

Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen

VON HANZ DIETER NIEMEYER

Zusammenfassung

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

Summary

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

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

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

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

Inhalt

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

1. Einführung und Problemstellung

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

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

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

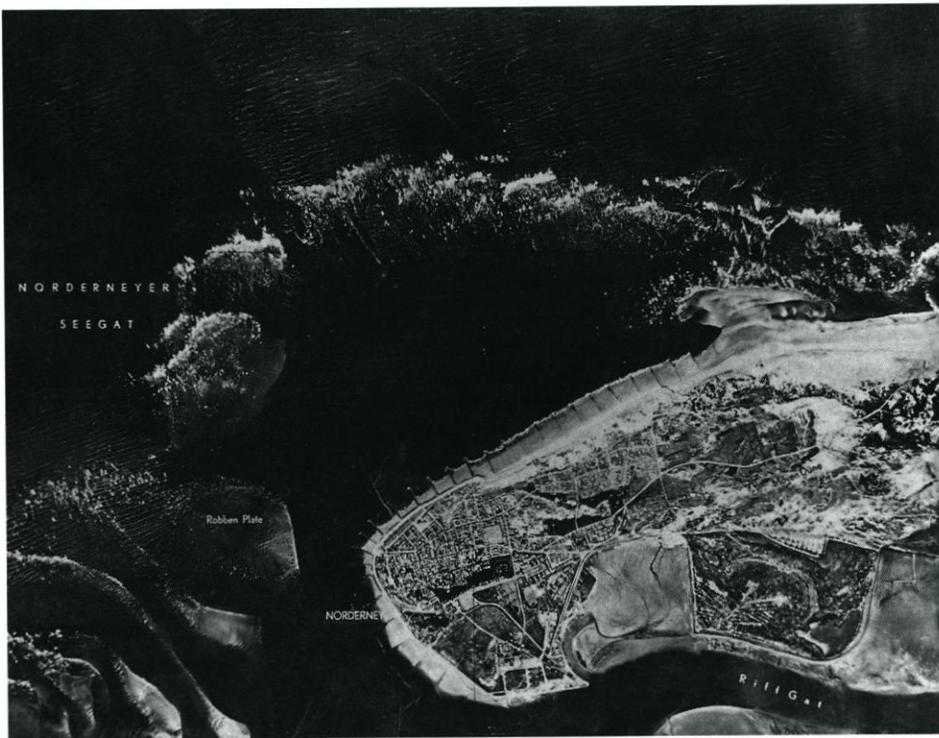


Abb. 1: Riffbogen vor dem Norderneyer Seegat und Inselvorstrand mit leichter Brandung. Der Anlandungsbereich liegt in Driftrichtung etwa ein Drittel der Insellänge westlich des Seegats

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

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

2. Hydrographische Naturuntersuchungen

2.1 Hydrographische Randbedingungen

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

Mittlere Tidekurve

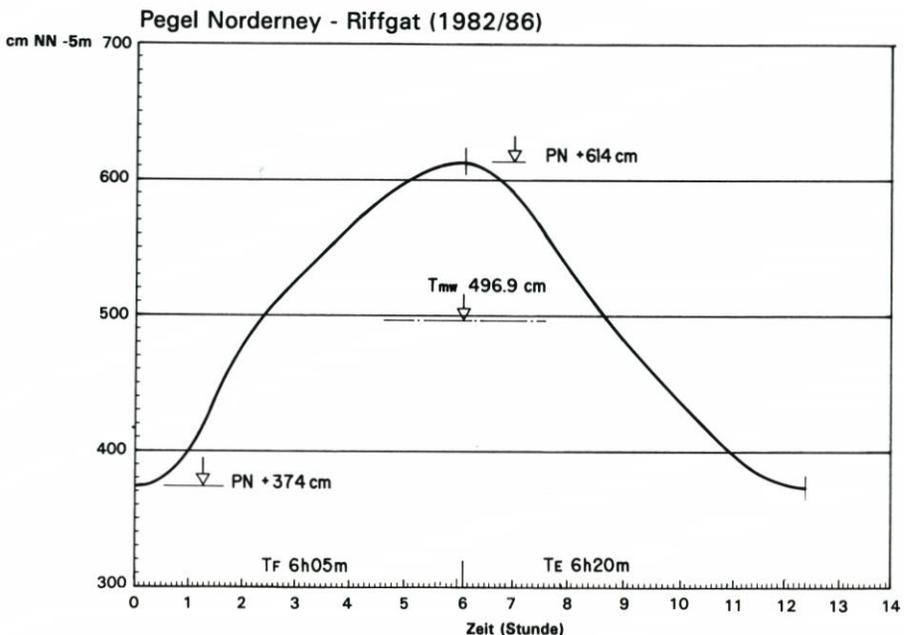


Abb. 2: Mittlere Tide am Pegel Norderney-Riffgat nach LASSEN u. SIEFERT (1991)

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

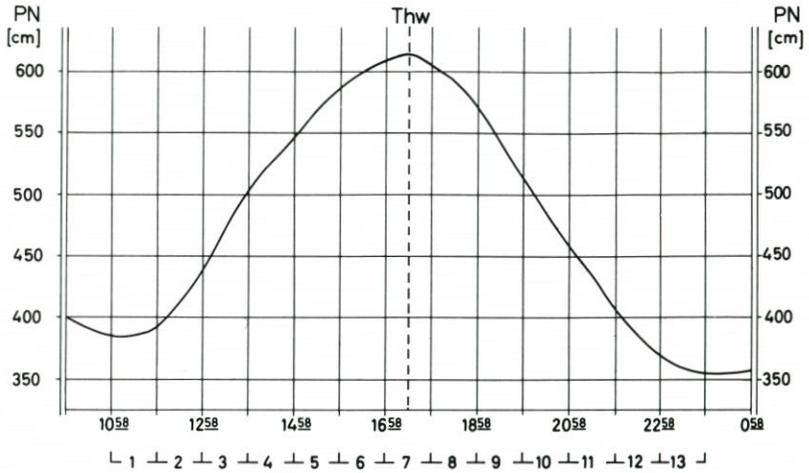
Windfluten:	MThw + 0,93 m
Sturmfluten:	MThw + 1,95 m
Orkanfluten:	MThw + 2,86 m

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

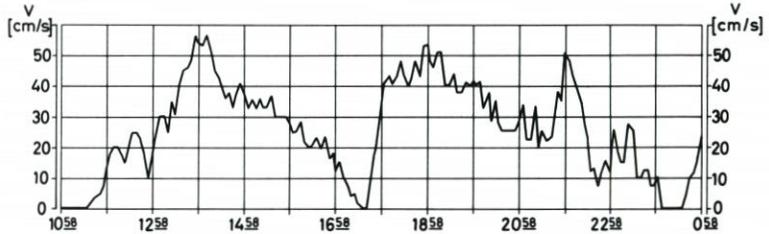
Aus den Erkenntnissen über die Strömungsverhältnisse auf den Stränden von Norderney (NIEMEYER, 1987b) und der Lage primärer Erosionsbereiche kann gefolgert werden, daß die Erosions- und Sedimentationsvorgänge auf den Stränden von Norderney im wesentlichen durch Seegang und Brandung bestimmt sind. Energiereicherer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

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

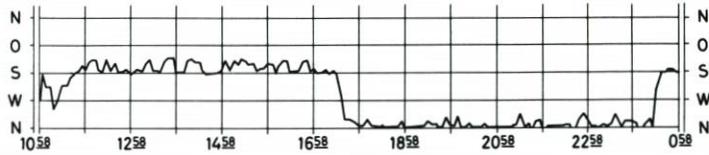
Ganglinie des Tidewasserstandes mit Phaseneinteilung zur Bestimmung der Stromvektoren sowie der Strömungen im Seegat



Strömungsgeschwindigkeiten



Strömungsrichtungen



Tidestrommessungen

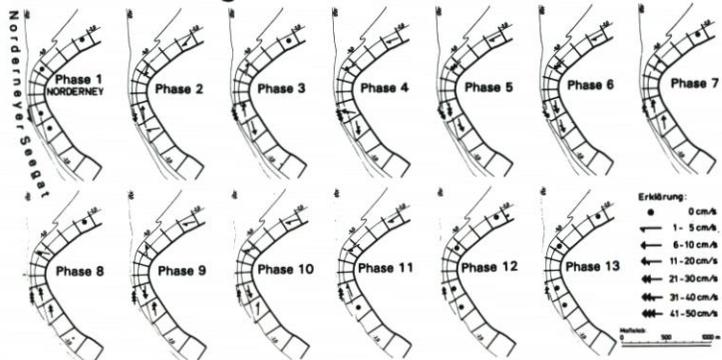


Abb. 3: Tideströmungen bei einer Normaltide im Seegat und auf den westlichen und nordwestlichen Stränden; a: Ganglinien der Wasserstände, Stromgeschwindigkeiten und -richtungen im Seegat; b: Stundennittel der Stromvektoren im Seegat und auf den Stränden

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

2.2 Das hydrographische Meßprogramm

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



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

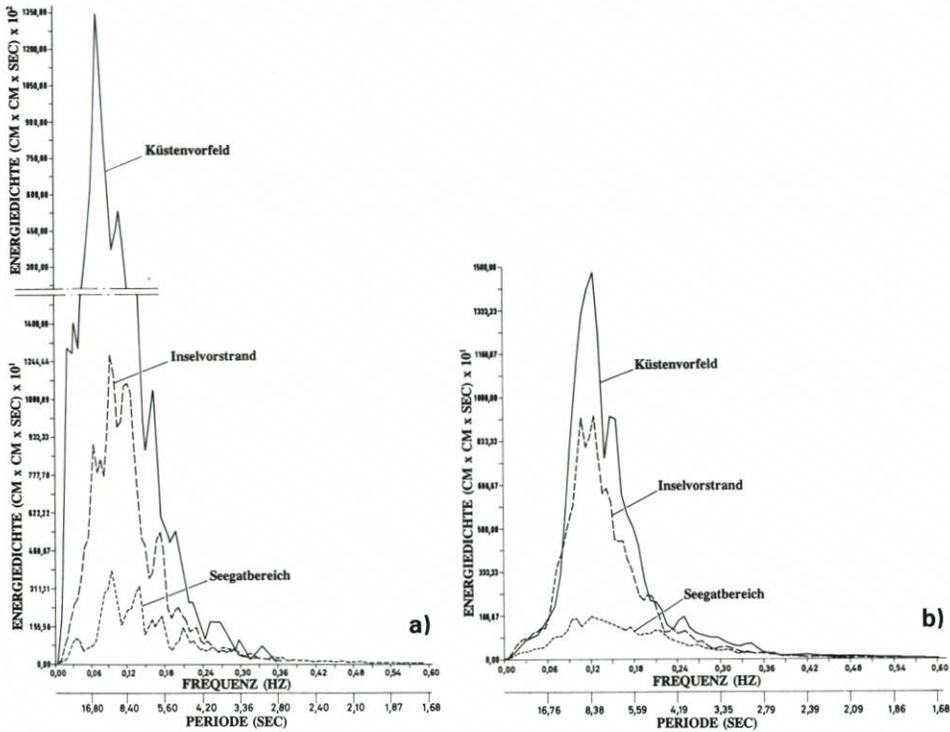


Abb. 6: Energiespektren des Seegangs im Küstenvorfeld, auf dem Inselvorstrand und im Seegat; a: bei auflandigem Sturm; b: bei auflandigem Starkwind

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

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

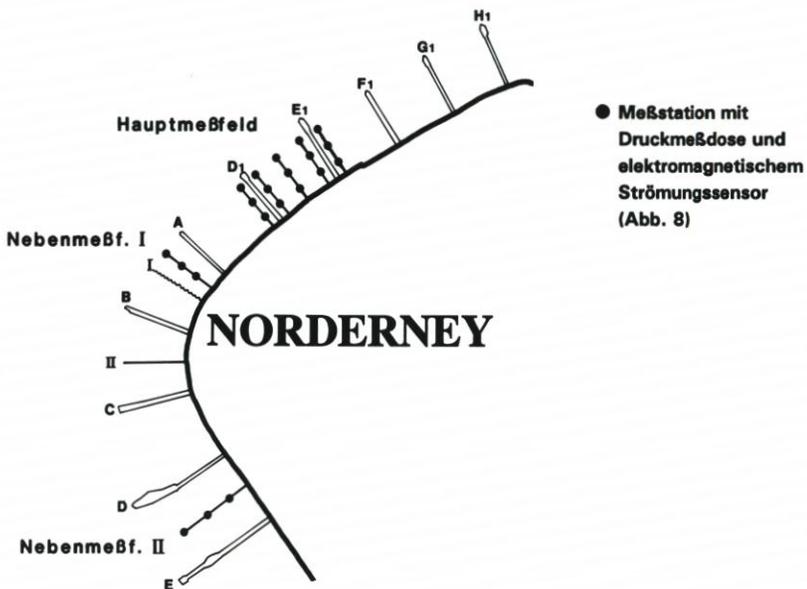
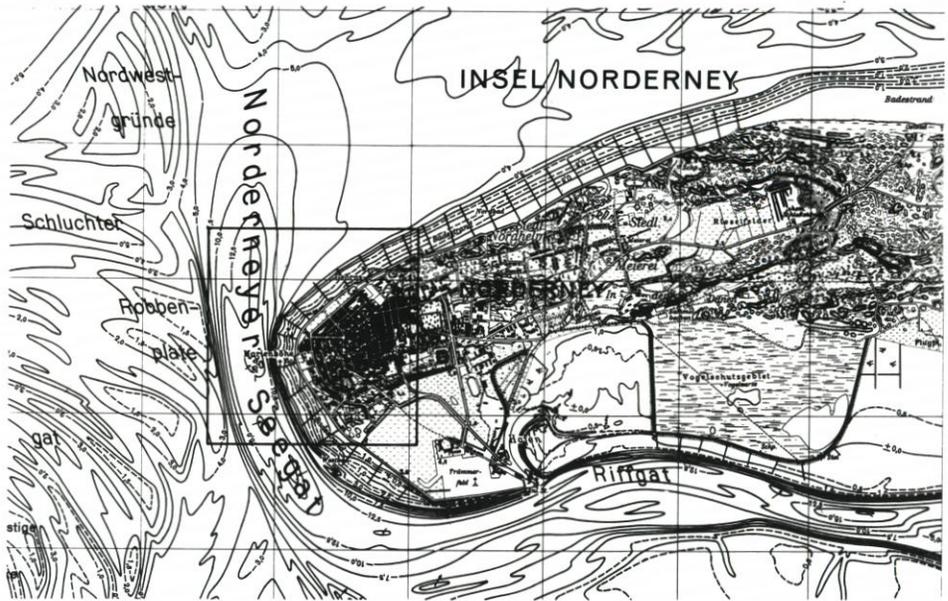


Abb. 7: Lage der Meßfelder auf den Inselstränden und Anordnung der Meßstationen

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

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

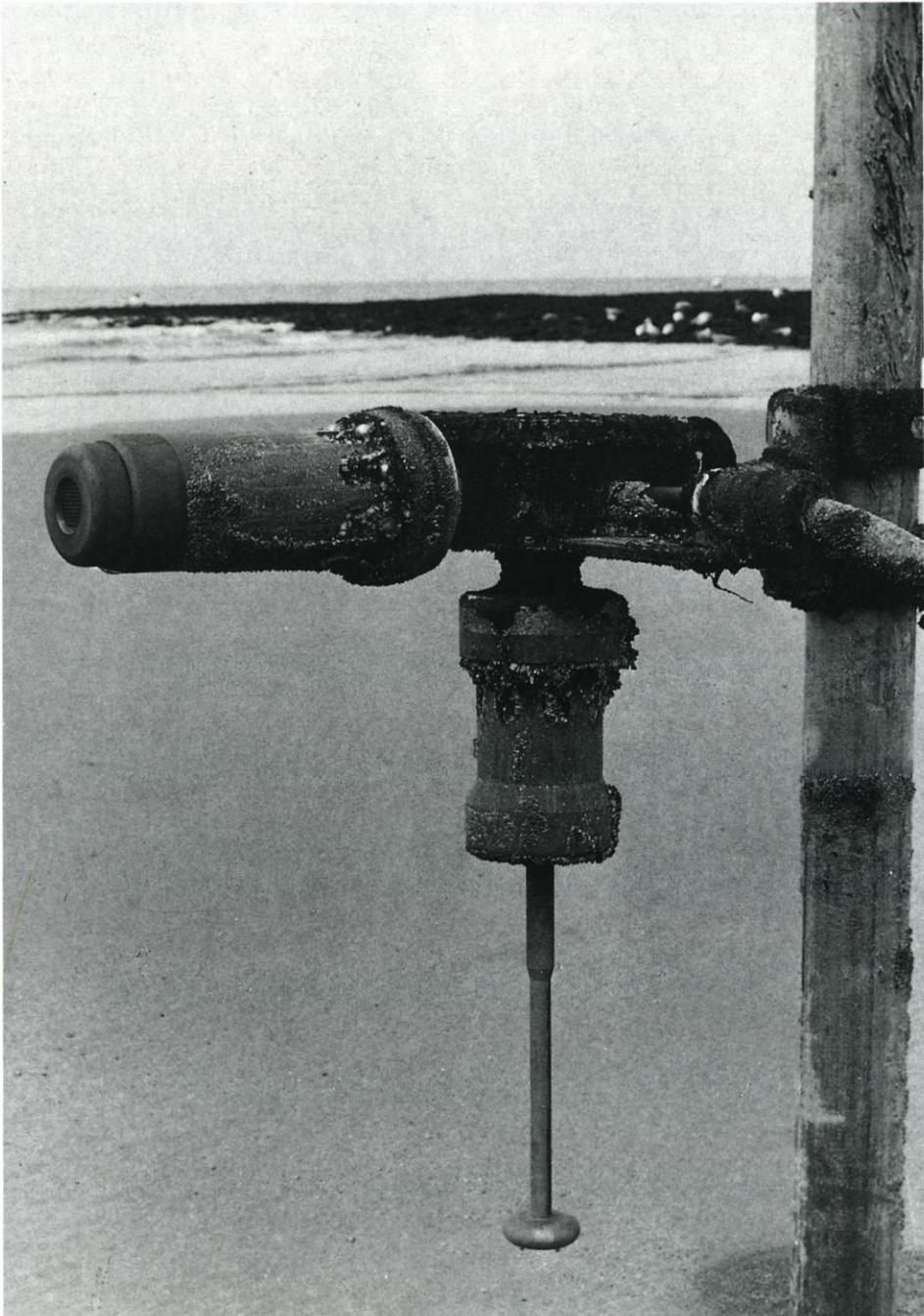


Abb. 8: Meßstation auf dem Strand mit Druckaufnehmer-Wellenpegel und Strömungssensor nach dem Induktionsprinzip

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

2.3 Analyse der Meßdaten

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

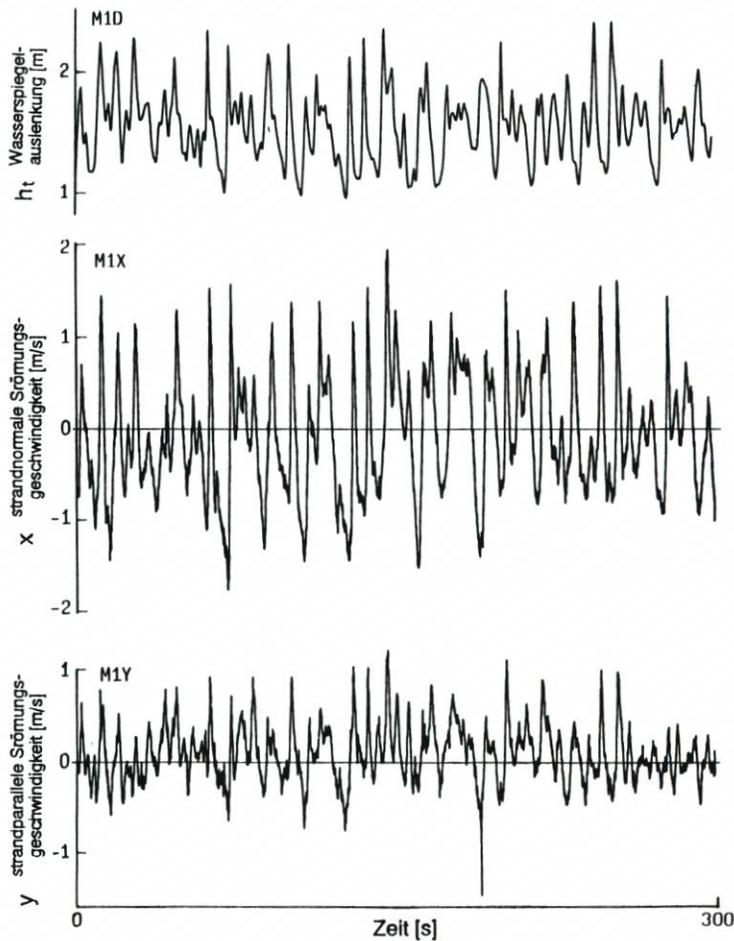


Abb. 9: Ganglinien der Wasserspiegelauslenkungen und Strömungskomponenten an einer Station auf dem Strand

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

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

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

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

3. Erosions- und Regenerationsvorgänge an Stränden

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

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

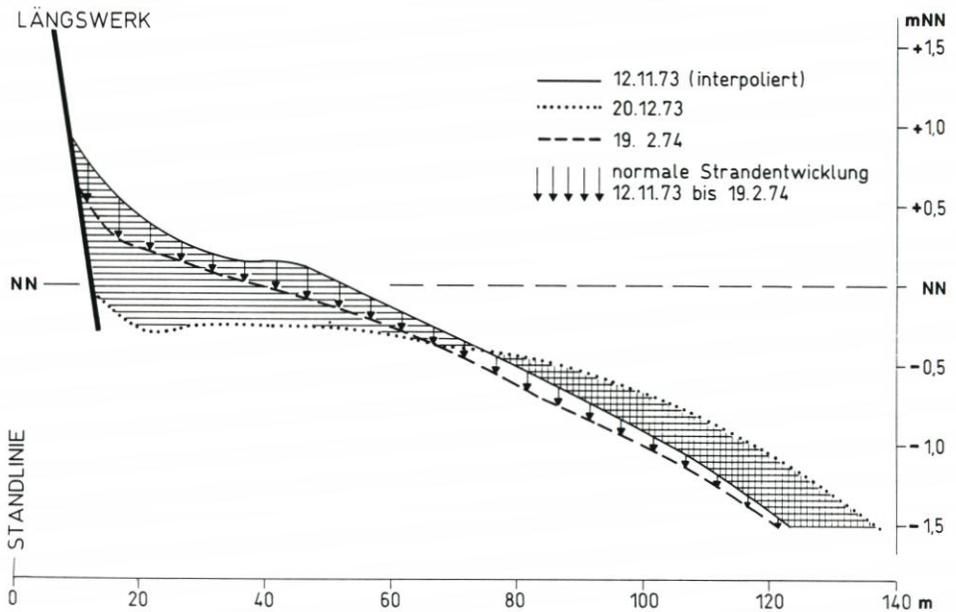


Abb. 10: Erosion und Regeneration von Stränden nach HOMEIER (1976)

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

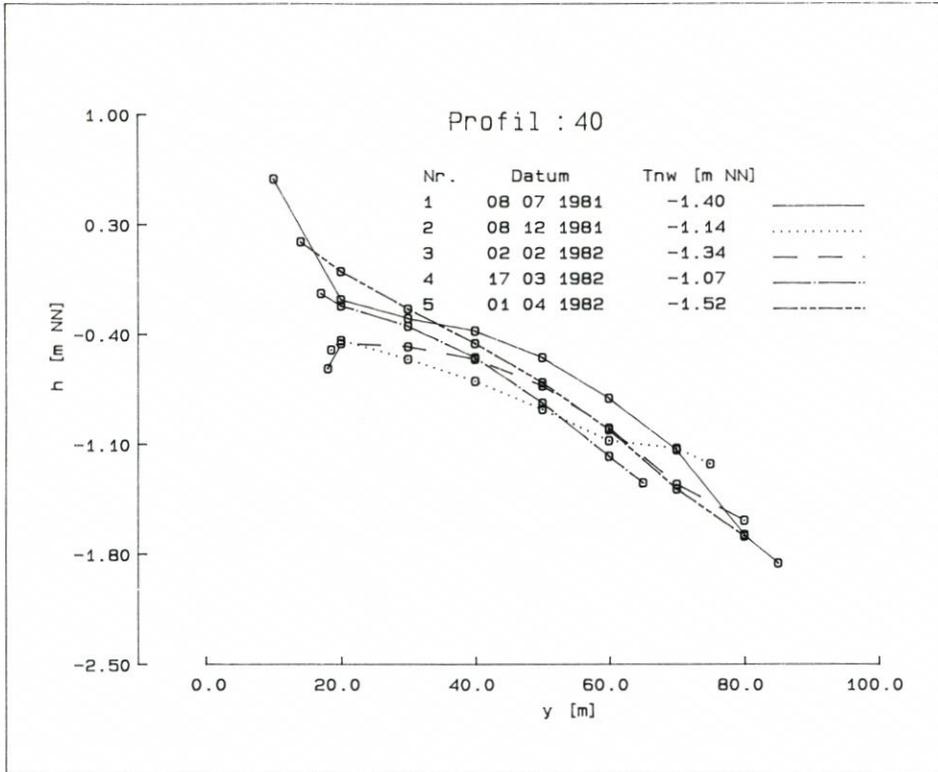


Abb.11: Erosion infolge der Sturmfluten vom 24. 11. 1981 und nachfolgende Regeneration eines Strandabschnittes auf Norderney (Profil 40)

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

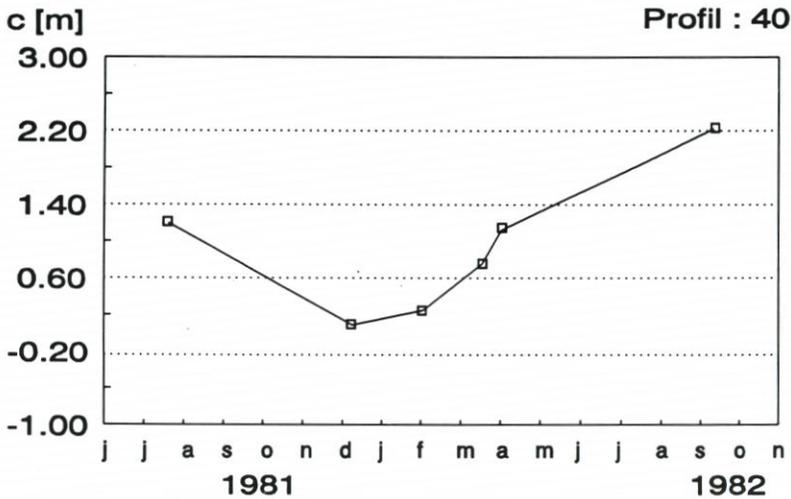
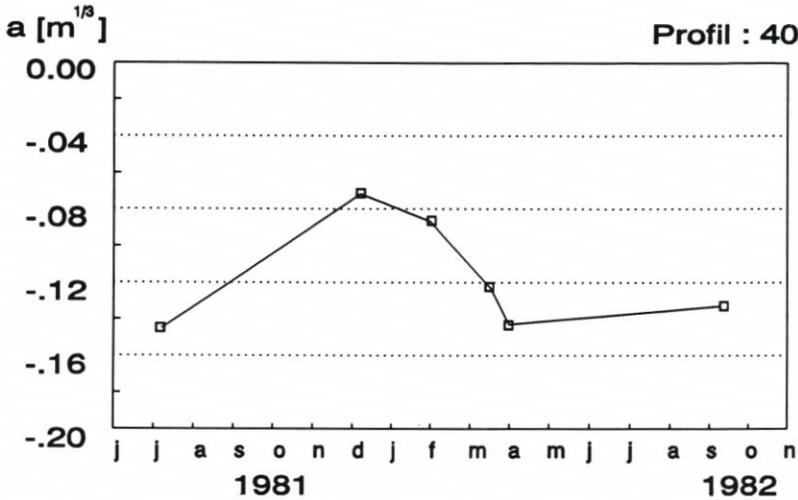


Abb. 12: Verlauf der Parameter der Regressionsgleichung zur Approximation des Strandprofils in Abhängigkeit von Strandumlagerungen (Abb. 11)

4. Analyse seegangs- und strömungsgeprägter Transportbedingungen

4.1 Vorgehensweise

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

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

4.2 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Sturmflut

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



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

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

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

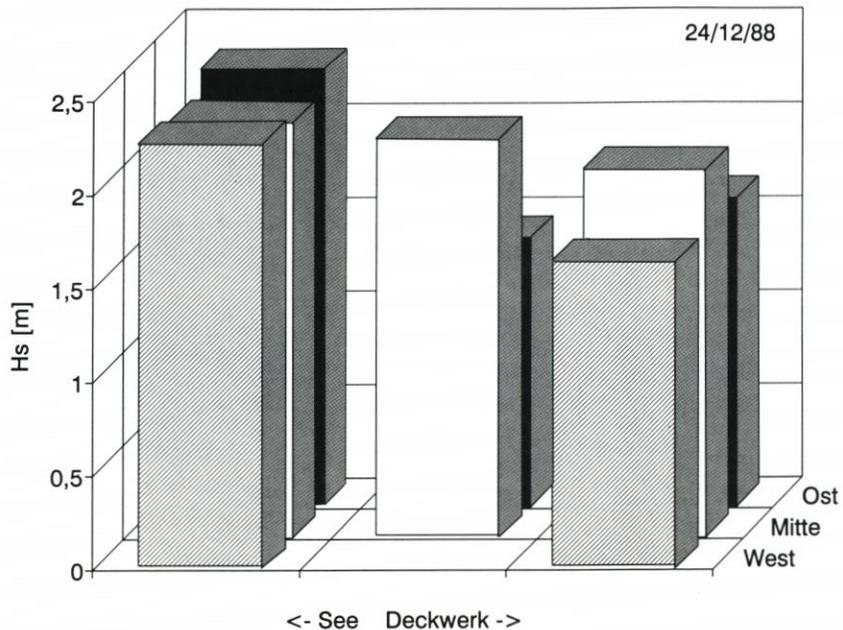


Abb. 14: Signifikante Wellenhöhen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

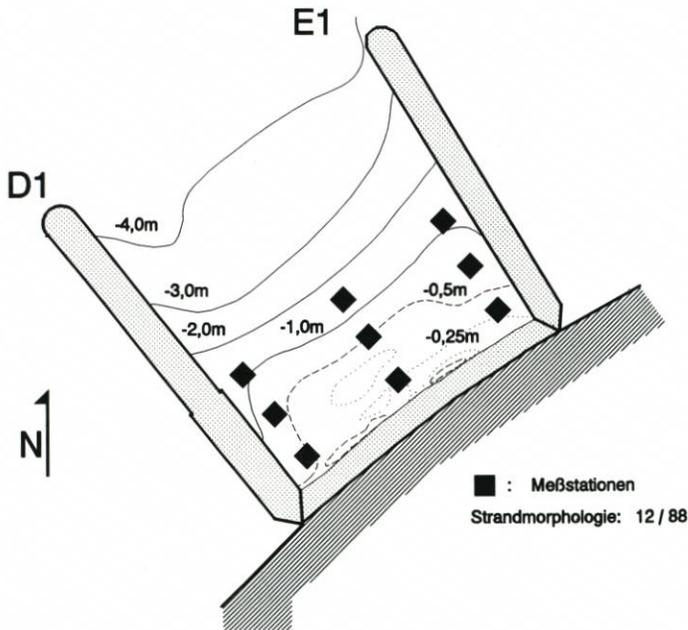


Abb. 15: Tiefenlinien im Bühnenfeld D1/E1 im Dezember 1988

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

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

Tabelle 1.

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

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

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

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

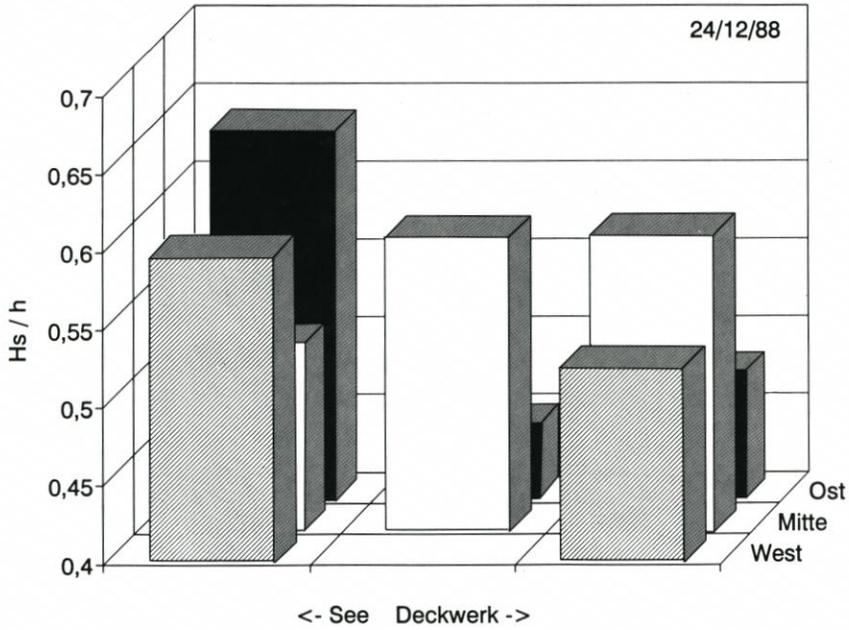


Abb. 16: Verhältnis der signifikanten Wellenhöhen und Wassertiefen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

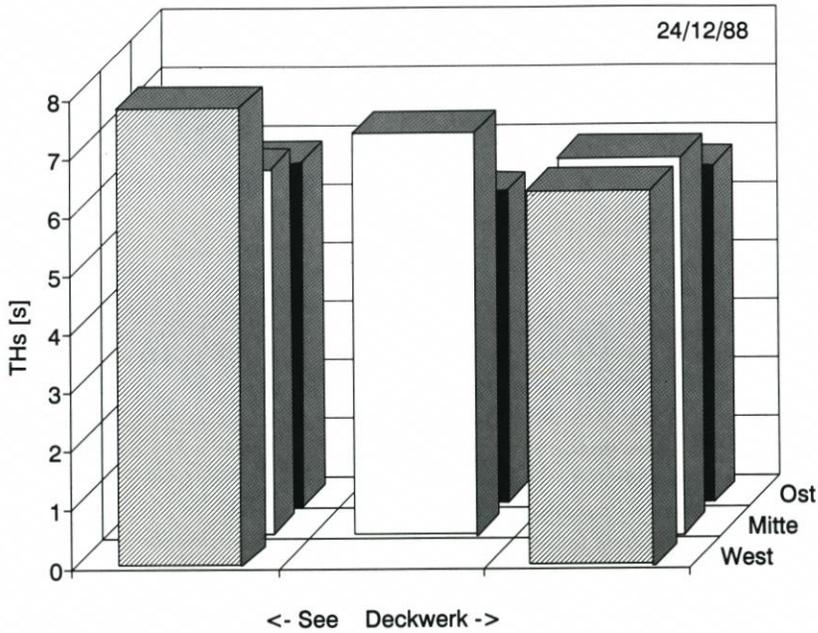


Abb. 17: Signifikante Wellenperioden an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

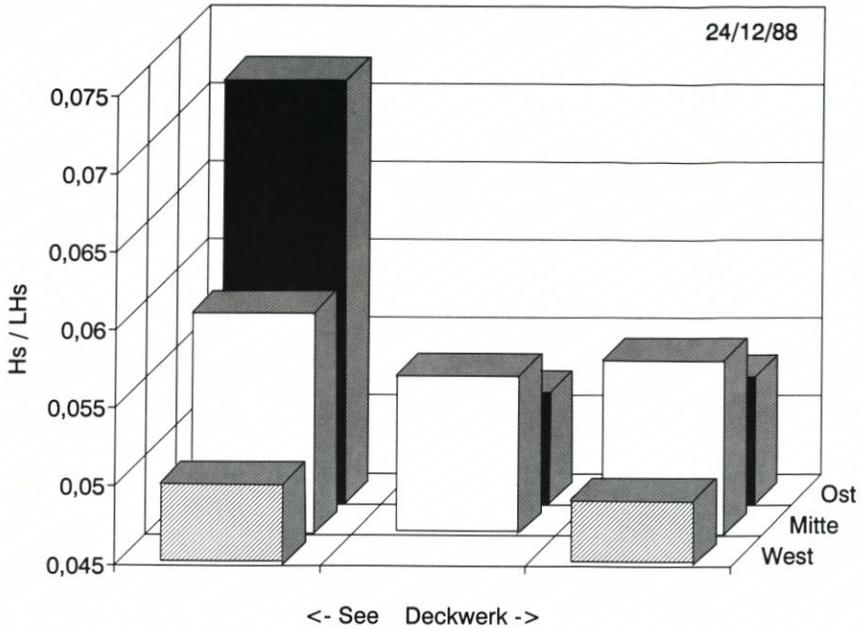


Abb. 18: Signifikante Wellensteilheiten an den Stationen im Bühnfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

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

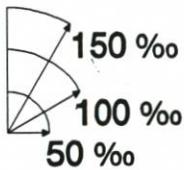
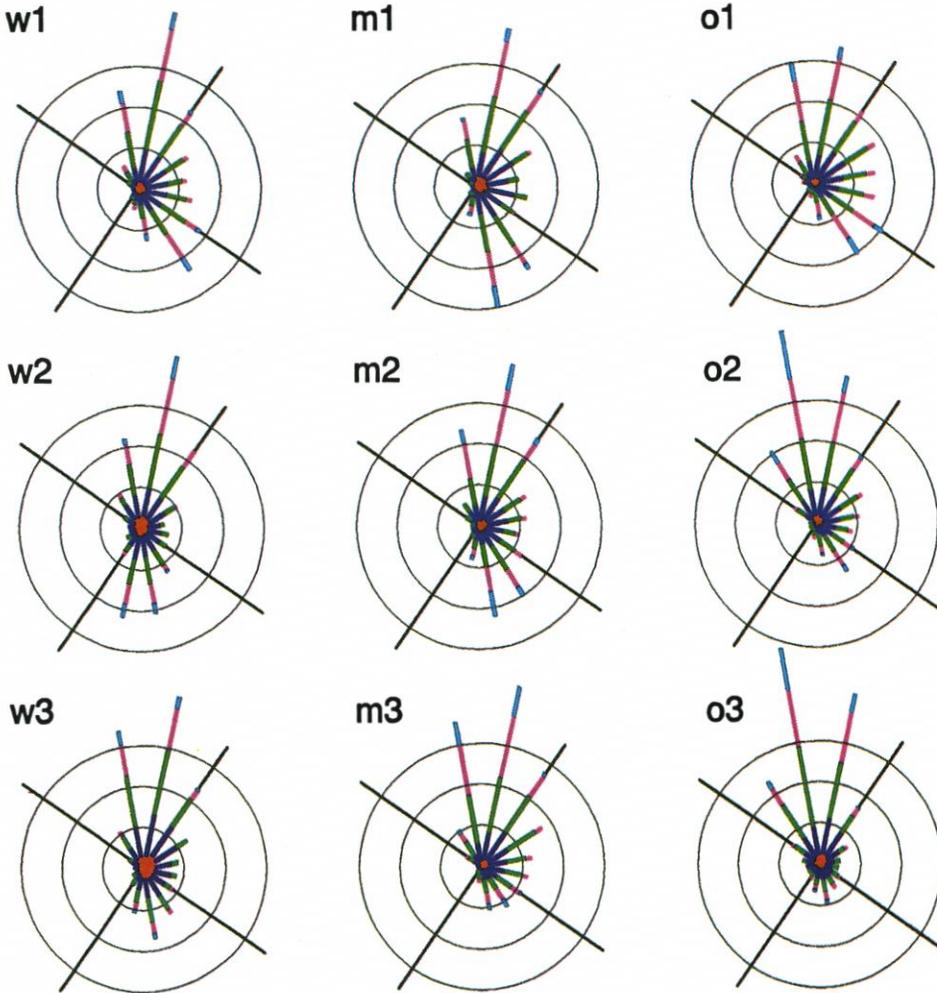
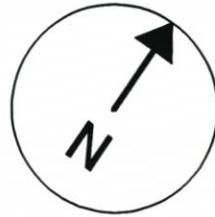
Die deutliche Dominanz seewärts gerichteter Strömungen in Sohlnähe ist typisch für Trecker, wie sie schon HAGEN (1863) beschrieben hat und die im modernen internationalen Schrifttum über Brandung als „undertow“ (SVENDSEN, 1984; STIVE u. WIND, 1986; BATTJES, 1988) analysiert und bezeichnet werden (Abb.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

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

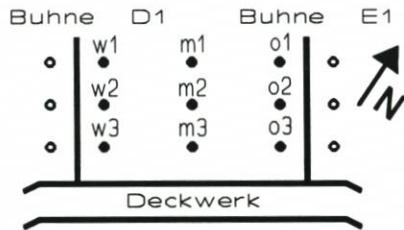
STROMSTÄRKERROSEN

Datum: 24.12.1988

Meßzeitraum: 11:34 bis 11:54



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



Häufigkeiten

Geschwindigkeitsklassen

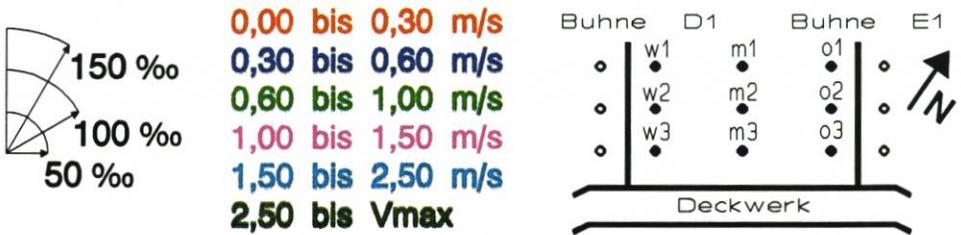
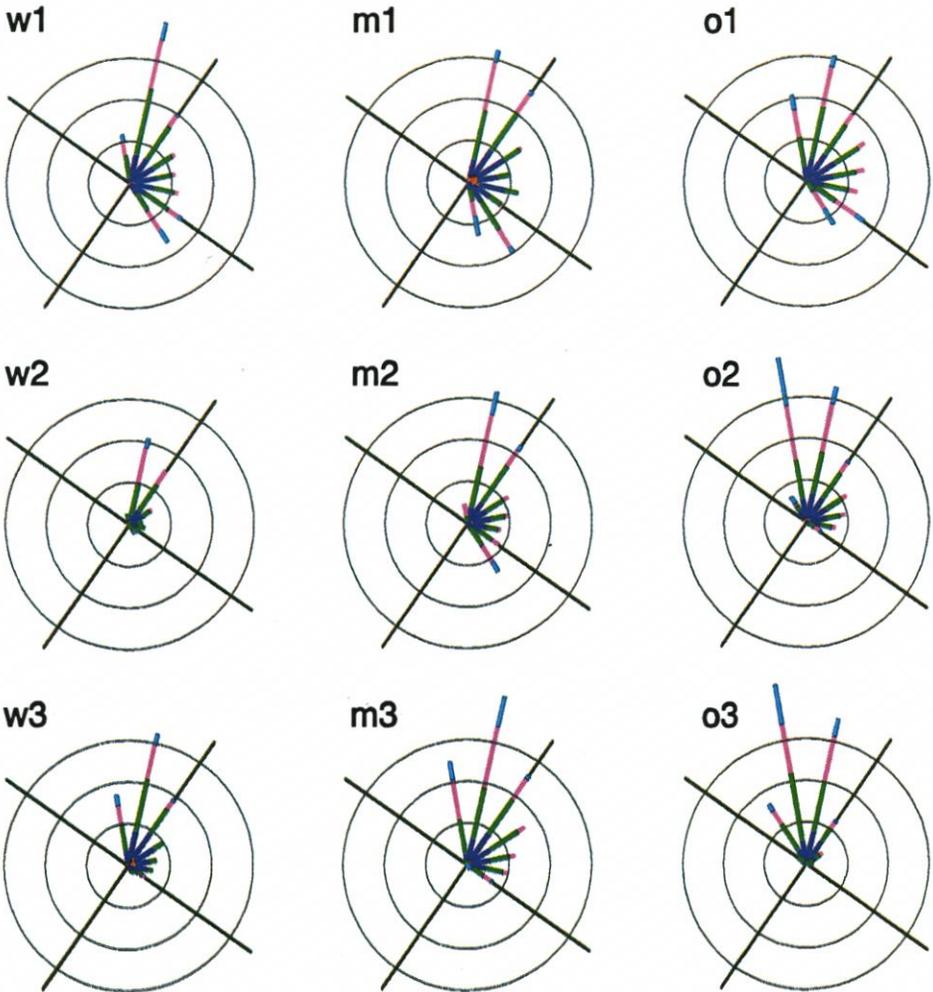
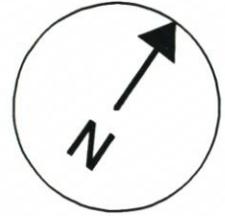
Lage der Meßstationen

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

RESULTIERENDE STROMSTÄRKEROKEN

Datum: 24.12.1988

Meßzeitraum: 11:34 bis 11:54



Häufigkeiten

Geschwindigkeitsklassen

Lage der Meßstationen

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

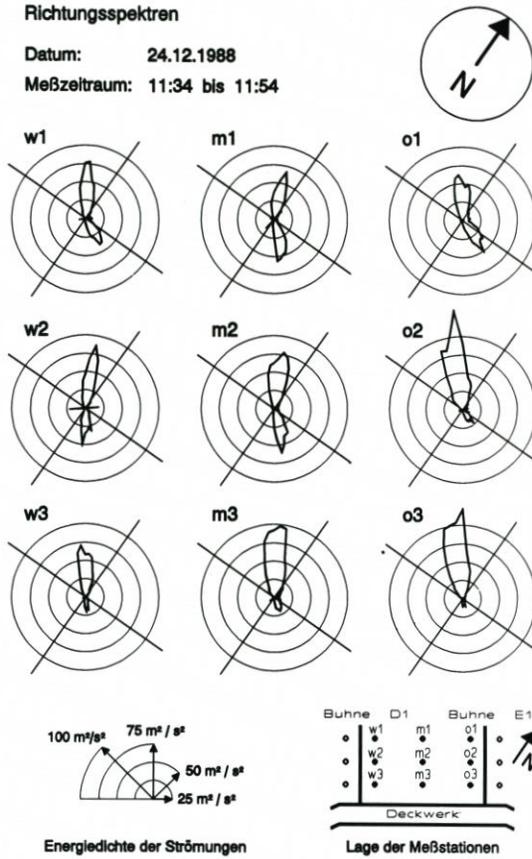


Abb. 21: Richtungsspektren an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Sturmflut vom 24. 12. 1988

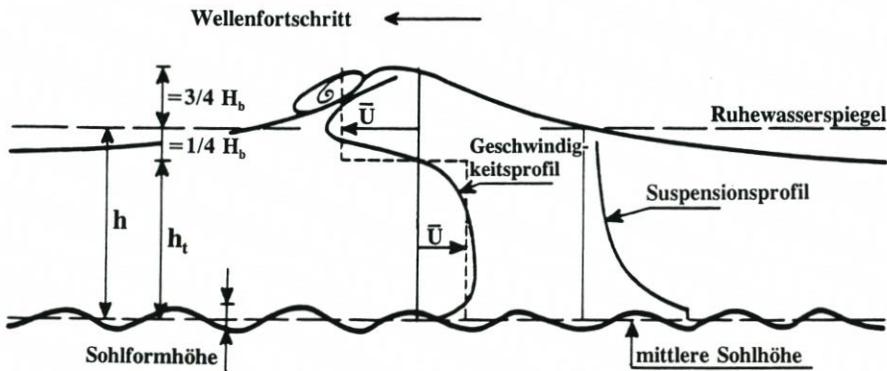


Abb. 22: Schematische Darstellung eines Treckers (undertow) in der Brandungszone und des Sedimenttransports (VAN RHIJN, 1990)

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

4.3 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei Dünung

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

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



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

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

Tabelle 2.

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

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

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

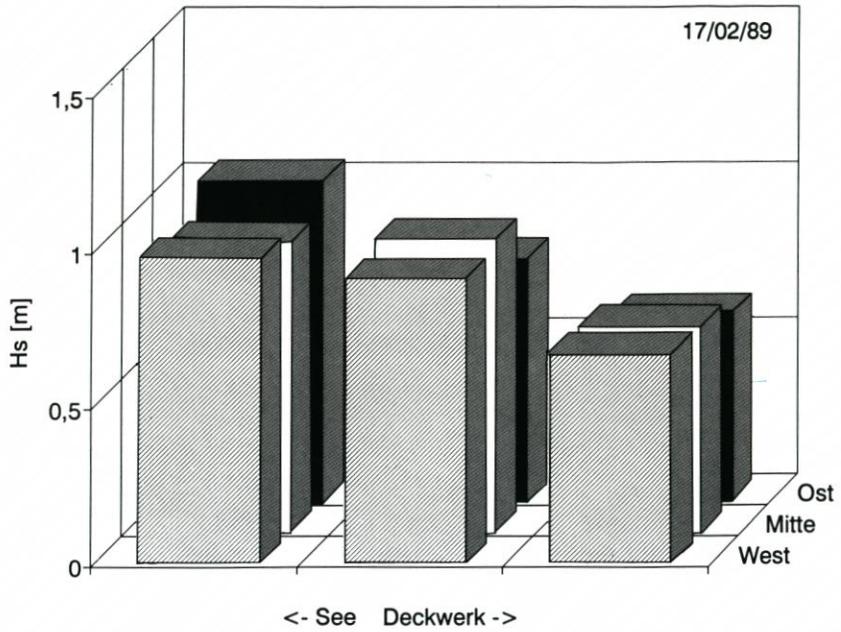


Abb. 24: Signifikante Wellenhöhen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

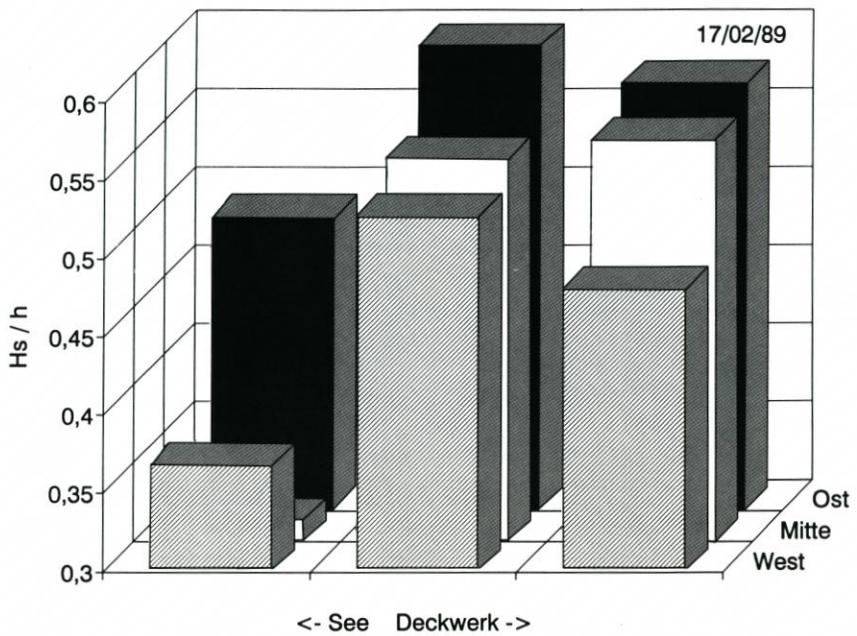


Abb. 25: Verhältnis der signifikanten Wellenhöhen und Wassertiefen an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

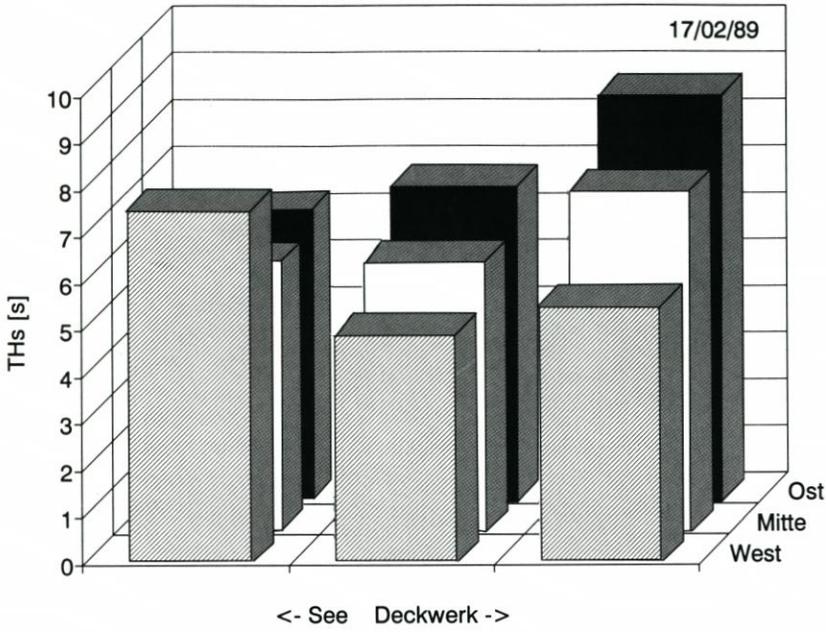


Abb. 26: Signifikante Wellenperioden an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

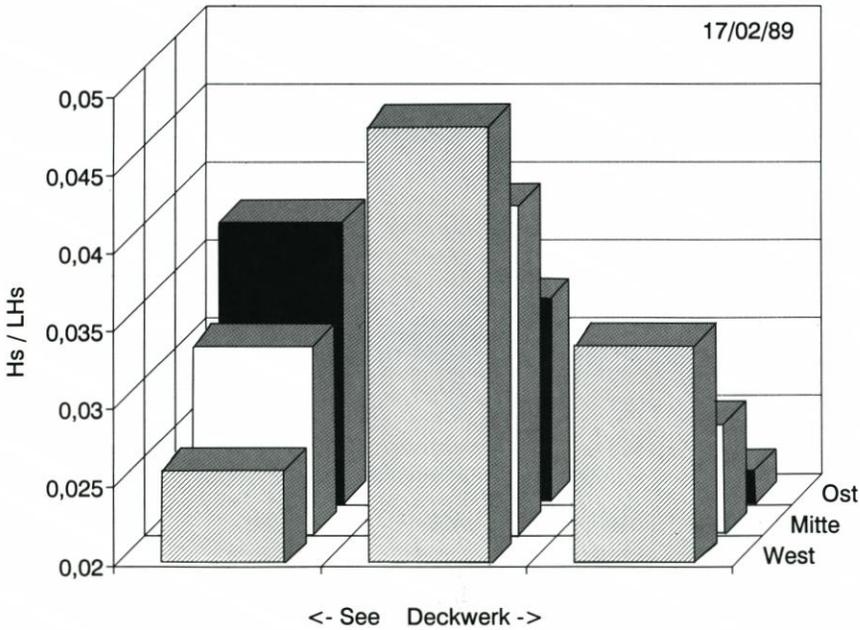


Abb. 27: Signifikante Wellensteilheiten an den Stationen im Bühnenfeld D1/E1 am Nordweststrand von Norderney bei der Tide vom 17. 02. 1989

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

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

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

5. Hydrodynamische Wirksamkeit von Strandbühnen

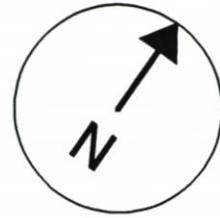
Die Funktion von Strandbühnen ist, küstenparallelen Längstransport durch Brandungsströmungen zu reduzieren. Die hydrodynamische Wirksamkeit der Strandbühnen konnte bereits am Beispiel der durch einschwingende Dünung bewirkten ufernahen Zirkulation gezeigt werden. Im folgenden soll auf der Grundlage der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

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

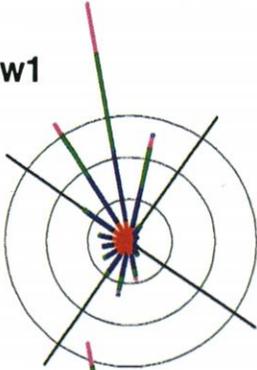
STROMSTÄRKEREOSEN

Datum: 17.02.1989

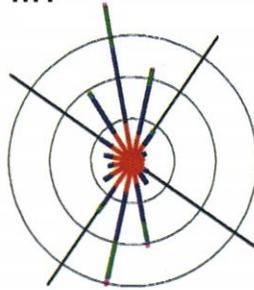
Meßzeitraum: 21:18 bis 21:38



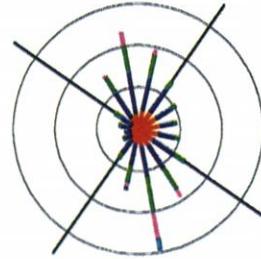
w1



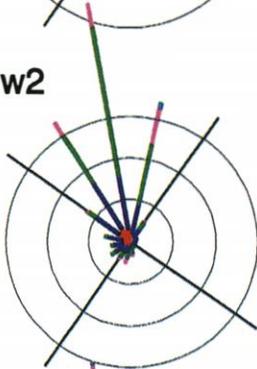
m1



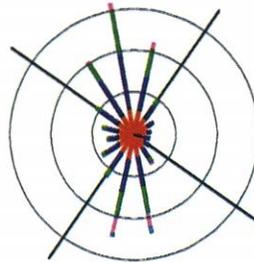
o1



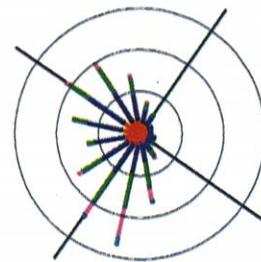
w2



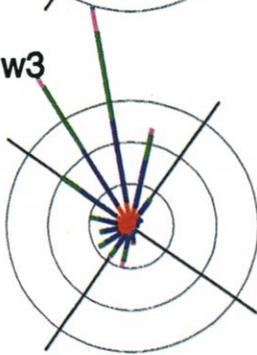
m2



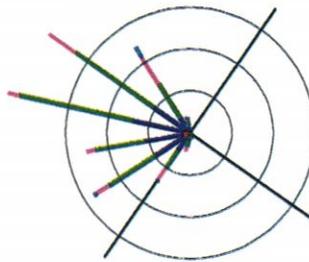
o2



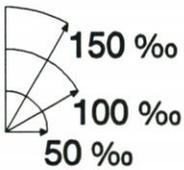
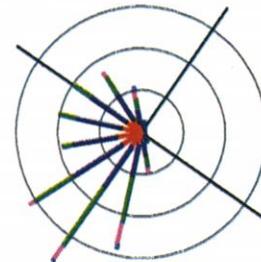
w3



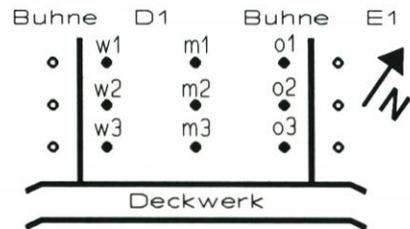
m3



o3



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



Häufigkeiten

Geschwindigkeitsklassen

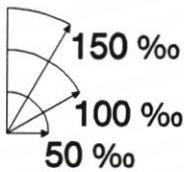
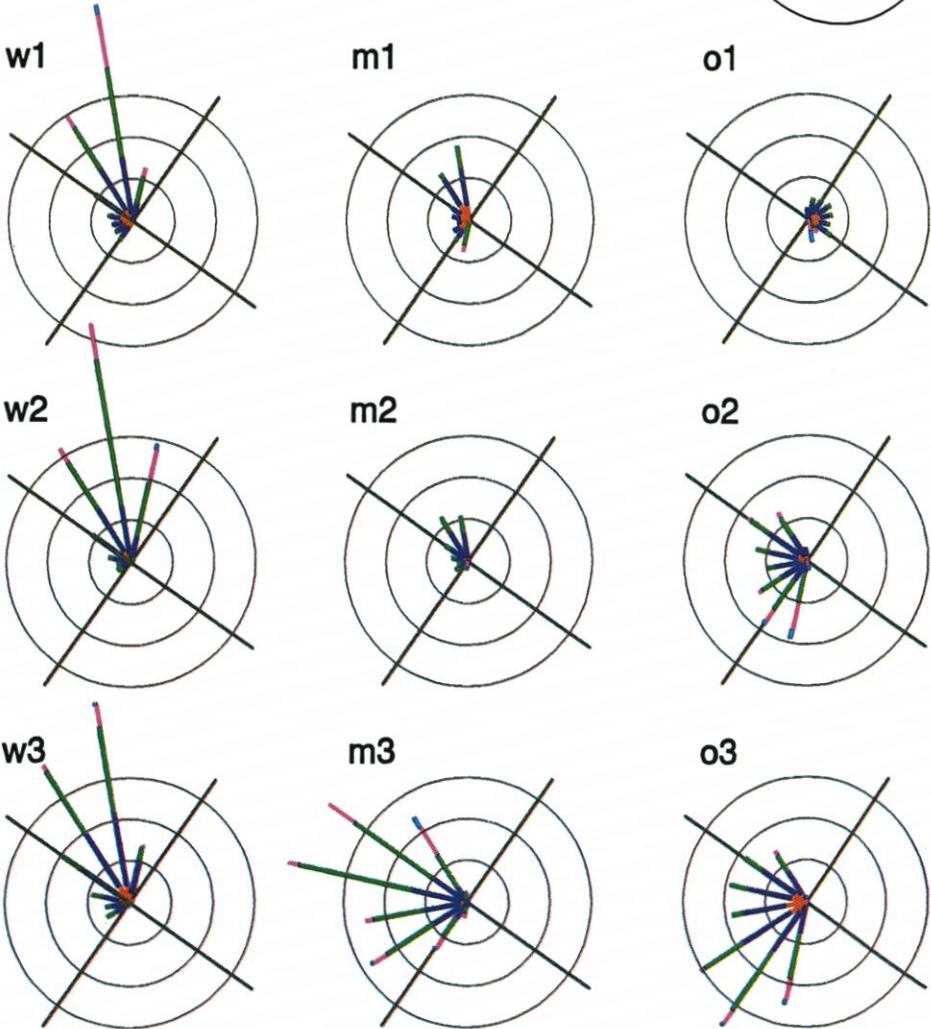
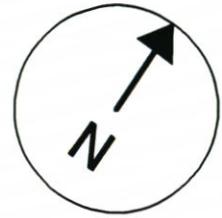
Lage der Meßstationen

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

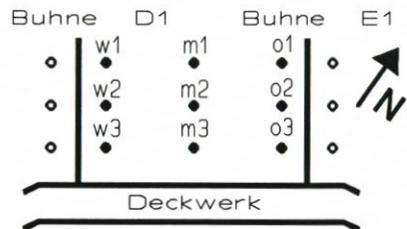
RESULTIERENDE STROMSTÄRKEROSEN

Datum: 17.02.1989

Meßzeitraum: 21:18 bis 21:38



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



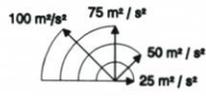
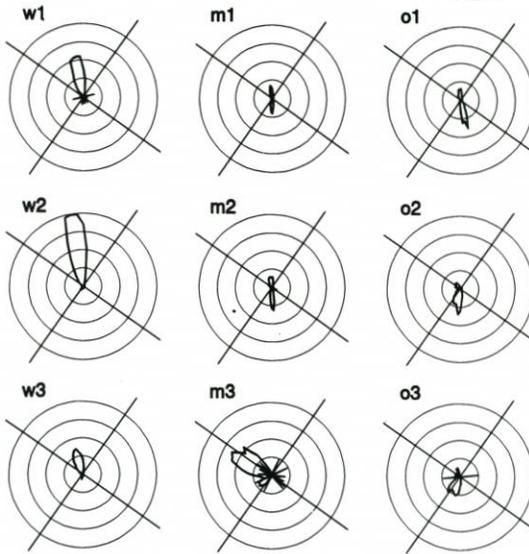
Häufigkeiten Geschwindigkeitsklassen

Lage der Meßstationen

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

Richtungsspektren

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



Energiedichte der Strömungen



Lage der Meßstationen

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

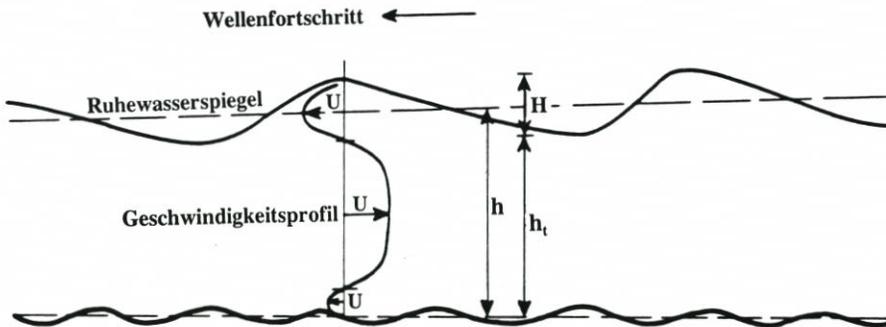


Abb. 31: Driftströmungen bei Wellen infolge nichtlinearer Effekte nach LONGUETT-HIGGINS (VAN RHIJN, 1990)

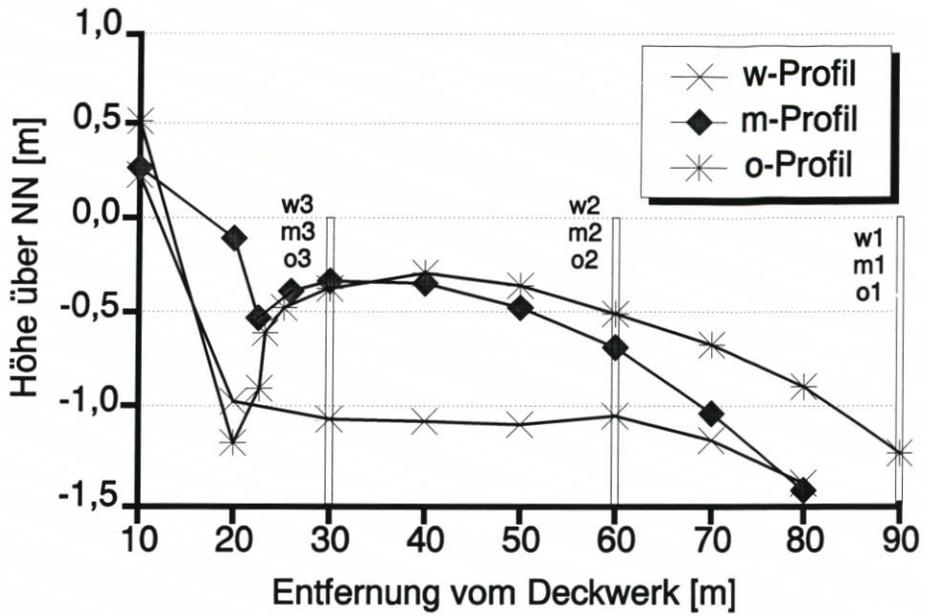


Abb. 32: Strandprofile entlang der Meßreihen am 17. 02. 1989

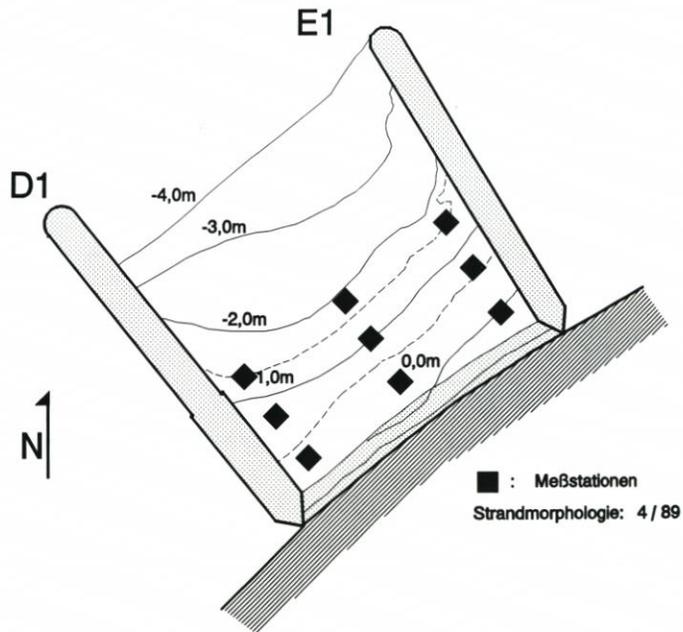


Abb. 33: Tiefenlinien im Bühnenfeld D1/E1 im April 1989

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

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

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

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

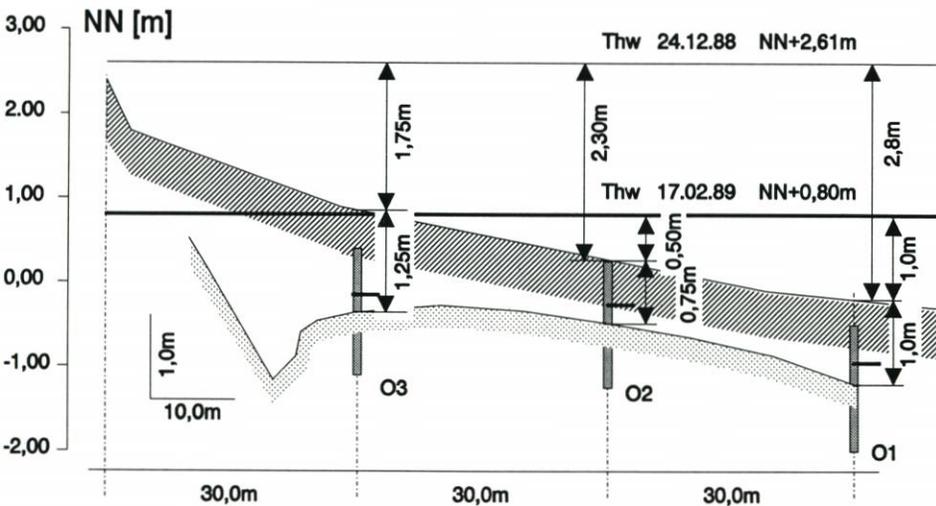


Abb. 34: Kronenlage der Buhne E1 mit Wasserständen und -tiefen für drei Tiden vom 24. 12. 1988 und 17. 02. 1989

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

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

6. Schlußfolgerungen und Ausblick

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

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

Es erscheint hinsichtlich der Dynamik der Transportvorgänge im Vorstrand- und Strandbereich sinnvoller, eine überwiegende Deposition der Auffüllmengen im Vorstrandbereich vorzunehmen als auf dem Strand. Hierdurch werden möglicherweise geringere Anfangsverluste und längere Verweilzeiten zu erreichen sein, da in der ersten Phase ein überwiegend landwärts gerichteter Sedimenttransport zu erwarten ist. Insbesondere gilt dies bei den für das späte Frühjahr und den Frühsommer, der üblichen Saison für die Ausführung von Strandauffüllungen, wahrscheinlichen Wasserstands- und Seegangsverhältnissen. Darüber hinaus bedingt eine Deposition im Vorstrandbereich, daß die Auffüllmengen in wesentlich geringerem Maß seegangs- und brandungsinduzierten strandparallelen Längsströmungen und damit der Gefahr endgültiger Verfrachtung in andere Bereiche ausgesetzt sind. Strukturelle Erosion wird durch Längs- und nicht durch Quertransport bewirkt (VAN DE GRAAFF, NIEMEYER u. VAN OVEREEM, 1991); somit ist das Konzept einer Vorstrandauffüllung die logische Konsequenz aus dieser Gegebenheit.

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

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

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

7. Danksagung

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

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

8. Schriftenverzeichnis

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

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

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

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