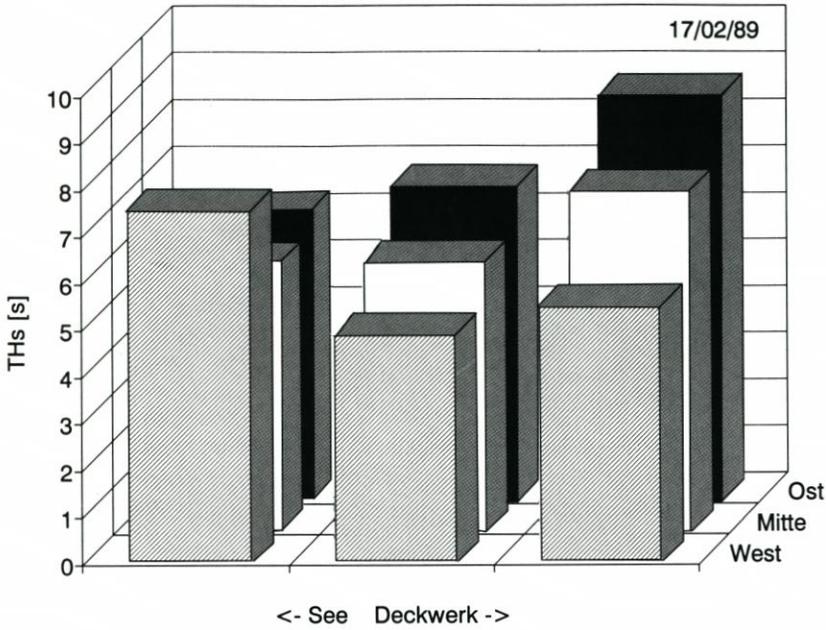


Abb. 26: Signifikante Wellenperioden an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

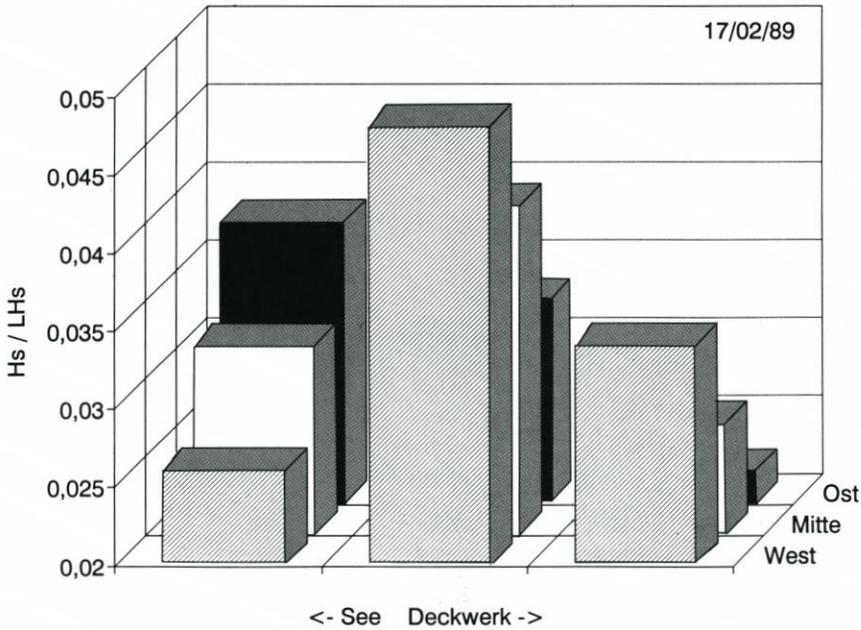


Abb. 27: Signifikante Wellensteilheiten an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

Strömungen auf, die überwiegend landwärts gerichtet sind, während im westlichen Teil ablandige Stromrichtungen dominieren (Abb. 28–30). Aus dem Gesamtbild der Stromstärkerosen und Richtungsspektren ist erkennbar, daß die aus etwa  $315^\circ$  einlaufende Dünung eine Zirkulationsströmung bewirkt: Es herrschen überwiegend aufländig gerichtete seegangsinduzierte Strömungen im östlichen Teil des Bühnenfeldes an den Stationen  $o_1$ ,  $o_2$  und  $o_3$  sowie an der Station  $m_2$  in der Mitte des Bühnenfeldes. In der Station  $m_1$  sind die auf- und ablandig gerichteten Komponenten hingegen ausgeglichen. In Bühnenfeldmitte vor dem Deckwerk in der Station  $m_3$  sind die Strömungen überwiegend strandparallel entgegengesetzt zur entsprechenden Komponente der Einschwingrichtung des Seegangs gerichtet. Im westlichen Teil des Bühnenfeldes treten an allen drei Stationen seewärts gerichtete Strömungen auf, die am stärksten in der mittleren Station  $w_3$  ausgebildet sind. Hier konzentrieren sich offensichtlich Rückströmungen aus dem mittleren und westlichen Abschnitt nahe dem Deckwerk (Abb. 28–30).

Meßdaten für derartige Randbedingungen erklären, warum in der Nachfolge von Sturmfluten eine Regeneration von Stränden stattfindet: Die aufgesteilten Wellen bewirken vor dem Branden eine stark ausgeprägte, landwärts gerichtete Strömung, die einen aufländigen Transport des bei Sturmflut seewärts transportierten Materials erzeugt. Die niedrigen Wasserstände bedingen zudem eine erhöhte Wirksamkeit der Bühnen, so daß diese ufernahe Zirkulationsströmungen herbeiführen können. Die prägende Rolle des Bühnensystems wird auch daran deutlich, daß eine Zuordnung land- und seewärts gerichteter Strömungen zum Energiemaximum und Minimum nicht in gleicher Weise möglich ist wie beispielsweise für Rippströmungen (BATTJES, 1988). Ursächlich können die aufländig wirkenden Strömungen als nichtlineare Drifteffekte nichtbrechender, aufgesteilter Wellen nach LONGUETT-HIGGINS (1953) erklärt werden (Abb. 31). Der bei der Tide am 17. Februar 1988 auf den Strand einschwingende Seegang erfuhr durch Shoaling seewärts der Brecherlinie eine Aufsteilung. Hierbei erfolgt fast nur sohnaher Transport (VAN RHIJN, 1990), wodurch erklärlich wird, daß die Regeneration erheblich längere Zeitspannen benötigt als die Erosion bei Sturmfluten, bei denen die Brandung erhebliche Sedimentmengen in Suspension versetzt und durch Rückströmungen verfrachtet (Abb. 22).

Die morphologischen Auswirkungen dieser Zirkulationsströmungen lassen sich an den Strandaufnahmen des 17. Februar 1989 deutlich erkennen: Im mittleren und insbesondere im östlichen Teil des Bühnenfeldes sind erhebliche Sedimentakkumulationen festzustellen (Abb. 32), die sich bis zum April 1989 bereits über das gesamte Bühnenfeld verteilt haben (Abb. 33).

## 5. Hydrodynamische Wirksamkeit von Strandbühnen

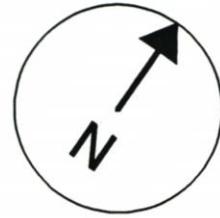
Die Funktion von Strandbühnen ist, küstenparallelen Längstransport durch Brandungsströmungen zu reduzieren. Die hydrodynamische Wirksamkeit der Strandbühnen konnte bereits am Beispiel der durch einschwingende Dünung bewirkten ufernahen Zirkulation gezeigt werden. Im folgenden soll auf der Grundlage der beiden hier untersuchten Zeitreihen versucht werden, Einblicke in die Wechselwirkungen von Seegang, seegangsinduzierten Strömungen und Strand mit Strandbühnen zu gewinnen, indem daran beispielhaft die hydrodynamische Wirksamkeit der in Driftrichtung liegenden Bühne E1 untersucht wird.

Die Daten der Sturmflut vom 24. 12. 1988 zeigen für die Stationen  $m_1$ ,  $m_2$  und  $m_3$  in der Mitte des Bühnenfeldes (Abb. 19), daß sich hier über die gesamte Breite des Strandes eine ausgeprägte Brandungsströmung mit einem bemerkenswerten Anteil im Geschwindigkeitsbe-

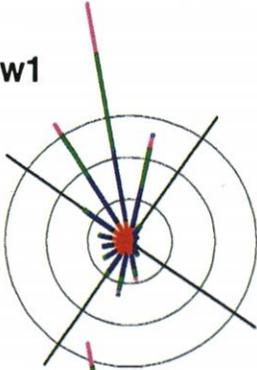
# STROMSTÄRKEROSEN

Datum: 17.02.1989

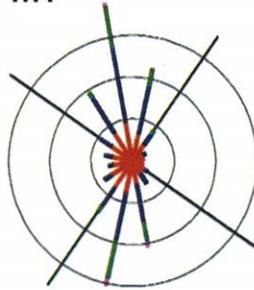
Meßzeitraum: 21:18 bis 21:38



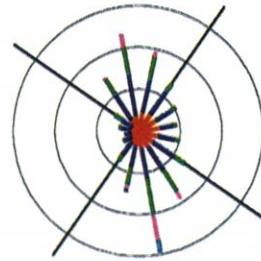
w1



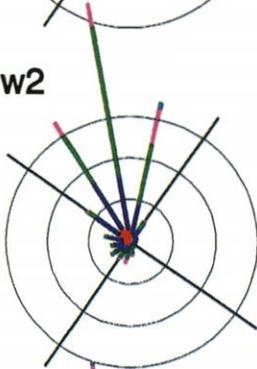
m1



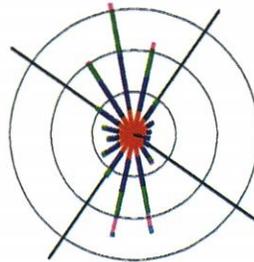
o1



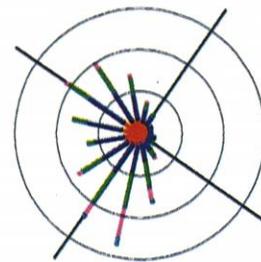
w2



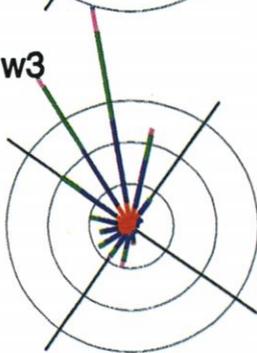
m2



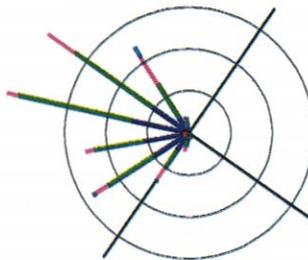
o2



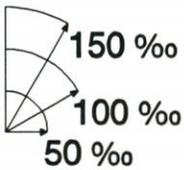
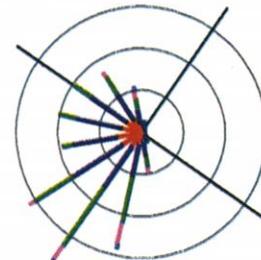
w3



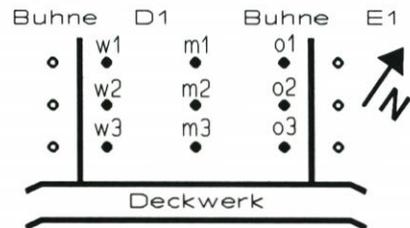
m3



o3



0,00 bis 0,30 m/s  
 0,30 bis 0,60 m/s  
 0,60 bis 1,00 m/s  
 1,00 bis 1,50 m/s  
 1,50 bis 2,50 m/s  
 2,50 bis Vmax



Häufigkeiten

Geschwindigkeitsklassen

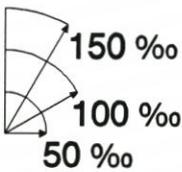
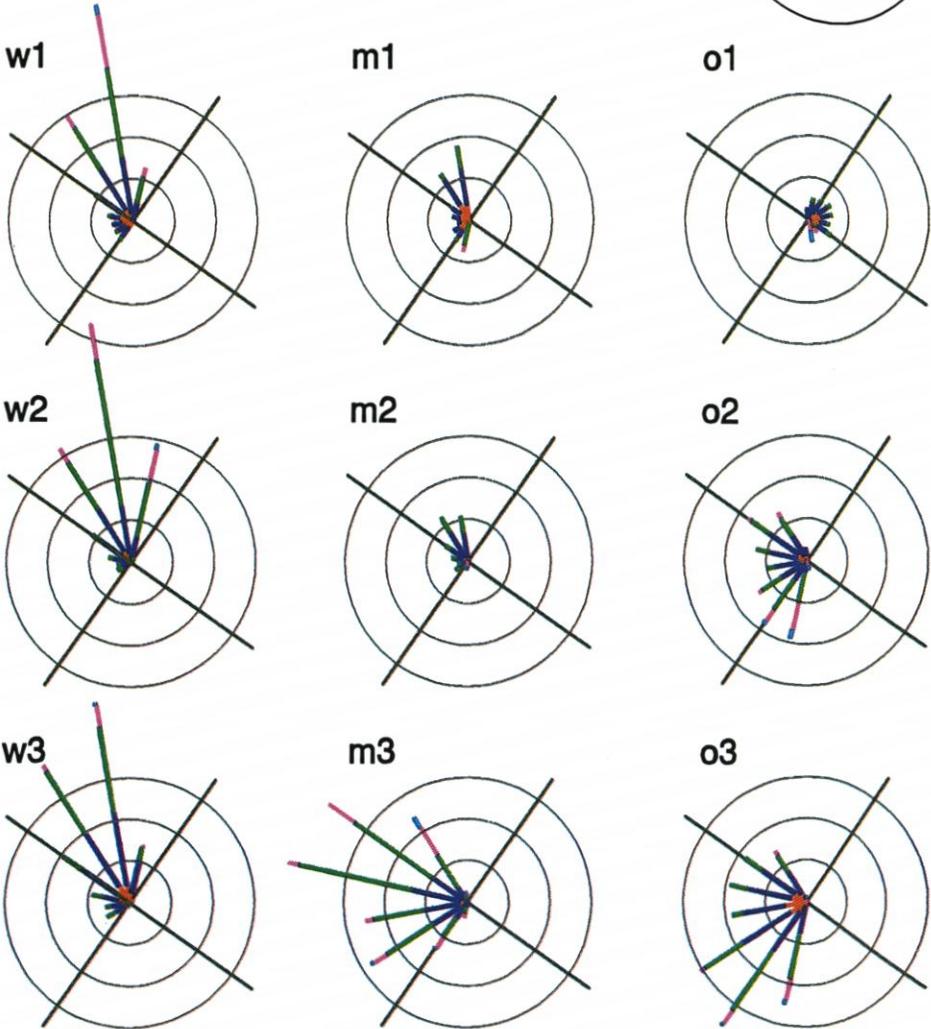
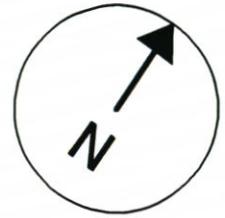
Lage der Meßstationen

Abb.28: Stromstärkerosen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

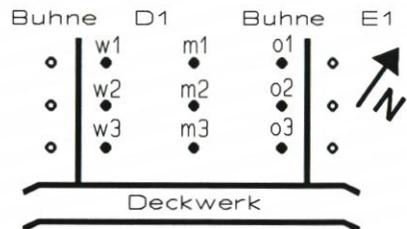
# RESULTIERENDE STROMSTÄRKEROSEN

Datum: 17.02.1989

Meßzeitraum: 21:18 bis 21:38



**0,00 bis 0,30 m/s**  
**0,30 bis 0,60 m/s**  
**0,60 bis 1,00 m/s**  
**1,00 bis 1,50 m/s**  
**1,50 bis 2,50 m/s**  
**2,50 bis Vmax**



Häufigkeiten

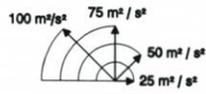
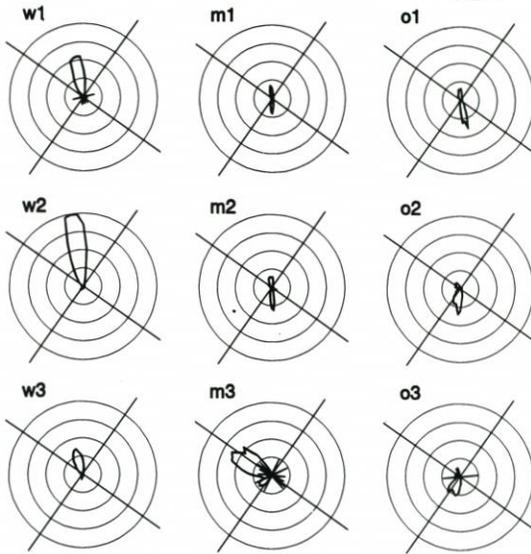
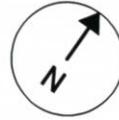
Geschwindigkeitsklassen

Lage der Meßstationen

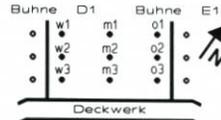
Abb. 29: Resultierende Stromstärkerosen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

Richtungsspektren

Datum: 17.02.1989  
 Meßzeitraum: 21:18 bis 21:38



Energiedichte der Strömungen



Lage der Meßstationen

Abb. 30: Richtungsspektren an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

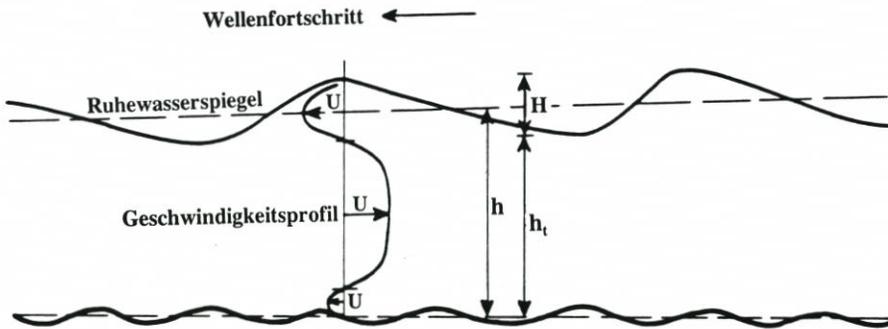


Abb. 31: Driftströmungen bei Wellen infolge nichtlinearer Effekte nach LONGUETT-HIGGINS (VAN RHIJN, 1990)

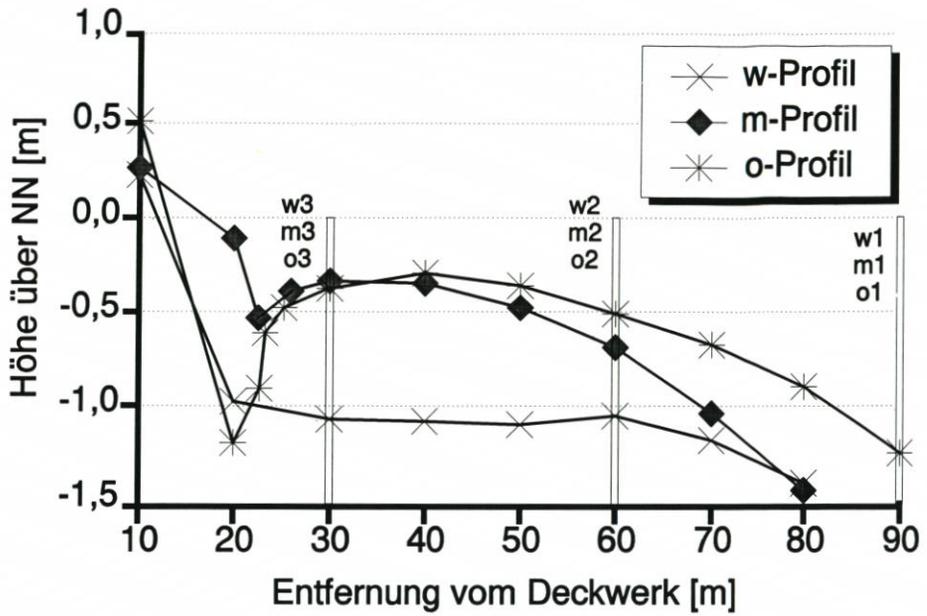


Abb. 32: Strandprofile entlang der Meßreihen am 17. 02. 1989

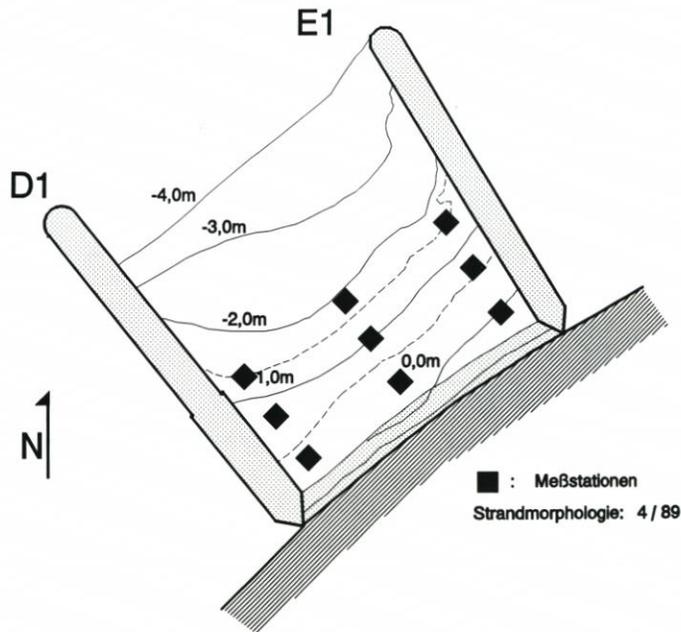


Abb. 33: Tiefenlinien im Bühnenfeld D1/E1 im April 1989

reich  $0,5 \text{ m/s} \leq v_L < 1,0 \text{ m/s}$  ausgebildet hat. Ein Vergleich mit den Datensätzen der im Seegangsluv der Buhne E1 liegenden Stationen  $o_1$ ,  $o_2$  und  $o_3$  zeigt hingegen, daß dort die strandparallelen Komponenten der Strömungen landwärts deutlich an Häufigkeit und Intensität abnehmen. Offenbar werden die strandparallelen Strömungskomponenten infolge der landwärts wachsenden geodätischen Höhen der Buhne zunehmend blockiert.

Ein vergleichbarer Effekt läßt sich auch für die Datensätze der Normaltide in anderer Form nachweisen. Die Stromstärkerosen für die Stationen  $o_1$ ,  $o_2$  und  $o_3$  (Abb. 28) zeigen eine landwärts sich verstärkende Richtungsumkehr der strandparallelen Strömungskomponenten. In der am weitesten seawärts gelegenen Station  $o_1$  sind in Übereinstimmung mit der schräg aus etwa  $315^\circ$  einschwingenden Dünung die strandparallelen Strömungskomponenten unterdriftig nordöstlich gerichtet und hinsichtlich Intensität und Häufigkeit stärker ausgeprägt als an der in Bühnenfeldmitte gelegenen Station  $m_1$ . In den weiter landwärts gelegenen Stationen, wie bereits gezeigt, werden sie hingegen durch die Wirkung der Buhne umgelenkt; die noch weiter seawärts in Richtung auf die Buhne gerichteten Längsströmungen sind hier völlig blockiert.

Ein Vergleich der geometrischen Randbedingungen für beide Datensätze (Abb. 34) ergibt überraschenderweise, daß die Wassertiefen über der Buhne im Bereich der Station  $o_3$  bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988 mit etwa 1,7 m bei hydrodynamischer Wirksamkeit der Buhne erheblich größer war als an der Station  $o_1$  bei der Tide vom 17. 02. 1989 mit etwa 1,0 m, wo ein Blockieren der Längsströmungen nicht erkennbar ist. Offensichtlich ist die Wassertiefe oberhalb der Bühnenkrone nicht geeignet, um die hydrodynamische Wirksamkeit von Strandbuhnen zu parametrisieren. Wird jedoch zusätzlich die Höhe der Bühnenkrone über der Sohle in die Betrachtung einbezogen (Abb. 34), gelangt man zu plausiblen Zusammenhängen für die hydrodynamische Wirksamkeit von Strandbuhnen. Maßgeblicher als die Wassertiefe oberhalb der Bühnenkrone sind hierfür dem Anschein nach die Wassertiefen zwischen Strandsohle und Bühnenkrone.

Die Einbeziehung von Seegangs- und Strömungsparametern lieferte keine zusätzlichen Erkenntnisse. Es bleibt aber zu betonen, daß die hier angestellten Überlegungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit von Buhnen vorläufigen Charakter haben und weitere eingehende

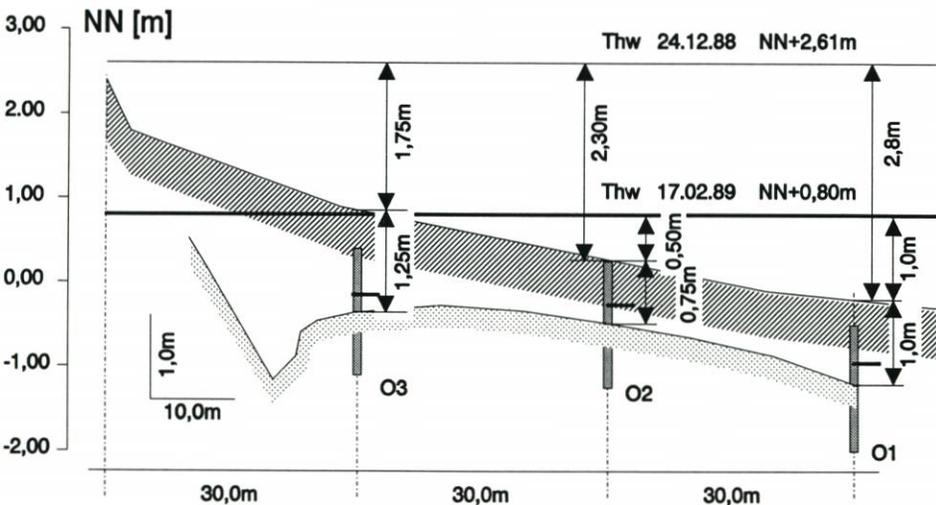


Abb. 34: Kronenlage der Buhne E1 mit Wasserständen und -tiefen für drei Tiden vom 24. 12. 1988 und 17. 02. 1989

Untersuchungen auf einer breiteren Datenbasis erforderlich bleiben. Trotz dieser Einschränkung läßt sich aus diesen Erkenntnissen hinsichtlich der Gestaltung von Strandauffüllungen bereits ein Rückschluß ziehen. Je höher die Strände relativ zur Kronenhöhe der Bühnen aufgefüllt werden, um so geringer ist deren hydrodynamische Wirksamkeit gegenüber Längsströmungen. Entsprechend größer sind die Anfangsverluste durch den Küstenlängstransport, die im Gegensatz zum Küstenquertransport strukturelle Erosion bedeuten.

Auf jeden Fall legen die hier gewonnenen Erkenntnisse die Vermutung nahe, daß die Strandbühnen im Vorstrandbereich nur sehr geringe oder sogar keine hydrodynamische Wirksamkeit gegenüber seegangsinduzierten Längsströmungen entwickeln können. Hieraus ist zu folgern, daß Strandbühnen hinsichtlich der strukturellen Erosion durch den Küstenlängstransport – wenn überhaupt – nur in geringem Maß den Strand stabilisieren können, wenn die Sohle oberhalb des hydrodynamisch bedingten Minimalprofils (KURZAK et al., 1949; STEPHAN, 1988; KUNZ, 1991a) liegt. Allerdings ist davon auszugehen, daß die Intensität seegangsinduzierter Längsströmungen im Vorstrandbereich wesentlich geringer und seltener ist als auf dem Strand, so daß hier keine ähnlich großen Erosionsraten auftreten können.

## 6. Schlußfolgerungen und Ausblick

Erosion der Strände bei Sturmfluten und deren anschließende Regeneration konnte hier durch die Analyse von Naturmessungen und die Einbindung von deren Ergebnissen in theoretische Zusammenhänge ursächlich gedeutet werden. Als erstes kann aus den Ergebnissen für die zukünftige Erfolgskontrolle von Strandauffüllungen abgeleitet werden, daß die Verweilzeit der Auffüllkörper und damit die Langzeitwirkung von Strandauffüllungen nicht im umgekehrt proportionalen Verhältnis zur Seegangsenergie steht, wie beispielsweise von PÄTZOLD (1982), DETTE und FÜHRBÖTER (1986) sowie ERCHINGER (1986) vermutet, da Seegang – wie hier dargelegt – nicht nur Erosion, sondern auch Zufuhr von Sediment an Stränden bewirkt.

Aus den hier exemplarisch erläuterten Erkenntnissen über die Transportvorgänge im Bereich von Vorstrand und Strand und deren Vereinbarkeit mit theoretisch und experimentell entwickelten Konzepten des Fachschrifttums sind für die Gestaltung künftiger Strandauffüllungen folgende Rückschlüsse zu ziehen (NIEMEYER, 1991):

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 späte Frühjahr und den Frühsommer, der üblichen Saison für die Ausführung 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. Strukturelle Erosion wird durch Längs- und nicht durch Quertransport bewirkt (VAN DE GRAAFF, NIEMEYER u. VAN OVEREEM, 1991); somit ist das Konzept einer Vorstrandauffüllung die logische Konsequenz aus dieser Gegebenheit.

Ein weiterer Vorteil entsteht zudem dadurch, daß infolge der geringeren Aufhöhung des Strandes die hydrodynamische Wirksamkeit der Strandbühnen im Bereich der intensivsten strandparallelen Strömungen in der Brandungszone weniger reduziert wird als bei der

Einbringung größerer Mengen auf dem Strand. Insofern ist eine Vorstrandauffüllung auch hinsichtlich dieser Gegebenheiten von Vorteil, da hiermit die Verfrachtung durch den strandparallelen Küstenlängstransport verlangsamt werden kann.

Im Frühjahr 1992 ist auf Norderney die siebte Strandauffüllung seit 1951 vorgenommen worden. In konsequenter Umsetzung der im KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ gewonnenen Erkenntnisse wurde hierbei erstmals ein Anteil von etwa 50 % in den Vorstrand eingebracht. Die Erfolgskontrolle wird zeigen, ob die positiven Annahmen der Realität entsprechen. Dies wird in besonderem Maße möglich sein, da hierfür durch Förderung des BUNDESMINISTERIUMS FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE das KFKI-Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen“ eingerichtet werden konnte. Zudem wird mit großer Wahrscheinlichkeit im Rahmen des MAST-II-Programms (Marine Science and Technology) der Europäischen Gemeinschaft das dänisch-deutsch-niederländische Projekt NOURTEC (Nourishment Technologies) zur vergleichenden Erfolgskontrolle und konzeptionellen Fortentwicklung von Vorstrandauffüllungen 1993 beginnen können, für das die Vorstrandauffüllung auf Norderney ebenfalls Anwendungsobjekt sein wird.

## 7. Danksagung

Vorstehende Untersuchungen konnten im Rahmen des vom BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMFT) über das KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (KFKI) geförderten Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ (MTK 0385) ausgeführt werden. Herr Ministerialrat Dr. F. Wilckens vom BMFT, der das Vorhaben angeregt hatte, ist der Idee umfangreicher Naturmessungen von Beginn an gegenüber sehr aufgeschlossen gewesen und hat die Schaffung der dafür erforderlichen Infrastruktur ermöglicht. Sein fachliches Interesse hat die Untersuchungen unterstützend begleitet.

Naturuntersuchungen zur Hydrodynamik in der Brandungszone erfordern nicht nur erhebliche materielle Aufwendungen, sondern sind auch sehr personalintensiv. Meßnetzaufbau und -unterhaltung sowie Datenerfassung, -management und -analyse erfordern hohen Aufwand an Zeit und Sorgfalt, um aussagekräftige und verlässliche Daten und Ergebnisse zu liefern. Besonderer Dank gilt hierfür den Kollegen des Verfassers aus dem Dezernat Hydrographie des Küstengebietes der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE des NLWA, vor allen den Herren Günther Brandt, Detlef Glaser, Dipl.-Ing. Ralf Kaiser, Holger Karow, Dipl.-Math. Wolfgang Liebig und Georg Münkewarf.

## 8. Schriftenverzeichnis

- ADEL, J. D., DEN, NIEMEYER, H. D., FRANKEN, A. F., BOOIJ, N., DEKKER, J. u. VOGEL, J. A.: Wave model application in a Wadden Sea area. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- ARBEITSGRUPPE NORDERNEY des „Küstenausschuß Nord- und Ostsee“: Gutachtliche Stellungnahme zu den Untersuchungen über die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney sowie zu den zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- BASCOM, W. H.: Characteristics of natural beaches. Proc. 4th Conf. o. Coast. Eng., ASCE, 1954.
- BATTJES, J.: Surf-zone dynamics. Ann. Rev. Fluid Mech. 20, 1988.

- BOOIJ, N. u. HOLTHUIJZEN, L.: A grid model for shallow water waves. Proc. 20th Int. Conf. o. Coastal Eng. Taipei, ASCE, New York, 1987.
- BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie): Gezeitentafeln für das Jahr 1992. Band I – Europäische Gewässer, Hamburg, 1991.
- DEAN, R. G.: Principles of beach nourishment. In: P. Komar: CRC Handbook of coastal processes and erosion. CRC Press, Boca Raton/Fl., 1983.
- DETTE, H.-H. u. FÜHRBÖTER, A.: Beurteilung der Versuchssandvorspülung vor Hörnum/Sylt im Jahre 1983. Ber. Nr. 633 Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau (unveröff.), 1986.
- ERCHINGER, H. F.: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste, H. 43, 1986.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. Mitt. d. Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau, H. 40, 1974.
- GALVIN, C. J.: Wave breaking in shallow water. In: R. E. Meyer: Waves on beaches and resulting sediment transport. Academic Press, New York, 1972.
- GRAAFF, J. VAN DE, NIEMEYER, H. D. u. OVEREEM, J. VAN: Beach nourishment, philosophy and coastal protection policy. In: J. v. d. Graaff, H. D. Niemeier, J. v. Overeem: Special Issue Artificial Beach Nourishments. Coast. Eng., Vol. 16, No. 1, 1991.
- HAGEN, G.: Handbuch der Wasserbaukunst – Dritter Theil: Das Meer. Verl. v. Ernst u. Korn, Berlin, 1863.
- HAYES, M. O.: Morphology and sand accumulation in estuaries. In: L. E. Cronin: Estuarine Research, Vol. 2, Academic Press, New York, 1975.
- HAYES, M. O.: Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: S. P. Leatherman: Barrier islands. Academic Press, New York, 1979.
- HOMMEIER, H.: Historisches Kartenwerk 1:50 000 der niedersächsischen Küste. Jber. 1961 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 13, 1962.
- HOMMEIER, H.: Die Auswirkungen schwerer Sturmtiden auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. Jber. 1975 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 27, 1976.
- HOMMEIER, H. u. LUCK, G.: Das Historische Kartenwerk 1:50 000 der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung als Ergebnis historisch-topographischer Untersuchungen und zur kausalen Deutung hydrologisch-morphologischer Gestaltungsvorgänge im Küstengebiet. Göttingen, 1969.
- KOCH, M. u. NIEMEYER, H. D.: Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats. Jber. 1977 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 29, 1978.
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. d. Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau, H. 105, 1989.
- KRAMER, J.: Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951–1952. Jber. 1957 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 9, 1957.
- KRAMER, J.: Die Strandaufspülung Norderney 1951–1952 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7, 1958.
- KRAMER, J.: Beach rehabilitation by use of beach fills and further plans for the protection of the island of Norderney. Proc. 7th Conf. o. Coast. Eng. Richmond, ASCE, 1960.
- KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991a.
- KUNZ, H.: Protection of the island of Norderney by beach nourishment, alongshore structures and groynes. Proc. 3rd Int. Conf. o. Coast. & Port Eng. in Devel. Countries. Mombasa, Kenya, 1991b.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- KURZAK, G., LINKE, O., DECHEND, W., KRAUSE, H. u. THILO, R.: Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney. Jber. 1949 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 1, 1949.
- LASSEN, H.: Örtliche und zeitliche Variationen des mittleren Tidemittelwassers in der südöstlichen Nordsee. Z. f. Vermess.wes., 116. Jg., H. 4, 1991.
- LASSEN, H. u. SIEFERT, W.: Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee – säkularer Trend und Verhältnisse um 1980 (Schlußbericht eines KFKI-Projektes). Die Küste, H. 52, 1991.
- LONGUETT-HIGGINS, M. S.: Mass transport in water waves. Philos. Trans. R. Soc. Londin, Ser. A, 245, 1953.

- LUCK, G.: Die zweite Strandaufspülung am Weststrand Norderney. Jber. 1968 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 20, 1970.
- LUCK, G.: Der Einfluß der Schutzwerke der ostfriesischen Inseln auf die morphologischen Vorgänge im Bereich der Seegaten und ihrer Einzugsgebiete. Mitt. d. Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau, H. 47, 1975.
- MC COWAN, J.: On the highest wave of permanent type. Phil. Mag., Vol. 5, 38, 1894.
- MICHE, R.: Mouvement ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Ann. Ponts Chaussées, 114, 1944.
- NIEMEYER, H. D.: Der Verlauf der Sturmtiden vom Januar 1976 im Bereich der Ostfriesischen Inseln. Jber. 1975 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 27, 1976.
- NIEMEYER, H. D.: Naturmessungen der Seegangs- und Brandungsbeanspruchungen von Inselstränden und Inselnchutzwerken. Jber. 1978 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 30, 1979a.
- NIEMEYER, H. D.: Instrumental equipment and data acquisition for field investigations on wave and surf action on shores. Proc. 18th IAHR-Congress, Cagliari, 1979b.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsbericht MF 0203, 1983.
- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. Jber. 1985 Forsch.-Stelle Küste, Bd. 37, 1986.
- NIEMEYER, H. D.: Zur Klassifikation und Häufigkeit von Sturmtiden. Jber. 1986 Forsch.-Stelle Küste, Bd. 38, 1987a.
- NIEMEYER, H. D.: Tidestrommessungen in Bühnenfeldern. Jber. 1986 Forsch.-Stelle Küste, Bd. 38, 1987b.
- NIEMEYER, H. D.: Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. Proc. 20th Int. Conf. o. Coast. Eng. Taipei, ASCE, New York, 1987c.
- NIEMEYER, H. D.: Morphodynamics of tidal inlets. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. – Progr. o. Contin. Educat. 1990) Delft Univ. o. Techn. Intern. – Intern. Civ. Eng., 1990.
- NIEMEYER, H. D.: Field measurements and analysis of wave-induced nearshore currents. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- NIEMEYER, H. D.: Naturuntersuchungen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen an erodierenden Stränden. Schlußber. KFKI-Forschungsvorhaben MTK 385 – Teil III, Bundesmin. f. Forsch. u. Techn. – Meerestechn. – 1992.
- NIEMEYER, H. D., KAISER, R. u. ADEL, J. D. DEN: Anwendung des mathematischen Seegangmodells HISWA auf Wattenmeerbereiche. Schlußber. Forschungsvorhaben MTK 464 B, Teil III. Bundesminister f. Forsch. u. Techn. Meerestechn. – 1992.
- PÄTZOLD, U.: Bilanz und Verformung aufgespülter Sandstrände. Jber. 1980 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 32, 1982.
- PEPER, G.: Die Entstehung und Entwicklung der Inselnchutzwerke auf Norderney mit besonderer Berücksichtigung der Bauten der letzten Jahre. Neues Arch. f. Niedersachs., Bd. 8, H. 3, 1955.
- PEREGRINE, D. H.: Calculations of the development of an undular bore. Journ. Fluid Mech., Vol. 25, 1966.
- PUTZ, R. R.: Statistical distribution for ocean waves. Trans. Am. Geophys. Un., Vol. 33, No. 5, 1952.
- RHIJN, L. VAN: Sediment transport by currents and waves. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. – Progr. o. Contin. Educat. 1990) Delft Univ. o. Techn. Intern. – Intern. Civ. Eng., 1990.
- ROELSE, P., COOSEN, J. u. MINNEBOO, F. A. J.: Beach Nourishment and monitoring programme. In: J. v. d. Graaff, H. D. Niemeyer, J. v. Overeem: Special Issue Artificial Beach Nourishments. Coast. Eng., Vol. 16, No. 1, 1991.
- ROHDE, H.: Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30, 1977.
- ROHDE, H.: Die neue DIN 4049 – Teil 1 – Hydrologie, Begriffe, quantitativ. Wasser u. Boden, 31. Jg., H. 12, 1979.
- SAWARAGI, T. u. IWATA, K.: On wave deformation after breaking. Proc. 14th Int. Conf. o. Coast. Eng. Copenhagen, ASCE, New York, 1975.
- SCHÜTTRUMPF, R.: Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. d. Franzius-Inst. f. Wasserbau u. Küsteningenieurw., H. 39, 1973.

- STEPHAN, H.-J.: Fünf Strandaufspülungen auf Norderney – Ergebnisse morphologischer Untersuchungen. Arb. a. d. Forsch.-Stelle Küste Nr. 11, 1988.
- STIVE, M. J. F. u. WIND, H. G.: Cross-shore mean flow in the surf zone. *Coast. Eng.*, Vol. 10, No. 4, 1986.
- SUHAYDA, J. N. u. PETTIGREW, N. R.: Observations of wave height and wave celerity in the surf zone. *Journ. Geophys. Res.*, Vol. 82, No. 9, 1977.
- SVENDSEN, I. A.: Mass flux and undertow in a surf zone. *Coast. Eng.*, Vol. 8, No. 4, 1984.
- THILO, R. u. KURZAK, G.: Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney. *Die Küste*, Jg. 1, H. 1, 1952.
- TOLLE, A.: Die Schutzwerke der Insel Norderney. *Zeitschr. Arch.- u. Ing. Vereins f. d. Kgr. Hannover*, Neue Folge d. Not.-Bl., Bd. 10, H. 2 + 3, 1864.
- WESTHOFF, T.: Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney. Diss., Univ. Münster, 1990.
- WITTE, H.-H.: Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. *Die Küste*, H. 19, 1970.
- YU, Z., NIEMEYER, H. D. u. BAKKER, W. T.: Site investigation on sand concentration in the sheetflow layer. *Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.*

# 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 D<sub>1</sub>–E<sub>1</sub> 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.

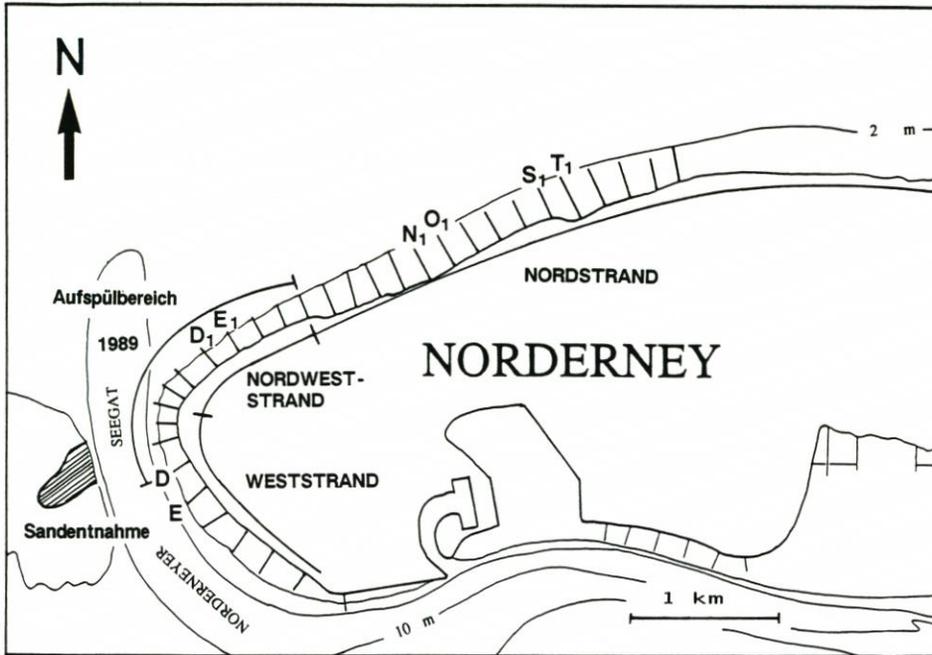


Abb. 1. Lageplan des Untersuchungsgebietes

### 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  $d_{50} \approx 0,2 \text{ mm}$ ) mit wechselnden Grobsandanteilen – im wesentlichen Schill-

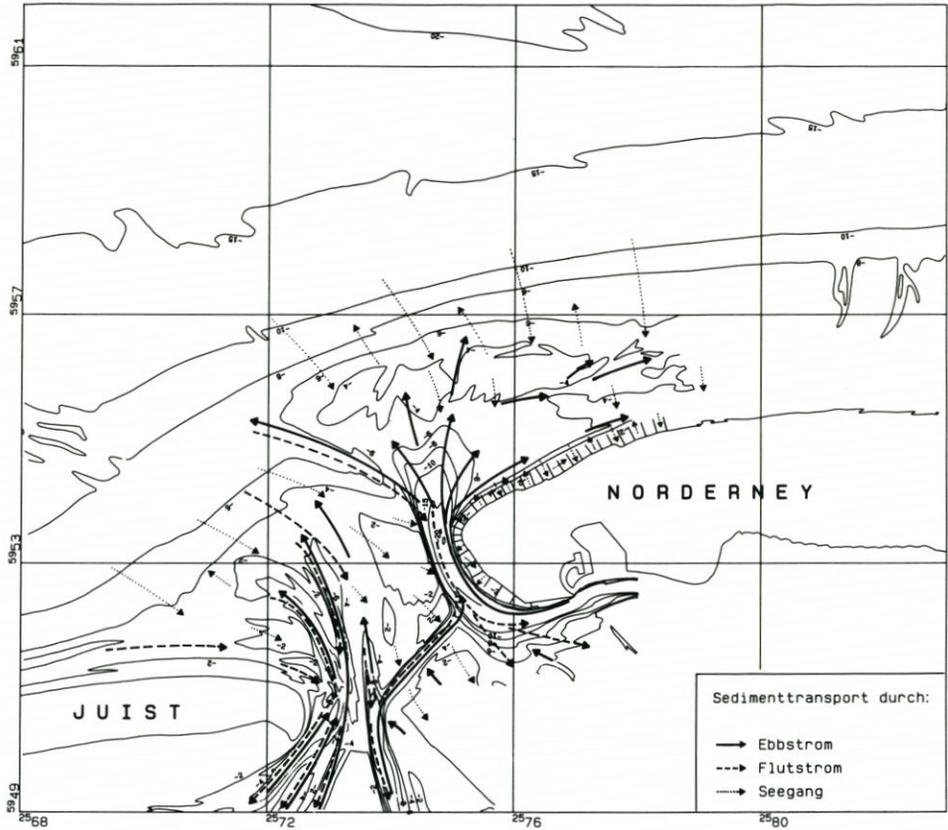


Abb. 2. Sedimenttransport im Ebbdelta des Norderneyer Seegats (aus WESTHOFF, 1990)

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 Tidedrömungen. 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.

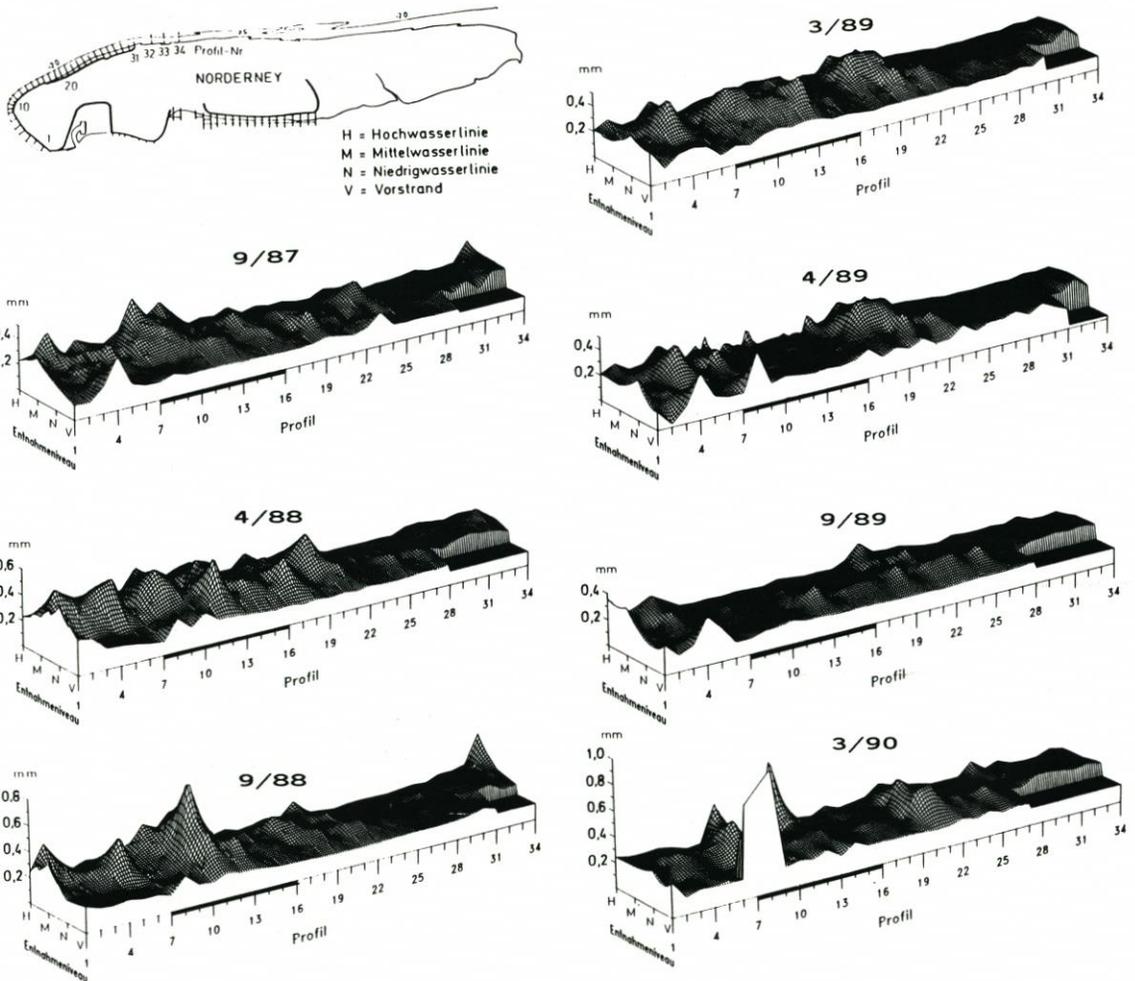


Abb. 3. Verteilung des  $d_{50}$ -Wertes des Strand- und Vorstrandbereiches (Aufspülbereich von Profil 7 bis 16)

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

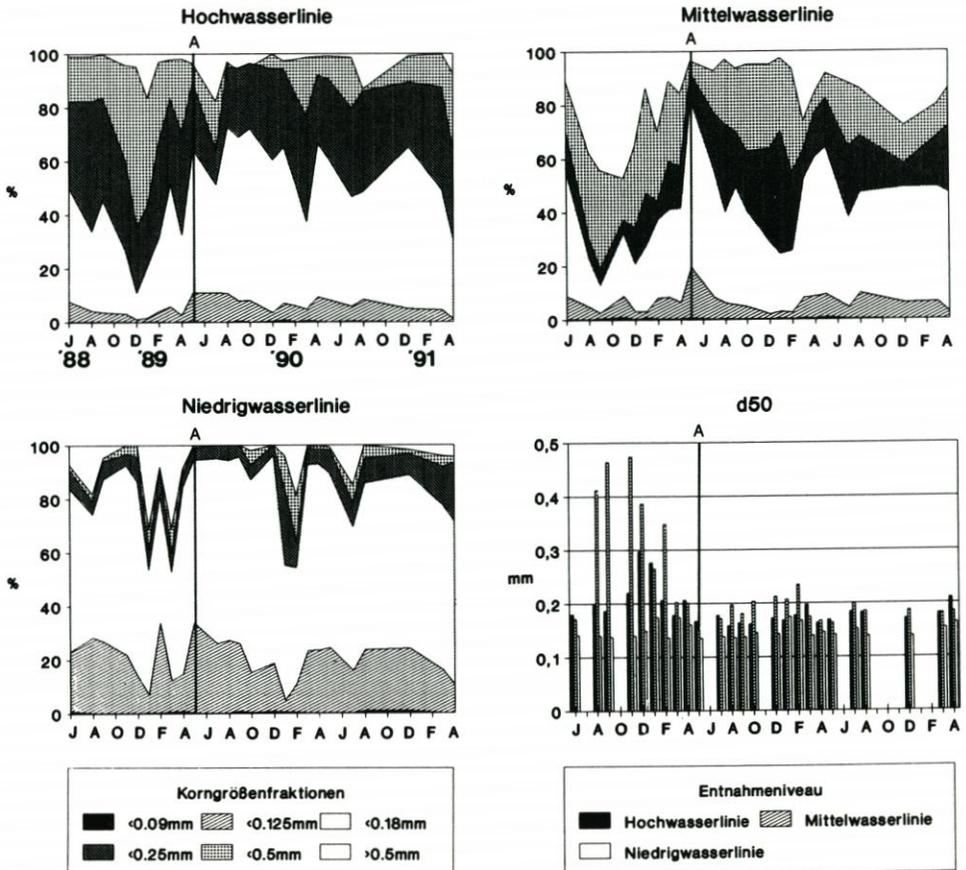


Abb. 4. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des  $d_{50}$ -Wertes im Buhnenfeld E-D (A: Aufspülung Mai 1989)

### Buhnenfeld D1 - E1

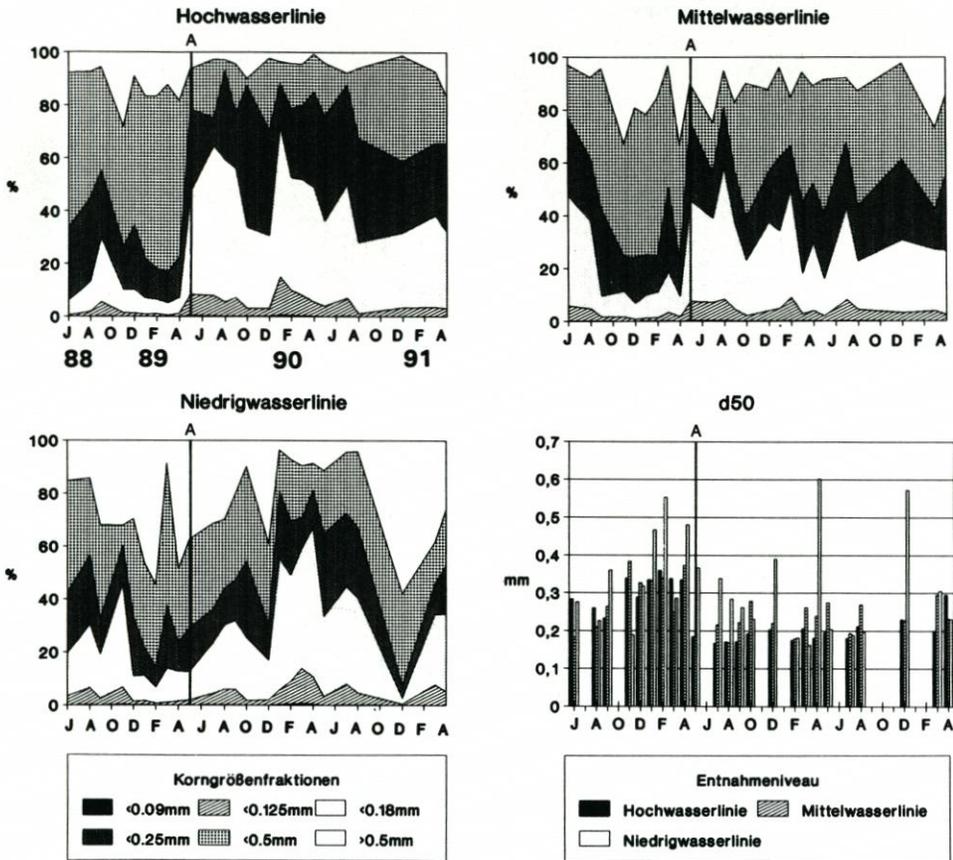


Abb. 5. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des  $d_{50}$ -Wertes im Buhnenfeld D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> (A: Aufspülung Mai 1989)

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

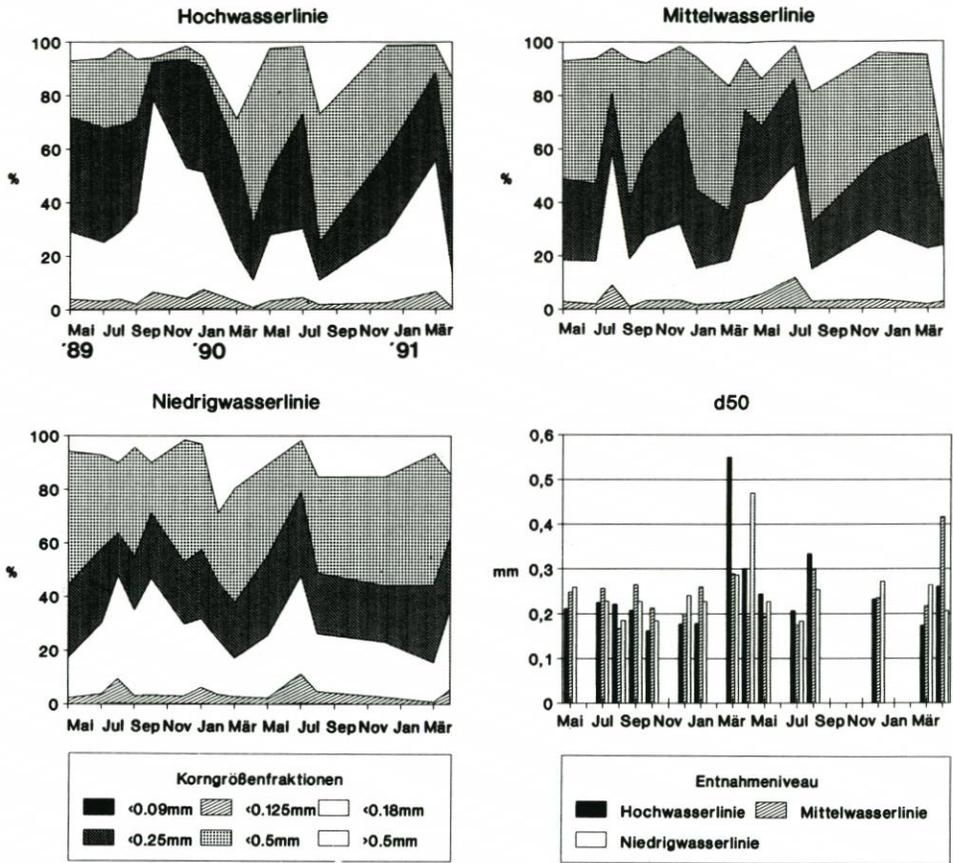


Abb. 6. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des  $d_{50}$ -Wertes im Buhnenfeld  $N_1-O_1$  (A: Aufspülung Mai 1989)

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 Probenreihen 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

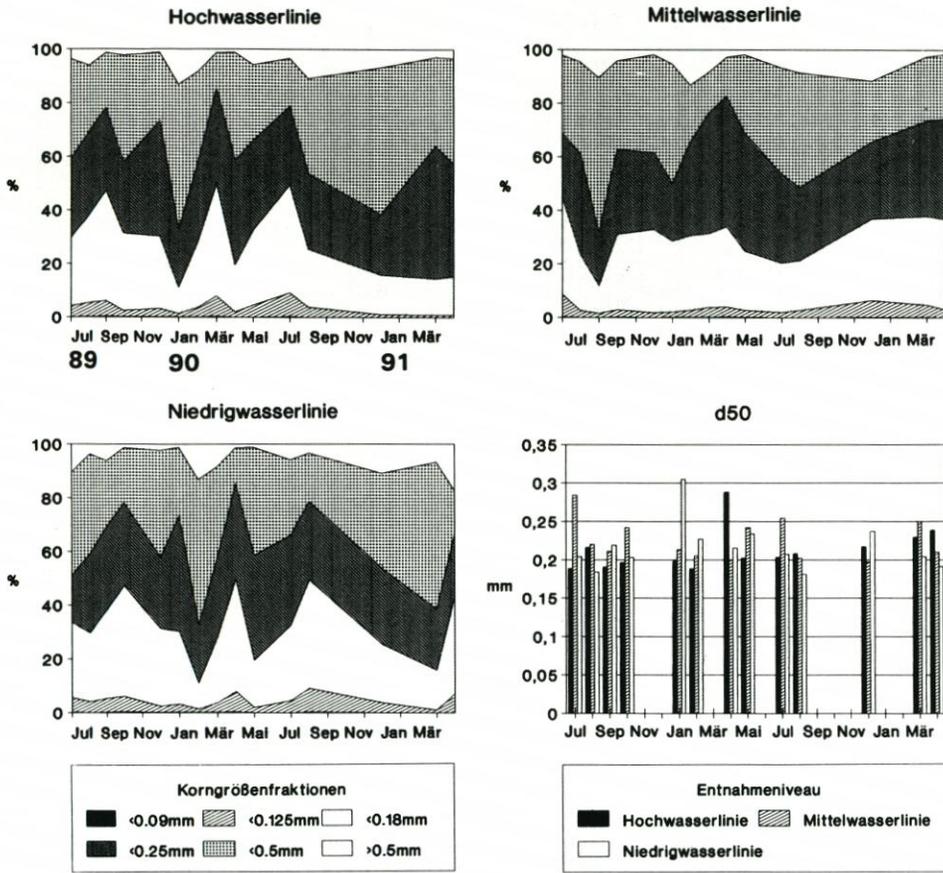


Abb. 7. Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des  $d_{50}$ -Wertes im Buhnenfeld S<sub>1</sub>-T<sub>1</sub> (A: Aufspülung Mai 1989)

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

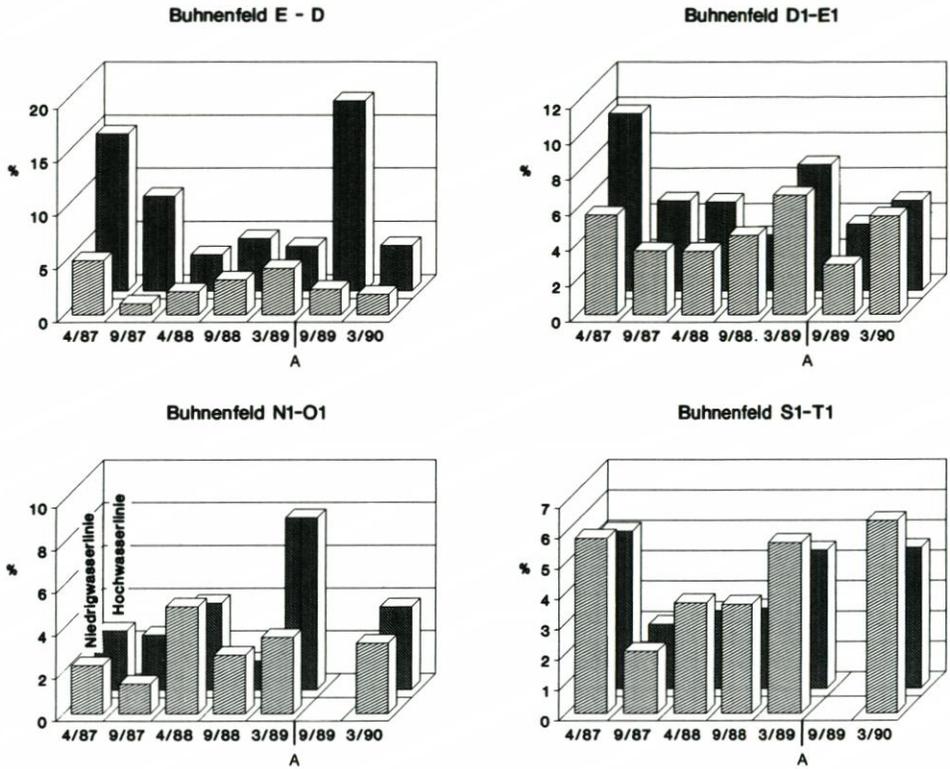


Abb. 8. Jahreszeitlich bedingte Variabilität der Schwermineralgehalte

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 D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub>, durchgeführt. Im folgenden werden einige Einzeltidenereignisse beispielhaft dargestellt.

#### 3.2.1 Sedimentverteilungen

Die Sedimentverteilung im Bühnenfeld D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> 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

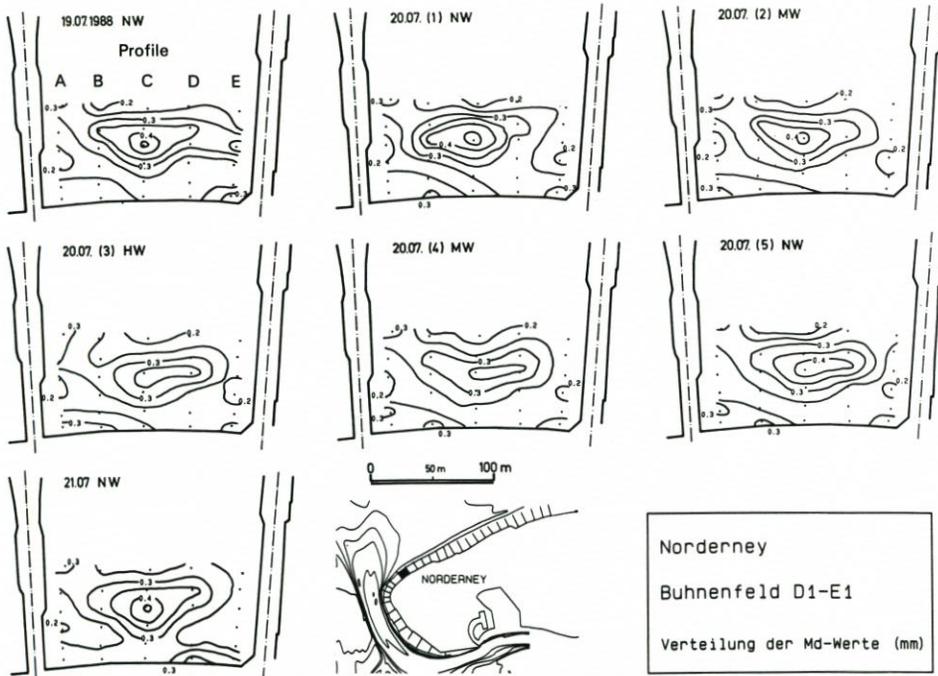


Abb. 9. Verteilung der Median-Werte im Bühnenfeld D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> über 3 Tiden (aus WESTHOFF, 1990, leicht modifiziert)

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).

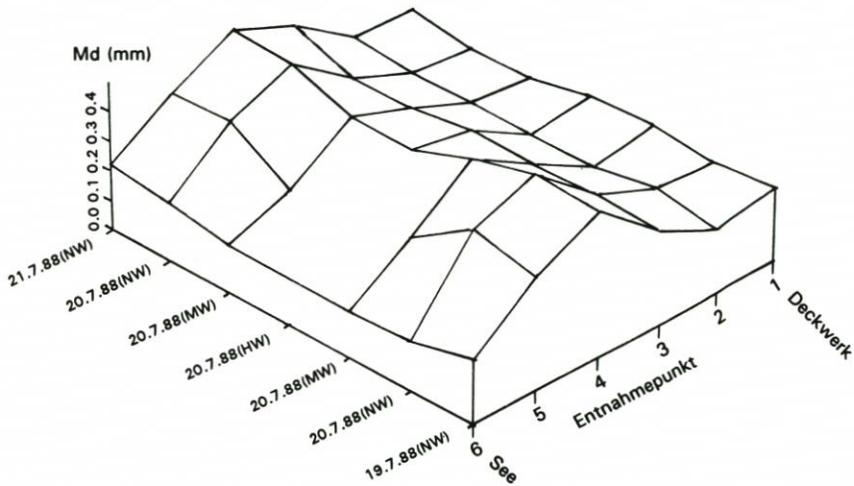


Abb. 10. Zeitliche Änderung der Median-Werte im Profil C (aus WESTHOFF, 1990)

Tabelle 2. Meteorologische und hydrographische Randbedingungen der Einzeltidenuntersuchungen vom 18. 7. bis 21. 7. 1988 im Bühnenfeld, D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> (Winddaten der Wetterstation Norderney) (H<sub>s</sub>: signifikante Wellenhöhe, T<sub>s</sub>: signifikante Wellenperiode)

Datum	Tide	V <sub>Wind</sub> (m/s)	Wind- richtung	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>s</sub> (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 D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> 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 D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> 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 m<sup>3</sup>) im Bühnenfeld D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> 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 D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> 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 D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> 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

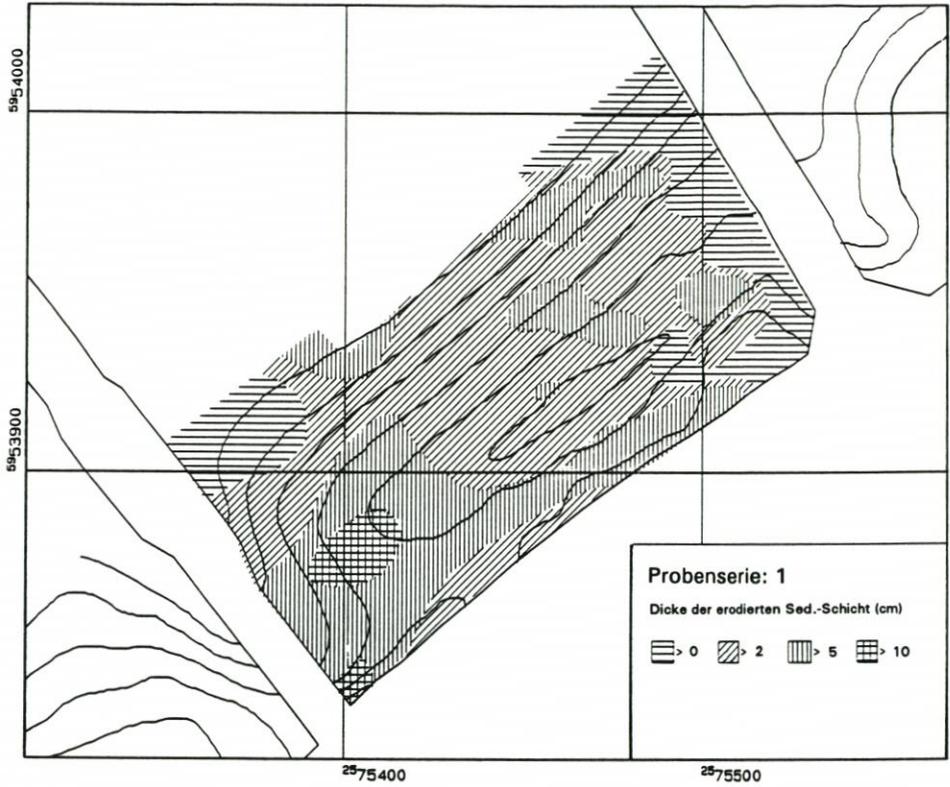


Abb. 11. Verteilung der Erosionsraten (aus WESTHOFF, 1991)

Tabelle 4. Ermittlung der Umlagerungsintensitäten durch eingebaute Farbsandkörper an der Niedrigwasserlinie im Bühnenfeld D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> (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

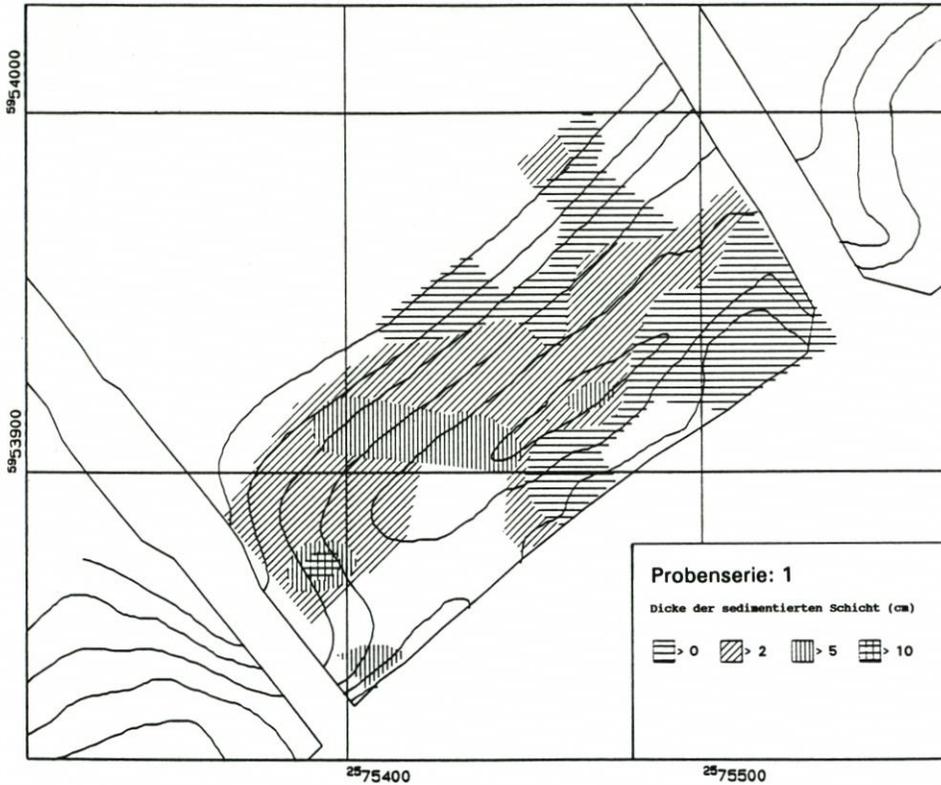


Abb. 12. Verteilung der Sedimentationsraten (aus WESTHOFF, 1991)

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

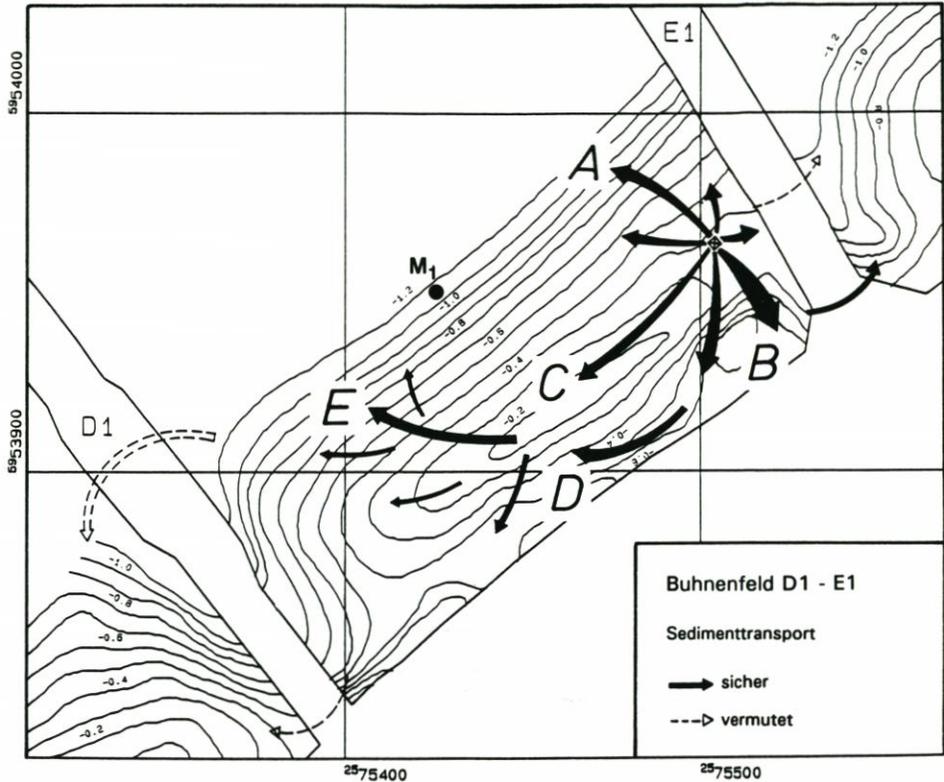


Abb. 13. Sedimenttransportmodell für das Buhnenfeld D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub>, beruhend auf einem Luminophorenversuch (aus WESTHOFF, 1991, verändert)

#### 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.

# Statistische Analyse von Meßdaten aus einem Bühnenfeld

VON HERWIG NÖTHEL, VALLAM SUNDAR UND KLAUS-PETER HOLZ

## Zusammenfassung

Messungen des sohnahen Druckes unter Wellen und der zugehörigen horizontalen Geschwindigkeitskomponenten in verschiedenen Wassertiefen in einem Bühnenfeld werden statistischen Analysen im Zeit- und Frequenzbereich unterzogen. Die Wellenhöhen- und Wellenperiodenparameter werden an verschiedenen Meßstellen im Bühnenfeld mit ihrem zeitlichen Verlauf ausgewertet und entsprechenden Verteilungsformen angepaßt. Weiterhin werden ihre spektralen Eigenschaften dargestellt. Die Geschwindigkeitsauswertungen haben zum Ziel, das Strömungsgeschehen während der Meßkampagnen zu beschreiben. Es werden Verfahren zur Ermittlung der mittleren Wellenanlaufrichtungen aus diesen Daten dargelegt. Weiter wird ein statistisches Modell vorgestellt, das, basierend auf der Grundlage der linearen Wellentheorie, die theoretischen Geschwindigkeiten in Wellenfortschrittsrichtung ermittelt. Vergleiche zwischen simulierten und gemessenen Resultaten im Zeit- als auch im Frequenzbereich werden dargestellt.

## Summary

*Measurements of the near bottom pressure under waves and their corresponding horizontal velocity components in different depths in a groin field are analyzed statistically in the time- and frequency domain. The temporal variation of several parameters concerning wave height and period at different locations in the groin field are compared with distribution functions and their spectral characteristics are shown. The aim of the velocity analysis is to describe the wave current characteristics during the survey. Methods are shown to determine the mean wave direction from this data. Based on linear wave theory, a statistical model to calculate the theoretical velocity in the wave propagation direction is presented. Comparisons are given between simulated and measured data in the time and frequency domain.*

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	112
2. Meßdatenerfassung . . . . .	112
3. Meßdatenanalyse . . . . .	114
3.1 Allgemeines . . . . .	114
3.2 Wellengeschehen . . . . .	114
3.2.1 Wahrscheinlichkeitscharakteristika des Seegangs . . . . .	114
3.2.2 Spektralcharakteristika des Seegangs . . . . .	117
3.2.3 Beziehungen zwischen statistischer und spektraler Betrachtung . . . . .	119
3.3 Strömungsgeschehen . . . . .	120
3.3.1 Statistische Eigenschaften . . . . .	120
3.3.2 Spektrale Eigenschaften . . . . .	125
4. Zusammenfassung . . . . .	125
5. Anmerkungen . . . . .	129
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	129

## 1. Einleitung

Die im küstennahen Bereich vorherrschenden hydrologischen, morphologischen und sedimentologischen Vorgänge haben einen bedeutenden Einfluß auf die Stabilität von sandigen Strandabschnitten sowie auf den Entwurf und die Berechnung von Küsten- und Offshorebauwerken. Von besonderem Interesse sind die Verteilungen der Wellenhöhen und -perioden sowie die resultierenden Strömungen für die Bemessung. Etliche Forscher haben sich mit diesen Problemen auseinandergesetzt, z. B. DATTATRI, 1973; GODA, 1985; LONGUET-HIGGINS, 1952; 1975, jedoch für den unmittelbaren Küstenbereich und insbesondere für Bühnenfelder gibt es nur wenige Untersuchungen, z. B. BLACK, 1978; SIEFERT u. KALDENHOFF, 1975.

Das KFKI-Forschungsprojekt „Wechselwirkungen von Bauwerken und mariner Umwelt“ hatte Untersuchungen zur Stabilität und Optimierung von Strandaufspülungen in Bühnenfeldern zum Ziel. Innerhalb des Projekts wurde ein umfangreiches Naturmeßprogramm über Tidewasserstände, Strömungen, Wellen, Windgeschwindigkeiten, morphologische Veränderungen und sedimentologische Parameter durchgeführt. Die entsprechende Meßdatenerfassung wurde von dem in das Projekt integrierten Niedersächsischen Landesamt für Wasser und Abfall, Forschungsstelle Küste, Norderney, durchgeführt. Das Datenmaterial wurde anschließend den an dem Projekt beteiligten Instituten zur Verfügung gestellt. Die hier dargestellten Methoden und Ergebnisse beziehen sich nur auf Auswertungen, die im Hinblick auf die Teilarbeiten „Mathematisches Modell“ von Bedeutung waren. Die gewonnenen Informationen wurden zur Steuerung und Verifikation hydrodynamisch-numerischer Modelle benötigt und herangezogen, die am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover bearbeitet wurden.

## 2. Meßdatenerfassung

Das Naturmeßprogramm wurde in ausgewählten Bühnenfeldern sowie in strandnahen Abschnitten im Westkopfbereich der Insel Norderney durchgeführt. Dieser Bereich ist durch Erosionszonen charakterisiert, welche ständige Küstenschutzmaßnahmen zur Sicherung der Insel notwendig machen (KUNZ, 1990). Ein Teil der Feldmessungen, die statistisch ausgewertet wurden, erfolgte in dem Bühnenfeld D1-E1 in den Jahren 1988 bis 1991. Die Lage dieses Feldes ist aus dem Übersichtsplan in Abb. 1 ersichtlich (NIEMEYER, 1990). Für zwei ausgewählte, jeweils 14tägige Meßzeiträume (7. 11. 1988–21. 11. 1988 und 5. 4. 1991–19. 4. 1991) werden die angefallenen Daten analysiert und die Ergebnisse dargestellt.

Die Anordnung der Meßstellen (Geräte W-M-O) für den ersten Meßzeitraum im November 1988 ist in Abb. 2 zu erkennen. An jeder Station wurden bodennah der Druck mit einer Druckmeßdose und in einer anderen feststehenden Höhe über Grund die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten mit einem nach dem magneto-hydrodynamischen Prinzip arbeitenden Strömungssensor gemessen.

Für die zweite Meßperiode im April 1991 wurde noch ein zusätzlicher Meßpfahl VS außerhalb der Bühnenstreichlinie zwischen den Bühnen D1-E1 installiert. Während dieser Meßperiode waren jedoch nur die Meßpunkte M1 und M2 aktiv. An diesen Meßstellen wurden bodennah der Druck und die horizontalen Strömungskomponenten in drei verschiedenen Höhen über Grund gemessen.

Während beider Meßperioden wurden die Druck- und Strömungssensoren mit Abtastraten von 5,9 Hz bzw. 11,8 Hz betrieben. Beide Messungen erfolgten in Zeitserien von

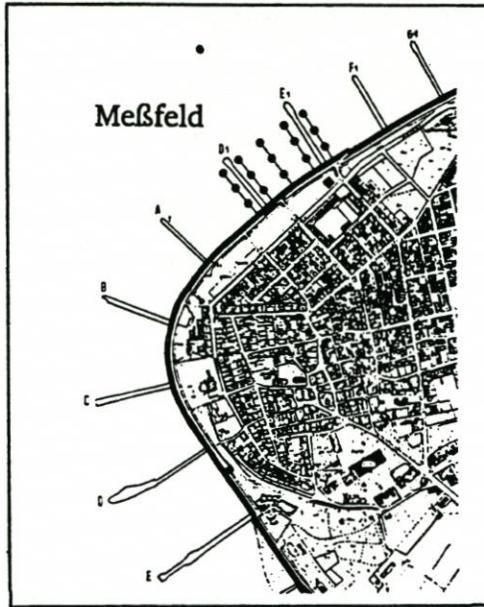


Abb. 1. Bühnenanordnung im Westkopfbereich der Insel Norderney

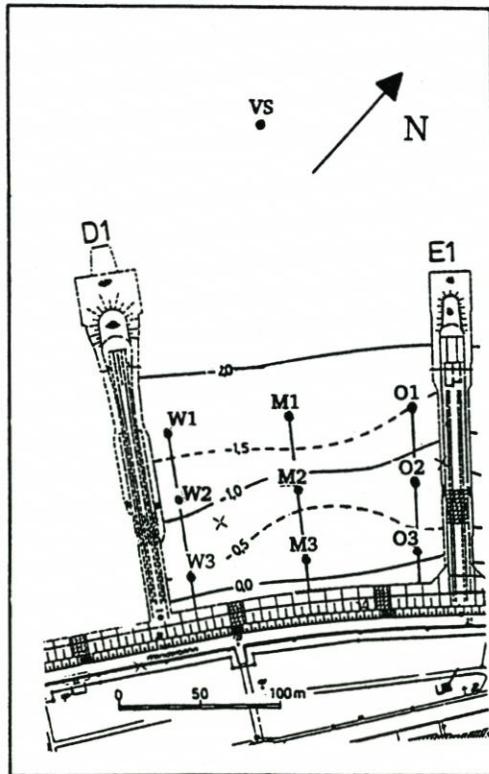


Abb. 2. Lage der Meßstellen im Bühnenfeld D1-E1

20 Minuten Dauer jeweils bei Hoch- und Niedrigwasser sowie bei den beiden Mittelwasserzeitpunkten.

Zusätzlich zu den hydrologischen Messungen wurden für die Auswertungen Windmeßwerte für den Zeitraum 20. 6. 1988–31. 12. 1991 berücksichtigt. Die Daten beinhalten Standardmittelwerte und wurden vom Deutschen Wetterdienst, Seewetteramt Hamburg, an der im Rahmen des KFKI-Forschungsprojektes betriebenen Station „Norderney-Wasserwerk“ gemessen.

### 3. Meßdatenanalyse

#### 3.1 Allgemeines

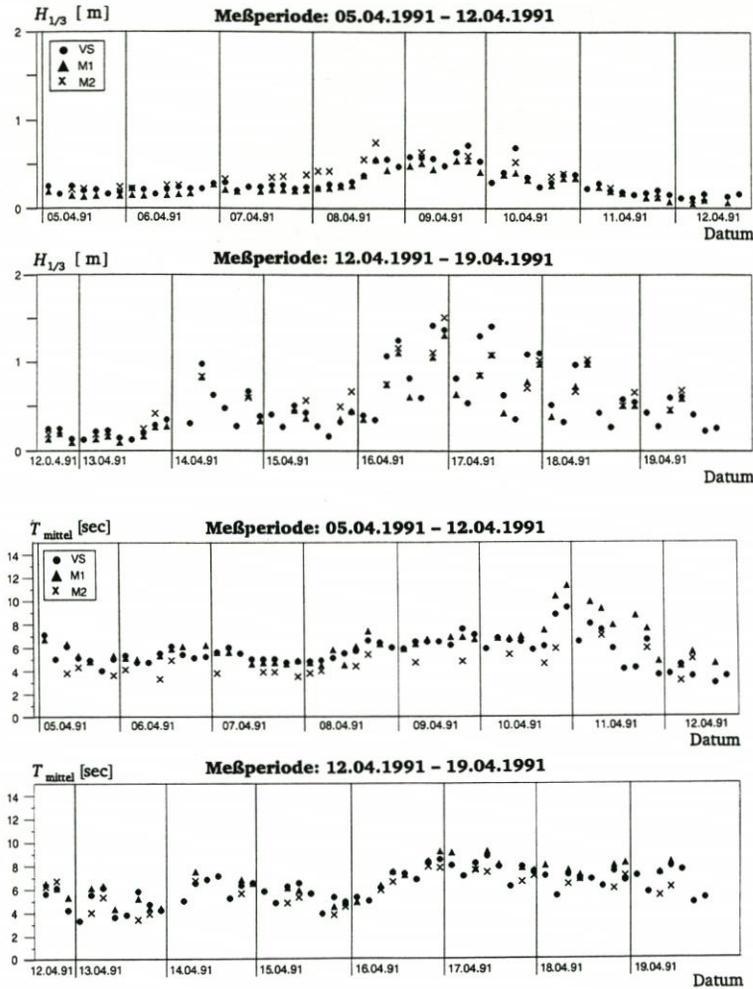
Der natürliche Seegang ist als ein stochastischer Vorgang anzusehen, der Wellen unterschiedlicher Höhen, Perioden und Laufrichtungen aufweist. Es wird angenommen, daß deren Verteilung statistischen Gesetzmäßigkeiten unterliegt.

Für ingenieurpraktische Aufgabenstellungen wird eine Parametrisierung des Seegangs vorgenommen. Aus der Gesamtheit aller Wellen werden charakteristische Wellenhöhen und -perioden ermittelt und der Seegang als Zeitreihe mit gleichbleibenden Wellenkennwerten aufgefaßt. Dazu ist es nötig, die einzelnen Wellen und Perioden innerhalb eines unregelmäßigen Wellenzuges zu definieren. Alternativ hierzu kann eine Wellenaufzeichnung auch nach den spektralen Eigenschaften des Seegangs ausgewertet werden. Hierbei erfolgt eine Zerlegung der Messung in die Frequenzkomponenten mittels Fourier-Analyse.

#### 3.2 Wellengeschehen

##### 3.2.1 Wahrscheinlichkeitscharakteristika des Seegangs

Für die Untersuchungen im Zeitbereich wurde zunächst der Tideeinfluß aus den Druckdaten eliminiert. Hieraus wurden dann die Wellenhöhen und -perioden nach dem Nulldurchgangsverfahren unter Benutzung der Zero-Up-Crossing- und Zero-Down-Crossing-Methode bestimmt. Es wurden dabei die signifikanten Wellenkennwerte wie z. B.  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{mittel}$ ,  $T_{1/3}$  und  $T_{mittel}$  ermittelt, wobei sich zwischen den beiden Auswertemethoden keine auffälligen Unterschiede ergaben. Als Beispiel ist in Abb. 3 die Verteilung der  $H_{1/3}$ - und  $T_{mittel}$ -Werte innerhalb der zweiten Meßperiode wiedergegeben, wie sie sich nach der Zero-Up-Crossing-Methode ergibt. Deutlich ist dabei die Höhenabnahme der einlaufenden Wellen infolge von Shoaling-Effekten vom Vorstrandpfahl VS zur Meßstelle M1 sichtbar; anschließend erfolgt eine erneute Aufsteilung zur Position M2. Die Wellenperioden nehmen infolge Umwandlung der Wellenenergie kontinuierlich zum Strand hin ab. Bei hohen Wellenhöhen wird auch der Einfluß des Tidewasserstandes auf die Größe der Wellenhöhe deutlich. Die zeitliche Variation der Wellenperiode zeigt, daß der Tidewasserstand auf diese Größen nur einen geringen Einfluß hat und der Periodenparameter nur wenig zwischen den Meßstellen im Bühnenfeld schwankt. Zur Beschreibung der Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden die ermittelten Wellenhöhen und -perioden als Histogramme dargestellt und auf bekannte theoretische Häufigkeitsverteilungen überprüft. LONGUET-HIGGINS (1952) hat bereits nachgewiesen, daß die RAYLEIGH-Verteilung unter bestimmten Bedingungen eine gute Approximation für die Verteilung der Random-Wellen ergibt. In der Brandungszone kann diese Verteilungsform jedoch nur eingeschränkt angewendet werden. Dort liefert die WEIBULL-Verteilungsfunk-

Abb. 3.  $H_{1/3}$ - und  $T_{\text{mittel}}$ -Verteilungen für den Meßzeitraum vom 5. 4. 1991–19. 4. 1991

tion eine wesentlich bessere Anpassung an die Meßdaten. Bei den Untersuchungen für die Messungen im Bühnengebiet erwies sich die RAYLEIGH-Verteilung als eine gute, die WEIBULL-Verteilung als eine sehr gute Beschreibungsform der Wellenhöhen und -perioden.

Exemplarisch sind in Abb. 4 die Wellenhöhenhistogramme mit den beiden Verteilungskurven für die verschiedenen Meßstellen aufgetragen, wobei die Höhen mit der Zero-Down-Crossing-Methode ermittelt wurden (15. 11. 1988, Meßbeginn 23:55 Uhr, Klassenbreite  $\Delta H = 0,2$  m). Die Wellenhöhen werden an der Meßstelle M1 eher durch die RAYLEIGH-Verteilung wiedergegeben, da hier größere Wassertiefen vorhanden sind und der Bühneneinfluß keine Rolle spielt. Die anderen Meßpunkte werden dagegen besser durch die WEIBULL-Verteilung beschrieben. Ähnliche Ergebnisse haben LEE und BLACK (1978) bei Wellenmessungen an verschiedenen Korallen-Riffstellen auf der Insel Oahu, Hawaii, beobachtet.

Analog zu den Wellenhöhen wurden entsprechende Histogramme und Verteilungskurven für die Wellenperioden ermittelt, die hier jedoch nicht dargestellt sind. Auch hier stellten

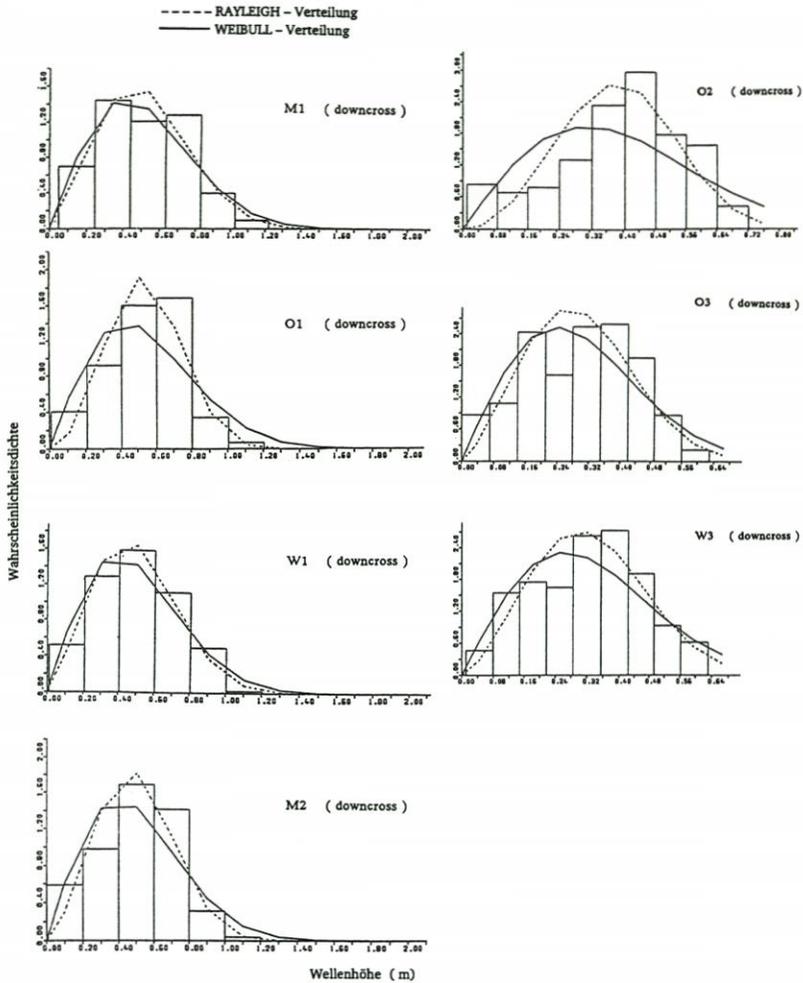


Abb. 4. Verteilungsformen der Wellenhöhen infolge Zero-Down-Crossing-Auswertung für den Meßzeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr

sich die zwei obengenannten Verteilungsformen als besonders brauchbar zur Beschreibung der gemessenen Perioden heraus.

Zur Absicherung der Aussagen wurde für den Meßpunkt M1 für den Zeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr, der Einfluß der Aufzeichnungsmenge der Meßdaten auf die Auswertung der Wellencharakteristika abgeschätzt. Es wurden die signifikanten Werte für Wellenhöhe und -periode unter Benutzung der Down-Crossing-Methode und Berücksichtigung unterschiedlicher Anzahl von Meßdaten in Abb.5 einander gegenübergestellt. Es zeigt sich, daß die Kennwerte relativ unabhängig von der Datenanzahl sind. Lediglich die Extremwerte  $H_{max}$ ,  $T_{max}$  und  $T_{hmax}$  unterliegen erwartungsgemäß einer Vergrößerung. Auswertungen für die übrigen Meßstellen sowie für andere Meßzeitpunkte zeigen die gleichen Tendenzen. Die Auswertungsmethode Zero-Up- oder Zero-Down-Crossing hat keinen Einfluß auf die Ergebnisse.

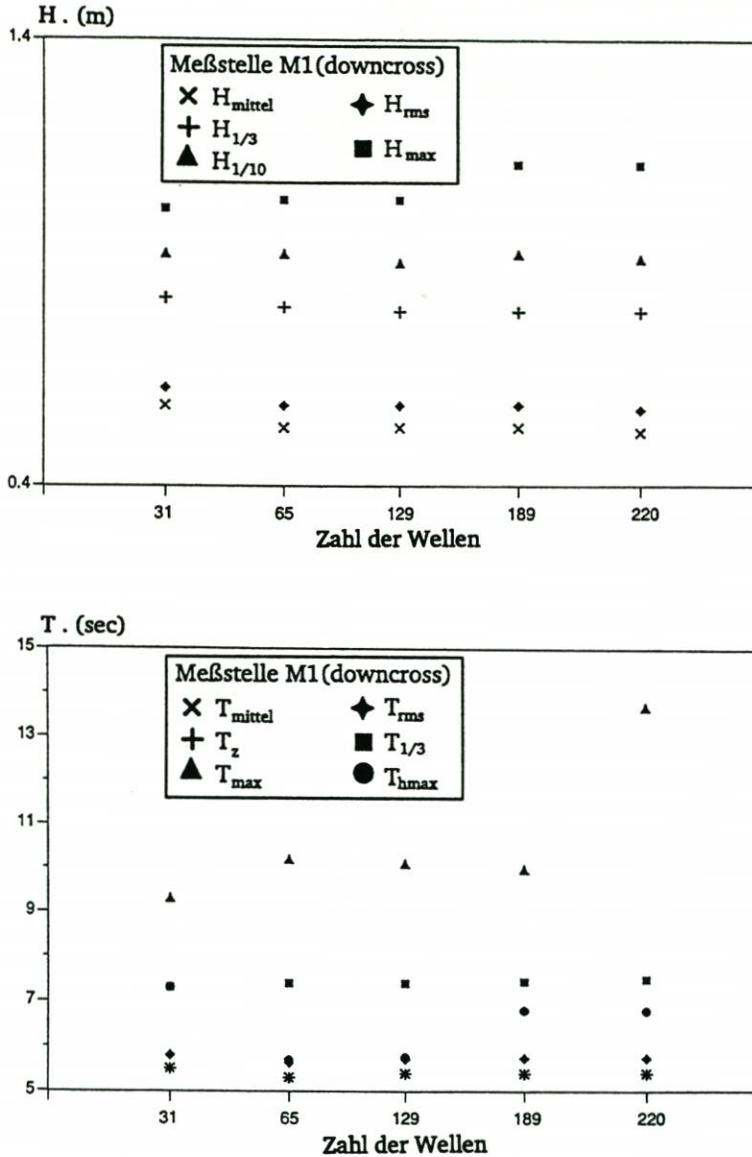


Abb. 5. Variation der Meßdatenanzahl auf verschiedene Wellenkennwerte

### 3.2.2 Spektralcharakteristika des Seegangs

Für die Spektraluntersuchungen wurden die gemessenen Druckdaten mittels der Fast-Fourier-Transformation in dem Frequenzbereich abgebildet, in dem die Zeitreihen als Überlagerung einer Summation von Sinus- oder Cosinus-Schwingungen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen aufgefaßt werden. Jeder Schwingungskomponente wird dabei ein Energieanteil zugeordnet, der dem Quadrat der Wellenhöhe proportional ist. Das

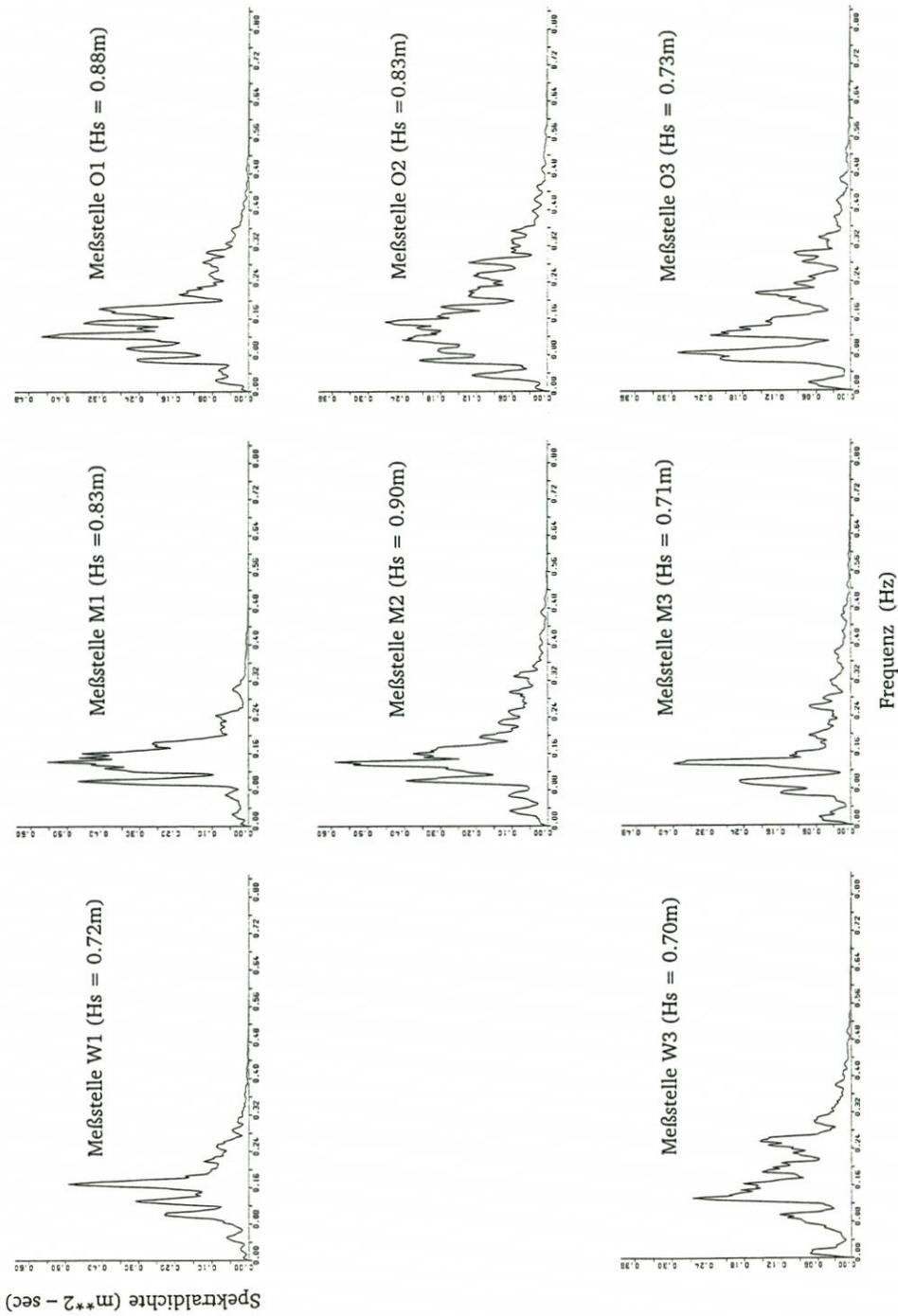


Abb. 6. Wellenspektren für den Meßzeitpunkt 16. 11. 1988, 2:00 Uhr

Spektrum ergibt sich dann aus der Gesamtheit aller Schwingungskomponenten. Hieraus können spektrale Parameter wie die Spektrumsmomente  $m_n$ , signifikante Wellenhöhen  $H_s$ , Peakperioden  $T_p$ , Spektralbreitparameter  $\epsilon$  usw. bestimmt werden.

Als Beispiel ist in Abb.6 für den Zeitpunkt 16. 11. 1988, 2:00 Uhr, die typische Verteilung der Spektraldichten für die Meßpunkte dargestellt, wobei die Frequenzen nur bis 0,8 Hz aufgetragen sind. Zusätzlich sind die signifikanten Wellenhöhen  $H_s$ , die sich aus der Beziehung  $H_s = 4\sqrt{m_0}$  bestimmen lassen, in der Abbildung angegeben. Es ist ersichtlich, daß das Spektrum und somit die Energieverteilung breitbandig ist und mehrfache Peaks pro Meßstelle vorhanden sind. Die Peakfrequenz im Maximum des Spektrums verschiebt sich dabei vom höherfrequenten Bereich für die Positionen O1, M1 und W1 mit größeren Wassertiefen zu niedrigen Frequenzen für die Meßpegel O3, M3 und W3 im unmittelbaren Flachwasserbereich. Die Ursache für diese im betrachteten Untersuchungszeitraum auftretende Erscheinung liegt in dem Brechen der Wellen innerhalb dieses Bereiches.

### 3.2.3 Beziehungen zwischen statistischer und spektraler Betrachtung

Da die wichtigsten Bemessungsverfahren auf der Grundlage der charakteristischen Wellenhöhe  $H_{1/3}$  aufbauen, sind Beziehungen entwickelt worden, mit denen die zugehörigen Kennwerte aus statistischer und spektraler Auswertung in Relation gebracht werden können. Bei den Wellenhöhen können näherungsweise die aus der Häufigkeitsauswertung gewonnenen  $H_{1/3}$ -Werte gleich der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  gesetzt werden. In Abb. 7 sind für die gesamte erste Meßperiode vom 7. 11. 1988–21. 11. 1988 die  $H_{1/3}$ -Werte gegenüber den  $H_s$ -Parametern für ausgewählte Meßpegel aufgetragen, wobei für die statistische Auswertung die Zero-Up-Crossing Methode benutzt wurde. Es ist hierbei ersichtlich, daß eine gute Korrelation zwischen den beiden Kennwerten zu verzeichnen ist.

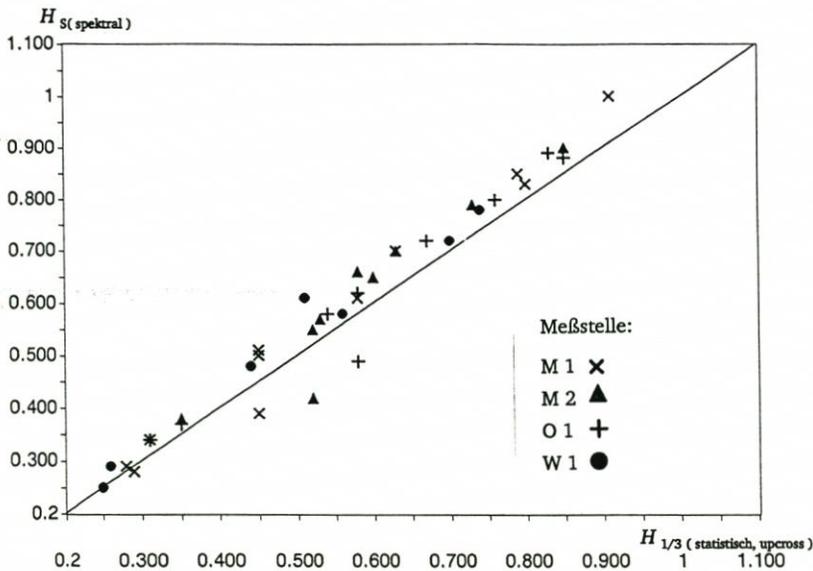


Abb. 7. Vergleich zwischen den Wellenhöhenparametern  $H_{s(\text{spektral})}$  und  $H_{1/3(\text{statistisch})}$

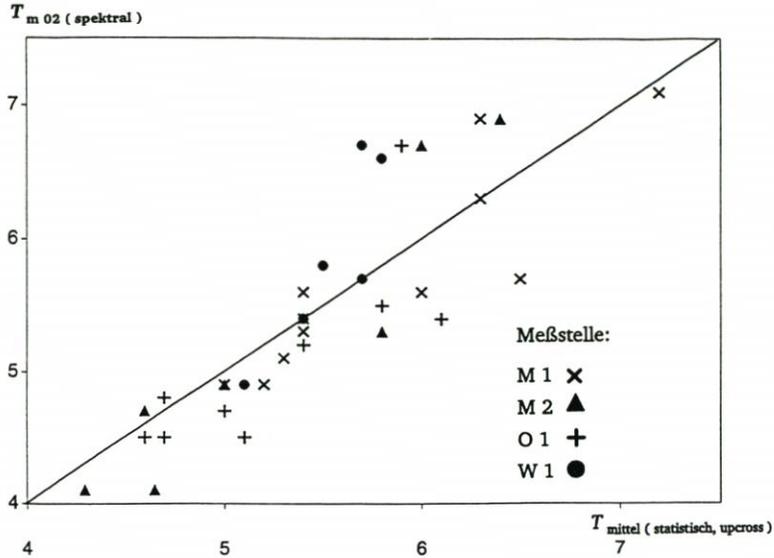


Abb. 8. Vergleich zwischen den Wellenperiodenparametern  $T_{m02(spektral)}$  und  $T_{mittel(statistisch)}$

Für die Ermittlung der Perioden aus der Spektrumbetrachtung gibt es in der Literatur verschiedene Formulierungsmöglichkeiten, z. B. GODA, 1985, KOHLHASE, 1983, wobei an dieser Stelle die Beziehung  $T_{m02(spektral)} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$  benutzt wurde. Die Abb. 8 zeigt ebenfalls wieder für die gesamte erste Meßkampagne die Wellenperioden, wie sie aus Zeit- und Frequenzbetrachtungen ermittelt wurden. Im Vergleich zu den Wellenhöhen ist bei den Perioden eine größere Schwankungsbreite zwischen den beiden Betrachtungsweisen erkennbar.

### 3.3 Strömungsgeschehen

An der Küste wird das Strömungsgeschehen durch die Tide, den Wind sowie den Seegang und, im kleinskaligen Bereich, durch die Einzelwelle selbst bestimmt, wobei alle diese Effekte in Wechselwirkung zueinander stehen. Meßdaten im Bühnenfeld zeigen, daß die Größe der hervorgerufenen Strömungen und ihre Frequenz sehr variieren und einem Zufallscharakter unterliegen. Des weiteren ändert sich die Richtung der Strömungen mit der Zeit. Das Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen lag in der statistischen und spektralen Beschreibung der gemessenen Strömung, um hieraus vornehmlich die Wellenanlaufrichtung zu bestimmen sowie Vergleiche mit einem mathematischen Modell anstellen zu können.

#### 3.3.1 Statistische Eigenschaften

##### Ermittlung der Wellenanlaufrichtungen

Die Richtung der aus der offenen See in Flachwassergebiete einlaufenden Wellen, insbesondere unmittelbar vor dem Brechen in der Brandungszone, ist zur mathematischen

Bestimmung der hier vorherrschenden Strömung und des damit verbundenen Sedimenttransportes von großem Interesse. Eine möglichst exakte Vorhersage ist dabei wünschenswert, da ansonsten große Fehler in den Transportberechnungen auftreten können (SHERMAN u. GREENWOOD, 1986). Zur Ermittlung der Wellenanlaufrichtungen wurden zunächst die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten einer Regressionsanalyse unterzogen (SUNDAR et al., 1992). Beispielhaft sind in Abb. 9 für einen ausgewählten Zeitpunkt aus der ersten Meßkampagne die gemessenen Geschwindigkeiten für die verschiedenen Meßstellen in einem globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem eingezeichnet. Die gestrichelten Linien stellen die Regressionsgeraden dar, die sich aus dem Zusammenhang der gemessenen Strömungskomponenten ergeben. Aufgrund der Tatsache, daß die beiden Untersuchungsgrößen in gleicher Abhängigkeit zueinander stehen, kann näherungsweise durch Mittelwertbildung der beiden Geraden auf eine mittlere Regressionsgerade geschlossen werden, die der Wellenanlaufrichtung entspricht. In Abb. 9 ist für jeden Meßpegel diese Gerade als durchgezogene Linie dargestellt, wobei zusätzlich deren Winkel bezüglich rechtweisend Nord angegeben ist. Wegen der großen Streuung wurden zum Vergleich aus Literaturquellen verschiedene Methoden zur Bestimmung der Anlaufrichtung der Wellen herangezogen (BUCHAN et al., 1984; KIM et al., 1986; MIZUGUCHI et al., 1980). Anzumerken zu den verschiedenen Verfahren ist, daß sie aus Auswertungen von Naturmessungen, aber auch aus Laboruntersuchungen gewonnen worden sind. Für einige Meßpunkte des Testfeldes sind in Tab. 1 die entsprechenden Resultate dargestellt. Es ist ersichtlich, daß die Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden relativ große Streubreiten aufweisen. Diese Kenntnis ist wichtig für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit mathematischer Modelle. Infolge der schwierigen Bestimmung der Anlaufrichtung der Wellen können die jeweiligen Methoden nur Näherungswerte liefern.

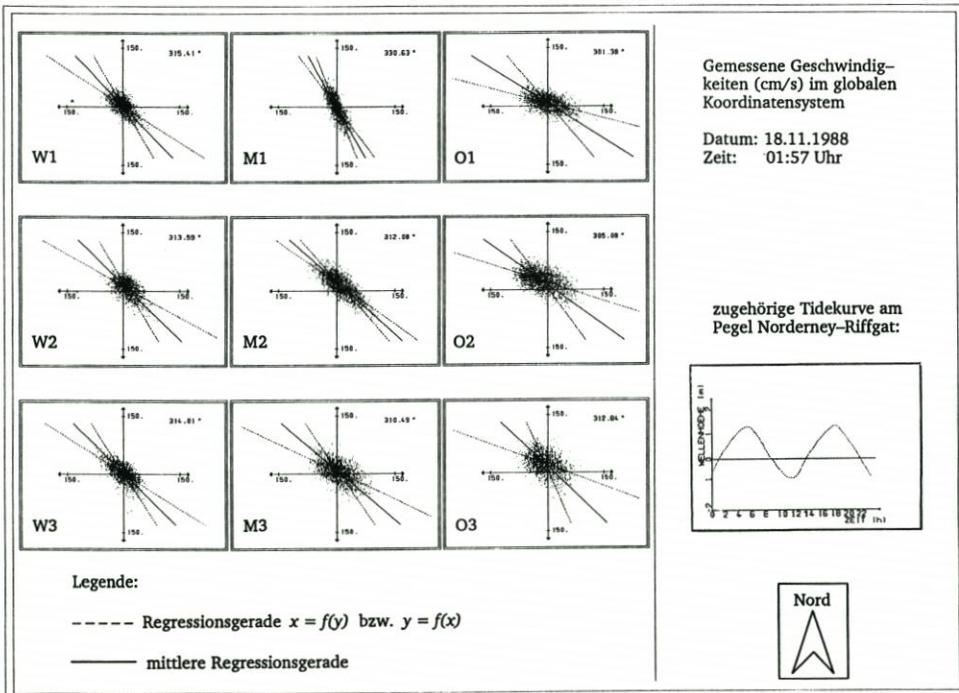


Abb. 9. Gemessene Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem

Tabelle 1. Wellenanaufrichtung in Grad bzgl. rechtweisend Nord, berechnet aus Geschwindigkeitsmeßdaten nach verschiedenen Methoden (Meßbeginn: 18. 11. 1988, 1:57 Uhr, Meßdauer: 20 Min.)

Methode	Meßstelle	M1	M2	O1	O2	W1
Buchan 1		333	307	289	291	321
Buchan 2		334	311	288	294	316
Kim		324	314	297	314	318
Mizuguchi 1		337	340	336	348	349
Mizuguchi 2		319	310	295	304	313
Mizuguchi 3		332	329	314	323	328
Nöthel		331	312	301	305	315

Vergleiche mit parallel zu den hydrologischen Messungen durchgeführten Windmessungen an der Wetterstation „Norderney-Wasserwerk“ zeigen, daß im strandnahen Bereich die Wellenanaufrichtung nur noch wenig durch den Wind und dessen Richtung beeinflusst wird. Der Windeinfluß darf daher vernachlässigt werden. Die morphologischen Gegebenheiten und Bühnenbauwerke spielen eine wesentlichere Rolle für die Verformung der Wellen.

#### Resultierende Strömungen:

Geht man davon aus, daß der Wellenfortschritt nicht mit einem Massentransport verbunden ist, so ergibt der Vektor vom Koordinatenursprung zum Schnittpunkt der Regres-

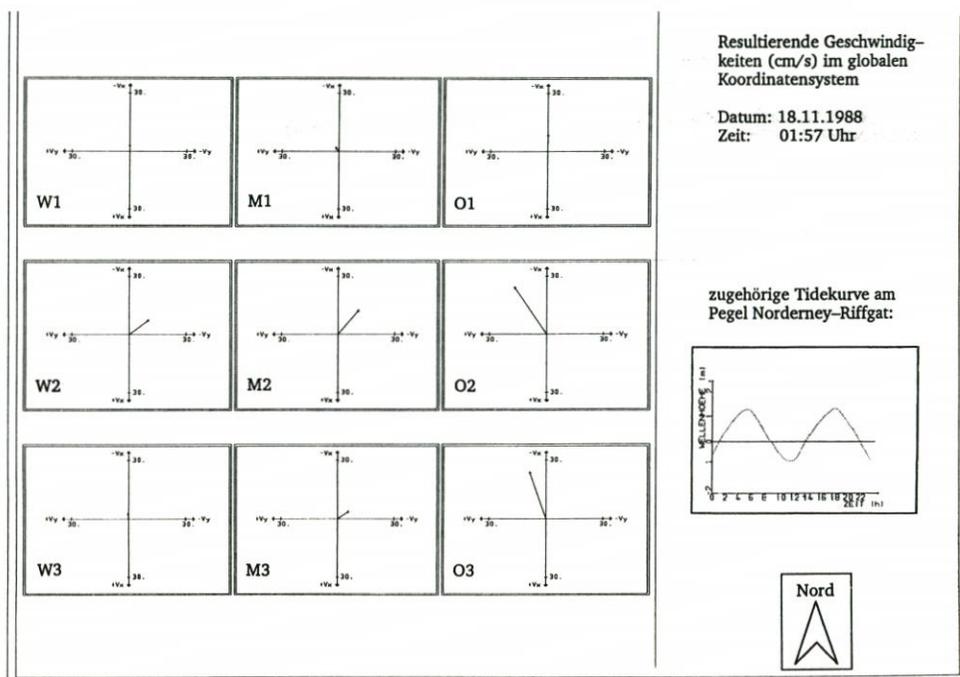


Abb. 10. Resultierende Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen rechtweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem

sionsgeraden gerade die Grundströmung, die sich infolge Tide, Wind und Seegangsumformung ergibt. Sie zeigt im Bühnenfeld eine meist inhomogene Struktur, wie es beispielhaft in Abb.10 für eine am 18. 11. 1988 durchgeführte 20minütige Messung für einen bodennahen Horizont (im Mittel 0,20 m über Grund) erkennbar ist. Die Auswertung der zweiten Meßkampagne, bei der auch Strömungsmessungen über die Wassertiefe vorgenommen wurden, ergab für alle Höhengniveaus im Bühnenfeld ein ähnlich inhomogenes Bild. Die Ergebnisse am Vorstrandpfahl, die hier nicht dargestellt sind, zeigen dagegen eine gleichmäßigere Verteilung der Strömungsrichtungen und -geschwindigkeiten. Es ist anzunehmen, daß außerhalb des Bühnenfeldbereiches die Tideströmung im Vergleich zur seegangsinduzierten Strömung überwiegt und daher das Strömungsgeschehen sich homogener ausbildet.

Die Abnahme der resultierenden Strömungen von der Meßstation VS bis zur strandnahen Station M2 ist aus Abb.11 ersichtlich. Es wurden dabei für die drei Meßstellen VS, M1 und M2 und die jeweils drei Meßhöhen die resultierenden Geschwindigkeiten aus jeweils 20minütigen Messungen für den 6. 4. 1991 dargestellt.

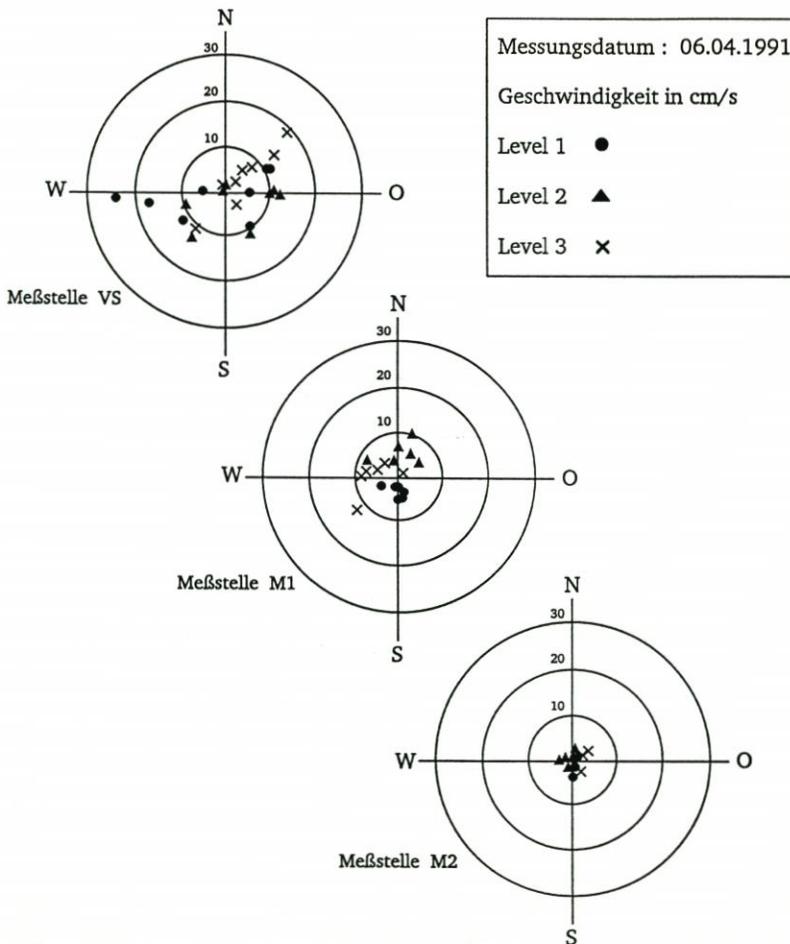


Abb. 11. Resultierende Geschwindigkeiten für acht jeweils 20minütige Messungen am 6. 4. 1991

## Variation der Strömungen:

Der quadratische Mittelwert der strandnormalen Strömung wird als Strömungsparameter  $u_{rms}$  bezeichnet. Die Veränderung dieses Wertes an ausgewählten Meßpunkten für den Meßzeitraum vom 16. 11. 1988–18. 11. 1988 ist in Abb.12 dargestellt, wobei in diesem Zeitraum kein Extremereignis auftrat. Aus der Abbildung ist ersichtlich, daß für jeden

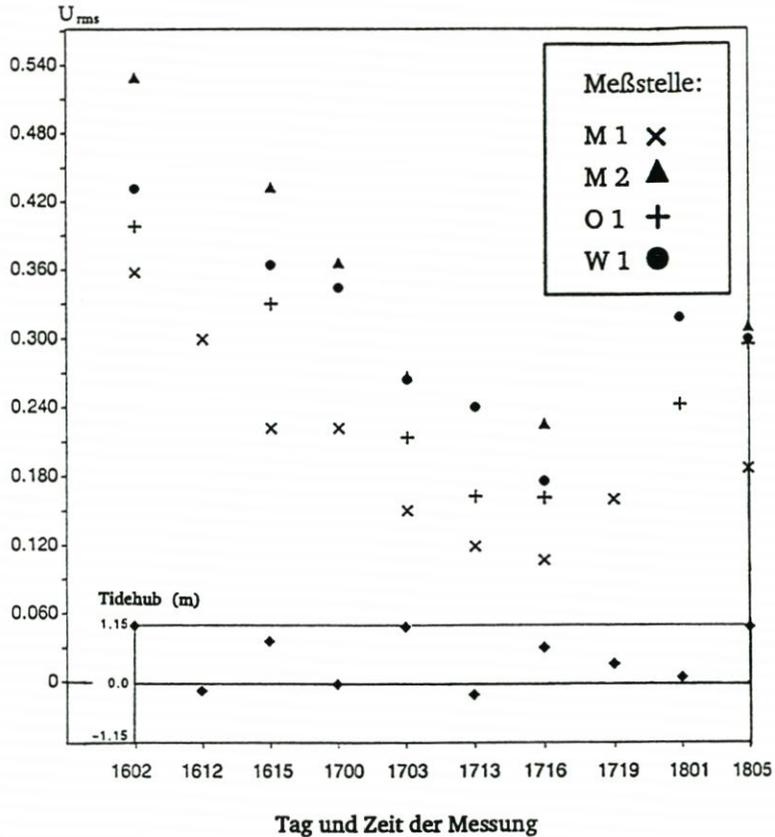


Abb. 12. Zeitliche Variation des Strömungskennwertes  $u_{rms}$  im Bühnenfeld

Meßzeitpunkt die Meßstelle M1 die minimalen und die Meßstelle M2 die maximalen Werte ergeben haben, wobei Unterschiede bis zu 30% zu verzeichnen sind. Weniger große Unterschiede treten dabei an den beiden Meßpegeln O1 und W1 auf. Dies erklärt sich durch die Lage dieser Pegel im äußeren Bereich des Bühnenfeldes. Über die Zeitachse betrachtet ist eine Streuung der  $u_{rms}$ -Werte erkennbar, welche auf den Tideeffekt zurückzuführen ist.

## Statistische Simulation der Strömungen:

Neben der reinen Datenauswertung wurde ein statistisches Modell entwickelt, mit dem aus der gemessenen Wellenhöhenverteilung die horizontale Geschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung infolge Welleneinfluß theoretisch ermittelt werden kann. Aufgrund der

vorher bereits beschriebenen schwierigen Bestimmung der Wellenanlaufriichtung wurde angenommen, daß die Wellenrichtung mit der Meßprofilrichtung übereinstimmt und somit die strandnormale Geschwindigkeitskomponente für einen Vergleich herangezogen werden darf.

Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit unter Wellen wurde die „time domain method“ nach REID (1957) benutzt, die auf der Grundlage der linearen Wellentheorie formuliert ist.

Als Simulationsbeispiel werden hier die Messungen vom 15. 11. 1988, Startzeit 23:55 Uhr, zugrunde gelegt. Zur besseren Übersichtlichkeit in den Darstellungen werden zunächst nur die ersten 1024 Meßdaten der Wellendrucke von insgesamt 7076 Werten je Meßpegel für die Berechnung herangezogen.

Abb. 13 zeigt für die verschiedenen Meßstellen jeweils die berechneten und gemessenen Geschwindigkeitsgrößen. Zu erkennen ist, daß die Formen der berechneten Geschwindigkeiten sowie deren Zeitbereiche mit Vorzeichenwechsel gut mit den entsprechenden Meßwerten übereinstimmen.

Tab. 2 enthält für die Meßstellen die Korrelationskoeffizienten zwischen den gemessenen und simulierten Geschwindigkeiten, wobei an den Pegeln in größerer Wassertiefe gute Übereinstimmungen erkennbar, dagegen an den Meßpunkten mit geringer Wassertiefe größere Abweichungen festzustellen sind. Da diese Meßstellen im unmittelbaren Flachwasserbereich liegen, treten infolge Brech- und turbulenter Strömungsvorgänge Nichtlinearitäten auf, für deren Erfassung das Modell jedoch nicht ausgelegt ist.

### 3.3.2 Spektrale Eigenschaften

Spektrale Untersuchungen wurden ebenfalls für die Geschwindigkeitsmessungen ange stellt. Beispielhaft sind in Abb. 14 die Frequenzspektren aus gemessener und simulierter Geschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung für die verschiedenen Meßpunkte dargestellt, wie sie sich aus den Zeitreihen in Abb. 13 ergeben. Es zeigen sich dabei in den Kurvenverläufen für die seewärtigen Meßdosen gute Übereinstimmungen; an den ufernahen Pegeln sind jedoch Abweichungen erkennbar. Im Bereich der Peakfrequenzen sind, außer an den Stellen W3, M3 und O3, Abweichungen zwischen 10 und 30% zwischen den gemessenen und simulierten Frequenzgrößen festzustellen. Weiterhin ist erkennbar, daß sich die Peakfrequenzen für die strandnahen Meßstellen mehr in den niederfrequenten Bereich verschieben. Die Ursache hierfür liegt zum einen im Brechen und dem Ineinanderlaufen der Wellen, welches niedrige Frequenzkomponenten hervorruft, und zum anderen im Abbau der hohen Frequenzen beim Einlaufen der Wellen in flacheres Wasser.

Vergleiche zwischen dem Spektralbreitparameter, mit dem die Energiekonzentration in dem Spektrum beschrieben werden kann, aus gemessener Strömung ( $\epsilon_{\text{gemessen}}$ ) und simulierter Strömung ( $\epsilon_{\text{berechnet}}$ ) an ausgewählten Pegeln für die gesamte erste Meßkampagne sind in Abb. 15 dargestellt. Es sind dabei gute Übereinstimmungen erkennbar, jedoch sind größere Abweichungen in diesem Parameter bei Werten größer als 0,85 festzustellen.

## 4. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Analyse von Naturmeßdaten über Wellendrucke und Strömungsgeschwindigkeiten beschrieben, wobei die Messungen an verschiedenen Pegeln in einem Bühnenfeld auf der Insel Norderney durchgeführt wurden. Das Ziel der Unter-

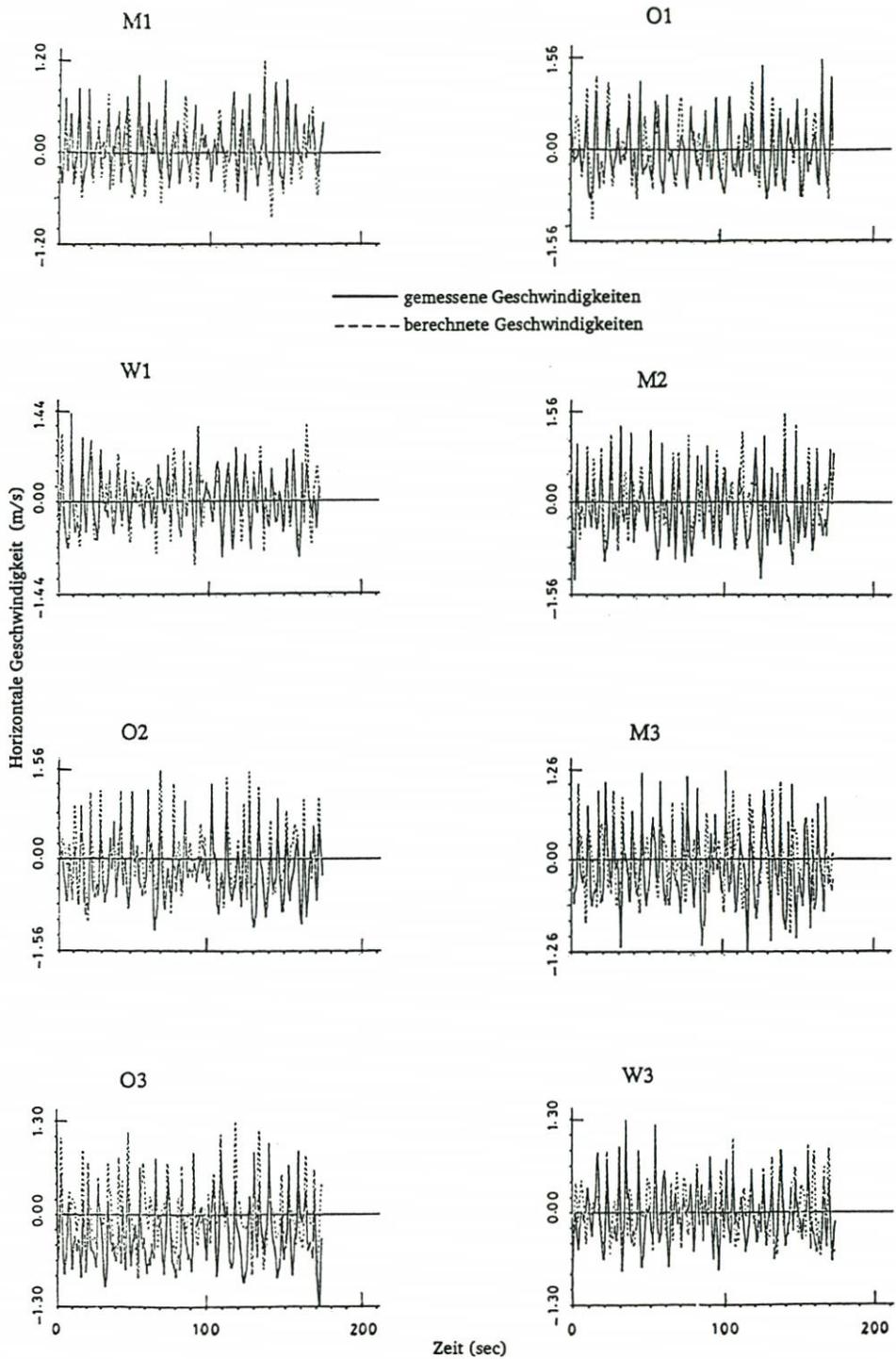


Abb. 13. Gemessene und berechnete strandnormale Geschwindigkeitsverläufe für den Zeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr

Tabelle 2. Korrelationskoeffizient zwischen gemessenen und berechneten Teilchengeschwindigkeiten

Meßstelle	M1	O1	W1	M2	O2	M3	O3	W3
Korrelationskoeffizient	0.91	0.87	0.88	0.81	0.79	0.76	0.71	0.65

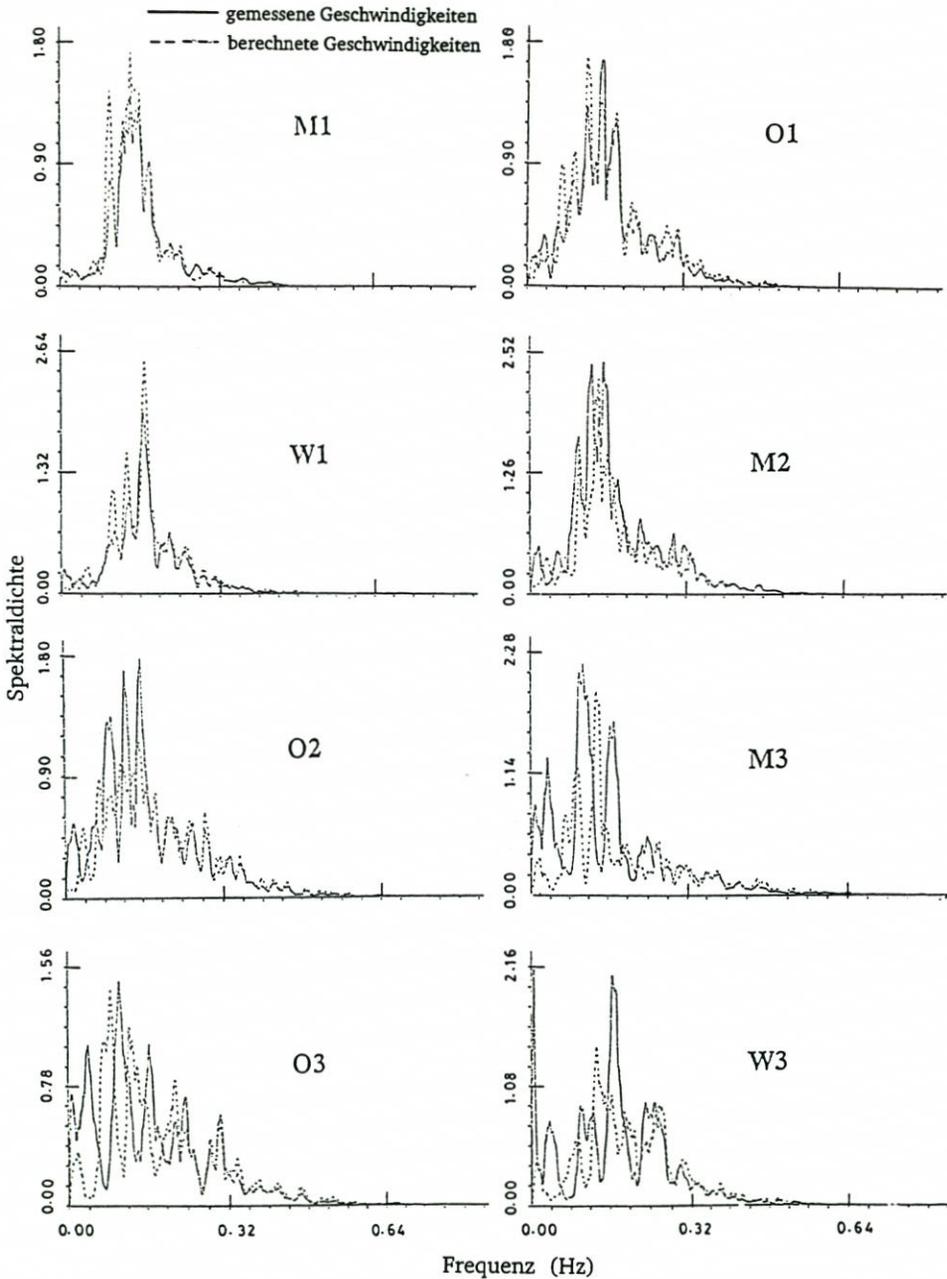


Abb. 14. Spektren infolge gemessener und berechneter strandnormaler Geschwindigkeiten für den Zeitpunkt 15. 11. 1988, 23:55 Uhr

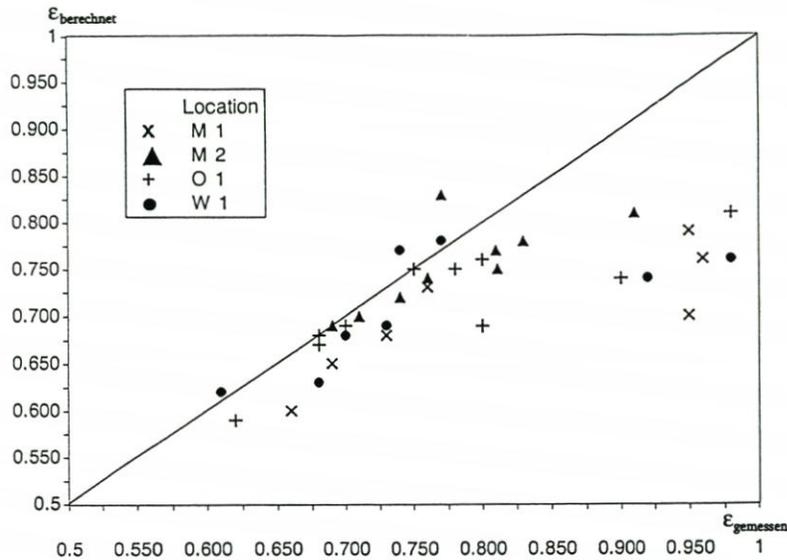


Abb. 15. Vergleich zwischen dem Spektralbreiteparameter  $\epsilon$  infolge gemessener und simulierter Strömung für den Meßzeitraum 7. 11. 1988–21. 11. 1988

suchungen lag in der statistischen Beschreibung dieser physikalischen Vorgänge, deren Ergebnisse für eine mathematische Modellierung herangezogen wurden.

Die Auswertungen der Wellenzeitreihen nach der Zero-Up-Crossing- als auch der Zero-Down-Crossing-Methode ergaben, daß die Wellenhöhen und Wellenperioden im Brandungsbereich sehr gut durch eine WEIBULL-Verteilungsfunktion angenähert werden können. Der Tideeffekt hat auf die Größe der Höhenparameter einen bedeutenden Einfluß, weniger jedoch auf die Periodenkennwerte. Die spektrale Betrachtung der Druckdaten zeigt eine breitbandige Spektrumsverteilung, wobei eine Verschiebung der Peakfrequenzen von höherfrequenten zu niederfrequenten Werten für die flachliegenden Meßstellen festzustellen ist. Die Vergleiche zwischen den statistischen und spektralen Kennwerten zeigen, daß der statistisch ermittelte  $H_{1/3}$ -Wert und der spektrale  $H_s$ -Wert gut korrelieren, dagegen traten zwischen den beiden Betrachtungsweisen für die Perioden Abweichungen auf.

Für die Strömungsmessungen wurden Regressionsbetrachtungen angestellt und hieraus die mittleren Wellenanaufrichtungen bestimmt. Vergleiche mit verschiedenen Literaturangaben ergeben dabei Übereinstimmungen. Die resultierende Grundströmung wurde ermittelt, wobei im Bühnenfeld in horizontaler und vertikaler Richtung keine gleichbleibende Struktur zu erkennen war.

Mittels eines statistischen Modells, das auf der Grundlage der linearen Wellentheorie aufbaut, wurde aus der gemessenen Wellenhöhenverteilung die horizontale Geschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung ermittelt. Es ergab sich dabei eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Werten; nur im unmittelbaren Flachwasser- und Brandungsbereich traten größere Differenzen auf. Die hierfür angestellten Spektrumsbetrachtungen zeigten außer für die strandnahen Pegel relativ gute Übereinstimmung in den Peakfrequenzen.

## 5. Anmerkungen

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) geförderten interdisziplinären Forschungsprojektes „Wechselwirkungen von Bauwerken und mariner Umwelt“ durchgeführt, wobei die Finanzierung vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) übernommen wurde. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover erarbeitet. Die Autoren bedanken sich bei den Institutsmitarbeitern für die Unterstützung und bei dem Niedersächsischen Landesamt für Wasser und Abfall, Forschungsstelle Küste, Norderney, für die Bereitstellung der umfangreichen Meßdaten.

## 6. Schriftenverzeichnis

- BLACK, K.P.: Wave Transmission over Shallow Reef (Field Measurement and Data Analysis). University of Hawaii, Technical Report 78-42, 1978.
- BUCHAN, S.J., STEEDMAN, R.K., STROUD, S.A. u. PROVIS, D.G.: A Shallow Water Directional Wave Recorder. Proceeding 19th Coastal Engineering Conference, Houston, 1984.
- DATTATRI, J.: Wave off Mangalore Harbor – West Coast of India. Journal Waterways, Harbors Coastal Engineering Division, ASCE, WW 1, 1973.
- GODA, Y.: Irregular Wave Deformation in the Surf Zone. Coastal Engineering in Japan, Vol. 18, 1975.
- GODA, Y.: Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo Press, 1985.
- KIM, K.H., TORU, S. u. ISCHIRO, D.: Lateral Mixing and Wave Direction in the Wave-current Interaction Region. Proceedings 20th International Conference on Coastal Engineering, Taipei, 1986.
- KOHLHASE, S.: Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenanplanung. Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, H. 57, 1983.
- KUNZ, H.: Artificial Beach Nourishment on Norderney, A Case Study. Proceeding 22nd International Coastal Engineering Conference, Delft, 1990.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- LEE, T.T. u. BLACK, K.P.: The Energy Spectra of Surf Waves on a Coral Reef. Proceedings 16th Coastal Engineering Conference, Hamburg, 1978.
- LONGUET-HIGGINS, M.S.: On the Statistical Distributions of the Height of the Sea Waves. Journal of Marine Research, Vol. 11, Nr. 3, 1952.
- LONGUET-HIGGINS, M.S.: On the Joint Distribution of the Periods and Amplitudes of Sea Waves. Journal Geophysical Research, 1975.
- MIZUGUCHI, M., ISOBE, M., HOTTA, S. u. HORIKAWA, K.: Field Observation of the Wave-induced Water Particle Velocity in the Surf Zone. Coastal Engineering in Japan, Vol. 23, 1980.
- NIEMEYER, H.D.: Field Measurements and Analysis of Wave Induced Nearshore Currents. Proceeding 22nd International Coastal Engineering Conference, Delft, 1990.
- OCHI, M.K. u. McMILLEN, R.I.: Stochastic Analysis of Offshore Currents. Proceedings 21st International Coastal Engineering Conference, Malaga, 1988.
- OCHI, M.K. u. WANG, W.C.: Non-gaussian Characteristics of Coastal Waves. Proceedings 19th Coastal Engineering Conference, Houston, 1984.
- REID, R.O.: Correlation of Water Level Variations of Offshore Forces on a Vertical Pile for non Periodic Waves. Proceeding 6th Coastal Engineering Conference, Florida, 1957.
- SHAHUL HAMMED, T.S. u. BABA, M.: Wave Height Distribution in Shallow Waters. Ocean Engineering 12(4), 1985.
- SHERMAN, D.J. u. GREENWOOD, B.: Determination of Wave Angle in Shallow Water. Journal Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 112, Nr. 1, 1986.
- SIEFERT, W. u. KALDENHOFF, H.: Analysis of Random Waves in Shallow Water and Laboratory

Reproduction. Proceedings 16th Congress International Association Hydraulics Research, Paris, 1975.

- SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Climate in a Groin Field. Ocean Engineering, Vol. 19, No. 5, 1992.
- SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Kinematics in a Groin Field – Frequency Domain Analysis. Coastal Engineering, 18, 1992.
- SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Kinematics in a Groin Field – Time Domain Analysis. Zur Veröffentlichung akzeptiert beim Journal of Coastal Research, 1992.
- SUNDAR, V., NÖTHEL, H. u. HOLZ, K.-P.: Wave Directions in a Groin Field. Zur Veröffentlichung eingereicht beim Journal of Atmospheric and Oceanographic Technology, 1992.

# Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen

Von HEINER SCHMIDT und JOHANNES PÄTSCH

## Zusammenfassung

Für verschiedene Orte auf Norderney wird die Richtungsabhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit aus vierjährigen Messungen dargestellt. Wegen der großen Unterschiede der Bodenrauigkeit auf der Insel ergeben sich zum Teil erhebliche Differenzen in der Windgeschwindigkeit. Die Simulation der Windverhältnisse mit einem dreidimensionalen numerischen Modell der Luftströmung ergibt eine befriedigende Übereinstimmung. Aus der flächendeckenden Modellrechnung können richtungsabhängige Faktoren zur Umrechnung der Windwerte von verschiedenen Meßorten auf die freie See abgeleitet werden.

## Summary

*The directional dependence between mean wind speed and location for Norderney Island is calculated from measurements taken over a four year period. Strongly varying surface roughnesses generate large differences in the wind speed. A simulation of the wind conditions using a three-dimensional numerical model shows satisfactory agreement with the measured data. From the model calculations, direction dependent factors can be deduced for relating the wind speed at different locations to their corresponding offshore values.*

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	131
2. Die Windmessungen . . . . .	132
3. Das numerische Modell MKW/SWA . . . . .	133
4. Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen und die Ableitung von Faktoren zur Übertragung auf die freie See . . . . .	135
4.1 Vorbemerkung . . . . .	135
4.2 Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen . . . . .	136
4.3 Ableitung der Übertragungsfaktoren . . . . .	138
4.4 Weitere Ergebnisse . . . . .	141
5. Schlußbemerkung . . . . .	142
6. Schriftenverzeichnis . . . . .	142

## 1. Einleitung

Es gibt heute in den küstennahen Seegebieten kaum noch ständig verfügbare Windmeßstellen. Da eine physikalische Zuordnung von Seegang, Windstau u. ä. vernünftigerweise nur zum Wind auf See vorgenommen werden sollte, ist eine Methode zur Korrektur der landgestützten (und vom Land selbst beeinflussten) Windmessungen erforderlich. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ in dem Teilprojekt „Naturmessungen“ auch ein meteorologisches Programm vorgesehen.

Das meteorologische Programm wurde vom Seewetteramt (SWA) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt. Es bestand aus einem Windmeßprogramm, um das notwendige Basismaterial bereitzustellen und um auch die anderen Teilprojekte mit Zeitserien des Windes versorgen zu können. Außerdem sollte anhand der Messungen auf Norderney versucht werden, eine auch auf andere Orte übertragbare Methode anzugeben, um von den auf einer Insel oder an der Küste gemessenen Werten approximativ auf die Windverhältnisse der freien See schließen zu können.

## 2. Die Windmessungen

In der Meteorologie ist seit langem bekannt, daß die Windverhältnisse an einem Meßort (-punkt) zum einen natürlich von den großräumigen Klimabedingungen, zum andern aber von der Höhe über Grund und kleinräumig ganz entscheidend von der Rauigkeit des Erdbodens in der näheren und weiteren Umgebung sowie von orographischen Strukturen geprägt werden. Als Beispiele für die sehr umfangreiche Literatur zu diesem Thema seien hier nur CHRISTOFFER u. ULBRICHT-EISSING (1989) sowie TROEN u. PETERSEN (1990) genannt.

Daher bestückte das SWA auf der Insel Norderney zusätzlich zu den bestehenden Windmeßeinrichtungen „Wetterstation“ (DWD) und „Wattpfahl“ (Forschungsstelle Küste) noch vier weitere Orte („Hafen“, „Flugplatz“, „Wasserwerk“ und „Nordpfahl“) mit Meßeinrichtungen. Die Lage der Stationen ist in Abbildung 1 dargestellt. Es wurde versucht, mit den Stationen im Rahmen der logistischen Gegebenheiten möglichst viele unterschiedliche Umgebungsbedingungen zu erfassen. Die Station „Hafen“ mißt in den vier Niveaus 4, 10, 16 und 24 m, die anderen messen nur in einem Niveau nahe 10 m über Grund.

Drei der neuen Stationen konnten nach Überwindung von Baurechts- und Naturschutzhindernissen im Januar 1988 in Betrieb genommen werden. Die Station „Nordpfahl“ wurde auf dem seeseitigen der beiden 1989 im Bühnenfeld D1-E1 eingespülten Meßpfähle der

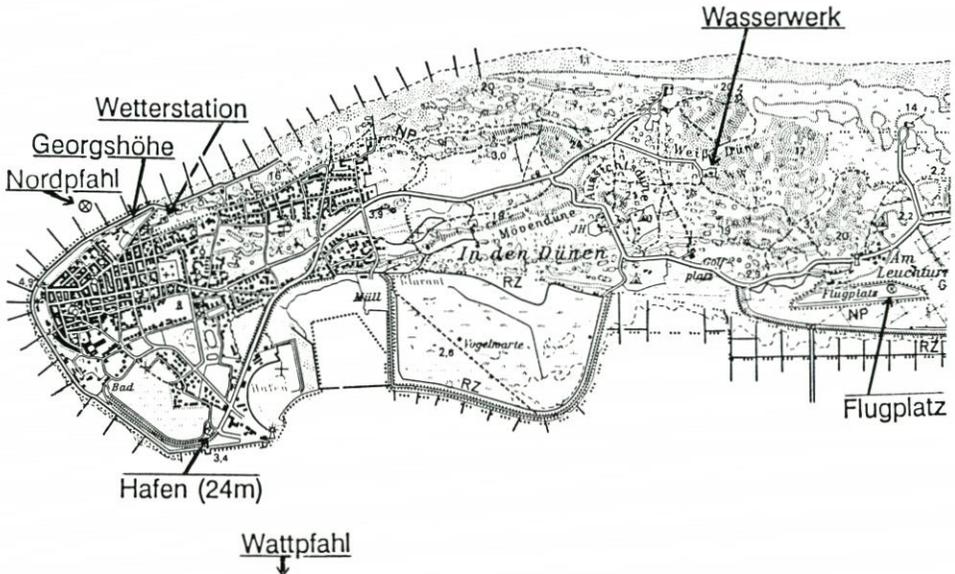


Abb. 1: Die Lage der Windmeßeinrichtungen auf der Insel Norderney.

Tabelle 1. Verfügbarkeit der Windmessungen an den Meßstellen auf Norderney

	1988		1989		1990	
Hafen 24 m	1	7	1	7	1	1
Flugplatz	-----*4		-----		-----	
Wasserwerk	-----		-----		-----	
Wetterstation	-----		-----		-----	
Wattpfahl	-----		I-----		-----	
Nordpfahl	-----		-----		-----	
	1990		1991		1990	
Hafen 24 m	1	7	1	7	1	1
Flugplatz	--*1		-----*5		-----*8	
Wasserwerk	--*3		-----		-----	
Wetterstation	-----		-----		-----	
Wattpfahl	-----		-----		-----	
Nordpfahl	I--*2		*6-----		*7-----	
*1 (Umbau Flughafen Mast)			*5 (Anlage ausgefallen)			
*2 (Blitzschlag)			*6 (nach *2 nur Richtung)			
*3 (Stromausfall)			*7 (Meßeinrichtung OK)			
*4 (Meßanlage def.)			*8 (Neue Siggelkow Anlg)			

Forschungsstelle Küste montiert. Nach verschiedenen Schwierigkeiten (u. a. durch Blitzschlag) waren die Windmessungen hier erst ab Juni 1991 verfügbar. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Verfügbarkeit aller Windmeßeinrichtungen.

Die Windmessungen erfolgten auf konventionelle Weise mit einem Schalenstern-Anemometer für die Windgeschwindigkeit und einer Einblatt-Windfahne für die Richtung. An drei der neuen Stationen wurden moderne Sensoren verwendet, deren digitale Signale direkt von einer elektronischen Meßwertverarbeitung (Fa. Siggelkow, Hamburg) im Takt von 1 Sekunde aufgenommen und über je 10 Minuten zu Mittelwert, Standardabweichung und Maximalwert von Richtung und Geschwindigkeit verarbeitet wurden. Die abgeleiteten Größen wurden auf Cassetten gespeichert. Vom gleichen Typ (nur mit Fernübertragung) ist die Station „Wattpfahl“ der Forschungsstelle Küste. Die Station „Hafen“ war ebenfalls ähnlich, nur war die Erfassungseinheit schon sehr alt. Sie hatte in zunehmendem Maße Ausfälle in einigen Niveaus und mußte zum Ende des Projektes gegen eine neue Anlage von Siggelkow ausgetauscht werden. Die Wetterstation ist mit einer modernen Windmeßanlage der Fa. Thies, Göttingen, ausgerüstet.

Das Staatliche Amt für Insel- und Küstenschutz (STAIK, Norden) hat Ende 1991 in unmittelbarer Nähe zu unserer Station „Hafen“ das Oberfeuer Riffgat mit einer Windmeßanlage (Höhe 18 m, Fa. Lambrecht, Göttingen, und Fa. Ott, Kempten) ausgerüstet. Die Daten werden auf einen PC in Norden fernübertragen und dienen dem Sturmflutwarndienst. Die Windverhältnisse vom „Hafen“ sind unmittelbar auf die Messungen des STAIK übertragbar.

### 3. Das numerische Modell MKW/SWA

Das SWA verfügt seit längerem über ein numerisches, dreidimensionales Modell zur Simulation der Luftströmung über orographisch gegliedertem Gelände mit wechselnder

Bodenrauhigkeit. Dieses relativ einfache statische (nicht zeitabhängige) Modell wurde vom SWA aus dem NOAA Boundary Layer Model (NOABL) weiterentwickelt (SHERMAN, 1976; TRACI, 1978). Es besitzt ein gleichabständiges Gitter in der Horizontalen. Die Vertikale wird durch eine geländefolgende Koordinate beschrieben, die Gitterabstände wachsen hier mit zunehmendem Abstand vom Boden.

Das Modell wandelt ein vorzugebendes Anfangswindfeld in ein massen-konsistentes Windfeld (daher der Name MKW) um. Das Modell kann hier nicht eingehend beschrieben werden; einige grundsätzliche vereinfachte Anmerkungen mögen zum Verständnis genügen.

Die Reibung der Atmosphäre an der rauhen Erdoberfläche erzeugt eine turbulente Durchmischung und damit einen vertikalen Impulsfluß, der beständig Impuls aus dem Wind entnimmt und in den Boden abführt. Unter idealen Bedingungen („unendliche horizontale Homogenität“) bildet sich ein vertikales Gleichgewichtsprofil aus, das „logarithmische Windprofil“, bei dem das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten  $u$  in zwei Höhen  $z_1$  und  $z_2$  über Grund nur durch die Rauigkeit (hier beschrieben durch eine Rauigkeitslänge  $z_0$ ) der Erdoberfläche und eine Verdrängungshöhe  $d$  bestimmt wird:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln(z_2 - d) - \ln(z_0)}{\ln(z_1 - d) - \ln(z_0)} \quad (1)$$

Die Verdrängungshöhe kommt nur dann zum Tragen, wenn der Untergrund sehr dicht mit Hindernissen besetzt ist, etwa in einem Kornfeld, einem Wald oder einer Stadt. In diesen Fällen beträgt  $d$  etwa 4/5 der mittleren Hindernishöhe; ansonsten ist  $d$  annähernd gleich Null. Für die Stadt Norderney wurde  $d = 7$  m gesetzt. Das Windprofil wird gewissermaßen um die Höhe  $d$  vom Erdboden nach oben verdrängt; unterhalb  $d$  ist die mittlere Windgeschwindigkeit klein. Typische Werte für die Rauigkeitslänge auf Norderney gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Rauigkeitslänge  $z_0$  in Meter

Stadt	0,7
Dünengelände	0,3
Marschwiesen	0,01
Strand	0,001
Meer	0,00025

Wenn der Wind nun von einem Gebiet geringerer Rauigkeit auf eines mit höherer Rauigkeit übertritt, wird das Gleichgewicht am Boden gestört. Eine interne Grenzschicht bildet sich aus, deren Höhe mit zunehmender Entfernung vom Rauigkeitssprung wächst. Unterhalb der Grenzschicht stellt sich der Wind mit einer erhöhten Turbulenz schnell auf die neue Rauigkeit ein, oberhalb herrschen noch die alten Verhältnisse. Bei einem Rauigkeitssprung von rau nach glatt ist es ähnlich, nur dauert die Anpassung an die neuen Verhältnisse länger, da die aus dem raueren Gebiet herangeführte Turbulenz nur allmählich gedämpft wird.

Beim Überströmen einer Insel (wie Norderney) erfolgt nun ein ständiger Wechsel der Bodenrauhigkeit. Auch sind quer zur Strömungsrichtung unterschiedliche Rauigkeiten vorhanden. Die daraus resultierenden Geschwindigkeitsunterschiede werden im Verlauf der Strömung durch horizontale Vermischung ausgeglichen.

Die beschriebenen Vorgänge werden in dem Modell MKW/SWA in dem ersten Programmteil approximativ behandelt. Es berechnet zu einer in einer gewissen Höhe vorzugebenden generellen Strömungsrichtung und -geschwindigkeit ein dreidimensionales Anfangswindfeld in geländefolgenden Koordinaten über der Orographie.

Das Anfangswindfeld ist im allgemeinen nicht massenkonsistent, d. h., in eine Gitterzelle kann mehr Luft einströmen als wieder hinaus fließt oder umgekehrt. Ein zweiter Programmteil besorgt nun die Massenkonsistenz mittels eines iterativen Potentialströmungsausgleichs. Dabei werden an den drei Windkomponenten jeder Gitterzelle so lange kleine Korrekturen angebracht, bis das gesamte Windfeld an jedem Punkt massenkonsistent (divergenzfrei) ist. Die Iteration minimiert die Summe der Quadrate der Zusatzvektoren. Die Lösung der zugehörigen Differentialgleichung wird sehr effizient mit einem modernen Mehrgitter-Verfahren vorgenommen. Durch den Potentialströmungsausgleich ergeben sich auch die Effekte seitlicher Umströmung von Hindernissen, eine Strömungsüberhöhung über Kuppen und Kämmen sowie Vorstau- und Lee-Effekte; alles ähnlich, wie es vom Wasser her bekannt ist.

Bei dem erfolgreichen Einsatz des Modells im KFKI-Projekt „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in Ästuarien der Deutschen Bucht“ konnte bereits eine Optimierung des Modellverhaltens im Fernfeld (1–20 km) hinter Rauigkeitssprüngen durch Vergleich mit dem sehr aufwendigen Grenzschichtmodell GESIMA der GKSS (Geesthacht) erreicht werden. Anhand der Windmessungen auf Norderney wurde auch das Verhalten im Nahfeld (50–1000 m) sowie die grundsätzliche Einstellung der wenigen freien Parameter („Schrauben“) des Modells der Natur angepaßt.

Das Modell MKW/SWA ist bezüglich der Geschwindigkeit vollständig linear, d. h., bei gleichem Rechengebiet und gleicher Anströmrichtung unterscheiden sich die Ergebnisse für zwei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten nur durch einen konstanten Faktor, der für alle Gitterpunkte des dreidimensionalen Windfeldes gültig ist. Diese Eigenschaft ist nützlich, denn so kann die Modellrechnung zunächst mit einer beliebigen Anströmgeschwindigkeit gestartet werden. Durch Vorgabe eines tatsächlichen Windwertes (z. B. eines Meßwertes) an einem Gitterpunkt ist der Faktor zur Skalierung des gesamten Feldes eindeutig bestimmt. Bei gleichzeitiger Vorgabe mehrerer Stützpunkte muß eine Ausgleichung vorgenommen werden. Für die Norderney-Rechnung wurden fünf Stützpunkte je Richtung verwendet.

#### 4. Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen und die Ableitung von Faktoren zur Übertragung auf die freie See

##### 4.1 Vorbemerkung

In der Meteorologie ist die Windrichtung definiert als die Richtung, aus der der Wind kommt; anders in der Ozeanographie, dort wird ein Strom mit der Richtung bezeichnet, in die er setzt. Die Windrichtung beginnt mit 0° bei Nordwind und zählt im Uhrzeigersinn, so daß 90° Ostwind bedeutet usw. Die Windgeschwindigkeit wird hier in Meter/Sekunde angegeben (obgleich in der Meteorologie sonst wegen der Belange der Luft- und Seefahrt die Einheit „Knoten“, kn = Seemeilen/Stunde vorherrscht; 1 kn = 0.51444 m/s).

Aus den Messungen des vierjährigen Projektzeitraums (Januar 1988 bis Dezember 1991) können verlässliche Angaben zu den langfristigen Klimaverhältnissen nur bedingt gewonnen werden; der Zeitraum ist zu kurz. Häufigkeitsverteilungen und insbesondere Mittelwerte des Windes beginnen sich wegen der großen Variabilität des Windes in allen Zeitskalen erst etwa ab einem 10jährigen Zeitraum zu stabilisieren. Für viele Anwendungen werden in der Klimatologie sogar 30 Jahre („Klima-Normal-Perioden“) verwendet. Hier werden nur einige abgeleitete Ergebnisse zu den 10 Jahren 1982–1991 dargestellt.

Anders als Mittelwerte stabilisieren sich Verhältniszahlen, die die mittlere Relation

zwischen der Windgeschwindigkeit an zwei Orten beschreiben, schon nach relativ kurzer Zeit. Ein halbes Jahr an stündlichen Parallelmessungen reichen im allgemeinen aus. Das Ziel, Übertragungsfaktoren zur Umrechnung des Windes von einem Ort auf einen anderen zu bestimmen, ist daher mit den vierjährigen Messungen des Projektes gut zu erreichen.

#### 4.2 Vergleich der Windmessungen mit den Modellrechnungen

Bei der Beschreibung des Modells (Abschnitt 3) wurde bereits deutlich, daß der Wind über vorwiegend ebenem Gelände (wie in Norderney) an einem Punkt im wesentlichen durch die stromauf vorhandene Rauigkeit der Erdoberfläche bestimmt wird. Daher muß hier eine Unterscheidung nach Windrichtungen vorgenommen werden. Die Klassenbreite der Richtung beträgt  $30^\circ$ , die 12 Klassen sind zentriert auf 0, 30, 60 Grad usw.

Die Windrichtung ist bei geringen Geschwindigkeiten sehr variabel und nicht mehr allein durch die Dynamik der Luftströmung bestimmt. Daher wurden für die folgende Auswertung alle gleichzeitig an den verschiedenen Orten auf der Insel gemessenen Windwerte außer Betracht gelassen, wenn die Windgeschwindigkeit am Hafen in 24 m Höhe (als Stundenmit-

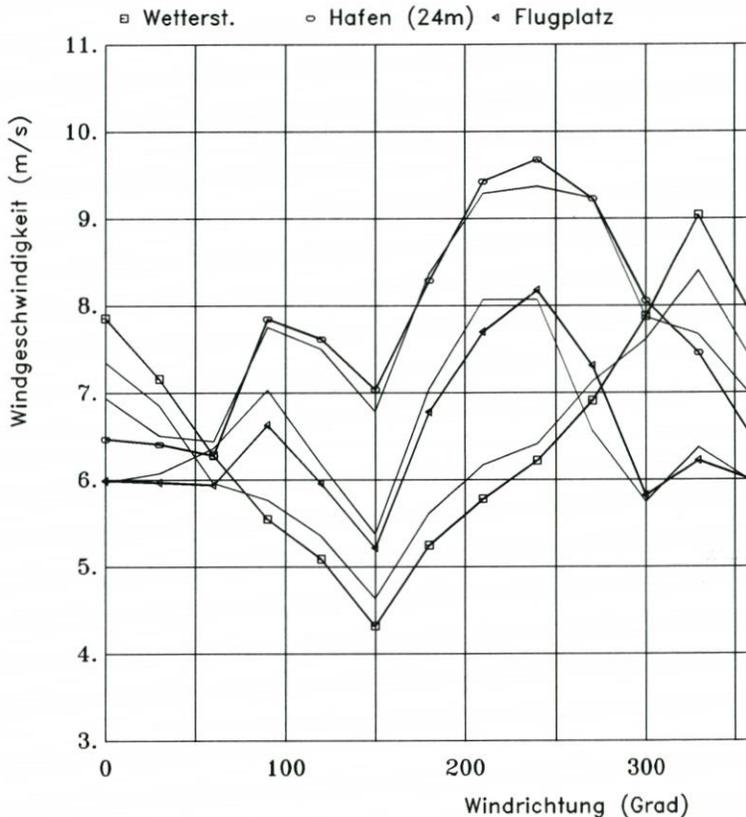


Abb. 2: Mittlere Vergleichs-Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung für die Orte „Wetterstation“, „Hafen 24 m“ und „Flugplatz“, berechnet nur für die Fälle, bei denen die Windgeschwindigkeit am Hafen (24 m) mehr als 4 m/s betrug. (Dicke Linien mit Symbolen: Aus Messungen. Dünne zugehörige Linien: Modellrechnungen).

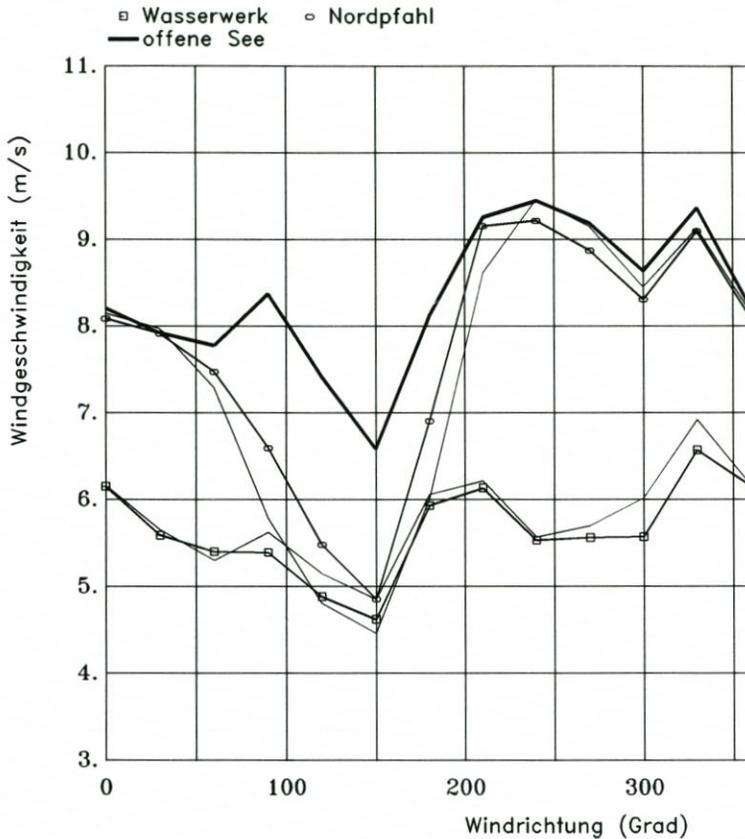


Abb. 3: Wie Abb. 2, für die Orte „Nordpfahl“ und „Wasserwerk“. Die sehr dicke einzelne Linie bezeichnet die Modellrechnung für die freie See.

telwert) kleiner als 4 m/s war. Unter dieser Bedingung wurden die Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für die 12 Richtungsklassen über den gesamten vierjährigen Meßzeitraum berechnet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 2 und 3 als dicke Linien mit Symbolen dargestellt.

Abb. 2 enthält die Verhältnisse für die Wetterstation, den Hafen (24 m) und den Flugplatz, Abb. 3 die für das Wasserwerk und den Nordpfahl. Für den Watterpfahl lagen nicht genügend Messungen vor. Es zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den Stationen, die zusätzlich noch mit der Windrichtung stark variieren. So ergeben sich z. B. für den Nordpfahl, der im aerodynamisch glatten Wasser steht, meist um 2–3 m/s höhere Werte als für das Wasserwerk, das allseits vom relativ rauen Dünengelände umschlossen ist (Abb. 3). Südöstlicher Wind (120–150°) ist am Nordpfahl dagegen geringer, weil der Pfahl sich dann im Lee der extrem rauen Stadt Norderney befindet. Die Meßhöhe ist dann sogar noch niedriger als die mittlere Dachhöhe der Häuser. Ähnliche Unterschiede zeigen sich auch beim Vergleich der Wetterstation mit dem Hafen. Diese Stationen liegen bei unterschiedlichen Windrichtungen im Lee der Stadt.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für die 12 Anströmrichtungen sind in den Abb. 2 und 3 für die fünf Stationen zusätzlich als dünne Linienzüge eingetragen. Eine Zuordnung zu den Kurven der Messungen (dicker, mit Symbolen) ist leicht möglich, da sie immer nahe

beinander liegen. Die Modellrechnungen (die in der näheren Umgebung der Stationen in einem horizontalen Raster von 50 m, in größerer Entfernung zu ihnen im 200-m-Raster erfolgten) geben die gemessenen Windverhältnisse folglich sehr gut wieder. Die mittlere Abweichung, über alle Richtungen und alle fünf Stationen berechnet, beträgt  $\pm 0,3$  m/s. Wir schließen daraus, daß die Modellrechnung eine entsprechende Güte auch an allen anderen Gitterpunkten aufweist, was allerdings unbeweisbar ist, da es dort keine Messungen gibt.

Als sehr dicke Linie sind in Abb. 3 die Windwerte für die ungestörte Anströmung der Modellrechnung in 10 m Höhe eingetragen. Diese Werte entsprechen den Windverhältnissen auf der „freien See“. Dies ist nun nicht die Mitte der Nordsee, sondern ein Punkt etwa 5–10 km nördlich der Insel Norderney. Er liegt also noch im Küstenvorfeld. Es ist zu beachten, daß auch die Linie für die „freie See“ mit den anderen Linien der Abb. 2 und 3 konsistent ist. Das heißt, es gilt die Einschränkung, daß in die Berechnung der Mittelwerte nur Werte eingehen, wenn am Hafen in 24 m Höhe der Wind größer als 4 m/s ist.

Bei der Erläuterung des Modells (Abschnitt 3) wurde erwähnt, daß sich bei der Umströmung von Hindernissen auch örtliche Abweichungen der Windrichtung von der Generalrichtung ergeben. Dies ist auch bei der Überströmung von Norderney der Fall. Die Abweichungen betragen aber in Höhen von 10 m und mehr über Grund an den Meßorten nur wenige Grad, so daß wir hier auf eine Erörterung verzichten können. Die Winkelabweichung wird für die praktische Anwendung gleich Null gesetzt.

### 4.3 Ableitung der Übertragungsfaktoren

Die Ableitung der mittleren windrichtungsabhängigen Faktoren  $f$  zur Übertragung der Windgeschwindigkeit  $u$  von einem Ort 1 auf einen anderen Ort 2 ist nun als gute Näherung sehr einfach. Es sind die Quotienten der in den Abb. 2 und 3 dargestellten (gemessenen oder modellierten) Vergleichs-Windgeschwindigkeiten  $u_v$  für jede Richtungsklasse  $i$ :

$$f_{i,1 \rightarrow 2} = \frac{u_{v,i,2}}{u_{v,i,1}} \quad (2)$$

Diese Übertragungsfaktoren verwenden wir nun nicht nur zur Transformation von Mittelwerten, sondern auch für beliebige Einzelwerte der Windgeschwindigkeit:

$$u_2 = f_{i,1 \rightarrow 2} \cdot u_1 \quad (3)$$

Dabei ergibt sich der Index  $i$  aus der zu  $u_1$  gehörigen Windrichtung. In der Praxis der Übertragung von Einzelwerten interpolieren wir meist noch Zwischenwerte von  $f$  entsprechend der Windrichtung.

Diese Methode wurde schon für die Darstellung der Windverhältnisse am Nordpfahl (Abb. 3) verwendet, der nur im Zeitraum Juni bis Dezember 1991 Messungen lieferte. Hier wurden zunächst für diese sieben Monate nach (2) die entsprechenden empirischen Faktoren zur Übertragung von der Wetterstation auf den Nordpfahl berechnet und dann mit (3) die vierjährigen Mittelwerte der Wetterstation transformiert.

In Abb. 4 und numerisch in Tabelle 3 sind nun die richtungsabhängigen Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeiten verschiedener Meßorte auf die freie See angegeben. Sie wurden zur Wahrung der inneren Konsistenz nur aus den Ergebnissen der Modellrechnungen berechnet, denn nur dadurch ist es möglich, Übertragungsfaktoren auch für Orte anzugeben, an denen es keine Messungen gibt. Es zeigt sich, daß die Windwerte der

Tabelle 3. Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeit auf die freie See für einige Orte auf Norderney

Ort	Windrichtung (Grad)											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
A	1,12	1,16	1,31	1,45	1,39	1,42	1,45	1,50	1,45	1,21	1,14	1,12
B	0,99	1,02	1,10	1,23	1,19	1,19	1,20	1,21	1,14	1,02	0,96	0,95
C	0,92	0,94	1,01	1,10	1,07	1,06	1,06	1,07	1,02	0,94	0,91	0,90
D	1,18	1,22	1,21	1,08	0,99	0,97	0,97	1,00	1,01	1,00	1,10	1,22
E	1,28	1,33	1,32	1,16	1,04	1,02	1,01	1,05	1,06	1,04	1,17	1,33

A: Derzeitige Wetterstation (WST), ab 1. 9. 1981

B: Ehem. WST Georgshöhe (1), 5. 10. 60-12. 4. 66 u. 11. 12. 78-31. 8. 81

C: Ehem. WST Georgshöhe (2), 12. 4. 66-11. 12. 78

D: Hafen 24 m (Projektmeßstelle)

E: Hafen 18 m, Station des STAİK Oberfeuer Riffgat, ab Dez. 1991

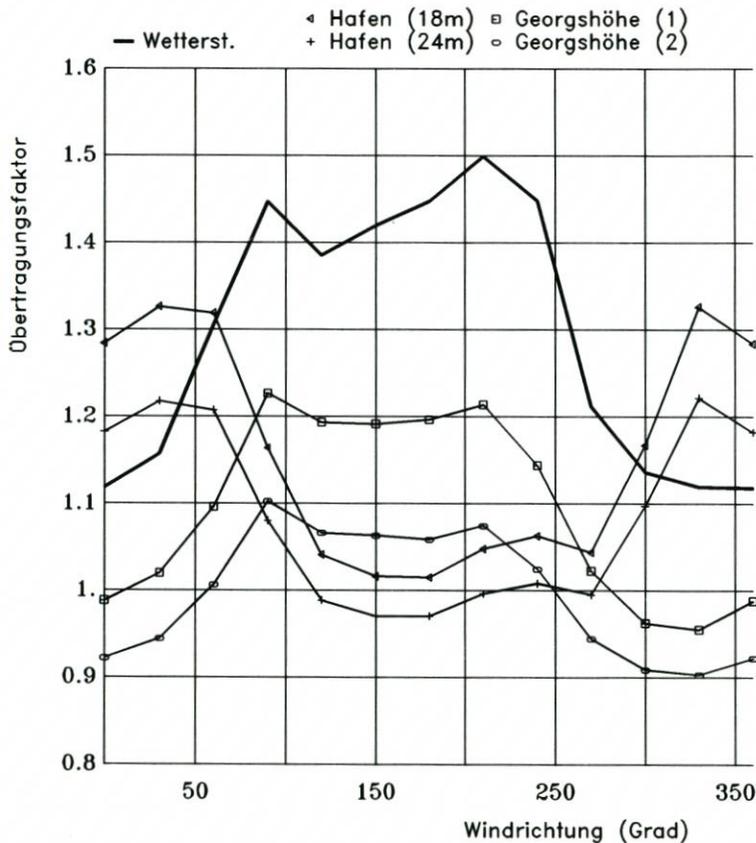


Abb. 4: Windrichtungsabhängige Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeiten von fünf Orten der Insel Norderney auf die freie See. Die Faktoren und eine Erläuterung zu den Orten sind in Tabelle 3 angegeben.

Wetterstation zur Übertragung auf die Seeverhältnisse bis zu 50% angehoben werden müssen, und zwar ausgerechnet für die Hauptwindrichtung Südwest (210–240°).

Mit der Bezeichnung „Wetterstation“ ist deren heutiger Standort am Januskopf gemeint, der am 1. 9. 1981 eingerichtet wurde. Die Meßhöhe beträgt hier 12 m über Grund (23 m über NN). Vorher befand sich die Wetterstation auf der „Georgshöhe“, etwa 200 m westlich der heutigen Station. Die Höhe des Windmessers betrug dort vom 5. 10. 60–12. 4. 66 33 m über NN, vom 12. 4. 66–11. 12. 78 44 m über NN und vom 11. 12. 78–31. 8. 81 wieder 34 m über NN. Für den ersten und letzten Zeitraum können die gleichen Faktoren „Georgshöhe (1)“, für den mittleren „Georgshöhe (2)“ verwendet werden. „Hafen 18 m“ stellt die Übertragungsfaktoren für die neue Station des STAIK am Oberfeuer Riffgat dar.

Es ist zu bedenken, daß die Übertragungsfaktoren mittlere Werte sind. Ihre Anwendung auf längerfristige richtungsabhängige Mittelwerte des Windes ergibt an der Zielstation mit einer Streuung von ca.  $\pm 5\%$  gute Ergebnisse. Bei der Übertragung einzelner Windwerte müssen deutlich höhere (aber unsystematische) Abweichungen von etwa  $\pm 10\text{--}15\%$  in Kauf genommen werden. Hier führt auch die Annahme der gleichen Windrichtung in Ausgangs- und Zielstation zu einer Unsicherheit von etwa  $\pm 20^\circ$ . Sehr schlecht werden die Übertragungsergebnisse für Einzelwerte bei schwachem Wind, etwa unterhalb 3 m/s. Für die meisten

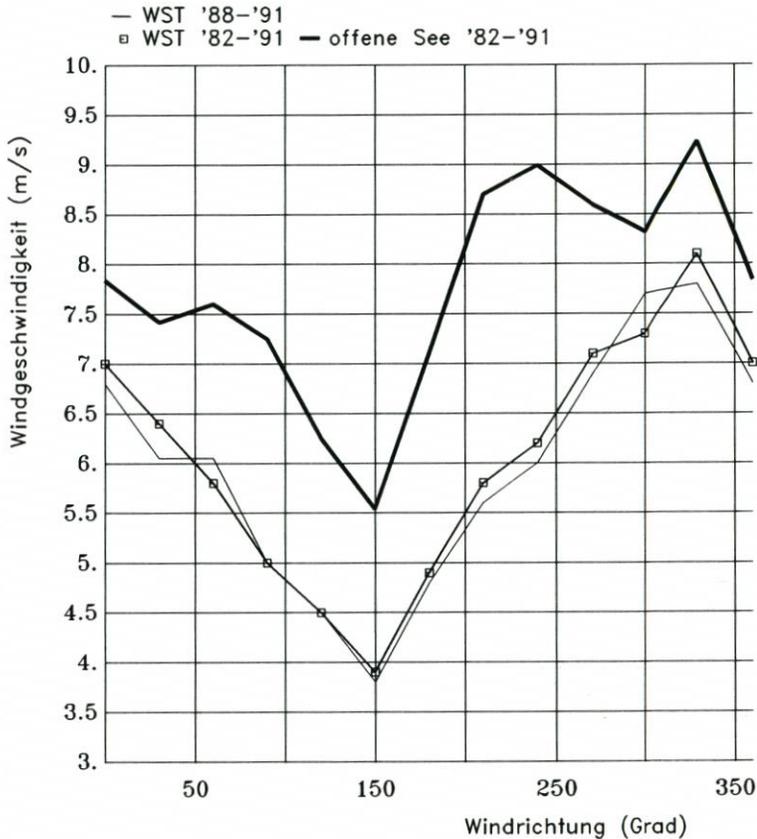


Abb. 5: Richtungsabhängige klimatologische Mittelwerte der Windgeschwindigkeit für die Jahre 1982–1991 an der Wetterstation (WST) und auf der freien See. Zum Vergleich für die Wetterstation auch das Mittel über den Projektzeitraum 1988–1991 (dünne Linie).

Insel Norderney dargestellt. Das quadratische Rechengebiet hat eine Seitenlänge von 3,15 km (63 Gitterzellen).

Die mittlere Windgeschwindigkeit variiert erheblich; sie reicht von mehr als 7 m/s in der nordwestlichen und südwestlichen Ecke auf dem Wasser bis zu weniger als 4,5 m/s über der Stadt (da hier die Verdrängungshöhe 7 m beträgt, ist dieser Windwert 10 m höher, also 17 m über dem Straßenniveau zu finden).

## 5. Schlußbemerkung

Es hat sich gezeigt, daß die Windmessungen auf Norderney keineswegs für die Windverhältnisse auf See repräsentativ sind. Vielmehr müssen die Werte für einige Windrichtungen zur Übertragung nach See erheblich modifiziert werden. Mit wenigen Ausnahmen gilt dies für alle Küsten- und Inselmeßstellen.

Das dargestellte Verfahren, approximative Faktoren zur Übertragung des Windes von einem auf andere Orte über Modellrechnungen zu bestimmen, ist nun ohne wesentliche Einschränkungen auch auf andere Gebiete an den deutschen Küsten übertragbar. Es kann sogar auf geplante Anemometer-Standorte angewendet werden, an denen es noch keine Vergleichsmessungen gibt, denn man benötigt nur relative Geschwindigkeitsunterschiede. Modellrechnungen sind allerdings aufwendig. Die Orographie und die Bodenrauigkeit müssen in einem feinen Raster bereitgestellt werden, und die Rechnungen kosten relativ viel Rechenzeit.

Wir danken den Mitarbeitern der Forschungsstelle Küste für die freundliche Hilfe bei der Planung, Einrichtung und Betreuung unserer Windmeßeinrichtungen auf Norderney.

## 6. Schriftenverzeichnis

- CHRISTOFFER, J. u. ULBRICHT-EISSING: Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 147, 2. Auflage, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach/Main, 1989.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“. Die Küste, H. 54, 1992.
- TROEN, I. u. PETERSEN, E. L.: Europäischer Windatlas. Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark, 1990.
- TRACI, R. M., PHILLIPS, G. T. u. PATNIAK, P. C.: Wind Energy Site Selection Methodology Development. RLO/2440-78/2, 1978.
- SHERMAN, C. A.: A Mass-Consistent Model for Windfields Over Complex Terrain. Lawrence Livermore Laborator Report UCRL-76171, Rev. 1, 1976.

technisch-wissenschaftlichen Anwendungen, wie etwa den Sturmflut- und Wind-Wa oder die Ermittlung des Windstaus, der Wellenanfachung und des Windenergiepotent Fehler bei Schwachwind jedoch belanglos.

Die eingehende Untersuchung der empirischen Übertragungsfaktoren zwischen Stationen zeigt außerdem, daß der Faktor für eine Windrichtung keine wirkliche K ist, sondern noch eine leichte Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweist, die aber im der zuvor genannten Genauigkeit zu vernachlässigen ist.

#### 4.4 Weitere Ergebnisse

In Abbildung 5 sind die 10jährigen klimatologischen Mittelwerte (Linie mit Sy 1982–91) des Windes im Vergleich mit den 4jährigen (dünne Linie, 1988–91) des Pro raums für die Wetterstation dargestellt. Die Anwendung der Umrechnungsfaktoren 3) auf den 10jährigen Zeitraum ergibt die richtungsabhängigen Mittelwerte des Winde freie See (genauer: etwa 5–10 km nördlich von Norderney). Dies ist die dicke Li Werte in Abb. 5 sind wirkliche klimatologische Mittelwerte; hier wurden in jeder Ric klasse alle Geschwindigkeitswerte zur Mittelbildung herangezogen (im Gegensatz Abb. 2 und 3, siehe Abschnitt 4.2).

Wenn man die Modellrechnung für jede Richtung nun so skaliert, daß sich Gitterpunkt, der der Meßhöhe an der Wetterstation entspricht, genau deren 10 Mittelwert ergibt, und dann die Felder für die 12 Richtungen (mit den zugehörigen Hä ten gewichtet) mittelt, ist das Ergebnis ein raumdeckendes Feld der mittleren Windge digkeit. Eine Schicht daraus, in 10 m Höhe über Grund (bzw. über der in Absc erwähnten Verdrängungshöhe), ist in Abb. 6 in einem Raster von 50 m für den Westk



Abb. 6: Klimatologische Mittelwerte (1982–1991) der Windgeschwindigkeit über dem Westkopf c Norderney in 10 m Höhe aus Modellrechnungen.

# Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989

Von HEIE F. ERCHINGER und BURKHARD TILLMANN

## Zusammenfassung

Die sechste Strandaufspülung am Westende der Insel Norderney wurde 1989 als versuchsorientierte Aufspülung im Rahmen eines KFKI-Forschungsvorhabens durchgeführt mit dem Ziel einer Optimierung von Aufspülungen. Der Aufspülkörper erhielt in Quer- und Längsrichtung ein in mehrjährigen Strandvermessungen ermitteltes natürliches Strandprofil, um die Umlagerungen in der Anfangsphase möglichst gering zu halten. Der Einbau von zwei verschiedenenkörnigen Sanden sollte Aufschluß darüber bringen, in welchem Maße das von einem Hopper heranzubringende gröbere Material länger am Aufspülort verweilt.

Interessante Erkenntnisse erbrachten die Umlagerungen des Aufspülkörpers. Oberhalb MTnw nahm die Strandhöhe bereits nach wenigen Monaten deutlich ab, während der Vorstrand zwischen MTnw und NN -4 m aus diesem Material aufgefüllt wurde. Die Veränderungen des Vorstrandes im Laufe des ersten Jahres nach der Aufspülung ließen erkennen, daß auch der Vorstrand bei künftigen Aufspülungen erhöht werden sollte, um seine natürliche Hangneigung bei Aufspülungen in etwa zu erhalten. Hieraus erwuchs der Plan, bei der Wiederholungsaufspülung Sandhöfte auf den Vorstrand vorzutreiben, um nach deren Umformung eine flächenhafte Aufhöhung des Vorstrandes zu erzielen.

Eine zeitlich enge Vermessung des 350 m langen Sandentnahmetrichters ermöglichte einen Einblick in die sehr schnelle Wiederverfüllung des Trichters durch einen beträchtlichen strömungs- und brandungsbedingten Sandtrieb auf der Plate. Auch die Einrichtung einer stationären Spülleitung für jährliche Sandzugaben konnte im Rahmen der Untersuchungen in spültechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht mit der bisherigen Aufspülmethode in Einzelmaßnahmen verglichen werden. Dabei erwies sich die bisherige Methode einer Wiederholungsaufspülung im Westen Norderney's nach 2 bis 6 Jahren in Abhängigkeit vom sturmflutbedingten Energieeintrag als deutlich überlegen.

## Summary

*The sixth Norderney Island sand replenishment was undertaken in 1989 as an experimentally oriented program in connection with a KFKI research project for optimizing such procedures. The sand was initially distributed as close as possible to natural profiles determined from long term measurements, in order to minimize initial redistribution. Two different sands were used in order to get indications as to whether coarser material was more resistant to erosion.*

*The redistribution of the deposited sand produced interesting results. The beach level above Mtlw sank significantly within a few months. This material was redeposited in the near shore area between Mtlw and NN -4. Changes in the near shore zone during the first year indicated that this area should also be replenished in future operations in order to retain the natural slopes. This led to the plan that sand masses should be placed in the near shore area during the next replenishment in order to generate large scale elevation increases in this reach.*

*Frequent measurements in a 350 m long sediment trench gave insight into its very fast filling resulting from significant flow and wave induced sand motion. An economical and technical comparison could be made between the present replenishment method and that with a permanent stationary pipeline. A repeat of the replenishment procedure every 2-6 years, depending on the storm induced energy input, was found to be significantly better.*

## Inhalt

1. Einführung . . . . .	144
2. Das Teilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“ . . . . .	144
3. Bisherige Aufspülungen 1951 bis 1984 . . . . .	146
4. Durchführung der Strandaufspülung 1989 . . . . .	148
4.1 Das natürliche Strandprofil für Aufspülkörper . . . . .	148
4.2 Die Gewinnung des feinen und gröberen Aufspülmaterials . . . . .	150
4.3 Der Aufspülkörper . . . . .	153
5. Entwicklung der Strandhöhen und -neigungen nach der Aufspülung . . . . .	154
5.1 Die Strandentwicklung im Seegatbereich . . . . .	154
5.2 Die Strandentwicklung am Nordweststrand . . . . .	155
6. Wiederverfüllung der Sandentnahmestelle auf der Robbenplate . . . . .	158
7. Häufige Sandzugaben durch eine stationäre Spülleitung . . . . .	161
7.1 Die Grundidee und mögliche Sandentnahmegebiete . . . . .	161
7.2 Aufspülkörper und Aufspülintervall . . . . .	163
7.3 Kostenvergleich . . . . .	164
8. Der äolische Sandtransport . . . . .	165
9. Ein Ergebnis der Untersuchungen: Strandaufspülung 1992 einschl. Vorstrandaufhöhung durch Sandhöfte . . . . .	165
10. Schriftenverzeichnis . . . . .	167

## 1. Einführung

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatte sich das Norderneyer Seegat soweit an den Westen Norderneys herangeschoben und Strand und Dünen abgetragen, daß 1857/58 mit dem Bau von massiven Schutzwerken zum Schutz von Ort und Kuranlagen begonnen werden mußte. Innerhalb von rd. hundert Jahren wurde dieses Schutzsystem auf rd. 6 km Länge als Strandmauer oder Deckwerk mit 32 Buhnen ausgebaut. Vor allem die 1933/34 gebauten, bis zur Sohle des etwa 25 m tiefen Seegats reichenden Unterwasserbuhnen haben den Inselsockel am Westkopf gesichert und vor weiterem Heranrücken des Seegats bewahrt. Diese Baumaßnahmen haben dem weiteren Abbruch des Westendes Einhalt geboten; die weitere Erosion des Strandes konnte jedoch damit nicht verhindert werden.

Bis 1950 hatte der Strand im Westen der Insel eine derart niedrige Lage erreicht, daß Deckwerksfußsicherungen und Buhneneinfassungen akut gefährdet und die z. T. fast hundert Jahre alten Bauwerke der infolge der Strandabnahme ständig steigenden Seegangsbelastung nicht mehr gewachsen waren. Der Empfehlung der Arbeitsgruppe Norderney des Küstenausschusses Nord- und Ostsee folgend wurde 1951/52 der Norderneyer Strand mit 1,25 Mio. m<sup>3</sup> Sand auf rd. 6 km Länge aufgespült. 1989 spülte ein Saugbagger den Strand zum sechsten Mal auf. Diese Aufspülung konnte im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ mit gezielten, vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) finanzierten Untersuchungen begleitet werden (KUNZ, 1992). Dieses Vorhaben beinhaltet mehrere Teilprojekte. Das Teilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“ wird in diesem Beitrag behandelt.

## 2. Das Teilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“

Im Rahmen dieses Teilprojekts sollten Fragen  
– der praktischen Durchführung von Strandaufspülungen,

- der Profilgebung,
- des Einflusses unterschiedlicher Korngrößen des Aufspülmaterials,
- der Gewinnungsmöglichkeiten gröberer Materials und
- der Kostenoptimierung langfristig geplanter Aufspülungen mit Standleitung vom Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz Norden untersucht werden.

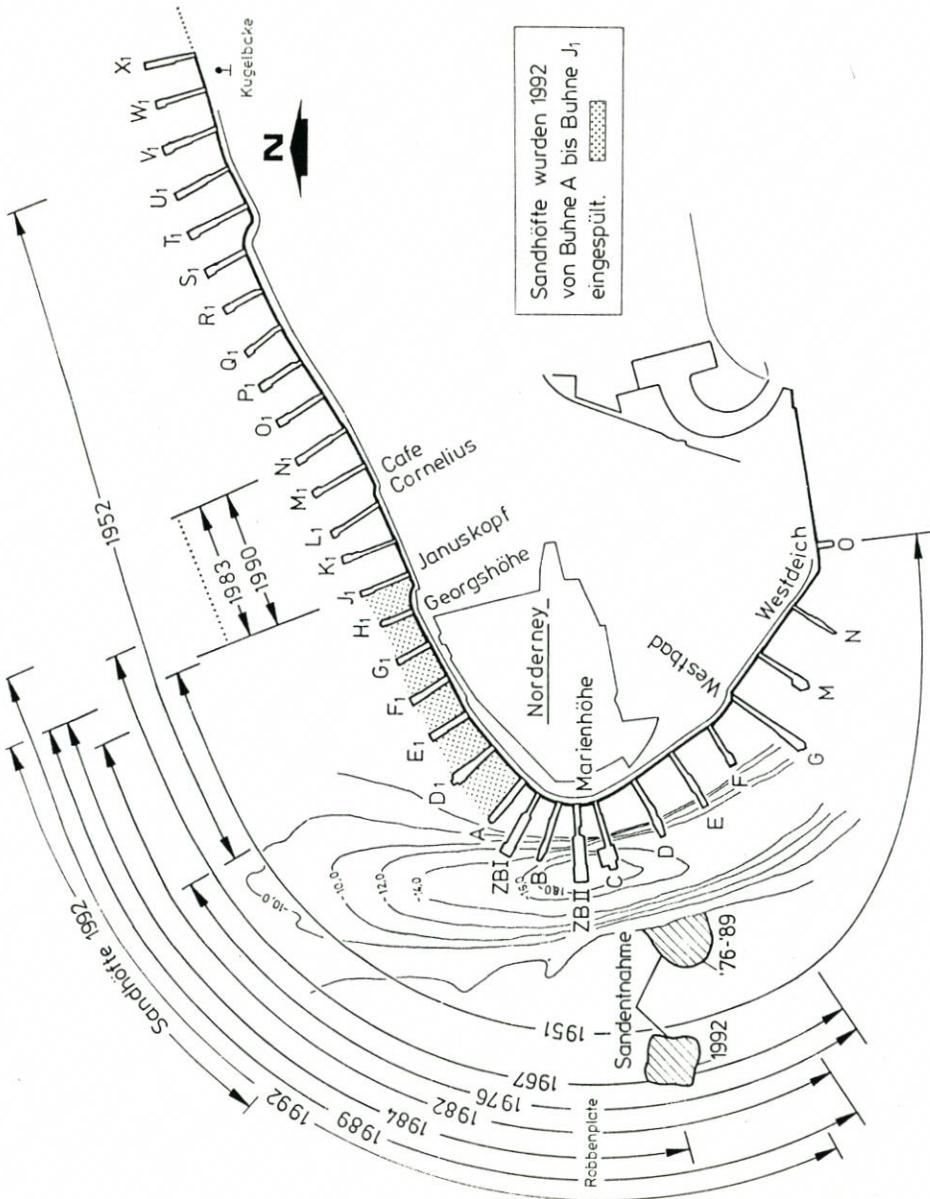


Abb. 1: Westende der Insel Norderney mit Kennzeichnung der Aufspülstrecken und Sandentnahmen der Strandaufspülungen 1951 bis 1992

Tabelle 1. Hauptmerkmale der Strandauffüllungen auf Norderney von 1951-1992

Jahr	Aufgespülte Länge km	Strandstrecke Buhnen	Einbaumenge (m <sup>3</sup> )	Entnahmeort
1951/52	6,0	O-V1	1 250 000	südl. Inselwatt
1967	2,0	E-K1	240 000	vor Bühnenkopf G1
1976	1,1	E-E1	500 000	Robbenplate
1982	1,5	D-H1	470 000	Robbenplate
1984	1,7	C-J1	410 000	Robbenplate
1989	1,8	D-J1	447 000	Robbenplate
1992	2,1	D-L1	500 000	Robbenplate West
Trockeneinbau				
1983	0,6	J1-N1	64 000	Strand östl. Weiße Düne
1990	0,5	J1-N1	45 000	Strand östl. Weiße Düne
Wiederherstellung und Sicherung der Schutzdüne östl. der Kugelbake:				
1981	0,65		82 000	Strand östl. Weiße Düne
1983	0,43		99 000	Strand östl. Weiße Düne
Gesamtmenge des eingebauten Sandes:			4 107 000	

Die Vorbereitung der Aufspülung begann 1987 mit Erstellung einer Lagerstättenstudie mit Unterstützung des Landesamtes für Bodenforschung, Hannover. Der Strand wurde 1989 aufgespült. Die Untersuchungen im Rahmen des Teilprojektes endeten Ende 1991.

### 3. Bisherige Aufspülungen 1951 bis 1984

Die fünf Strandaufspülungen von 1951 bis 1984 sind in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentiert (KRAMER, 1958/59; ERCHINGER, 1986). Letzterer hat die Profile dieser Aufspülungen im Bühnenfeld D1-E1 zusammengestellt. Die aufgespülten Strandstrecken und die Einbaumengen sind in Abb. 1 und Tab. 1 wiedergegeben. Mit der ersten Aufspülung 1951/52 ist der 6 km lange unterversorgte Strand mit 1,25 Mio. m<sup>3</sup> Wattsand erhöht und verbreitert worden. Nach der Aufspülung gab es erhebliche Umlagerungen, vor allem nordöstlich des Westkopfes in den Bühnenfeldern A bis F1 im Divergenzbereich des Brandungsstromes mit dem Schwerpunkt im Bühnenfeld D1-E1, wo der Strand nach wenigen Jahren bereits wieder abgetragen war. Der Brandungsstrom hat den Sand in beide Richtungen den Strand entlang transportiert. Er ergänzt auf dem Transportweg jeweils die unterversorgten Strandabschnitte und bleibt insgesamt lange Zeit zum Schutze der Insel wirksam. Der Küstenlängstransport zugunsten der angrenzenden Strandstrecken hat es ermöglicht, die weiteren Aufspülungen auf den engeren Westkopfbereich mit einer Strandstrecke von ein bis zwei Kilometer Länge zu beschränken. Für das Bühnenfeld D1-E1 ist die Sandmassenbilanz im Profil 74 (Bühnenfeldmitte) auf Abb. 2 dargestellt. Erfasst sind die Sandmassen im Strandkeil oberhalb MTnw und seewärts des Deckwerksfußes. Unterlegt ist diese Massenbilanz mit einem Säulendiagramm über die Häufigkeit von Sturmzeiten über 2 m NN für Norderney, um dadurch auch die Zusammenhänge zwischen dem Energieeintrag durch Sturmfluten und der Stranderosion zu veranschaulichen.

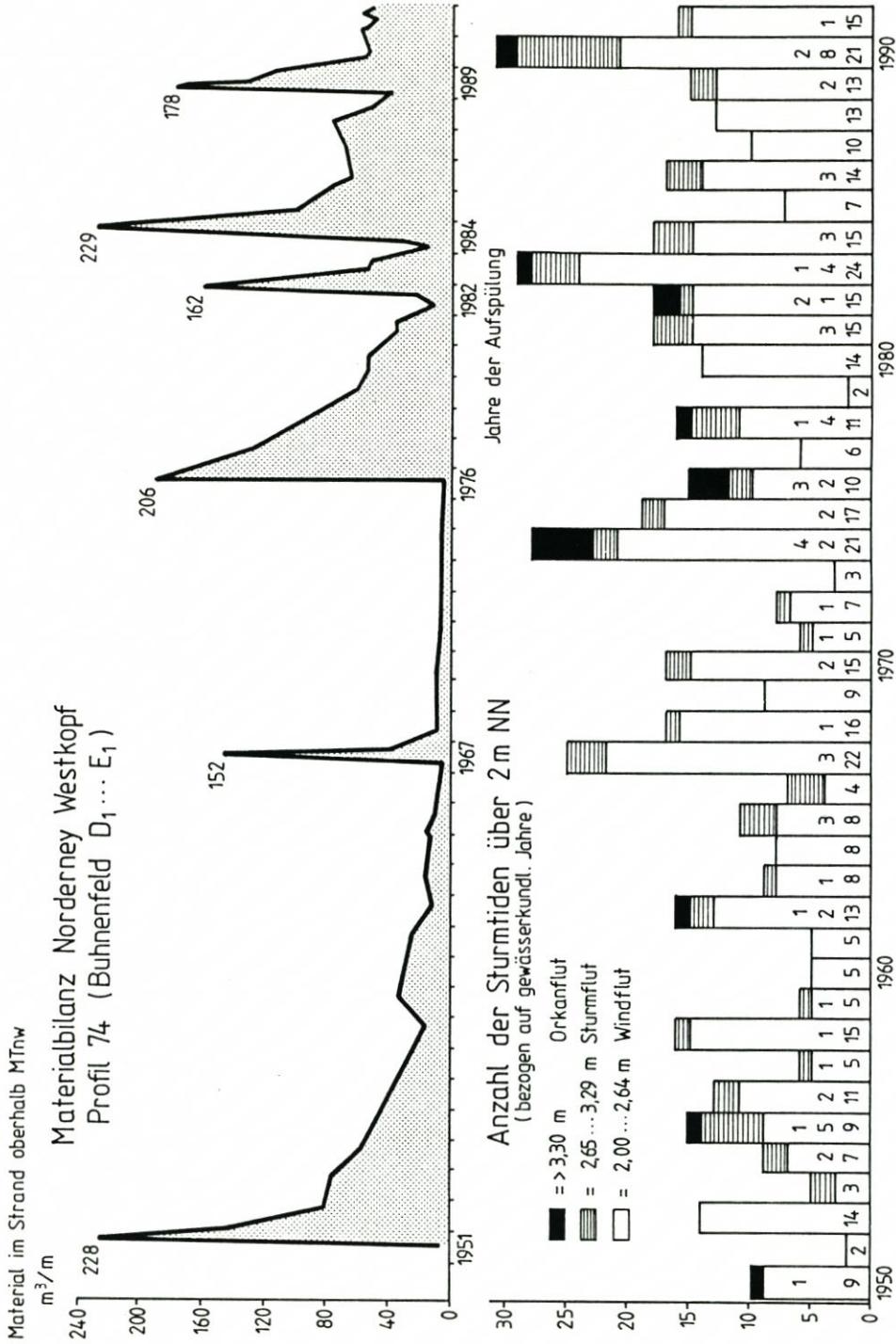


Abb. 2: Massenbilanz im Buhnenfeld D<sub>1</sub>-E<sub>1</sub> und Sturmfluthäufigkeit von 1951 bis 1991

## 4. Durchführung der Strandaufspülung 1989

## 4.1 Das natürliche Strandprofil für Aufspülkörper

Bei der Untersuchung der Profilentwicklung nach der Strandaufspülung 1984 wurde festgestellt, daß sich das durch Brandungs- und Strömungskräfte erzeugte Küstenquerprofil unter Beibehaltung seiner Form allmählich nach unten verlagert hatte. Diese Profilform stellt den angreifenden Kräften offenbar den größten Widerstand entgegen. Daraus konnte geschlossen werden, daß die Gestaltung des Aufspülprofils 1989 entsprechend dem natürlichen Querprofil zu den geringsten Sandverlusten unmittelbar nach Aufbringen des Aufspülkörpers führen würde (Abb. 3). Profilaufnahmen aus dem Bereich des Vorstrandes lagen nicht in ausreichendem Maße vor, so daß die Betrachtung des natürlichen Querprofils an der MTnw-Linie enden mußte.

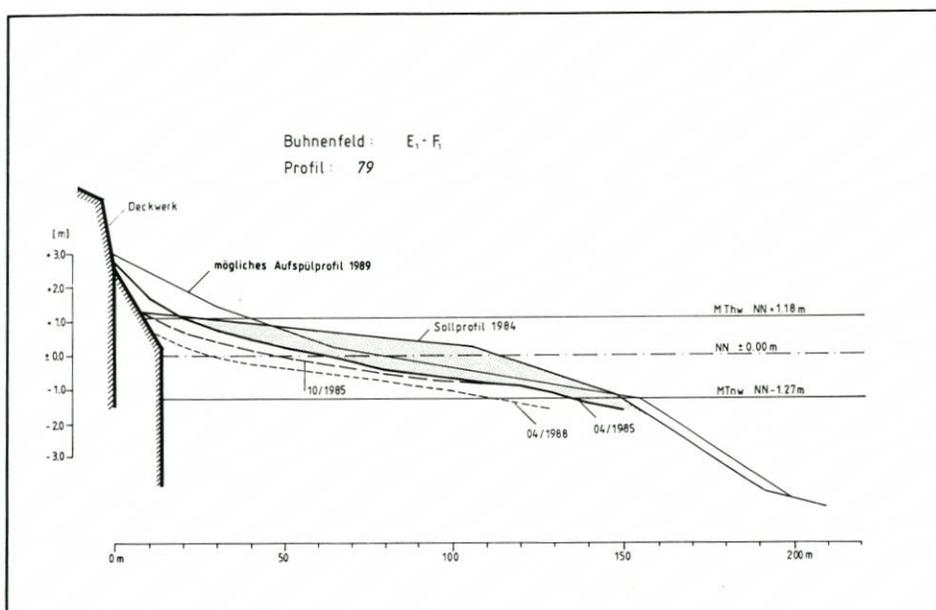


Abb. 3: Entwicklung des Strandprofils 79 am Nordweststrand von 1984 bis 1989

Das natürliche Strand-Querprofil ist am exaktesten durch eine Potenzfunktion zu beschreiben. Die Basis für die Profilentwicklung liefert die von DEAN aus Naturmessungen entwickelte Formel:

$$h = a \cdot y^{2/3}$$

Der Wert  $h$  entspricht der Strandhöhe in der Entfernung  $y$  vom Profilmullpunkt, und  $a$  ist abhängig vom vorgefundenen Korndurchmesser.

Um eine bessere Anpassung an die Norderneyer Verhältnisse zu erzielen, wurde die Exponentialfunktion modifiziert zu:

$$h = a \cdot y^{2/3} + b$$

Die Funktionswerte  $a$  und  $b$  wurden mit einer Ausgleichsrechnung nach der Methode der

kleinsten Quadrate bestimmt. Die Ermittlung dieser Funktionswerte und die Festlegung des Profil-Nullpunktes hat KOTZBAUER (1990) eingehend dargelegt. Danach ergibt sich für das Strandprofil 79 im Bühnenfeld E1-F1 ein natürliches Strandprofil, das beschrieben werden kann

$$h = -0,097 \cdot y^{2/3} + 1,15 \quad (1)$$

mit MThw-Durchgang = 0 m

Für die praktische Ausführung der Aufspülung wurde das so ermittelte Profil in Teilstrecken mit jeweils gleicher Neigung gegliedert und zwischen MThw und MTnw nur einmal abgestuft von der Neigung 1:30 im oberen Strandbereich zur Neigung 1:60 im mittleren und unteren Strandbereich (s. Abb. 4).

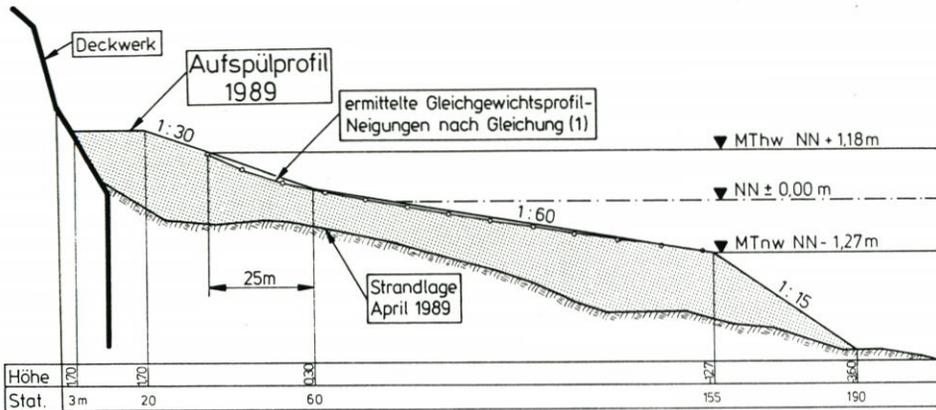


Abb. 4: Natürliches Strandprofil nach der DEAN-Formel am Beispiel Norderney

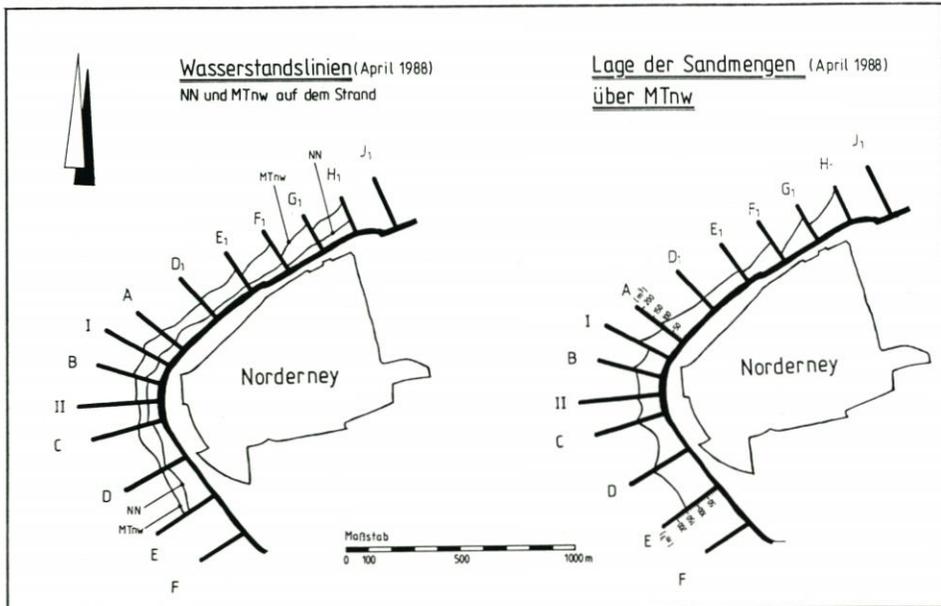


Abb. 5: Strandkonturen und Sandmengen in den Bühnenfeldern im April 1988



Tabelle 2. Seit 1976 eingesetzte Naßbagger, deren Merkmale und Bauzeiten

Jahr der Ausführung	1976	1982	1984	1989
Naßbagger	„Jokra“ Cutter	„Pirat VI“ Cutter	„Triton“ Cutter	„Pirat VI“ Sauger*)
Verdrängung	~ 2200 m <sup>3</sup>	~ 440 m <sup>3</sup>	~ 1350 m <sup>3</sup>	~ 440 m <sup>3</sup>
Tiefgang	2,80 m	1,40 m	2,40 m	1,40 m
Cuttertiefe	26,00 m	16,00 m	20,00 m	16,00 m
Saugleitung	Ø 800 mm	Ø 550 mm	Ø 850 mm	Ø 550 m
Druckleitung	Ø 750 mm	Ø 500 mm	Ø 800 mm	Ø 500 mm
Pumpenleistung	~ 3200 kW	~ 850 kW	~ 2500 kW	~ 850 kW
Schneidkopfantrieb	~ 590 kW	~ 132 kW	~ 365 kW	nicht benötigt
Spülmenge	500 000 m <sup>3</sup>	470 000 m <sup>3</sup>	410 000 m <sup>3</sup>	447 000 m <sup>3**</sup> )
Bauzeit gesamt	60 Tage	65 Tage	37 Tage	52 Tage
Spüldauer	20 Tage	31 Tage	13 Tage	21 Tage
Spüleistung pro Tag	~ 25 000 m <sup>3</sup>	~ 15 000 m <sup>3</sup>	~ 31 000 m <sup>3</sup>	~ 20 500 m <sup>3</sup>

\*) mit Druckwassereinrichtung  
 \*\*) einschl. 17 000 m<sup>3</sup> gröberen Sand mit Hopper

Um den Einfluß unterschiedlicher Korngrößen des Aufspülmaterials zu erforschen, war der Einbau von Sand mit zwei verschiedenen Korngrößen geplant. Das Bühnenfeld C-II sollte mit gröberem Material aufgefüllt werden, während im übrigen ein Feinsand mit  $d_{50} \approx 0,2$  mm eingebracht werden sollte.

Während der holozäne Feinsand mit Korndurchmesser von etwa 0,2 mm oberhalb der Geschiebemergelschicht aus der Robbenplate entnommen werden konnte, gab es für die Gewinnung des gröberen Materials zwei Alternativen, und zwar die Entnahme

- aus den tieferen Schichten der Robbenplate im Tiefsaugverfahren,
- vom Seegrund aus etwa 10 m Tiefe nördlich von Juist-Ost mit einem Hopper mit Schleppkopf.

Die Entnahme des feinsandigen Mittelsandes aus 30 bis 40 m Tiefe aus der Robbenplate im Tiefsaugverfahren wäre grundsätzlich möglich gewesen. Um das Einbrechen der durchstoßenden Mergelschicht zu verhindern, hätte allerdings mit einer zweiten Pumpe Druckwasser unter die Mergelschicht gepumpt werden müssen. Natürlich ist ein solcher Betrieb wegen des möglichen Verlustes des Saug- bzw. Druckrohres durch Einbrechen der Mergelschicht mit erheblichem Risiko behaftet. Bei einer ausgeschriebenen Menge von 20 000 m<sup>3</sup> betrug daher der Einheitspreis mit 25 DM/m<sup>3</sup> für diesen gröberen Sand etwa das 10fache der normalen Feinsandaufspülung aus oberflächennahen Schichten.

Im Vergleich dazu konnte das vom Hopper per Schleppkopf aufgenommene und herantransportierte Material für einen Einheitspreis von etwa 7 DM/m<sup>3</sup> eingebaut werden. Der eingebrachte gröbere Sand wies allerdings auch lediglich Korngrößen zwischen 0,25 und 0,3 mm und einen erheblichen Muschelbruchanteil auf. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde diese Lösung gewählt. Beim Antransport dieses gröberen Sandes von der Entnahmestelle nördlich Juist-Ost muß der Hopper den Norderneyer Riffbogen mit beschränkter Wassertiefe im Schluchter-Fahrwasser kreuzen. Dieses Fahrwasser weist eine maximale Wassertiefe von 5,5 m bei Tidehochwasser auf. Daher kann nur ein kleiner Hopper mit einem Tiefgang von 3,5 m im beladenen Zustand mit einer Ladekapazität von 815 m<sup>3</sup> eingesetzt werden.

Für die Gewinnung des oberflächennahen Feinsandes aus der Robbenplate wurde der stationäre Sauger mit Druckwassereinrichtung gemäß Tab. 2 eingesetzt. Er förderte durch eine



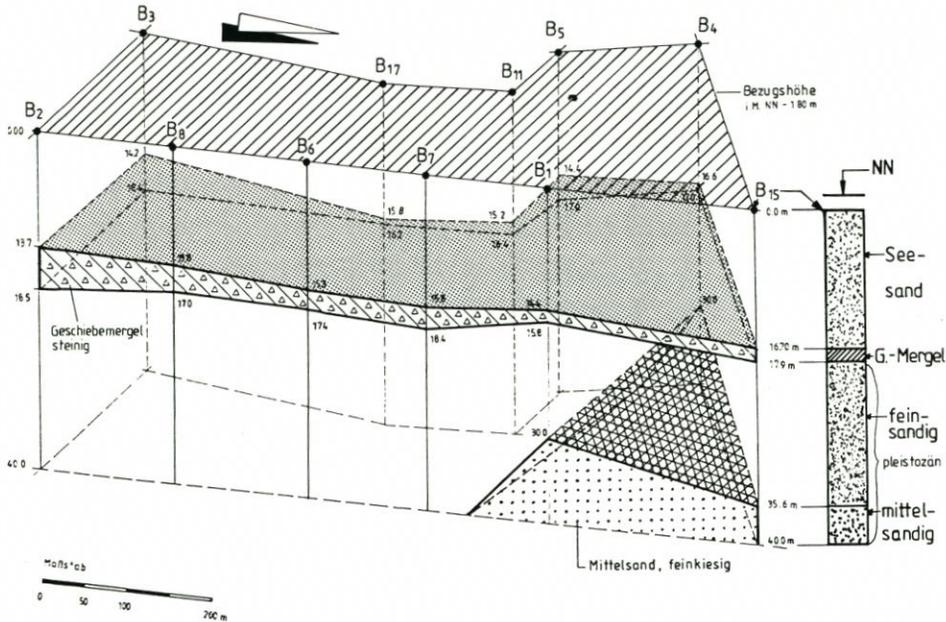


Abb. 8: Schematische Darstellung der Geschiebemergelschicht u. des feinkiesigen Mittelsandvorkommens in der Robbenplate

Spüldruckleitung von 500 mm bei einer tatsächlichen Spüldauer von 21 Tagen 430 000 m<sup>3</sup> Feinsand zur Einbaustelle am Strand. Der mittlere Korndurchmesser des eingespülten Sandes ergab sich zu  $d_{50} = 0,17$  mm.

### 4.3 Der Aufspülkörper

Im Aufspülbereich ist zwischen zwei sehr unterschiedlichen Strand- und Vorstrandprofilen am Westkopf und am Nordweststrand zu unterscheiden (Abb. 9):

- Am Westkopf fällt der nur etwa 190 m breite Strand mit steiler Böschung zum über 20 m tiefen Seegat ab. Der Inselsockel ist durch die bis zur Seegatsohle bei NN –25 m herunterreichenden Unterwasserbuhnen, wie beispielsweise die Buhne II, gesichert.
- Im Nordweststrandbereich mit dem Bühnenfeld D1-E1, dem Divergenzbereich des Brandungsstroms, fällt der Vorstrand wesentlich flacher ab als unmittelbar am Seegat. Er erreicht aber doch bereits 250 m vor dem Deckwerk die Tiefe von NN –5,0 m und wird nach Nordosten noch flacher.

Der Aufspülkörper wurde mit den in Abschnitt 3 beschriebenen Profilen auf der 1,8 km langen Strandstrecke zwischen den Bühnen D und J1 aufgespült. Von der am Deckwerk verlaufenden Hauptspüleleitung wurden die Bühnenfelder über abzweigende Stichleitungen bis auf das vorgegebene Profil aufgehöhht und durch Planierraupen profilgemäß mit einer Toleranz von +10 cm für Einzelwerte und von 20 cm bei gleichmäßiger Überschreitung aller Höhenmarken eines Bühnenfeldes hergerichtet. Die vorgegebenen Profile waren bis zur Höhenmarke MTnw festgelegt. Darunter lagerte sich der Sand nach seinem natürlichen Böschungsprofil unter Wasser (EAK'81, Empfehlungen D) mit zunächst etwa 1:15, also mit einem recht steilen Unterwasserprofil, ab.

Lediglich das Bühnenfeld C-II wurde mit 17 000 m<sup>3</sup> größerem Material vom Seegrund

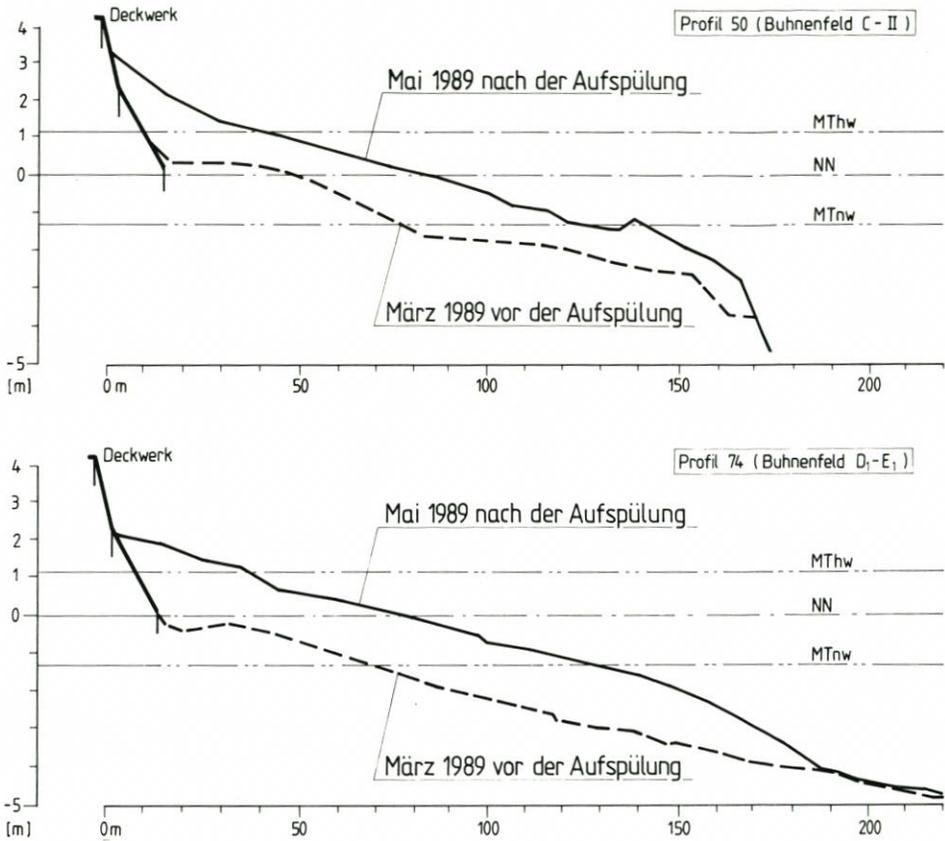


Abb. 9: Norderneyer Strandprofile am Westkopf mit tiefem Seegat und am Nordweststrand vor und nach der Aufspülung 1989

nördlich Juist-Ost aufgefüllt. Dank des risikofreudigen, geschickten Hopperkapitäns konnte der Hopper nach dem Regenbogensystem direkt in das Bühnenfeld entladen werden (Abb. 10). Der Sand wurde durch einen Rohrstutzen mit düsenartiger Öffnung, der nach vorn über den Bug hinausragte, bei Hochwasser auf den trockenfallenden Strand gespült und bei dem jeweils folgenden Tideniedrigwasser mit Raupen strandaufwärts geschoben und profilgemäß eingebaut.

## 5. Entwicklung der Strandhöhen und -neigungen nach der Aufspülung

### 5.1 Die Strandentwicklung im Seegatbereich

Der Umlagerungsprozeß verlief mit Ausnahme des mit größerem Sand gefüllten Bühnenfeldes C-II in allen Bühnenfeldern ähnlich. Einer anfänglichen gleichmäßigen Abnahme unter Beibehaltung der Profilform folgte in den von einer außergewöhnlichen Sturmzeitenhäufigkeit geprägten Wintermonaten Januar und Februar 1990 die weitere Ausräumung des Strandkeiles oberhalb der NN-Linie. Das bis November 1989 sehr stabil erscheinende „Grobsandfeld“

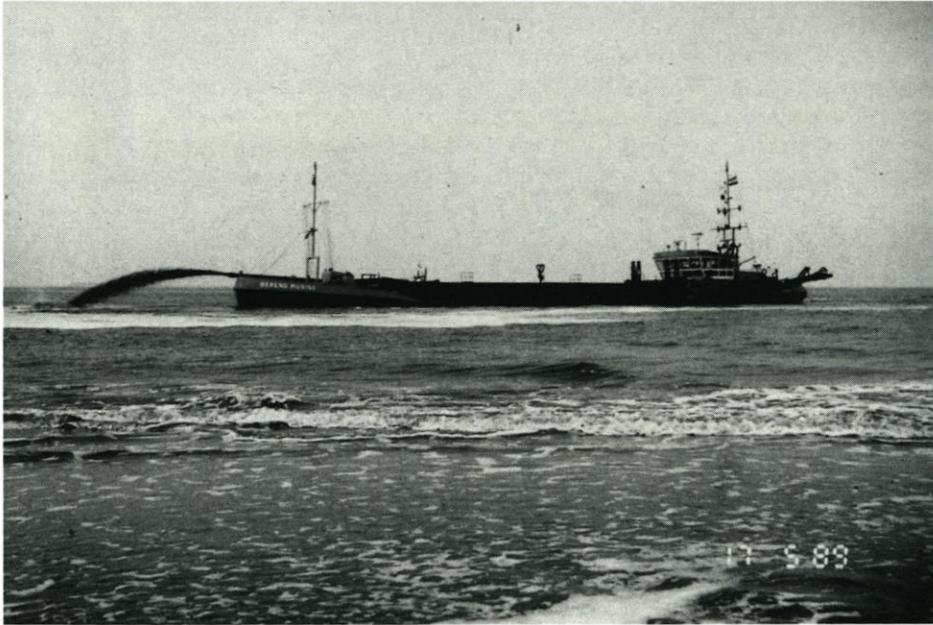


Abb. 10: Hopperbagger im Einsatz mit Entladung nach dem Regenbogensystem

unterlag während der Wintermonate einem dramatischen Massenverlust und präsentierte sich im Mai 1990 in etwa dem gleichen Zustand wie vor der Aufspülung. Dieses Verhalten kann nicht erklärt werden; ggf. ist der hohe Muschelanteil in dem gröberen Material Ursache für die starke Sturmfluterosion. In der Strandhöhenentwicklung des Seegatbereiches zeichnete sich bis zum Dezember 1991 eine zunehmend kleiner werdende Schwankungsbreite der saisonalen Massenzu- und -abnahmen ab. In der Massenbilanz sind von Mai 1990 bis Dezember 1991 nur geringfügige Änderungen festzustellen.

## 5.2 Die Strandentwicklung am Nordweststrand

Auf diesem Strandabschnitt hielt die Ausräumung des Strandes über den gesamten Beobachtungszeitraum hin an. In den Feldern zwischen Buhne D1 und Buhne H1 war im Dezember 1991 ein so niedriges Strandniveau erreicht, daß eine Wiederholungsaufspülung für das Frühjahr 1992 geplant wurde, um eine akute Bedrohung des Deckwerkes abzuwenden.

Die Abbildungen 11 und 12, die die Strandhöhenentwicklung anhand der Höhenlinien MThw, NN, MTnw, NN -4 m zeigen, lassen deutlich erkennen, daß die Hauptmassenverluste des oberen Strandbereiches eindeutig am Nordweststrand festzustellen sind. Die Linie NN -4 m wandert dagegen zunächst seawärts, was auf eine Aufhöhung des Vorstrandes in dieser Höhenlage hinweist. Bis Ende 1991 liegt sie dann wieder etwa in der alten Position.

Die Massenbilanzen auf Abb.13 zeigen die Massenentwicklung in dem Strandkeil oberhalb der MThw-Linie bzw. oberhalb der NN -5 m-Linie in den drei Bühnenfeldern A-D<sub>1</sub>, E<sub>1</sub>-F<sub>1</sub> und F<sub>1</sub>-G<sub>1</sub> am Nordweststrand. Sie machen deutlich, daß der Strand oberhalb MTnw vom Mai 1989 bis Dezember 1991 stark ausgeräumt wurde, am stärksten im Bühnenfeld F<sub>1</sub>-G<sub>1</sub>, das am Nordostende dieses Abschnitts liegt und einen flacheren Vorstrand als das

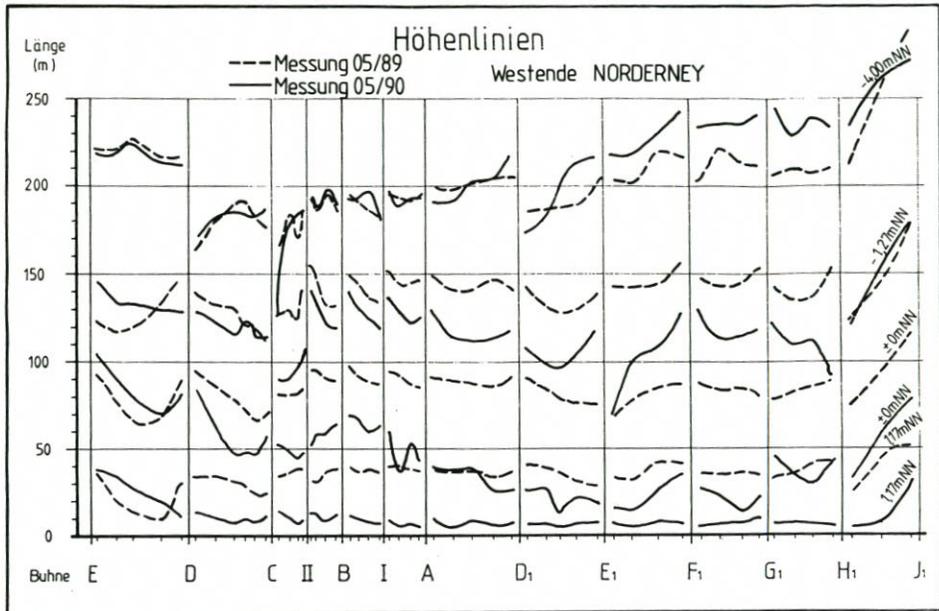


Abb. 11: Strandhöhenentwicklung von Mai 1989 bis Mai 1990

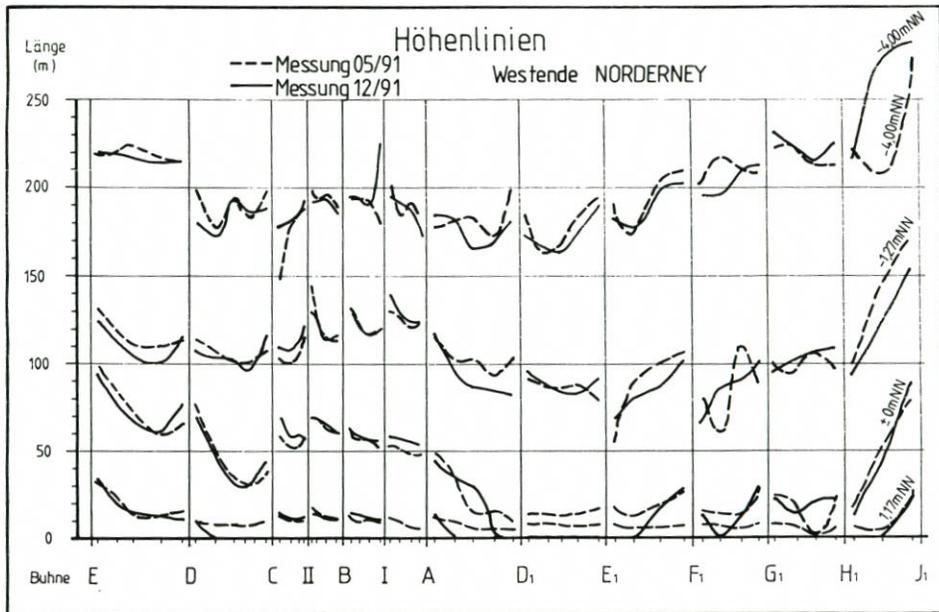


Abb. 12: Strandhöhenentwicklung bis Dezember 1991

Feld A-D<sub>1</sub> aufweist. Die Darstellung des gesamten Strandkeiles bis zur Tiefe von NN -5 m läßt den stärkeren Abfall am steileren Vorstrand im Bühnenfeld A-D<sub>1</sub> deutlich werden.

In diesem Strandabschnitt muß ein gegenüber den benachbarten Strandbereichen erheblich höherer Energieeintrag herrschen. Es ist nicht auszuschließen, daß diese Entwicklung mit

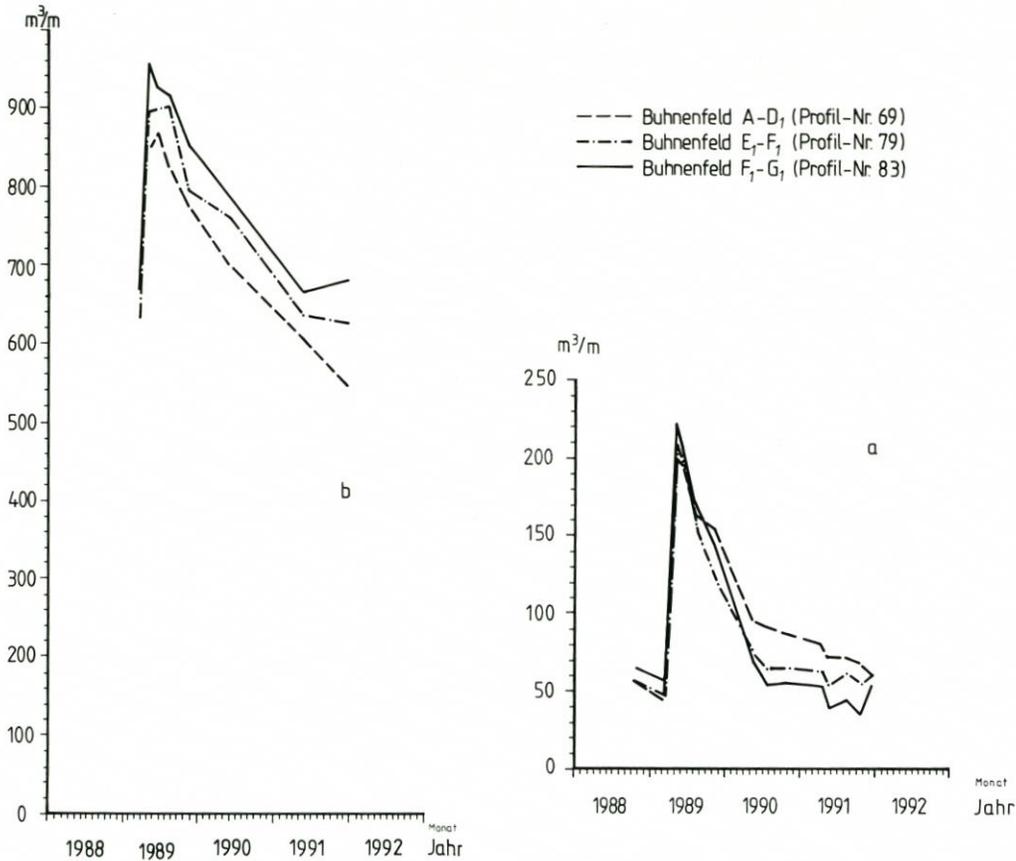


Abb. 13: Sandmassenbilanz im Strandkeil oberhalb MTnw (a) bzw. bis NN -5,00 m (b)

Veränderungen im Riffbogen und mit der beobachteten Nordwestverlagerung der Robbenplate zusammenhängt.

Diese auch in Abb. 14 dargestellte Entwicklung der Vorstrandneigung macht deutlich, daß die Aufspülung des nassen Strandes oberhalb MTnw dazu führt, daß sich unterhalb MTnw zunächst die natürliche Aufspülneigung gemäß EAK 1981, Empfehlungen D, Abschn. 3.1.2 einstellt und durch Strömung und Seegang in kurzer Zeit abgeflacht wird auf etwa 1:25. Bereits ein Jahr nach der Aufspülung 1989 hatte der Vorstrand sich wieder abgeflacht auf das ursprüngliche Maß von etwa 1:45. Im Verlaufe dieses Umformungsprozesses waren zunächst in größerem Maße Massen aus dem Strand oberhalb MTnw in diese Vorstrandzone verfrachtet worden und hatten diesen aufgehöhht und abgeflacht.

Dieses Resultat führt zu der Konsequenz, daß der Norderneyer Nordweststrand bei künftigen Aufspülungen im Vorstrandbereich mit aufgespült werden sollte, um in diesem Bereich in etwa die natürliche Hangneigung zu behalten. Dadurch dürfte dann die starke Strandabnahme im oberen Strandbereich unmittelbar nach einer Aufspülung auch verringert werden können. Daraus ist zu folgern, daß die in Abschn. 4 beschriebene Herstellung eines natürlichen Strandprofils oberhalb MTnw auch auf den Vorstrandbereich ausgedehnt werden sollte. Die bautechnischen Möglichkeiten zur Erzielung eines flachen Vorstrandes werden in Abschn. 9 dargelegt.

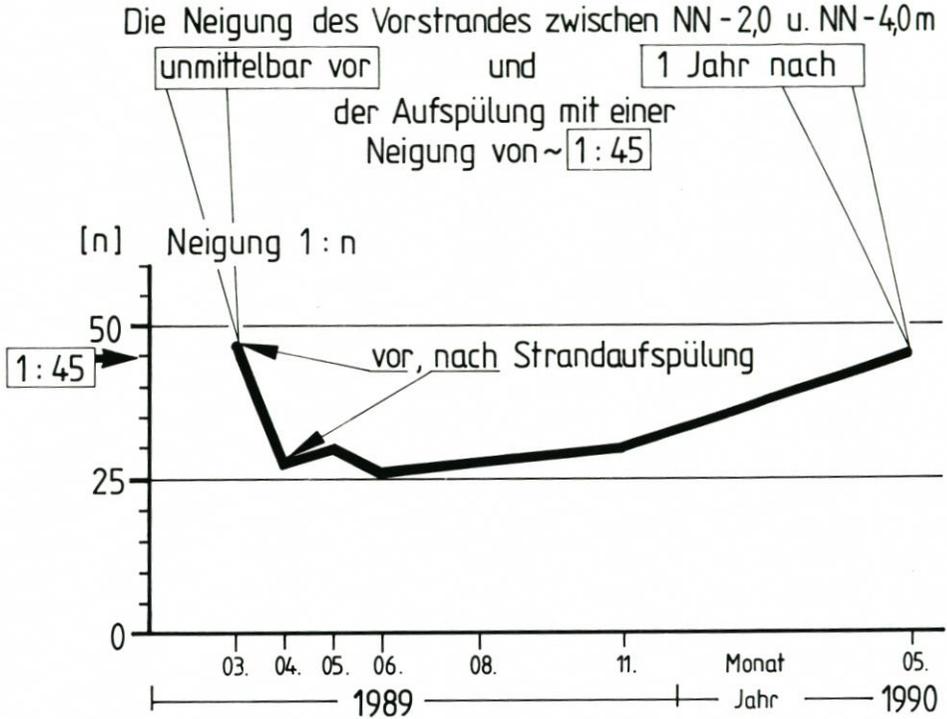


Abb. 14: Entwicklung der Hangneigung im Bereich NN -2 m bis NN -4 m

#### 6. Wiederverfüllung der Sandentnahmestelle auf der Robbenplate

Die Sandentnahme aus der Robbenplate wurde am 3. Mai 1989 beendet. Mitte Mai '89 erfolgte die erste Kontrollpeilung des rd. 350 m langen, 200 m breiten und ca. 10 m tiefen Entnahmeloches. Die geringe Zeitspanne zwischen dem Ende der Baggerungen und der Vermessung genügte bereits, um einen Teil des während der Spülarbeiten noch tiefer reichenden Entnahmetrichters wieder zu verfüllen, so daß kein direkter Zusammenhang zwischen dem entnommenen Sandvolumen und dem Mitte Mai ermittelten Rauminhalt des Baggerloches herstellbar ist. Die tatsächliche Tiefe des Entnahmetrichters kann jedoch nicht mit der maximalen Baggertiefe von rd. 13 m unter Geländeoberkante gleichgesetzt werden, da während des Saugvorganges steilere Hangneigungen vorliegen, auf denen das Sandmaterial zur Spitze des Trichters rutscht und diesen solange wieder zusetzt, bis ein Gleichgewichtszustand mit natürlichen Hangneigungen erreicht ist. Darüber hinaus wurden ständig Sedimente durch Tideströmung und Seegang aus der Oberflächenschicht der Robbenplate in das Loch transportiert, wie die nachfolgenden Abbildungen verdeutlichen.

Die erste Kontrollpeilung gibt somit bereits einen teilgefüllten Zustand der Sandentnahmestelle „Robbenplate“ wieder. Ein Rauminhalt von 250 000 m<sup>3</sup> war noch verblieben, bezogen auf das Höhenniveau der Peilung vom Mai 1990 mit bereits vollständiger Verfüllung. Zwei weitere Peilungen von Anfang August und Mitte November 1989 ergaben rd. 130 000 m<sup>3</sup> bzw. rd. 80 000 m<sup>3</sup> Restvolumen. Die Abb. 15 und 16 geben dieser Entwicklung in den genannten Etappen anhand von Tiefenlinienplänen bzw. Längs- und Querprofil wieder.

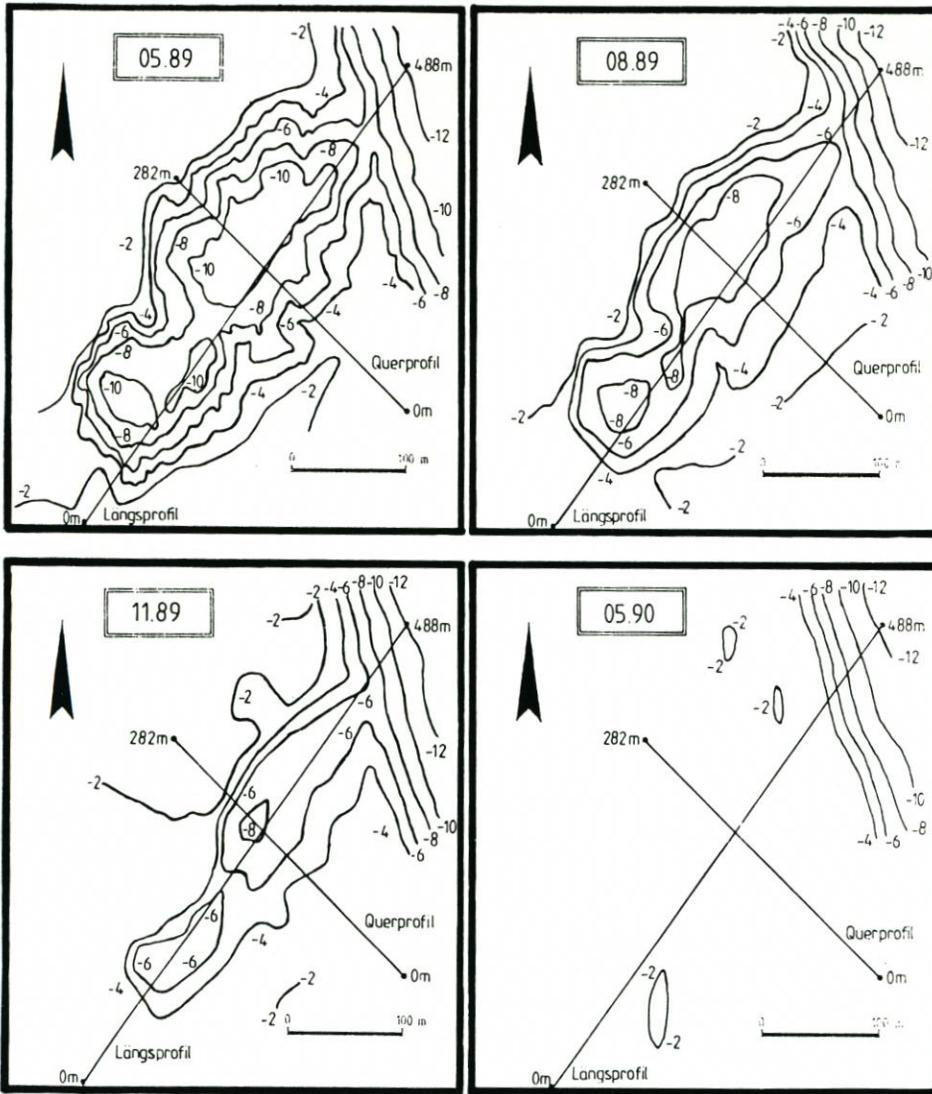


Abb. 15: Tiefenlinienpläne der Sandentnahmestelle Robbenplate zu den 4 Vermessungszeitpunkten mit Profilkennzeichnung

Aus ihnen ist auch zu ersehen, daß der Entnahmetrichter im wesentlichen aus nordwestlicher Richtung verfüllt wurde, also aus der Richtung des überwiegend anlaufenden Seegangs und des einlaufenden Flutstromes.

Der zeitliche Ablauf der Wiederverfüllung in Abb.17 gibt im linken Diagramm das Restvolumen des Baggerloches über die Zeit vom 350 Tagen wieder und zeigt rechts die Abbildung der Schnittfläche im Längsprofil über die Zeit. Diese Diagramme belegen, daß die Wiederverfüllung nach etwa einem Jahr abgeschlossen ist. Mangels einer weiteren Vermessung im Februar/März 1990 kann nicht nachgewiesen werden, daß das Baggerloch bereits nach den schweren Sturmflutenketten im Januar bzw. im Februar 1990 völlig verfüllt war und daß die

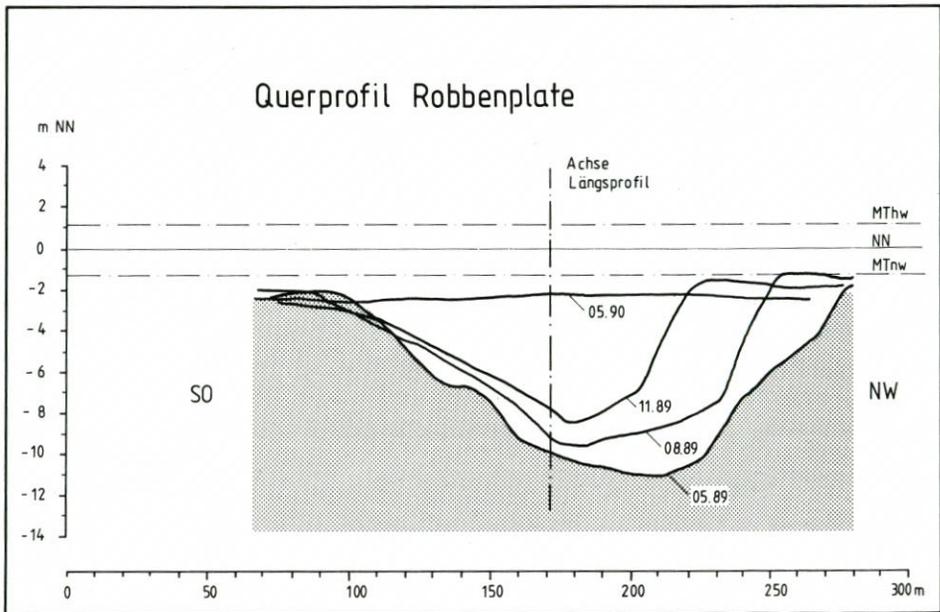
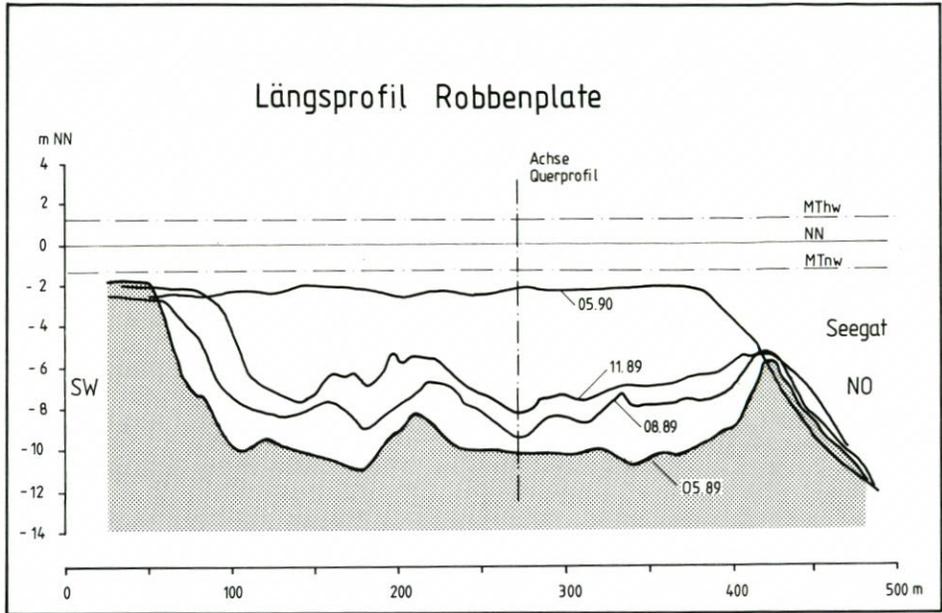


Abb. 16: Zeitliche Entwicklung des Längsprofils (oben) und des Querprofils (unten) der Entnahmestelle Robbenplate

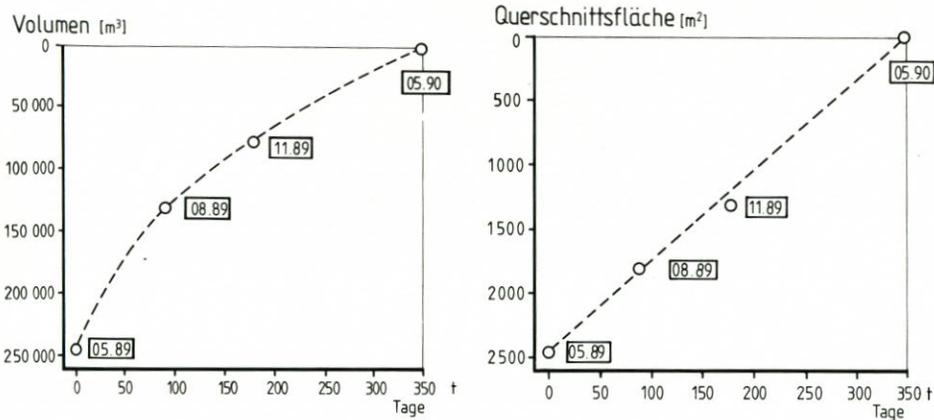


Abb. 17: Entwicklung von Volumen und Querschnitt der Entnahme

Verfüllungsrate in diesen Wintermonaten vermutlich höher war als aus Abb. 17 zu schließen ist. Aber es ist ablesbar, daß nach einem halben Jahr bereits  $\frac{2}{3}$  des Restvolumens von Mitte Mai '89 wieder verfüllt ist. Der beträchtliche Sandeintrieb von 170 000 m<sup>3</sup> in den 350 m langen Entnahmetrichter während des Sommerhalbjahres verdeutlicht die Größenordnung der Sedimentbewegung durch Tideströmung und Brandung auf derartigen Platen.

Aus diesem Vorgang kann auch geschlossen werden, daß der Entnahmetrichter ausschließlich mit feinem Sediment aus der Oberfläche der Platen verfüllt worden ist.

## 7. Häufige Sandzugaben durch eine stationäre Spüleleitung

### 7.1 Die Grundidee und mögliche Sandentnahmegebiete

Es ist bereits mehrfach erörtert worden, ob nicht eine stationäre Spüleleitung den Erfordernissen des Insel-schutzes durch eine ständig mögliche partielle Sandzugabe am ehesten Genüge leisten könnte. Nach Einschätzung der Arbeitsgruppe Norderney des Küstenausschusses Nord- und Ostsee ist ein Jahresbedarf von etwa 90 000 m<sup>3</sup> Sand zu ergänzen. KRAMER (1959) schlägt aufgrund der Erfahrungen nach der ersten Aufspülung vor, jährlich etwa 80 000 m<sup>3</sup> nachzuspülen. Diese Idee bietet eine Vielzahl von Vorteilen. Es wäre möglich,

- die Strandhöhe langfristig auf einem relativ niedrigen Niveau zu belassen, ohne den Bestand der bestehenden Deckwerke zu gefährden,
- nach Sturmfluten den Strand gezielt dort aufzuspülen, wo die größten Verluste registriert werden, und
- durch eine häufigere Einspeisung geringer Sandmengen die Anfangsverluste zu verringern.

Vor Verwirklichung dieser Idee sind die technischen und wirtschaftlichen Aspekte abzuwägen.

Soll eine stationäre Spüleinrichtung geschaffen werden, so muß zunächst die Frage der Sandentnahmestelle geklärt werden. Dafür kommen in Betracht:

- a) die zwischen den Inseln Juist und Norderney gelegene Robbenplate, die bei den Strandaufspülungen seit 1976 zur Sandentnahme diente, und
- b) ein Strandabschnitt östlich des Platananlandungsbereichs, also östlich des Strandbades „Weiße Düne“.

Zu a):

Die Robbenplate ist auch in Zukunft als geeignetes Sandentnahmegebiet einzustufen (s. Abschn. 4.2). Es wäre zu erwägen, das Seegat mit einem Dauerdüker zu durchqueren. Ein Risiko ist allerdings bei der Verankerung und dem Wiederauffinden des freien Endes auf der Plate zu sehen. Die jeweils am Deckwerksfuß verlaufende Spülleitung ist für jede Aufspülung mit Schiebern und Abzweigrohren neu zu verlegen, da sie dort nicht dauerhaft eingebaut werden kann. Auch die Spülleitung auf der Robbenplate vom Cutter zum Düker müßte für jede Aufspülung neu verlegt werden, da die Sturmflutbrandung und die Umlagerungen auf der Plate ein hohes Risiko für den Leitungsbestand bilden. Aufgrund der Verschiebungen des Platenrandes und der in Sturmfluten besonders hohen Strömungen im Seegat ist auch der Bestand des Dauerdükers nicht absolut sicher.

Zu b):

Die 1959 von KRAMER vorgeschlagene Sandentnahme aus dem Strandabschnitt östlich der „Weißen Düne“ wäre aufgrund der dort vorgefundenen Sandkörnungen ebenfalls geeignet. Zu bedenken ist:

- Der Sand muß von einem Cutter aus dem Unterwasserhang nördlich des Strandes aufgenommen und über eine Schwimm- und Dükerleitung zu einer entlang der Randdüne verlaufenden Dauerleitung gepumpt werden. In dieser seegangsexponierten Lage können sich mittlere Cutter nur bei geringem Seegang aufhalten. Bei aufkommendem stärkeren Wind muß der Cutter durch das Fahrwasser mit geringer Tiefe im Norderneyer Riffbogen zum Hafen geschleppt werden – ein weiter und schwieriger Rückzugsweg. Der Einsatz eines großen Cutters kommt wegen der geringen Spülmassen ohnehin nicht in Betracht.
- Die regelmäßig wiederkehrende Sandentnahme in diesem Bereich in einer Größenordnung von 50 000 bis 80 000 m<sup>3</sup> je Jahr ist zunächst auf ihre langfristige Wirkung zu untersuchen. Ein erheblicher Teil des Sandes wird durch den Küstenlängstransport vom Nordweststrand aus wieder in diesen Bereich zurückgeführt. Nach ERCHINGER (1986) muß dabei mit einer Wandergeschwindigkeit von rd. 1 km/Jahr gerechnet werden, so daß er erst nach 6 bis 8 Jahren wieder im Entnahmegebiet eintrifft. Auch die Platananlandung geschieht nicht regelmäßig. Die ständige Sandentnahme kann somit zu Sandmangel im Entnahmegebiet und östlich davon führen sowie Strand- und Dünenabbrüche verursachen.
- Die Spülentfernung zwischen der Entnahme- und der Einbaustelle am Westkopf beträgt bis zu 9 km. Je nach Maschinenausstattung des Cutters sind für das Spülen ein oder zwei Zwischenpumpstationen erforderlich.
- Die Dauerrohrleitung muß entweder an der Binnenseite der Randdünen oder am Strand in der Nähe des Dünenfußes verlegt werden. Die Verlegung in dem kopierten Dünengelände scheidet aus Gründen des Dünen- und Naturschutzes aus. Bei der Verlegung in Dünenfußnähe muß eine große Zahl von Buhnen gekreuzt werden – ein erheblicher baulicher Aufwand. Die zugehörige(n) Zwischenpumpstation(en) müssen sturmflutsicher an der Binnenseite der Randdüne eingerichtet werden. Sie müssen dort mit Kraftstoff versorgt werden können und erfordern somit eine feste Wegeanbindung.
- Der Cutterbagger und die Zwischenpumpstation(en) werden jeweils in der Nähe von belebten Badestränden arbeiten. Die Maschinengeräusche und bei bestimmten Windrichtungen auch die Abgase werden im belebten Staatsbad Norderney als lästige Störung empfunden werden.

Die hier aufgeführten Nachteile und Schwierigkeiten bei einer Sandentnahme östlich der „Weißen Düne“ lassen dieses Entnahmegebiet als ungeeignet erscheinen. Es bleibt folglich bei der seit 1976 üblichen Sandentnahme aus der Robbenplate, nach den Bodenaufschlüssen von 1990 bevorzugt aus dem Westteil der Robbenplate.

7.2 Aufspülkörper und Aufspülintervall

Seit 1976 ist eine Wiederholungsaufspülung jeweils durchgeführt worden, wenn im Nordweststrandbereich der Spülkörper bis auf einen Rest von etwa  $50 \text{ m}^3/\text{m}$  (Mindestprofil) im Strandkeil oberhalb von MTnw abgetragen worden war. Die zuvor übliche weitergehende Strandabnahme hatte in schweren Sturmfluten wie 1962, 1973 und 1976 jeweils zu erheblichen Schäden am Deckwerk und zu Wassereinbruch über das Deckwerk in den Ort geführt. Das Mindestsandvolumen von  $50 \text{ m}^3/\text{m}$  ist für die Fußsicherung der Schutzwerke und die Siche-

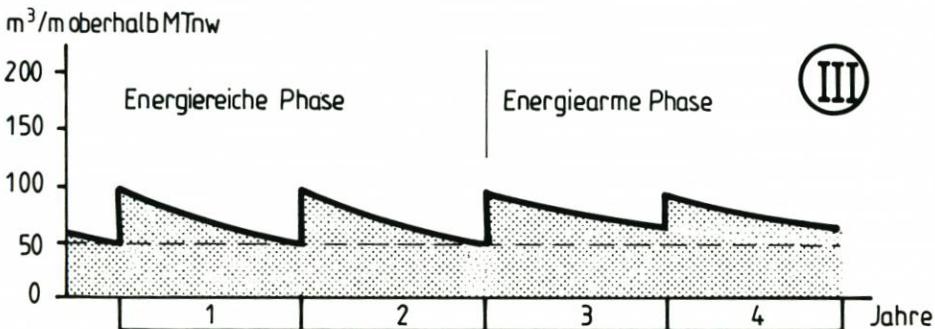
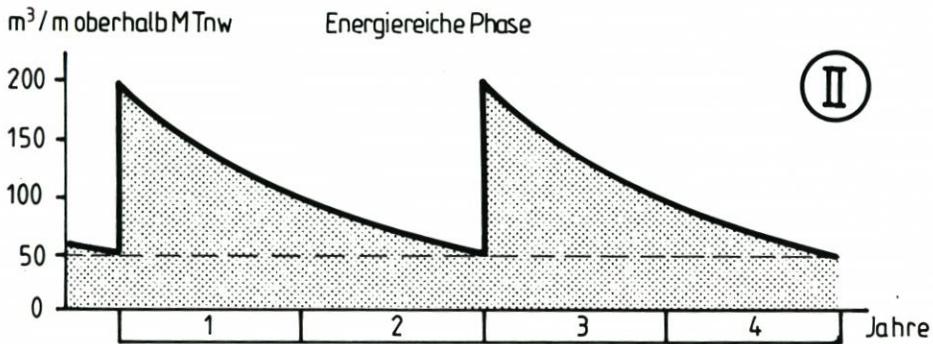
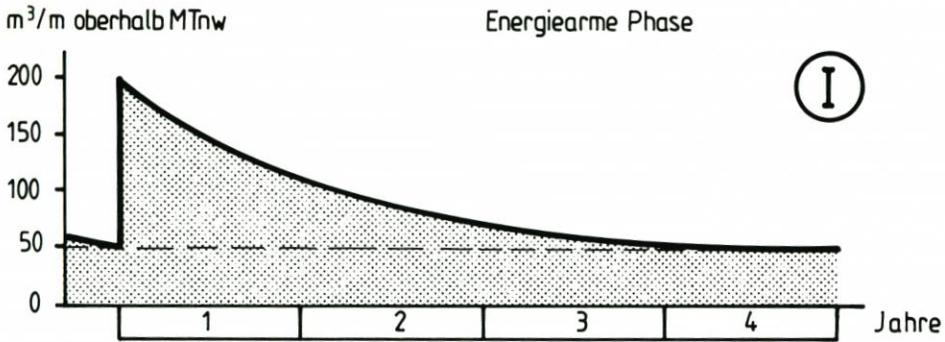


Abb. 18: Sandmassenabtrag am Nordweststrand bei unterschiedlichem Ausgangsvolumen für energiearme und -reiche Zeiträume von 1 bis 4 Jahren – Prinzipskizze –

zung des über 130 Jahre alten Deckwerks durch Begrenzung der Seegangbelastung unbedingt erforderlich.

In den Aufspülungen von 1976 bis 1989 sind jeweils 400 000–500 000 m<sup>3</sup> auf rd. 2 km Strandstrecke eingebaut worden. Das Aufspülintervall bis zur nächsten Maßnahme betrug zwischen 2 und 6 Jahren und war vor allem von der Energiebelastung in Sturmfluten abhängig (s. Abb. 2). Nach der Aufspülung 1982 betrug das Wiederholungsintervall lediglich 2 Jahre, da die Sturmfluthäufung 1983 zu erheblichem Strandabtrag führte. Nach 1984 verstrich ein Intervall von 5 Jahren mit geringer Sturmfluttätigkeit bis zur Aufspülung 1989. Die Volumenabnahme über die Zeit kann für diese beiden Fälle als für eine energiereiche (1982–1984) und eine energiearme Phase (1984–1989) unterschieden werden. Sie liegen den Beispielen der Abb. 18 zugrunde. Die Beispiele umfassen einen Zeitraum von 4 Jahren und beinhalten Wiederholungsintervalle von 4, 2 oder 1 Jahr für energiereiche und -arme Phasen. Da die Sturmflutentwicklung eines Jahres nicht vorhergesehen werden kann, muß das aufzufüllende Sandvolumen für eine energiereiche Phase ausreichen. Abb. 18 läßt erkennen, daß bei 4jährigem Intervall (energiearm) (Beispiel I) und 2jährigem (energiereich) (Beispiel II) ein Spülkörper von 150 m<sup>3</sup>/m und bei einjährigem Intervall (energiereich) (Beispiel III) nur von 50 m<sup>3</sup>/m oberhalb des Mindestprofils als Ausgangsmasse erforderlich sind.

Tabelle 3. Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Einzelaufspülmaßnahmen und Maßnahmen mit jährlicher Auffüllung und stationärer Dükerleitung

Lösung	Aufspülstrecke Km	Aufspülintervall Jahre	Aufspülvolumen			BE + BR		Kosten Spülbetr. DM	Gesamtkosten DM
			über MTnw m <sup>3</sup> /m	unter m <sup>3</sup> /m	gesamt m <sup>3</sup>	mit Düker DM	ohne Düker DM		
A	2	2	150	50	400 000	480 000		960 000	1 440 000
B	2	1	50	15	130 000	560 000		455 000	1 015 000
	2	1	50	15	130 000		330 000	455 000	785 000

### 7.3 Kostenvergleich

Der Kostenvergleich zwischen dem bisherigen Verfahren (Lösung A) und der alljährlichen Sandergänzung durch eine geringe Sandmenge mit Verbleiben des Dükers im Seegat (Lösung B) ergibt sich aus Tab. 3. Verglichen werden die Jahre 1 und 2 der Beispiele II und III in Abb. 18. Das Ergebnis mit Kosten von 1,44 Mio. DM für Lösung A und 1,8 Mio. DM für Lösung B macht die wirtschaftliche Überlegenheit des bisherigen Verfahrens deutlich. In Anbetracht der geringen Sandmengen, des verbleibenden umfangreichen Spülleitungsbaus sowie des jeweiligen Antransportes und der Vorarbeiten des Cutters sind die Festkosten je Maßnahme relativ hoch.

Die Lebensdauer des Dükers ist für eine längerfristige Betrachtung noch bedeutsam. Nach hiesigen Erfahrungen mit einem normalen St-37-Rohrdüker dürfte der Düker nach 500 bis 800 000 m<sup>3</sup> Materialdurchgang nicht mehr ausreichend sicher sein. Der im Vergleich der Tab. 3 unter B aufgeführte Düker wird voraussichtlich noch für ein paar weitere Jahresspülmengen halten, so daß sich der Kostenvergleich noch etwas zugunsten der Lösung B verändert. Aber selbst bei sich einstellender Kostengleichheit ist noch zu werten,

– daß ein erhebliches Risiko für den Bestand des das tiefe Seegat kreuzenden Dükers besteht,

weil dieser 600 m lange Düker teilweise freispülen und abknicken könnte, wenn sich die Plate verlagert; das freispülte Dükerende könnte sogar als Unterwasserhindernis zu einer Gefährdung der Schifffahrt führen;

- daß die in jedem Frühjahr durchzuführende Aufspülung eine erhebliche Störung mit sich bringt, und
- daß die relativ geringen Aufspülmengen auch nur eine geringere Sandversorgung für die unterstrom folgenden Strände mit sich bringen würde.

Das Kostenverhältnis und die Wertung des Vergleichs sprechen daher eindeutig für die Beibehaltung der bisherigen Aufspülmethode durch Einzelmaßnahmen in dem bisherigen Umfang (s. Tab. 1).

## 8. Der äolische Sandtransport

Dem äolischen Sandtransport kommt vor allem für die Sandbewegungen auf dem trockenen Strand, u. a. im Zusammenhang mit der Dünenbildung, eine erhebliche Bedeutung zu. Über die dabei in Abhängigkeit von Windrichtung und -stärke transportierten Mengen liegen bisher nur wenige Messungen vor, u. a. von GISZAS (1970) und ZANKE (1982). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde auch dieser Frage nachgegangen, erste Ergebnisse dazu liegen vor. Die Untersuchungen werden allerdings in dem nachfolgenden Projekt ab Januar 1992 fortgesetzt. Die Ergebnisse sollen nach Abschluß des neuen Projektes veröffentlicht werden.

## 9. Ein Ergebnis der Untersuchungen: Strandaufspülung 1992 einschl. Vorstrandaufhöhung durch Sandhöfte

Die Erörterungen in der Projektgruppe haben ergeben, daß die nächste Strandaufspülung auch die Aufhöhung des Vorstrandes mit einbeziehen sollte. Das anzustrebende Strandprofil wurde aufgrund der beschriebenen Untersuchungsergebnisse nach Abb. 19 entwickelt. Da eine flächenhafte Aufspülung im ständigen Unterwasserbereich nicht ohne besonderen Aufwand möglich ist, kann der für die Vorstrandaufhöhung notwendige Sand in Form von Sandhöften eingebracht werden. Strömung und Brandung werden diese Sandkörper seitlich verteilen und über eine zu erforschende Zeit ein flächenhaftes Unterwasserprofil herstellen.

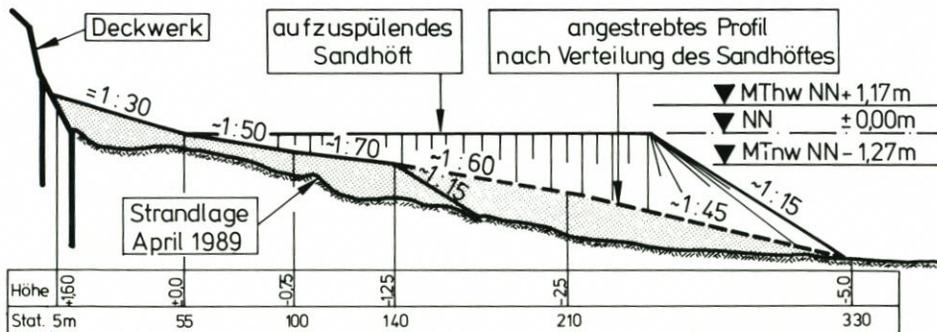


Abb. 19: Regelprofil für die Strandaufspülung 1992 Norderney mit flach geneigtem Vorstrand nach natürlicher Umlagerung von auf den Vorstrand aufgespülten Sandhöften

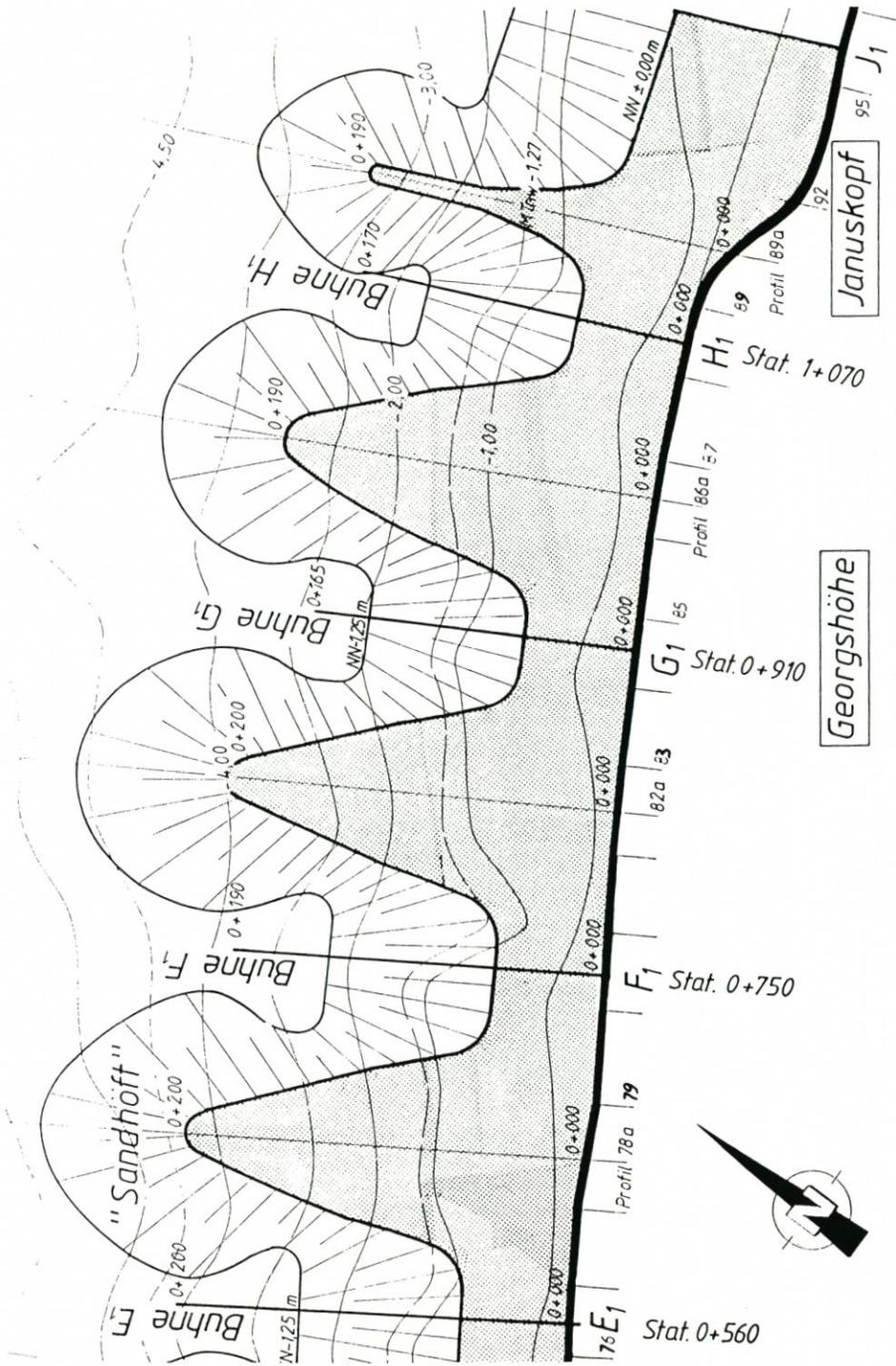


Abb. 20: Geplante Sandhütte Nordernei 1992 in der Draufsicht

Bei der Bilanzierung der Sandmassen des Strandes wird die bisherige Betrachtung bis zur MTnw-Linie aufgegeben werden müssen, da ja bewußt der Vorstrand bis NN -5 m mit aufgefüllt werden soll und der bis dort sich ablagernde bzw. eingebrachte Sand nicht als „Verlust“ bezeichnet werden kann.

Als im Frühjahr 1992 das Strandniveau so niedrig lag, daß eine erneute Sicherungsmaßnahme erforderlich wurde, reifte der Entschluß, Strand und Vorstrand aufzuspülen. Zur Aufhöhung des Vorstrandes sollten Sandhöfte bis auf den Vorstrand vorgespült werden (Abb. 20). Die Herstellung und Entwicklung des neuartigen Aufspülkörpers können in dem vom BMFT bewilligten neuen KFKI-Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerkssystemen“ untersucht werden. Darüber wird zu gegebener Zeit zu berichten sein.

## 10. Schriftenverzeichnis

- AUSSCHUSS „KÜSTENSCHUTZWERKE“ der Dt. Ges. für Erd- und Grundbau (DGEG) und der Hafentechn. Ges. (HTG): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK '81). Die Küste, H. 36, 1981.
- BRUUN, P.: Beach nourishment – improved economy through better profiling. The Dock & Harbour Authority, Vol. 69, Nr. 805, 1988.
- CENTRE OF CIVIL ENGINEERING RESEARCH CODES AND SPECIFICATIONS (CUR): Manual on artificial beach nourishment. report 130, Delft Hydraulics 1987.
- CHRISTIANSEN, H.: Umformung von Sandstränden durch Sturmfluten. Hamburger Küstenforschung, H. 35, 1976.
- DETTE, H. H. u. GÄRTNER, J.: Erfahrungen mit der Versuchssandvorspülung vor Hörnum im Jahre 1983. Die Küste, H. 45, 1987.
- ERCHINGER, H. F.: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste, H. 43, 1986.
- ERCHINGER, H. F.: Prevention of Seawall Damage and Erosion of German Barrier Islands by Means of Beach Nourishment. Proc. of Beach Prevention Technology, Gainsville, Florida, 1988.
- ERCHINGER, H. F.: Beach Replenishment, Consideration of Natural Processes and Profiles. MAFF-Conference of River and Coastal Engineers, Ss. 2.5, Loughborough, 1991.
- FÜHRBÖTER, A.: Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen. Die Küste, H. 52, 1991.
- GISZAS, H.: Beitrag zur Frage des Sandtransportes durch Wind – Messungen im Gebiet um Scharhörn (Elbe) –. Hamburger Küstenforschung, H. 16, 1970.
- HOMEIER, H.: Die Auswirkungen schwerer Sturmzeiten auf die Ostfriesischen Inselstrände und Randedünen. Jb. der Forschungsstelle Küste, Bd. 27, Norderney, 1975.
- KOTZBAUER, U.: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 105/89, 1990.
- KRAMER, J.: Die Strandaufspülung Norderney 1951–192 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7, 1958/59.
- KUNZ, H. u. NIEMEYER, H. D.: Untersuchungen zum Seegangsklima im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste. Die Küste, H. 34, 1979.
- KUNZ, H.: History of Seawalls and Revetments on the Island of Norderney. Coastal Sediments '87, Proc. Bd. 1, S. 974–989, 1987.
- KUNZ, H.: Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd ICCE, ASCE, Bd. 3, S. 3254–3267, 1991.
- KUNZ, H.: Protection of the Island of Norderney by Beach Nourishment, Alongshore Structures and Groynes. Proc. COPEDEC, Bd. 1, S. 29–42, 1991.
- KUNZ, H.: Das interdisziplinäre KFKI Verbund-Forschungsvorhaben „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.

- KÜSTENAUSSCHUSS NORD- UND OSTSEE, ARBEITSGRUPPE NORDERNEY: Gutachtliche Stellungnahme zu den Untersuchungen über die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordstrand der Insel Norderney sowie den zum Schutz der Insel vorgeschlagenen seebautechnischen Maßnahmen. Die Küste, Jg. 1, H. 1, 1952.
- RAUDKIVI, A. J.: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt im Rück- und Ausblick. In: Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt. Herausg.: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Statusseminar, Kiel 1991.
- STAATL. AMT FÜR INSEL- UND KÜSTENSCHUTZ: Teilberichte 1 bis 6 und Schlußbericht zum Forschungsteilprojekt „Versuchsorientierte Strandaufspülung“, bearbeitet von: Erchinger, H. F., Kotzbauer, U., Laue, M. und Tillmann, B., Norden, 1989/92 (unveröffentlicht).
- ZANKE, U.: Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1982.

# Deichvorland: Seine Entwicklung zwischen Ems und Jade und die Untersuchungen im Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“

VON HANS-GERD COLDEWEY UND HEIE F. ERCHINGER

## Zusammenfassung

Als Heller werden in Ostfriesland die zwischen MThw und dem Deich- bzw. Dünenfuß gelegenen Salzwiesen bezeichnet. Sie sind durch Ablagerung von schllickig-schluffigen Sedimenten in beruhigten Randzonen des Watts, vielfach in Lahnungsfeldern, entstanden. Ihre Flächengröße hat sich seit 1950 um etwa 30 % vermehrt. Nicht künstlich gesicherte Heller liegen heute infolge größer werdender hydrodynamischer Belastung fast ausschließlich im Abbruch.

Höhenvermessungen der ostfriesischen Hellerflächen in den 60er Jahren und regelmäßige Profilaufnahmen seit Anfang der 80er Jahre haben die Ermittlung der jährlichen Sedimentationsraten für unterschiedliche Hellerbereiche ermöglicht. Sie betragen unter günstigen Bedingungen 2 bis 4 cm/a.

Die große Bedeutung der Heller für den Küstenschutz und die vom Naturschutz angestrebte Wende der Bewirtschaftung im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer waren die Auslöser für ein interdisziplinäres KFKI-Forschungsvorhaben mit 5 Teilprojekten. Umfangreiche Untersuchungen werden von Küsteningenieuren, Botanikern, Bodenkundlern und Geologen durchgeführt. Erste Ergebnisse dieses bis 1994 laufenden Projektes über vergleichende Überflutungsdauer auf begrüpten und unbegrüpten Hellern, Hellerkantenabbruch in Abhängigkeit von der Seegangenergie und der Sedimentation auf Hellerflächen werden vorgestellt.

## Summary

*In East Friesland, the salt marshes between MHT and the dikes or dunes are termed Hellers. They are formed through the deposition of mud and clays in stagnant inter-stitial zones of the tidal flats often located in land reclamation areas. Their surface area has increased approximately 30 % since 1950. Not artificially protected Hellers are generally eroding due to increasing hydrodynamical forces.*

*The yearly deposition rates for different Heller reaches could be determined based on piling data from 1960 and repetitive piling since the beginning of the 1980's. It was found to be between 2 to 4 cm/year under good conditions.*

*An interdisciplinary KfKI program involving 5 research projects is being conducted until 1994 due to the importance of the Hellers for coastal protection and desired changes in the context of environmental protection of the Lower Saxony Tidal Flats National Park. Extensive investigations were conducted by coastal engineers, botanists, soil experts and geologists.*

*In this paper, first results are presented for the relative times of submergence of drained and undrained Hellers, for the relationship of Heller recession to wave energy and the sedimentation of Heller areas.*

## Inhalt

1. Einführung und Begriffsbestimmung . . . . .	170
2. Die Entstehung und weitere Entwicklung von Hellerflächen . . . . .	171
3. Die Heller am Festland und auf den Inseln . . . . .	172

3.1	Der Flächenbestand und seine Entwicklung . . . . .	172
3.2	Höhenwachstum der Heller . . . . .	174
3.3	Jährliche Sedimentationsraten in Abhängigkeit von der Geländehöhe . . . . .	175
3.4	Die künftige Entwicklung des Deichvorlandes . . . . .	177
4.	Die Bedeutung des Deichvorlandes für den Küstenschutz . . . . .	177
5.	Das Forschungsvorhaben mit 5 Teilprojekten . . . . .	177
5.1	Die Projektgruppe und die Teilprojektgruppen . . . . .	177
5.2	Forschungsinhalt der Teilprojekte . . . . .	178
5.2.1	Koordination und Logistik, Naturmessungen, hydrologische und morphologische Untersuchungen . . . . .	178
5.2.2	Botanische Untersuchungen . . . . .	178
5.2.3	Bodenkundliche Untersuchungen . . . . .	179
5.2.4	Modellversuche im Seewasserversuchskanal . . . . .	179
6.	Untersuchungsgebiete . . . . .	179
6.1	Lage der Untersuchungsgebiete . . . . .	179
6.2	Versuchsflächen Leybucht . . . . .	181
6.3	Buscherheller . . . . .	181
6.4	Neßmerheller . . . . .	181
7.	Erste Ergebnisse zum Teilprojekt „Logistik, hydrologische und morphologische Untersuchungen“ . . . . .	183
7.1	Ziel der Untersuchungen . . . . .	183
7.2	Wasserstände auf begrüpten und unbegrüpten Hellern . . . . .	184
7.3	Hellerkantenabbruch in Abhängigkeit von der Seegangsenergie . . . . .	184
7.4	Sedimentation auf Hellerflächen . . . . .	185
8.	Schriftenverzeichnis . . . . .	186

## 1. Einführung und Begriffsbestimmung

Die zwischen der MThw-Linie und dem Deichfuß bzw. dem Dünenfuß auf Teilen der Inselrückseiten gelegenen Salzwiesen werden in Ostfriesland als „Heller“ bezeichnet. Als Deichvorland sind die Heller wichtiger Bestandteil des aktiven Küstenschutzes. Gleichzeitig sind sie als Salzwiesen ein einzigartiger und besonders schützenswerter Biotop. Obwohl die erhebliche Bedeutung der Heller für den Küstenschutz seit langem geschätzt wird, fehlen bisher detaillierte Untersuchungen über Wechselwirkungen zwischen den hydrodynamischen Beanspruchungen und den widerstehenden Kräften, die von Lage, Höhe, Bodenaufbau, Bodeneigenschaften, Bewuchs und Nutzung abhängig sind.

Seit Menschengedenken sind die fruchtbaren Marschflächen von den Küstenbewohnern gern genutzt worden, zwischen Ems und Jade fast ausschließlich als Weideland. Die Nutzung ist im letzten Jahrzehnt im Interesse des Naturschutzes sowohl hinsichtlich des Flächenanspruchs als auch der Intensität beträchtlich reduziert worden. Aber im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer wird vom Naturschutz die völlig natürliche Entwicklung dieser Flächen mit Aufgabe jeglicher Beweidung und Begrüpfung angestrebt. Die über ein Jahrhundert alten Erfahrungen mit Hellerbewirtschaftung und -sicherung sind plötzlich in Frage gestellt. Einseitige, z. T. als übertrieben bezeichnete Forderungen haben die Sorge aufkommen lassen, ob diese Wendung in der Bewirtschaftung für den Bestand und die Weiterentwicklung der Heller vertretbar ist. Das vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) finanzierte KFKI-Forschungsvorhaben soll dazu beitragen, die bestehenden Kenntnisse zu erweitern, die natürlichen Vorgänge zu analysieren und zu registrieren und die Einflüsse verschiedener natürlicher und anthropogener Faktoren auf die Erosionsfestigkeit der Heller zu ergünden. Ziel ist es, eine möglichst weitgehende Entwicklung im Sinne des Naturschutzes zu ermöglichen, aber den Bestand und die Funktion für den Küstenschutz zu

erhalten. Daher sollen Grundlagen für einen Ausgleich divergierender Interessen zwischen Natur- und Küstenschutz geschaffen und als Ergebnis des Forschungsvorhabens „Empfehlungen für das Management des Hellers“ erarbeitet werden.

## 2. Die Entstehung und weitere Entwicklung von Hellerflächen

In beruhigten Randzonen und Buchten des Watts können die feinen Schwebstoffe im Wasser bei geringer Wasserbewegung während der Hochwasserzeit zu Boden sinken und sich ablagern. Wenn die frischen Sedimentschichten beim Trockenfallen von Kieselalgen besiedelt werden, bewirken diese Diatomäen-Häute gleichzeitig eine gewisse Sicherung gegen erneute Aufwirbelung. Allmählich erhöhen sich die Wattflächen im Verlandungsgebiet auf diese Weise. Das vegetationsarme Watt geht dabei mit der Zeit in eine von salzverträglichen Pflanzen wie Queller (*Salicornia europaea*) und Schlickgras (*Spartina anglica*) zunächst in schütterem, später in geschlossenem Bestand bedeckte Fläche über (Abb. 1). Durch weitere Sedimentation entwickeln sich diese Anwachsflächen zu Salzwiesen mit vielfältigem Bewuchs salzverträglicher Pflanzen. Die Pflanzengesellschaften der Salzwiese ordnen sich nach ihrer unterschiedlichen Salztoleranz und somit nach Überflutungshäufigkeit und -dauer in die untere Andelzone und die obere Schwingelzone (Abb. 1, ERCHINGER 1985, 1993).

Bei den derzeitigen hydrologischen und meteorologischen Verhältnissen herrscht an der ostfriesischen Küste mit Ausnahme je einer kurzen Küstenstrecke in der südlichen Leybucht und westlich der Jade im Wellenschatten von Minsener Oog ausschließlich Abbruchtendenz und keine natürliche Auflandung. Mit dem Bau von Lahnungsfeldern wird versucht, die

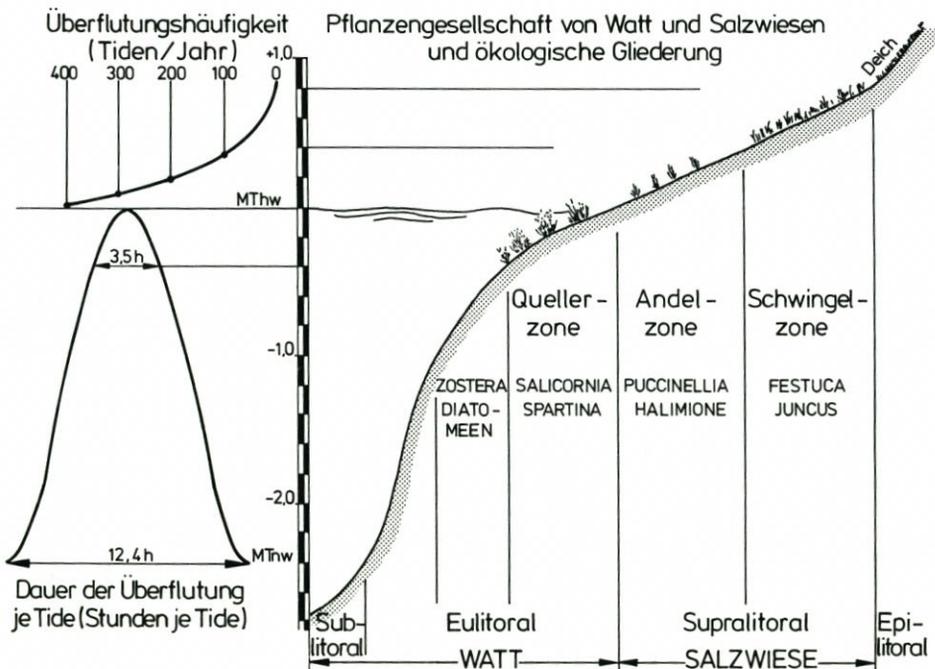


Abb. 1: Watt und Salzwiesen mit ihren Pflanzengesellschaften in Abhängigkeit von Überflutungsdauer und Überflutungshäufigkeit sowie ihrer ökologischen Gliederung (ERCHINGER, 1985, 1993)

Sedimentation in diesen zu fördern und dem Abbruch der Heller entgegenzuwirken. Auf hochliegendem Watt werden seit Jahrhunderten Buschlahnungen für die Schaffung der Sedimentationsfelder gebaut. Auf niedrig gelegenen Wattflächen sind häufig schwerere Bauweisen erforderlich, damit die Lahnungen den Wasserkräften standhalten können. Lahnungen aus Natursteinen oder Betonformteilen werden hierfür eingesetzt.

Die Inselheller unterscheiden sich deutlich von den Hellern an der Festlandsküste:

- Sie haben sich im allgemeinen im Wind- und Wellenschatten der Dünen gebildet und werden daher auch weniger von Wellen beansprucht,
- sie weisen aufgrund des geringen Schlickfalls nur eine dünne Kleiauflage auf,
- aufgrund teilweiser Sandaufwehungen variieren Höhenlage und Bodenzusammensetzung,
- in den an die Dünen angrenzenden Hellerbereichen führt der Austritt des Grundwassers der Süßwasserlinse zu einer unterschiedlich starken Verbrackung des Wassers und entsprechend zu einem breiten Artenspektrum von Pflanzen- und Tierwelt,
- ihr Bewuchs ist aufgrund der wechselhaften Höhen- und Wasserverhältnisse und des insgesamt nährstoffärmeren sandigen Bodens im allgemeinen artenreicher, aber in seinen Ausprägungen vielfach schwächer und weniger dicht,
- der sandige Untergrund weist eine größere Wasserdurchlässigkeit auf und verhindert in abflußlosen, flachen Geländemulden langfristige Wasserbedeckungen und ein völliges Absterben der Vegetation.

### 3. Die Heller am Festland und auf den Inseln

#### 3.1 Der Flächenbestand und seine Entwicklung

An der Küste Ostfrieslands und des nördlichen Jeverlandes finden sich insgesamt rd. 4400 ha Hellerflächen, davon 1960 ha auf den Inseln und 2440 ha an der Festlandsküste.

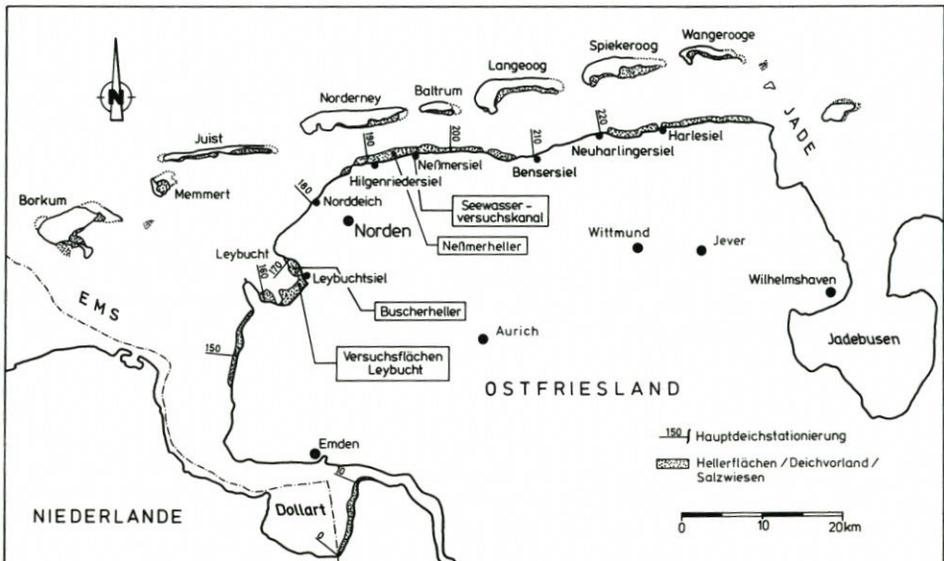


Abb. 2: Insel- und Festlandsheller zwischen Ems und Jade sowie Untersuchungsgebiete des Forschungsvorhabens (Übersichtskarte)

Darüber hinaus gibt es 860 ha Sommerpolderflächen, die dem täglichen Tideeinfluß zwar entzogen sind, die aber im Winterhalbjahr von Zeit zu Zeit auch von Salzwasser überflutet werden. Diese Heller- und Sommerpolderflächen machen rd. 11 % der Wattfläche zwischen Inseln und Festland aus (Abb. 2).

Seit 1950 ist die Salzwiesenfläche an der Festlandsküste Ostfrieslands um etwa 30 % gestiegen. Der Zuwachs konnte durch Maßnahmen des aktiven Küstenschutzes gefördert und durch Sedimentation in Lahnungsfeldern erzielt werden. Ein weiterer Zuwachs ist kaum zu erwarten, da der aktive Küstenschutz auf eine Bestandserhaltung zurückgeführt wurde und eine natürliche Verlandung auf zwei Küstenstrecken von geringer Ausdehnung beschränkt ist.

Statt dessen herrscht auf nahezu der gesamten Küstenstrecke Vorlandabbruch. Dort hat sich ein mehrere Dezimeter bis über ein Meter hohes Kliff gebildet. Der stärkste Abbruch wird seit 1985 auf ungeschützten Strecken des Neßmerhellers mit 3 m/a registriert (s. Abschn. 7.3). An seinem Westende sind von 1960 bis 1985 150 m abgebrochen (ERCHINGER, 1987).

Auf mehr als 20 km ostfriesischer Küste liegt der Deich völlig schar und weist kein Deichvorland auf. Die exponierte Lage und das niedrige vorgelagerte Watt haben ständig eine starke Seegangsbelastung des Vorlandes ermöglicht, so daß dieses immer weiter abbrach. Bei Norddeich ist das noch 1650 vorhandene Vorland in der Folgezeit auf gesamter Länge verloren gegangen. Nach der Orkanflut 1717 konnte die 7 km lange Deichlinie westlich von Norddeich nicht mehr gehalten werden und mußte nach sechs schweren Deichbrüchen zurückverlegt werden. Der ausgedeichte, bis zu 450 m breite Streifen aber wurde in wenigen Jahrzehnten wieder völlig abgebrochen.

Die Salzwiesenflächen auf den ostfriesischen Inseln sind das Ergebnis ehemals umfangreicher Auflandung (EHLERS, 1988). In den letzten Jahrzehnten hat sie sich vor allem auf den Ostplatten von Spiekeroog und Norderney ausgedehnt. Im übrigen überwiegt heute an den südlichen Vorlandkanten der Inseln der Abbruch. Seit 20 Jahren ist dieser besonders stark auf den Inseln Juist, Langeoog und Wangerooge. Auf Langeoog ist der Heller am Ostende z. B. seit 1969 um insgesamt 50 m abgebrochen. Die Abbruchrate hat von 2 m/a um 1970 auf 4,3 m/a um 1990 zugenommen.

Verursacht werden die Hellerabbrüche durch größere hydrodynamische Belastungen. Häufigere Starkwind- und Sturmweatherlagen aus Südwest führen im ostfriesischen Wattenmeer vielfach zu Kantenfluten mit nur wenige dm höheren Wasserständen, aber zu stärkerer Seegangsbelastung auf dem Watt und an den Hellerkanten. Der Anstieg des Tidehochwassers bei gleichbleibender Watthöhe ermöglicht eine stärkere Seegangsentwicklung. Von 1960 bis 1990 ist beispielsweise das MThw für Norderney um 6 cm von NN+1,12 auf 1,18 m gestiegen. Bei hohen Wattlagen von etwa NN+0,9 m vor der Hellerkante ist dadurch die Wassertiefe bei MThw um 6 cm bzw. 27 % gestiegen. Wenn die durch diese beiden Faktoren bedingte höhere hydrodynamische Belastung ferner zu einer Erosion des Wattbodens geführt hat, so bewirkt diese morphologische Veränderung eine weitere Verstärkung des Seegangs und eine stärkere Belastung der Hellerkante. Ein Watthöhenabtrag ist zwar nicht durchgängig festzustellen, aber vor dem Heller in Hilgenriedersiel betrug der Abtrag seit 1930 rd. 50 cm und seit 1960 30 cm (ERCHINGER, 1992). Am Ostende Langeoogs hingegen hat sich die Watthöhe von 1960 bis 1990 nicht verändert.

## 3.2 Höhenwachstum der Heller

Starkwind- und Sturmweatherlagen mit erhöhten Tidewasserständen wirken jedoch nicht nur zerstörend auf die Hellerkante, sondern sie tragen bei Hellerüberflutung auch zur Erhöhung der Hellerflächen bei. Durch den stärkeren Seegang und die Tideströmung werden die schlickig-schluffigen Sedimente des Wattbodens in stärkerem Maße aufgewirbelt und weitertransportiert. Mit der Windgeschwindigkeit nehmen auch die Seegangsenergie und damit die Turbulenzintensität zu, die zu einem erhöhten Schwebstoffgehalt führen. Bei Windstärke 6 bis 7 wurde am Neßmersieler Außentief ein Schwebstoffgehalt von 640 mg/l gemessen (ERCHINGER, COLDEWEY, PROBST, 1986).

Über dem Deichvorland gibt der Seegang bei geringerer Wassertiefe einen Großteil seiner Energie ab und läßt auch einen Teil der mitgeführten Schwebstoffe zur Absetzung kommen. Dabei kommt hinter der Hellerkante zunächst das gröbere Material aus Feinsand, Grobschluff und Muschelschalen zur Ablagerung, während das feinschluffige, tonige Material im deichnahen Bereich sedimentiert.

## Sedimentation [ cm/Jahr ]

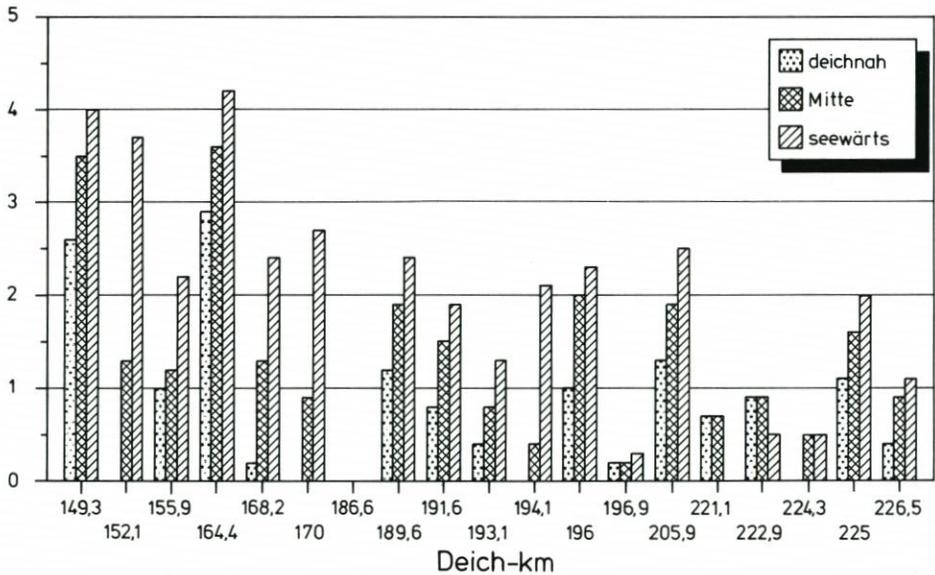


Abb. 3: Mittlere jährliche Sedimentation zwischen 1960 und 1985 auf den Hellern an der Festlandsküste zwischen Deich-km 149,3 in Krummhörn-Upleward und 226,5 in Wittmund-Harlesiel

Das Höhenwachstum der Deichvorländer an der ostfriesischen Küste wurde durch einen Vergleich von 20 regelmäßig vermessenen Vorlandprofilen mit den 1:5000er Wattkarten der Forschungsstelle Küste, Norderney, aus den 60er Jahren ermittelt. Für den Raum Hilgenriedersiel konnten sogar Vermessungen von 1930 verwertet werden. Die untersuchten Hellerflächen sind vornehmlich in schützenden Lahnungsfeldern aufgewachsen. Die Sedimentation auf den Hellern zwischen Deich-Km 149,3 (Krummhörn-Upleward) und 226,5 (Wittmund-Harlesiel) wird getrennt nach Werten für den deichnahen, den mittleren und den deichfernen oder seewärtigen Hellerbereich wiedergegeben (Abb. 3).

Der Heller in der Leybucht vor dem Störtebekerdeich ist von 1960 bis 1984 relativ gleichmäßig von i. M. NN +0,9 um etwa 90 cm aufgewachsen (Abb. 4a). Für den Heller bei

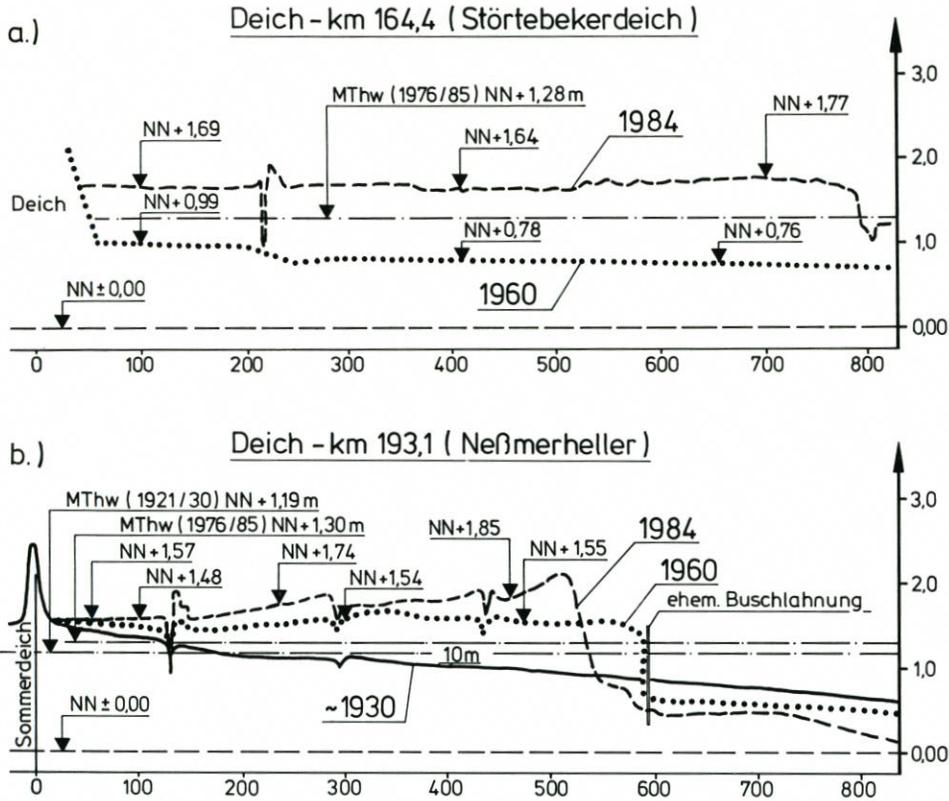


Abb. 4: Deichvorlandprofile: a) von 1960 und 1984 vor dem Störtebekerdeich im Bereich der Versuchsflächen Leybucht, b) von 1930, 1960 und 1984 auf dem Neßmerheller (ERCHINGER, 1987)

Hilgenriedersiel kann die Entwicklung anhand der Zustände von 1930, 1960 und 1984 nachgezeichnet werden. 1930 war der Heller noch relativ schmal, danach konnte das Vorland auf etwa 600 m Breite in Lahnungsfeldern aufwachsen. 1960 hatte das etwa 600 m breite Vorland eine mittlere Höhe von NN+1,5 m und war in gesamter Breite der Andelzone zuzuordnen. Bis 1984 wurde der Heller im äußeren Bereich bis über NN+2 m erhöht, während er im deichnahen Bereich noch auf NN+1,57 m liegt und somit ein mittleres Gegengefälle zum Deich von etwa 1:1000 aufweist (Abb. 4b). Während der deichnahe Bereich noch zur Andelzone zu rechnen ist, ist der Heller im mittleren und seewärtigen Bereich der Schwingelzone zuzuordnen.

### 3.3 Jährliche Sedimentationsraten in Abhängigkeit von der Geländehöhe

Unter äußerst günstigen Bedingungen mit hohem Sedimentangebot beträgt die maximale Sedimentationsrate auf niedrigen Flächen nach Abb. 3 etwa 4 cm/a. An der Nordküste erreicht die Sedimentation unter günstigen Bedingungen auf dem äußeren Hellerstreifen etwa 2 cm/a, im deichnahen Bereich jeweils um 1 cm/a. Bei ungünstigen Sedimentationsbedingungen fallen die Werte auch auf den äußeren Hellern z.T. erheblich unter 1 cm/a. Auch mit

zunehmender Hellerhöhe gehen die Sedimentationsraten deutlich zurück, und zwar auf älteren Hellern, die mehr als 90 cm über MThw liegen, gegen Null. Flächen dieser Höhenlage werden jährlich i. M. 10mal überflutet, während die Höhenlage MThw + 60 cm i. M. etwa 30mal und die Höhenlage MThw + 35 cm mehr als 100mal mit Wasser bedeckt wird.

Auf den Hellern der ostfriesischen Inseln liegt die Sedimentationsrate infolge des geringen Schwebstoffgehalts im Überflutungswasser wesentlich niedriger.

Das Höhenwachstum eines Hellers entwickelt sich nach einem negativen Regelkreislauf (PETHICK, 1981, in DIECKMANN, 1988). Durch die Ablagerung von Sediment und in geringem Umfange auch durch Humusbildung nimmt die Geländehöhe auf dem Heller im Laufe der Zeit zu, während die Höhe und Verweildauer der Überflutungen immer mehr abnehmen. Als oberer theoretischer Grenzwert für das Höhenwachstum von Hellern kann nach DIECKMANN (1988) das MThw als Mittelwert der jährlich höchsten Sturmflutwasserstände angesehen werden. Die Profilauswertungen zeigen jedoch, daß in den vorliegenden Fällen ein derartig hohes Niveau von etwa 1,8 m über MThw für den Untersuchungsbereich bei weitem nicht erreicht wird. Bereits bei Höhen von 1 m über MThw ist die weitere Auflandung verschwindend gering (Abb. 5).

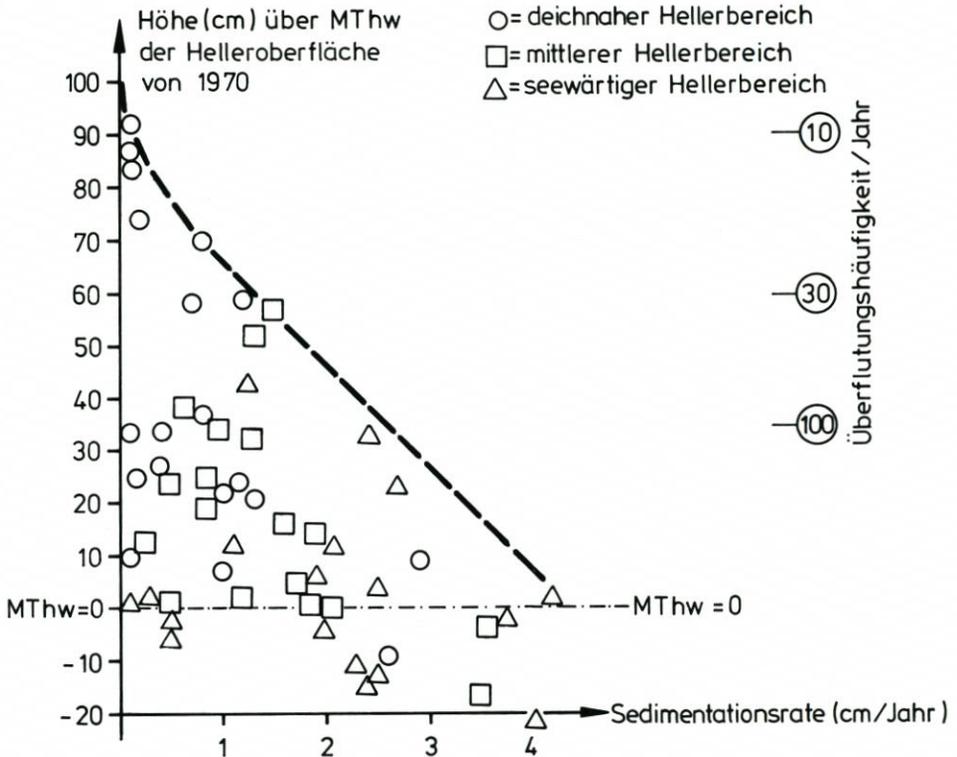


Abb. 5: Mittlere jährliche Sedimentationsraten in Abhängigkeit von Geländehöhe und Überflutungshäufigkeit zwischen 1960 und 1985 (COLDEWEY, 1989)

### 3.4 Die künftige Entwicklung des Deichvorlandes

Wegen der großen Bedeutung des Deichvorlandes für den Küstenschutz stellt sich die Frage nach der künftigen Entwicklung. Diese hängt entscheidend von den Änderungen der hydrologischen und meteorologischen Bedingungen ab. Die als Folge der Klimaveränderungen zu befürchtende weitere Zunahme von Sturmhäufigkeiten (ERCHINGER, 1992) und der ebenfalls nicht auszuschließende schnellere Anstieg des Mitteltidehochwassers haben auf die Entwicklung der Deichvorländer einen ganz erheblichen Einfluß. Soweit durch diese veränderten Bedingungen auch das Watt erodiert wird, erhöht sich dadurch die Seegangsbelastung für den angrenzenden Heller zusätzlich. Sollte sich der Tidehochwasseranstieg auf etwa 0,5 cm/a verdoppeln, so dürfte die Sedimentationsrate auf den Hellern im allgemeinen deren Bestand vor etwaigem „Untergang“ noch sichern. Der stärkere Seegangsangriff wird allerdings zu vermehrtem Hellerabbruch führen, soweit er nicht durch ein vorgelagertes Lahnungssystem verhindert wird.

Die Erhaltung des Deichvorlandes ist bei den z. Z. zu befürchtenden Klimaentwicklungen besonders wichtig, weil durch das Deichvorland und noch mehr durch Sommerdeiche die wachsenden Seegangsbelastungen der Deiche gedämpft werden können.

## 4. Die Bedeutung des Deichvorlandes für den Küstenschutz

Das Deichvorland hat als aktiver Küstenschutz eine große Bedeutung für die Sicherheit des Landes. Es mindert die hydrodynamische Beanspruchung der Deiche, verringert den Wellenauflauf und schließt den besonders kritischen Fall eines Strombruches beim Deich aus. Darüber hinaus ermöglicht es, in dringenden Fällen schwerer Sturmflutschäden schnell geeigneten Klei und salzverträgliche Soden nahe am Deich zu gewinnen. Treibseleinmessungen haben nach der sehr schweren Sturmflut am 19. 11. 1973 am scharliegenden Deich östlich von Norddeich einen Wellenauflauf von 3 m ergeben, während er hinter dem Deichvorland in Neßmergrode nur 1 m betrug (ERCHINGER, 1974).

## 5. Das Forschungsvorhaben mit 5 Teilprojekten

### 5.1 Die Projektgruppe und die Teilprojektgruppen

Für das vom BMFT geförderte KFKI-Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ hat das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) eine interdisziplinäre Projektgruppe berufen, die sich zusammensetzt aus:

LBD Dipl.-Ing. H. F. Erchinger, Norden (Obmann);  
 Prof. Dr. D. J. von Willert, Münster;  
 Prof. Dr. H. Gebhardt, Oldenburg;  
 Prof. Dr.-Ing. A. Führböter, Braunschweig;  
 Dipl.-Ing. G. Ragutzki, Norderney;  
 RBR Dipl.-Ing. V. Petersen, Husum.

Die Vielfalt der Untersuchungen in den unterschiedlichen Disziplinen erforderte die Bildung folgender fünf Teilprojekte:

– Koordination des Projektes sowie Logistik, hydrologische und morphologische Untersuchungen durch das Staatliche Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden, mit LBD Dipl.-

- Ing. H. F. Erchinger (Obmann), Dipl.-Ing. H.-G. Coldewey, Dipl.-Ing. F. Schmidt (bis Dez. 1991) und Dipl.-Geol. C. Meyer (ab 1992);
- Institut für Angewandte Botanik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster mit Prof. Dr. D. J. von Willert (Obmann), Dr. Austenfeldt, Dipl.-Biol. W. Steincke;
  - Bodenkundliche Untersuchungen des Fachbereichs Biologie der Universität Oldenburg mit Prof. Dr. H. Gebhardt (Obmann), Dipl.-Biol. U. Frank;
  - Modelluntersuchungen im Seewasserversuchskanal durch das Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig mit Prof. Dr.-Ing. A. Führböter (Obmann), Dr.-Ing. H. H. Witte/Dr.-Ing. M. Schulze, Dr.-Ing. H. Manzenrieder, Dipl.-Ing. U. Kotzbauer;
  - Bodenphysikalische Untersuchungen: Forschungsstelle Küste, Norderney, mit Dipl.-Ing. G. Ragutzki, Diplomand O. Otten (ztw.)

Die ersten Untersuchungen wurden 1985 eingeleitet. Eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Botanik, Münster und dem Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig begann 1986. Zusammen mit diesen Instituten wurde das Forschungsvorhaben 1987 formuliert und zunächst für 1989 bis 1991 genehmigt, später bis 1994 verlängert. Während der Endphase wird der interdisziplinäre Gesamtbericht erstellt werden.

## 5.2 Forschungsinhalt der Teilprojekte

### 5.2.1 Koordination und Logistik, Naturmessungen, hydrologische und morphologische Untersuchungen

Neben der Koordination der Teilprojekte und der Bereitstellung der Infrastruktur und Logistik werden morphologische Untersuchungen durchgeführt und hydrologische Daten erfaßt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Erfassung der Wasserstände, der Strömungsgeschwindigkeiten an der Hellerkante und in Gruppenquerschnitten und des Seegangs. Hierfür wurden zwei Meßstationen für Wasserstand, Seegang und Strömung jeweils vor den Hellerkanten der Untersuchungsgebiete Buscher- und Neßmerheller erstellt sowie zwei weitere Pegelmeßstellen auf den Versuchsflächen Leybucht zur Erfassung der unterschiedlichen Überflutungszeiten von begrüpten und unbegrüpten Hellerflächen sowie eine Klimastation eingerichtet.

Veränderungen der Hellerkanten und -oberflächen werden durch Feinnivellements und Profilvermessungen sowie Luftbilddauswertungen erfaßt. Die Messungen ermöglichen einen Aufschluß über die Zusammenhänge zwischen Abbruchrate, Seegangbelastung und Schutzwirkung von Lahnungen verschiedener Höhen im Untersuchungsgebiet Neßmerheller.

Ferner wird die Sedimentation der Hellerflächen bei unterschiedlicher Höhe, Nutzung und Gruppensituation erfaßt und sowohl hinsichtlich der Ablagerungsschichtdicke und der Kornverteilung (durch das Teilprojekt Bodenkunde) untersucht. Die Querschnittsentwicklung von Gruppen wird bei unterschiedlichen Höhenlagen und Einzugsgebieten erfaßt.

### 5.2.2 Botanische Untersuchungen

Die Vegetation des Hellers leistet einen nicht unerheblichen Beitrag zu seiner Erosionsfestigkeit. Sie schirmt den Boden gegen die Belastungen aus Seegang und Strömung ab. Das Wurzelwerk stabilisiert den Boden.

Ein Schwerpunkt dieses Teilprojekts ist daher die Erfassung der Pflanzenarten, ihres

Pflanzenwurzelwachstums und der Biomasseverteilung im Boden. Hierfür sind neue Untersuchungstechniken, wie beispielsweise die Rizothrontechnik, weiterentwickelt worden. Dabei sollen kausale Zusammenhänge zwischen Wurzelaktivität und Nährstoffkreislauf, insbesondere Stickstoffkreislauf, in den Hellerpflanzen und -böden in Abhängigkeit von den vielfältigen Einflußfaktoren und der jahreszeitlichen Entwicklung erforscht werden. Die ausgeprägt starke Wurzelaktivität der Hellerpflanzen – insbesondere im Winterquartal – hat alle Beteiligten überrascht.

Im Rahmen der umfangreichen botanischen Feld- und Kartierungsarbeiten wird auch die Herkunft des Treibsels untersucht, der nach Sturmfluten auf dem Heller oder an der Deichaußenböschung abgelagert wird.

### 5.2.3 Bodenkundliche Untersuchungen

Ziel dieser Untersuchungen ist es, Entwicklungsstand und Erodierbarkeit der im Deichvorland vorkommenden Böden zu erfassen. Das erfordert eine Vielzahl von bodenmorphologischen Untersuchungen und bodenchemischen und -physikalischen Bestimmungen bei unterschiedlichen Bodentypen. Dabei werden auch die Auswirkungen der Hellerbewirtschaftung durch Beweidung und Begrüppung auf die Prozesse der Bodenentwicklung erfaßt.

### 5.2.4 Modellversuche im Seewasserversuchskanal

Aufgabe dieses Teilprojektes ist es, die Belastung des Hellers möglichst naturnah im Modellversuch nachzubilden und seine Erosionsfestigkeit in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung und Bodenzusammensetzung im Großmodell zu untersuchen. Im Sommerpolder bei Neßmersiel konnte ein 50 m langer Versuchskanal mit einem Querschnitt von  $0,7 \times 1,4$  m so errichtet werden, daß über eine ausgediente Schöpfwerkspumpe bis zu  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  schwebstoffarmes Seewasser aus dem dortigen Spülbecken durch die Rinne strömen konnte. Auch bei längeren Versuchseinstellungen an einzelnen großvolumigen Proben konnte auf diese Weise das salzige Milieu für Pflanzen und Boden erhalten bleiben. Die großvolumigen Hellerbodenmonolithe (l : b : d = 100 : 70 : 40 cm) wurden als ungestörte Proben mit einer speziell dafür gefertigten Form im Heller gewonnen und in einer Reihe von drei Proben auf 3 m Länge in den Kanal eingebaut. Sie können mit Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 4,5 m/s belastet werden. Darüber hinaus wurden vorgefertigte Hellerkantenproben durch Seegang bei verschiedenen Wasserständen beaufschlagt.

Alle in den Kanal eingebauten Bodenmonolithe werden zuvor von den Botanikern und Bodenkundlern analysiert. Alle wichtigen fachspezifischen Daten werden dabei erfaßt.

## 6. Untersuchungsgebiete

### 6.1 Lage der Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiete boten sich drei Hellerbereiche im Nordwesten Ostfrieslands an. Sie unterscheiden sich im Bodenaufbau und in der hydrodynamischen Beanspruchung. Darüber hinaus war auf einer Teilfläche seit 1980 eine gestaffelte Beweidungsdichte einschl. Null-Beweidung eingehalten worden. Die Versuchsgebiete gliedern sich in

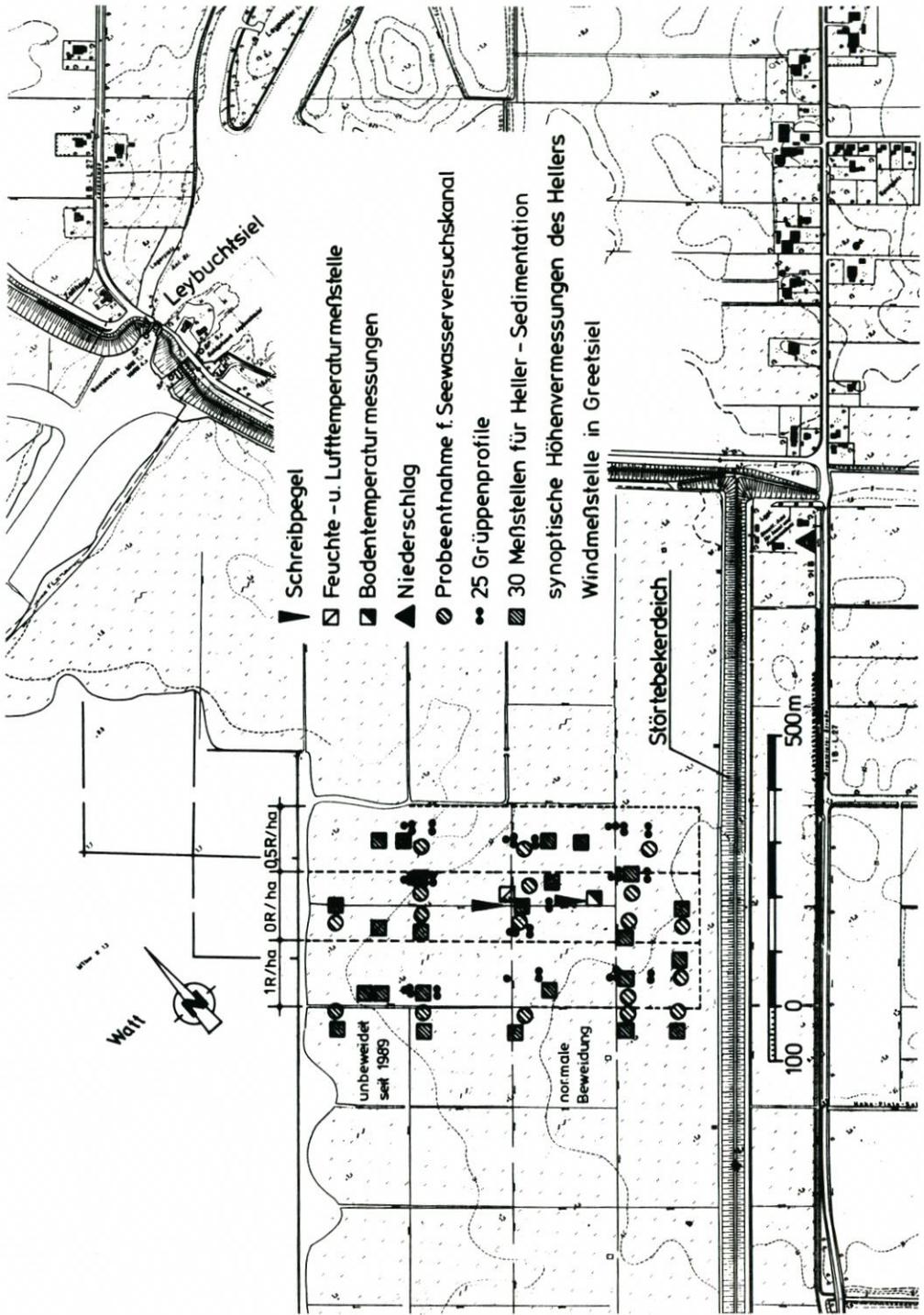


Abb. 6: Lageplan der Versuchsflächen Leybucht mit Messstellen

- die Versuchsflächen Leybucht,
- den Buscherheller, beide in der Leybucht, und
- den Neßmerheller vor Hilgenriedersiel, 12 km östlich von Norddeich am Rückseitenwatt der Insel Norderney (Abb. 2).

In Abstimmung aller Teilprojekte wurden innerhalb dieser Gebiete die einzelnen Versuchsflächen und Standorte nach botanischen, bodenkundlichen, topographischen und hydrologischen Gesichtspunkten festgelegt.

## 6.2 Versuchsflächen Leybucht

Vor dem im Jahre 1950 fertiggestellten Störtebekerdeich ist – infolge starker natürlicher Verlandung und unterstützt durch Lahnungsbau – ein 800 m breiter Heller entstanden. Bereits im Jahr 1980 sind hier drei nebeneinanderliegende, jeweils 10 ha große Versuchsflächen mit unterschiedlicher Beweidungsdichte von 1 Rind/ha, 0,5 Rind/ha und unbeweidet angelegt worden (Abb. 6). Auch sind die Flächen seit 1977 nicht mehr begrünzt worden, so daß neben der Auswirkung der Beweidung auf Vegetations- und Bodenentwicklung auch der Einfluß der Begrünung untersucht werden kann. Die beweideten Flächen mußten allerdings 1989 wieder begrünzt werden, da sonst eine Beweidung wegen langandauernder Nässeperioden nicht mehr möglich gewesen wäre.

Die Sedimente dieses Hellers weisen einen Tonanteil ( $< 0,002$  mm) von rund 30 % und einen Schluffanteil ( $0,063$  mm  $> d > 0,002$  mm) von rd. 60 % auf. Dieser hohe Anteil an tonig-schluffigem Material verleiht dem Hellerboden stark bindige Eigenschaften.

## 6.3 Buscherheller

Der im Nordwesten der Leybucht liegende Buscherheller wird stärker durch Seegang beaufschlagt als die o.g. Versuchsflächen vor dem Störtebekerdeich. Infolgedessen sind größere Sedimente anzutreffen. Der Tonanteil liegt bei 15 % und der Schluffanteil bei rund 40 %.

Der insgesamt 180 ha große Heller, für den ein allmählicher Übergang zum Watt als charakteristisch gilt, ist bis zu 1100 m breit. In den 80er Jahren wurden allerdings auf Teilstrecken Hellerabbrüche beobachtet. Zusätzlich hatten sich im Nahbereich der Hellerkante mehrere ausgeprägte vegetationslose Flächen, sog. Salzpflanzen, gebildet. Die Untersuchung dieser Initialflächen für Erosionen ist ein Teilaspekt des Verbundprojektes.

## 6.4 Neßmerheller

In früheren Jahrzehnten, besonders seit den 20er Jahren, war der im Seegangsschatten der Insel Norderney liegende Neßmerheller durch einen starken Anwachs gekennzeichnet (Abb. 7). Der Anwachs wurde durch Lahnungsbau und Vorlandarbeiten gefördert. In den 70er Jahren kehrte sich der Trend um, und das Vorland begann, im Westen vor Hilgenriedersiel abzubrechen. Seitdem hat sich eine Steilkante am Übergang zum Watt gebildet. Da das alte Buschlahnungssystem abgängig war, konnte es keinen Schutz mehr bieten.

Die Ursachen des Abbruchs sind vermutlich in morphologischen Veränderungen des Vorfeldes und daraus folgenden anhaltenden Erosionen des vorgelagerten Watts und stärkerer

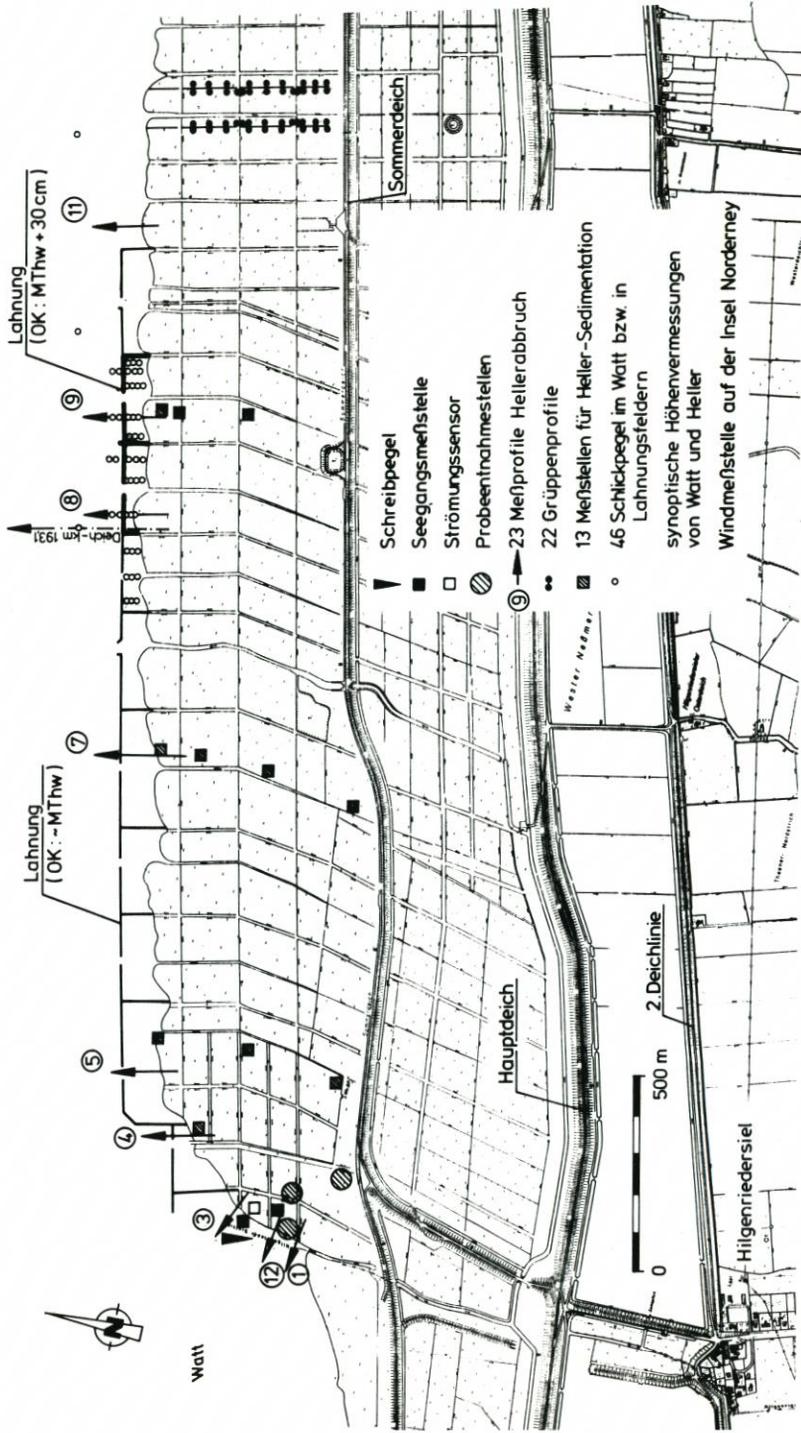


Abb. 7: Lageplan des Neßmerhellers – Westteil – mit Meßstellen

hydrodynamischer Beanspruchung zu suchen. Zum Schutz des Vorlandes wurde ab 1984 im Westabschnitt die Grundinstandsetzung des Lahnungssystems begonnen.

Verglichen mit den Untersuchungsgebieten der Leybucht ist der Heller in seinem vor Hilgenriedersiel gelegenen Westabschnitt im Einflußbereich des Norderneyer Seegats stärkeren hydrodynamischen Belastungen ausgesetzt, die weiter nach Osten zur Wattwasserscheide etwas abnehmen. Auf ihm überwiegt deutlich feinsandiges Sediment. Der Tonanteil fällt auf unter 10 % und der Schluffanteil auf ca. 25 %.

## 7. Erste Ergebnisse zum Teilprojekt „Logistik, hydrologische und morphologische Untersuchungen“

### 7.1 Ziel der Untersuchungen

Im Rahmen dieses Teilprojektes werden die hydrologischen Gegebenheiten und die morphologischen Veränderungen der Versuchsflächen untersucht. Ziel ist es, Grundlagen über die Wechselwirkungen zwischen Wasserständen, deren Verweilzeiten und den hydrodynamischen Belastungen des Hellers aus Seegang und Strömung sowie den Veränderungen der Hellerflächen zu gewinnen. In Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten wird u. a. auch angestrebt, die hydrologischen Einflüsse auf Bewuchs und Boden darzustellen. In die Untersuchungen werden unterschiedliche Beweidungsintensitäten, begrüpte und nicht begrüpte Bereiche sowie die Wirkung von Lahnungen einbezogen. Als Beispiele der umfangreichen Auswertungen sollen hier die Ergebnisse von drei Teilbereichen mitgeteilt werden. Die Erörterung weiterer Untersuchungsbereiche bleibt dem späteren Gesamtbericht vorbehalten.

### 7.2 Wasserstände auf begrüpten und unbegrüpten Hellern

Die Wasserstandsdaten der Pegelstationen dienen vor allem der Charakterisierung der Untersuchungsstandorte in Abhängigkeit von der örtlichen Topographie. Durch Pegelmessungen auf der nicht beweideten Versuchsfläche in der Leybucht konnten z. B. deutlich unterschiedliche Überflutungszeiten auf begrüpten und seit 1977 unbegrüpten Teilflächen festgestellt werden. Die Gesamtdauer der Abflußverzögerungen eines Monats ist dabei hauptsächlich von der Häufigkeit von Tiden abhängig, die den Heller überfluten. In den

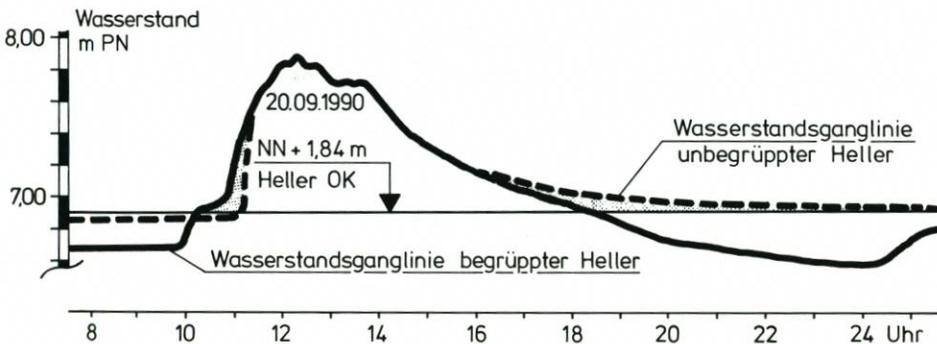


Abb. 8: Wasserstandsganglinien einer Hellerüberflutung auf begrüpten und unbegrüpten Versuchsflächen Leybucht

unbegrüpften Flächen verzögert sich der Salzwasserabfluß in den Sommermonaten um bis zu 18 und in den Wintermonaten um bis zu 30 Stunden. Der Einstau von Salzwasser erhöht sich dabei bis zum zweifachen der Salzwasserbedeckung in begrüpften Bereichen (Abb. 8).

Wie die Ergebnisse der botanischen und bodenkundlichen Untersuchungen gezeigt haben, wirkt sich die Begrüpfung durch einen positiven Einfluß auf die Bodenverhältnisse aus und fördert die Durchwurzelung der obersten Bodenschichten. Die Verminderung der Stauunässe bewirkt über eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes im Boden offenbar eine Wachstumsförderung der Pflanzen.

### 7.3 Hellerkantenabbruch in Abhängigkeit von der Seegangsenergie

Seit 1985 wird der ständige Kantenabbruch des Neßmerhellers durch regelmäßige Vermessungen erfaßt. Es konnten örtlich unterschiedliche Abbruchraten ermittelt werden, die gemäß Abb. 9 in drei Gruppen eingeteilt werden können und als 6jähriges Mittel betragen:

- Gruppe 1: ohne Buschlagung und mit niedrigem Watt von etwa NN+0,5 m: Abbruchrate bis 3 m/a
- Gruppe 2: mit vorgelagerter Buschlagung mit Kronenhöhe auf MThw und mit niedrigem Watt: Abbruchrate 0,5 bis 1,5 m/a
- Gruppe 3: ohne vorgelagerte Buschlagung und mit hohem Watt von i. M. NN+0,9 m: Abbruchrate ca. 0,5 m/a

Das Maß des Energieabbaus auf dem hohen Watt bzw. durch ein Lahnungsfeld ist aus diesen Werten ablesbar.

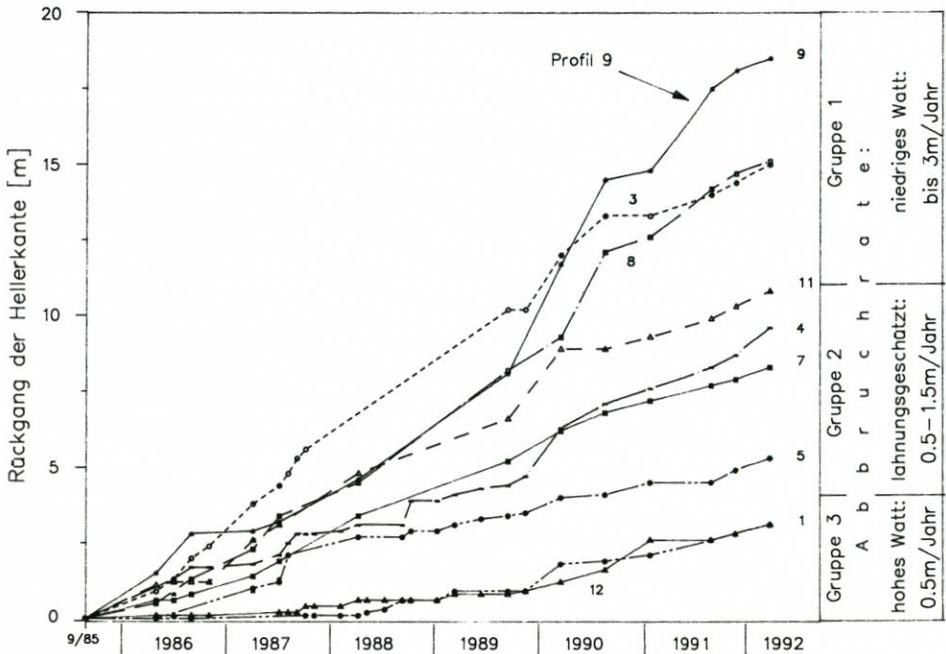


Abb. 9: Summenlinien der Kantenabbrüche an den Profilen des Neßmerhellers

Der ersten Gruppe kann die auf dem Watt ca. 30 m vor der Kante errichtete und über Solarzellen versorgte Pegel- und Seegangmeßstation als repräsentativ zugeordnet werden. Der Seegang wird mit Hilfe eines Meßdrahtes bei Wasserständen von 30 cm über MThw in Zeitabschnitten von 7 Minuten gemessen und mit einer Meß-Taktfrequenz von 18 Hz auf einem Laptop-PC gespeichert. Als maßgebend für die Abbruchgrößen ist die zwischen zwei Meßzeitpunkten eingetragene Seegangenergie ermittelt und den gemessenen Abbruchwerten gegenübergestellt worden. Dabei ergibt sich bereits aufgrund der bisherigen Messungen ein guter quantitativer Zusammenhang zwischen Seegangenergieeintrag und Kantenabbruch im Bereich des niedrigen Watts.

Die Gruppe 2 verdeutlicht, daß die Abbruchraten an einer lahnungsgeschützten Hellerkante geringer sind. Dabei ist auch die Höhe der Lahnung von Bedeutung. Seit 1991 ist daher eine Lahnungsstrecke mit „klassischer“ Lahnungs-OK von MThw + 0,3 m in die Untersuchungen einbezogen worden. Als qualitatives Ergebnis kann bereits nach einem Jahr festgestellt werden, daß diese Lahnung gegenüber einer OK auf MThw eine deutlich bessere Schutzwirkung hat.

#### 7.4 Sedimentation auf Hellerflächen

Zur Erfassung der Sedimentation sind im Jahr 1989 u.a. auf den Versuchsfeldern Leybucht 24 Stationen mit jeweils vier Plexiglasplatten (15 × 15 cm) eingerichtet worden. Die Feldunterteilung ermöglicht eine getrennte Erfassung für die verschiedenen Beweidungsdichten.

Um keine Störstellen an der Oberfläche zu schaffen, wurden die Scheiben ca. 4 cm unter GOK eingebracht. Die Sedimentauflage wird mit einem Dorn von der GOK bis zur

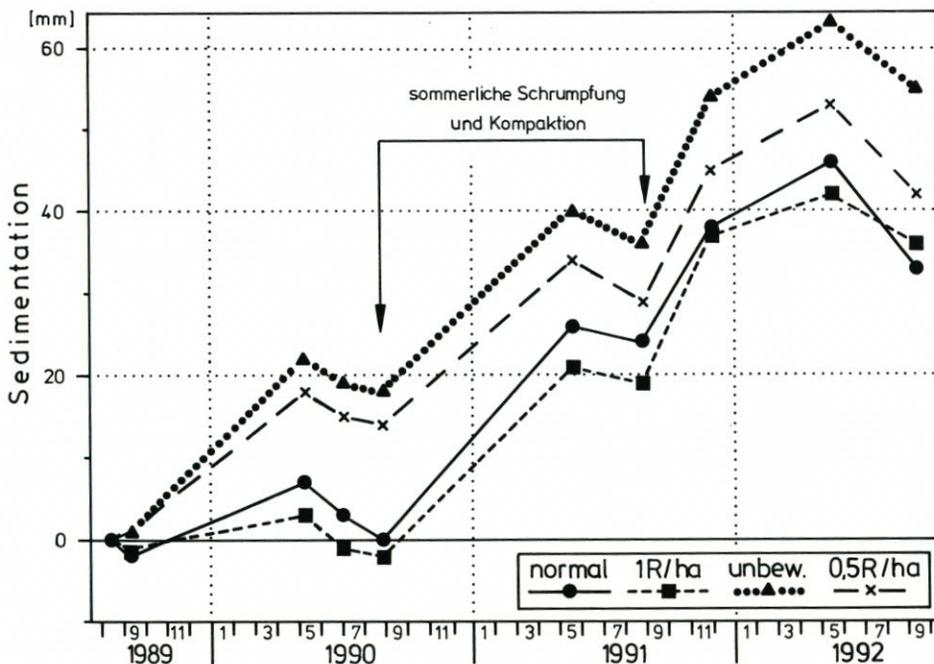


Abb. 10: Summenlinien der Sedimentation auf den Versuchsfeldern Leybucht mit unterschiedlicher Beweidungsdichte

Plexiglasplatte mehrmals im Jahr abgelesen. Zusätzlich wurden an den Meßstellen jeweils zwei Kunstrasenmatten auf der Geländeoberfläche ausgelegt, um das abgelagerte Material analysieren zu können.

Die Meßergebnisse auf den Versuchsflächen Leybucht dokumentieren eine deutlich positive Niveauentwicklung der Flächen, die in den drei Jahren von 1989 bis 1992 insgesamt 4 bis 5,5 cm beträgt (Abb. 10). Wie unter 3. beschrieben, nehmen die Sedimentationsraten mit der Entfernung vom Deich zu. Besonders deutlich wurde dies im ersten Beobachtungszeitraum September '89 bis Mai '90, in dem eine große Anzahl von Sturmfluten (39mal über NN + 2 m) einschließlich zwei Orkanfluten im Februar auftraten.

Die höchsten Sedimentationsbeträge von i. M. 2 cm wurden auf dem unbeweideten Feld gemessen. Es hatte den Anschein, als bewirke der hohe Bewuchs eine bessere Abschirmung gegen die starke Turbulenz während der Orkanfluten. In den beiden folgenden Winterhalbjahren mit geringeren Sturmfluthöhen und -häufigkeiten (23 bzw. 26mal über NN + 2 m) trat auch in Richtung Deich verstärkt Sedimentation auf. Durch die Bodenanalysen wurde festgestellt, daß sich feineres Material als in ersten Untersuchungen abgelagert hatte. Auf den beweideten Flächen wurden i. M. über 2 cm hohe Sedimentauflagen gemessen, die z. T. über den Werten des nichtbeweideten Feldes lagen. Trotz der geringen Anzahl von erhöhten Tiden sind über die gesamten Flächen gemittelt erheblich größere Mengen von Sedimentablagerungen festzustellen als im Winter 1989/90 mit der bisher größten Sturmfluthäufigkeit. Ob die Spülarbeiten an der Baumaßnahme „Leyhörn“ ein erhöhtes Sedimentangebot zur Folge gehabt haben, wird noch zu ergründen sein.

Die geringe Abnahme der Schichtdicke über den Plexiglasscheiben in den Sommermonaten ist infolge der seltenen Überflutungsereignisse und der besonders im Jahr 1992 geringen Niederschläge auf Schrumpfung und Kompaktion des tonigen Sediments zurückzuführen.

Vor Beginn der Messungen lagen die Meßpunkte der unbeweideten Parzelle gegenüber den beweideten Flächen um i. M. 8 cm höher, drei Jahre später hat sich die Höhendifferenz um 1 bis 2 cm vergrößert. Dies beruht hauptsächlich auf den großen Sedimentationsunterschieden im ersten Beobachtungsjahr.

Durch den Höhenunterschied von nur 10 cm verringert sich die Überflutungshäufigkeit in dem Höhenbereich um immerhin i. M. 8–11 Tiden, wenn die vergangenen drei Jahre zugrundegelegt werden. Aufgrund der Aufhöhung nach dem negativen Regelkreislauf wird sich der Höhenunterschied nicht wesentlich vergrößern. Wegen häufigerer Bedeckung mit sedimentbeladenem Seewasser und vermehrter Sedimentation wird der Höhenunterschied niedriger gelegener Flächen allmählich wieder ausgeglichen.

## 8. Schriftenverzeichnis

- COLDEWEY, H.-G.: Morphologische Entwicklung von Hellern/Deichvorländern zwischen Ems und Jade in den letzten 25 Jahren. Workshop Küstenmorphologie, Oldenburg, 1989.
- DIECKMANN, R.: Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wateinzugsgebieten in der Deutschen Bucht. Mitt. Franzius-Inst. der Uni Hannover, H. 60, 1985.
- DIJKEMA, K. S.: Saltmarshes in Europe; Council of Europe. Nature and Environment Series nr 30; Strasbourg, 1984.
- DIJKEMA, K. S., BOUWSEMA, P. and VAN DEN BERGS, J.: Possibilities for the Waddensea marshes to survive future sea-level rise. In: Saltmarsh Management in the Waddensea Region. Proceedings of the Working Conference. Rømø 1989. Published by the Ministry of the Environment, The National Forest and Nature Agency, 1990
- EHLERS, J.: The Morphodynamics of the Waddensea. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1988.

- ERCHINGER, H. F.: Landgewinnung und Lahnungsbau im Wattgebiet. Die Küste, H. 21, 1971.
- ERCHINGER, H. F.: Wellenaufbau an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. des Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 41, 1974.
- ERCHINGER, H. F.: Dünen, Watt und Salzwiesen. Verlag Soltau-Kurier, Norden, 1985.
- ERCHINGER, H. F.: Salzwiesenbildung und -erhaltung – Lahnungsbau und Begrüpfung für den Küstenschutz. In: Kempf, N., Lamp, J. und Prokosch, P.: Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur? Tagungsbericht 1 der Umweltstiftung WWF – Deutschland, Husum, 1987.
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G. u. PROBST, K.: Empfehlungen für eine wirksame Außentiefenräumung als Ergebnis des Forschungsvorhabens „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“. Die Küste, H. 47, 1988.
- ERCHINGER, H. F.: Saltmarsh Management in Respect of Coastal Protection Demands in Niedersachsen. In: Saltmarsh Management in the Waddensea Region. Proc. of the Working Conference, Rømø 1989. Published by the Ministry of the Environment, The National Forest and Nature Agency, 1990.
- ERCHINGER, H. F.: Sturmfluten, eine zunehmende Bedrohung der Küste als Folge von Klimaveränderungen. HANSA, Nr. 12, 1992.
- ERCHINGER, H. F.: „Küsteningenieurwesen“ im Taschenbuch der Wasserwirtschaft. 7. Auflage. Hrsg. von Bretschneider, Lecher, Schmidt, Verl. Paul Parey, Hamburg, Berlin, 1993.