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

Doppel

KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN

ZUSAMMENFASSENDER BERICHT ZUM KFKI-VERBUNDPROJEKT WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN KÜSTENBAUWERKEN UND MARINER UMWELT

von
Hans Kunz

26

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE
- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE -

030484 2it - 1-2

Norderney, im Februar 1993
NLÖ - Forschungsstelle Küste
An der Mühle 5
26548 Nordeney

Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt"

Dr.-Ing. H. Kunz
Nds. Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste, Norderney

Inhalt:

Zusammenfassung 2

Summary 2

1. Veranlassung 3

2. Organisation und Aufgabe des KFKI-Verbundforschungsvorhabens 3

3. Strandvorspülungen und Küstenschutzwerke auf Norderney 6

4. Zur Wahl des Standortes Norderney für das KFKI-Verbundforschungsvorhaben 7

5. Forschungsfelder 8

6. Forschungsaufgaben der Teilvorhaben/Teilprojekte 12

7. Angaben zu Untersuchungen und Ergebnissen der Teilvorhaben/Teilprojekte 16

8. Forschungsziele und deren Vernetzung zu Ergebnissen, Ausblick 91

9. Schrifttum 93

Danksagung 95

Anlage 1:
Teilvorhaben/Teilprojekte des KFKI-Verbundforschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" mit Bezeichnung der ausführenden Stellen, Namen der wissenschaftlichen Leitung und Anschrift

Anlage 2:
Mitglieder der KFKI-Projektgruppe zum Verbundforschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt"

Anlage 3:
Berichte und Veröffentlichungen zum KFKI-Verbundforschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt"

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 Buhnenfelder von Zeit zu Zeit mit Seesand aufgespült, um die Bauwerke vor Zerstörungen durch Sturmfluten zu bewahren. Die Strandvorspülung 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 Schlußbericht für das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) werden die Gliederung des Projektes dargestellt, die Forschungsziele angesprochen, Zusammenarbeiten aufgezeigt und auf Ergebnisse hingewiesen, ohne diese näher darstellen oder bewerten zu wollen. Bereits vorliegende Berichte und Veröffentlichungen zu dem Forschungsvorhaben sind in der Anlage 3 zusammengestellt, die 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 interdisziplinary 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 Technology (BMFT)". The research work had been carried out from 1986 to 1992. This paper reviews the research project and provides a general describtion of the organisation, the targets, and

results. An attached list of reports and publications facilitates the acces to more detailed information on the research-project.

1. Veranlassung

An der deutschen Nordseeküste weisen auch die sandigen Küstenabschnitte zum Teil erhebliche Abbrüche auf. Als Folgen der nicht auszuschließenden Änderungen des Weltklimas durch den Menschen ist mit einer Vergrößerung der Abbruch-Tendenzen 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, Buhnen) gegen Abbrüche gesichert worden war (KRAMER 1958). Die Technik der Strandaufspülung, auch als Strandauffüllung bezeichnet (AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE 1977, 1981), stellte damals eine "weiche" 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 Küstenbauwerken und regelmäßig zu wiederholenden Strandauffüllungen" Einhalt geboten werden kann.

Die mit Strandaufspülungen 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" (kurz: "Wechselwirkungen") ist in Verbindung zu sehen mit dem KFKI-Forschungsvorhaben "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt". Beide Vorhaben befassen sich mit Problemen der "Strandaufspülungen"; 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 Anlage. 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, die Forschungsaufgaben der Teilvorhaben/Teilprojekte sind in Kap. 6 und Angaben zu Untersuchungen sowie Ergebnissen der Teilvorhaben sind in Kap. 7 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 Strandaufspülungen zu gewinnen sind.

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

Die aktive Zusammenarbeit der Teilvorhaben und ihrer Teilbereiche mit außenstehenden Institutionen und Forschungsvorhaben gibt die 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. Ergeb-

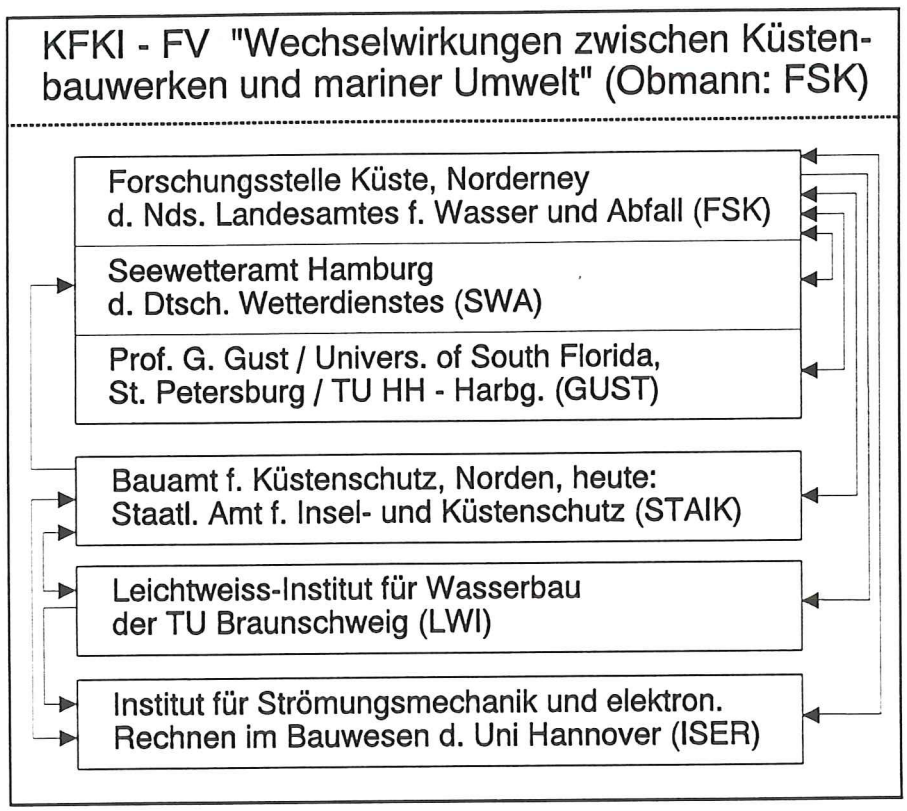


Abb. 1 Am KFKI-Verbundforschungsforhaben "Wechselwirkungen..." beteiligte Fachbehörden und Hochschulinstitute und deren interne informelle Verkopplung (Richtungspfeile)

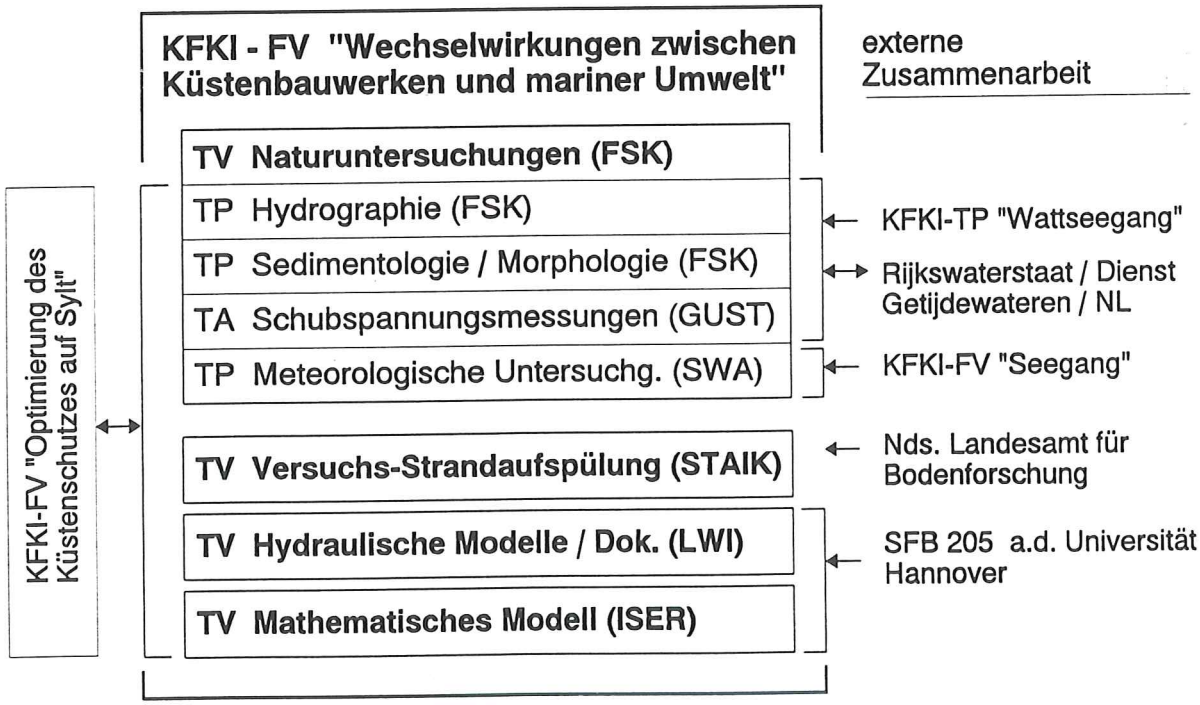


Abb. 2 Teilvorhaben/Teilprojekte des KFK-Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen..." und deren Zusammenarbeit mit externen Vorhaben und Institute

nisse in das Verbundvorhaben einflossen. Die Kooperation mit dem thematisch verwandten KFKI-Vorhaben "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt" ist getrennt ausgewiesen.

3. Strandaufspülungen und Küstenschutzwerke auf Norderney

Mit Strandaufspülungen sind die großräumigen Ursachen für Strandabbrüche nicht zu beeinflussen und ist die natürliche Sandzuwanderung nicht zu vermehren: der Sand wird wieder abgetragen, so daß Aufspülungen in gewissen Zeitabständen wiederholt werden müssen. Sie sind somit wie Unterhaltungsmaßnahmen anzusehen, die ständige Aufwendungen erfordern, solange das jeweils vorgebene 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 Sturmflut-Einwirkungen mit hochgelegenem Sanddepot.
- Schutz von Küstenbauwerken gegen Zerstörungen während Sturmfluten durch die Gewährleistung von ausreichenden Strandprofilen.

Auf Norderney dienen die Strandaufspülungen der Sicherung der Küstenschutzwerke; sie 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 Tideströmungen des Seegats vom Inselsockel (Verhinderung einer Ostverlagerung der tiefen Rinne des Norderneyer Seegats),
2.2 Strandbuhnen zur Verminderung von Längsströmungen (Stabilisierung von Strandabschnitten).
3. Strandaufspülungen
Auffüllen von Buhnenfeldern mit Seesand im Bereich großer Seegangsbelastungen und negativer Sandbilanzen (Schutz vor Unterspülungen der Fußsicherungen von Buhnen- 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 Sandtransport-Geschehen aus. Über die Schutzwerke selbst gibt es ein umfangreiches Schrifttum; eine neuere Zusammenfassung unter Einbeziehung der Strandaufspülungen 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 Buhnen und Längswerke" angewendet, hat bisher im Mittel 85 000 m^3 Sand erfordert, um die gewünschten Strandlagen in den Buhnenfeldern 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 "Strandaufspülungen" und "Wechselwirkungen" zu gewinnen. Der Standort Norderney bietet dafür günstige Voraussetzungen:

Die Versuchsstrandauffüllung 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 Strandaufspülung 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 Ökologie (bis zum 01.10.92: des Niedersächsischen Landesamtes für Wasser und Abfall). 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 Inselschutzwerke bieten gute Voraussetzungen für Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen hydrodynamisch-morphologischen Parametern und den Bauwerken (Strandmauer, Buhnen), 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 Strandaufspülungen künstlich versorgten Küsten/Insel-Abschnitte wirken die von der Nordsee her bestimmten Tide- und Seegangsgrößen ein. Um deren Ausprägung an der seeseitigen Begrenzung des "offenen Randes des Untersuchungsgebietes" (sogenannte "Buhnenstreichlinie") 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 (Meßnetz für FV) - der maßgebende Wind vor der Küste zu berechnen ist (SCHMIDT/PÄTSCH 1992). Tidewasserstände und Wellenhöhen am "offenen Rand des Aufspülbereiches" (Buhnenstreichlinie) 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 Buhnenfeldern eingerichteten hydrographischen Meßsysteme zur Erfassung des Tide- und Seegangs-Geschehens 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, 1992a, b). Die Strömungen transportieren das Sandmaterial im sohlnahen Bereich. Die diese Vorgänge

verursachenden Schubspannungen konnten durch den Einsatz von Prototypen einer fortgeschrittenen Meßtechnik erstmals in der Natur gemessen werden (GUST 1992, TA 1.3); Strömungs-Geschwindigkeiten 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. 1992a, b). 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 Schwerminenral-Bestimmungen, 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 Strandprofil-Änderungen 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, KUNZ/ STEPHAN 1992a, b). Sedimentologische Analysen der Buhnen-Bereiche und des großräumig zugeordneten marinen Umfeldes (TP 1.2) erfaßten die morphologisch-hydrographischen Wechselwirkungen und trugen zu deren Deutung bei (EITNER et al. 1992 a, b). Die Einbeziehung der hydrographischen Messungen im Rahmen dieses Projektes in Verbindung mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen der Forschungsstelle Küste zu Tideströmungen und Seegang in Buhnenfeldern und dem großräumigen marinen Umfeld (NIEMEYER 1987, 1991, 1992 a, b) ermöglichte Deutungen und Rückschlüsse auf den längs- und quergerichteten 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 in 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 Buhnenfeld 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 Verwallung

Die Untersuchungnen 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 (ERCHINGER 1991; TILLMANN/ERCHINGER 1992). 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 Buhnen mit erfaßten. Die Einbeziehung von Ergebnissen der hydrographischen und der sedimentologischen Untersuchungen ermöglichte ursächliche Deutungen, den Nachweis der hydrodynamischen Wirksamkeit von Strandbuhnen und die

Herleitung von Grundsätzen zur Minimierung von Sandverlusten (KUNZ 1991a, b; KUNZ/-STEPHAN 1992; NIEMEYER 1992a, b). Die hydraulischen Modellversuche (TV 3) bestätigten, daß man mit stationären Strömungszuständen die komplizierten Naturverhältnisse in den Buhnenfeldern 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 Strandaufspülungen, Untersuchungen zu besonderen Einzelproblemen

Im Rahmen des Vorhabens (TV 3) wurde eine umfassende Dokumentation über alle bislang in Deutschland ausgeführten Strandaufspülungen 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 Energiefluß-Ansatzes 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 Kap. 7, insbesondere aber den in der Anlage 3 zusammengestellten Berichten und Veröffentlichungen selbst 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 10 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 Buhnen.

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 Sandtransport-Geschehen.

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 Sandverlustraten 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 Grenzschicht-Bereich "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 Korrektion 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 5 - 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- u. 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 Buhnenfeld (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 WELLEN-KANAL (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 f. 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 brandungsinduzierter Strömungen und Anwendung auf monochromatische Wellen sowie Verifikation mittels Ergebnissen der hydraulischen Modelluntersuchungen des Leichtweiß-Instituts (wellenerzeugte Strömungen in einem Buhnenfeld).

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 Buhnen-Hauptmeßfeld (D1-E1) von der FSK erhoben) mit dem Ziel, Informationen zur Steuerung und Verifikation der numerischen Modelle zu erhalten (Parametrisierung zu Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit, Wellenanlaufrichtung).

7. Angaben zu Untersuchungen und Ergebnissen der Teilvorhaben/Teilprojekte

Mit Verweis auf die in der Anlage 3 ausgewiesenen BMFT-Schlußberichte und Veröffentlichungen beschränken sich die folgenden Ausführungen auf zusammenfassende Überblicke und Hinweise.

Anmerkung: die Abbildungen des Kap. 7 sind für jedes Teilvorhaben (TV) und beim TV 1 zudem für die unterschiedlichen Teilprojekte mit eigenständiger Numerierung aufgeführt; analog ist das zitierte Schrifttum getrennt zugeordnet worden.

7.1 Teilvorhaben Naturuntersuchungen (Forschungsstelle Küste)

Das Teilvorhaben setzt sich zusammen aus:

1.1 Teilprojekt "Hydrographie"
1.2 Teilprojekt "Sedimentologie/Morphologie"
1.3 Teilaufgabe "Schubspannungsmessungen"
1.4 Teilprojekt "Meteorologische Messungen auf Norderney u. Modellrechnungen"

Die Projekte Nr. 1.1 bis 1.4 arbeiteten eng zusammen; die Koordination wurde durch den wissenschaflichen Leiter des Teilvorhabens gewährleistet.

7.1.1 Teilvorhaben Naturuntersuchungen - Teilprojekt Hydrographie (Forschungsstelle Küste)

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 ± 0,7 m. Der höchste, bisher

gemessene Stau am Pegel Norderney trat bei der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 mit 2,87 m über mittlerem Tidehochwasser auf.

Strömungsverhältnisse und Morphologie der tiefen Rinne des Norderneyer Seegats sind durch eine ausgeprägte Dominanz des Ebbstroms geprägt. Die mittleren Stromgeschwindigkeiten betragen für beide Halbgezeiten 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). Die Tideströmungen auf den Stränden von Norderney sind erheblich schwächer, wobei deren Intensität mit Entfernung vom Seegat abnimmt. Insbesondere in den Bereichen mit starker Erosionstendenz sind Tideströmungen von nachrangiger Bedeutung.

Aus den Erkenntnissen über die Strömungsverhältnisse auf den Stränden von Norderney (NIEMEYER 1987) 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 Sturmwetterlagen 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 Dünung aus westlichen und nordwestlichen Richtungen, die in Wechselwirkungen mit der Inseltopographie ein in zwei Hauptrichtungen auf den Stränden wirkendes System von Brandungsströmungen und strandparallelem Küstenlängstransport erzeugen.

Das Überlappen des Riffbogens über die westlichen und nordwestlichen Inselstrände bis zu seinem Anlandungsbereich 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 (NIEMEYER 1987).

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 1979) gestatteten 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 & MINNEBOO 1991). Bei dem KFKI-Forschungs-

vorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" war von Beginn an eine 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. I.1). Die Sensoren werden dabei in Sohlnähe 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, die Kabelverbindung zum Land haben. Hiermit wird sowohl die Energieversorgung der Sensoren sichergestellt, als auch der kontinuierliche Datentransfer an Land. Die Daten werden an den jeweiligen Landstationen in eine rechnergesteuerte Datenfernübertragung eingespeist und in die Meßnetzzentrale im Dienstgebäude der Forschungsstelle Küste drahtlos 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 quasikontinuierliche Aufzeichnung aller Rohdaten über die Dauer mehrerer Tiden.

Analyseverfahren der Meßdaten

Die Aufzeichnungen der Meßdaten mit hoher zeitlicher Auflösung gestattet auch eine realistische Reproduktion hochfrequenter Vorgänge in der Brandungszone bis hin zu Turbulenzstrukturen seegangs- und brandungsinduzierter Strömungen (Abb. I.2). Die Datenfülle erschwert jedoch gleichzeitig die Interpretation der hydrodynamischen 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 Mittelwertbildungen wegen der starken Variabilität der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungsfelder auf Stränden mit hohen Informationsverlusten verbunden sind.

Um zu einer hinsichtlich ihrer Gesamtwirkung bewertbaren Analyse der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen zu gelangen (NIEMEYER 1991), wurden für Zeitreihen von zwanzig Minuten richtungsklassifizierte Geschwindigkeitsverteilungen aller mit 11,8 Hz Auflösung erfaßten Strömungsvektoren für Sektoren von 22,5° erstellt und graphisch in Form von Stromstärkerosen aufgetragen (Abb. I.3). Darüber hinaus wurden zur Verdeutlichung der richtungsmäßig überwiegenden Wirkung der seegangs- und brandungsinduzierten Strömun-

gen resultierende Stromstärkerosen erstellt (Abb. I.3). Hierbei werden die jeweils um 180° entgegengerichteten Geschwindigkeitsverteilungen voneinander subtrahiert, sodaß näherungsweise der Anteil gleichstarker gegenläufiger Strömungen eliminiert wird.

Als eine weitere Möglichkeit zur Darstellung der räumlichen Verteilung der Strömungsintensität wurden Richtungsspektren der Energiedichte ermittelt (Abb. I.3). Für Sektoren von fünf Grad werden hierbei 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.

Erosions- und Regenerationsvorgänge

Die saisonale Anpassung von Stränden an das jeweilige Seegangsklima ist ein im internationalen Schrifttum seit Langem bekanntes Phänomen, das in der Literatur oft durch die Begriffe "Sommer- und Winterprofile" umschrieben wird (BASCOM 1954). 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 die Regeneration von Stränden und Dünen auf Juist, Memmert und Norderney unabhängig von baulichen und morphologischen Randbedingungen eintritt. Hinsichtlich des Inselschutzes auf Norderney ist dabei von wesentlicher Bedeutung, daß auch die einer kontinuierliche Erosion unterliegenden, bauwerksgeschützten Strände am West- und Nordweststrand von Norderney nach sturmflutbedingten Erosionen eine bemerkenswerte Regeneration erfahren.

Es erschien daher naheliegend, derartige Umlagerungsvorgänge hinsichtlich der wirksamen hydrodynamischen Vorgänge zu untersuchen, um die hierbei zu gewinnenden Erkenntnisse darauf zu prüfen, ob sie als Grundlage für Optimierungen künftiger Srandauffüllungen nutzbar sind. Im Gegensatz zu einer statischen Betrachtungsweise soll hier eine Orientierung an der Dynamik der Transportvorgänge im Strandbereich erfolgen.

Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Sturmflut

Bei Sturmfluten führen die herrschenden meteorologischen Randbedingungen in der Regel zur Ausbildung energiereichen Seegangs, der sich infolge erhöhter Wasserstände weiter landwärts ausbreiten kann als unter normalen Bedingungen. 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.

Die Strömungsdaten in ihrer Gesamtheit belegen die hohe Transportkapazität der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen auf Stränden. Während Tideströmungen hier nur sehr geringe Geschwindigkeiten aufweisen, weisen die seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen nennenswerte Anteile im Geschwindigkeitsbereich von 1,5 m/s bis 2,5 m/s auf (Abb. I.4).

Die Stromstärkerosen für die Zeitreihe zeigen ein landwärts zunehmendes Überwiegen seeseitig gerichteter Strömungen (Abb. I.4). Dieser Effekt wird noch offensichtlicher bei Darstellung der Strömungsverhältnisse in Form resultierender Stromstärkerosen (Abb. I.4). So sind in der inneren Linie des Meßfeldes in der Nähe des Deckwerks (w3, m3, o3) nur noch resultierende Komponenten in strandnormal seewärtiger und in strandparallel unterdriftiger Richtung mit einem erheblichen Anteil hoher Geschwindigkeiten vorhanden.

Die seewärts gerichteten Strömungen in Sohlnähe treten als Folge brechender Wellen insbesondere dann auf, wenn über die gesamte Breite der Brandungszone die Energieumwandlung in Form borenartiger weißer Roller erfolgt. Deren landwärts gerichteter Massentransport wird durch einen seewärts gerichteten Rückstrom kompensiert. Die hohe Turbulenz in der Brandungszone bewirkt hohe Suspensionsraten, so daß die hohen Transportkapazitäten der seewärts gerichteten Rückströmungen nicht nur auf sohlnahe Geschiebefrachten zurückzuführen sind.

Die Ergebnisse der Datenanalyse liefern in Zusammenhang mit theoretischen und experimentellen Erkenntnissen (SVENDSEN 1984; STIVE & WIND 1986; BATTJES 1988; VAN RHIJN 1990) eine plausible Erklärung für die nach Sturmfluten festzustellenden starken Erosionen an Stränden. Die resultierend seewärts gerichteten küstennormalen Strömungen mit hohen Geschwindigkeiten verfügen über eine erhebliche Transportkapazität, der durch die hohe Turbulenz in der Brandungszone zusätzlich Material zugeführt wird. Hierdurch werden erst die großen 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 & VAN OVEREEM 1991) erfolgen.

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 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 Strand fortpflanzen.

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 auflandigen Transport des bei Sturmflut seewärts transportierten Materials bewirkt (Abb. I.5). Die niedrigen Wasserstände bedingen zudem eine erhöhte Wirksamkeit der Buhnen, so daß diese ufernahe Zirkulationsströmungen herbeiführen können.

Offensichtlich ist die Wassertiefe oberhalb der Buhnenkrone aber nicht die bestimmende Größe für die Buhnenwirkung. Wird jedoch zusätzlich die Höhe der Buhnenkrone über der Sohle in die Betrachtung einbezogen, gelangt man zu plausiblen Zusammenhängen für die hydrodynamische Wirksamkeit von Strandbuhnen. Es bleibt aber zu betonen, daß die hier angestellten Überlegungen zur hydrodynamischen Wirksamkeit von Buhnen vorläufigen Charakter haben und weitere eingehende 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 Buhnen 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.

Sturmflutbelastung massiver Inselschutzwerke

Trotz der wiederholten Strandauffüllungen bilden die Deckwerke den Sturmflutschutz der Insel. Quantitative Vorstellungen hinsichtlich der Belastbarkeit der massiven Inselschutzwerke bestehen nur für Scheitelwerte von Sturmflutewasserständen und der dazugehörigen Strandlagen. Die eingehenden Naturmessungen sollen nunmehr genutzt werden, um ein differenziertes Bild der Sturmflutbelastung massiver Inselschutzwerke zu skizzieren, indem man Parametrisierung der unmittelbaren Krafteinwirkung über den Seegang erfolgt.

Umsetzung der Erkenntnisse

Es erscheint hinsichtlich der Dynamik der Transportvorgänge im Vorstrand- und Strandbereich sinnvoll, Depositionen der Auffüllmengen im Vorstrandbereich vorzunehmen. Hierdurch werden möglicherweise geringere Anfangsverluste und längere Verweilzeiten zu erreichen sein, da in der ersten Phase ein überwiegend landwärts gerichteter Sedimenttransport zu erwarten ist. Ein weiterer Vorteil entsteht zudem dadurch, daß infolge der geringeren Aufhöhung des Strandes die hydrodynamische Wirksamkeit der Strandbuhnen 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.

Schrifttum:

BASCOM, W. H. (1954): Characteristics of natural beaches. Proc. 4th Conf. o. Coast. Eng., ASCE

BATTJES, J. (1988): Surf-zone dynamics. Ann. Rev. Fluid Mech. 1988, 20

GRAAFF, J. van de, NIEMEYER, H. D. & OVEREEM, J. VAN (1991): Beach nourishment, philosophy and coastal protection policy. in: J. v. d. Graaff, H. D. Niemeyer, J. v. Overeem: Special Issue Artificial Beach Nourishments. Coast. Eng., Vol.16, No. 1

HOMEIER, H. (1976): Die Auswirkungen schwerer Sturmtiden auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. Jber. 1975 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 27

KOCH, M. & NIEMEYER, H. D. (1978): Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats. Jber. 1977 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 29

NIEMEYER, H. D. (1979): Instrumental equipment and data aquisition for field investigations on wave and surf action on shores. Proc. 18th IAHR-Congress, Cagliari

NIEMEYER, H. D. (1983): Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsbericht MF 0203

NIEMEYER, H. D. (1987): Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. Proc. 20th Intern. Conf. o. Coastal Eng. Taipei, ASCE, New York

NIEMEYER, H. D. (1991): Field measurements and analysis of wave-induced nearshore currents. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York

RHIJN, L. van (1990): Sediment transport by currents and waves. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. - Progr. o. Contin. Educat.1990) Delft Univ. o. Techn. Intern. - Intern. Civ. Eng.

ROELSE, P., COOSEN, J. & MINNEBOO, F. A. J. (1991): 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

STIVE, M. J. F. & WIND, H. G. (1986): Cross-shore mean flow in the surf zone. Coast. Eng., Vol. 10, No. 4

SVENDSEN, I. A. (1984): Mass flux and undertow in a surf zone. Coast. Eng., Vol. 8, No. 4

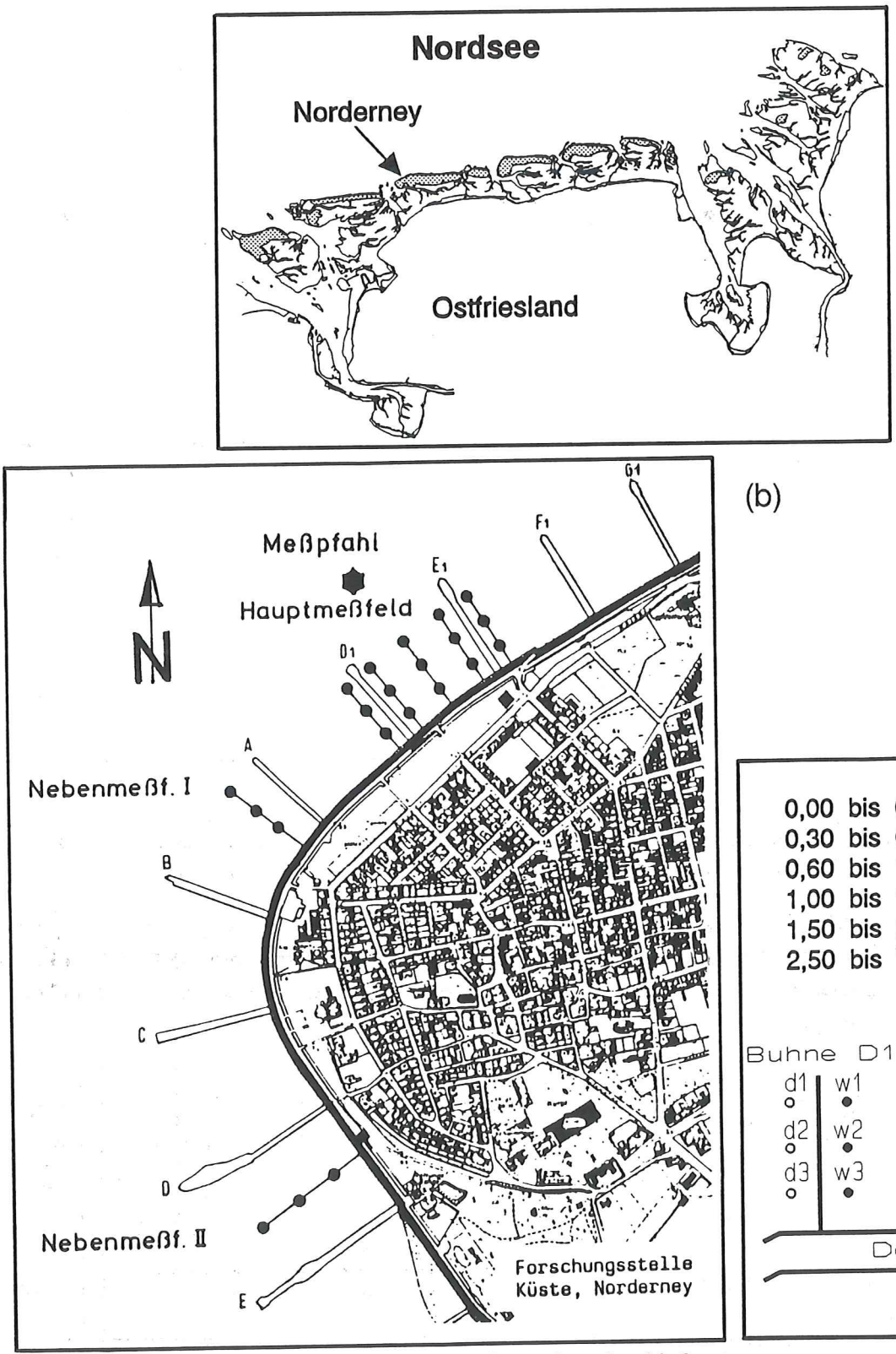


Abb. I.1: Lageplan und Konfiguration des Meßnetzes

a. Lageplan der ostfriesischen Inseln mit Norderney

b. Haupt- und Nebenmeßfelder auf Norderney

c. Anordnung und Bezeichnung der Stationen im Hauptmeßfeld sowie Geschwindigkeitsklassen für Stromstärkerosen auf den Abb. I.3 und I.4

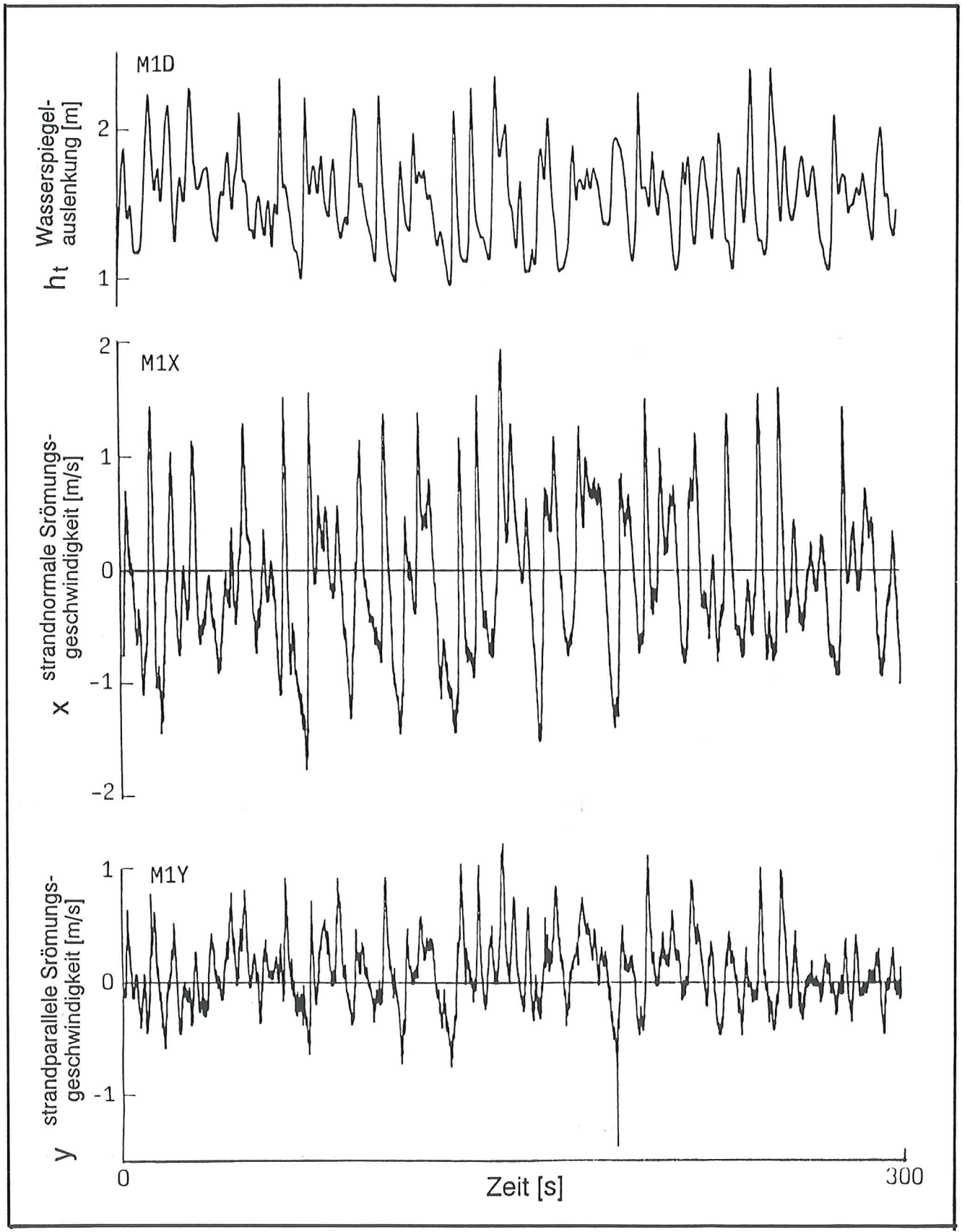
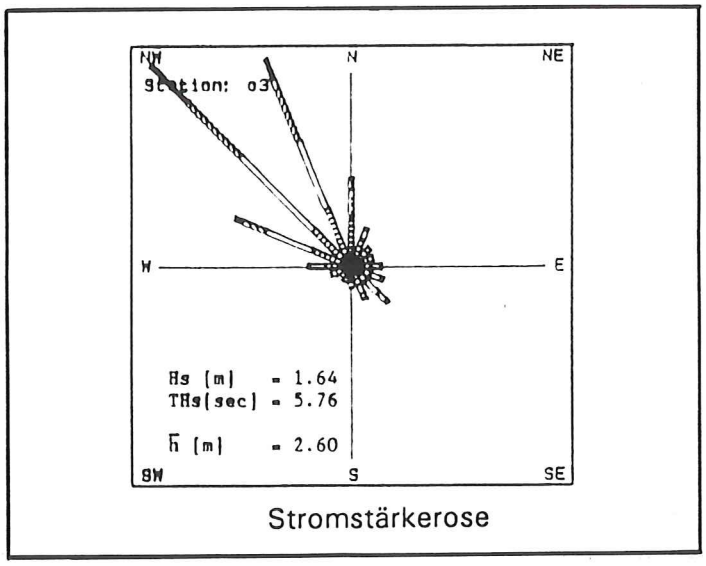
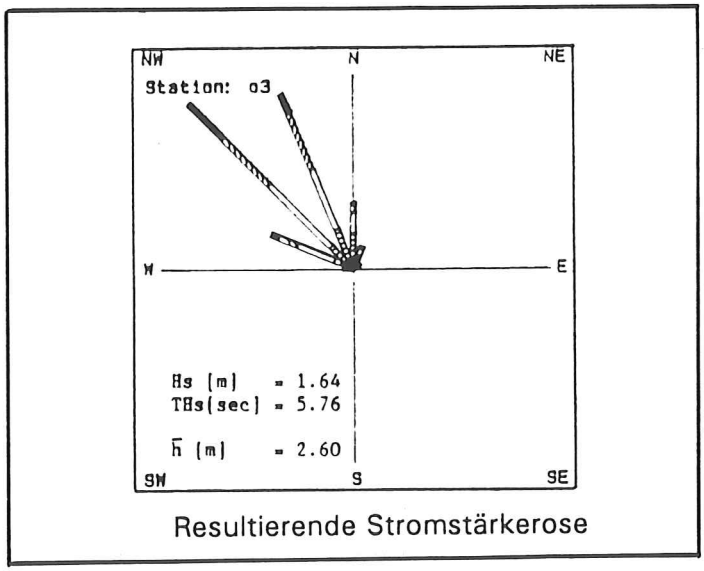


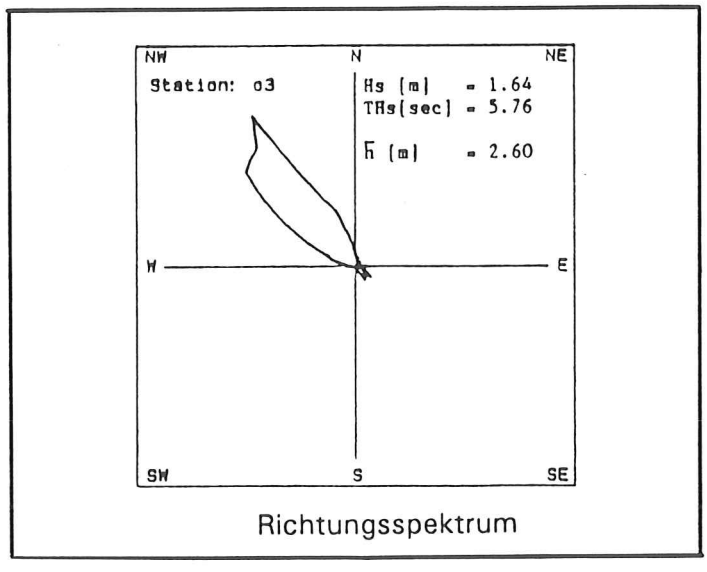
Abb. I.2: Wasserspiegelauslenkung, strandnormale und strandparallele Strömungsgeschwindigkeiten an der Station m1 am 17.02.89, Zeitraum 09:42-09:47



Stromstärkerose



Resultierende Stromstärkerose



Richtungsspektrum

Abb. I.3: Darstellungen der Geschwindigkeitsverteilung an einem Meßpunkt

Datum	17.02.1988	Datum	24.12.1988	Datum	24.12.1988
Meßzeitraum	21:18-21:38	Meßzeitraum	11:34 - 11:54	Meßzeitraum	11:34 - 11:54
100 Promille		100 Promille		70 $m^2 s^{-2}$	

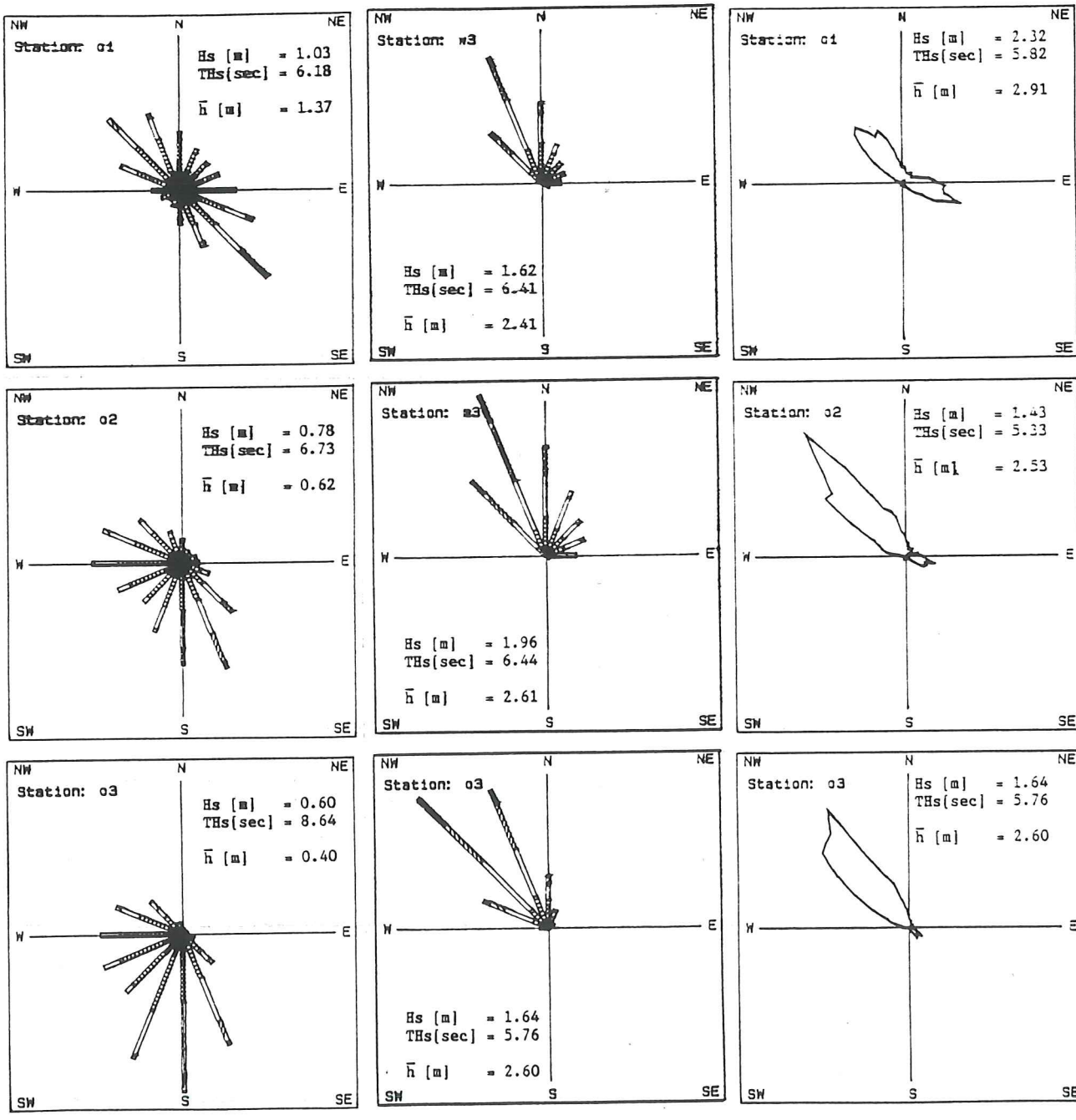


Abb. I.4: Stromstärkerosen für die Stationen o1, o2, o3 für die Tide vom 17.02.1989, resultierende Stromstärkerosen für die Stationen w3, m3, o3 und Richtungsspektren für die Stationen o1, o2, o3 bei der Sturmflut vom 24.12.1988

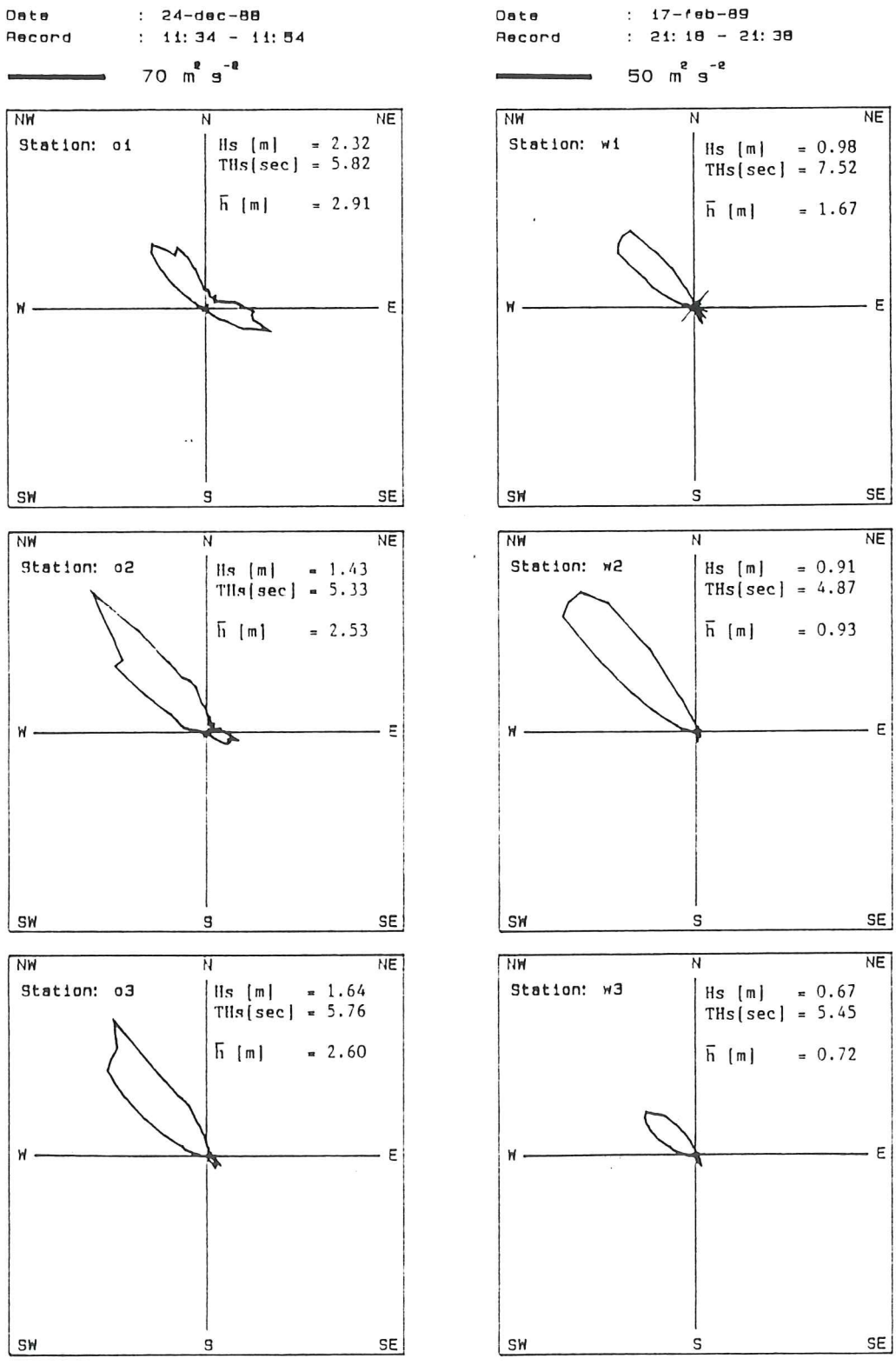


Abb. I.5: Richtungsspektren an den Stationen o1, o2, o3 für die Sturmflut vom 24.12.1988 und an den Stationen w1, w2, w3 für die Tide vom 17.02.1989

7.1.1.1 Naturmessungen der Sandkonzentrationen im Grenzschichtbereich

In Zusammenarbeit mit dem DIENST GETIJDEWATEREN des RIJKSWATERSTAAT wurden Naturmessungen der Sandkonzentration im Grenzschichtbereich zur Erfassung von Sheetflow-Effekten in der Auflaufzone auf dem Strand von Norderney vorgenommen. Unter Sheetflow wird der in Lagen von nur wenigen Korndurchmessern stattfindende Sedimenttransport an der Sohle bei hohen Geschwindigkeiten verstanden.

Auf der Basis einer Laborsonde wurde eine Vorrichtung entwickelt, die kontrollierte Messungen der Sandkonzentration auf dem Strand ermöglichte (Abb. I.6). Der eigentliche Sensorträger ist in einem Gestell beweglich montiert und kann über Gewindestangen um definierte Beträge in der Höhe an die variierende Lage der Sohle angepaßt werden. Die Steuerung erfolgt manuell durch Anleitung über Funk in Orientierung an der on line-Datenerfassung.

Die Grundsatzuntersuchungen führten insgesamt zu folgenden Erkenntnissen und Ergebnissen (YU, NIEMEYER, BAKKER 1991):

1. Die Sensoren und der Sensorträger sind für Sheetflow-Messungen in der Natur geeignet, bei manueller Betätigung bis zu Wassertiefen von etwa 1 m. Für Einsatz in größeren Wassertiefen ist eine elektronische Fernsteuerung über Kabel erforderlich.

2. Probleme stellen Geschwindigkeitsmessungen mit marktüblichen Sensoren in Sohlnähe dar. Für Messungen ohne die Gefahr von Kolkbildungen in unmittelbarer Sohlnähe sind Miniatursonden erforderlich.

3. Unter sheetflow-Bedingungen sind Bewegungen an der Sohle mit Schichtdicken bis zu 8 mm festgestellt worden.

4. Während einer Meßkampagne wurde bei auflaufender Flut innerhalb einer Stunde eine Schicht von insgesamt 55 mm erodiert; wobei in der letzten halben Stunde Erosionsraten von 1,5 mm/min festgestellt wurden.

Schrifttum:

YU, Z.; NIEMEYER, H. D.; BAKKER, W. T. (1991): Site investigation on sand concentration in the sheetflow layer. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York

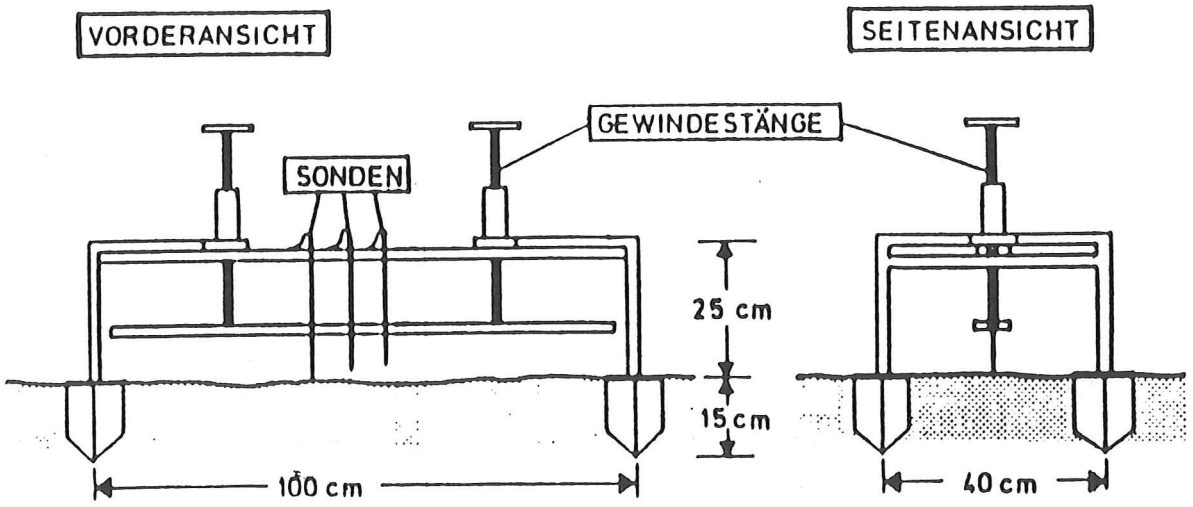


Abb. I.6.1: Darstellung der weiterentwickelten Meßkonfiguration zur Erfassung der sohlnahen Sedimentkonzentration bei Sheet-Flow-Bedingungen

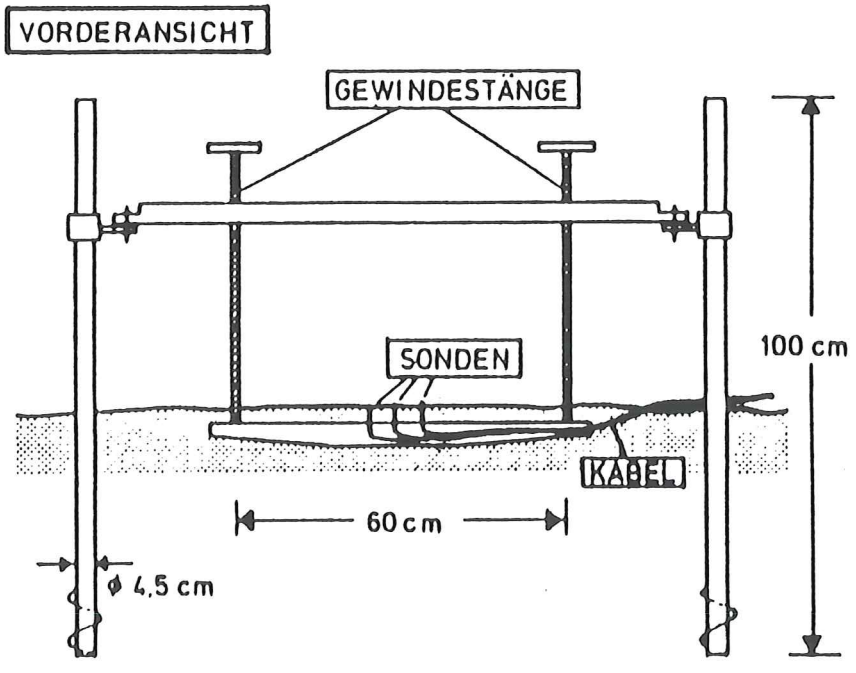


Abb. I.6.2 Detaildarstellung der Widerstandsmeßgeber zur Erfassung der Sedimentkonzentration bei Sheet-Flow-Bewegungen

7.1.2 Teilvorhaben "Naturuntersuchungen" - Teilprojekt "Sedimentologie/Morphologie" (Forschungsstelle Küste)

7.1.2.1 Sedimentologie

Vorbemerkungen

Als Teilprojekt des KFKI-Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" wurden zur Klärung der hydrodynamisch-morphologischen Vorgänge bei Strandauffüllungen am Anwendungsbeispiel Norderney umfangreiche sedimentologische Untersuchungen ausgeführt. Während bei den vorhergehenden fünf Norderneyer Strandaufspülungen die 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 Wechselbeziehungen 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 in den fünf Zwischenberichten und einer umfassenden Arbeit dargestellt (WESTHOFF 1990).

Untersuchungsverfahren

Der Strand und Inselvorstrand wurde in halbjährlichen Abständen entlang von 34 küstennormalen Profilen beprobt, um ein Gesamtbild längerfristiger Änderungen der Sedimentverteilung zu erhalten. Um auch kurzfristige Veränderungen zu erfassen, wurden in monatlichen Abständen Sedimentproben entlang von sieben Profilen entnommen, wobei der Schwerpunkt auf die Problembereiche mit besonders starken Strandhöhenverlusten gelegt wurde.

Die Sedimentproben wurden 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, entnommen. Von dieser Probenentnahmetechnik wurde bei der sedimentologischen Aufnahme des Aufspülkörpers abgewichen, bei der jeweils 9 Proben pro Buhnenfeld mit einem 12 cm tiefreichenden Stechzylinder entnommen wurden.

Der Inselvorstrand und das Ebbdelta des Norderneyer Seegats wurden vom Schiff aus durch einen Van-Veen-Greifers beprobt, der gestörte Sedimentproben liefert. Die Vorstrandproben wurden 50 m seeseitig der Buhnenköpfe, entlang der sogenannten Buhnenstreichlinie (BSL) gewonnen.

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

Ergebnisse

Ebbdelta des Norderneyer Seegats

Bereits in der Vergangenheit, insbesondere ab 1949, war das Ebbdelta des Norderneyer Seegats Gegenstand intensiver Untersuchungen hinsichtlich der Erfassung der Transportvorgänge. 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. Die unterschiedlichen Transportmedien und ihre Richtungen im Ebbdelta des Norderney Seegat wurden von WESTHOFF (1990) unter Einbeziehung veröffentlichter Untersuchungsergebnisse dargestellt.

Strand- und Vorstrandbereich

Bei allen bisherigen Strandauffüllungen wurden Sedimente im Fein-/Mittelsandbereich (überwiegend $d_{50} \approx 0{,}2$ mm) mit wechselnden Grobsandanteilen - im wesentlichen Schillbruch - aufgespült. Selektionsprozesse, die im Anschluß an die Auffüllungen feineres Material aussortierten, hatten eine Vergröberung zur Folge.

Die Strände des Westkopfes der Insel Norderney (Abb.II.1) unterscheiden sich durch verschiedene hydrodynamisch-morphologische Einflußgrößen (Abb. II.6). Dabei ist zu vergegenwärtigen, daß der Seegang und die dadurch induzierten Wirkungen stark von den jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten abhängen. Die Sedimentbilanz wird seit 1951 wesentlich von den Strandauffüllungen beeinflußt (siehe TP "Hydrographie" und Teil "Morphologie").

Der Weststrand unterscheidet sich hinsichtlich der Verteilung der d_{50}-Werte aufgrund der unterschiedlichen hydrodynamischen Einwirkungen (Norderneyer Seegat) von den anderen Strandabschnitten (Abb. II.2). Neben den seegangserzeugten Strömungen wirken hier in verstärktem Maße zusätzlich auch Tideströmungen (in den Buhnenfelder bis zu 30 cm/s). Aufgrund dieser Gezeitenströmungen, die in den anderen Buhnenfeldern am Nordwest- und Nordstrand nahezu vernachlässigbar sind, und deren Überlagerung mit seegangsinduzierten 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 jedoch geringer im Vergleich zu den Sedimenten des weiter östlich gelegenden 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 gröbsten Sedimente befinden sich jedoch in der Regel im Bereich der Mittelwasserlinie.

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 Platenanlandungsbereich 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 Sandbilanzes, d.h. aus dem Bereich der Platenanlandung des Riffbogens, gröbere Sedimente eingetragen werden. Der Übergang vom Bereich ausgeglichener zum Bereich positiver Sedimentbilanz zeichnet sich durch eine Vergröberung in der Korngrößenzusammensetzung ab, die durch den Eintrag von überwiegend Mittelsand- mit Grobsand- bzw. Schillanteilen aus dem Riffbogen verursacht wird (Abb. II.2).

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. II.2). 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. II.3).

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

Allgemein kennzeichnend ist ein Anstieg der Schwermineralgehalte vom Vorstrand zum trockenen Strand, der auch 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 zufolge hat. Die Schwermineralgehalte der Strandsedimente nehmen von West nach Ost ab. Parallel dazu vermindert sich die Differenz der Schwermineralanteile der Sedimente, die an 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. II.4).

Sedimentumlagerungsintensitäten

Die Umlagerungsintensitäten wurden durch kurzzeitige tachymetrische Aufnahmen der Strandhöhen, durch Untersuchungen mit sogenannten Grenzwertanzeigern und mit Farbsandversuchen untersucht. Der Nachteil der erstgenannten Methode ist, daß nur das Endresultat der Umlagerungsvorgänge ermittelt werden kann. Durch die zweitgenannte, auf GREENWOOD et al. (1979) zurückgehende Methode kann die Erosionstiefe sowie die Sedimentationshöhe bestimmt werden.

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 Buhnenfeld D_1-E_1 an, um die Stärke der Umlagerungen über einige Tiden zu bestimmen.

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.

7.1.2.2 Morphologie

Deutung volumetrischer Untersuchungen zu Wechselwirkungen

Für das seit Mitte des vorigen Jahrhundert ausgebaute System von Küstenschutzbauwerken (Buhnen und Dünenschutzwerke) wurde seit 1951 die Strandaufspülung als Methode des "aktiven Küstenschutzes" (Schutz vor Zerstörung durch Erosion bei Sturmfluten infolge zu tiefer Strandlagen) ausgeführt. Das kombinierte Schutzsystem (Strandvorspülungen bis einschließlich 1989) ist auf der Abb. II.5 dargestellt.

Bedingt durch die Gestalt und die Lage des Westkopfes der Insel Norderney sind die Küstenschutzwerke (Buhnenfelder) den Einwirkungen der natürlichen Umwelt in unterschiedlicher Weise ausgesetzt. Will man die Ergebnisse volumetrischer Berechnungen ursächlich deuten, verschiedene Standorte miteinander vergleichen und verallgemeinerbare Erkenntnisse gewinnen, so muß eine räumliche Zuordnung vorgenommen werden. Dies war möglich, weil die dafür im wesentlichen maßgebenden hydrographischen und morphologischen Gegebenheiten aufgrund vorliegender Untersuchungen weitgehend bekannt sind. Die von der FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY (1950) durchgeführten Untersuchungen sind auch heute noch aussagefähig hinsichtlich der großräumig sich entfaltenden hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen. Die von NIEMEYER (1986, 1987) mitgeteilten Ergebnisse gestatten zudem eine Beurteilung der Wirkungen von Tide und Seegang auf die Buhnenfeld--Bereiche. Bestätigungen und verfeinerte Erkenntnisse konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" gewonnen werden.

Volumen-Zeit-Funktionen

Wie auf der Abb. II.6 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 Buhnenfeld-Bereiche maßgebend ist und daß die bereits von THILO/-KURZAK (1952) begründete Festlegung des "Divergenzbereichs" auf den westlichsten Teil des Inselkopfes (etwa zwischen den Buhnen A und C, siehe Abb. II.5) auch heute noch zutrifft. Der Divergenzbereich ist dadurch gekennzeichnet, daß die Transporte in den Buhnenfeldern ganz überwiegend in Querrichtung verlaufen und keine größeren Materialzuführungen aus benachbarten Feldern vorhanden sind. Wegen dieser Eigenschaft wurde für die im

Rahmen des Forschungsvorhabens vorgesehenen speziellen volumetrischen Untersuchungen der Bereich zwischen den Buhnen A und C gewählt.

Für beidseitig des Divergenzbereichs festzulegende weitere "Bereichseinheiten" wurden die Volumen für sämtliche Buhnenfelder ab 1951 berechnet und ausgewertet (STEPHAN 1988, KUNZ 1991a).

Art und Korngröße des Strandmaterials beeinflussen das Transportverhalten und sind mitbestimmend für die Gestalt der Strandprofile. Im Bereich Norderneys war kein gröberer Sand zu gewinnen, so daß keine aussagefähigen Untersuchungen zur Abhängigkeit der Volumenänderungen (Strandverluste) vom Korndurchmesser ausgeführt werden konnten. Aus veröffentlichten Ergebnissen läßt sich rückschließen, daß die Korndurchmesser des Strandmaterials in den aufgespülten Strandabschnitten von Norderney nicht so unterschiedlich waren, als daß man bei der Analyse der zeitlichen Volumenänderungen materialspezifische Korrekturen vornehmen müßte (SWART 1991).

Auf Norderney wurden nach 1976 die Strandaufspülungen in kurzen Zeitabständen wiederholt (siehe Abb. II.5), so daß lediglich für die davorliegende Zeitspanne die Beziehung zwischen Volumen und Zeit über mehr als 5 Jahre zu untersuchen waren. 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 auszuwerten ist.

Die Untersuchungen zum Verhalten in den ersten 5 Jahren können auf Daten aller Aufspülungen bezogen werden. Voruntersuchungen ergaben, daß dabei die Aufspülung des Jahres 1961 wegen zu geringer Mengen und diejenige des Jahres 1982 wegen unzureichenden Datenumfangs (1984 war bereits die nächste Aufspülung) nicht mit einzubeziehen sind.

Allen Volumen-Ermittlungen lag der "Bilanzraum" zugrunde, der durch das "Referenzprofil von 1950" (Annäherung an das sogenannte Gleichgewichtsprofil) und durch die "Tiefenbegrenzung von NN -1,50" (Horizontale) festgelegt ist.

Die Volumen-Werte sind von den Zufälligkeiten der zugrundeliegenden "Momentaufnahmen" bestimmt. Die Zuordnung von Jahreswerten für Verweilzeiten und Eintrittshäufigkeiten von Sturmflutwasserständen ermöglichte keine Rückschlüsse auf systematische Streuungen; erst Untersuchungen in kleinskaligem Zeitmaßstab, wie sie für Norderney von HOMEIER (1976) veröffentlicht wurden, lassen die Abnahme und die nachfolgende erneute Zunahme der Werte infolge sturmfluterzeugter Profilumformungen erkennen. Dies gilt analog für die Deutung von Einflüssen der seit langem bekannten saisonalen Schwankungen, oft als "Sommer- und Winterprofile" bezeichnet (BASCOM 1954). Die Einbeziehung integrierter Wellenenergie--Größen ermöglichte auch mit den Norderney-Daten einen empirischen Nachweis von Bezie-

hungen zu Verlust-Volumen (PÄTZOLD 1982). 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" annähernd einer e-Funktion zuordnen lassen, z. B. AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE (1977, 1981), FÜHRBÖTER (1991). Dieses ist nicht für die Zeitreihe 1951 bis 1976 von Norderney möglich. Es sind wenigstens zwei Zeitabschnitte zu unterscheiden: 1951 - 1955 und 1956 - 1976. Diesen Zeitabschnitten angepaßte e-Funktionen weisen sehr verschiedene "Halbwertzeiten" auf: für die Anfangsphase (1951 - 1955) würde man ermitteln, daß das aufgespülte Volumen etwa 7 mal so schnell sich auf die Hälfte verringerte, wie in der darauffolgenden Zeitspanne (1956 - 1976) - KUNZ (1991a), KUNZ/STEPHAN (1992).

Die vorgestellte Annäherung durch zwei Funktionen ist unbefriedigend. Es wurde daher eine stetige Exponential-Funktion angepaßt, die aber im Exponenten nicht mehr eine Konstante, sondern eine von der Zeit abhängige Variable aufweist. Ein ursächlicher Zusammenhang der ermittelten 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 Teilvorhaben belegen (NIEMEYER 1992).

Für den Divergenzbereich (A - C) wurde nachgewiesen, daß sich die Verluste enorm vergrößern, sobald man das Strandvolumen über einen kritischen Wert erhöht. Damit ist für eine Minimierung der Sandverluste besonders entscheidend, daß man den Strand nicht in einer höheren Profillage hält, als dies für die Sicherung der Küstenschutzwerke gegen Sturmflut-einwirkungen unbedingt notwendig ist. Eine Minimierung der Sandverluste ist einerseits im Hinblick auf Kostengesichtspunkte von Interesse. Andererseits ist geeigneter Seesand an einigen Standorten nur in begrenzter Menge verfügbar, was bei steigendem Bedarf einen sparsamen Umgang mit dieser Resource nahelegt.

Das zur Gewährleistung der Schutzwirkung erforderliche Minimalvolumen ist auf Norderney für jedes Buhnenfeld aufgrund küstenschutztechnischer Überlegungen festzulegen. Dies führt zu Fragestellungen einer Kosten-Optimierung zwischen Aufspülmengen und den von der Gestaltung und dem Erhaltungszustand der Küstenschutzbauwerke abhängigen Größe des erforderlichen Minimalvolumens. Die Optimierung setzt u.a. voraus, daß man weiß, wie sich die Verluste aufgespülter Sandmengen mit den Variablen ändern. Diese Kenntnis konnte auf der Grundlage volumetrischer Untersuchungen gewonnen werden (KUNZ 1991b; KUNZ/-STEPHAN 1992).

Die ausgeführten morphologischen Untersuchungen führten zu Ergebnissen, die weiterführende Erkenntnisse erbrachten für die Grundsätze zur Gestaltung und Bemessung von Strandaufspülungen (Strände mit und ohne integrierte Schutzwerke). Es konnte gezeigt werden, daß die Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen Küstenschutzwerken und der marinen Umwelt einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der Systeme zu leisten vermag. Im Hinblick auf die Strandaufspülung waren die folgenden Grundsätze abzuleiten:

- der aufgespülte Strandbereich ist so zu wählen, daß die Sandverluste sich in möglichst großem Maße in benachbarte Gebiete mit ebenfalls negativer Sandbilanz bewegen (feeder beach-Funktion),
- eine Aufspülung möglichst kleiner Sandmengen in häufiger kurzzeitiger Wiederholung führt zu den kleinsten Verlusten,
- Querwerke im Strand (Buhnen) wirken sandverlustmindernd, wenn sie ausreichend hoch über den Strand herausragen,
- nur durch eine Verknüpfung der Kenntnisse darüber, wie "Sandverluste" und "Spülkosten unter Berücksichtigung der einsetzbaren Technik" von der "Aufspülmenge (bezogen auf Strandlängen-Einheit)" abhängen, läßt sich eine Strandaufspülung optimieren.

Die vorgestellten Ergebnisse ergänzen diejenigen des KFKI-Vorhabens "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt".

Schrifttum:

AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZBAUWERKE der HTG und DGEG (1977, 1981): Empfehlungen für Strandauffüllungen als Küstenschutz; Naßbaggerberichte Bd. 5; Die Küste H. 36

BASCOM, W.H. (1954): Characteristics of natural beaches; Proc. 4. Conf. o. Coastal Engin., ASCE.

DETTE, H.H. (1991): Energetische Betrachtungen zu seegangserzeugten Änderungen der Küstenmorphologie; Statusseminar Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt, S. 97-124; BMFT, Bonn.

EITNER, V.; RAGUTZKI, G.; WESTHOFF, T. (1992) Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer küsnstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge; Die Küste H. 54

FORSCHUNGSSTELLE NORDERNEY (1950): Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordwest-Strand der Insel Norderney; Jber. d.Forsch.-Stelle 1949, Bd. I u. II, Norderney.

FÜHRBÖTER, A. (1991): Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen; Die Küste H. 52

GREENWOOD, B., HALE, P.B., MITTLER, P.R. (1979): Sediment Flux Determination in the Nearshore Zone: Prototype Measurements; Workshop on Instrumentation for Currents and

Sediments in the nearshore Zone; Natl. Res. Council: S. 99-119, Ottawa.

HOMEIER, H. (1976): Die Auswirkungen schwerer Sturmtiden auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen; Jber. 1975 Forsch.-Stelle f.Insel- u. Küstenschutz 27: S. 107-122, Norderney.

KUNZ, H. (1991a): Artificial beach nourishment on Norderney, a case study; Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 3: New York (ASCE).

KUNZ, H. (1991b): Protection of the island of Norderney by Beach Nourishment, Alongshore Structures and Groynes; Proc. 3. Intern. Conf. on Coastal a. Port Engineering in Developing Countries; Bd. 1, S. 29-42, COPEDEC, Mombasa.

KUNZ, H, STEPHAN, H.-J. (1992) Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney; Die Küste H. 54

NIEMEYER, H.D. (1986): Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney; Jber. 1985 Forsch.-Stelle Küste 38: S. 49-95, Norderney.

NIEMEYER, H.D. (1987): Tidestrommessungen in Buhnenfeldern; Jber. 1986 Forsch.-Stelle Küste 38: S. 127-150, Norderney.

NIEMEYER, H.D. (1991): Field measurements and analysis of wave induced nearshore currents.; Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 1: S. 783-797, New York (ASCE).

NIEMEYER, H.D. (1992): Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen; Die Küste H. 54

PÄTZOLD, U. (1982): Bilanz und Verformung aufgespülter Sandstrände; Jber. Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 32, S. 41-53, Norderney.

STEPHAN, H.-J. (1988): Fünf Strandauffüllungen vor Norderney - Ergebnisse morphologischer Untersuchungen; Bericht Forsch.-Stelle Küste, Norderney (unveröffentl.).

SWART, D.H. (1991): Beach nourishment and particle size effects; Coastal Engineering, 16, S. 61-81, Elsevier, Amsterdam.

THILO, R., KURZAK, G. (1952): Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordwest-Strand der Insel Norderney; Die Küste, Jg. 52, H. 1, S. 1-20, Heide.

VEENSTRA, H.J.&WINKELMOLEN, A.M. (1976): Size, shape and density around two barrier islands along the north coast of Holland.- Geol. Mijnb.55(1/2):87-104; s'Gravenhage.

WESTHOFF, T. (1990): Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney; Diss. Univ. Münster, 189 S., Münster.

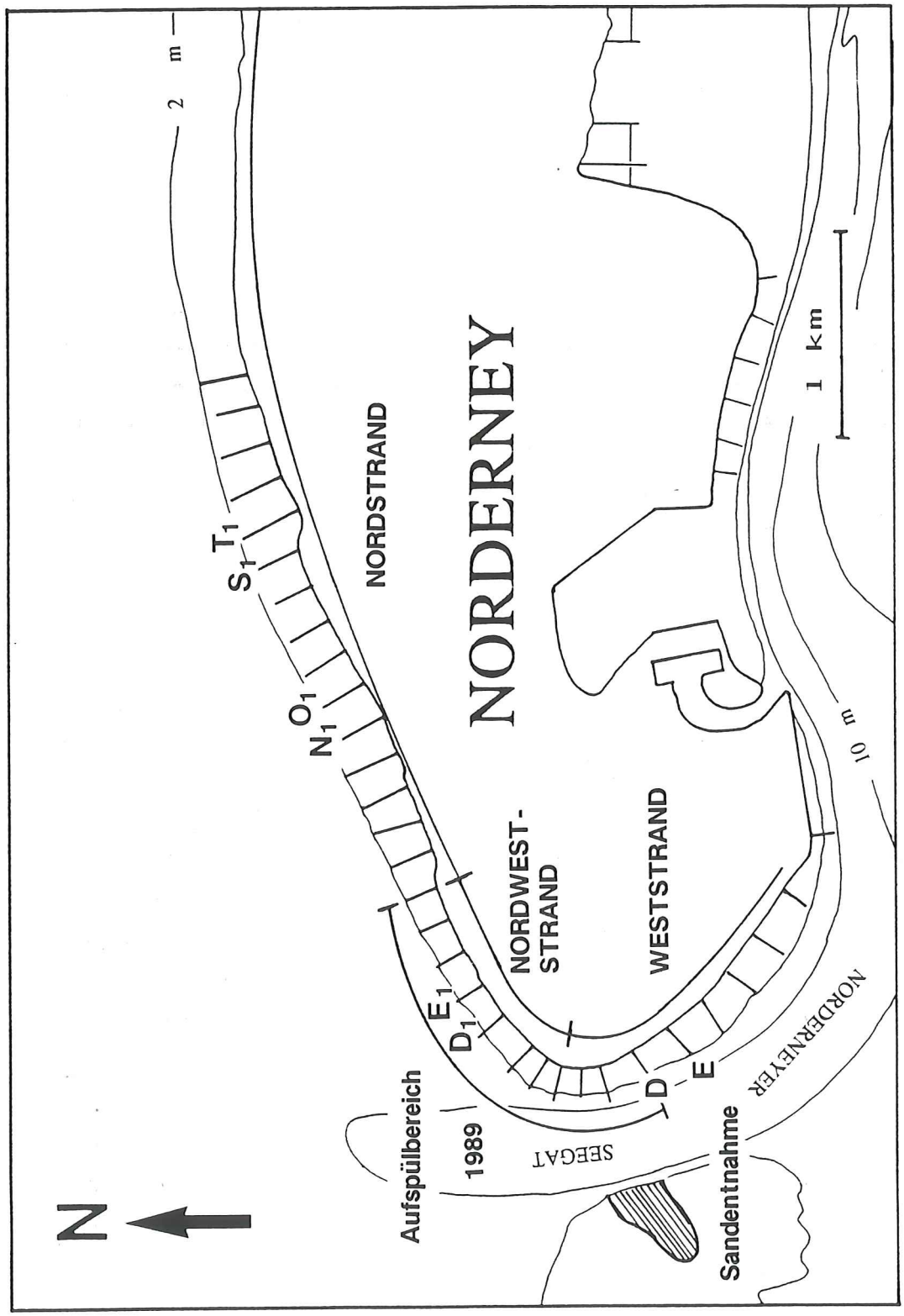


Abb. II.1 Lageplan des Untersuchungsgebiets und Ortshinweise auf die unterschiedlichen Strandabschnitte

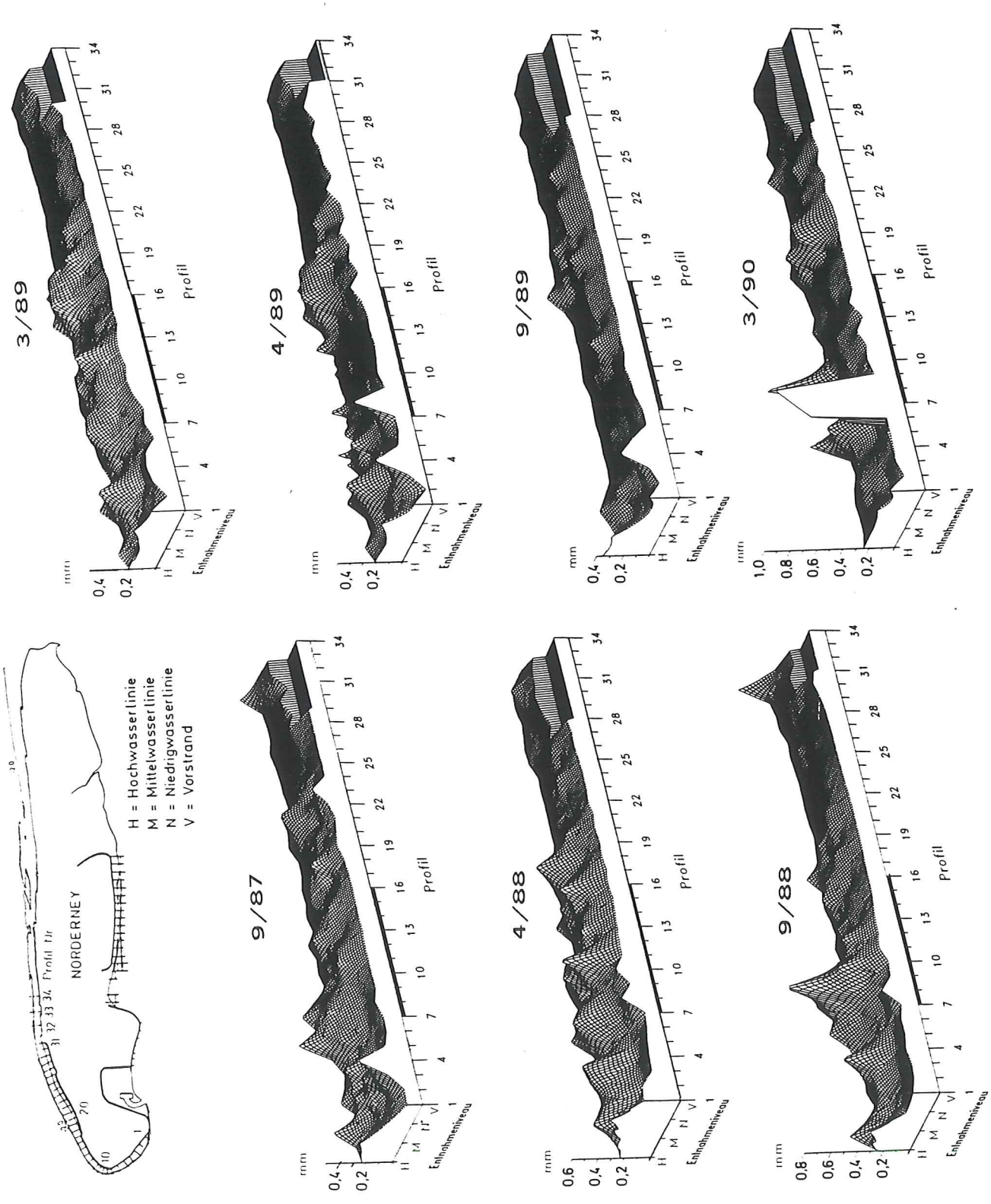


Abb. II.2 Verteilung des d_{50}-Wertes des Sandes im Strand- und Vorstrandbereich im Gesamtabschnitt des befestigten Westteils von Norderney

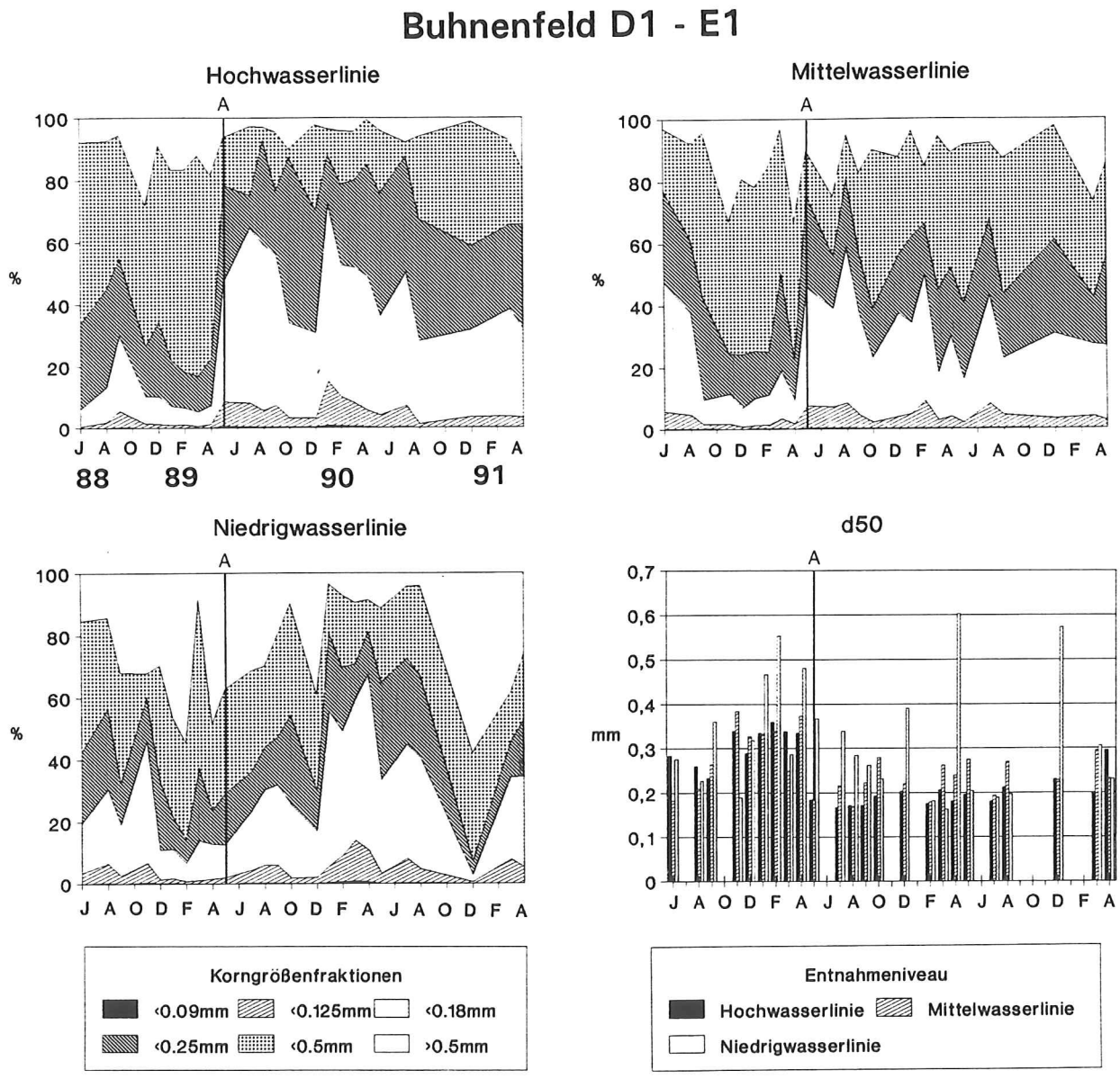


Abb. II.3 Zeitliche Entwicklung der Korngrößenverteilung und des d_{50}-Wertes des Sandes im Buhnenfeld D_1 - E_1 (A: Aufspülung)

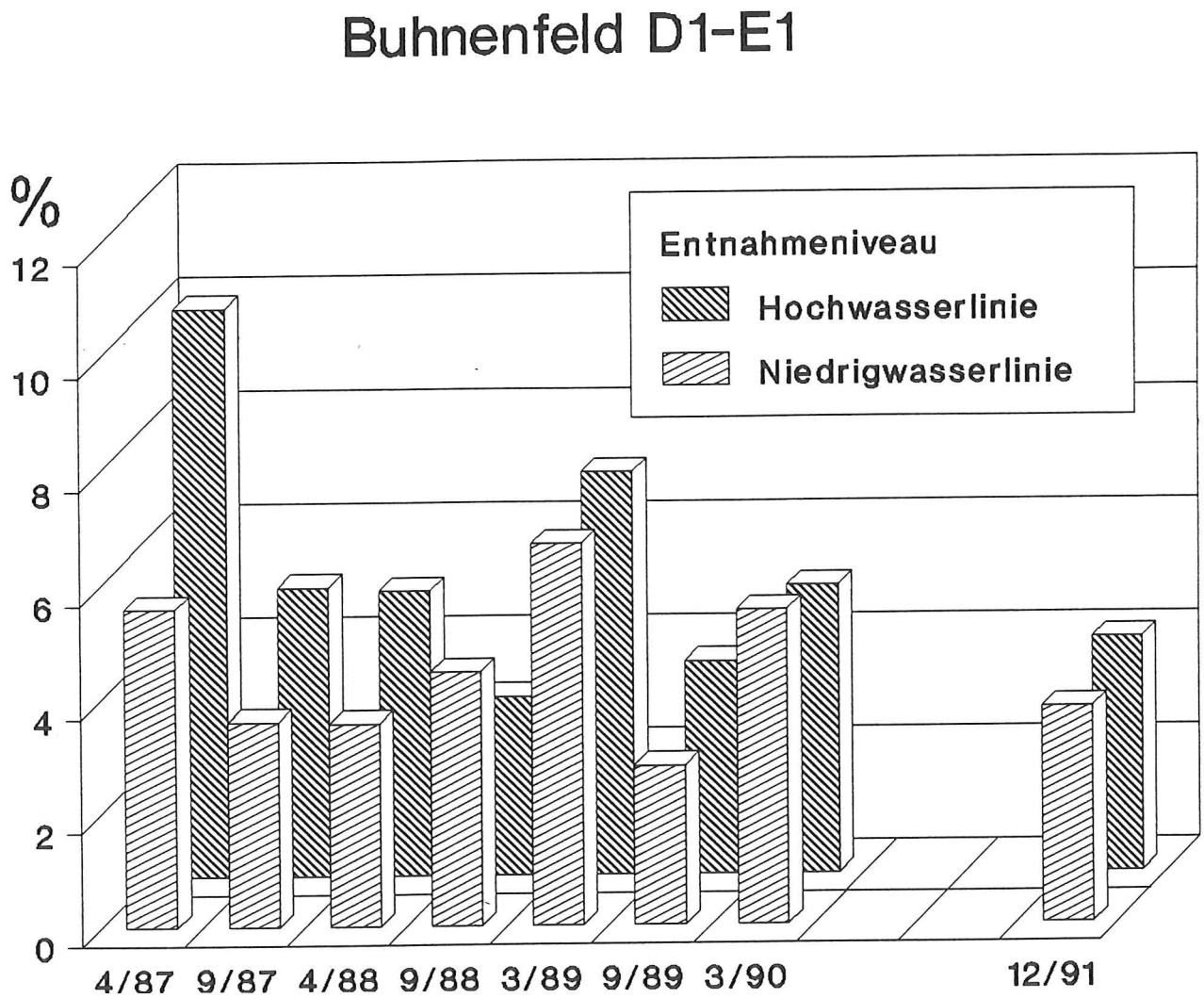


Abb. II.4 Jahreszeitlich bedingte Variabilität der Schwermineralgehalte des Sandes im Buhnenfeld D_1 - E_1, unterschieden nach Hoch- und Niedrigwasserlinie in % vom Gesamtwert

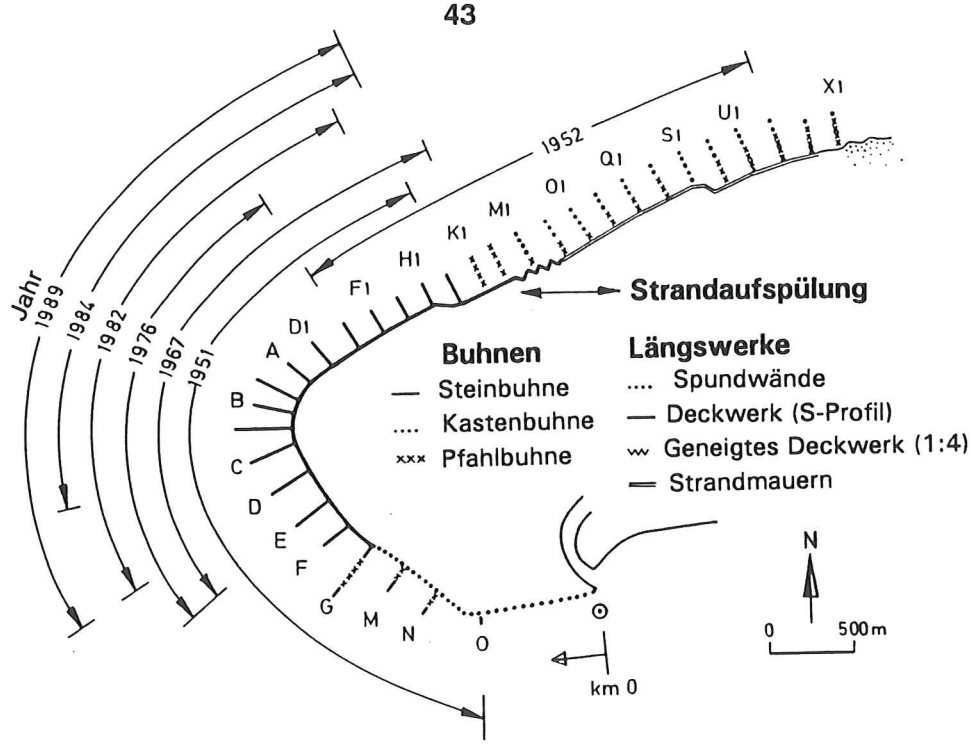


Abb. II.5 Lageplan der Küstenbauwerke (Strand-Buhnen, Dünen-Längswerke) und der Strandaufspülungen (1951 bis 1989) zum Schutz des Westteiles der ostfriesischen Düneninsel Norderney

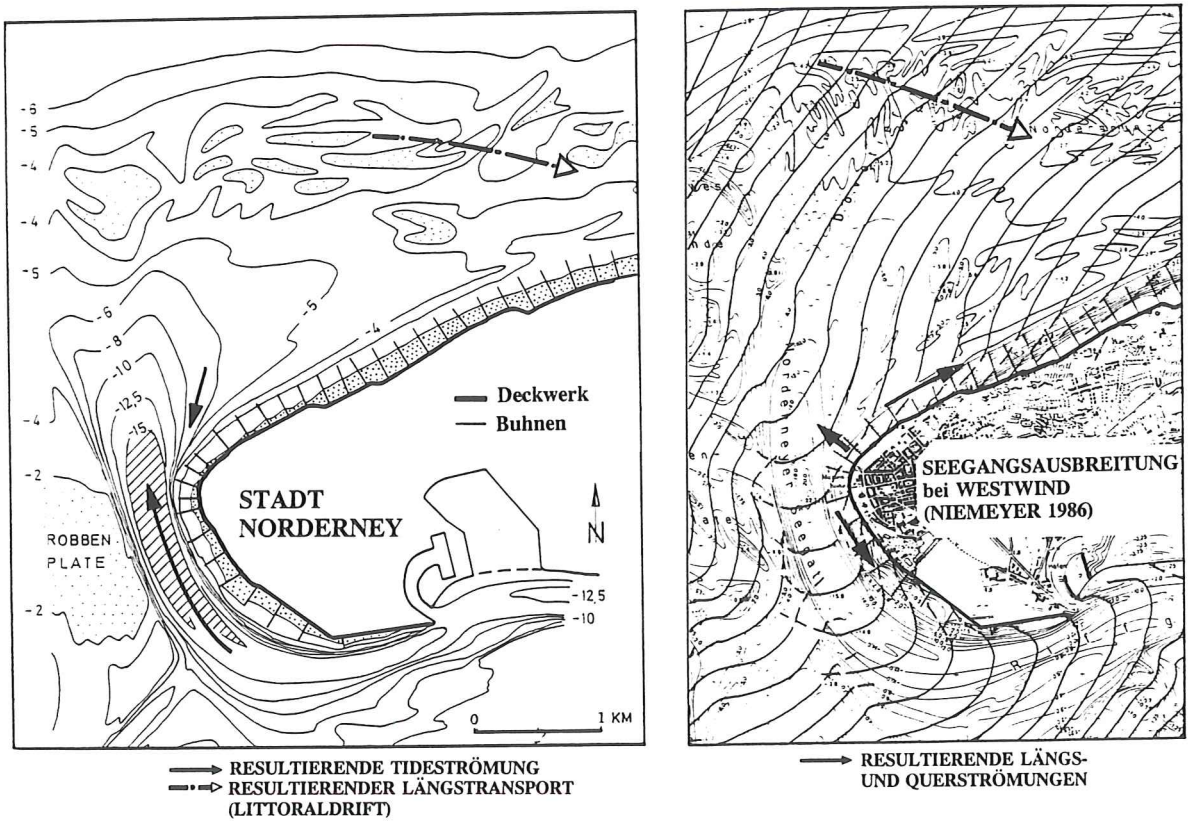


Abb. II.6 Skizzen zu den natürlichen Krafteinwirkungen aus Tide (linkes Bild) und Seegang (rechtes Bild)

Berichte zu den Teilprojekten 1.1 und 1.2 ("Hydrographie" und "Sedimentologie/Morphologie")

NIEMEYER (1990): Zwei Dokumentationen zum hydrographischen Meßsystem (unveröffentl.) u. Auswertungsbeispiel für Seegangs- und Strömungsmessungen (unveröffentl.)
RAGUTZKI/WESTHOFF (1987-1990): Fünf Zwischenberichte zu den sedimentologischen Untersuchungen (unveröffentl.)
STEPHAN (1988): Fünf Strandauffüllungen vor Norderney - Ergebnisse morphologischer Untersuchungen (unveröffentl.)
WESTHOFF (1990): Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney; Diss. Uni Münster
WESTHOFF (1991): Markierungsversuch mit Luminophoren zur Kennzeichnung des Sedimenttransportes in einem Buhnenfeld, Zwischenbericht (unveröffentl.)
EITNER/RAGUTZKI/WESTHOFF (1992): Sedimentologische Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt; Schlußbericht zum FV MTK 0385 - Teil "Sedimentologie", August 1992 (unveröffentl.)
KUNZ/STEPHAN (1992): Morphologische Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt; Schlußbericht zum FV MTK 0385 - Teil "Morphologie", September 1992 (unveröffentl.)
NIEMEYER (1992): Naturuntersuchungen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen an erodierenden Stränden; Schlußbericht zum FV MTK 0385 - Teil "Hydrographie", Dezember 1992 (unveröffentl.)

Veröffentlichungen über Ergebnisse aus dem Teilvorhaben "Naturuntersuchungen" Teilprojekte 1.1 und 1.2: "Hydrographie" und "Sedimentologie/Morphologie" (Forschungsstelle Küste)

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; Druck in Vorber.
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.
KUNZ, H. (1991): Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. - Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 3:3254-3267; New York (ASCE).
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, 29-42; Mombasa (COPEDEC).
KUNZ, H., H.-J. STEPHAN (1992): Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney; Die Küste, H. 54; Druck in Vorber.

NIEMEYER, H.D. (1987b): Tidestrommessungen in Buhnenfeldern, 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 Transportphenomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen, Die Küste, H. 54, Druck in Vorber.
WESTHOFF, T. (1990): Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten, Diss. Univ. Münster, 189 S.; 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.

7.3 Teilvorhaben "Naturuntersuchungen" - Teilaufgabe Schubspannungsmessungen (Gust, TU Hamburg-Harburg)

Zur Teilaufgabe 1.3 wurde ein in sich geschlossener Schlußbericht vorgelegt: G. GUST (TU Hamburg-Harburg) "Naturuntersuchungen - Schubspannungsmessungen; Schlußbericht zum FV MTK 385 - Teil "Schubspannungsmessungen", Dezwmber 1992

Im Rahmen des Teilvorhabens "Schubspannungsmessungen im Strandbereich" wurden erfolgreich Sonden und Meßsysteme entwickelt, mit denen innerhalb der Brandungs- und Swash-Zone sowohl Geschwindigkeiten in unmittelbarer Bodennähe (Höhen < 10 cm) als auch Bodenschubspannungen gemessen werden können. Diese wurden anschließend als Prototypen gebaut und im Strandbereich innerhalb der Brandungs- und Swash-Zone im Hauptmeßfeld Norderney in zwei Meßkampagnen (August 1990) in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle Küste erfolgreich eingesetzt. Aufgrund des bisherigen Fortganges der Entwicklungen und der erzielten Messungen ist belegt worden, daß die Technologie existiert, um räumlich und zeitlich hochauflösend die hydrodynamischen Vorgänge am Boden im Strandbereich unter Feldbedingungen zu messen.

Technische Entwicklungen und anschließende Messungen ergaben im Antragszeitraum: die Technik und der angestrebte Einsatz zur Erfassung der bodennahen Hydrodynamik ist realisierbar und kann (obwohl bisher mit gewissen Einschränkungen) die gewünschten Daten liefern. Das System ist zur Zeit autark betreibbar und besteht aus einem "intelligenten" Datenaufzeichnungs- und Programmsteuerungssystem, welches über Kabel mit einem der jeweiligen Einsatzart angepaßten Sondenturm patentierter Geschwindigkeitssonden verbunden ist. Dieser Sondenturm wird in das Sediment eingespült und weist aufgrund seiner geringen Strömungs-Angriffsfläche eine sehr hohe Stabilität unter geringster Störung der Umgebungsbedingungen, selbst unter brechenden Wellen, auf. Es ist möglich, mittels dieser Sondenanordnung mehrere Aufgaben simultan zu untersuchen:

1. Es können Sohlfluktuationen als Reaktion auf Wellen, Boden und Strömungen hochauflösend über Tidenzyklen erfaßt werden (Abb. III.1).

2. Es können Orbital-Geschwindigkeiten pro Wellenzug hochauflösend erkannt werden.
3. Es können zugehörige Bodenschubspannungen für diejenige Teilsonde des Sondenturms erkannt werden, die bündig relativ zu dem umgebenden Boden eingebaut ist.

Es hat sich als schwierig erwiesen, Bodenschubspannungen einwandfrei zu bestimmen ohne zusätzliche Kenntnis über die pro Wellenzug auftretenden, im Rahmen des Projektes aufgezeichneten hochfrequenten Sohlumlagerungen. Durch den bodennahen Sedimenttransport ähneln sich die Signale für Bodenschubspannung und Geschwindigkeit sehr stark. Eine Bodenkontaktanzeige wird diese Situation verbessern. Mittels dieser Anlage, zu der auch die entsprechenden programmladenden sowie datenauslesenden PC-Schnittstellen und Software-Pakete gehören, ist in Beispielsfällen der Wellenwiderstand innerhalb des Strandbereiches durch gleichzeitige Messungen lokaler Geschwindigkeiten und Bodenschubspannungen bestimmt worden. Die erzielten Ergebnisse weisen einen sehr großen Streubereich auf, liegen im Mittel jedoch unter den in der Literatur angegebenen Werten. Diese Unterschiede werden besonders deutlich im Vergleich zu gleichzeitig durchgeführten Messungen der Forschungsstelle Küste mit elektromagnetischen Strömungsmessern, gegenüber denen die Geschwindigkeitsangaben ebenfalls zu niedrige Werte ergaben. Die Ursachen und deren Korrektur sollen im Nachfolgeprojekt untersucht werden, wobei bereits jetzt bekannt ist, daß sie zum größten Teil in einem systematischen, korrigierbaren Unterschied des gewählten Eichverfahrens liegen. Für Geschwindigkeiten oberhalb von 45 cm/s hat sich herausgestellt, daß je nachdem, ob die Strömung bzw. Eichung in laminarer oder turbulenter Umgebung abläuft, eine unterschiedliche Eichkurve anzuwenden ist.

Als wichtigstes Ergebnis der bisherigen Untersuchungen läßt sich erkennen, daß die Meßanlage ermöglicht, kontinuierlich pro Wellenzug die auftretenden Fluktuationen der Sohllage zu erfassen und damit zusammenhängend Erosions- und Despositionsgeschwindigkeiten des Sediments zu quantifizieren (Abb. III.2). Darüber hinaus kann die Wellengrenzschicht unmittelbar am Boden aufgelöst werden, die im allgemeinen kleiner als 1,5 cm zu sein scheint.

Die geplanten Veröffentlichungen von den Daten und Ergebnissen der zwei bisherigen Meßkampagnen werden nach erfolgter Nacheichung (nach Bau eines Kalibrierstandes am neuen Arbeitsbereich an der TUHH) erscheinen.

Hinweis: Der Text ist die vom Verfasser gekürzte Fassung einer Mitteilung von Herrn Prof. Gust.

Berichte zur Teilaufgabe 1.3 (Prof. G. Gust, TU Hamburg-Harburg)

GUST (1992): Sonderaufgabe "Schubspannungsmessungen", Zwischenbericht (unveröffentl.).
GUST (1992): Naturuntersuchungen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen an erodierenden Stränden - "Schubspannungsmessungen"; Schlußbericht zum FV MTK 385 - Teil " Schubspannungsmessungen", Dezember 1992 (unveröff.)

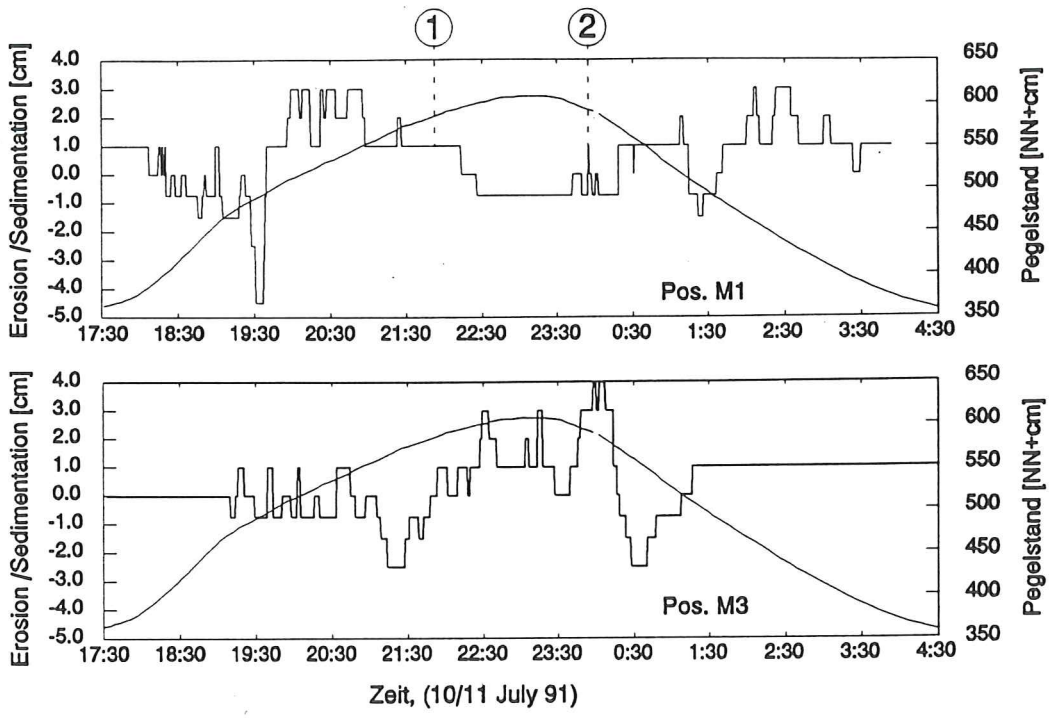


Abb. III.1 Erosion/Deposition während einer Tide mit Angabe der Tidekurve für den Pegel Norderney-Riffgat

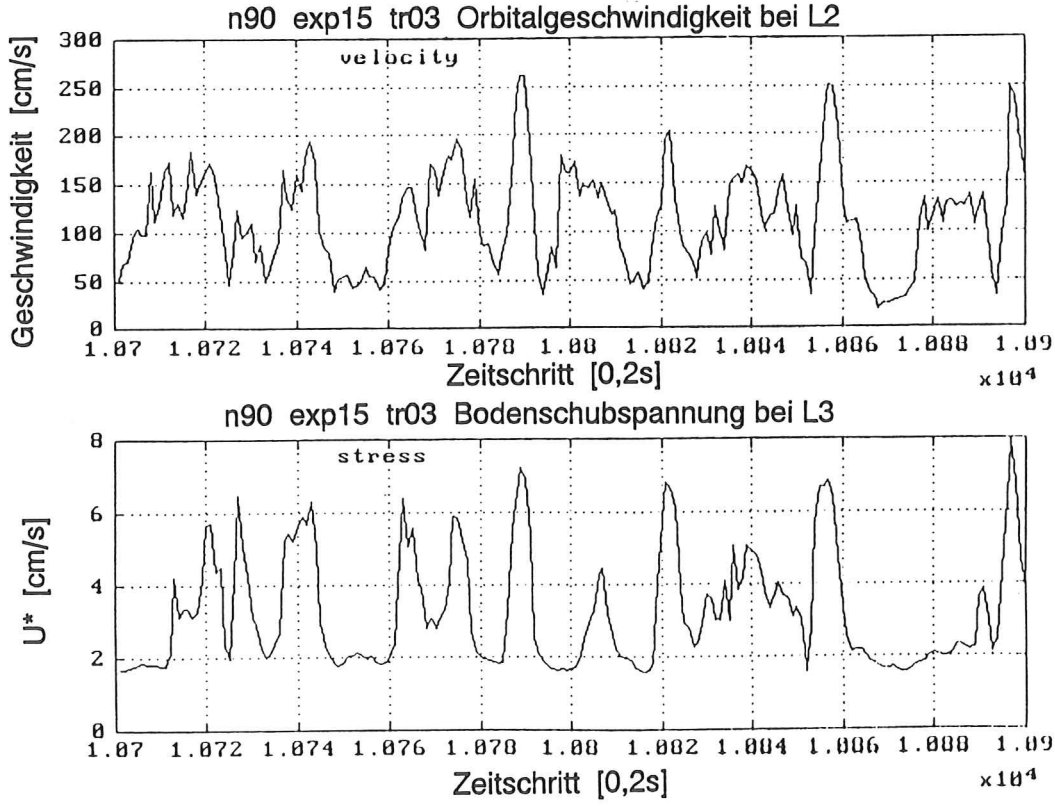


Abb. III.2 Demonstration der Orbital- bzw. Swashzonengeschwindigkeiten ca. 2 m über Boden (oben) und zugehörige Bodenschubspannungen (unten)

7.4 Teilvorhaben Naturuntersuchungen - Teilprojekt Meteorologische Messungen und Modellrechnungen (Seewetteramt Hamburg)

Zum TP 1.4 liegt ein in sich geschlossener Schlußbericht vor: DWD-Seewetteramt (H. SCHMIDT, J. PÄTSCH): Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen; Schlußbericht zum FV 385 - Teil "Meteorologie" (Proj. 104 des DWD), August 1992.

Vorbemerkung

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 Korrektion 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 zum einen aus einem Windmeßprogramm, um das notwendige Basismaterial bereitzustellen und um auch die anderen Teilprojekte mit Zeitserien des Windes versorgen zu können. Zum anderen 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.

Windmessungen

In der Meteorologie ist schon seit langem bekannt, daß die Windverhältnisse an einem Meßort (-punkt) zum einen natürlich von den großräumigen Klimabedingungen, zum anderen aber von der Höhe über Grund und kleinräumig ganz entscheidend von der Rauhigkeit des Erdbodens in der näheren und weiteren Umgebung sowie von orographischen Strukturen geprägt werden. Daher bestückte das SWA auf der Insel Norderney zu den bestehenden Windmeßeinrichtungen "Wetterstation" (DWD) und "Wattpfahl" (Forschungsstelle Küste) noch vier andere Orte mit Meßeinrichtungen. Die Lage der Stationen ist in Abb. IV.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. An drei der neuen Stationen wurden moderne Sensoren verwendet, deren digitale Signale direkt von einer elektronischen Meßwertverarbeitung im Takt von 1 Sekunde aufge-

nommen und über je 10 Minuten zu Mittelwert, Standardabweichung und Maximalwert von Richtung und Geschwindigkeit verarbeitet wurden. Errichtung und Betrieb des meteorologischen Meßsystems erfolgte in Zusammenarbeit mit der Forschungsstelle Küste.

Numerisches 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). Hinweise sind in SCHMIDT/PÄTSCH (1992) gegeben.

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 Rauhigkeitssprüngen durch Vergleich mit dem sehr aufwendigen Grenzschichtmodell GESIMA der GKSS (Geesthacht) erreicht werden. Anhand der Windmessungen auf Norderney wurde auch das Verhalten im Nahfeld (50-100 m) sowie die grundsätzliche Einstellung der wenigen freien Parameter ("Schrauben") des Modells der Natur angepaßt.

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

Aus den Messungen des vierjährigen Projekt-Zeitraums (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 10-jährigen Zeiträumen 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.

Der Wind über vorwiegend ebenem Gelände (wie auf Norderney) wird an einem Punkt im wesentlichen durch die stromauf vorhandene Rauhigkeit der Erdoberfläche bestimmt. Daher

muß hier eine Unterscheidung nach Windrichtungen vorgenommen werden. Die Klassenbreite der Richtung beträgt 30°, 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 Stundenmittelwert) 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 beispielhaft in der Abb. IV.2 als dicke Linie mit Symbolen dargestellt. Die Abbildung enthält die Verhältnisse für das Wasserwerk und den Nordpfahl. Entsprechende Auswertungen wurden für alle Stationen vorgenommen; für den Wattpfahl lagen allerdings nicht genügend Messungen vor. Es zeigten sich erhebliche Unterschiede zwischen den Stationen, die zusätzlich noch mit der Windrichtung stark variieren.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen für die 12 Anströmrichtungen sind in der Abb. IV.2 für die zwei Stationen zusätzlich als dünne Linienzüge eingetragen. Eine Zuordnung zu den Kurven der Messungen (dicker, mit Symbolen) ist leicht möglich, da sie immer nahe beieinander liegen. Die Modellrechnungen geben die gemessenen Windverhältnisse folglich sehr gut wieder. Die mittlere Abweichung, über alle Richtungen und alle fünf Stationen berechnet, beträgt 0,3 m/s. Es ist daraus zu schließen, daß die Modellrechnung eine entsprechende Güte auch an allen anderen Gitterpunkten aufweist.

Als sehr dicke Linie sind die Windwerte für die ungestörte Anströmung der Modellrechnung in 10 m Höhe eingetragen. Diese Werte entsprechen den Windverhältnissen auf der "freien See", man kann sich darunter einen Punkt etwa 5-10 km nördlich der Insel Norderney vorstellen. Er liegt also noch im Küstenvorfeld. Es ist zu beachten, daß auch diese Linie mit den anderen Linien 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.

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 mit den erzielten Zwischenergebnissen möglich - SCHMIDT/PÄTSCH (1992). Diese Methode wurde schon für die Darstellung der Windverhältnisse am Nordpfahl (Abb. IV.2) verwendet, der im Zeitraum Juni bis Dezember 1991 Messungen lieferte. Hier wurden zunächst für diese 7 Monate die entsprechenden empirischen Faktoren zur Übertragung von der Wetterstation auf den Nordpfahl berechnet und dann die vierjährigen Mittelwerte der Wetterstation transformiert.

In der Abb. IV.3 sind die richtungsabhängigen Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeiten verschiedener Meßorte auf die freie See angegeben. Es zeigt sich, daß die Windwerte der Wetterstation zur Übertragung auf die Seeverhältnisse bis zu 50 % angehoben werden müssen, und zwar ausgerechnet für die Hauptwindrichtung Südwest (210 - 240°).

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. 5 % gute Ergebnisse. Bei der Übertragung einzelner Windwerte müssen deutlich höhere (aber unsystematische) Abweichungen von etwa 10 bis 15 % in Kauf genommen werden. Hier führt auch die Annahme der gleichen Windrichtung in Ausgangs- und Zielstation zu einer Unsicherheit von etwa 20°. Sehr schlecht werden die Übertragungsergebnisse für Einzelwerte bei schwachem Wind, etwa unterhalb 3 m/s. Für die meisten technisch-wissenschaftlichen Anwendungen, wie etwa den Sturmflut- und Wind-Warndienst oder die Ermittlung des Windstaus, der Wellenanfachung und des Windenergiepotentials sind Fehler bei Schwachwind jedoch belanglos.

Weitere Ergebnisse

Die 10-jährigen klimatologischen Mittelwerte (1982 - 1991) des Windes wurden mit den 4-jährigen Werten (1988 - 1991) des Projektzeitraumes verglichen. Die Anwendung der Umrechnungsfaktoren auf den 10-jährigen Zeitraum ergibt die richtungsabhängigen Mittelwerte des Windes für die freie See (genauer: 5 - 10 km nördlich von Norderney). Wenn man die Modellrechnung für jede Richtung nun so skaliert, daß sich an dem Gitterpunkt, der der Meßhöhe an der Wetterstation entspricht, genau deren 10-jähriger Mittelwert ergibt, und dann die Felder für die 12 Richtungen (mit den zugehörigen Häufigkeiten gewichtet) mittelt, ist das Ergebnis ein raumdeckendes Feld der mittleren Windgeschwindigkeit. Eine Schicht daraus, in 10 m Höhe über Grund (bzw. über der in Abschnitt 3 erwähnten Verdrängungshöhe), ist in Abb. IV.3 in einem Raster von 50 m für den Westkopf der Insel Norderney dargestellt.

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.

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 dargestellt Verfahren, approximative Faktoren zur Übertragung des Windes von einem auf andere Orte über Modellrechnungen zu bestimmen, ist nun ohne wesentliche Einschränkung 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 Bodenrauhigkeit müssen in einem feinen Raster bereitgestellt werden und die Rechnungen kosten relativ viel Rechenzeit.

Schrifttum

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-Consistant Model for Windfields Over Complex Terrain, Lawrence Livermore Laborator Report UCRL-76171, Rev. 1, 1976
SCHMIDT, H. u. PÄTSCH, J.: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnung; DIE KÜSTE,.H. 54 , 1992

Hinweis: Vom Verfasser ausgearbeitet auf der Grundlage des Manuskriptes H. Schmidt/J. Pätsch für die Küste, H. 54, 1992.

Berichte zum Teilprojekt 1.4 (Seewetteramt des DWD, Hamburg):

SCHMIDT (1988): Eine Abschätzung des äolischen Sandtransportes infolge einer hoch an das Deckwerk der Insel Norderney reichenden Strandvorspülung (unveröffentl.)
SCHMIDT (1988): Zwischenbericht Meteorologie (unveröffentl.)
SCHMIDT (1989 bis 1991): Dokumentationen zu den meteorologischen Messungen (unveröffentl.)
SCHMIDT (1989): Dokumentationen zu den Windmeßstellen auf Norderney (unveröffentl.)
SCHMIDT, H.; PÄTSCH, J. (1992): Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen; Schlußbericht FV MTK 385 - Teil "Meteorologie" (unveröffentl.)

Veröffentlichungen zu Ergebnissen aus dem Teilprojekt 1.4 "Meteorologische Messungen und Modellrechnungen (Seewetteramt des DWD, Hamburg)

SCHMIDT, H., PÄTSCH, J.: Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnung, Die Küste, H. 54, Druck in Vorber.

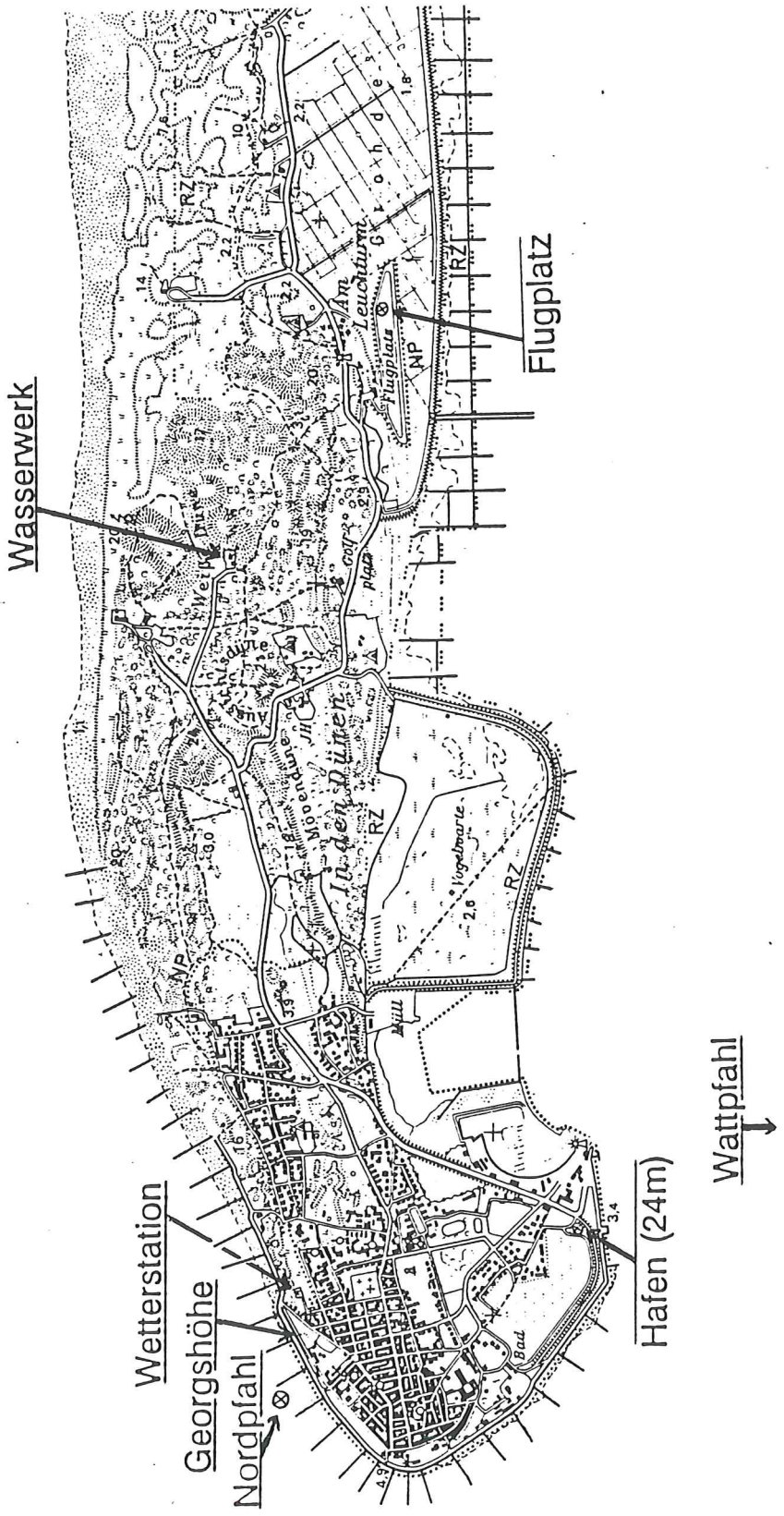


Abb. IV.1 Lage der Windmeßeinrichtungen auf Norderney für die meteorologischen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens

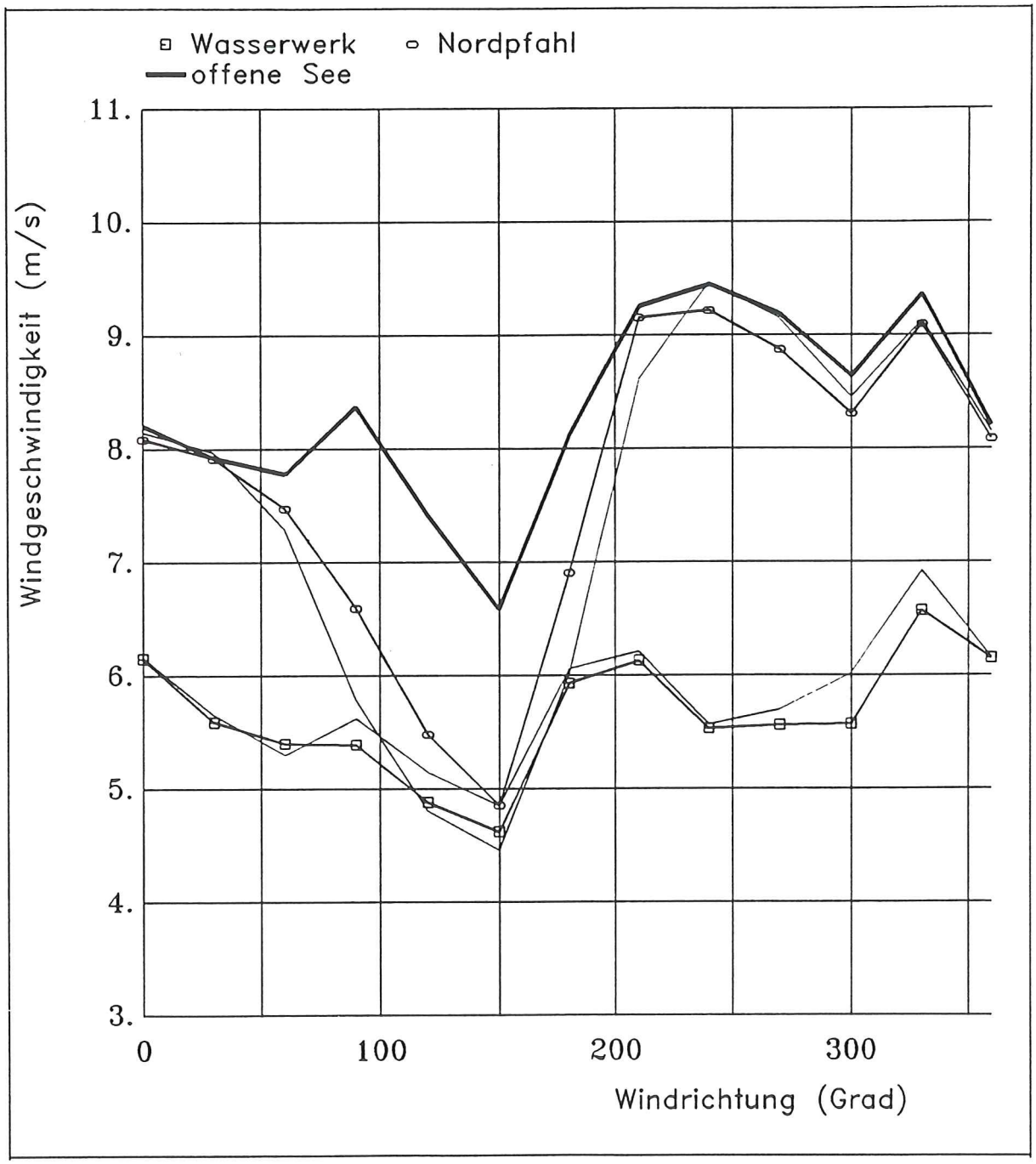


Abb. IV.2 Mittlere Vergleichs-Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung für die Orte "Nordpfahl" und "Wasserwerk", berechnet nur für die Fälle, bei denen die Windgeschwindigkeit am Hafen (24 m) mehr als 4 m/s betrug (Dicke LInien mit Symbolen: aus Messungen. Dünne zugehörige Linien: Modellrechnungen).

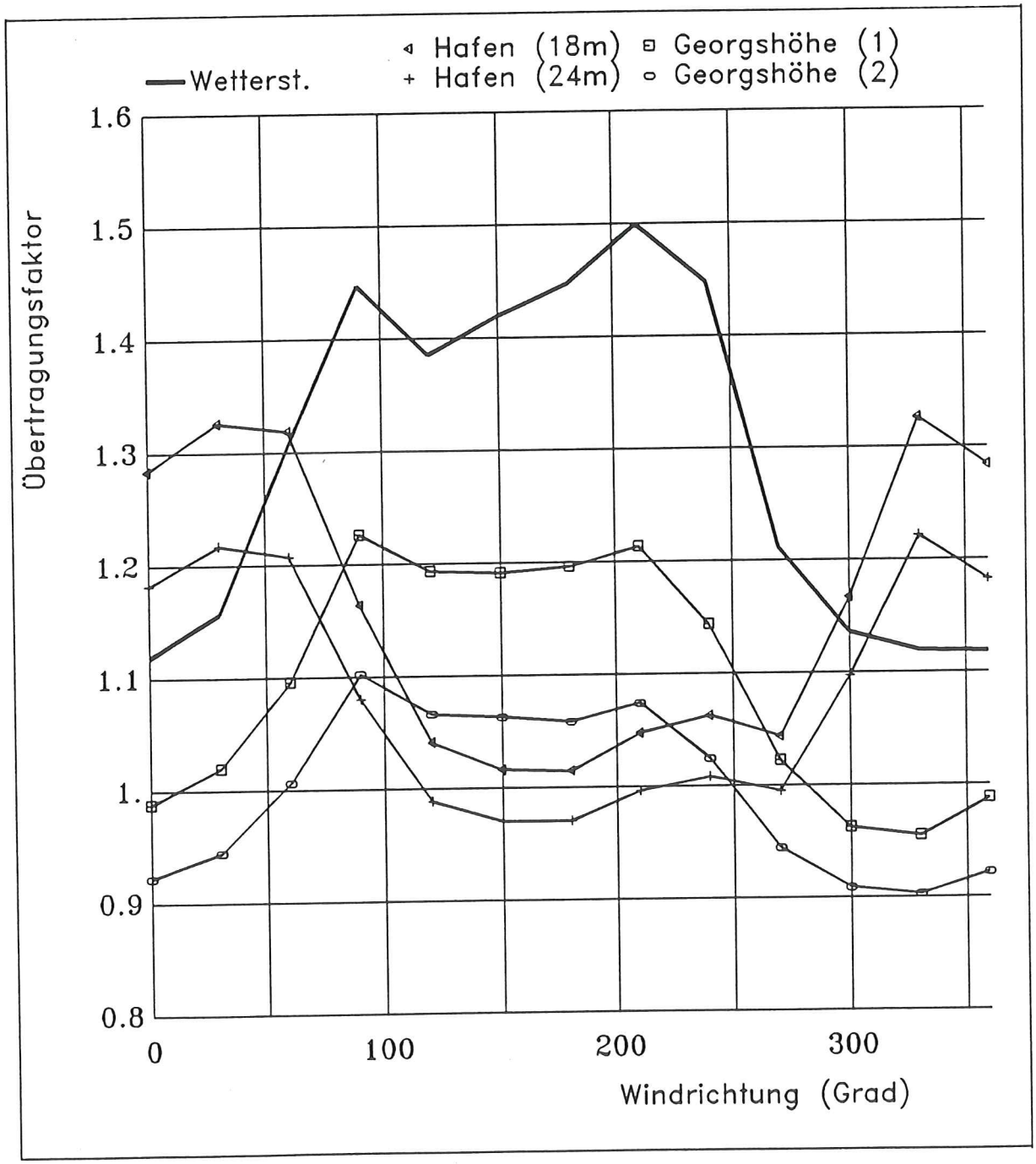


Abb. IV.3 Windrichtungsabhängige Faktoren zur Übertragung der Windgeschwindigkeiten von fünf Orten der Insel Norderney auf die freie See.

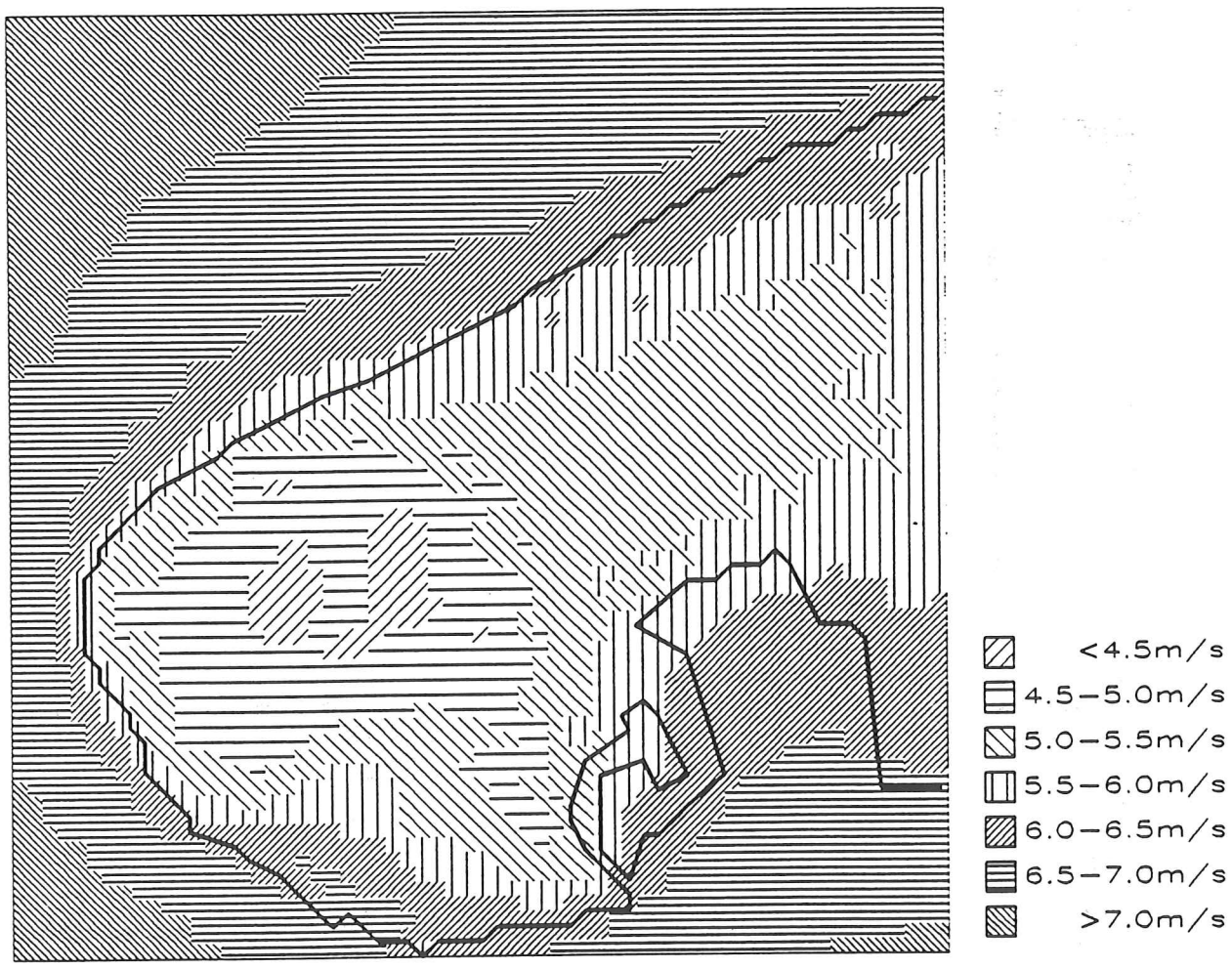


Abb. IV.4 Klimatologische Mittelwerte (1982-1991) der Windgeschwindigkeit über dem Westkopf der Insel Norderney in 10 m Höhe aus Modellrechnungen

7.2 Teilvorhaben "Versuchorientierte Strandaufspülung" (Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden)

Einleitung

Seit der ersten Strandauffüllung in 1951/52 sind bisher sechs Aufspülungen in Zeitabständen von zwei bis fünfzehn Jahren durchgeführt worden. Die Wiederholungsaufspülung 1989 konnte versuchsorientiert gestaltet und durch das Forschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" begleitet werden. Dem Staatlichen Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden oblag die Durchführung des Teilvorhabens "Versuchsorientierte Strandaufspülung". Die Ziele dieses Teilprojektes waren:

a) Die Entwicklung von neuen Aufspülprofilen,
b) die Untersuchung der Erosionsfestigkeit von Sanden mit unterschiedlichen Korngrößen,
c) die Optimierung der Vorspültechnik in Abhängigkeit von Pkt. b),
d) Untersuchungen zum äolischen Sandtransport.

Bisherige Strandauffüllungen

Die erste Strandaufspülung erfolgte 1951/52 am Weststrand der Insel zwischen den Buhnen O und V_1 auf einer Strecke von 6,0 km. Dieser ersten Strandauffüllung folgten weitere in den Jahren 1967, 1976, 1982, 1984 und 1989. Die jeweils aufgefüllten Strandabschnitte sowie die zugehörigen Massen sind der Tabelle V.1 zu entnehmen. Es wird deutlich, daß die eingebauten Massen pro Meter Strand bei der Aufspülung von 1989 denen der vorhergehenden entsprechen.

Planung der versuchsorientierten Strandaufspülung, Profilentwurf für 1989

Natürliche Querprofile

Bei der Untersuchung der Profilentwicklung nach der Strandaufspülung 1984 wurde festgestellt, daß sich das durch Brandungs- und Strömungskräfte erzeugte Küstenquerprofil unter Beibehaltung seiner Form nach unten verlagert. Diese Profilform stellt den angreifenden Kräften den größten Widerstand entgegen.

Die Profilgestaltung (Neigung) der künstlichen Strandaufhöhung sollte der natürlich entstehenden Form weitestgehend entsprechen. In Abb. V.1 sind die Umformung des Aufspülprofils von 1984 in ein Gleichgewichtsprofil (Neigungen) und dessen stetiges Absinken sowie ein daraus resultierendes mögliches Aufspülprofil für das Jahr 1989 am Beispiel des Profils 79 (Buhnenfeld E_1 - F_1) dargestellt. Deutlich treten die großen Anfangsverluste (Umformungen in das "Ausgangsprofil") und die sich verlangsamende Strandabnahme hervor.

Berechnung eines Ausgleichsprofils

Der Verlauf eines Gleichgewichtsprofiles (Neigungen) ist gut durch eine Potenzfunktion zu beschreiben. Die Basis für die Profilentwicklung liefert eine von DEAN aus Naturmessungen entwickelte Form. Um eine bessere Anpassung an die Norderneyer Verhältnisse zu erzielen, wurde diese Exponentialfunktion modifiziert. Die Funktionswerte wurden mit einer Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

Die Wahl eines geeigneten Profilnullpunktes ist für die Berechnung des Strandverlaufes außerordentlich wichtig. Nach DEAN sollte er im Schnittpunkt von Strand und Wasserlinie liegen. Wegen des ständig wechselnden Wasserstandes und der am Westkopf vorhandenen festen Berandung ist dieser Ansatz für Norderney nicht unmittelbar übertragbar. Spezielle Untersuchungen ergaben: für die Profile im Aufspülbereich ist die Lage des Nullpunktes im Schnittpunkt von Strand und MThw-Linie in den meisten Fällen als ideal anzusehen. Es wurde nachgewiesen, daß die Anpassung nach einer Potenzfunktion gegenüber einer linearen Anpassungsfunktion eine wesentlich bessere Annäherung an die Strandvermessungsdaten ergibt.

Bestimmung der Aufspülprofilneigung

Aus der Anpassungsfunktion kann durch einfache Ableitung die Neigung "n" des Gleichgewichtsprofils bestimmt werden. Damit ist die Neigung des Aufspülprofils im variablen Abstand y vom Profilnullpunkt zu ermitteln. Die damit mögliche graphische Ermittlung des Aufspülprofils ist für das Profil 79 in Abb. V.2 dargestellt. Der Wert 0 auf der Abszisse entspricht hierbei dem Schnittpunkt MThw-Linie/Gleichgewichtsprofil bzw. MThw-Linie/Aufspülprofil. Wie aus Abb. V.2 zu erkennen ist, wurde die Neigung des Aufspülprofils nur einmal abgestuft. Eine häufigere Abstufung des Aufspülprofils würde zwar eine bessere Anpassung an das Gleichgewichtsprofil bedeuten, ließe sich aber bei der praktischen Durchführung nur durch einen erhöhten Aufwand realisieren.

Liegt das zugrunde gelegte "Gleichgewichtsprofil", hier das Profil von April 1985 (Definition für Untersuchungen StAIK), auf einem für die Aufspülung zu niedrigen Niveau, so wurde das Aufspülprofil parallel zur Abszisse verschoben. Damit wird eine Erhöhung des Aufspülvolumens erreicht, ohne daß sich die Neigungen in den einzelnen Höhenabschnitten ändern.

Der Bereich über MThw kann, da er nicht mehr zum Gleichgewichtsprofil gehört, nach örtlichen Gegebenheiten angepaßt werden, wobei allerdings der Einfluß des äolischen Sandtransportes zu berücksichtigen ist.

Entwurf des Aufspülkörpers

Aus den Auswertungen der Profilentwicklungen und Berechnungen der Anpassungsfunktionen konnte das Maß der Profilverschiebung innerhalb der Buhnenfelder ermittelt werden. Dieses Maß der Profilverschiebung wird durch die an den Buhnenfeldrändern liegenden

Profile bestimmt. Die Berechnung der Anpassungsfunktionen wurde mit den Meßdaten von Oktober 1985 durchgeführt. Die Aufspülprofile wurden jeweils so weit parallel zur Abszisse parallel verschoben, bis im unteren 1 : 60 geneigten Strandbereich der entsprechende Höhenabstand erreicht war. Dies entspricht einer horizontalen Verschiebung von ungefähr 20 m. Der berechnete Höhenunterschied kann je nach Buhnenfeld bis zu 0,5 m betragen. Beispiele zeigt die Abb. V.3.

Die gewählte Potenzfunktion mit einem konstanten Exponenten ist für die Entwicklung von Aufspülprofilen von hinreichender Genauigkeit, da ohnehin nur ein Augenblickszustand erfaßt werden kann. Außerdem dient das Verfahren lediglich zur Verringerung der Anfangsverluste, so daß eine verfeinerte Berechnung nicht erforderlich ist.

Sandentnahme und -einbau in der Leistungsbeschreibung

Festlegung des Aufspülbereiches

Wie aus Tabelle V.1 und aus Abb. V.4 zu entnehmen ist, wurde als Aufspülbereich die 1,8 km lange Strecke von Buhne D bis Buhne J_1 festgelegt. In diesem Abschnitt lag das Strandniveau besonders niedrig. Eine Versorgung der südwestlich und östlich an diesen Bereich anschließenden Buhnenfelder wurde nicht vorgesehen, da hier ein Masseneintrag aus dem Küstenlängstransport zu erwarten ist.

Einbau unterschiedlichen Sandmaterials

Die Beschaffung ausreichend groben Sandes mit einem $d_{50}>0{,}2$ mm hat bisher bei Norderneyer Aufspülungen stets Schwierigkeiten bereitet. Daher galt besonderes Interesse der partiellen Verwendung gröberen Sandes, der auf unterschiedliche Weise eingebaut werden sollte.

Um sowohl den unterschiedlichen Seegangsbeanspruchungen im Seegat- bzw. Nordweststrandbereich als auch der Anforderung gerecht zu werden, im Hauptmeßfeld D_1-E_1 weitestgehend einkörniges Sandmaterial zu behalten, sollten zwei Grobsandbereiche in ausreichender Entfernung voneinander erstellt werden. Aus bau- und gerätetechnischen Gründen konnte mit gröberem Material in der Ausführungsphase nur das Buhnenfeld C-ZbII ausgefüllt werden (Nordweststrand, vgl. Abb. V.4).

Die über MThw liegenden Bereiche des Aufspülprofils, die einen überwiegend trockenen Strand bilden, wurden nach Beendigung der Spülarbeiten durch das Aufstellen von Sandfangzäunen gegen Winderosion gesichert.

Festlegung der endgültigen Form der Aufspülprofile

Das gewählte Profil der ausgeführten Strandaufspülung ist einem Gleichgewichtsprofil (siehe

Definition) weitestgehend angepaßt worden, indem es ausschließlich konkav gewölbt, der vorhandenen Korngrößenverteilung entsprechend geneigt und zwischen den Buhnen D und C sowie E1 und H1, den jeweiligen Umlagerungsvorgängen innerhalb der Felder entsprechend, bis zu 25 m parallel in Richtung See bzw. Deckwerk verschoben wurde. Die Profilneigungen wurden außerdem auch in Abhängigkeit der jeweiligen örtlichen Breite des Inselsockels gewählt; im Seegatbereich ergaben sich somit zwischen der MThw- und MTnw-Linie Strandneigungen von etwa 1 : 45, während im breiteren Nordweststrandbereich Neigungen von ca. 1 : 60 möglich waren. Oberhalb MThw wurden die Profile bis NN +1,70 m, beispielhaft anhand von Profil 51 in Abb. V.5 dargestellt, weitergeführt. Bedingt durch die beschriebene Form des Aufspülprofils, lag dessen Schwerpunkt näher am Deckwerk als bei den vorangegangenen Aufspülmaßnahmen, wobei die aufzuspülenden Sandmengen jedoch weitgehend denen der 1984er Vorspülung entsprechen.

Entnahmebereiche für das Aufspülmaterial

Die ca. 500 m westlich des Aufspülbereiches liegende Robbenplate (s. Abb. V.4) bot sich - wie schon seit 1976 - als Sandentnahmestelle an und wurde daher 1987 auf geeignetes Material hin untersucht. In Zusammenarbeit mit dem NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG wurde eine umfangreiche Lagerstättenstudie erstellt.

Von einer Entnahme des Grobsandes aus der Robbenplate mußte wegen des zu hohen Abraumanteils bei der Entnahme aus einem tiefreichenden Trichter und der damit verbundenen Kosten abgesehen werden. Das geforderte Sandmaterial ist seewärts des Ostteils der Insel Juist durch flächigen Abtrag gewonnen worden. Der mittlere Korndurchmesser der Versuchsschürfung lag bei d50 = 0,38 mm in Wassertiefen von ca. 8 bis 12 m.

Zusammenfassung der Vergabeentscheidung

Nach der Submission konnte eine klare Entscheidung zugunsten einer preiswerten und zugleich erfolgversprechenden Verfahrenstechnik getroffen werden. Das kostengünstigste Angebot, dem auch der Zuschlag erteilt wurde, sah für eine Gesamtsumme von rd. 1,3 Mio DM vor, für die Entnahme der Hauptsandmenge von 340.000 m^3 einen bereits mehrfach bewährten Saugbagger (auch als Cutter ausrüstbar) einzusetzen, der den holozänen Seesand löst und durch eine Schwimm-, Düker- und Spülleitung in die entsprechenden Buhnenfelder des Westkopfes der Insel Norderney transportiert.

Für die Gewinnung und den Transport des gröberen Sandmaterials wurde ein Hopperbagger gewählt. Die Entnahme sollte flächenhaft im Schleppkopfbetrieb erfolgen, und zwar zunächst vor Juist-Ost; je nach Ergiebigkeit sollten auch alternative Gebiete angefahren werden. Die Verklappung des Transportgutes sollte in einem separaten, kleineren Saugtrichter am Rande der Robbenplate erfolgen. Dieser Einsatz eines, wegen des Schluchter-Fahrwassers, flachge-

henden und somit kleineren Hoppers, der außerdem ohne Übergabestation entladen sollte, stellte im Bereich der mittleren Ostfriesischen Inseln ein Novum dar.

Die Bauausführung

Geräteeinsatz

Saugbagger

Zur Entnahme des feineren Seesandes wurde ein Cutter mit einem Saugkopf mit Druckwasserlöseeinrichtung ausgerüstet; auf die Montage eines zusätzlichen Schneidkopfes wurde verzichtet. Bei einer Gesamtspüldauer von 21 Tagen und einer Arbeitstiefe von etwa 16 m wurde eine durchschnittliche Spülleistung von 20.500 m^3 pro Tag erbracht.

Hopperbagger

Die Entnahme des gröberen Sandes erfolgte mit einem Laderaumsaugbagger (Hopper) vor Juist-Ost. Der eingesetzte Hopper ist für den Einsatz im Bereich des Norderneyer Riffbogens besonders geeignet, da er im beladenen Zustand lediglich einen Tiefgang von 3,50 m aufweist. Trotz dieses geringen Tiefgangs war eine Durchquerung des "Schluchter-Fahrwassers" mit einer maximalen Wassertiefe von 5,5 m nur bei Tidehochwasser möglich. Nachteilig für einen schnellen Arbeitsfortschritt wirkte sich auch die geringe Ladekapazität von 815 m^3 aus.

Sandeinbau und Profilgestaltung

Seesand

Die mit dem Saugbagger gelösten Sandmassen wurden mittels eines Dükers von der Robbenplate zum gegenüberliegenden Buhnenfeld D-C und weiter über eine am Fuß des S-Deckwerkes verlaufende Hauptleitung gefördert. Die mittleren Korndurchmesser d50 lagen zwischen 0,15 und 0,18 mm. Die Verteilung in die einzelnen Buhnenfelder wurde über Querleitungen vorgenommen.

Gröberer Sand

Beim Hopperbetrieb konnte sich keine eingespielte Routine einstellen, denn neben den schwierigen nautischen Verhältnissen verhinderten ungünstige Wetterverhältnisse einen kontinuierlichen Betriebsablauf. Der eingebrachte Sand wies allerdings lediglich Korngrößen von 0,25 - 0,30 mm auf. Mit dem vergleichsweise kleinen, wendigen und flachgehenden Schiff wurde direkt in das am Seegat liegende Buhnenfeld C-II gefahren und der Hopper durch Direkteinspülung entladen. Dieses erfolgte zunächst über einen seitlichen Rohrstutzen, der etwa am bugseitigen Ende des Laderaumes angeordnet war: das Sand-Wasser-Gemisch wurde einfach seitlich über Bord gepumpt. Da sich durch die fortschreitende Entlastung des Schiffes dessen Tiefgang insbesondere am Bug verringerte, war es möglich, den Laderaumsaugbagger immer weiter strandaufwärts zu manövrieren.

Eine weitere Optimierung bestand in der Anbringung eines Rohrstutzens mit düsenartiger Öffnung, der nach vorn über den Bug hinausragte und eine Materialeinspülung nach dem Regenbogensystem ermöglichte. Auf diese Weise gelang es, das Aufspülmaterial nochmals um etwa 20 m weiter in Richtung Trockenstrand zu befördern.

Bei dem dann jeweils folgenden Tideniedrigwasser fiel das oberhalb der MTnw-Linie lagernde Depot des angelieferten gröberen Sandes frei und konnte mit Raupen strandaufwärts geschoben und profilgemäß eingebaut werden.

Herstellung des endgültigen Aufspülprofiles

Nach Beendigung der Spülarbeiten konnte die endgültige Profilierung ausgeführt werden. Die einzuhaltenden Toleranzen waren in der Ausschreibung folgendermaßen festgelegt worden: Unterschreitungen der Profilhöhen sind nicht zulässig, Überschreitungen von 10 cm für Einzelwerte sowie von 20 cm bei gleichmäßiger Überschreitung aller Höhenmarken eines Buhnenfeldes werden jedoch noch akzeptiert. Die abschließende Kontrollvermessung ergab sehr gute Übereinstimmungen mit den Vorgaben.

Verlauf der Strandentwicklung nach der Aufspülung von 1989

Zugrunde gelegte Strandvermessungen und Strandbereiche

Die wesentlichen Veränderungen des Strandes sind über Trockenstrandvermessungen und die gleichzeitige Peilung des Vorstrandes erfaßt worden. Nähere Aufschlüsse über die Entwicklung des Strandkeiles oberhalb der MTnw-Linie wurden aus einer Vielzahl von Trockenstrandvermessungen gewonnen.

Generell ist der Aufspülbereich in zwei, ihrem Erscheinungsbild und ihrem Verhalten nach, sehr unterschiedliche Abschnitte zu unterteilen:

1. Der Seegatbereich: Von Buhne E bis Buhne A reichend. In diesem Strandabschnitt fallen die Unterwasserhänge steil zum Seegat hin ab.

2. Der Nordweststrand östlich der Buhne A: In diesem Bereich ist eine in östlicher Richtung zunehmende Verflachung des Vorstrandes zu beobachten.

Die Strandentwicklung im Seegatbereich

Für jedes Buhnenfeld dieses Strandabschnittes ist eine detaillierte Einzelbetrachtung des Verlaufes der intensivsten Phase der Massenumlagerung vom Ende der Baumaßnahme bis zum Mai 1990 ausgeführt worden.

Der Umlagerungsprozeß verlief, mit Ausnahme des mit gröberem Sand gefüllten Feldes, in

allen Buhnenfeldern ähnlich. Einer anfänglichen gleichmäßigen Abnahme unter Beibehaltung der Profilform folgte in den, von größeren Sturmtidenhäufigkeiten geprägten Wintermonaten, die weitere Ausräumung des Strandkeiles oberhalb der NN-Linie. Das bis November 1989 sehr stabil erscheinende "Grobsandfeld" unterlag während der Wintermonate einem hohen Massenverlust und präsentierte sich im Mai 1990 in etwa in dem gleichen Zustand wie vor der Aufspülung. Dieses Verhalten kann nicht erklärt werden; noch zu prüfen ist, ob der hohe Muschelanteil an dem gröberen Material mit Ursache für die starke Sturmfluterosion ist.

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.

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 im Frühjahr 1992 geplant wurde, um die akute Bedrohung des Deckwerkes abzuwenden.

Graphische Aufarbeitung der Strandentwicklung

Auswertungen der Strandhöhenentwicklungen anhand einiger ausgewählter Höhenlinien (MThw, NN, MTnw, NN -4 m) ließen deutlich erkennen, daß der Schwerpunkt der Massenverluste eindeutig am Nordweststrand zu finden war. Die Abb. V.6 zeigen Beispiele für die Zeit unmittelbar nach der Aufspülung und am Ende des Untersuchungszeitraumes (Frühjahr 1992); die Abb. V.7 weisen Volumenänderungen für das Profil 79 (Buhnenfeld E-F1) von 1989 bis Anfang 1992 auf.

Veränderung der Vorstrandneigungen

Eine Auswertung der Neigungen des Vorstrandes zwischen MTnw und NN -4,0 m zeigte, daß die Neigungswerte der Urzustände i.d.R. flacher als die der nachfolgenden Aufspülneigungen waren. Auffällig ist, daß bei der 89er Aufspülung die Strandneigungen schon ein Jahr nach der Baumaßnahme sich sehr stark dem Urzustand angenähert hatten und bis Ende 1991 nur noch geringfügige Veränderungen eintraten. Daraus kann für die Norderneyer Strandaufspülungen geschlossen werden, daß der Unterwasserbereich zukünftig wesentlich flacher aufgespült werden sollte, wobei die Größe der Hangneigungen (analog zur Optimierung des trocken fallenden Strandes, s. KOTZBAUER 1990) an durchschnittlichen Urprofilen zu orientieren ist.

Rückbildung der Sandentnahmestelle Robbenplate

Die Rückbildung (Verfüllung) der Sandentnahme wurde eingehend untersucht. Dabei war ein beschleunigender Einfluß der zwischen Januar und März 1990 aufgetretenen Sturmtiden nicht

deutlich nachweisbar, er wird aber vermutet. Die natürliche Verfüllung erfolgte in etwa einem Jahr.

Ansatz zur Quantifizierung des äolischen Sandtransportes

Nach Abschluß der Aufspülmaßnahme wurden Untersuchungen zum Sandtransport durch Wind (äolisch) ausgeführt. Durch den äolischen Sandtransport ergeben sich Strandverluste und Beeinträchtigungen. Die Abb. V.8 zeigt das Funktionsprinzip der vom StAIK entwickelten Flugsandfalle. Die Untersuchungen erbrachten erste Ergebnisse und Hinweise auf Verbesserungen (ERCHINGER, TILLMANN 1992).

Ergebnisse

Es konnte nachgewiesen werden, daß die gewählten Ansätze zur Ermittlung eines Gleichgewichtsprofils (siehe Definition) richtig sind. Der Verlauf der Strandumlagerung hat gezeigt, daß bei zukünftigen Aufspülungen eine flächige Auffüllung des Vorstrandes vorgenommen werden sollte. Die Profilierung des Vorstrandes sollte sich an der Unterwassermorphologie orientieren, um zu einer optimierten Form des Spülkörpers zu gelangen. Eine Auswertung über die Regeneration der Sandentnahmestelle zeigte, daß diese innerhalb eines Jahres wieder vollständig aufgefüllt war.

Zur Quantifizierung des äolischen Sandtransportes sind die Ergebnisse aus Naturmessungen mit einer neu entwickelten Sandfalle den theoretischen Transportraten gegenübergestellt worden. Die Ergebnisse liegen nahe beisammen. Es sollten dennoch zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden, um die Datenbasis zu erweitern und die Einflüsse der verschiedenartigen Randbedingungen näher zu untersuchen.

Schrifttum:

KOTZBAUER, U., 1990: Vorschlag zur Ermittlung von Strandaufspül-Profilen nach natürlichen Gleichgewichtsprofilen, Mitt. d. Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig, H. 105/89
TILLMANN,B., H.F. ERCHINGER 1992: Schlußbericht für Teilvorhaben "Versuchsorientierte Strandaufspülung", StAIK, Norden (August 1992)

Hinweis: Vom Verfasser ausgearbeitet in enger Anlehnung an die Formulierungen des Schlußberichtes des StAIK (ERCHINGER/TILLMANN 1992).

Berichte zum 2. Teilvorhaben (Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden)

KOTZBAUER/ERCHINGER (1989): 1. Teilbericht "Planung und Vorbereitung der Strandaufspülung 1989" (unveröffentl.)
LAUE/ERCHINGER (1989): 2. Teilbericht "Beschreibung der Profilanalyse und des Aufspülprofils sowie weitergehender Auswertungsverfahren" (unveröffentl.)
LAUE/ERCHINGER (1989): 3. Teilbericht "Ausschreibung und Vergabe zur 6. Strandaufspülung" (unveröffentl.)
LAUE/ERCHINGER (1990): 4. Teilbericht "Durchführung der 6. Strandaufspülung" (unveröffentl.)
LAUE/ERCHINGER (1990): 5. Teilbericht "Zeitliche Entwicklung der Strandprofile nach der 6. Strandaufspülung und Empfehlungen zur Gestaltung des Aufspülkörpers" (unveröffentl.)
TILLMANN/ERCHINGER (1991): 6. Teilbericht "Überlegungen zu Bauverfahren und Formgebung künftiger Strandaufspülungen" (unveröffentl.)
TILLMANN/ERCHINGER (1991): Schlußbericht zum Teilvorhaben "Versuchsorientierte Strandaufspülung" (unveröffentl.)

Veröffentlichungen zum Teilvorhaben "Versuchsorientierte Strandaufspülung"

ERCHINGER, H.F. (1991): Beach Replenishment in consideration of natural process 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.; B. TILLMANN (1992): Die versuchsorientierte Strandaufspülung 1989; Die Küste H. 54

Jahr	Aufgespülte Länge km	Strandstrecke Buhnen	Einbaumenge (m^3)	Entnahmeort
1951/52	6,0	O - V1	1.250.000	südl. Inselwatt
1967	2,0	E - K1	240.000	vor Buhnenkopf 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
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:			3.607.000	

Tabelle V.1 Hauptmerkmale der Strandauffüllungen von 1951 bis 1989

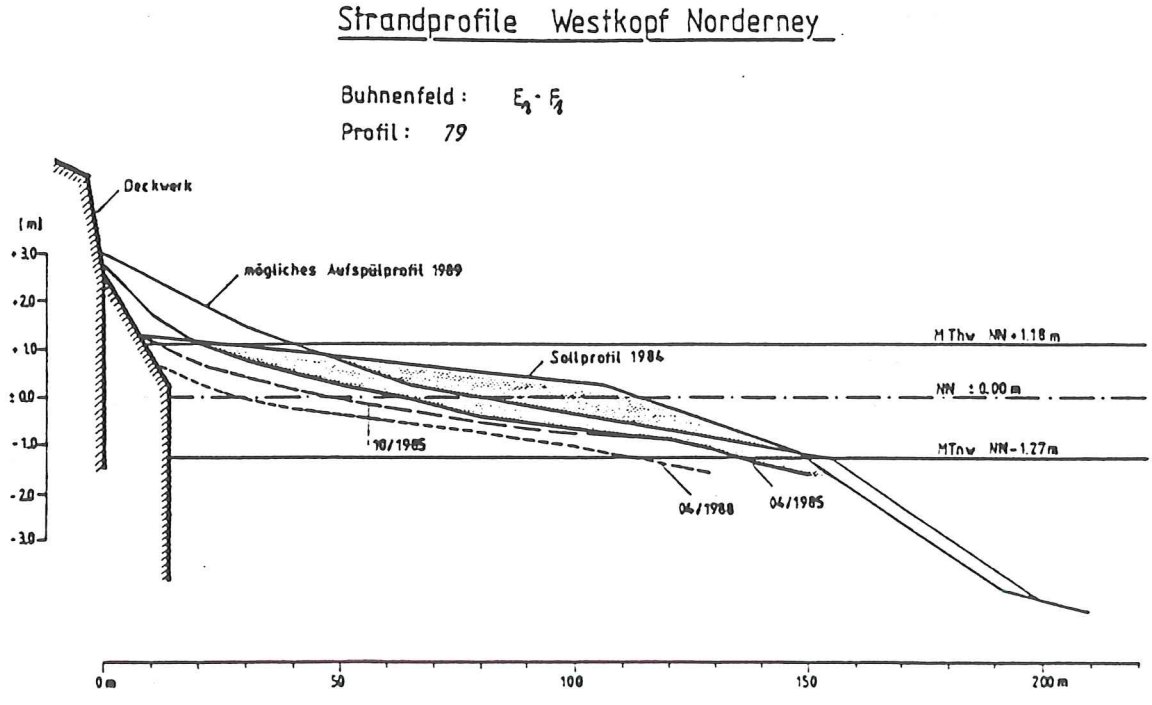


Abb. V.1 Entwicklung des Strandes und Ausbildung eines Gleichgewichtsprofiles

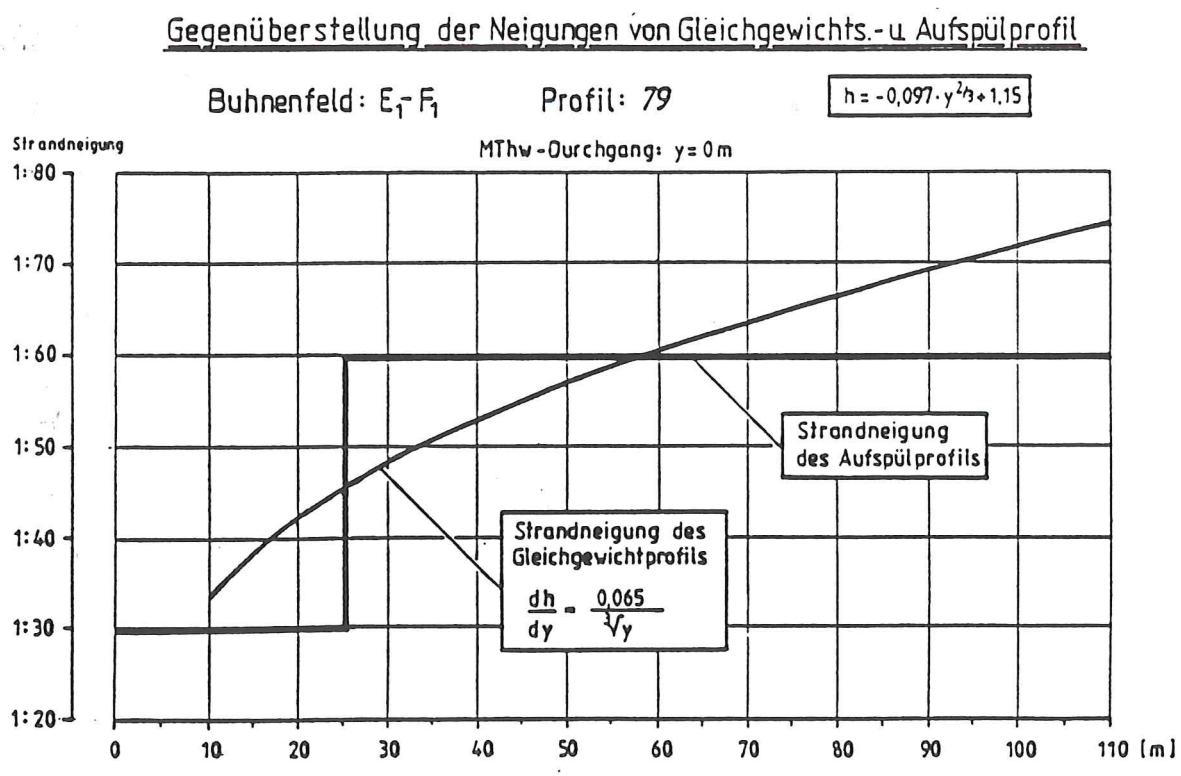


Abb. V.2 Graphische Ermittlung der Profilneigung

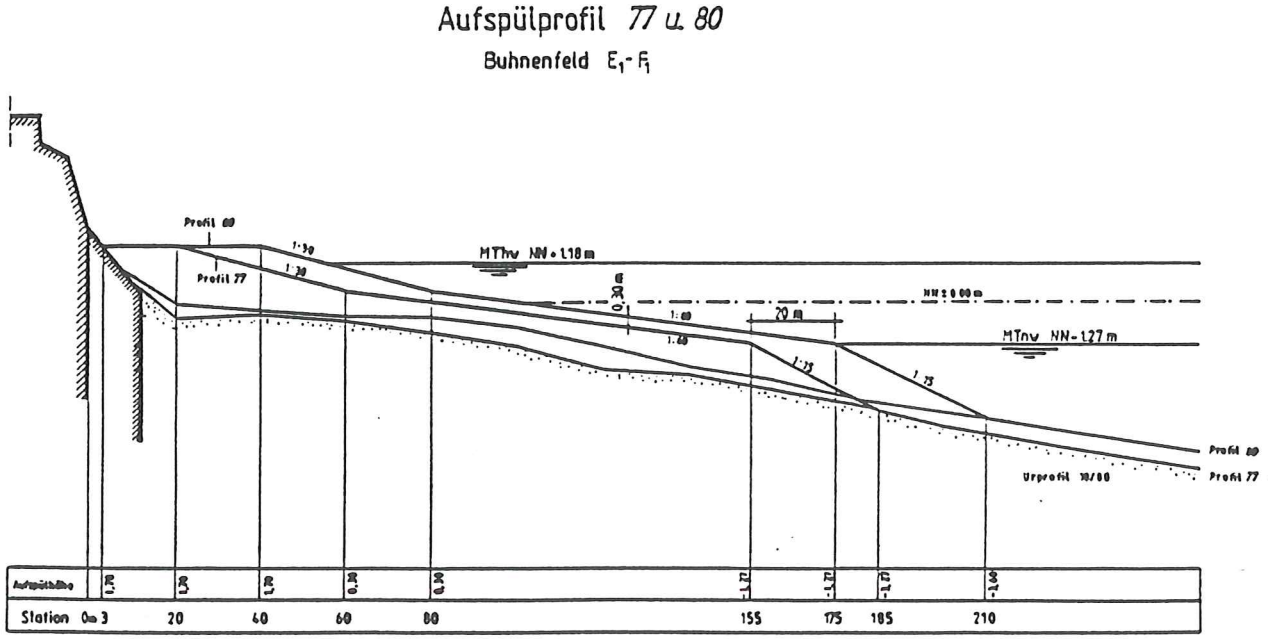


Abb. V.3 Aufspülprofile im Buhnenfeld E_1 - F_1

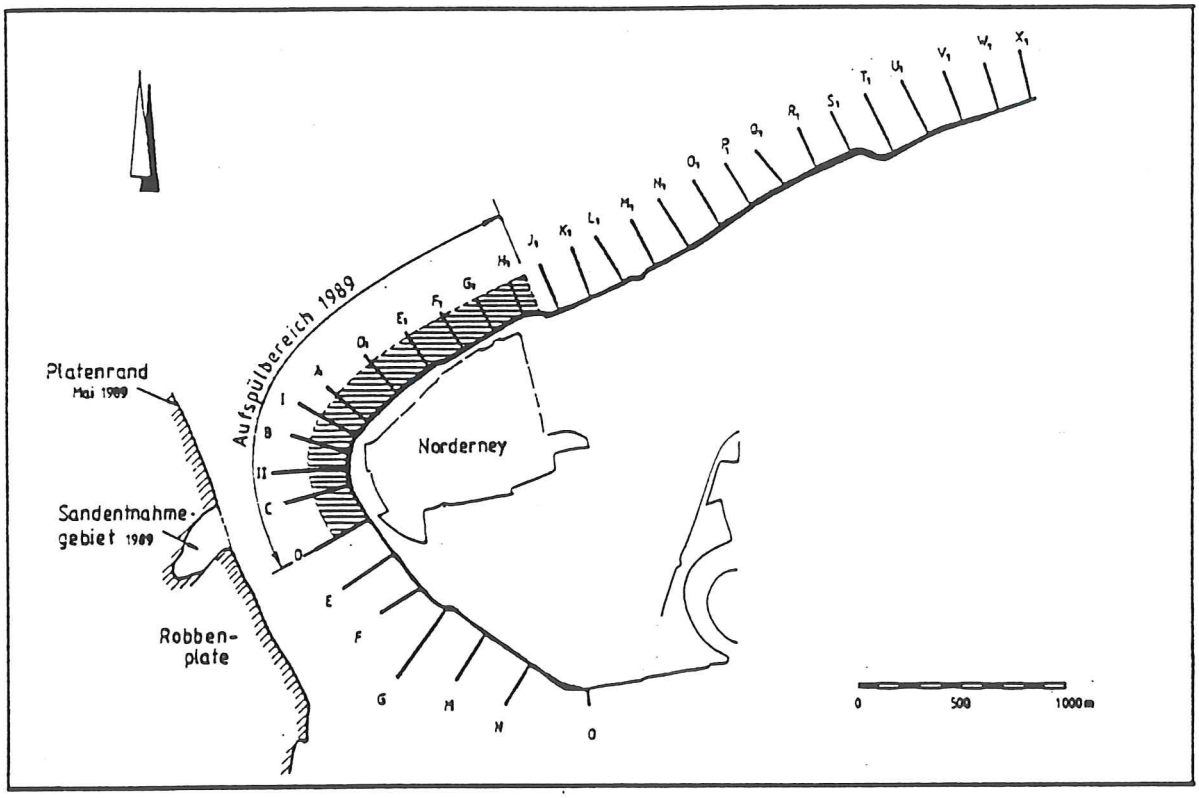


Abb. V.4 Lageplan der Norderneyer Strandaufspülung 1989

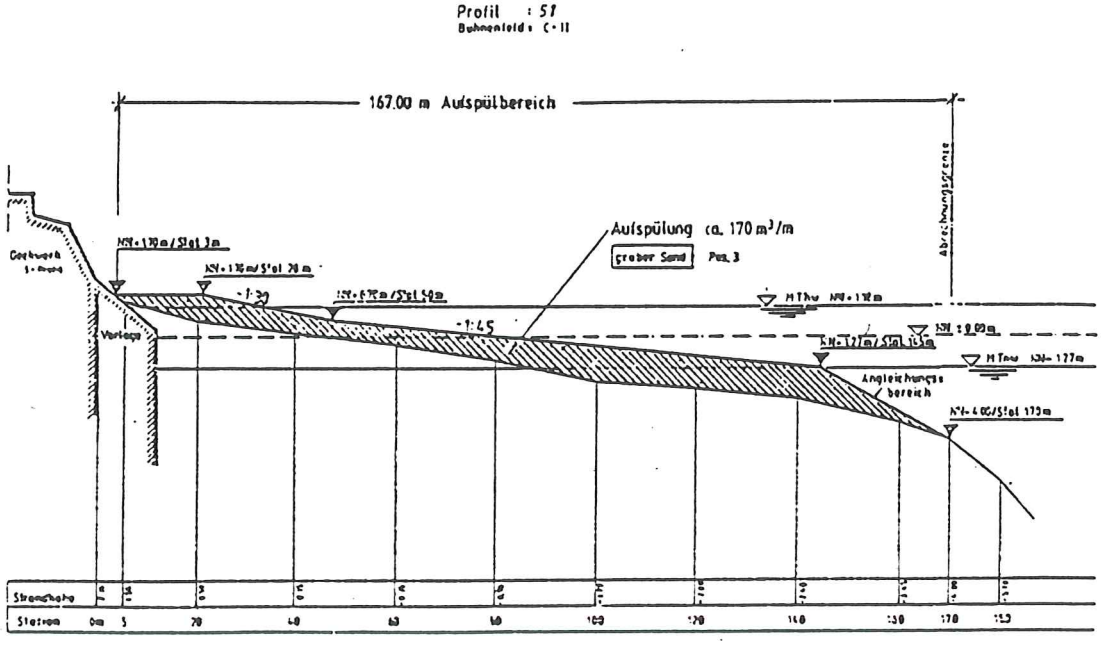


Abb. V.5 Charakteristische Form des ausgeschriebenen Sollprofiles (Profil 51)

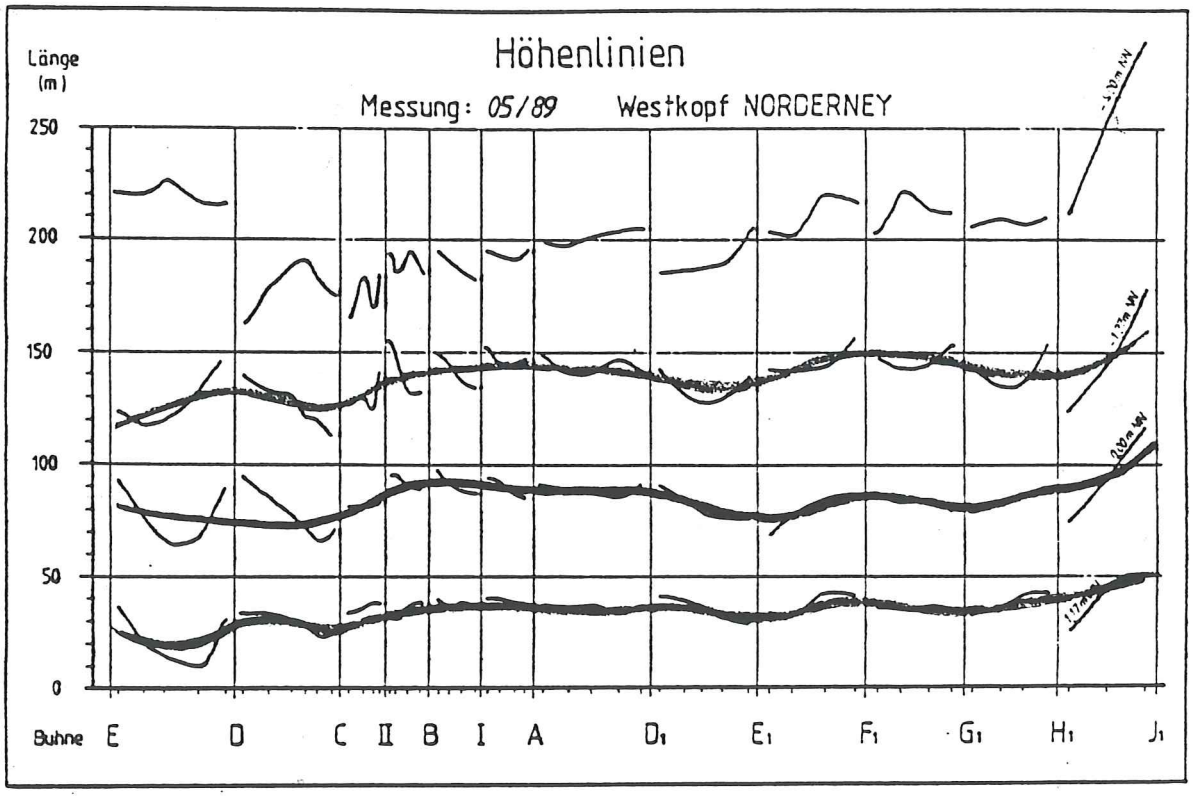


Abb. V.6.1 Strandsituation unmittelbar nach der Aufspülung

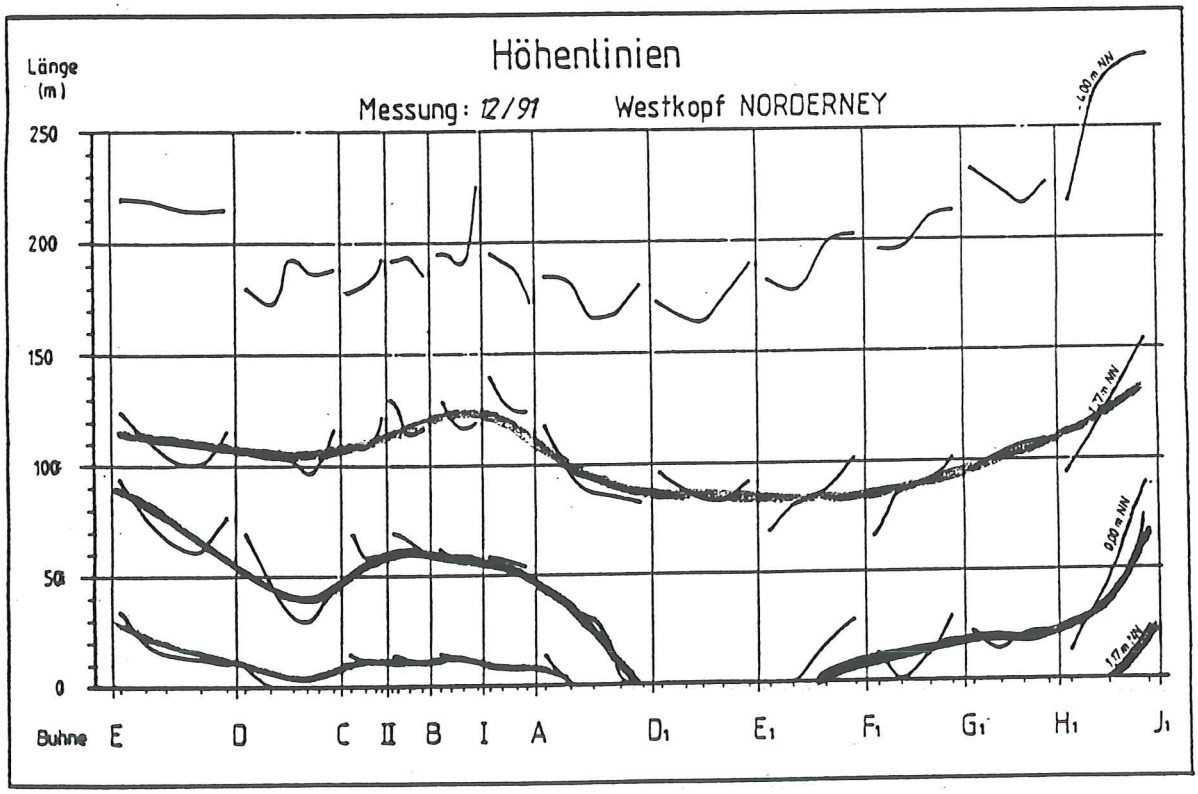


Abb. V.6.2 Strandsituation am Ende des Untersuchungszeitraumes

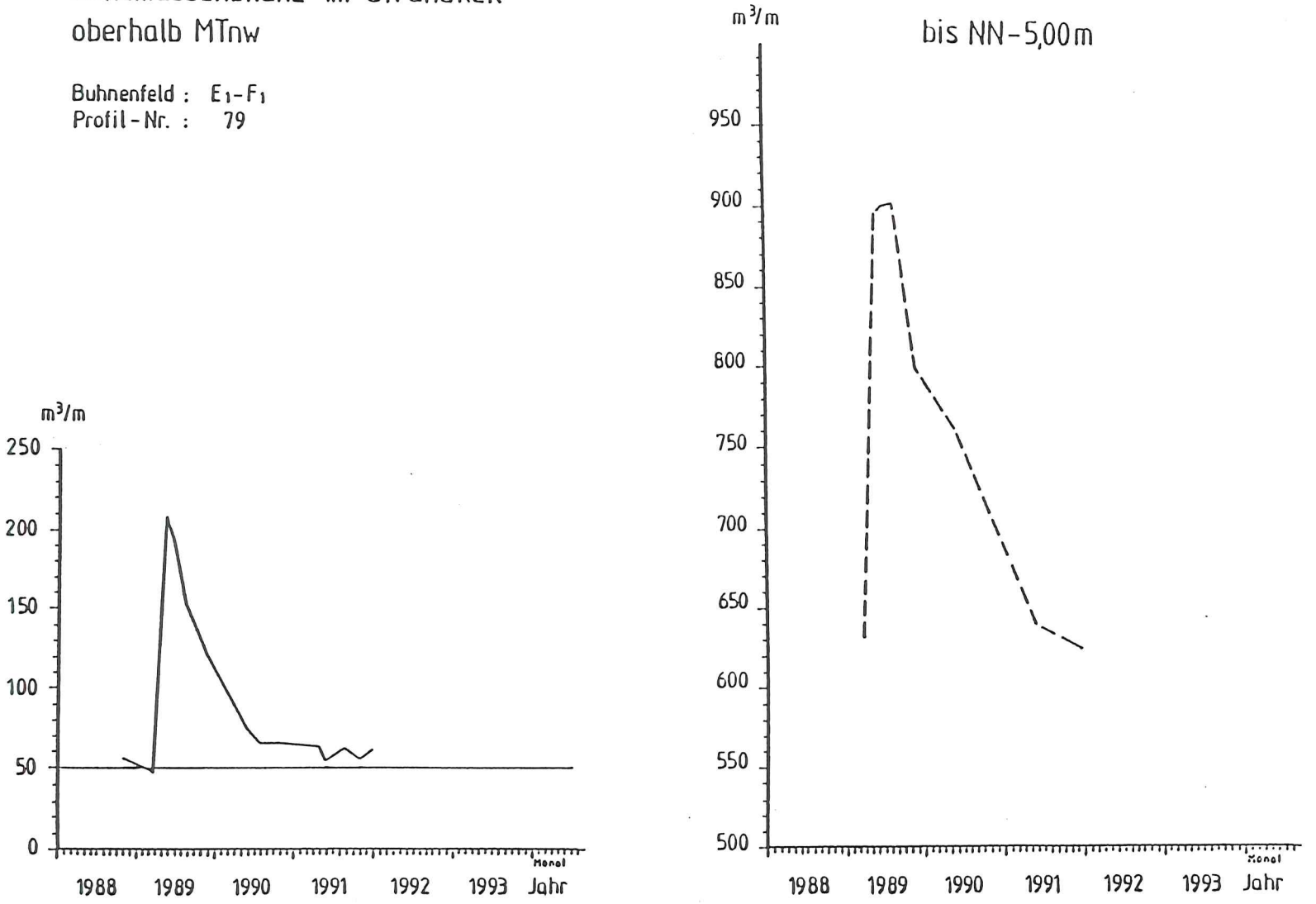


Abb. V.7 Massenentwicklung im Buhnenfeld E_1 - F_1 (Profil 79)

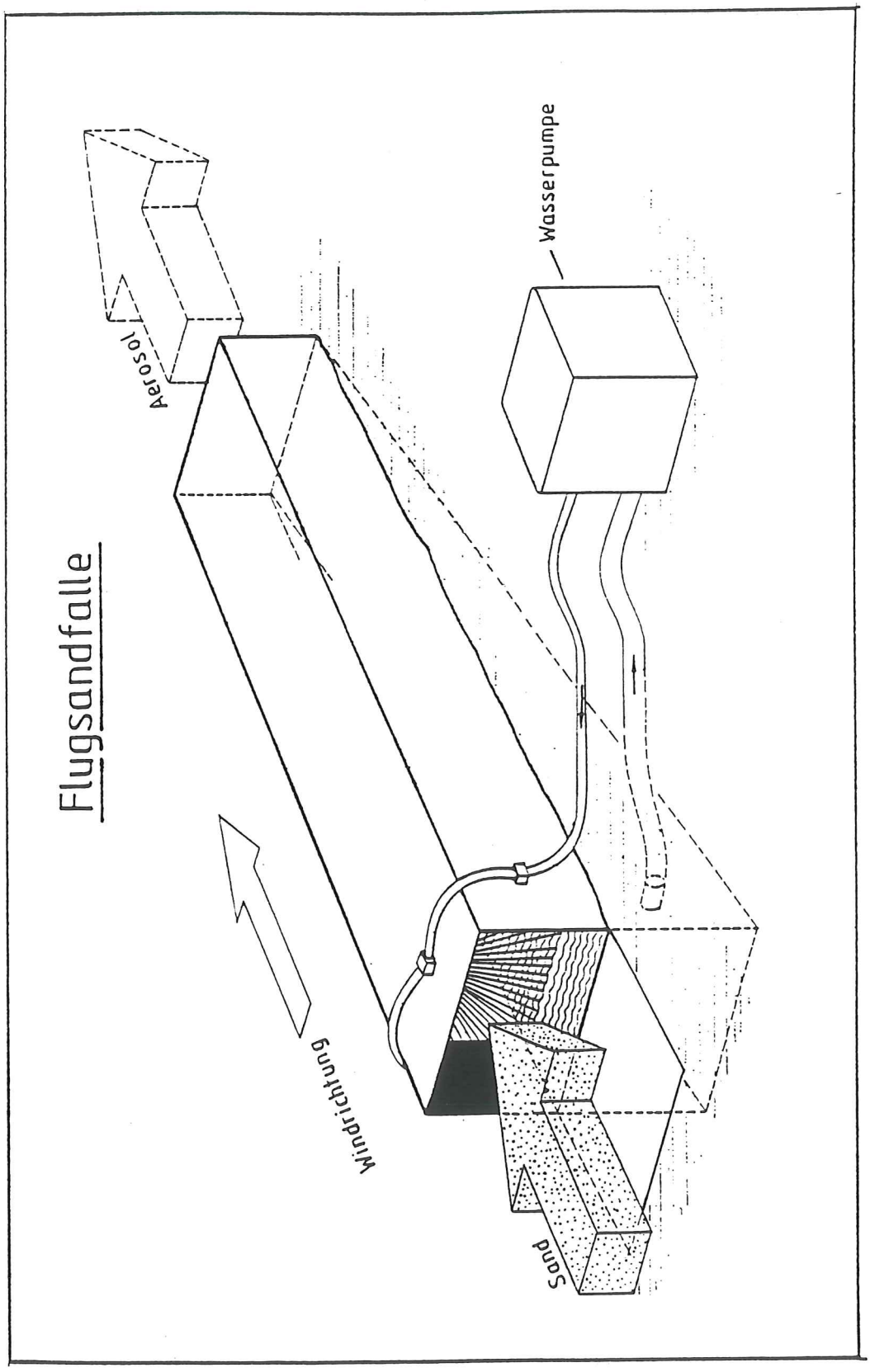


Abb. V.8 Funktionsprinzip der Flugsandfalle des StAIK

7.3 Teilvorhaben "Hydraulische Modellversuche, Dokumentationen" (Leichtweiß-Institut, Braunschweig)

Modelluntersuchungen zu wellenerzeugten Strömungen in einem Buhnenfeld

Für die hydraulischen Modelluntersuchungen wurde als repräsentatives Buhnenfeld das Feld D1-E1 (Hauptmeßfeld für die Naturmessungen) ausgewählt. Die Abb. VI.1 zeigt die Versuchsanordnung (Modellmaßstab für Längen und Höhen war 1 : 30; die Betonsohle hatte eine Neigung von 1 : 50).

Die Ziele der hydraulischen Modelluntersuchungen sind wie folgt zusammenzufassen:

1. Erfassung und Dokumentation von ausgewählten Datensätzen der Wellenhöhenverteilung und der zugehörigen Strömungsverteilung nach Richtung und Geschwindigkeit in einem Buhnenfeld mit und ohne Einbauten bei senkrechtem und schrägem Wellenangriff für folgende weitergehende Betrachtungen:

a) Heranziehen von Datensätzen aus hydraulischen Modellversuchen zur Verifikation (Überprüfung) numerischer Modellentwicklungen.

b) Vergleich der Modellergebnisse mit in der Natur gemessenen Daten (Seegang und Strömungen) bei ähnlichen Randbedingungen im Hinblick auf die Beurteilung der Eignung von kleinmaßstäblichen Untersuchungen.

2. Wirksamkeit von baulichen Begleitmaßnahmen zu einer Sandvorspülung hinsichtlich einer Verlängerung der Verweilzeit des aufgespülten Sandes im Buhnenfeld vor dem Deckwerk im Vergleich zu einer Aufspülung ohne Begleitmaßnahme.

Wegen der genannten Aufgabenstellungen wurde der Schwerpunkt der Modelluntersuchungen auf die Schaffung von repräsentativen Datensätzen und weniger auf die eingehende Analyse und Bewertung gelegt, da dazu Ergebnisse aus Naturmessungen besser geeignet sind.

Die Ergebnisse der Modellversuche sind im Bericht Nr. 3 (siehe Schrifttum) dargestellt.

Die Zusammenfassung sagt aus: "Als wesentliches Ergebnis der Modelluntersuchungen ist zusammenfassend festzustellen, daß sich die Strömungsbilder im untersuchten Buhnenfeld mit und ohne Verwallung, besonders aber beim bestehenden Zustand, als zeitlich sehr veränderlich gezeigt haben, obwohl nur monochromatische Wellen simuliert wurden. Daher muß auch in der Natur mit einer relativ starken Veränderlichkeit der Strömungsbilder gerechnet werden, wodurch die rechnerische Erfassung derartiger Vorgänge sehr schwierig erscheint.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Modellversuche sollte eine theoretische bzw. numerische Betrachtung von einer Turbulenzproblematik und weniger von der Betrachtung stationärer Strömungszustände ausgehen. Die aus den Modellversuchen gewonnenen Erkenntnisse, z.B. hinsichtlich der Ausbildung von Querströmungen sowie der Bedeutung des Transportes von (kinetischer) Wellenenergie im Buhnenfeld, sind wichtige Hinweise, die durch die Naturmessungen nach Möglichkeit überprüft werden sollten; sie liefern damit einen Beitrag zum physikalischen Verständnis der wellenerzeugten Vorgänge in einem Buhnenfeld und deren Simulation."

Dokumentation von Sandvorspülungen

Sandaufspülungen wurden seit 1950 an Küstenabschnitten der deutschen Nordsee- wie auch der Ostseeküste durchgeführt. Die Baumaßnahmen in beiden Küstenbereichen unterscheiden sich grundsätzlich in den Aufspülmengen, die an der Ostseeküste in der Regel wesentlich kleiner sind als an der Nordseeküste, was auch durch den Einsatz kleinerer Geräte mit kürzeren Spülentfernungen zum Ausdruck kommt.

Das Ziel der Arbeiten des Leichtweiß-Institutes ist es, das verfügbare Datenmaterial von jeder ausgeführten Sandvorspülung an den deutschen Küsten in möglichst vollständigem Umfang als eine umfassende Dokumentation u.a. für alle Dienststellen und Forschungsinstitutionen, die mit Sandvorspülungen befaßt sind, zusammenzustellen und daraus Zusammenhänge für die Planung und Ausführung künftiger Aufspülmaßnahmen abzuleiten. Es werden dabei alle Parameter der Sandvorspülungen, die in Erfahrung gebracht werden können, in vereinheitlichter Form zusammengestellt.

Eine erste Dokumentation liegt vor (siehe Nr. 1); dieser ist die Abb. VI.2 über die zeitliche Entwicklung von Aufspülungen entnommen worden. Die abschließende Dokumentation (siehe Nr. 5) ist fertiggestellt und wird in Kürze verfügbar sein.

Erstellung mehrjähriger Zeitreihen von Seegangsdaten aus Messungen und Korrelationen, Anwendung auf einen Energiefluß-Berechnungsansatz

Die Untersuchungen wurden ermöglicht durch Seegangsmeßdaten, die mit einer Richtungswellenboje vor Sylt durch das FRANZIUS-INSTITUT für Wasserbau der Universität Hannover im Rahmen des BMFT-Forschungsvorhabens "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt - Phase I -" (BMFT-FB-MTK 0374) im Zeitraum 1986 bis 1990 gewonnen wurden. Die Forschungsergebnisse werden als ein Beitrag für die Aufgabenstellung: "Methodische Ansätze zur Beurteilung der Wirksamkeit von Sandvorspülungen" eingeordnet.

Die Bewegung von Sand an der Küste sowohl innerhalb des natürlichen Transportes wie auch aus einem Vorspülkörper bedeutet eine Arbeitsleistung, d.h. eine Transportleistung. Aus diesem Grunde ist der Energiefluß auf die Küste von großer Bedeutung. Der Energiefluß weist Größe und Richtung auf und ist zeitabhängig. Hinsichtlich einer Einbeziehung dieses Parameters in die Beurteilung des Sandtransportes, der an der Küste sowohl als Küstenquertransport als auch Küstenlängstransport vorherrscht, bietet es sich an, den Energiefluß (resultierend) in eine küstenparallele und eine küstensenkrechte Komponente aufzuteilen und als Gang- und/oder Summenlinie aufzutragen.

Die Untersuchungen haben zum Ziel, die Eignung und Aussagefähigkeit eines Energiefluß-Ansätzes als ein praktisches und allgemein anwendbares Verfahren für die Beurteilung des Verhaltens und der Wirksamkeit von Sandvorspülungen zu überprüfen. Voraussetzung für eine solche Betrachtungsweise ist eine lückenlose Zeitreihe von ausgewerteten Seegangsparametern (Wellenhöhe, Periode und insbesondere Wellenanlaufrichtung) über den gesamten vorgesehenen Untersuchungszeitraum.

Die Untersuchungen wurden mit lückenhaften Meßreihen vor der Insel Sylt ausgeführt. Zunächst wurde aus lückenhaften Zeitreihen von Wellen-, Wind- und Wasserstandsmessungen ein kontinuierlicher Datensatz mit stündlichen Werten über einen Zeitraum von 4 Jahren erstellt. Dazu waren umfangreiche Vorarbeiten zu leisten (siehe Bericht Nr. 4).

Für nachfolgende Untersuchungen zum Energiefluß wurde beispielhaft ein Näherungsansatz vorgestellt, mit dem aus den nunmehr lückenlosen Zeitreihen der beiden Wellenparameter für den 4-jährigen Zeitraum sowohl der Gesamtenergiefluß als auch der küstennormale und küstenparallele Energiefluß für den Nordteil und den Südteil der Insel Sylt berechnet wird. Die Abb. VI.3 zeigt ein Ergebnis.

Das beschriebene Verfahren kann mit entsprechend vorhandenen Meßwerten auch für andere Küstenabschnitte angewandt werden, da die lokalen morphologischen Gegebenheiten in das Näherungsverfahren zur Bestimmung der Wellenenergie nicht eingehen.

Rechnerische Abschätzung des Diffusionskoeffizienten aus naturmaßstäblichen Suspensionsmessungen am großen Wellenkanal

Zur Untersuchung von Erosionsvorgängen an sandigen Küsten wurden im GROSSEN WELLENKANAL (GWK) in Hannover im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 205 -Küsteningenieurwesen- vom Teilprojekt A 6 "Seegangserzeugte Wechselwirkung zwischen Vorstrand und Küstenschutzbauwerk" naturmaßstäbliche Versuche ausgeführt. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützte ebenfalls die Untersuchungen.

An ausgewählten Positionen der Brandungszone wurden Suspensionsmessungen (Abpumpverfahren) in einem Bereich von ca. 0,02 m bis ca. 1,0 m über der Sohle vorgenommen, die als Grundlage für ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Diffusionskoeffizienten nach VAN DE GRAAFF dienten.

Die berechneten Diffusionskoeffizienten am Gleichgewichtsprofil wurden dann für verschiedene Ausgangsprofile und Wellenbelastungen vorgestellt.

Partikelgrößenanalysen der an mehreren Höhenkoten abgepumpten Sedimente mit einem laseroptischen Verfahren (HELOS) bestätigten den Ansatz von VAN DE GRAAFF als hinreichend zur Ermittlung des Diffusionskoeffizienten.

Eine Zuordnung von charakteristischen Kurvenverläufen des Diffusionskoeffizienten zu Bereichen in der Brandungszone scheint möglich, was allerdings durch weit mehr Untersuchungen, insbesondere auch in der Natur, überprüft werden müßte.

Auf einzelne Ergebnisse kann hier nicht eingegangen werden; auf den Bericht Nr. 2 wird hingewiesen.

Schrifttum:

DETTE, H.H. (1991): Energetische Betrachtungen zu seegangserzeugten Änderungen der Küstenmorphologie; Statusseminar "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt";Kiel, Herausgeber: Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn.
FÜHRBÖTER, A. (1991): Strandvorspülungen vor der Westküste von Sylt; Braunschweig.

Hinweis: Die vom Verfasser erstellte Zusammenfassung stützt sich auf die vorliegenden Berichte des Leichtweiß-Institutes (s.u.) und gibt die dort enthaltenen Beurteilungen wieder.

Berichte zum 3. Teilvorhaben (Leichtweiß-Institut, Braunschweig):

1. DETTE, H.H., SCHULZE, M., LAUE, M. (1988): Zur Dokumentation von Sandvorspülungen - Stand April 1988 - Bericht Nr. 660 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig (unveröffentl.).
2. DETTE, H.H., ULICZKA, K. (1989): Rechnerische Abschätzung des Diffusionskoeffizienten aus Suspensionsmessungen im Großen Wellenkanal, Bericht Nr. 676 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig (unveröffentl.).
3. FÜHRBÖTER, A., DETTE, H.H., SCHULZ, K.-P. (1988): Modelluntersuchungen zu wellenerzeugten Strömungen in einem Buhnenfeld, Bericht Nr. 679 des Leichtweiß-Instituts der TU

Braunschweig (unveröffentl.).
4. DETTE, H.H., NEWE, J., SPINGAT, F. (1991): Zur Erstellung einer mehrjährigen Zeitreihe von Seegangsdaten aus Messungen und Korrelationsberechnungen, Bericht Nr. 711 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig (unveröffentl.).
5. DETTE, H.H., SCHULZE, M., LAUE, M. (1992): Sandvorspülungen an der Deutschen Nordseeküste (1951 - 1991), Bericht Nr. 744 des Leichtweiß-Instituts der TU Braunschweig (unveröffentl., in Vorbereitung).

Anmerkung: Die Berichte Nr. 3 und Nr. 4 wurden durch die Verbindung mit anderen Forschungsvorhaben ermöglicht.

Veröffentlichungen zum Teilvorhaben "Hydraulische Modellversuche"

ULICZKA, K. (1989): Zur meßtechnischen Erfassung des Sedimenttransportes unter Sheet-Flow-Bedingungen (Dissertation); Mitt. Leichtweiß-Institut d. TU Braunschweig, H. 105/89.
DETTE, H.H. (1991): Expericences 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 - Zentralorgan für Schiffahrt, Schiffbau, Hafen; 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: In den angeführten Veröffentlichungen sind Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben "Wechselwirkungen ..." mit verwendet worden.

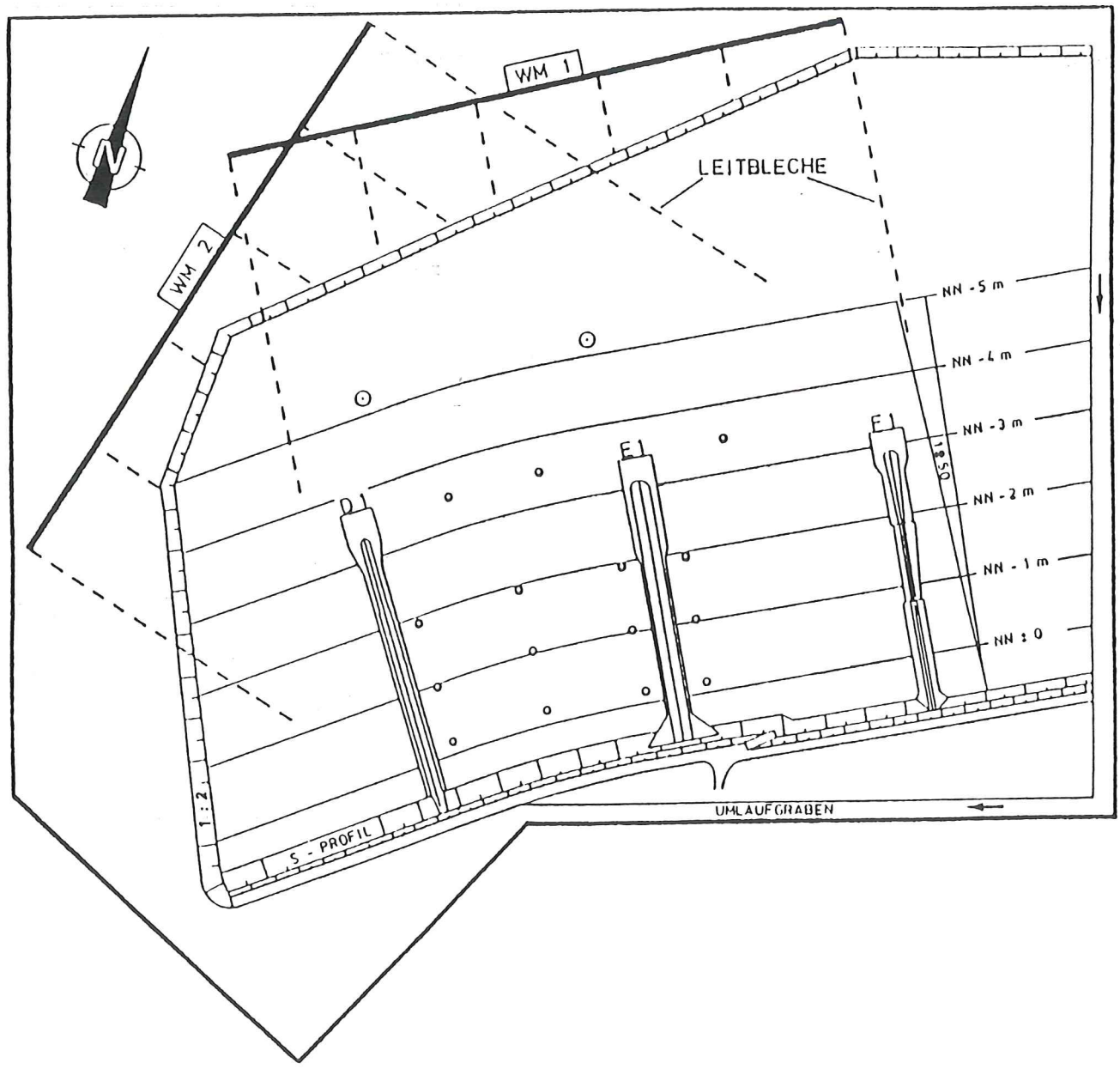


Abb. VI.1 Anordnung des Ausschnittsmodelles des Westkopfes der Insel Norderney (Buhnen D_1, E_1 und F_1) im Wellenbecken des LEICHTWEISS-INSTITUTS für Wasserbau (Braunschweig)

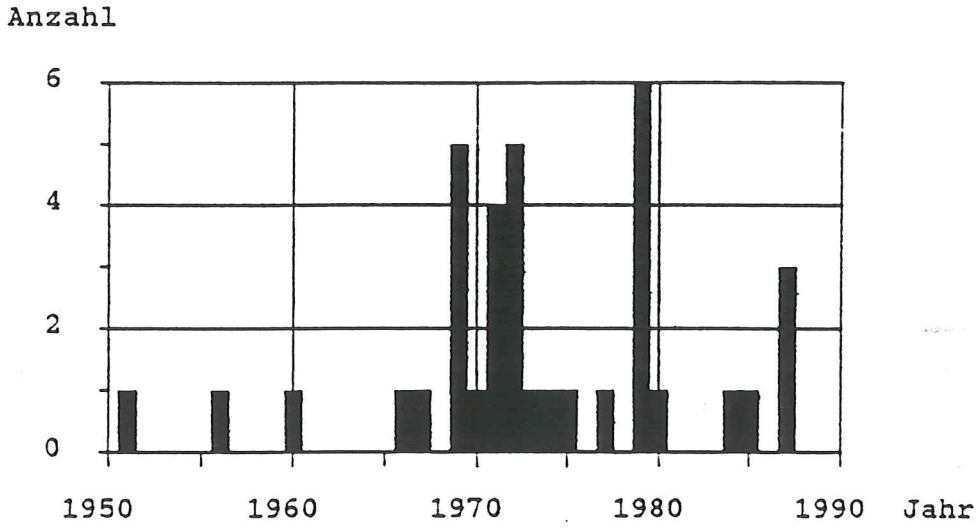


Abb. VI.2.1 Zeitliche Entwicklung der jährlichen Anzahl durchgeführter Sandvorspülungen an der deutschen Ostseeküste im Zeitraum von 1951 bis 1987

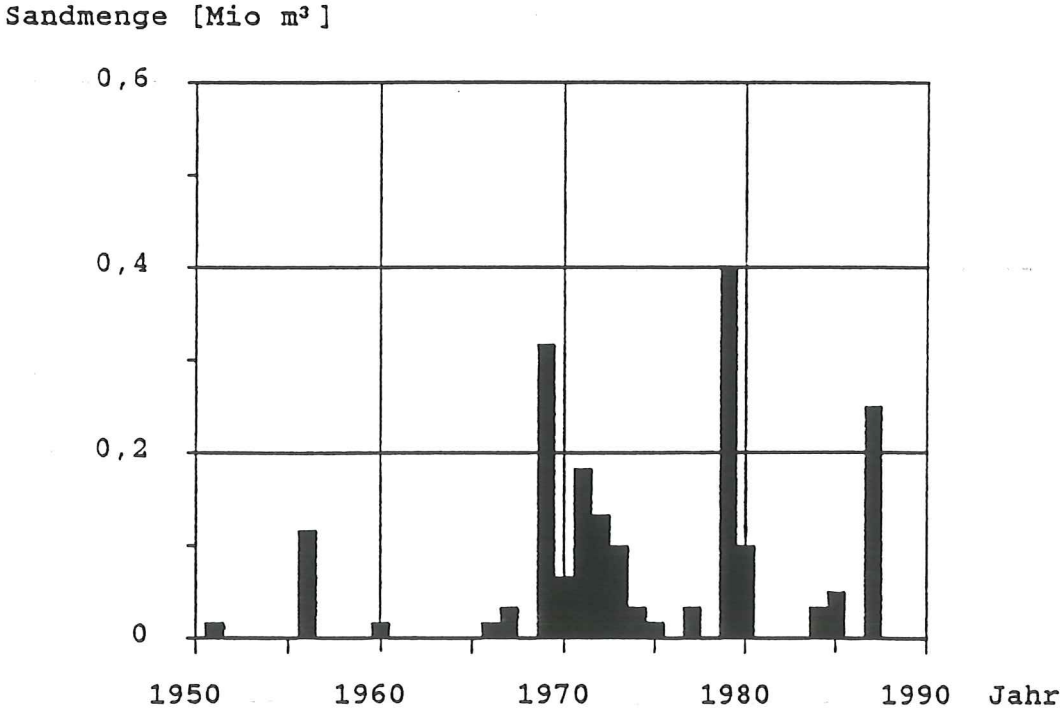


Abb. VI.2.2 Zeitliche Entwicklung der jährlichen Gesamtvorspülmengen an der deutschen Ostseeküste im Zeitraum von 1951 bis 1987

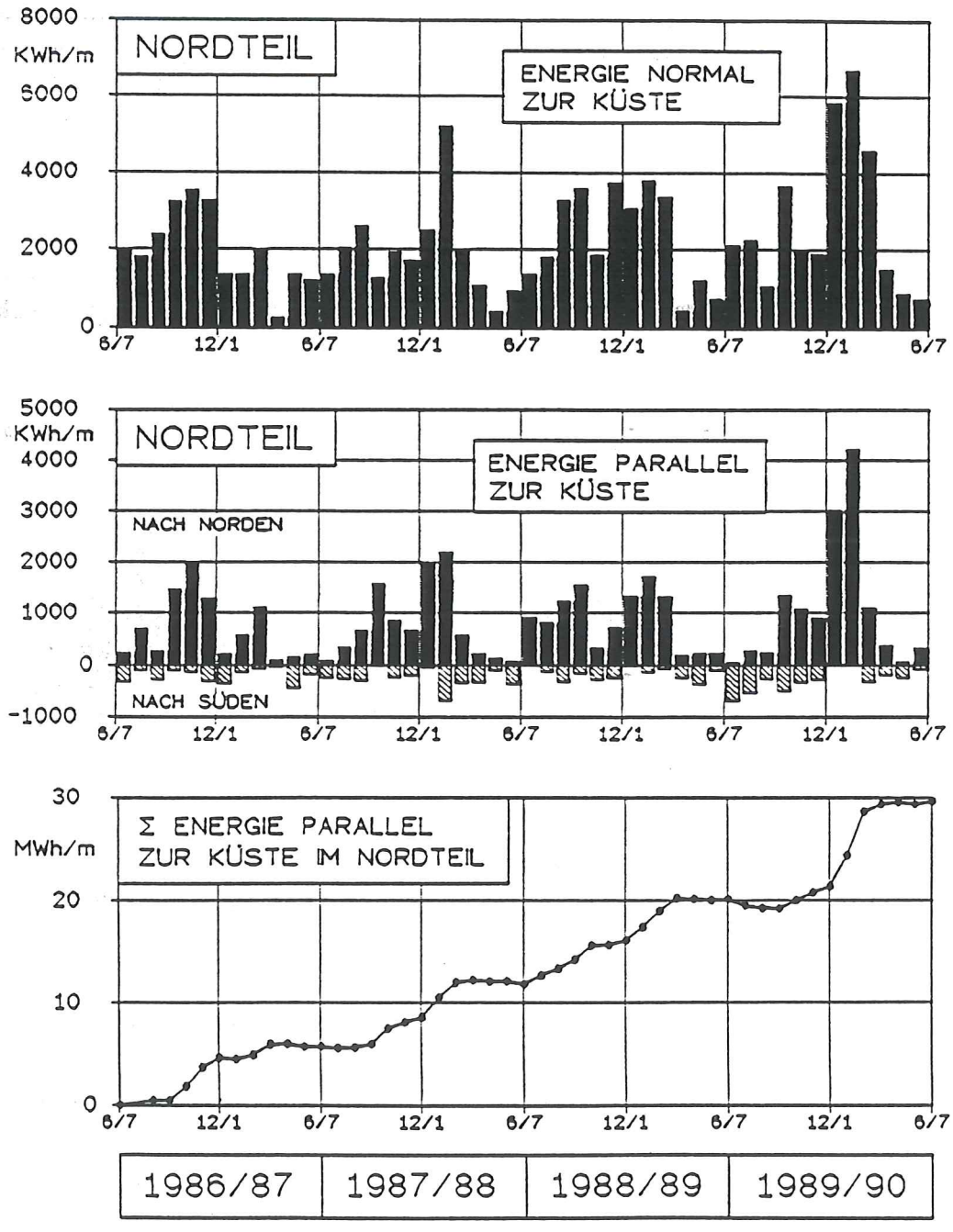


Abb. VI.3 Monatliche Wellenenergien 1986 bis 1990: Nordteil von Sylt (nach DETTE 1991) oben: Küstennormale Energiekomponenten E_n; mitte: Küstenparallele Energiekomponenten E_p; unten: Summenlinie der küstenparallelen Energiekomponente (aus FÜRBÖTER 1991)

7.4 Teilvorhaben "Mathematisches Modell" (Institut f. Strömungsmechanik u. elektr. Rechnen im Bauwesen, Hannover)

Aufgabe

Die Durchführung der Berechnung des Wellengeschehens, der tide- und welleninduzierten Strömungen und des Sedimenttransportes unter Verwendung hydrodynamisch-mathematischer Modelle im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" wurde dem Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover mit dem Teilvorhaben "Numerische Modelle" übertragen.

Ergebnisdarstellung

Der innerhalb des Forschungsvorhabens erbrachte Arbeitsplan für das Teilvorhaben ist schematisch in Abb. VII.1 dargestellt. Zunächst wurden dabei getrennt für sich nur die reinen tide- und brandungsbedingten Strömungen sowie die hieraus resultierenden sedimentologischen Umformungen untersucht und anschließend eine Interaktion dieser beiden physikalisch verschiedenen Vorgänge vorgenommen. Weiterhin wurde die Situation vor und nach der Sandaufspülung im Frühjahr 1989 betrachtet. Für den zweiten Zeitraum war ein Meßpfahl außerhalb des Buhnentestfeldes D_1-E_1 vorhanden, dessen Meßwerte zur Steuerung der numerischen Modelle herangezogen werden konnten.

Die für die Berechnung erforderlichen mathematischen Simulationsmodelle wurden neu erstellt oder auf der Basis bestehender Programme weiterentwickelt. Alle Programme benutzen finite Dreieckselemente zur Darstellung der Tiefenstruktur. Die Rechenmodule sind eingebettet in das Programmsystem TICAD (Tidal Interactive Computation And Design).

Tidegeschehen

Für die hydrologische Simulation der Strömungen in den unmittelbar strandnahen Buhnenfeldern wurden die beiden Buhnentestfelder C-D und D_1-E_1 auf der Insel Norderney herangezogen, da innerhalb dieser Gebiete Natur-Meßdaten vorlagen. Zur Steuerung der numerischen Modelle wurden jedoch auch seeseitige Randwerte in Form von Durchflüssen und Wasserständen benötigt. Daher wurde ein großräumiges Modell entwickelt. Damit konnte die Simulation des Tidegeschehens im gesamten Gebiet landseitig des Riffbogens von Norderney durchgeführt werden und es waren die Randwerte für die lokalen Modelle zu gewinnen. Dieses großräumige Modell wurde mit am Institut entwickelten übergeordneten Modellen der Deutschen Bucht und der Nordsee gesteuert. Die Modellfamilie ist aus Abb.

VII.2 ersichtlich. Das Submodell Norderney wurde dabei für ein mittleres Tidegeschehen anhand des Pegels Norderney-Riffgat verifiziert. In Abb. VII.3 sind für diesen Pegel die berechnete und die gemessene Wasserstandsganglinie wiedergegeben. Anhand der somit vorhandenen Daten konnten die kleinskaligen Modelle betrieben und mittlere Tidevorgänge simuliert werden.

Wellengeschehen

Zur Simulation der seegangsbedingten Vorgänge im Küstenvorfeld wurde ein die Naturbedingungen vereinfachendes Wellenmodell entwickelt, welches auf der von AIRY formulierten linearen Wellentheorie basiert. Aufbauend auf empirischen Ansätzen wird die Veränderung der Wellenhöhen und -richtungen ermittelt unter Einschluß der für Küstengebiete wesentlichen Effekte wie Shoaling, Diffraktion, Refraktion, Brechvorgängen und einer Grundströmung, wie sie z.B. infolge Tide vorhanden sein kann. Für ausgewählte Zeitpunkte wurden mit dem Modell Simulationen des Wellengeschehens im Buhnenfeld D1-E1 vorgenommen. Die Berechnungen erfolgten mit Meßwerten, die vom Leichtweiß-Institut mit den ausgeführten hydraulischen Modelluntersuchungen mit monochromatischen Wellen gemessen wurden. In einem weiteren Schritt wurden aus der infolge Änderung der Wellenhöhen hervorgerufenen Energieverteilung die welleninduzierte Strömung ermittelt. Exemplarisch ist die Verteilung dieser Strömung für den Fall einer senkrecht zum Strand in das Buhnenfeld einlaufenden Welle mit den Parametern $H_{1/3}$ = 1.0 m und T = 3.0 sec bei einem Wasserstand von NN +0.0 m in Abb. VII.4 dargestellt.

Strömung infolge Tide- und Wellengeschehen

Durch mehrfache Superposition der Ergebnisse aus der Tide- und Wellenberechnung wurde ein stationärer Zustand ermittelt, der die zugeordnete Gesamtströmung darstellt.

Sedimentologische Untersuchungen

Die Berechnung der Transportvorgänge, einschließlich der Morphologieveränderungen infolge Erosion und Sedimentation, die auf den vorher ermittelten Strömungsgrößen infolge Tide- und Wellengeschehen aufbauen, erfolgte mit zwei verschieden formulierten Sedimentmodellen, die innerhalb des Projektes erstellt wurden. Als Grundlage dieser Modelle wurden ingenieurpraktisch erprobte Sedimenttransportformeln herangezogen. Bei den ausgeführten Studien ist in erster Näherung davon ausgegangen worden, daß das Umfeld von Norderney durch Sedimentmaterial mit einheitlichem Korndurchmesser beschrieben werden kann.

Statistische Meßdatenanalyse

Ein wesentlicher Teil der Arbeiten erstreckte sich auf die Aus- und Bewertung von Strömungs- und Wellenhöhenmessungen sowie Topographieaufnahmen in der Natur, wobei die Meßdatenerfassung von der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE, Norderney, erbracht worden ist. Ziel dieser Untersuchungen war es, Parameter zu ermitteln, die geeignet sind, die numerischen Modelle zu steuern und zu verifizieren. Die Datenanalyse erfolgte für zwei ausgewählte, jeweils 14-tägige Meßzeiträume. Für die Auswertung und Interpretation der Daten und um Analysen sowohl für den Zeit- als auch für den Frequenzbereich durchführen zu können, mußte umfangreiche Software erstellt werden. Durch die Elimination von niederfrequenten Anteilen aus dem Frequenzspektrum ist die Bestimmung von welleninduzierten und swash- bzw. tidebedingten Anteilen aus einer Meßreihe möglich. Beispielhaft für eine Messung sind in Abb. VII.5 die bereits wieder in den Zeitbereich zurücktransformierten Komponenten dargestellt. Für die Strömungsmessungen wurden ebenfalls Auswertungen sowohl im Zeit- als auch im Frequenzraum vorgenommen. Zur Bestimmung der Anlaufrichtung des Seegangs, die für die numerische Simulation von besonderer Bedeutung ist, wurden Regressionsanalysen durchgeführt. In Abb. VII.6 sind für die verschiedenen Meßpegel die Regressionsgeraden eingezeichnet, wobei die mittlere Regressionsgerade der Wellenanlaufrichtung gleichgesetzt wurde, die in Modellrechnungen eingeführt ist.

Hinweis: Erarbeitet vom Verfasser auf der Grundlage einer diesem zur Verfügung gestellten Ausarbeitung von Prof. Holz/Dipl.-Ing. Nöthel, ISER.

Berichte zum 4. Teilvorhaben "Mathematisches Modell" (Institut f. Strömungsmechanik u. elektr. Rechnen im Bauwesen, Hannover):

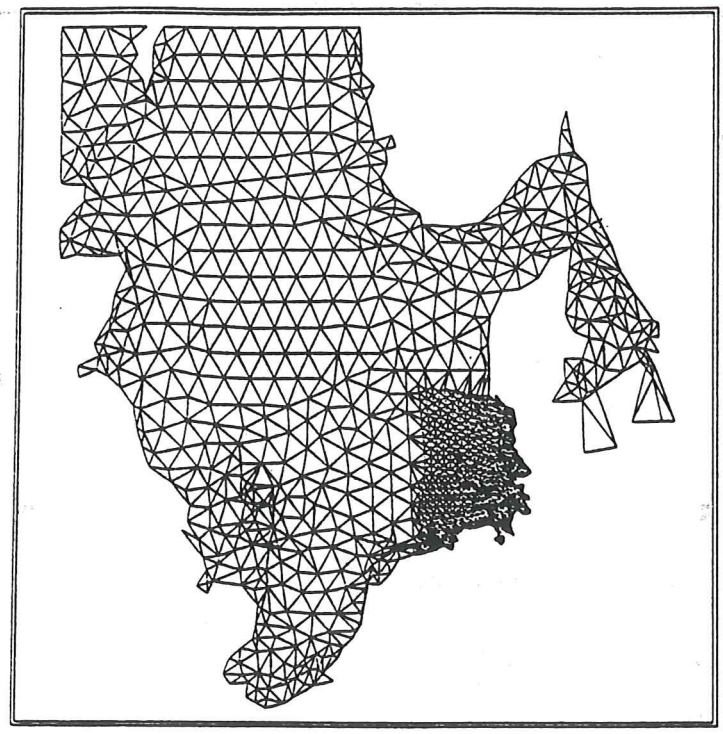
FEIST/NÖTHEL/HOLZ (1988 bis 1991): Fünf Zwischenberichte zum Teilvorhaben "Numerische Modelle" (unveröffentl.).
NÖTHEL/HOLZ (1992): Abschlußbericht zum Teilvorhaben "Mathematische Modelle"; April 1992.

Veröffentlichungen zum 4. Teilvorhaben "Mathematisches Modell" (Institut f. Strömungsmechanik u. elektr. Rechnen im Bauwesen, Hannover):

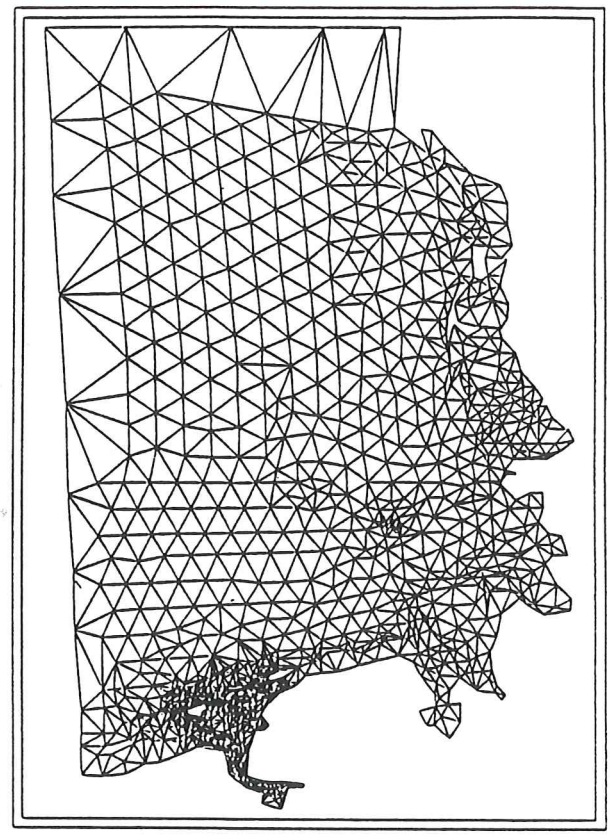
NÖTHEL, H., V. SUNDAR, K.-P. HOLZ (1992): Statistische Analyse von Meßdaten aus einem Buhnenfeld; Die Küste, H. 54, Druck i. Vorber.
SUNDAR, V., H. NÖTHEL, K.-P. HOLZ (1992): Wave Climate in a Groin Field; zur Veröffentlichung akzeptiert im Ocean Engineering.
SUNDAR. V., H. NÖTHEL, K.-P. HOLZ (1992): 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

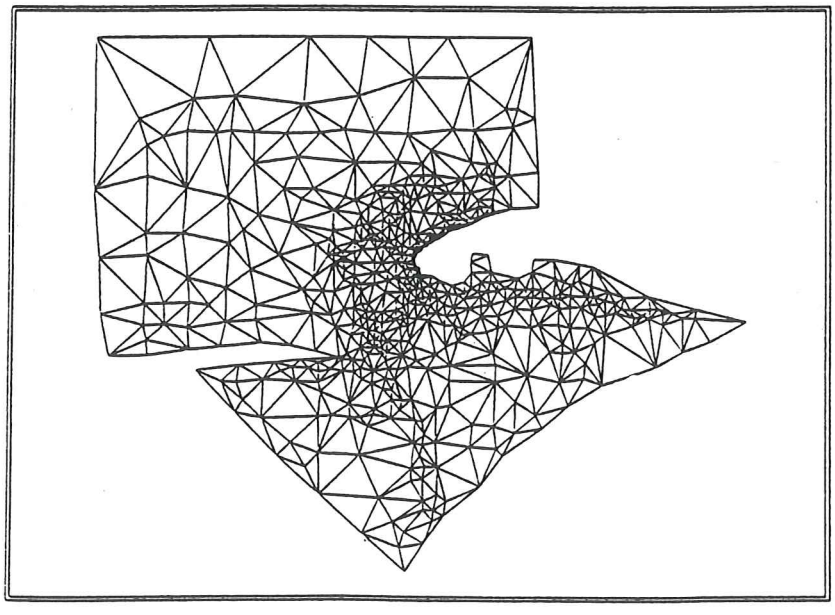
Abb. VII.1 Arbeitsplan für das Teilvorhaben "Mathematisches Modell"



Nordseemodell



Deutsche – Bucht – Modell



Submodell Norderney

Abb. VII.2 Modellfamilie zur Berechnung von Tide-Wasserständen und Wellen am "offenen Rand" des Untersuchungsgebietes (Buhnenstreichlinie)

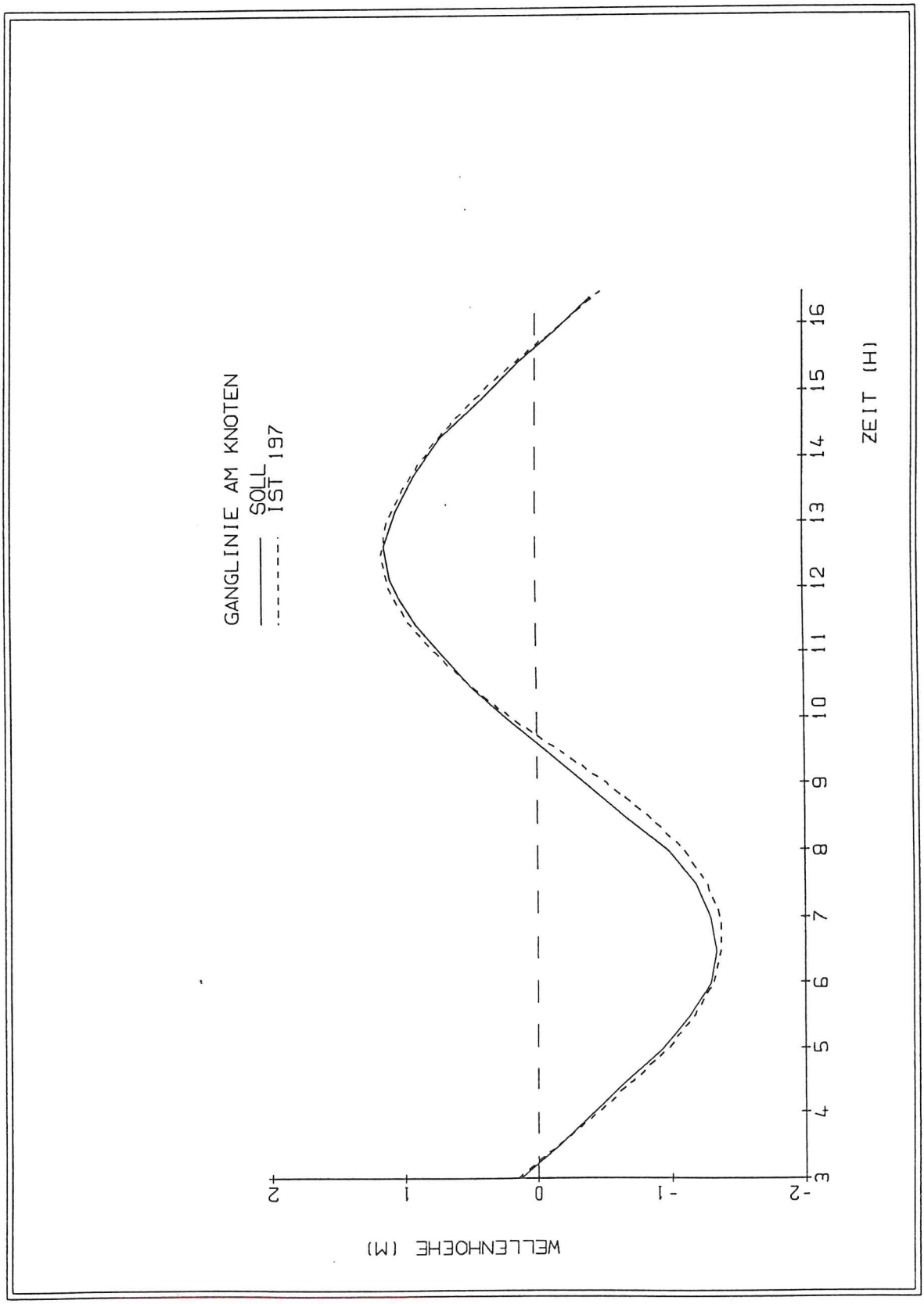


Abb. VII.3 Wasserstandsganglinien am Standort des Pegels Norderney Riffgat - Vergleich Naturmessungen und Berechnungsganglinien des numerischen Modells

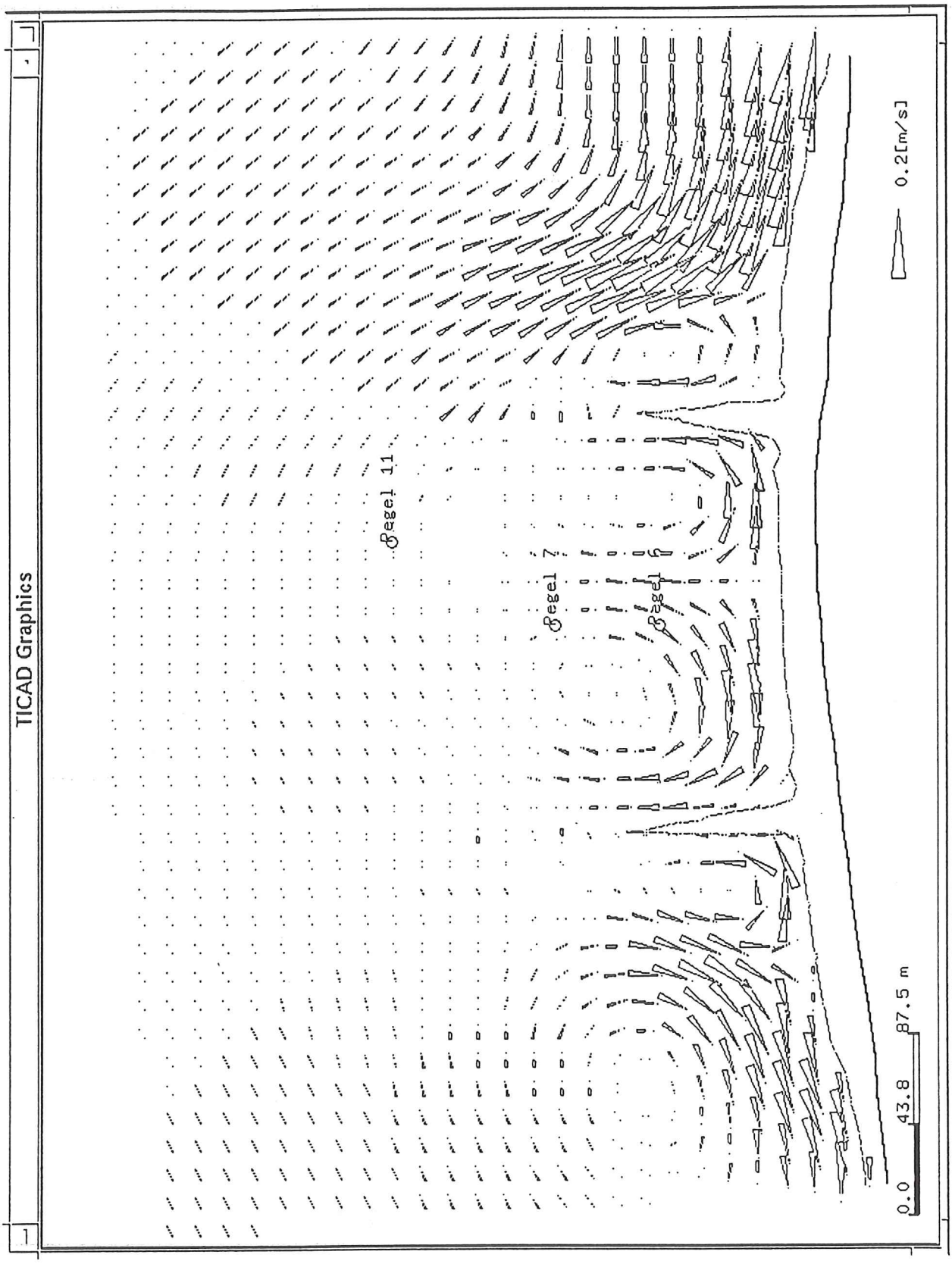


Abb. VII.4 Brandungsinduzierte Strömung infolge einer senkrecht zum Strand in das Untersuchungsgebiet (Buhnenfelder) einlaufenden Welle - Eingabewerte aus TV 3 (Hydraulisches Modell)

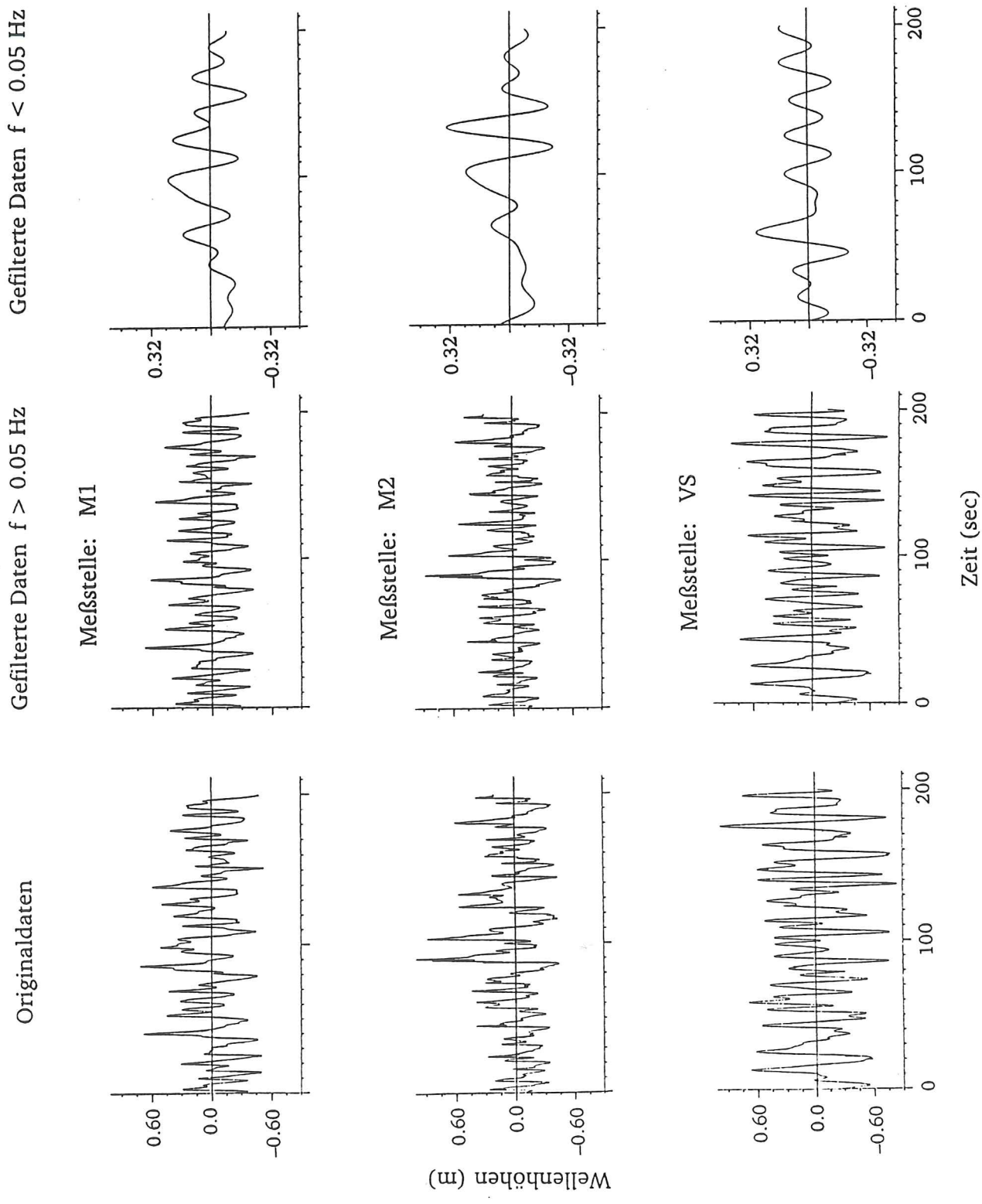


Abb. VII.5 Zeitreihe der Seegangsverteilung am 17.04.1991, 08:45 Uhr Naturmeßdaten aus TV1 "Hydrographie"

Legende:

- - - - - - Regressionsgerade $x = f(y)$ bzw. $y = f(y)$

——— mittlere Regressionsgerade

Abb. VII.6 Ergebnisse von Untersuchungen zur Bestimmung der Anlaufrichtung des Seeganges aus gemessenen Geschwindigkeiten (aus TV1 "Hydrographie") im globalen rechtsweisend Nord ausgerichteten Koordinatensystem

Gemessene Geschwindigkeiten (cm/s) im globalen Koordinatensystem

Datum : 18.11.1988

Zeit : 01:57 Uhr

zugehörige Tidekurve am Pegel Norderney-Riffgat:

8. Forschungsziele und deren Vernetzung zu Ergebnissen, Ausblick

Die in den Kap. 5 bis 7 beschriebenen Untersuchungen sind als Diagramme in den Abb. 3 und 4 so verknüpft worden, daß die Zuordnung zu den übergeordneten Forschungsfeldern des Gesamtvorhabens erkennbar wird.

In der Abb. 3 steht die Erweiterung unserer Kenntnisse zur "Physik der Prozesse" im Mittelpunkt. Dies umfaßt eine Vielzahl der für die Sandbewegungen in Wechselwirkung mit der natürlichen Umwelt und Küstenschutzwerken maßgebenden Teilfragen. Die praktische Anwendung führt zu Grundsätzen, mit denen eine Minimierung der Sand-Verlustraten aus Strandaufspülungen unter Einbeziehung der Wirkung von Küstenbauwerken erreicht werden kann.

Die Abb. 4 zeigt die Verknüpfung der mit der Abb. 3 zuvor angesprochenen Thematik "Sandbewegungen" mit dem Forschungsbereich "Technik der Strandaufspülung". Diese führt zu Grundsätzen, wie eine Minimierung der Kosten von Strandaufspülungen zu erreichen ist. Darauf aufbauend sind dann Empfehlungen für Insel- und Küstenschutz-Techniken zu entwickeln, die möglichst umweltverträglich und kostengünstig sind und zudem die Resource "Seesand" nicht verschwenden.

Das KFKI-Verbundvorhaben "Wechselwirkungen" erbrachte zahlreiche Ergebnisse, die man benötigt, um die in den Abb. 3 und 4 ausgewiesenen Ziele erreichen zu können. Viele der gewonnenen Erkenntnisse sind bereits jetzt bei der Planung und Ausführung von Strandaufspülungen praktisch anwendbar.

Mit dem KFKI-Folgevorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von 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 Küstenschutz-Programms auf Norderney ausgeführten Versuchs-Strandaufspülung, 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.

Die Ergebnisse des KFKI-Verbundforschungsvorhabens "Wechselwirkungen" sind in Forschungsberichten und bereits auch in zahlreichen Veröffentlichungen mitgeteilt worden; die Anlage 3 enthält eine Zusammenstellung.

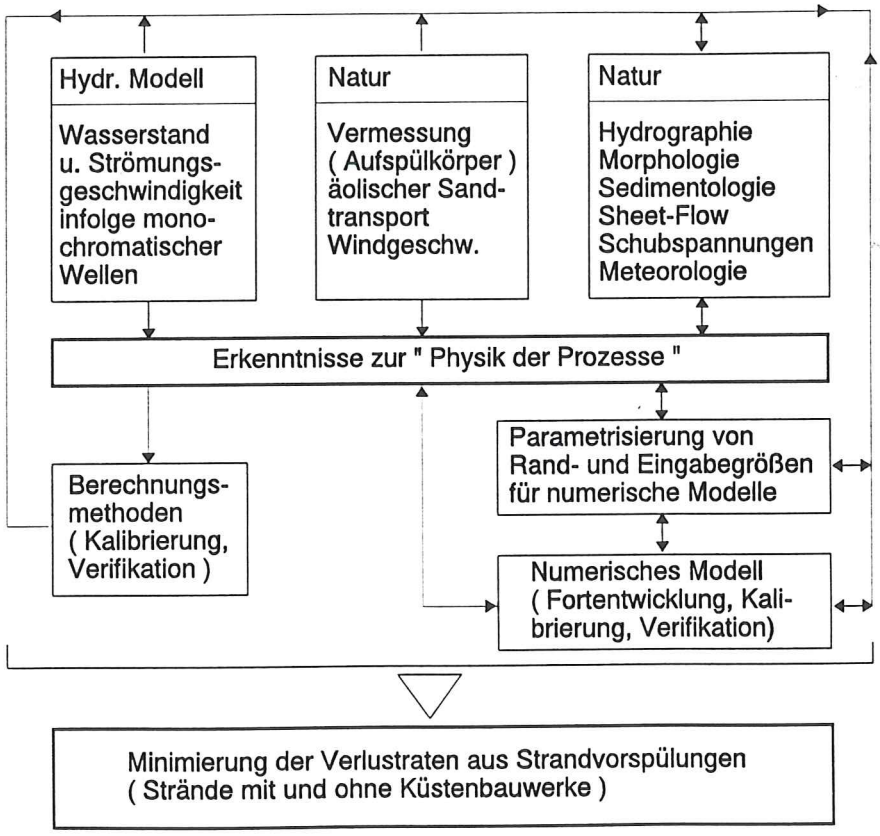


Abb. 3 Diagramm zu den Zielen des KFK-Forschungsvorhabens "Wechselwirkungen..." und deren informativer Verkopplung

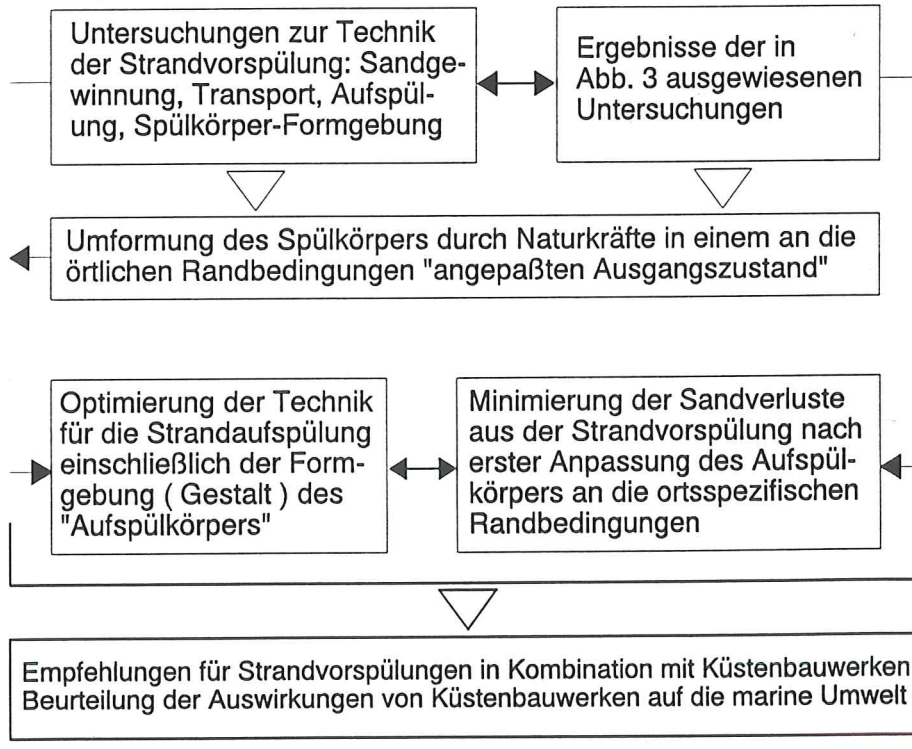


Abb. 4 Diagramm zur Einbindung der Untersuchungen zur "Technik der Strandvorspülungen einschließlich anfänglicher Umformungen des Aufspülkörpers" in das Gesamtvorhaben

9. Schrifttum

Hinweis: Das Schrifttum zum Kap. 7 ist dort jeweils im Anschluß an die einzelnen Teilvorhaben/Teilprojekte aufgeführt.

AUSSCHUSS KÜSTENSCHUTZWERKE der HTG und DGEG (1981): Empfehlungen für Strandauffüllungen als Küstenschutz; Naßbaggerberichte Bd. 5, 1977 und Die Küste, Bd. 36, 1981.

DETTE, H.H., M. SCHULZE, M. LAUE (1988): Zur Dokumentation von Sandvorspülungen - Stand April 1988; Bericht Nr. 660 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, (unveröffentl.).

DETTE, H.H., K. ULICZKA (1989): Rechnerische Abschätzung des Diffusionskoeffizienten aus Suspensionsmessungen im Großen Wellenkanal; Bericht Nr. 676 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, (unveröffentl.).

DETTE, H.H., J. NEWE, F. SPINGAT (1991): Zur Erstellung einer mehrjährigen Zeitreihe von Seegangsdaten aus Messungen und Korrelationsberechnungen; Bericht Nr. 711 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, (unveröffentl.).

DETTE, H.H., M. SCHULZE, M. LAUE (1992): Sandvorspülungen an der Deutschen Nordseeküste (1951 - 1991); Bericht Nr. 744 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, (unveröffentl.).

EITNER, V., G. RAGUTZKI, T. WESTHOFF (1992a): Sedimentologische Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt; Schlußbericht Teil "Sedimentologie" des TV "Naturuntersuchungen"; Forschungsstelle Küste, Norderney, (unveröffentl.).

EITNER, V., G. RAGUTZKI, T. WESTHOFF (1992b): Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge; Die Küste, H. 54.

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

FÜHRBÖTER, A., H.H. DETTE, K.P. SCHULZ ((1988): Modelluntersuchungen zu wellenerzeugten Strömungen in einem Buhnenfeld; Bericht Nr. 679 d. Leichtweiß-Instituts d. TU Braunschweig, (unveröffentl.).

GUST, G. (1992): Naturuntersuchungen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen

an erodierenden Stränden - "Schubspannungsmessungen"; Schlußbericht zum FV MTK 385 (unveröff.)

HOLZ, K.P., H. NÖTHEL (1992): Abschlußbericht zum Teilvorhaben "Mathematische Modelle",Institut f. Strömungsmechanik, Uni Hannover, (unveröffentl.).

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

KRAMER, J. (1958): Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951/52; Jber. 1957, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 9, Norderney.

KUNZ, H. (1987): History of Seawalls and Revetments on the Island of Norderney; Coastal Sediments '87, proc. vol. 1, ASCE, New York.

KUNZ, H. (1991a): Artificial beach nourishment on Norderney, a case study; Proc. 22nd Int. Conf. Coast. Eng. 1990 (Delft), Bd. 3:3254-3267, ASCE, New York.

KUNZ, H. (1991b): 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.

KUNZ, H., H.-J. STEPHAN, (1992a): Schlußbericht zum Teilvorhaben "Naturuntersuchungen", Teil "Morphologie".

KUNZ, H., H.-J. STEPHAN, (1992b): Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney; Die Küste, H. 54.

LAUE, M., H.F. ERCHINGER (1990): 5. Teilbericht "Zeitliche Entwicklung der Strandprofile nach der 6. Strandaufspülung und Empfehlungen zur Gestaltung des Aufspülkörpers"; StAIK, Norden, (unveröffentl.).

NIEMEYER, H.D. (1987): Tidestrommessungen in Buhnenfeldern; Jber. 1986, Forschungsstelle Küste, Bd. 38, Norderney.

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. (1992a): Naturuntersuchungen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen an erodierenden Stränden; Schlußbericht zum FV MTK 385, Teil "Hydrographie" (unveröff.).

NIEMEYER, H.D. (1992b): Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen; Die Küste, H. 54.

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

SCHMIDT, H.J. (1988): Eine Abschätzung des äolischen Sandtransportes infolge einer hoch an das Deckwerk der Insel Norderney reichenden Strandaufspülung; Bericht SWA Hamburg, (unveröffentl.).

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

STREIF, H. (1988): Lagerstättenkundliche Auswertung von Bohrungen auf der Robbenplate; Bericht Nieders. Landesamt f. Bodenforschung, Hannover, (unveröffentl.).

TILLMANN, B, H.F.ERCHINGER (1991): 6. Teilbericht "Überlegungen zu Bauverfahren und Formgebung künftiger Strandaufspülungen", StAIK Norden, (unveröffentl.).

TILLMANN, B., H.F. ERCHINGER (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben "Versuchsorientierte Strandaufspülung"; StAIK, Norden, (unveröffentl.).

WESTHOFF, T. (1990): Sedimentologische 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.

Danksagung:
Das interdisziplinäre KFKI-Verbundforschungsvorhaben "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" wurde vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert. Hierfür und für die Begleitung des Vorhabens von der Antragstellung bis zu dessen Abschluß hin wird an dieser Stelle noch einmal dem Ref. Meerestechnik gedankt.
Beratungsgremium und Bindeglied zum Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) war die in der Anlage 2 ausgewiesene Projektgruppe. Die Mitglieder der Projektgruppe

wurden von den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Verbundvorhabens tatkräftig unterstützt. Das Projekt hatte zahlreiche Mitwirkende, deren Namen nicht als Verfasser von Ergebnissen wissenschaftlicher Arbeiten erscheinen, ohne deren Einsatzfreude, Können und Sorgfalt aber das Projekt nicht hätte durchgeführt werden können. Dies gilt insgesamt, in besonderen Maße aber für diejenigen Projektteile, die den naturnahen Einsatz vor Ort und eine unmittelbare Auseinandersetzung mit der "marinen Umwelt" erforderten.

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 01.10.92: 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**" (Wiss. Leitg.: Prof. G. 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, Merkurstr. 11, 3000 Hannover 21.

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; Staatliches Amt für 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 (TV1) - 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 den 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 Seegangs- und Strömungsmessungen.
RAGUTZKI/WESTHOFF (1987-1990): Fünf Zwischenberichte zu den sedimentologischen Untersuchungen.
STEPHAN (1988): Fünf Strandauffüllungen vor Norderney - Ergebnisse morphologischer Untersuchungen, Zwischenbericht.
WESTHOFF (1991): Markierungsversuche mit Luminophoren zur Kennzeichnung des Sedimenttransportes in einem Buhnenfeld, Zwischenbericht.
EITNER/RAGUTZKI/WESTHOFF (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben "Naturuntersuchungen", Teil "Sedimentologie" (August 1992).
KUNZ/STEPHAN (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben "Naturuntersuchungen", Teil "Morphologie" (September 1992)
NIEMEYER (1992): Naturuntersuchungen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen an erodierenden Stränden; Schlußbericht zum Teilvorhaben "Naturuntersuchungen", Teil "Hydrographie" (Dezember 1992)
KUNZ (1992): Zusammenfassender Schlußbericht zum Teilvorhaben "Naturuntersuchungen" (Dezember 1992)

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.
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 Buhnenfeldern; 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 Transportphenomenen 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-Harburg.

Berichte:

GUST (1992): Sonderaufgabe "Schubspannungsmessungen", Kurzbericht.
GUST (1992): Schlußbericht zum Teilvorhaben "Naturuntersuchungen", Teilaufgabe "Schubspannungsmessungen" (Dezember 1992)

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 Strandaufspülung, 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" (August 1992)

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 (August 1992)

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.; B. TILLMANN (1992): Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989; Die Küste H. 54.

3. TV "Hydraulische Modelle, Dokumentationen", Leichtweiss-Institut der Technischen 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 (August 1992)

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

Veröffentlichungen:

DETTE, H.H. (1991): Expericences 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.
HOLZ/ NÖTHEL (1992): Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt - Mathematisches Modell: Abschlußbericht (April 1992).

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.