

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

1-1
E 7. AUG. 1998 170 2. DEZ. 1998

BUNDESMINISTERIUM
FÜR
BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE
-Meerestechnik-

UNTERSUCHUNG VON TRANSPORTFAKTOREN
IM BEREICH
KÜNSTLICH AUFGEFÜLLTER
VORSTRÄNDE UND STRÄNDE
- Beispiel Norderney -

von

Hanz Dieter Niemeyer
Ralf Kaiser
Heiko Knaack

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE
-Forschungsstelle Küste-

Schlußbericht KFKI - FV MTK 0545A - TP Hydrographie/ Teil II, Januar 1996

N^o 32863 K1

Niemeyer, H.D.; Kaiser, R. & Knaack, H. (1995): Untersuchung von Transportfaktoren im Bereich künstlich aufgefüllter Vorstrände und Strände			
BMBF - Schlußbericht MTK 0545A	Hydrographie - II	1 - 132	Norderney

Inhalt

1. Einführung und Problemstellung	3
2. Hydrographie des Untersuchungsgebietes	5
3. Ermittlung von Transportfaktoren	10
3.1 Konzept	10
3.2 Meßnetz	11
3.3 Analyse der Meßwerte	13
4. Entwicklung des Aufspülkörpers	15
4.1 Methodik	15
4.2 Gestaltung der Auffüllungen	16
4.3 Volumenentwicklung	16
4.4 Hydrodynamische Randbedingungen	23
5. Analyse seegangs- und strömungsgeprägter Transportbedingungen	29
5.1 Vorgehensweise	29
5.2 Zeitlicher Gang von Seegang und Strömungen über eine Tide	30
5.2.1 Normaltide	30
5.2.2 Sturmflut	40
5.3 Räumliche Variation von Seegang und Strömungen	51
5.3.1 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Normaltide	51
5.3.2 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer erhöhten Tide	69
5.3.3 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Sturmflut	87
5.4 Richtungsvariationen der Strömungen	105
5.5 Vertikale Strukturierung der Strömungsfelder	106

6. Exemplarische Untersuchung von Transportvorgängen	109
6.1 Zielsetzung und Methodik	109
6.2 Ergebnisse	109
6.2.1 Hydrodynamische Randbedingungen	109
6.2.2 Morphodynamik und Sedimentumlagerung	110
7. Großräumige Randbedingungen	117
7.1 Bezug zu Vorstrand- und Strandauffüllungen	117
7.2 Morphologische Veränderungen	118
7.3 Änderungen der Seegangsausbreitung	118
8. Zusammenfassung und Folgerungen	127
9. Danksagung	128
10. Literatur	129
11. Symbole	132

1. EINFÜHRUNG UND PROBLEMSTELLUNG

Die vorherrschende küstenparallele Drift, der Meeresspiegelanstieg und langfristige großskalige morphodynamische Vorgänge im Küstengebiet bestimmen den Gestaltwandel der Einzugsgebiete und Seegaten inselgeschützter Wattküsten. Im Gebiet der Ostfriesischen Inseln und Küste sind diese Vorgänge eingehend im historischen Kartenwerk der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE [HOMEIER 1962; HOMEIER u. LUCK 1969] dokumentiert; auf dieser Grundlage war es möglich weitergehende ursächliche Deutungen der Prozesse zu erarbeiten [LUCK 1975; NIEMEYER 1995a].

Die Verlagerung von Seegaten bewirkt im Zusammenwirken mit der örtlich wirksamen Hydrodynamik und dem daraus resultierenden Küstenquer- und -längstransport topographische Veränderungen auf den angrenzenden Düneninseln. Dieser Vorgang hat sich auch im Bereich der Ostfriesischen Inseln wiederholt in nachhaltiger Form zugetragen; in früheren Zeiten hatten die Inselbewohner derartige naturgegebene Änderungen als unabänderliches Schicksal zu ertragen und sich an die veränderten Randbedingungen anzupassen. Im Verlauf der letzten Jahrhunderte sind daher auf Ostfriesischen Inseln mehrfach Siedlungen aufgegeben und an anderer - zum Zeitpunkt der Errichtung als sicher angesehener - Stelle wieder aufgebaut worden.

Der seit dem Ende des 18. Jahrhunderts wachsende Fremdenverkehr führte zum Schaffen wachsender materieller Werte in Form von Immobilien in den Inselgemeinden. Hieraus leiteten sich wiederum verstärkte Wünsche der Inselbewohner ab, der Erosion durch gestaltende Eingriffe bei Erhalt der geschaffenen Werte zu begegnen und nicht mehr unter der Aufgabe der Wohnstätten durch Ausweichen in als ungefährdet angesehene Gebiete. Die wachsende Wirtschaftskraft der Inselgemeinden gab diesem Verlangen eine zunehmend hinreichende rationale Grundlage, um auf die politische Ebene erfolgreich einwirken zu können. Ein später in der Diskussion geratenes Argument für die Bestandserhaltung der Inseln war, daß sie gleichzeitig einen Schutz für das Festland boten [KRÜGER 1911]. Hiermit wurde dem Vorschlag von FÜLSCHER [1905] widersprochen, nur noch wenige Inseln wie beispielsweise Norderney oder Sylt mit hohem wirtschaftlichem Wert zu erhalten.

Die Obrigkeit sah sich zunehmend veranlaßt, durch stützende bauliche Eingriffe den Erhalt der Siedlungen auf den Inseln zu gewährleisten. Anfänglich erfolgte dies mit konventionellen Mitteln der Dünenstabilisierung sowie des Anlegens von Buschschlengen und Palisadenzäunen, womit allerdings struktureller Erosion nicht erfolgreich begegnet werden konnte. Fortschreitende Abbrüche und die Gefährdung besiedelter Gebiete zwangen die Provinz Ostfriesland des seinerzeitigen Königreichs Hannover 1857 auf Norderney - die seinerzeitigen technischen Möglichkeiten bis an die Grenzen nutzend - erstmalig mit dem Bau massiver Deckwerke und Strandbuhnen [TOLLE 1864] zu beginnen und eine völlig neuartige Form des Inselsschutzes einzuführen.

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 am Prallhang der tiefen Rinne um die Jahrhundertwende - 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 weitgehend von der natürlichen Sedimentzufuhr des Küstenlängstransportes abgeschnitten; Seegang und Brandung bewirkten dort somit eine strukturelle Erosion [KURZAK et al. 1949; THILO & KURZAK 1952], die auf die Ausbildung von Gradienten des Küstenlängstransports zurückgeführt werden kann [VAN DE GRAAFF et al. 1991]. In deren Gefolge waren wiederholt 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 ironisch auch als „Schutz der Schutzwerke“ bezeichnet, was auf deren geringe Wirksamkeit hinsichtlich des Erhalts der Strände abzielt. Es bleibt aber festzuhalten, daß sich seinerzeit zum Bau massiver Schutzwerke keine technischen Alternativen boten und andererseits damit für nahezu ein Jahrhundert die Inselküste im wesentlichen gehalten werden konnte. Erst die Entwicklung einer leistungsfähigen Naßbaggertechnik bot dann die - ökonomisch und ökologisch vorteilhafte - Möglichkeit, erodierte Strände künstlich wiederaufzufüllen.

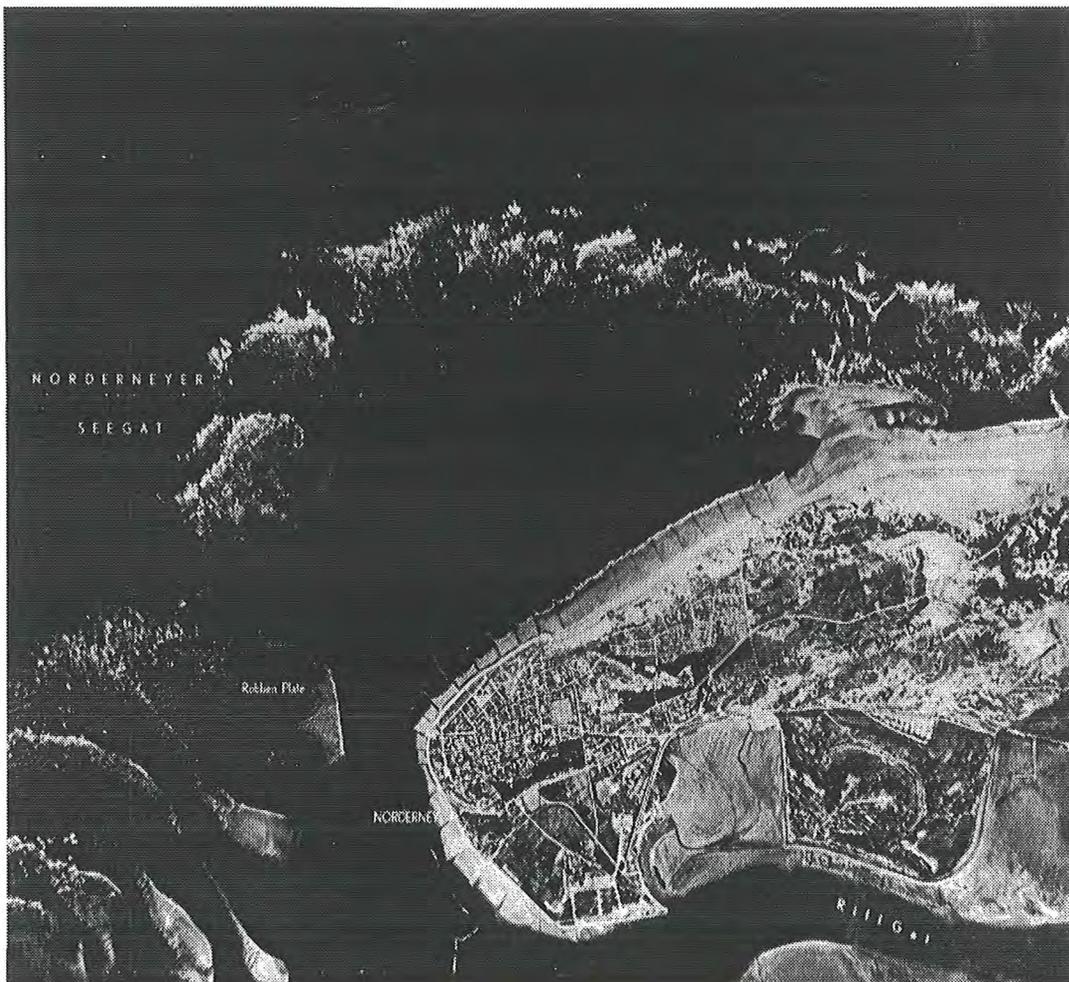


Abb. 1: Riffbogen vor dem Norderneyer Seegat und Inselvorstrand mit leichter Brandung, der Anlandungsbereich liegt in Driftrichtung etwa ein Drittel der Inselänge westlich des Seegats

Die vom damaligen Küstenausschuß Nord- und Ostsee eingesetzte ARBEITSGRUPPE NORDERNEY [1952] hat daher zur nachhaltigen Verbesserung der Strandverhältnisse auf Norderney folgerichtig die Ausführung der ersten Strandauffüllung in Europa vorgeschlagen. Deren Erfolg [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 Küstenschutzes erwiesen. Unbeschadet von dieser positiven Beurteilung bestand und besteht der Wunsch nach einer Optimierung. Das vom damaligen BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE zu diesem Zweck initiierte KFKI-Forschungsvorhaben „Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ führte dann zur Idee einer kombinierten Vorstrand- und Strandauffüllung, die in dem KFKI-Folgevorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen“ insbesondere durch Naturmessungen untersucht worden ist. An dieser Stelle wird über Teilergebnisse dieses Vorhabens berichtet, wobei exemplarisch Transportfaktoren und Transportvorgänge dargestellt werden. Ergänzend werden die Untersuchungen zum mittelfristig wirksamen Seegangsklima [NIEMEYER 1995b] herangezogen, um Aussagen zur Effektivität kombinierter Vorstrand- und Strandauffüllungen im Vergleich zu konventionellen Strandauffüllungen herleiten zu können.

2. HYDROGRAPHIE DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES

Mittlere Tidekurve

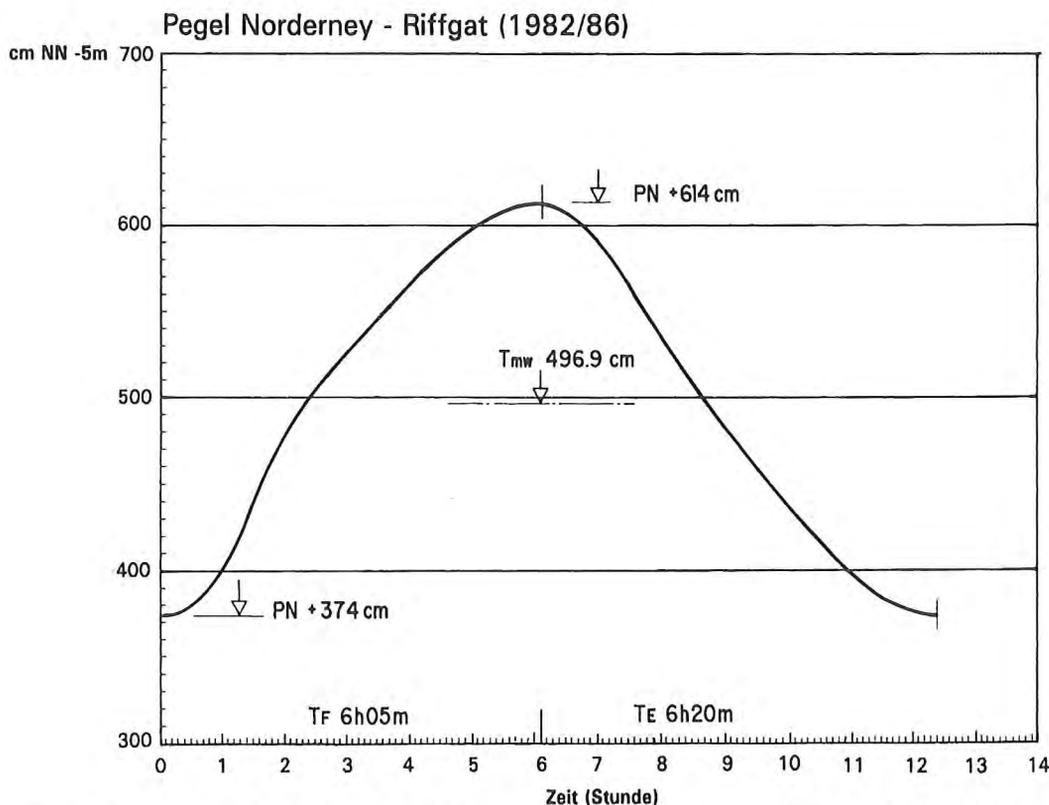


Abb. 2: Mittlere Tide am Pegel Norderney-Riffgat nach LASSEN & SIEFERT [1991]

Der mittlere Tidehub bei Norderney beträgt etwa 2,4 m, wobei infolge von Spring und Nipp Modulationen von bis zu $\pm 0,7$ m [BSH 1994] auftreten. Der Gang der Tidewasserstände weist flachwassertypische Asymmetrie auf: die mittlere Dauer der Ebbe ist geringfügig länger als diejenige der Flut (Abb. 2). Das Tidemittelwasser [LASSEN 1991] liegt für 1982/86 bei NN -3,1 cm. Die bekannten Parameter für die Jahresreihe 1990/94 weichen nur geringfügig ab: MThw = PN +376 cm; MThw = PN +617 cm; MThb = 241 cm. Mit 2,87 m über MThw trat der höchste, bisher gemessene Stau am Pegel Norderney bei der Sturmflut am 16./17. Februar 1962 auf. Nach der Einmessung einer Hochwassermarken unter Berücksichtigung des säkularen Anstiegs des mittleren Tidehochwassers nach ROHDE [1977] ergibt sich für die Sturmflut vom 4. Januar 1855 sogar ein Stau von mehr als 3,3 m über MThw [NIEMEYER 1976]. Die zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmfluten nach DIN 4049 [ROHDE 1979] gehörenden Höhenstufen sind auf Basis der Zeitreihe 1946/85 für den Pegel Norderney-Riffgat wie folgt ermittelt worden [NIEMEYER 1987a]:

Windfluten: MThw +0,93 m

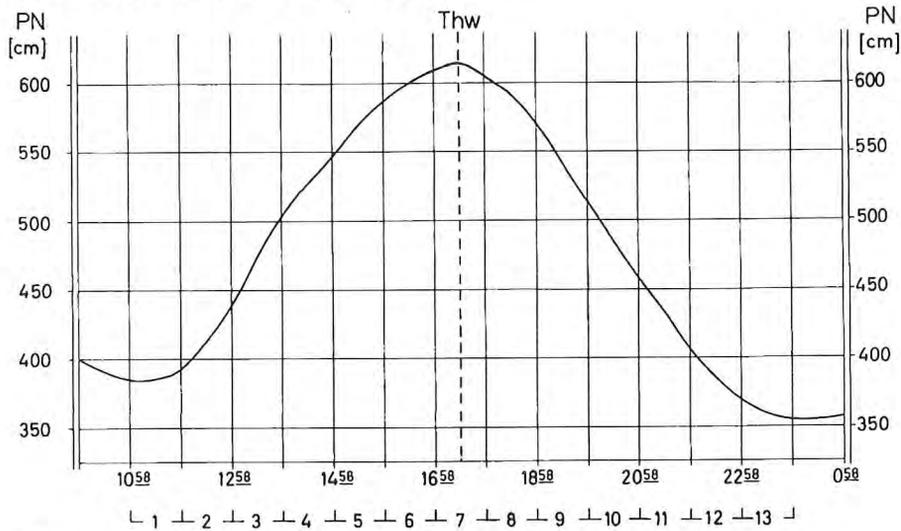
Sturmfluten: MThw +1,95 m

Orkanfluten: MThw +2,86 m

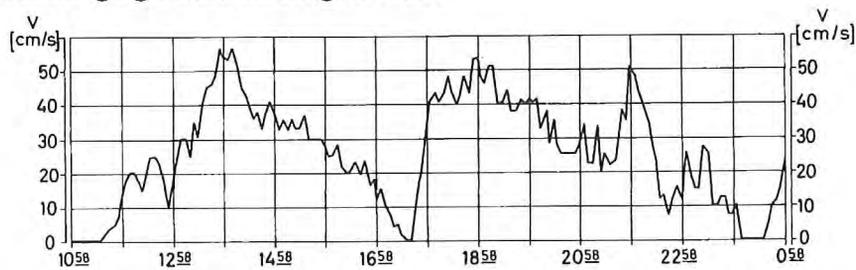
Strömungsverhältnisse und Morphologie der unmittelbar am Weststrand von Norderney gelegenen tiefen Rinne des Norderneyer Seegats sind durch eine ausgeprägte Dominanz des Ebbstroms gekennzeichnet; in Ausnahmefällen sind kontinuierliche Ebbstromdauern von mehr als 21 Stunden festgestellt worden [KOCH u. NIEMEYER 1978]. Derartige Anomalien sind selbst für die Ebbstromrinnen von Seegaten ungewöhnlich; Sie sind erklärbar durch Drifteffekte bei westlichen Windrichtungen in Verbindung mit der Trichterform des Juister Watts [KÖRITZ 1955; 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).

Die Strömungsverhältnisse auf den Stränden von Norderney [NIEMEYER 1987b] und die Lage primärer Erosionsbereiche führen zu dem Schluß, daß die Erosions- und Sedimentationsvorgänge auf den Stränden von Norderney im wesentlichen durch Seegang und Brandung bestimmt sind. Im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste tritt energiereicher Seegang bei auflandigen Stark- und Sturmweatherlagen aus dem Sektor West bis Nordost auf. Dieser Sektor wird von etwa 135° durch Refraktion vom Küstenvorfeld bis zum Inselvorstrand bei mittleren Tideverhältnissen auf ungefähr 85° eingeeengt [NIEMEYER 1983]. Hierbei herrschen Windsee und Dünung aus westlichen und nordwestlichen Richtungen vor, die in Wechselwirkung mit der Inseltopographie auf den Stränden ein in zwei Hauptrichtungen wirkendes System von Brandungs-

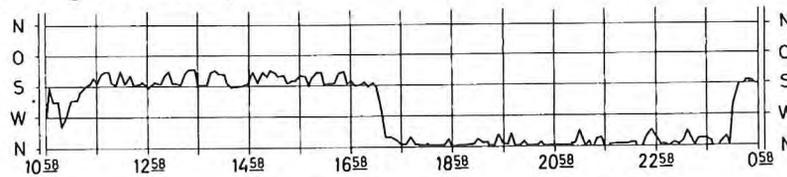
Ganglinie des Tidewasserstandes mit Phaseneinteilung zur Bestimmung der Stromvektoren sowie der Strömungen im Seegat



Strömungsgeschwindigkeiten



Strömungsrichtungen



Tidestrommessungen

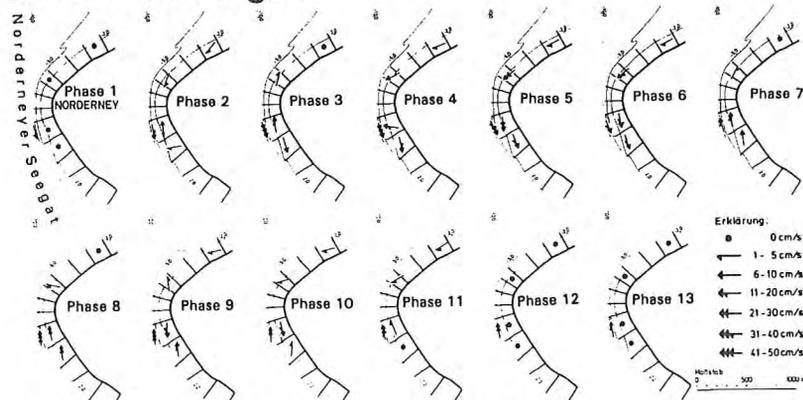


Abb. 3: Tideströmungen bei der Normaltide im Seegat und auf den westlichen und nordwestlichen Stränden; a: Ganglinien der Wasserstände, Stromgeschwindigkeiten und -richtungen im Seegat; b: Stundenmittel der Stromvektoren im Seegat und auf den Stränden [NIEMEYER 1987b]

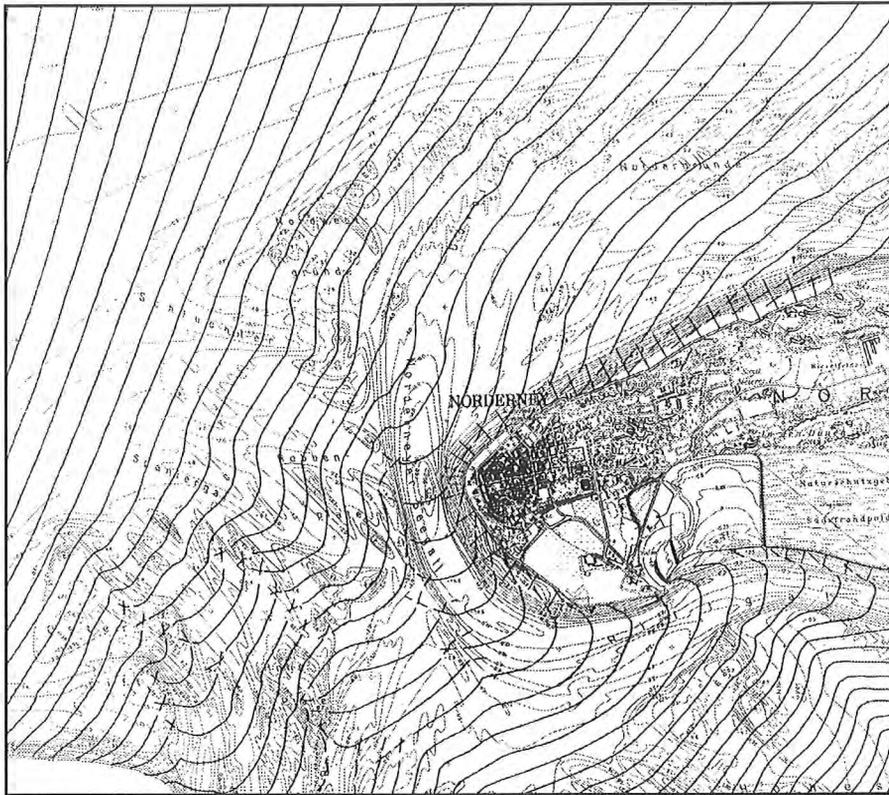


Abb. 4: Seegangsausbreitung im Bereich des Norderneyer Seegats (Windrichtung: West; Wasserstand MThw) [NIEMEYER 1986]

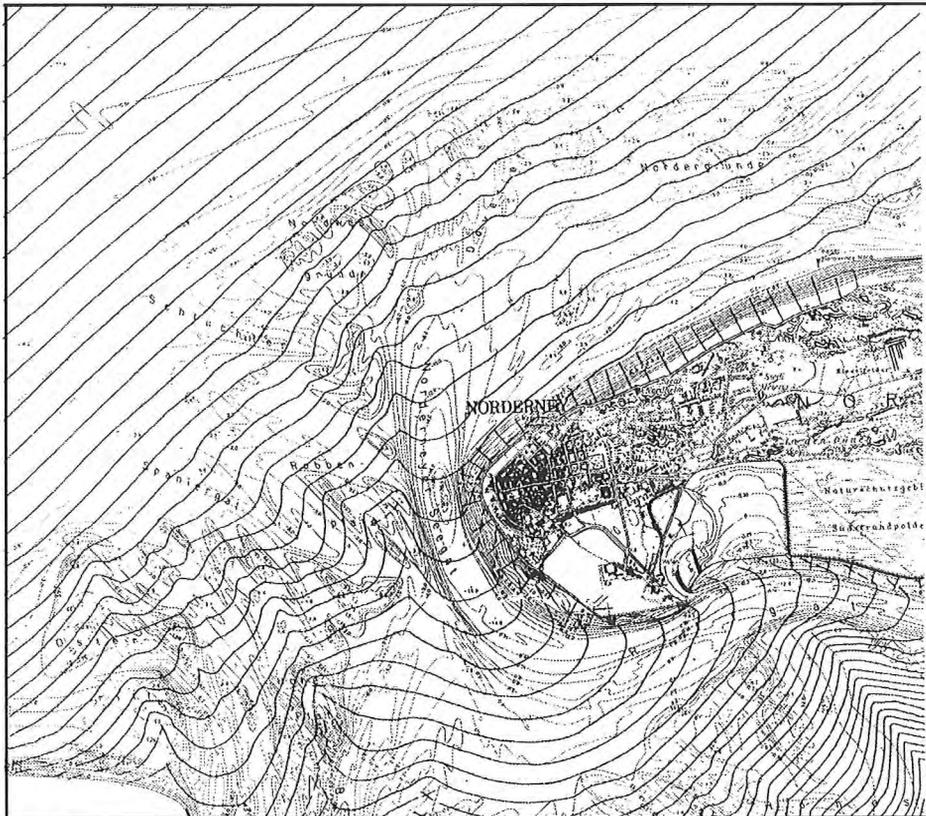


Abb. 5: Seegangsausbreitung im Bereich des Norderneyer Seegats (Windrichtung: Nordwest; Wasserstand MThw) [NIEMEYER 1986]

strömungen 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 eine südöstlich gerichtetes Teilsystem aufspaltet [NIEMEYER 1986].

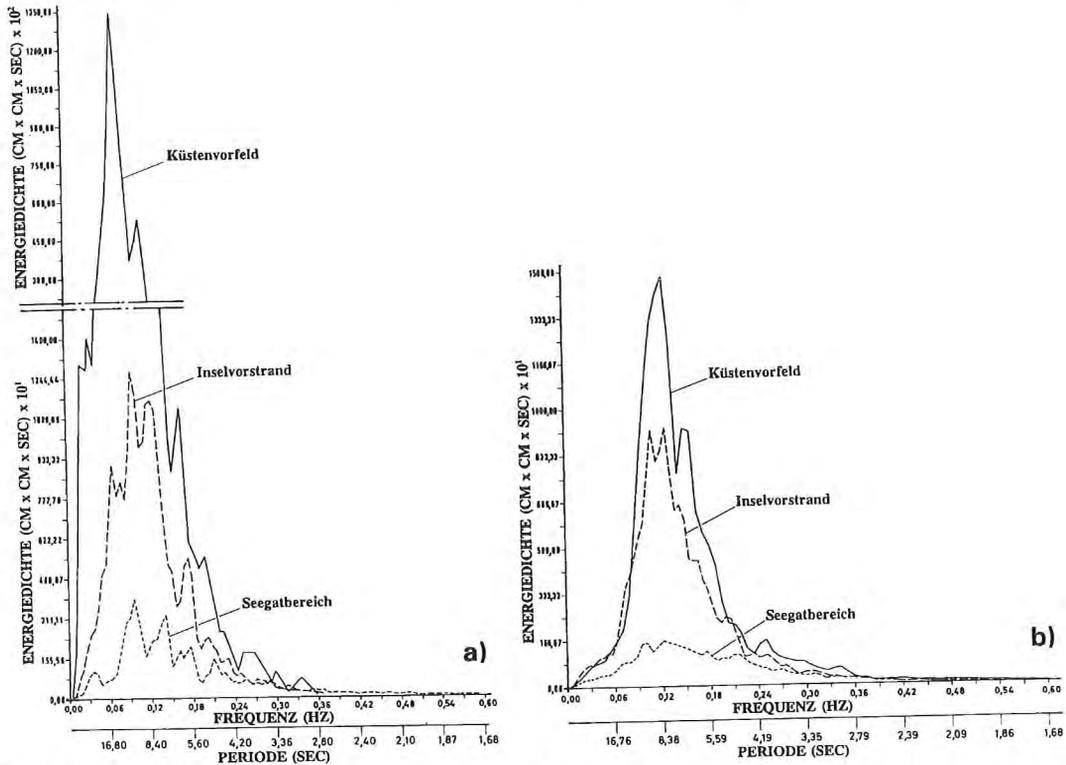


Abb. 6: Energiespektren des Seegangs im Küstenvorfeld, auf dem Inselvorstrand und im Seegat; a: bei aufländigem Sturm; b: bei ablandigem Starkwind [NIEMEYER 1987c]

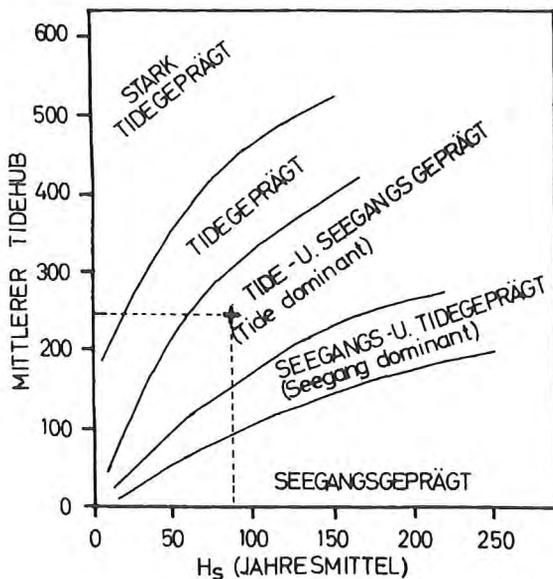


Abb. 7: Einordnung des Norderneyer Seegats nach der hydrodynamischen Klassifikation nach HAYES [1975,1979]

Das Ebbdelta des Riffbogens überlappt die westlichen und nordwestlichen Inselstrände bis zu seinem Anlandungsbereich (Abb. 1). Zum einen wird dadurch ein strukturelles Sedimentdefizit in diesen Bereichen bewirkt, aber zum anderen auch eine wirksame Abschattung gegen intensiven Seegang aus dem Küstenvorfeld. Aus der Nordsee einschwingender energiereicher Seegang wird unter erheblicher Energieumwandlung auf den Platen des Riffbogens gebrochen: Naturmessungen ergaben bei aufländigen Starkwind- und Sturmvetterlagen im Mittel infolge Riffbrandung Energiedissipationen von 70 % vor dem Inselvorstrand und 92 % vor dem Seegat. Mit dieser intensiven Energieumwandlung ist

nicht nur eine merkliche Abnahme der Wellenhöhen und Veränderung der Wellenperioden und -längen verbunden, sondern auch eine relative Verlagerung von Energieanteilen in höherfrequente Bereiche und eine Aufspaltung der Energiekonzentration von einem zu mehreren Peaks (Abb. 6) [NIEMEYER 1987c]. Diese auf Grundlage phänomenologischer Analysen von Naturmessungen gewonnenen Erkenntnisse zum Seegangsklima im Einzugsbereich des Norderneyer Seegats konnten mittlerweile auch mit Hilfe des mathematischen Seegangmodells HISWA [HOLTHUIJSEN & BOOIJ 1987] weitgehend bestätigt werden [DEN ADEL et al. 1991, NIEMEYER et al. 1992, 1995].

Die hydrodynamische Klassifikation von HAYES [1975, 1979] weist das Norderneyer Seegat bei einem mittleren Tidehub von etwa 2,4 m und einer über das Jahr gemittelten signifikanten Wellenhöhe von $0,7 \leq H_s \leq 1,0$ m als tide- und seegangsprägtes Seegat mit überwiegender Tideeinwirkung aus (Abb. 7) [NIEMEYER 1990].

3. ERMITTLUNG VON TRANSPORTFAKTOREN

3.1 Konzept

Die Bedeutung seegangsinduzierter Strömungen für Umlagerungsvorgänge auf Stränden ist im Schrifttum des deutschen Küsteningenieurwesens bereits von HAGEN [1863] und KRÜGER [1911] mitgeteilt worden. Allerdings sind ihre Erkenntnisse weder im deutschen, geschweige denn im internationalen Küsteningenieurwesen gewürdigt oder genutzt worden. Allgemein hat diese Gegebenheit erst nach den grundlegenden Arbeiten von PUTNAM et al. [1949] sowie SHEPARD & INMAN [1951], die noch durch ähnliche phänomenologische Erkenntnisse wie die von KRÜGER [1911] bei der Vorbereitung der amphibischen alliierten Landungsunternehmen des 2. Weltkriegs angeregt worden waren, Eingang in das Denken des modernen Küsteningenieurwesens gefunden.

Seither ist eine bemerkenswerte Fortentwicklung auf diesem Gebiet zu verzeichnen, die ihre Schwerpunkte vor allem auf dem Gebiet der theoretischen Hydrodynamik aufweist; was beispielhaft die Arbeiten von LONGUET-HIGGINS & STEWART [1962, 1963]; BATTJES [1974, 1988]; SVENDSEN [1984]; STIVE & WIND [1986] verdeutlichen. Auf deren Grundlage lassen sich weitgehende Einsichten in die strandgestaltenden hydrodynamischen Prozesse gewinnen. Insbesondere ist es hiermit in dem vorangehenden Projekt gelungen, Erosions- und Regenerationsvorgänge auf Stränden physikalisch zu deuten [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b].

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] 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-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 in der Planungsphase des vorangehenden Projektes zeigte sich, daß trotz erheblichen personellen und technischen Aufwandes diese Zielsetzung nicht umfassend erreichbar ist.

3.2 Meßnetz

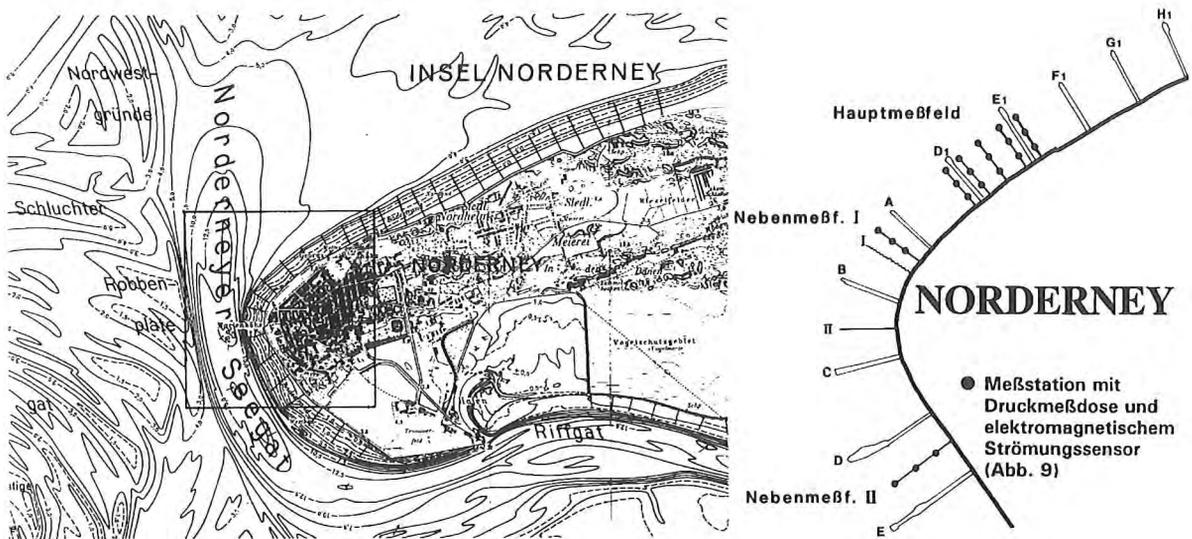


Abb. 8: Lage der Meßfelder auf den Inselstränden und Anordnung der Meßstationen [NIEMEYER 1992a]

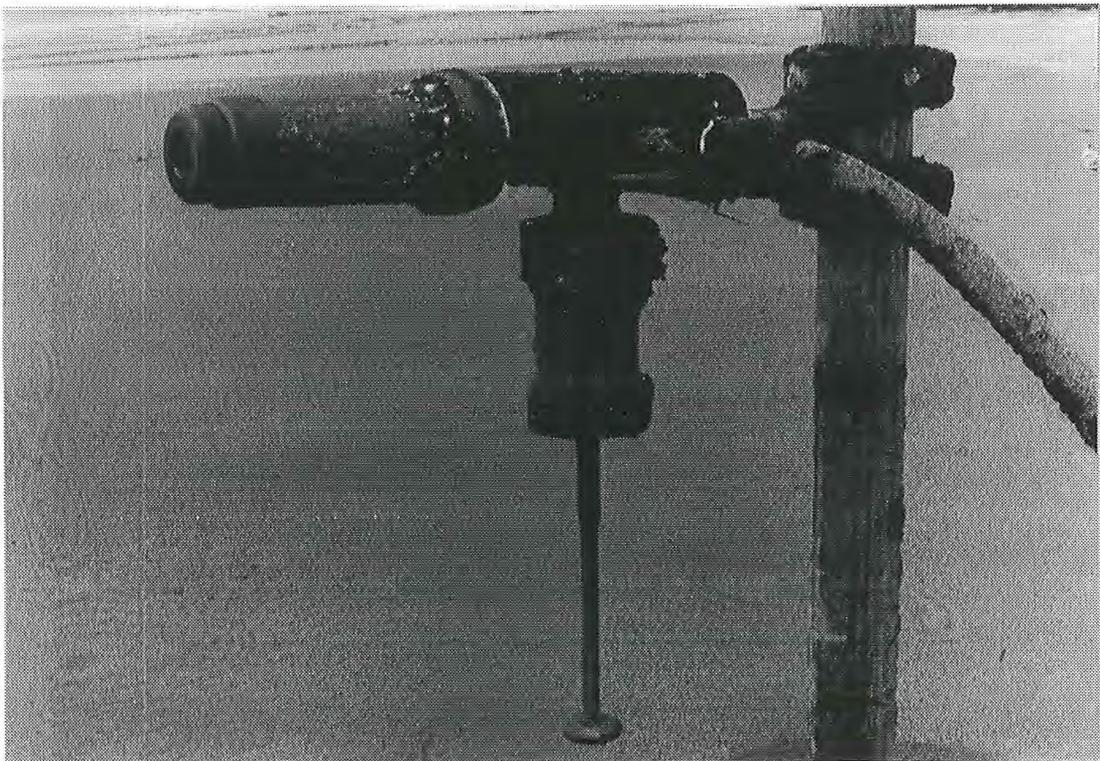


Abb. 9: Meßstation auf dem Strand mit Druckaufnehmer-Wellenpegel und Strömungssensor nach dem Induktionsprinzip [NIEMEYER 1992a]

Schematische Darstellung der Datenfernübertragung

Meßnetz Norderney

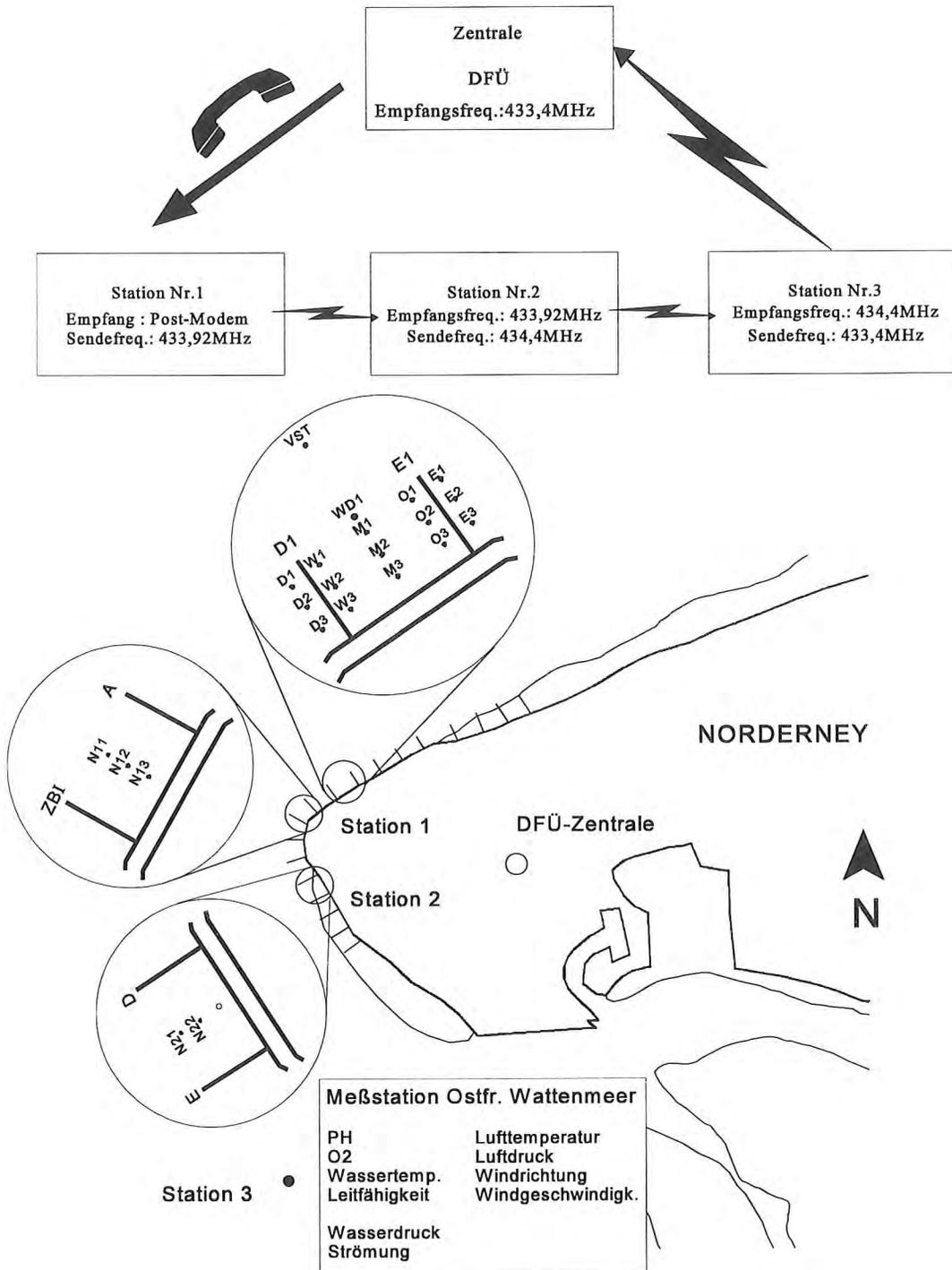


Abb. 10: System der Datenfernübertragung für das hydrographische Meßprogramm [NIEMEYER 1992a]

Aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben standen ein Meßnetz (Abb. 8) und Datensätze zur Verfügung [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b]. Das Meßnetz wurde in reduziertem Umfang fortgeführt, insbesondere um Aussagen über die mittelfristigen Variationen der hydrodynamischen Randbedingungen zu gewinnen [NIEMEYER 1995b]. Die vorhandenen Datensätze wurden ergänzend hinsichtlich übertragbarer Aussagen analysiert, wobei die seegangsinduzierten Strömungen als wesentlicher Transportfaktor im Mittelpunkt des Interesses standen. In jeder Station sind jeweils ein Drucksensor zur Erfassung der Wasserstände und des Seegangs sowie ein elektromagnetischer Zweikomponenten-Strömungssensor angebracht (Abb. 9), 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 (Abb. 10) in eine rechnergesteuerte Datenfernübertragung eingespeist und in die Meßnetzzentrale im Dienstgebäude der Forschungsstelle Küste drahtlos per Funk übertragen.

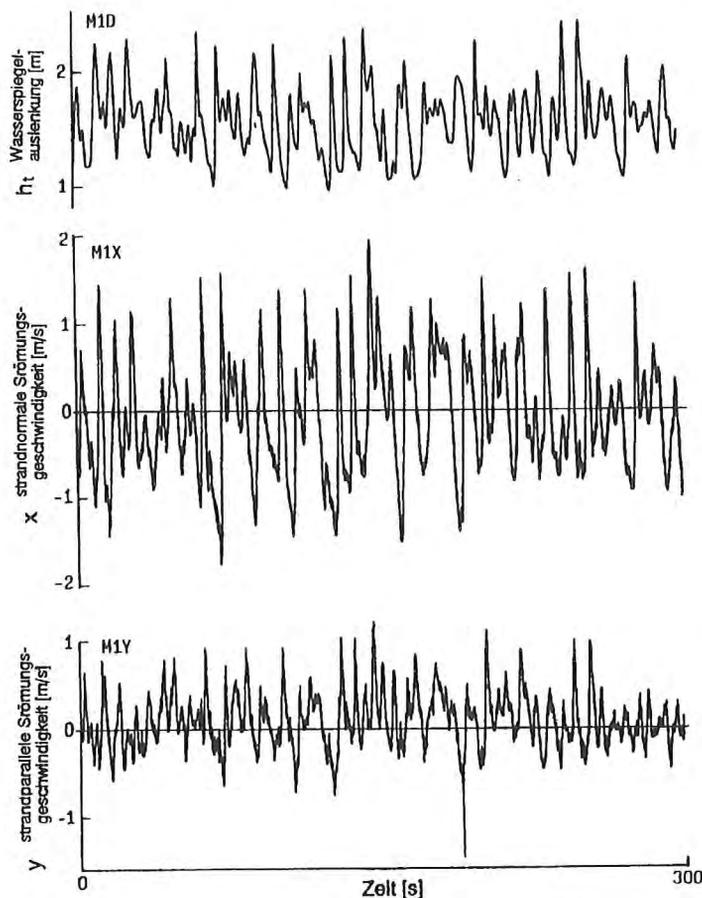
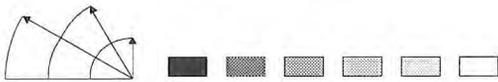
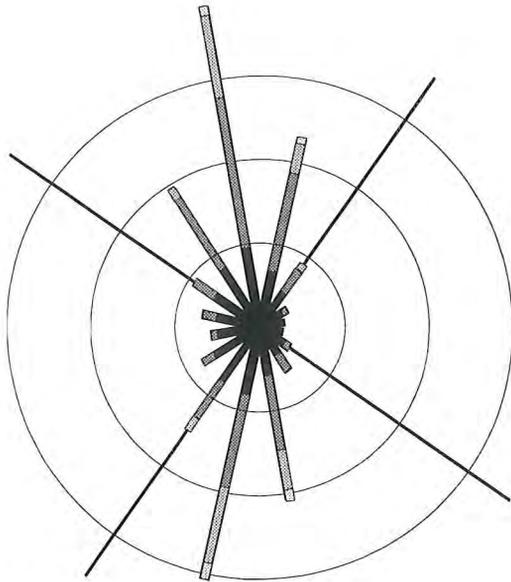


Abb. 11: Ganglinien der Wasserspiegelauslenkungen und Strömungskomponenten an einer Station auf dem Strand [NIEMEYER 1992b]

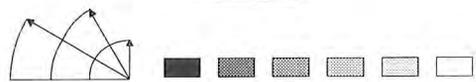
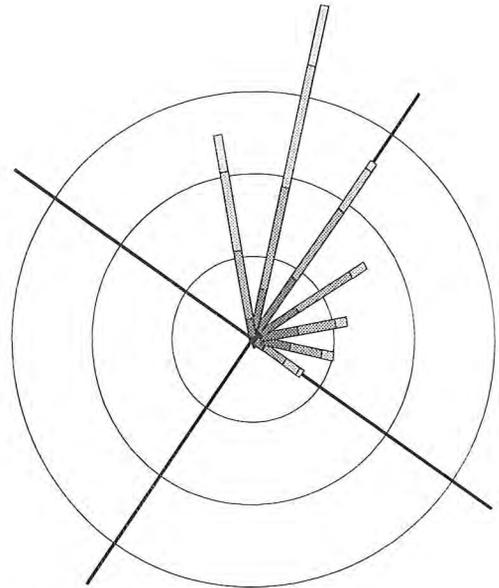
3.3 Analyse der Meßdaten

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. 11). 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 allein 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.

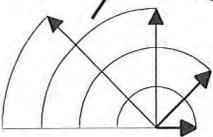
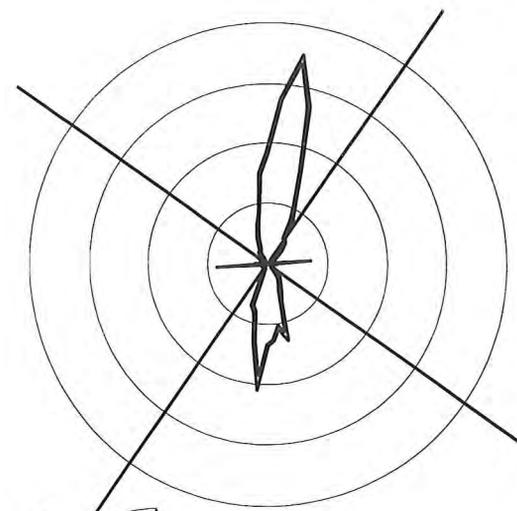
In Orientierung an der primären Aufgabenstellung, Optimierungsmöglichkeiten für künftige Strandauffüllungen zu erarbeiten, war es erforderlich, zu einer hinsichtlich ihrer Gesamtwirkung bewertbaren Analyse der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen zu gelangen [NIEMEYER 1991]. Hierfür sind die üblichen Analyseverfahren



Häufigkeiten Geschwindigkeitsklassen
Abb. 12: Stromstärkerose einer Zeitreihe von zwanzig Minuten Länge



Häufigkeiten Geschwindigkeitsklassen
Abb. 13: Resultierende Stromstärkerose einer Zeitreihe von zwanzig Minuten Länge



Energiedichte der Strömungen
Abb. 12: Richtungsspektrum der Strömungen einer Zeitreihe von zwanzig Minuten Länge

mit der Zielsetzung, Zusammenhänge zwischen verursachendem Seegang und induzierten Strömungen erkennbar zu machen, untauglich. Hier wurden zum einen 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. 12). Dieses Verfahren gestattet es, ohne filternde Mittelung die Gesamtwirkung der seegangserzeugten Strömungsfelder für - hinsichtlich der Variation herrschender Randbedingungen - angemessene Zeitreihenlängen hinsichtlich der primären Fragestellung interpretierbar darzustellen. Darüber hinaus wurden zur Verdeutlichung der richtungsmäßig überwiegender Wirkung der seegangs- und brandungsinduzierten Strömungen resultierende Stromstärkerosen erstellt (Abb. 13). Hierbei werden die jeweils um 180° entgegengerichteten Geschwindigkeitsverteilungen (Abb. 12) voneinander subtrahiert. Hierdurch wird der Anteil gleichstarker gegenläufiger Strömungen näherungsweise eliminiert (Abb. 13).

Als eine weitere Möglichkeit zur Darstellung der räumlichen Verteilung der Strömungsintensität wurden Richtungsspektren der Energiedichte [NIEMEYER 1991] ermittelt (Abb. 14). Für Sektoren von 5° 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.

Als ergänzende Parametrisierung wurden die küstenparallelen und -normalen Komponenten der Strömungen als in Form gewichteter, kennzeichnender Mittelwerte für die Gesamtheit oder einen prozentualen Anteil der Meßwerte ermittelt. Hierbei sind teilweise auch Filterungen vorgenommen worden, um Einwirkungen langperiodischer Vorgänge wie beispielsweise Infrarotwellen erkennen 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.

4. ENTWICKLUNG DES AUFSPÜLKÖRPERS

4.1 Methodik

Zur Untersuchung der morphologischen Entwicklung der 1989 und 1992 aufgespülten Strandbereiche wurden wiederholt Peilungen des Vorstrandes und terrestrische Vermessungen des Strandes vorgenommen. Aus diesen Vermessungsdaten wurden die in den einzelnen Bühnenfeldern vorhandenen Sandmassen oberhalb bestimmter Höhenstufen berechnet [KUNZ & STEPHAN 1992; STEPHAN & WESTHOFF 1992; EITNER et al. 1993]. Die somit vorliegenden Volumenangaben bilden die Basis für einen Vergleich der konventionellen Strandaufspülung 1989 und der kombinierten Vorstrand- und Strandaufspülung von 1992. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Entwicklung in verschiedenen Bereichen wurden die Volumen in den Bühnenfeldern auf eine Strandlänge von einem Meter umgerechnet. Die Berechnung erfolgte mit einer jeweils konstanten Bühnenfeldbreite, was in einigen Fällen, z.B. in Feldern mit stark divergierenden Bühnen, zu kleinen Fehlern führen kann, die jedoch bei einer Gesamtbetrachtung vernachlässigt werden können. Ferner wurde für einige Betrachtungen nicht das Volumen oberhalb bestimmter Höhenschichten sondern die Massen in bestimmten Höhenschichten mit einer Mächtigkeit von einem Meter herangezogen. Als untere Tiefenbegrenzung der Betrachtung wurde soweit möglich die Tiefe von NN-5m gewählt. Da jedoch nicht alle Vermessung, insbesondere nach 1989, bis zu dieser Tiefe reichten, wurden teilweise nur Berechnungen bis NN-4m durchgeführt.

Für die vergleichende Betrachtung der hydrographischen Randbedingungen nach den Aufspülungen wurden Wasserstandsmessungen des Pegel Norderney-Riffgat und Seegangdaten von der Station M1 im Bühnenfeld D1-E1 herangezogen (Abb. 15). Die hier aufgeführten Ergebnisse sind in ausführlicher Form bei NIEMEYER [1995b] dargestellt. Es wurden Zeitreihen des Seegangs um den Zeitpunkt des jeweiligen Tidehochwassers ausgewertet und für 20 Minuten die signifikante Wellenhöhe und die mittlere Wellenperiode bestimmt. Für den Zeitraum 1989 bis 1994 stehen Wellendaten von 1910 Tiden zur Verfügung, entsprechend einer Meßdichte von 48,5%. Berücksichtigt man die Zeiten für Ab- und Aufbau der Instrumente während der Aufspülungen, während Eisgangs und für Wartungszwecke so ist die Meßdichte als befriedigend anzusehen.

4.2 Gestaltung der Auffüllungen

Im Jahr 1989 wurde die Aufspülung als konventionelle Strandaufspülung zwischen den Bühnen D und J1 ausgeführt (Abb. 15). Es wurden 450000m³ Sand auf einer Gesamtlänge von ca. 1,8km eingespült [ERCHINGER & TILLMANN 1992], die mittlere Korngröße des Aufspülmateri als $d_{50}=0,17\pm 0,04\text{mm}$ [EITNER et al. 1992]. Bei der

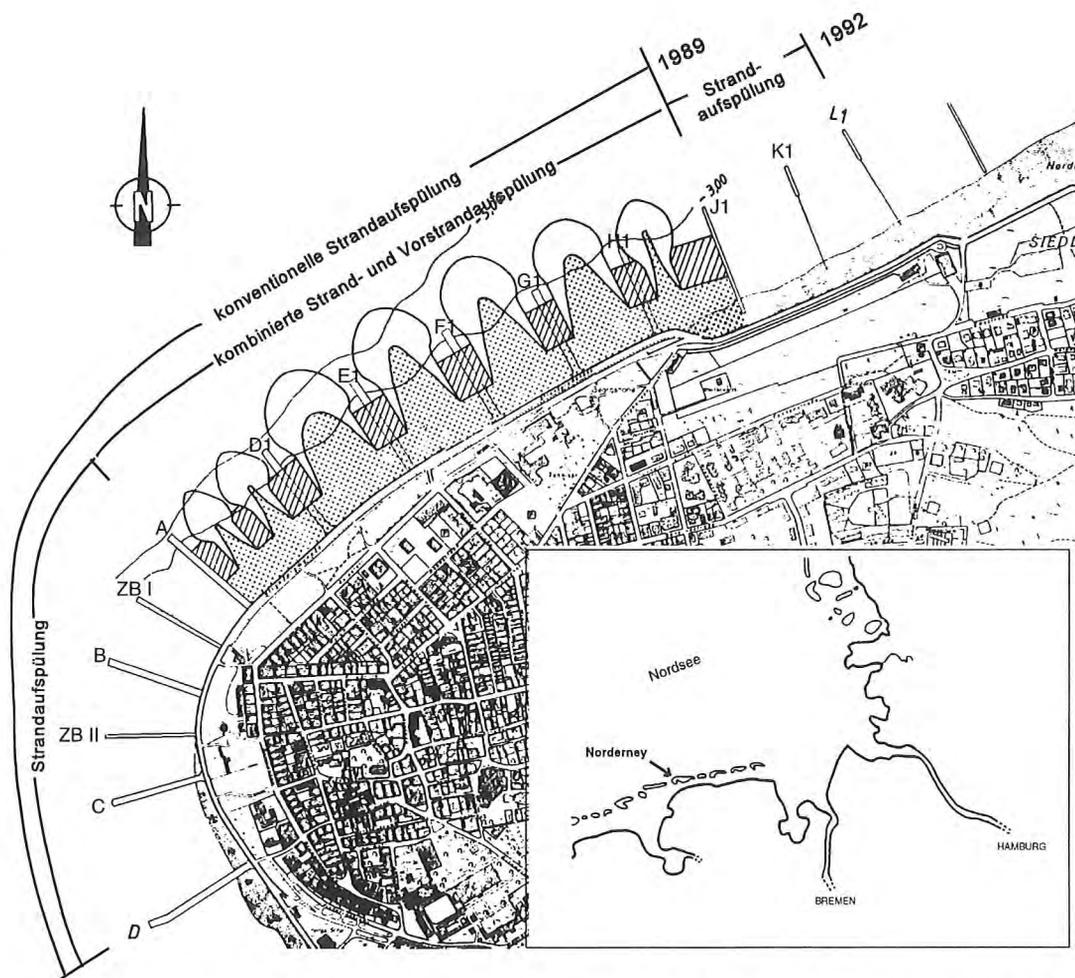


Abb. 15: Lageplan der Aufspülungen [ERCHINGER & KNAACK 1995, verändert]

Aufspülung 1992 wurden insgesamt 500000m^3 Sand mit einem d_{50} von $0,20\pm 0,05\text{mm}$ [EITNER 1993] auf einer Länge von ca. 2km zwischen den Bühnen D und L1 eingebaut. Im Bereich des Weststrands zwischen den Bühnen D und A erfolgte die Aufspülung in annähernd gleicher Form wie 1989, während am Nordweststrand zwischen den Bühnen A und J1 1992 durch das Einspülen großer Sanddepots der Vorstrand mit aufgefüllt wurde [ERCHINGER & KNAACK 1995] und daher deutliche Unterschiede in der Ausführung der Auffüllungen bestehen. Somit sind bei einem Vergleich der beiden Aufspülungen die Bereiche Weststrand und Nordweststrand zu trennen.

4.3 Volumenentwicklung

Weststrand (Bühnen D bis A)

Nach der Aufspülung 1989 nahm das Volumen im Bereich des nassen und trockenen Strandes kontinuierlich ab, während nach 1992 die Sandmassen in den ersten Monaten nach der Aufspülung zunahm und erst im darauffolgenden Winter der Strand erodiert wurde. Nach dieser Erosionsphase stellte sich ein deutlich höheres Strandniveau ein als nach der Aufspülung 1989 (Abb. 16). Im Vorstrandbereich waren die Änderungen nach beiden Aufspülungen gering (Abb. 17). Nach der Aufspülung 1989 blieb das Volumen im Vorstrand in den ersten Monaten nahezu stabil und nahm dann leicht ab. Auch nach 1992 waren die Verluste in den ersten Monaten gering, gegen Ende des Jahres 1993/Anfang 1994 war dann eine Massenzunahme im Vorstrandbereich festzustellen (Abb. 17).

Betrachtet man das Gesamtvolumen oberhalb NN-4m, waren die Verluste nach der Aufspülung 1989 deutlich größer als nach 1992. Nach dieser Aufspülung erfolgten zuerst nur relativ geringe Volumenabnahmen, in der zweiten Hälfte des Jahrs 1993 war sogar eine Massenzunahme zu verzeichnen (Abb. 16).

Möglicherweise wurde die günstigere Situation nach der Aufspülung 1992 durch einen Materialtransport aus dem nach Nordosten angrenzenden Bereich hervorgerufen, in dem 1992 höhere Verluste als nach 1989 festzustellen waren (s.u.). Allerdings steht einem Transport aus dieser Richtung das in früheren Untersuchungen festgestellte Transportschema am Westkopf von Norderney mit dem Divergenzbereich zwischen den Bühnen C und A entgegen [KURZAK et al. 1949]. Sollte, wie von EITNER et al. [1993] angenommen wurde, eine Ostverlagerung des Divergenzbereiches in den letzten Jahren stattgefunden haben, wäre die oben genannte Materialverlagerung möglich.

Nordweststrand (Bühnen A bis J1)

Zwischen den Bühnen A und J1 wurde 1992 eine Strandgrundversorgung ähnlich der Aufspülung 1989 eingebaut und zusätzlich eine größere Sandmenge depotartig in den Vorstrand eingespült. Wegen der größeren Nähe des Seegats wurden im Feld A-D1 dieses Material in zwei Sandkörpern eingespült, in den anderen Feldern wurde jeweils ein Depot eingebaut (Abb. 15). Zwischen den Bühnen A und H1 (für Bühnenfeld H1-J1 liegen keine Daten vom Zeitpunkt unmittelbar vor der Aufspülung 1989 vor) wurden in der Aufspülung 1989 durchschnittlich $295\text{m}^3/\text{m}$ Sand oberhalb NN-4m eingebaut, davon 60% oberhalb NN-1,5m. 1992 wurden im Schnitt $338\text{m}^3/\text{m}$ eingespült, wiederum ca. 60% oberhalb NN-1,5m (Abb. 18).

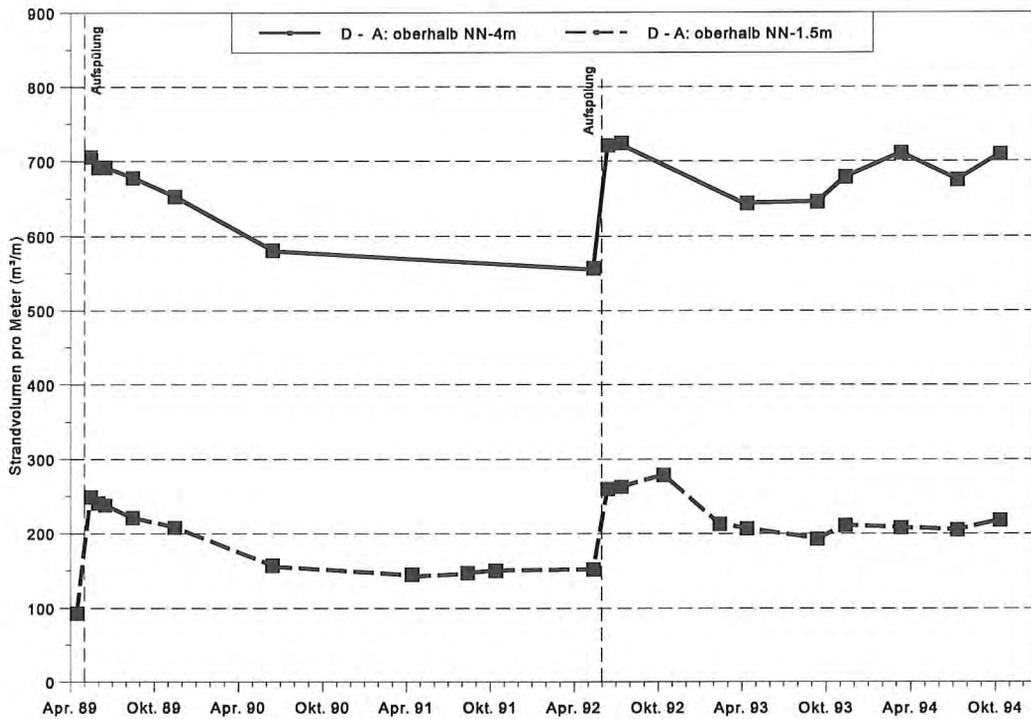


Abb. 16: Entwicklung des Strandvolumens oberhalb NN-4m und NN-1,5m zwischen den Bühnen D und A (Weststrand)

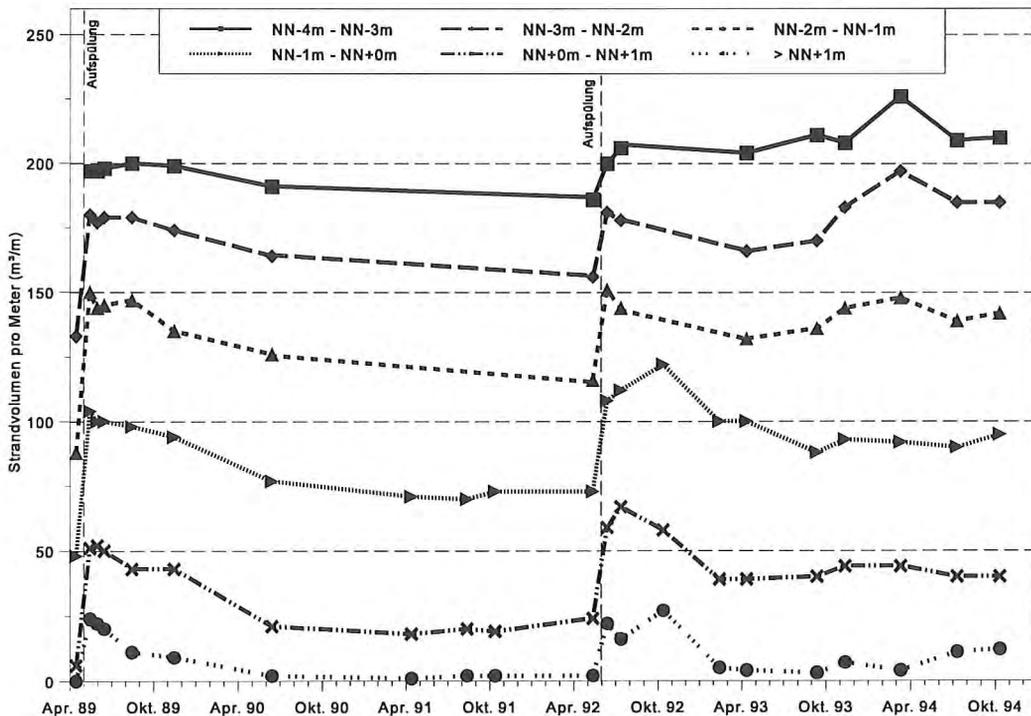


Abb. 17: Entwicklung des Strandvolumens in Höhenschichten zwischen den Bühnen D und A (Weststrand)

Betrachtet man die durchschnittlichen Sandmengen in dem Bereich A - J1, so waren im Vorstrand die Volumenabnahmen in den ersten Monaten nach der Aufspülung 1989 gering, deutlichere Verluste erfolgten erst 1990 und 1991 (Abb. 20). Nach der Aufspülung 1992 hingegen wurden insbesondere im ersten Monat große Sandmengen aus dem Vorstrand erodiert. Im Laufe des Jahres 1993 wurden die Volumenabnahmen dann geringer und die Verlustraten blieben bis zur Aufspülung 1994 relativ klein. Der nasse und trockene Strand erodierten nach beiden Aufspülungen, wobei die Verlustraten nach 1992 etwas höher als nach 1989 waren. Im Gesamtbilanzraum oberhalb NN-4m ergaben sich somit nach beiden Aufspülungen ähnliche Volumenänderungen mit großen Verlusten. Diese Volumenabnahmen erfolgten nach 1992 schneller als nach der Aufspülung 1989. Nach 1992 wurde bereits nach einem Jahr ein Volumen gemessen, das nach der Aufspülung 1989 erst nach ca. zwei Jahren erreicht wurde (Abb. 19). Die Volumenabnahmen verlangsamten sich nach den hohen Anfangsverlusten 1992 deutlich und die späteren Verluste waren nur noch gering.

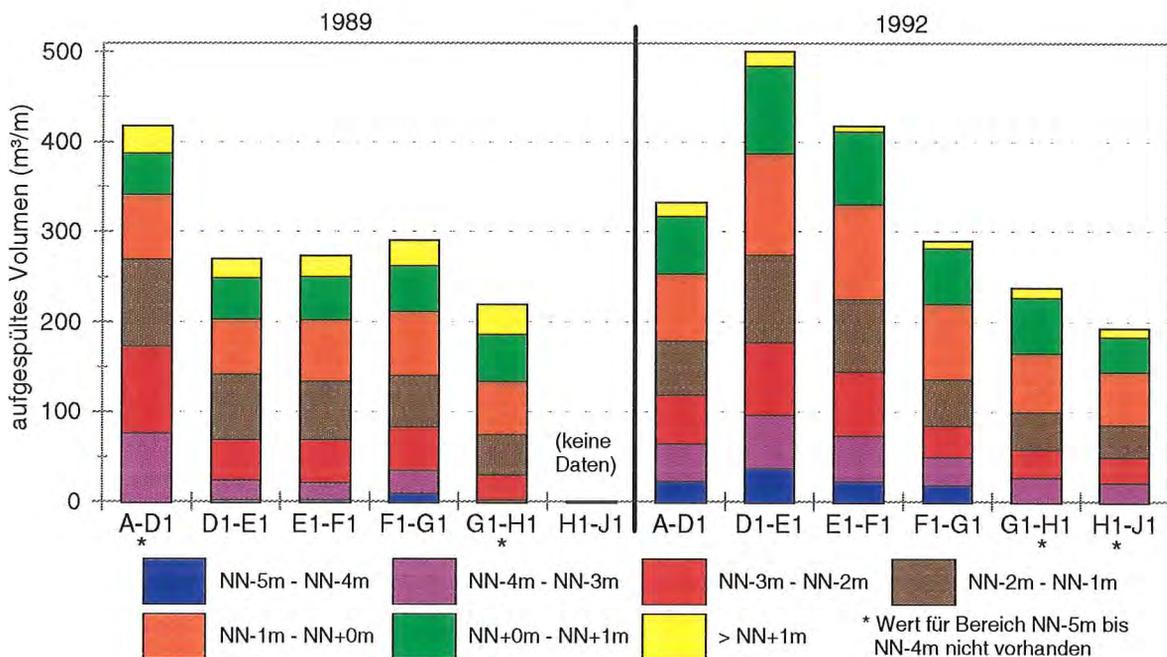


Abb. 18: Verteilung des Aufspülmaterials zwischen den Bühnen A und J1 auf verschiedene Höhenschichten

Die größere Erosion nach 1992 dürfte einer der Gründe dafür sein, daß nach dieser Aufspülung die Wiederherstellung einer dem Zustand vor der Aufspülung ähnlichen Korngrößenverteilung schneller erfolgte als nach der Aufspülung 1989 (siehe Bericht zur Sedimentologie).

Bei der Betrachtung der Volumenentwicklung ist zu berücksichtigen, daß sich das Verhalten in den einzelnen Feldern stark voneinander unterscheiden kann. 1989 lagen die Anfangsverluste in allen fünf Feldern zwischen den Bühnen A und J1 in etwa in der gleichen Größenordnung (Abb. 21). In den drei westlichen Bühnenfeldern nahm unterhalb NN-4m das Volumen sogar geringfügig zu, dies spricht für eine Materialverlagerung vom Strand in den Vorstrand. Nach der Aufspülung 1992 waren die

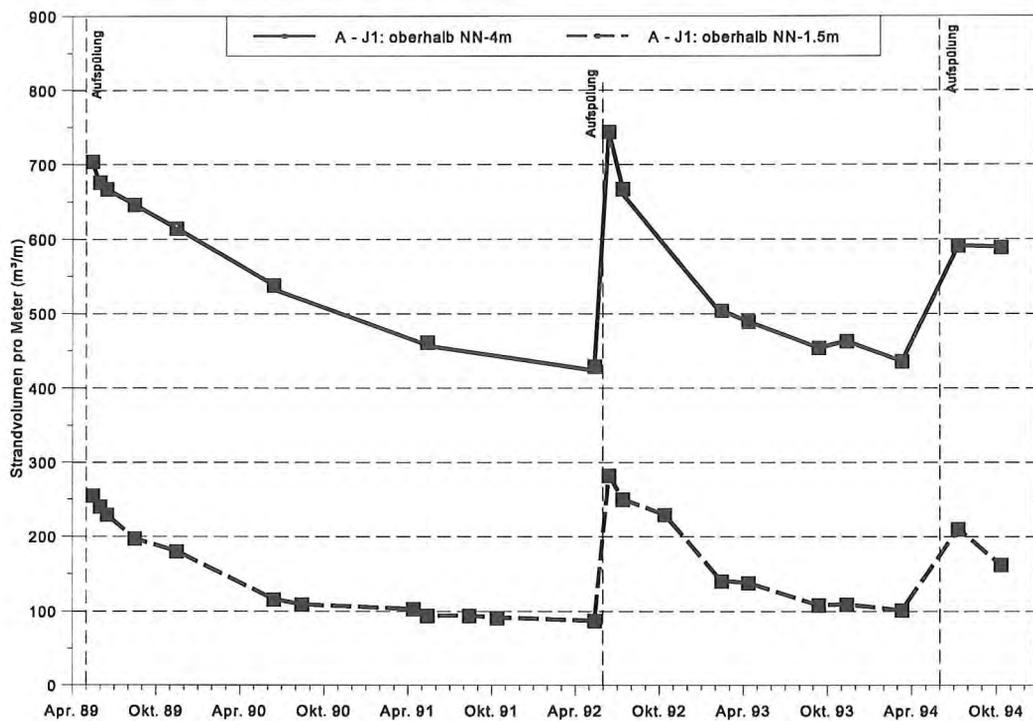


Abb. 19: Entwicklung des Strandvolumens oberhalb NN-4m und NN-1,5m zwischen den Bühnen A und J1 (Nordweststrand)

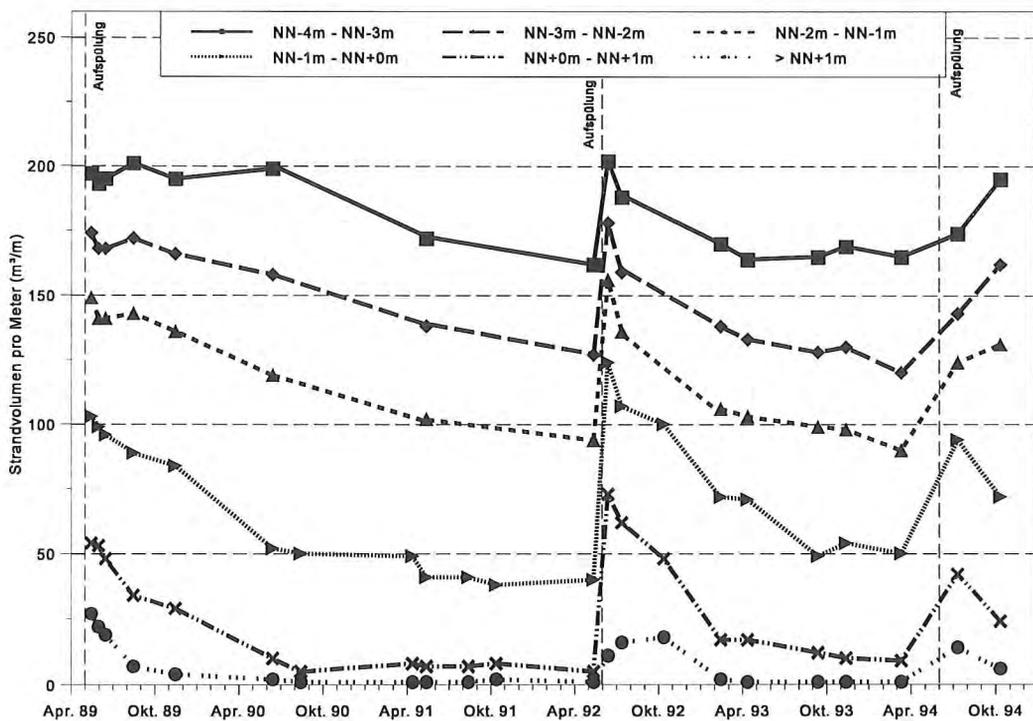


Abb. 20: Entwicklung des Strandvolumens in Höhenschichten zwischen den Bühnen A und J1 (Nordweststrand)

Anfangsverluste von Bühnenfeld zu Bühnenfeld sehr verschieden. Hohe Verluste traten im Feld A-D1 auf, während in F1-G1 die Volumenabnahme nur $18\text{m}^3/\text{m}$ betrug. Auch in G1-H1 waren die Verluste ähnlich gering, hier wurde jedoch eine höhere Volumenabnahme von $62\text{m}^3/\text{m}$ oberhalb von NN-4m durch einen deutlichen Zuwachs unterhalb dieser Tiefe kompensiert. Ähnlich stellte sich auch die Entwicklung in E1-F1 dar (Abb. 21). Die Verluste im Feld A-D1 erfolgten zu über $2/3$ im Vorstrand, während im Bühnenfeld D1-E1 die Abnahmen zum überwiegenden Teil im Strandbereich zu verzeichnen waren. In E1-F1 und G1-H1 erfolgte im Vorstrandbereich eine Volumenzunahme, während im Bühnenfeld H1-J1 oberhalb NN der Sandvorrat anstieg.

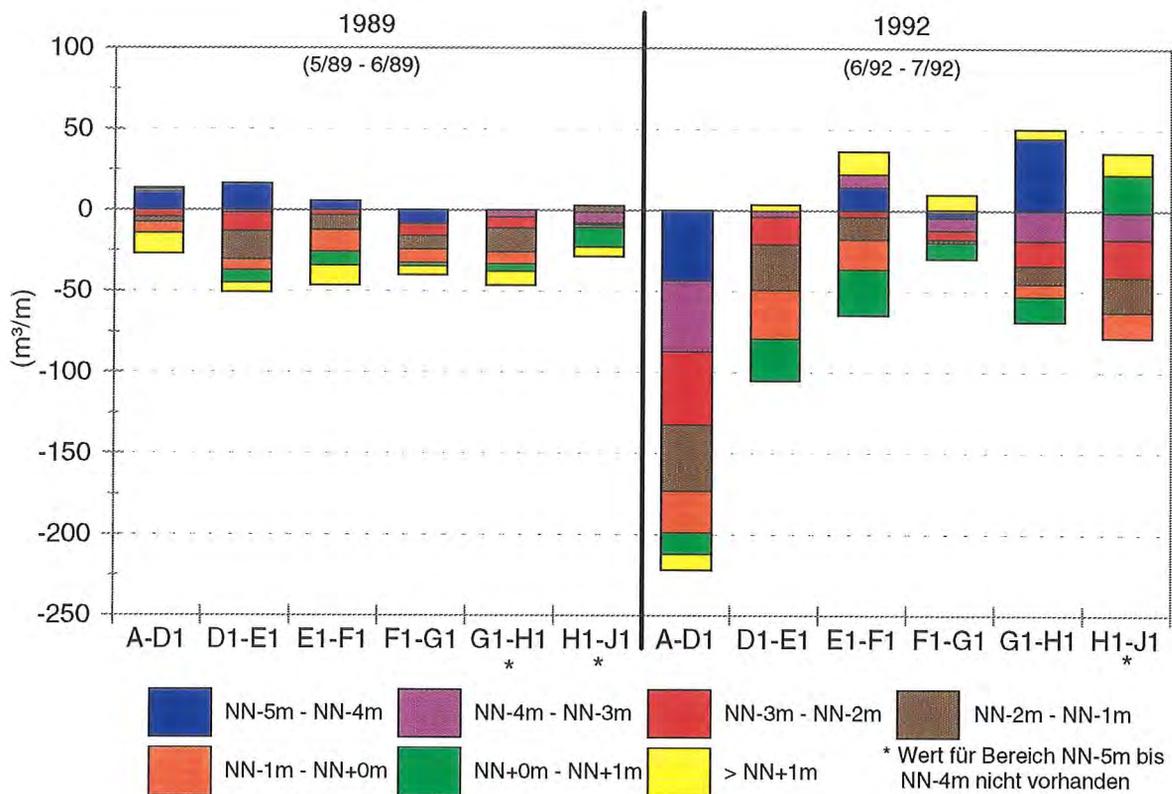


Abb. 21: Volumenänderungen im ersten Monat nach den Aufspülungen in verschiedenen Höhenschichten, Bereich A bis J1

Die nachfolgenden Verluste bis zum nächsten Sommer betrafen nach 1989 in allen fünf Feldern zu etwa $2/3$ den nassen und trockenen Strand (Abb. 22). Östlich der Bühne F1 waren im Vorstrand leichte Massenzunahmen zu verzeichnen. Nach 1992 waren die Verluste im ersten Jahr nach der Aufspülung deutlich höher als 1989. Die Verluste erfolgten in den Feldern A-D1, D1-E1, E1-F1 und F1-G1 je etwa zur Hälfte im Strand- und Vorstrandbereich. In den beiden Bühnenfeldern G1-H1 und H1-J1 waren die Verluste oberhalb der Niedrigwasserlinie deutlich größer als im Vorstrand (Abb. 22).

Die Verluste im zweiten Jahr nach den Aufspülungen waren in beiden Fällen relativ gering und in allen Bühnenfeldern etwa gleich groß (Abb. 23). Nach der Aufspülung 1992 traten z.T. Massenzunahmen im Vorstrand auf, insbesondere im Feld G1-H1 nahm das Volumen zwischen NN-5m und NN-4m deutlich zu. Es kam somit zu stärkeren Umlagerungen zwischen Strand und Vorstrand.

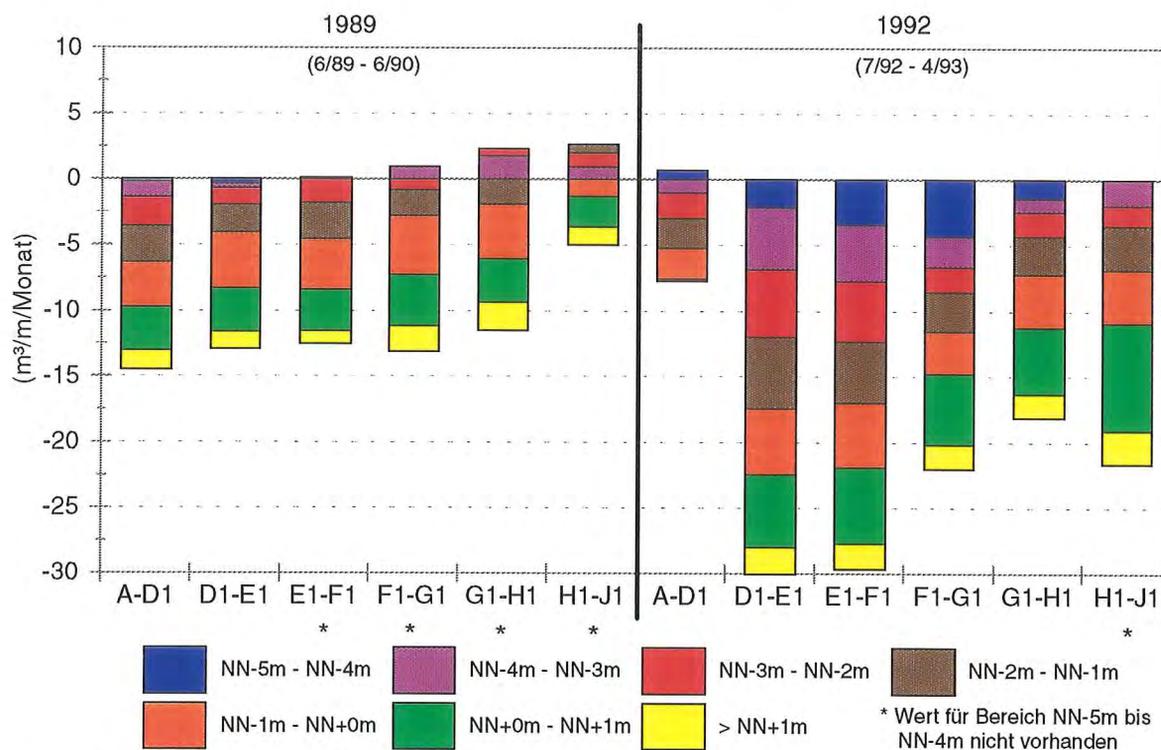


Abb. 22: Volumenänderungen im ersten Jahr nach der Aufspülung (ohne 1. Monat) in verschiedenen Höhenschichten, Bereich A bis J1

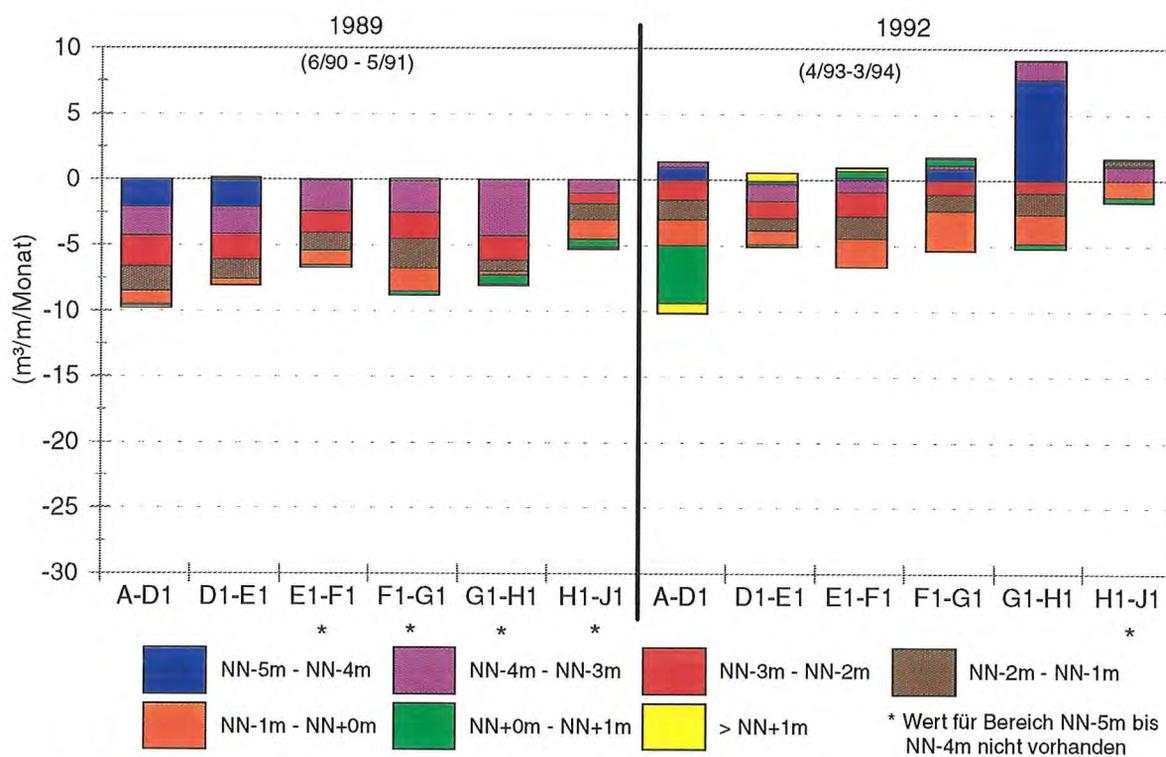


Abb. 23: Volumenänderungen im zweiten Jahr nach den Aufspülungen in verschiedenen Höhenschichten, Bereich A bis J1

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Anfangsverluste, die durch die Umformung der "Störkörper" hervorgerufen wurden, und die Verluste im ersten Jahr nach der kombinierten Strand- und Vorstrandaufspülung 1992 erheblich größer als nach der Auffüllung 1989 waren. Nach 1992 wurde bereits nach ca. einem Jahr ein Strandvolumen erreicht, das nach der Aufspülung 1989 erst nach etwa zwei Jahren gemessen wurde. Nach 1992 verlangsamten sich die Volumenabnahmen anschließend und so war das Volumen oberhalb NN-4m in den Bühnenfeldern D1-E1, E1-F1 und F1-G1 vor der Aufspülung 1994 größer als unmittelbar vor der Aufspülung 1992. In den Feldern A-D1, G1-H1 und H1-J1 war das Verhältnis umgekehrt und im Mittel war in dem Bereich A bis J1 das Volumen vor der Aufspülung 1994 geringfügig größer als vor 1992. Eine geringere Langzeitwirkung der kombinierten Strand- und Vorstrandauffüllung ist somit nicht nachweisbar, zumal die Entwicklung durch die neuerliche Aufspülung abgeschnitten wurde.

4.4 Hydrodynamische Randbedingungen

Da für den untersuchten Zeitraum von 1989 bis 1994 nur für etwa 48% der Tiden auch Seegangsmessungen vorliegen, war die Signifikanz des reduzierten Datensatzes zu überprüfen. Hierzu wurde die Randbedingung Tidewasserstände herangezogen. Ein Vergleich der relativen Eintrittshäufigkeit der Tidehochwasser am Pegel Norderney-Riffgat zeigte nur geringe Unterschiede von etwa $\pm 0,5\%$ zwischen allen Tiden und dem reduzierten Datensatz (Abb. 24 bis 26). Letzterer zeigte eine etwas größere Anzahl an höheren Tiden und eine etwas geringere Häufigkeit von Tiden mit niedrigem Hochwasserstand (NIEMEYER 1995b).

Untersuchungen der relativen Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhen und der mittleren Wellenperioden für den Zeitraum 1989 bis 1994 zeigten die größte Häufigkeit von H_s im Intervall von 0,15 bis 0,25 m, die dominante Wellenperiode lag im Intervall 5,5 bis 5,75 s (Abb. 27 + 28) [NIEMEYER 1995b]. Bei diesen Untersuchungen wurden Zeitserien mit Wellenhöhen von $H_s < 0,05$ m nicht berücksichtigt. Die Abbildungen 29 und 30 zeigen die Überschreitungshäufigkeit der signifikanten Wellenhöhe H_s und der mittleren Wellenperiode T_m für den oben genannten Zeitraum. Es wird deutlich, daß größere signifikante Wellenhöhen und längere mittlere Wellenperioden nur in geringer Anzahl auftraten, signifikante Wellenhöhen von $H_s > 2,0$ m traten nach der Statistik einmal pro Jahr auf, ein Wert von $H_s = 2,5$ m wurde nicht erreicht. Es herrschte somit nur selten stark ausgeprägter Seegang. Diese moderaten Seegangsverhältnisse sind für die morphodynamische Entwicklung der Strände auf Norderney bestimmend [HOMEIER 1976; KUNZ & STEPHAN 1992; NIEMEYER 1991; 1992b; 1995b].

Für den Vergleich der Aufspülungen 1989 und 1992 wurde der Gesamtdatensatz in zwei Intervalle unterteilt: 1989 bis 1992 und 1992 bis 1994. Die Abbildungen 31 bis 33 zeigen die Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhe für die beiden Intervalle sowie deren Differenzen (Meßreihen mit $H_s < 0,05$ m wurden hierbei miteinbezogen). Im Zeitraum 1989 bis 1992 war im Vergleich zum nachfolgenden Zeitabschnitt der Anteil kleinerer Wellen höher und der Prozentanteil signifikanter Wellenhöhen von $H_s > 0,35$ m geringer als im zweiten Intervall. Der Vergleich der mittleren Wellenperioden zeigte eine größerer Häufigkeit längerer Perioden im Abschnitt 1989/92 gegenüber dem Abschnitt 1992/94 (Abb. 34 bis 36). Diese Ergebnisse weisen auf einen höheren relativen Anteil von Dünung im Intervall 1989/92 und einen höheren Anteil von Wind-

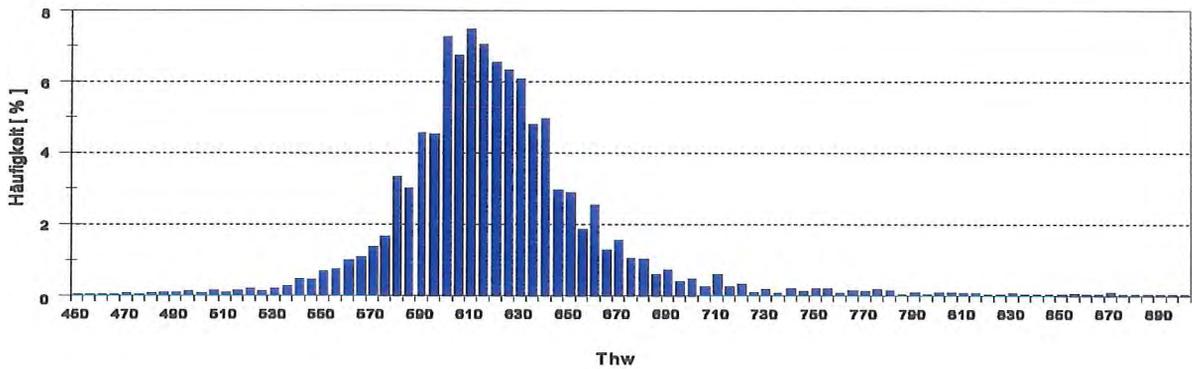


Abb. 24: Relative Häufigkeiten des Thw am Pegel Norderney-Riffgat (Intervall = 5 cm); Zeitraum 6/89 - 2/94 [NIEMEYER 1995b]

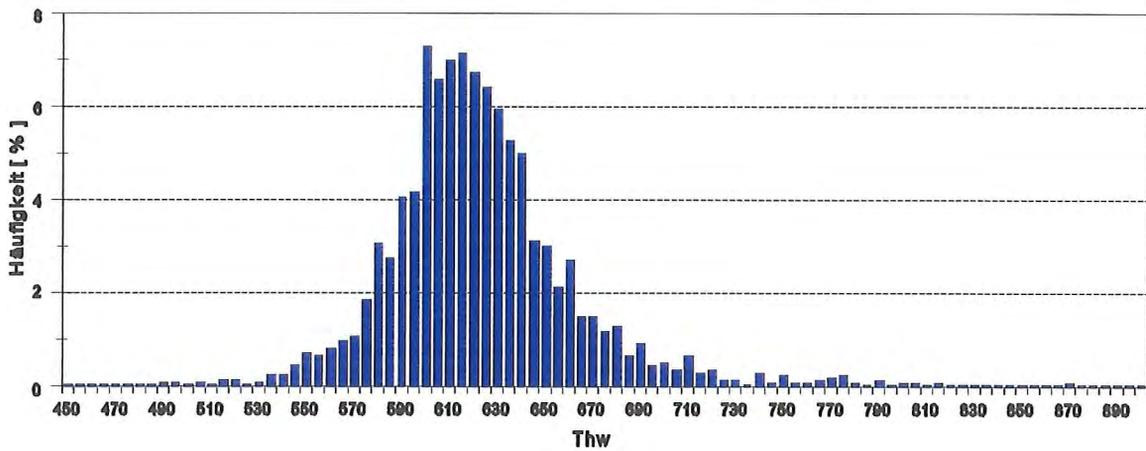


Abb. 25: Relative Häufigkeiten des Thw am Pegel Norderney-Riffgat (Intervall = 5 cm); nur Tiden mit zeitgleichen Wellenmessungen an der Position M_1 [NIEMEYER 1995b]

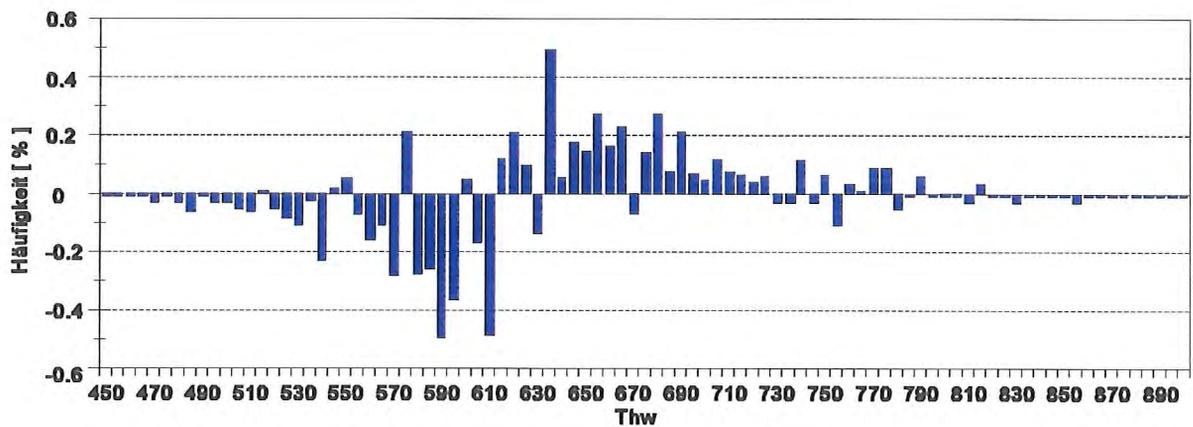


Abb. 26: Differenzen der relativen Häufigkeiten des Thw für den Gesamtzeitraum und für den reduzierten Datensatz mit zeitgleichen Wellenmessungen an der Position M_1 [NIEMEYER1995b]

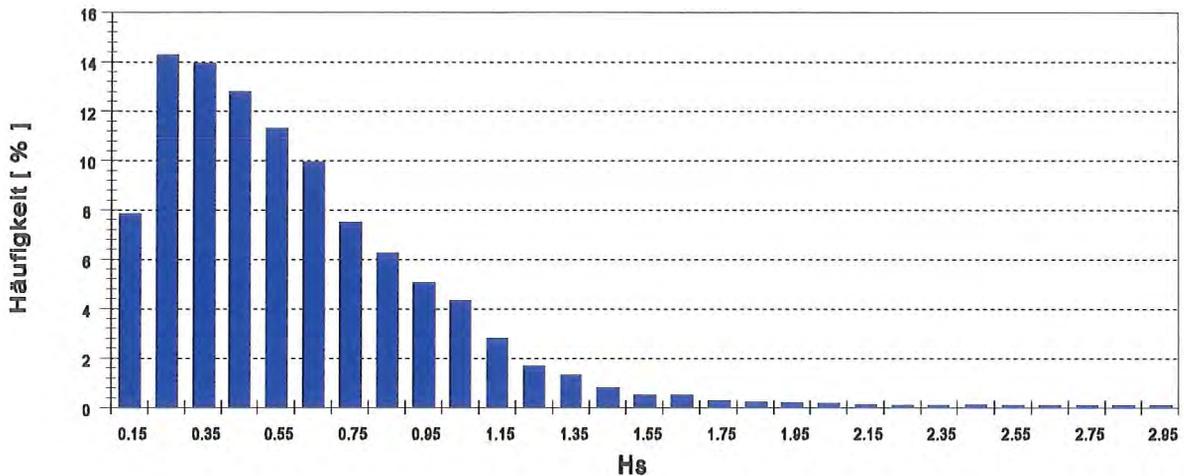


Abb. 27: Verteilung der signifikanten Wellenhöhen ($H_s \geq 0,05$ m, Intervall = 0,1 m); Zeitraum 6/89 bis 2/94 [NIEMEYER 1995b]

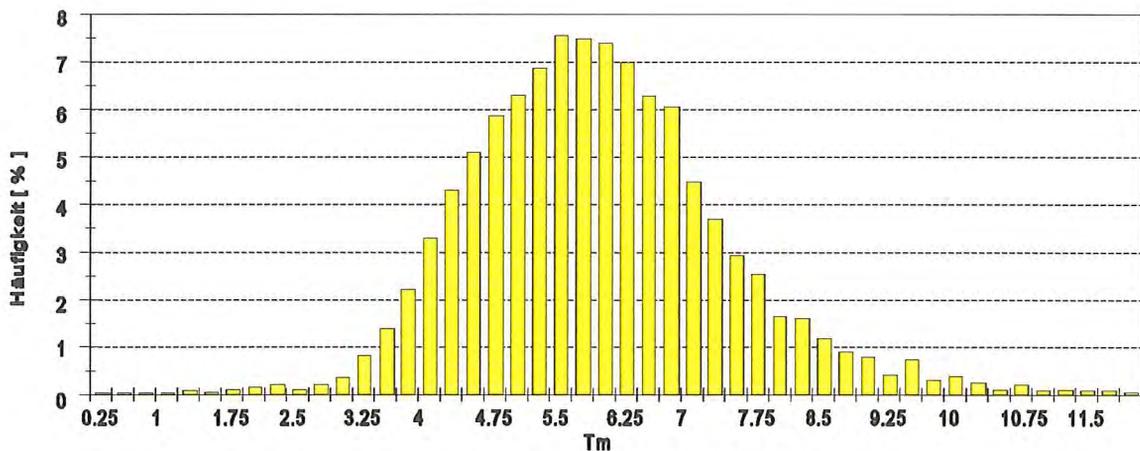


Abb. 28: Verteilung der mittleren Wellenperioden ($H_s \geq 0,05$ m, Intervall = 0,25 s); Zeitraum 6/89 bis 2/94 [NIEMEYER 1995b]

seen im Abschnitt 1992 bis 1994 hin. Längere Wellen verursachen bei gleicher Wellenhöhe eine Verstärkung bodennaher Strömungsfelder, was insbesondere für die Mobilisierung und Ablagerung der Sedimente von Bedeutung sein kann [NIEMEYER 1995b];

steilere und damit kürzere Wellen mit größeren Höhen habe eine hohe erosive Wirkung [NIEMEYER 1991; 1992b]. Aus den Unterschieden der relativen Häufigkeit der Parameter H_s und T_m in den beiden Intervallen sind jedoch keine unmittelbaren Folgerungen auf die morphologischen Veränderungen möglich. Zum einen haben einzelne Ereignisse nur eine zeitlich begrenzte morphologische Wirkung (HOMEIER 1976; NIEMEYER 1991; 1992a; 1992b) und sind in der mittelfristigen Entwicklung zumeist nicht identifizierbar [STEPHAN 1988; KUNZ & STEPHAN 1992; KERSTING et al. 1994]. Zum anderen ist für die Beurteilung der mittelfristigen morphologischen Veränderungen ein Vergleich der relativen Häufigkeit nicht ausreichend, vielmehr ist eine Betrachtung der absoluten Häufigkeit notwendig, um die gesamte hydrodynamische

mische Wirkungsdauer einzubeziehen. Nach geeigneten Umrechnungen der Daten wurde ein entsprechender Vergleich durchgeführt. Es zeigte sich, daß, im wesentlichen aufgrund der längeren Wirkdauer, die hydrodynamische Belastung im Zeitabschnitt 1989/92 stärker gewesen ist als im zweiten Abschnitt. Aus den analysierten Seegangsdaten läßt sich somit keine signifikante Begründung für die kürzere Dauer des zweiten Intervalls ableiten [NIEMEYER 1995b].

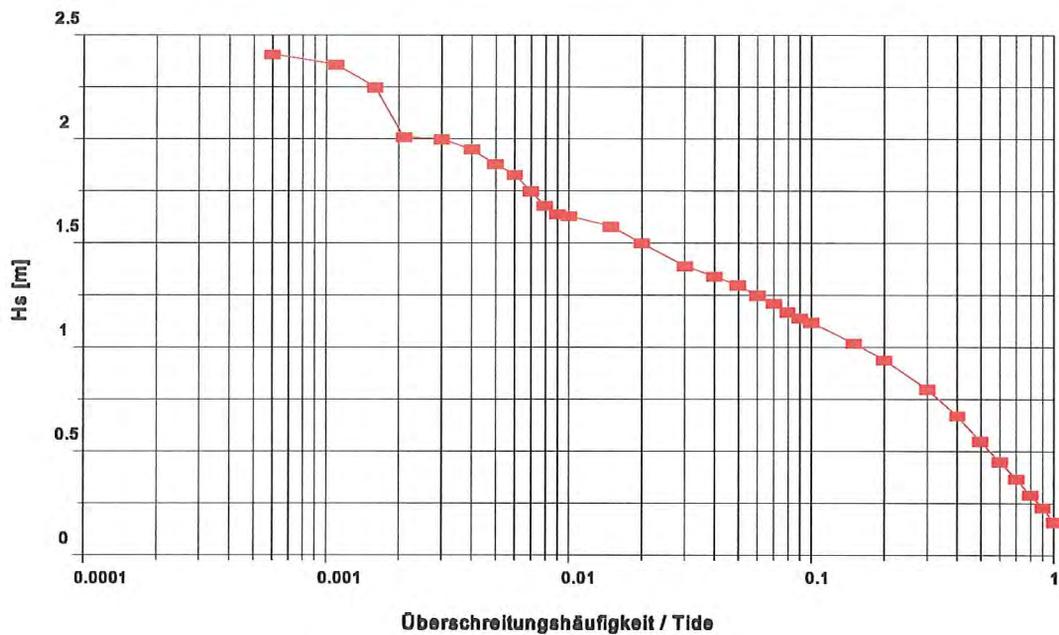


Abb. 29: Überschreitungshäufigkeit signifikanter Wellenhöhen für den Zeitraum 6/89 bis 2/94 [NIEMEYER 1995b]

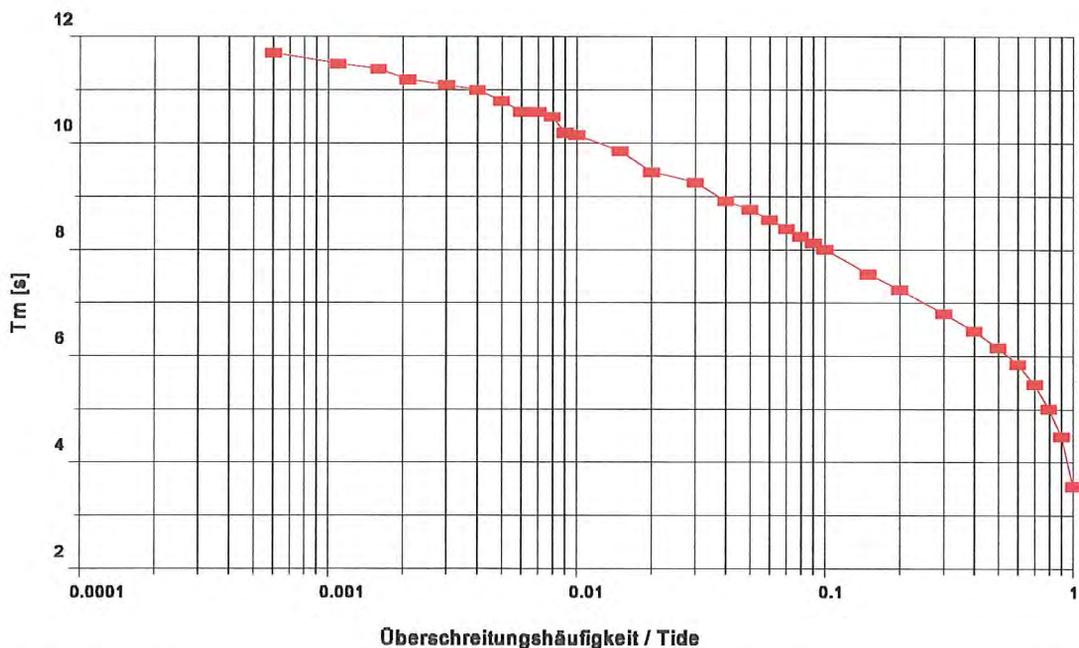


Abb. 30: Überschreitungshäufigkeit mittlerer Wellenperioden für den Zeitraum 6/89 bis 2/94 [NIEMEYER 1995b]

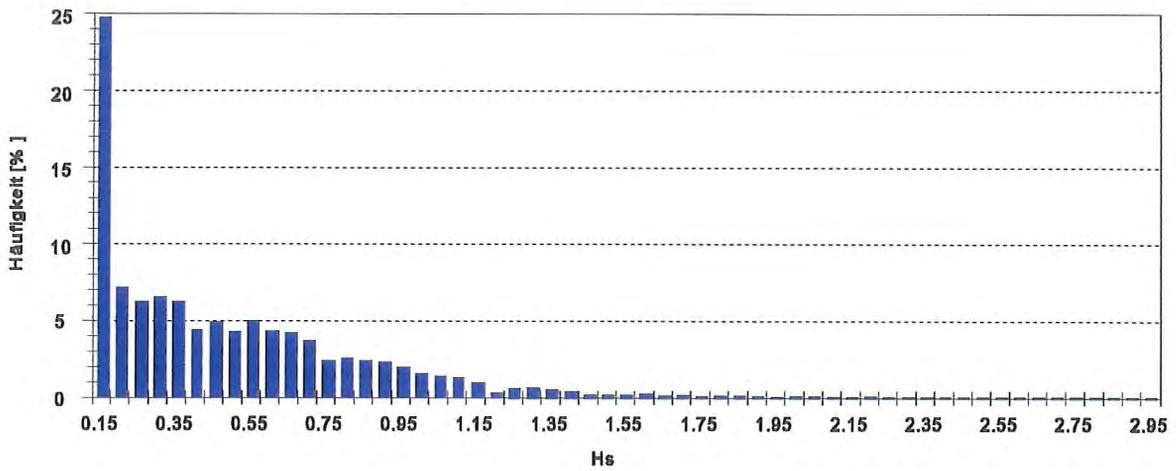


Abb. 31: Verteilung der signifikanten Wellenhöhen (Intervall $l = 0,05$ m) im Zeitraum 1989 bis 1992 [NIEMEYER 1995b]

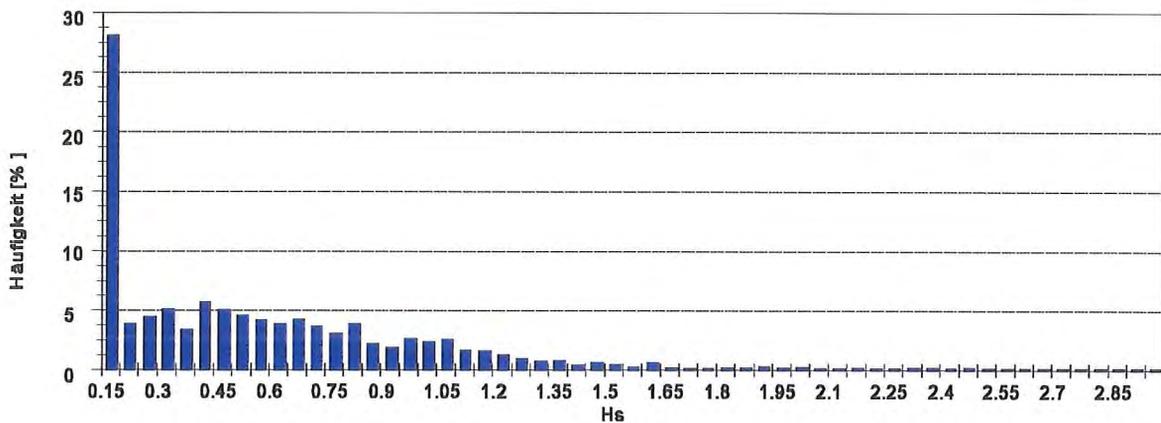


Abb. 32: Verteilung der signifikanten Wellenhöhen (Intervall = 0,05 m) für den Zeitraum 1992 bis 1994 [NIEMEYER 1995b]

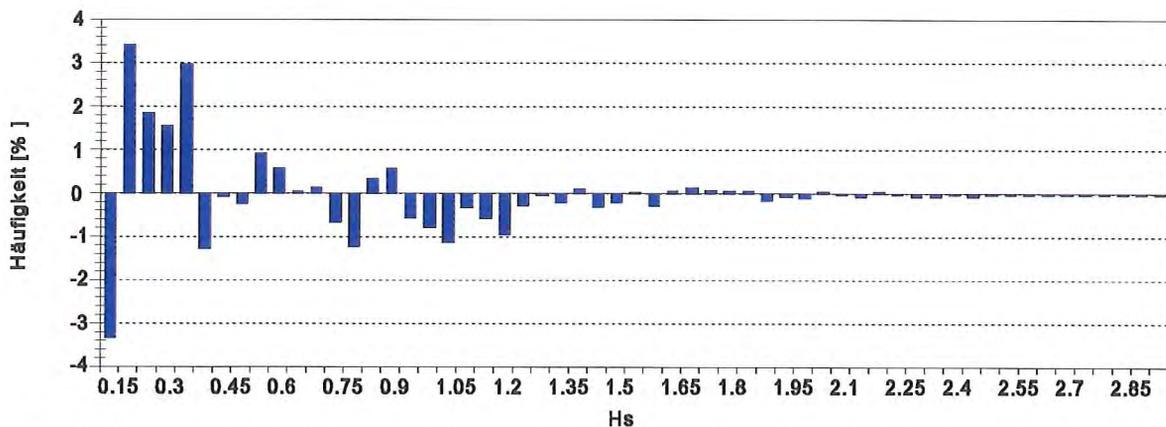


Abb. 33: Differenz der relativen Häufigkeit der signifikanten Wellenhöhen (Intervall = 0,05 m) in den Perioden 1989/92 und 1992/94 [NIEMEYER 1995b]

Eine singuläre Erklärung der verschiedenen Volumenentwicklung nach den beiden Aufspülungen durch unterschiedliche hydrodynamische Randbedingungen ist auf Grund der vorliegenden Seegangsmessungen nicht möglich. Vielmehr weisen die teilweise großen Unterschiede der morphologischen Entwicklung in benachbarten Bühnenfeldern nach der Aufspülung 1992 auf räumlich variierende Ursachen hin.

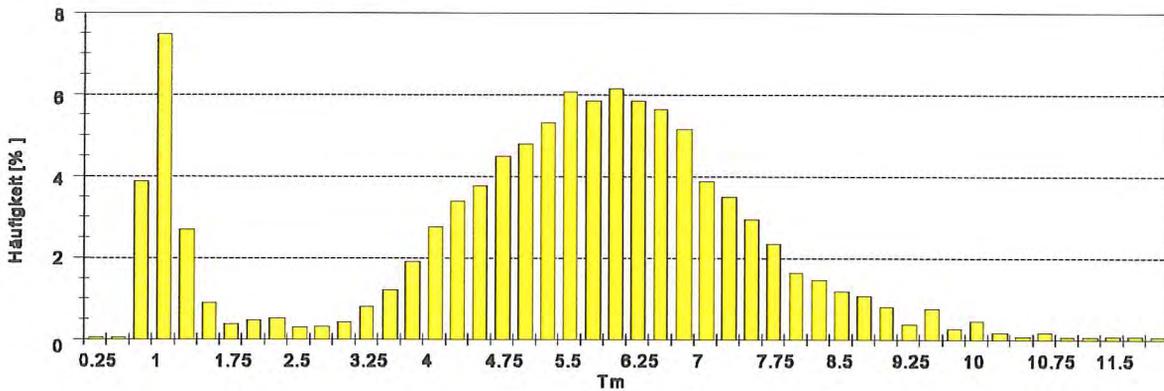


Abb. 34: Verteilung der mittleren Wellenperioden (Intervall = 0,25 s) für den Zeitraum 1989 bis 1992 [NIEMEYER 1995b]

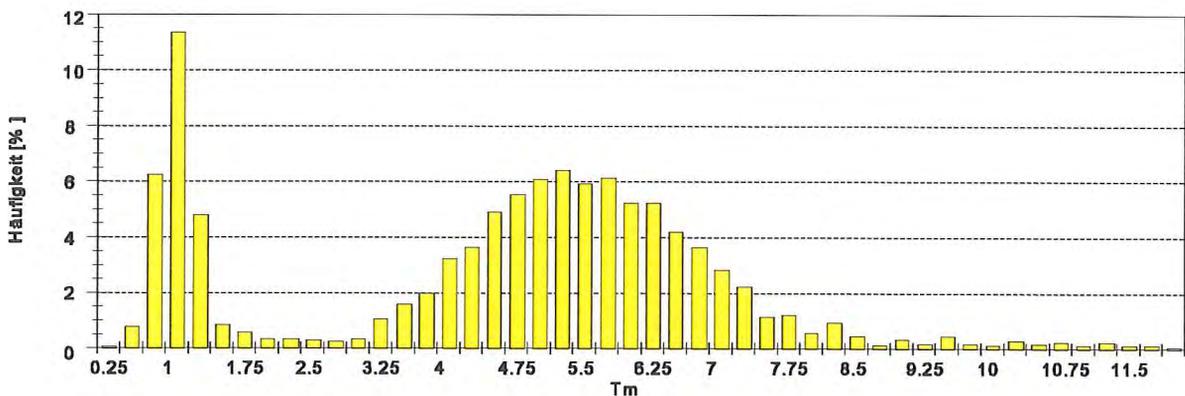


Abb. 35: Verteilung der mittleren Wellenperioden (Intervall = 0,25 s) für den Zeitraum 1992 bis 1994 [NIEMEYER 1995b]

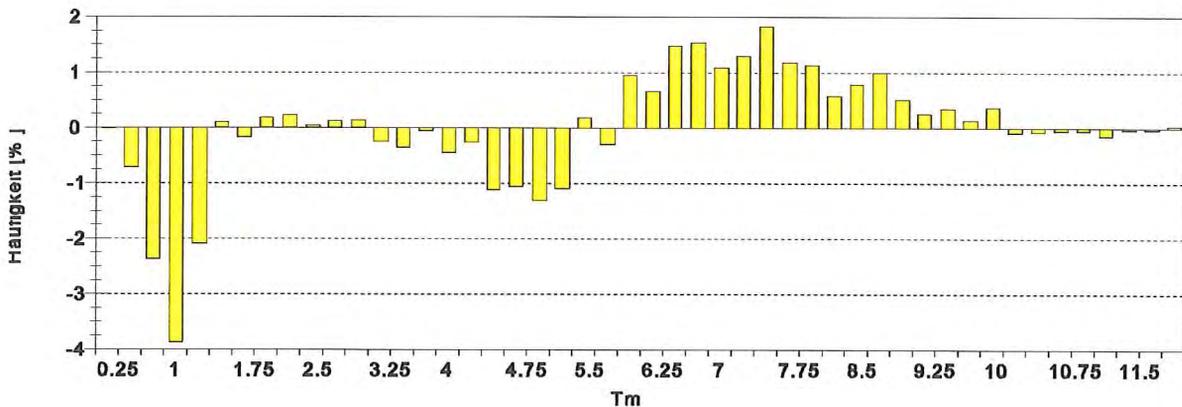


Abb. 36: Differenz der relativen Häufigkeit der mittleren Wellenperioden (Intervall = 0,25 s) in den Perioden 1989/92 und 1992/94 [NIEMEYER 1995b]

5. ANALYSE SEEGANGS- UND STRÖMUNGSGEPRÄGTER TRANSPORT-BEDINGUNGEN

5.1 Vorgehensweise

Tidewasserstände und Seegang sind vertikale Auslenkungen der Wasseroberfläche von unterschiedlicher Frequenz um einen Ruhewasserspiegel in Überlagerung. Der jeweilige Tidewasserstand, der im Mittel über eine Periode von 12h 25' um den Meeresspiegel oszilliert, bildet wiederum für eine Dauer von Minuten den Ruhewasserspiegel für den vergleichsweise hochfrequenten Seegang mit mittleren Perioden von Sekunden und möglicherweise überlagernder Infrashwerewellen mit Perioden über zwanzig Sekunden. Als Kompromiß zwischen der Forderung nach einem stationären Ruhewasserspiegel und statistisch hinreichend langer Zeitreihen wird der Tidewasserstand über eine Dauer von 20 Minuten gemittelt und entsprechende Zeitreihen des Seegangs analysiert.

Die vertikalen Wasserspiegelauslenkungen bewirken in ihren Frequenzbereichen Strömungsfelder, die sowohl Horizontal- als auch Vertikalkomponenten haben. Um so geringer die Wassertiefe, desto geringer sind - insbesondere in Sohlhöhe - die Vertikalkomponenten, von brandendem Seegang abgesehen. In der Regel werden bei Naturmessungen und in mathematischen Modellen nur Horizontalkomponenten erfaßt; es wird davon ausgegangen, die maßgebenden Transportfaktoren hierdurch mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen. Hierzu ist anzumerken, daß hinsichtlich der Mobilisierung von Sedimenten in Suspension die Vertikalkomponenten von Bedeutung sind. Auch bei den Naturmessungen in diesem Projekt ist das horizontale Strömungsfeld erfaßt worden. Voruntersuchungen hatten ergeben, daß Tideströmungen insbesondere in den starker Erosion unterliegenden nordwestlichen Strandbereichen kaum Bedeutung für die Transportvorgänge haben [NIEMEYER 1987b]. Aus diesem Grund wurde das Hauptaugenmerk auf seegangsinduzierte Strömungen gelegt, die als wesentliche Transportfaktoren für diesen Bereich ausgewiesen sind [KURZAK ET AL. 1949; NIEMEYER 1992a, 1992b]. Darüber hinaus sind Differenzierungen vorgenommen worden, die eine gesonderte Betrachtung von Infrashwerewellen mit einer Grenzfrequenz von

$$f \leq 0,05 \text{ [Hz]}$$

und der durch sie induzierten Strömungen erlaubt. Hiermit sollen Größenordnungen und Erscheinungsformen dieser Phänomene im Hinblick auf die Transportprozesse im Strand- und Vorstrandbereich explizit herausgearbeitet werden. Auf die Bedeutung solcher langperiodischen Vorgänge für ufernahe Strömungsvorgänge hatte bereits MUNK [1949] hingewiesen; eine umfassende Darstellung des neueren Kenntnisstandes hat BATTJES [1988] erarbeitet.

Ergänzend zu früheren Untersuchungen in diesem Problemfeld [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b] werden hier aus Darstellbarkeitsgründen exemplarisch die Daten einzelner Tiden in ihrem Gesamtverlauf an einzelnen Stationen und für die Zeiten der Überflutung für das Hauptmeßfeld zur Erfassung räumlicher Effekte dargestellt. Diese prozeßorientierten Analysen stellen eine Ergänzung zu den mittelfristigen Betrachtungen des Wasserstands- und Seegangklimas im Vorstrand- und Strandbereich von

Norderney dar [NIEMEYER 1995]. Hierbei wird zur Verbesserung der Anschaulichkeit eine Unterscheidung in küstennormale und küstenparallele Komponenten vorgenommen. Diese Vereinfachung ist physikalisch völlig korrekt. Sie darf aber nicht dazu verleiten, hieraus ein gleichermaßen vereinfachtes Transportschema herzuleiten.

5.2 Zeitlicher Gang von Seegang und Strömungen über eine Tide

Betrachtungen zur Hydrodynamik in der Brandungszone orientieren sich in der Regel an den Zeiträumen um das Tidehochwasser, wenn der gesamte Gezeitenbereich des Strandes überflutet ist. Da im vorliegenden Fall aber auch die Wechselwirkungen von Vorstrand und Strand von Bedeutung sind, wird exemplarisch die Seegangs- und Strömungsentwicklung über den Verlauf einer Tide dargestellt und zwar für eine Normal- und eine Sturmflut. Aus Darstellbarkeitsgründen wird die Analyse auf die Datensätze der Stationen VST auf dem Vorstrand und M₁ im Bereich der MTnw-Linie begrenzt (Abb. 10), die - im Gegensatz zu den weiter landwärtigen Stationen - den gesamten Tidenverlauf erfassen.

5.2.1 Normaltide

Die Nachttide vom 23./24. 09. 1990 weist mit Tnw von PN +375 cm und PN +372 cm, einem Thw von PN +629 cm, einem Tidestieg von 254 cm, Tidefall von 257 cm, einem Tidehub von 256 cm und einer Tidendauer von 12h 13' nur geringe Abweichungen von den fünfjährigen Mittelwerten 1990/94 ab: MTnw = PN +376 cm; MThw = PN +617 cm; MThb = 241 cm. Der Wind hatte bis um den Eintritt des Thw Stärken von Beaufort 2 bis 4 aus südwestlichen Richtungen; danach drehte er auf westliche Richtungen und frischte bis auf Beaufort 6 auf.

Auf dem Vorstrand nehmen die Wellenhöhen kurzfristig mit den Tidewasserständen zu, um dann unabhängig von deren weiteren Ansteigen etwa gleichzubleiben und sogar abzunehmen (Abb. 37). Die Abnahme der Wellenhöhen im Fall sind für dessen erste Phase daher auch nicht durch den Gang der Wasserstände erklärbar. Entsprechend des aus den Windverhältnissen erklärbaren Dünungscharakters zeigen die mittleren und signifikanten Perioden kaum Variationen und auch die der höchsten Wellen nur geringe, wobei deren relativ große Dauer von 10 s erkennen läßt, daß Dünungssysteme unterschiedlichen Alters überlagernd auftreten (Abb. 38). Die Wellenangriffsrichtung liegt hier - mit Ausnahme einer kurzen Zeitspanne im Fall - um 310° mit einer bis zur halben Ebttide anhaltenden leicht rechtsdrehenden Tendenz. Danach folgt eine kurze stärkere Ausrichtung auf Werte um 320°, nach der dann aber die vorangehende Richtung wieder eintritt (Abb. 39). Als Ursache hierfür ist vermutlich die Änderung der Windverhältnisse zu sehen, die mittelbaren Einfluß genommen haben kann.

Wasserspiegelauslenkungen im Infrashwerebereich haben keine nennenswerte Ausprägung (Abb. 40). Ihre Kopplung an die Höhenentwicklung des Seegangs läßt als Ursache Wellengruppeneffekte aus der Überlagerung unterschiedlicher Dünungssysteme vermuten, worauf auch die Variationen der Perioden hindeuten (Abb. 41).

Die küstennormalen Strömungskomponenten - unabhängig von der Halbgezeit - zeigen sowohl in ihrer Gesamtheit (Abb. 42) als auch bei den langperiodischen Anteilen (Abb. 43) wechselnde Dominanz: im Stieg und Fall bei niedrigeren Wasserständen eher ab-, ansonsten leicht aufländig. Inwieweit allerdings bei den geringen Geschwindigkeiten und der geringeren Turbulenz der Dünung gegenüber der Windsee wesentliche Transportkapazität zur Verfügung steht ist fraglich. Gleiches gilt für die Drift (Abb. 44 +45), die noch geringere Geschwindigkeiten aufweist. Bemerkenswert sind aber die Phasen mit überwiegend oberdriftiger Dominanz.

An der Tnw-Linie setzt etwa eine Stunde nach Eintritt des Tideniedrigwassers Seegang ein, dessen Intensität gleichsinnig mit dem Wasserstand wächst. Etwa weitere zwei Stunden später ist offensichtlich die dominante höhenbegrenzende Wirkung der Wassertiefen nicht mehr gegeben: die Wellenhöhen, insbesondere die mittlere und signifikante, schwanken nur noch in geringem Maß um einen nahezu gleichbleibenden Wert. Bemerkenswert ist, daß eine leichte Abnahme der Wellenhöhen bereits vor dem Fallen der Wasserstände eintritt (Abb. 46). Die Perioden zeigen hingegen einen engeren Zusammenhang mit dem Wasserstandsverlauf (Abb. 47), was den Dünungscharakter des Seegangs unterstreicht. Die langperiodischen Wellen haben - offenbar aufgrund von Resonanz der einschwingenden Dünung mit dem Strand - größere Amplituden als auf dem Vorstrand (Abb. 49); die Perioden weisen etwa gleiche Größenordnungen auf (Abb. 50). Die Wellenangriffsrichtungen folgen hier bis etwa zur halben Ebbitide mit einem durch Refraktion erklärbareren rechtdrehenden Versatz der Entwicklung auf dem Vorstrand. Zeitgleich mit dem dort erkennbaren stärkeren Ausschlag folgt hier ein entgegengerichteter (Abb. 48).

Die gegenüber dem Vorstrand stärkeren Wechselwirkungen mit der Morphologie führen im Bereich der Tnw-Linie zu wesentlich höheren Strömungsgeschwindigkeiten, vor allem bei den küstennormalen Komponenten (Abb. 51), die auch die für Normaltiden erwartete aufländige Dominanz aufweisen, die in früheren Untersuchungen ursächlich mit nichtlinearen Effekten sich aufsteilender Wellen [LONGUET-HIGGINS 1953] gedeutet worden sind [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b]. Ein weiteres Indiz für die Richtigkeit dieser These ist die Tatsache, daß dieser Effekt nur bei der Gesamtheit der küstennormalen Komponenten auftritt, nicht aber bei den langperiodischen Anteilen (Abb. 52).

Auch die Drift weist hier höhere Geschwindigkeiten als auf dem Vorstrand auf (Abb. 53). Hierzu ist anzumerken, daß die hohen Geschwindigkeiten kurz nach oder vor dem Eintritt des Tnw durch den borenartigen Auf- und Ablaufschwall brechender Wellen erklärbar ist, wie bereits früher festgestellt [YU et al. 1991]. Für den Bereich höherer Wasserstände weist die Drift durchgängig eine leichte oberdriftige Tendenz aus. Den langperiodischen Anteilen ist wegen ihrer geringen Geschwindigkeiten (Abb. 54) keine besondere Bedeutung beizumessen.

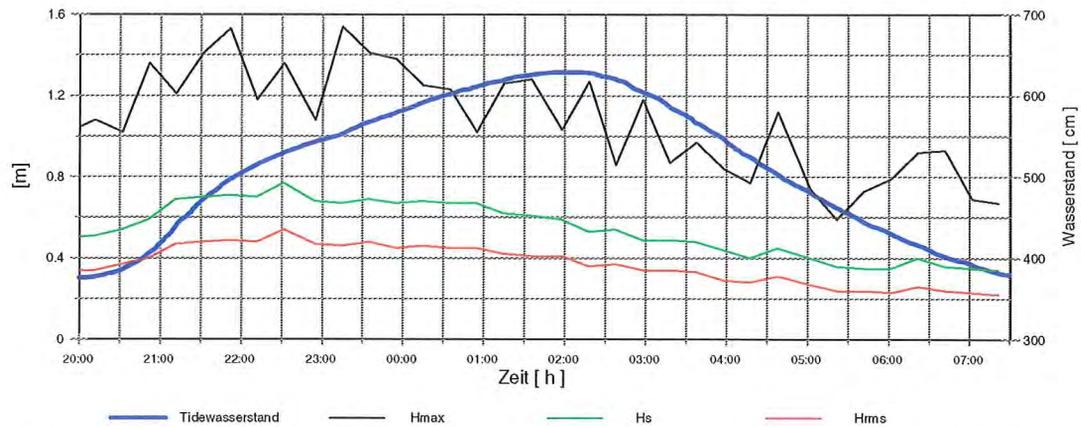


Abb. 37: Charakteristische Wellenhöhen des Seegangs auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

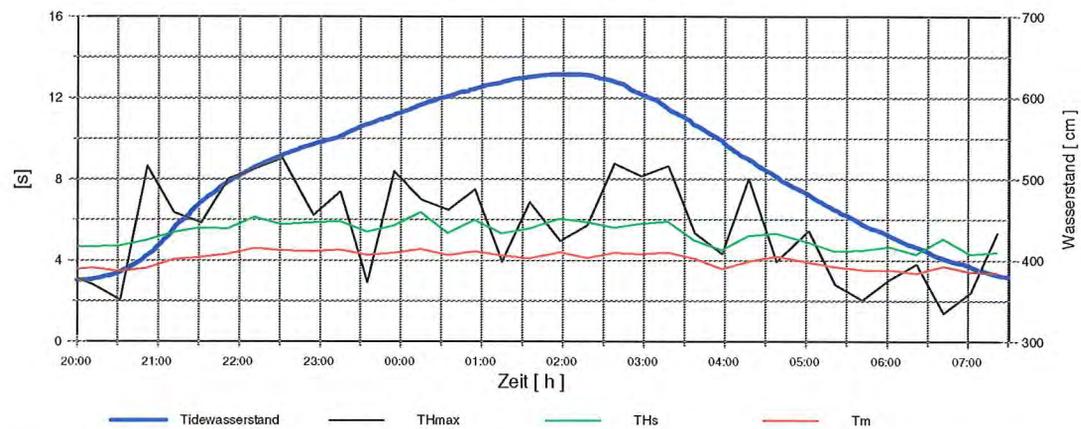


Abb. 38: Charakteristische Perioden des Seegangs auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

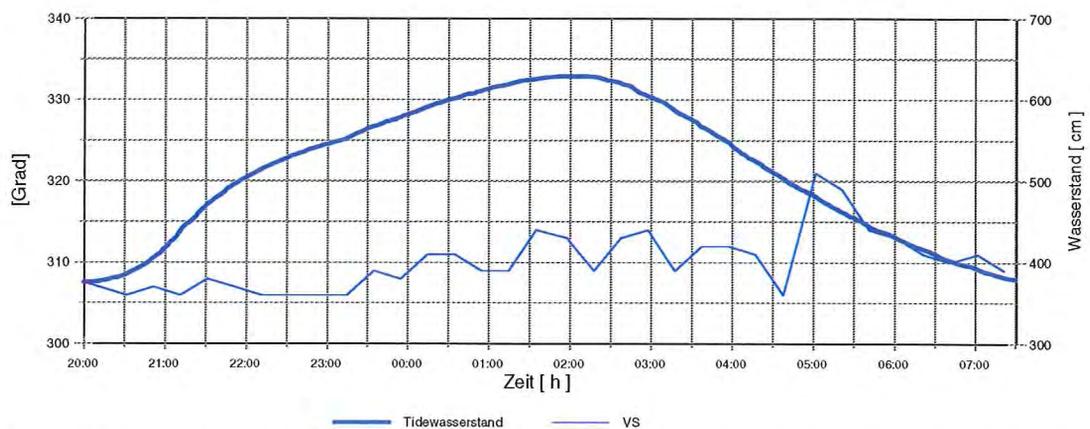


Abb. 39: Wellenanlaufrichtung des Seegangs auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

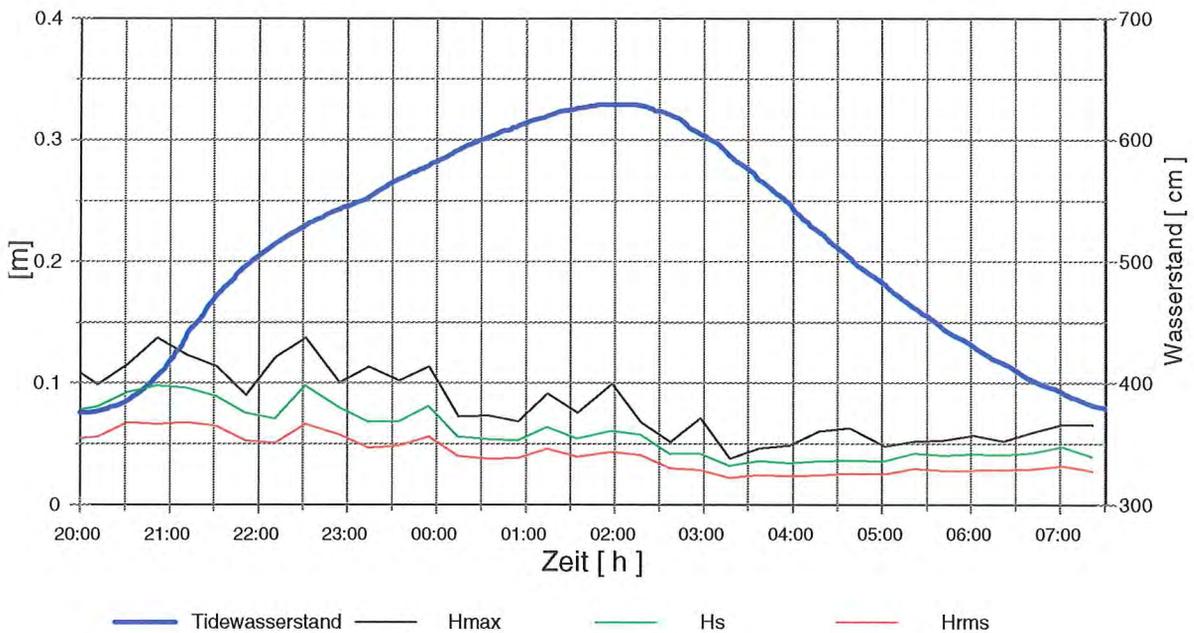


Abb. 40: Charakteristische Höhen langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

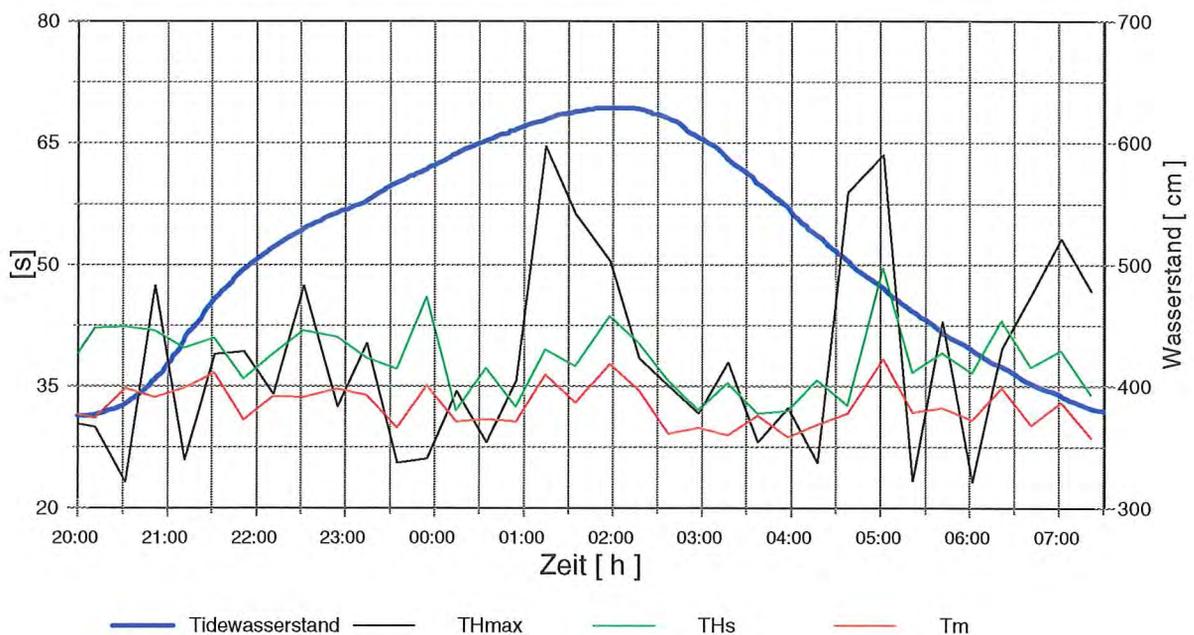


Abb. 41: Charakteristische Perioden auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

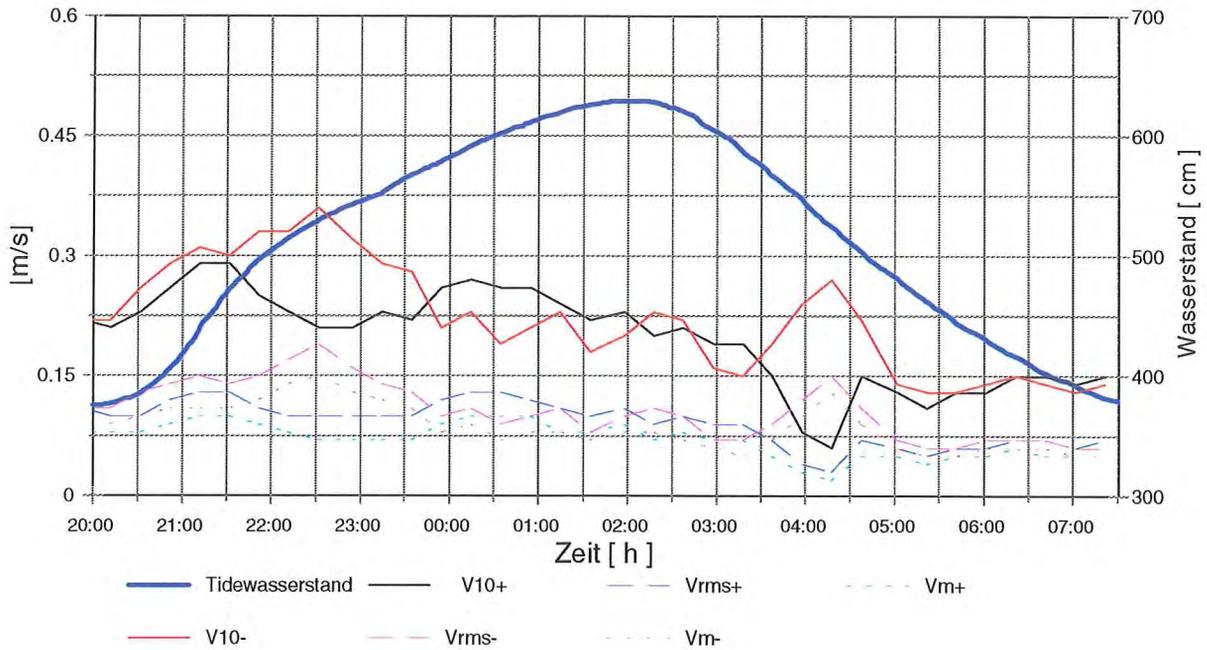


Abb. 42: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

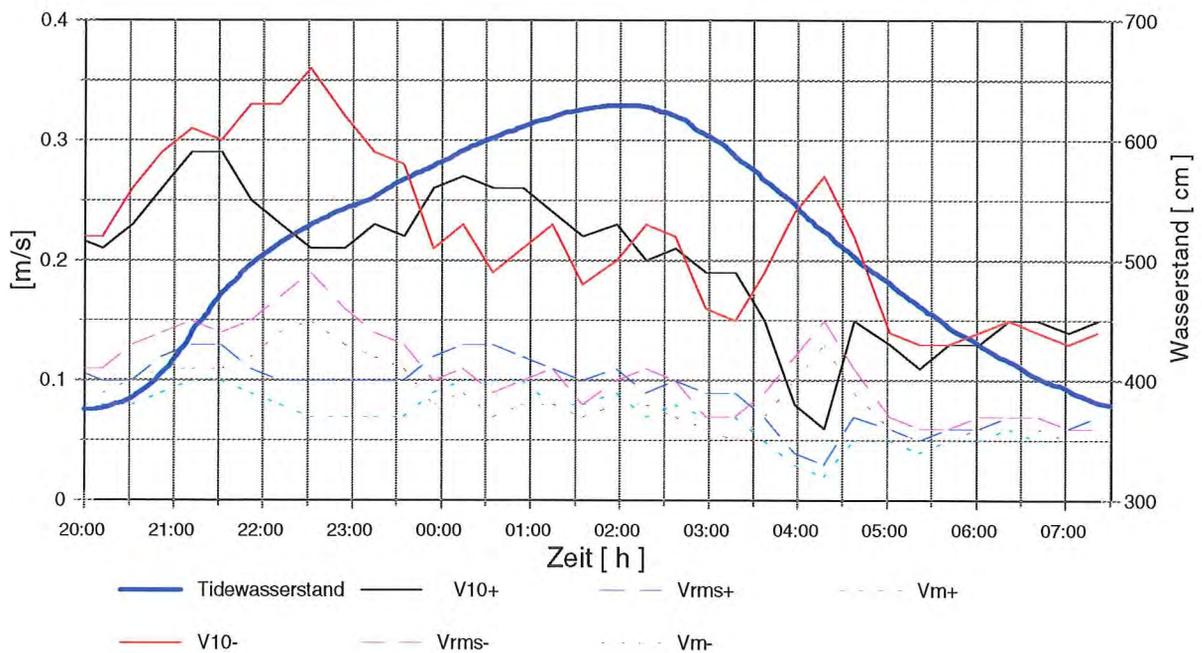


Abb. 43: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen im Infrabereich auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

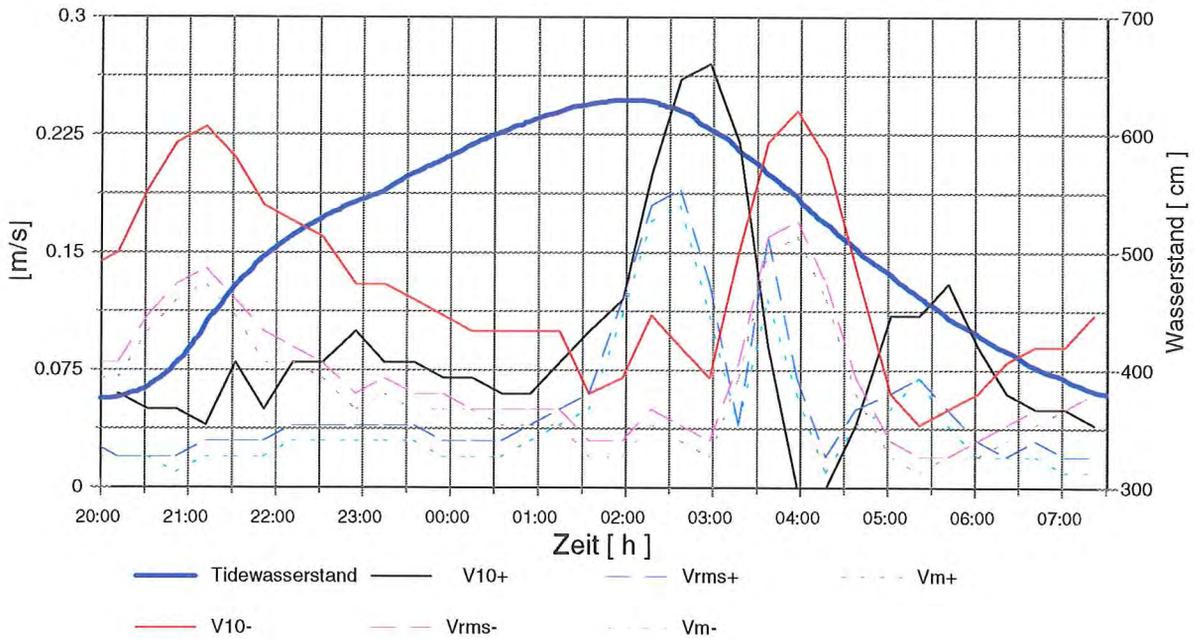


Abb. 44: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

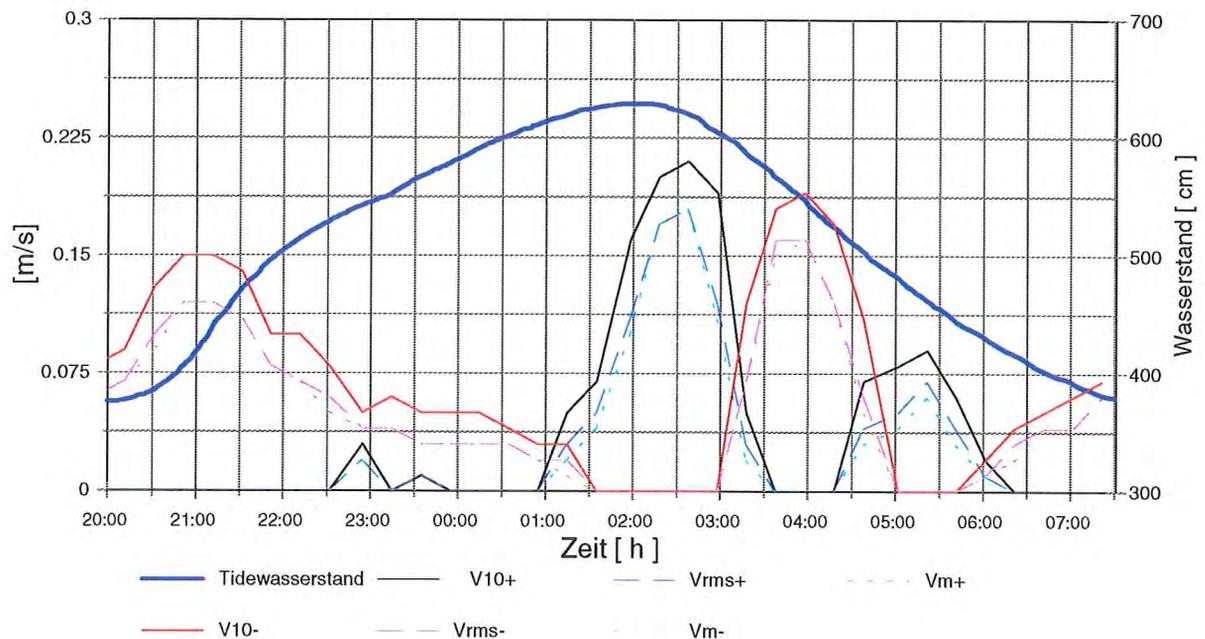


Abb. 45: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen im Infrabereich auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

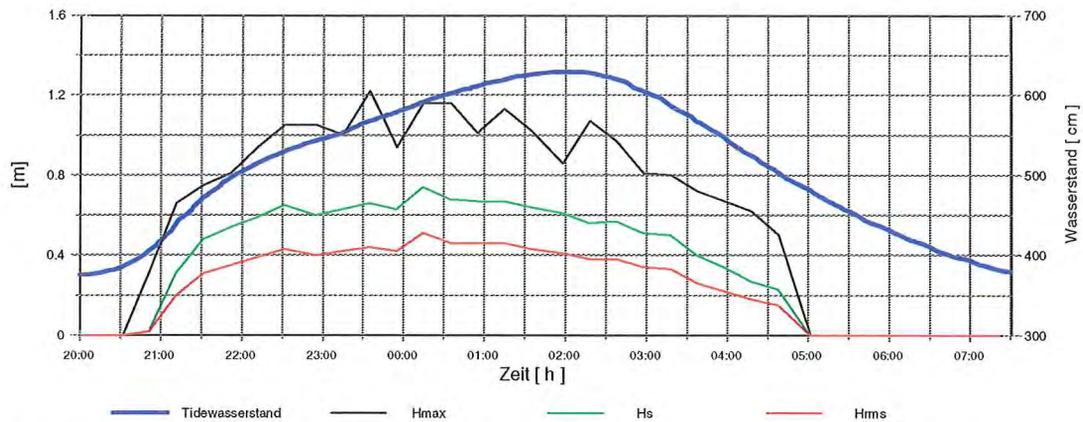


Abb. 46: Charakteristische Wellenhöhen des Seegangs im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

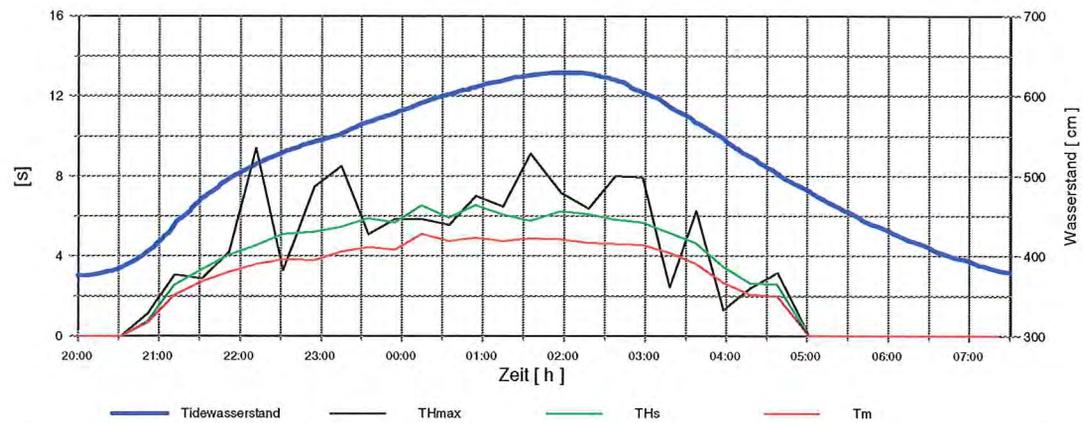


Abb. 47: Charakteristische Perioden des Seegangs im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

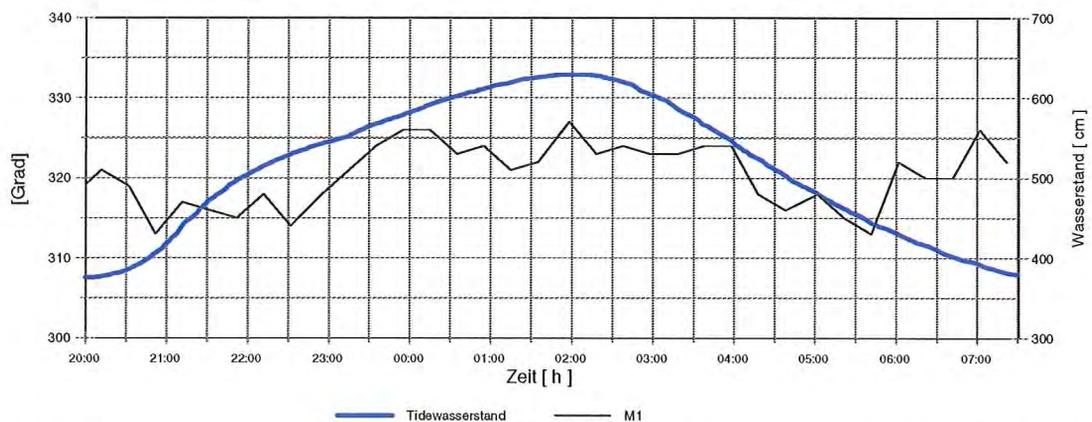


Abb. 48: Wellenanlaufichtung im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

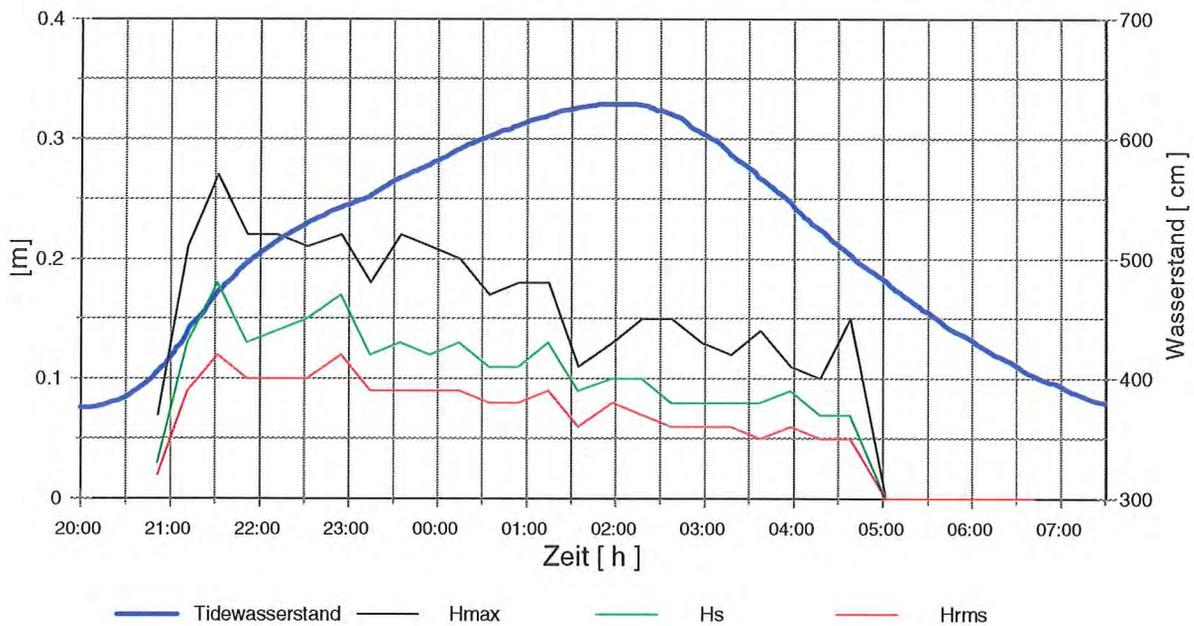


Abb. 49: Charakteristische Höhen langperiodischer Wellen im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

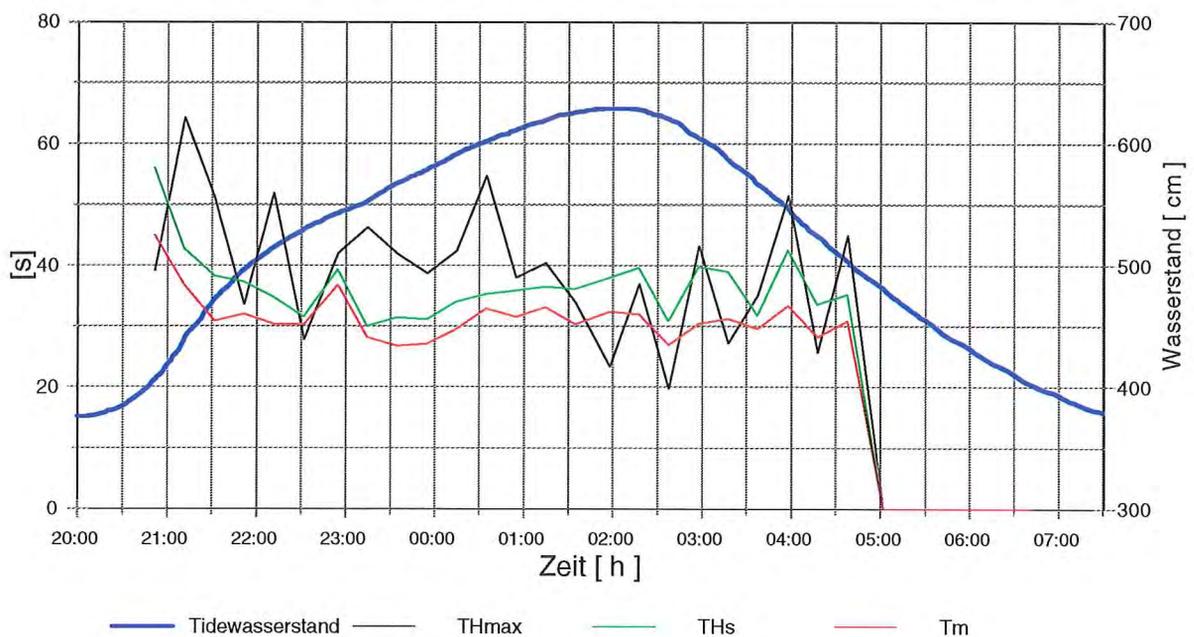


Abb. 50: Charakteristische Perioden im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

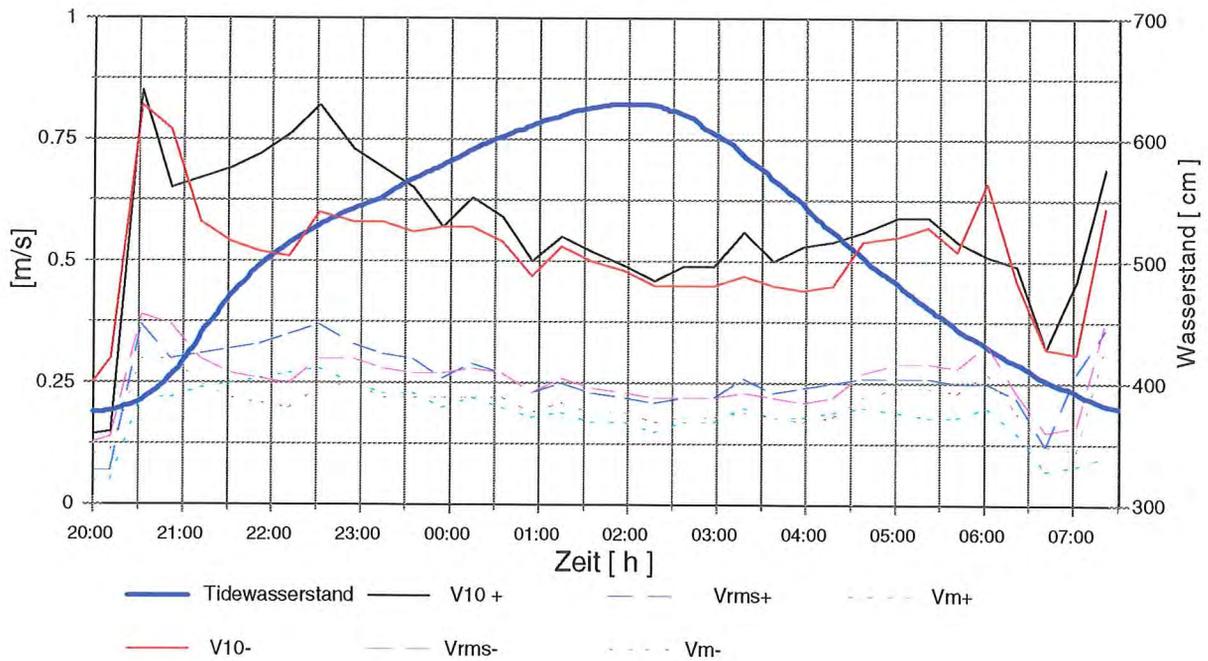


Abb. 51: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

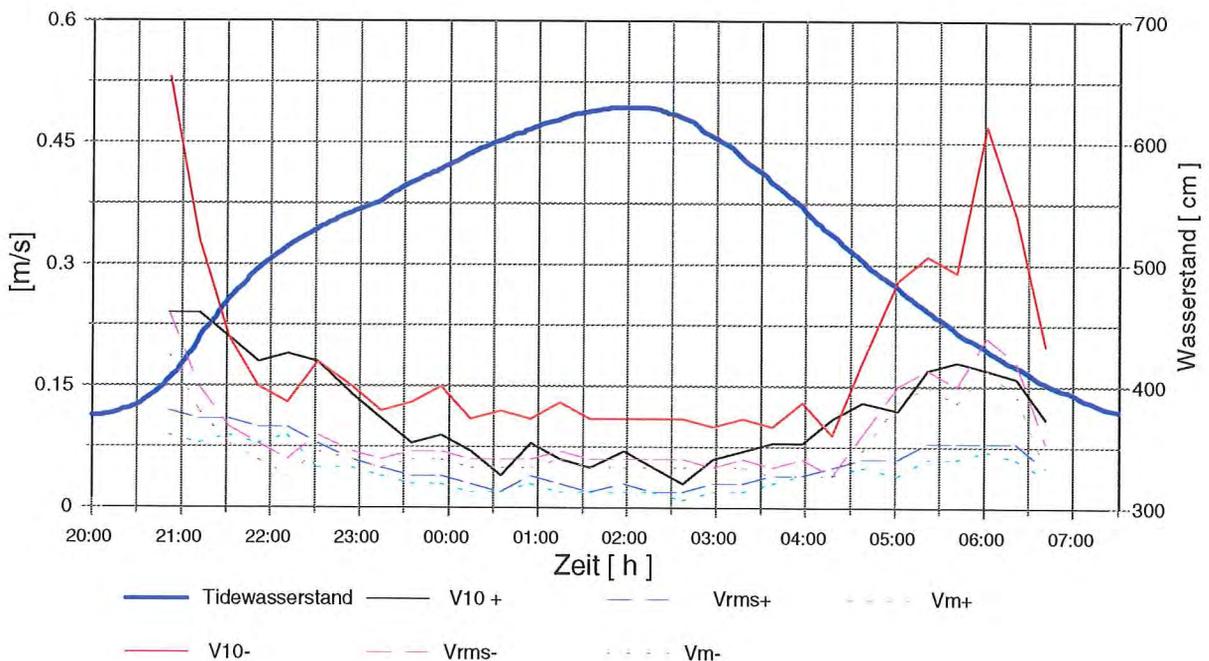


Abb. 52: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen im Infrabereich im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

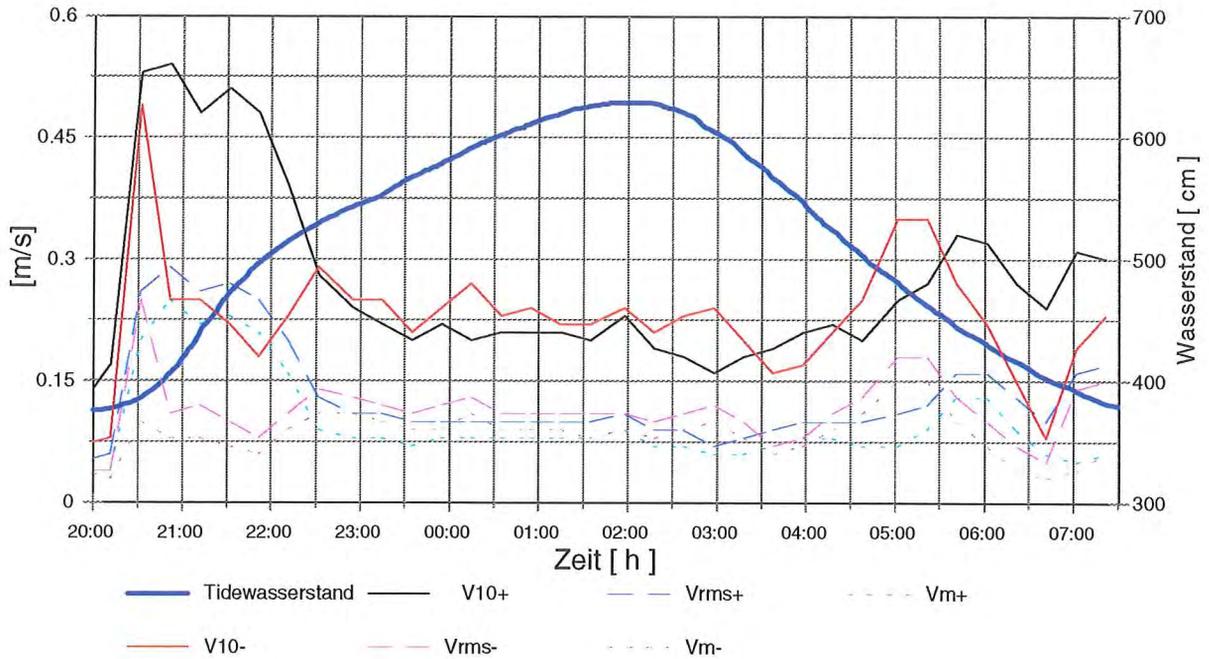


Abb. 53: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

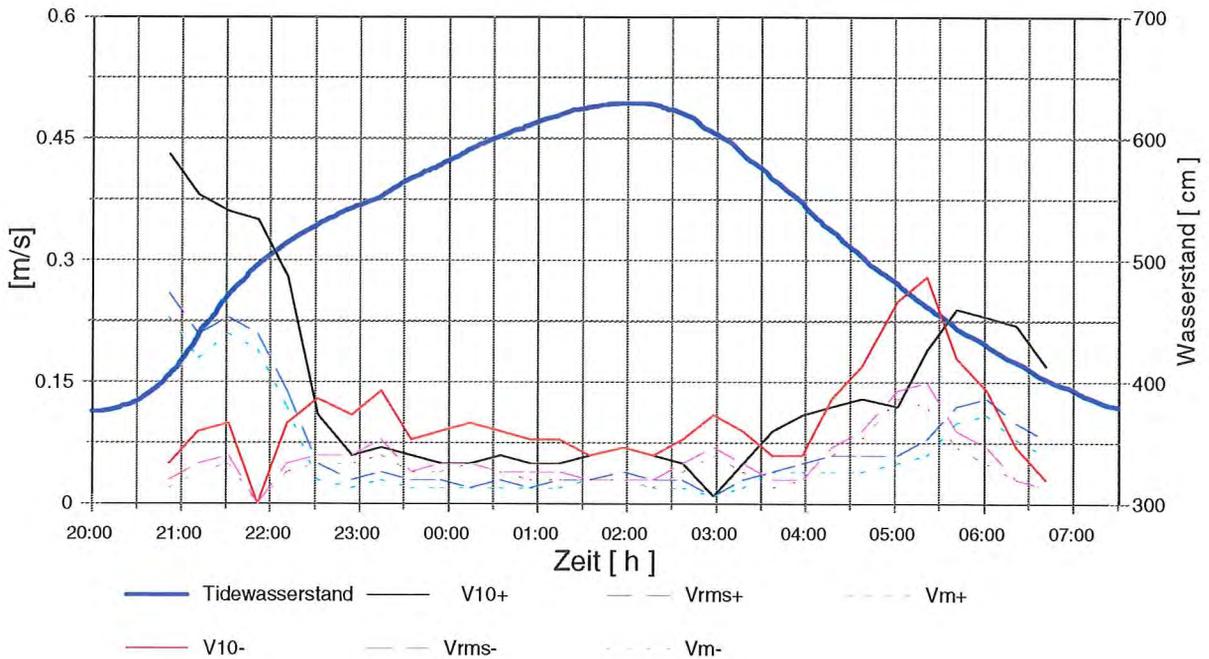


Abb. 54: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen im Infrarbereich im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Normaltide vom 23./24.09.1990)

5.2.2 Sturmflut

Am 21. 09. 1990 trat eine Sturmflut mit folgenden Scheitelwerten auf: $T_{nw} = PN + 492$ cm; $Thw = PN + 775$ cm; $T_{nw} = 559$ cm. Der Stau gegenüber einer mittleren Tide variierte somit von 116 cm über 158 cm beim Thw auf 183 cm. Der Wind kam anfänglich aus nordwestlicher Richtung mit Stärken von Beaufort 8 und drehte bis zum Thw-Eintritt auf westliche Richtungen unter Abschwächung auf Beaufort 7. Danach nahm die Stärke wiederum auf Beaufort 8 zu.

Auf dem Vorstrand folgte die Seegangsentwicklung dem Tidewasserstand mit unterschiedlicher Intensität: Die Wellenhöhen, insbesondere die maximalen mit einer Variation von weniger als 2 m bis etwa 4,6 m um den Eintritt des Thw, weisen einen deutlichen Bezug zum Wasserstandsverlauf aus (Abb. 55); die höhenbezogenen Perioden einen erheblich schwächeren Bezug zum Gang des Tidewasserstandes auf, wobei die Schwankungen des T_{Hmax} als typisch für den ausgeprägten stochastischen Charakter dieses Parameters anzusehen sind (Abb. 56). Die Wellenangriffsrichtung steigt bis etwa zur halben Tide von etwa 305° auf 310° , um danach bis etwa zum Eintritt des Thw bis auf etwa 300° zurückzugehen und anschließend bis zu 310° wieder zu steigen. Während diese Änderungen als Refraktion infolge wechselnder Wassertiefen zu erklären sind, ist der nachfolgende Rückgang im Fall auf etwa 300° nicht dadurch deutbar. Möglicherweise wirkt sich hier - zumindest mittelbar - das Rückdrehen des Windes aus (Abb. 57).

Die Analyse langperiodischer Wasserstandsschwankungen im Infrashwerebereich (Abb. 58 + 59) weist Erscheinungen mit mittleren Perioden um etwa 30 s aus, deren Höhe im Mittel bei etwa 0,25 m liegen; eine Korrelation mit den Tidewasserständen ist nicht erkennbar. Hieraus läßt sich vermuten, daß originäre Infrashwerewellen einschwingen und die beobachteten Phänomene nicht nur eine Folge des Auftretens von Wellengruppen sind, da der Seegang in seiner Intensität - insbesondere hinsichtlich der Höhenentwicklung - mit erhöhten Wasserständen zunimmt. Das höchste Drittel variiert nur geringfügig zwischen etwa 0,3 und knapp 0,5 m mit einer etwas höheren Periodizität als im Mittel. Von einer Ausnahme um den Eintritt des Thw mit einer Höhe von etwa 1 m abgesehen, die vermutlich auf Gruppen hoher Wellen zurückzuführen ist, weisen auch die Maximalwerte der Höhen keine ausgeprägten Veränderungen über die Tide auf. Auch die Schwankungen der Perioden der höchsten langperiodischen Wellen ist eher stochastischer Natur als an den Gang der Tide gekoppelt.

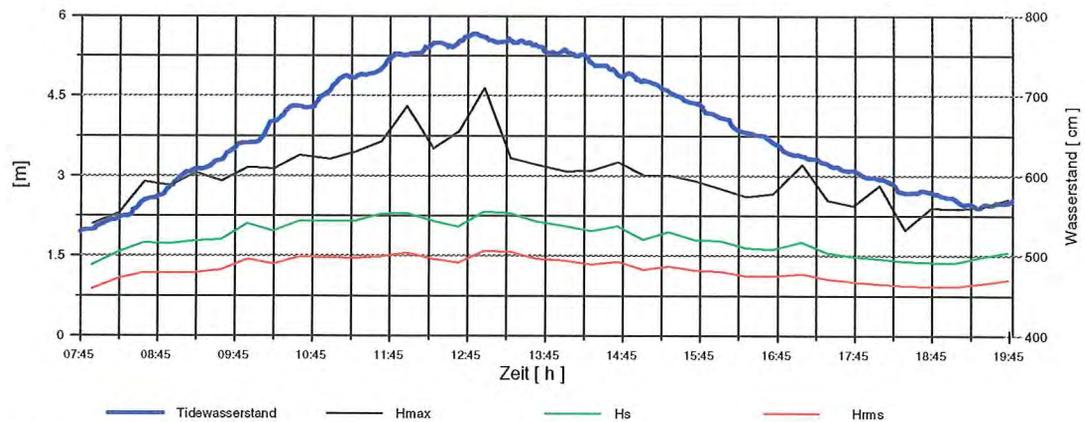


Abb. 55: Charakteristische Wellenhöhen des Seegangs auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

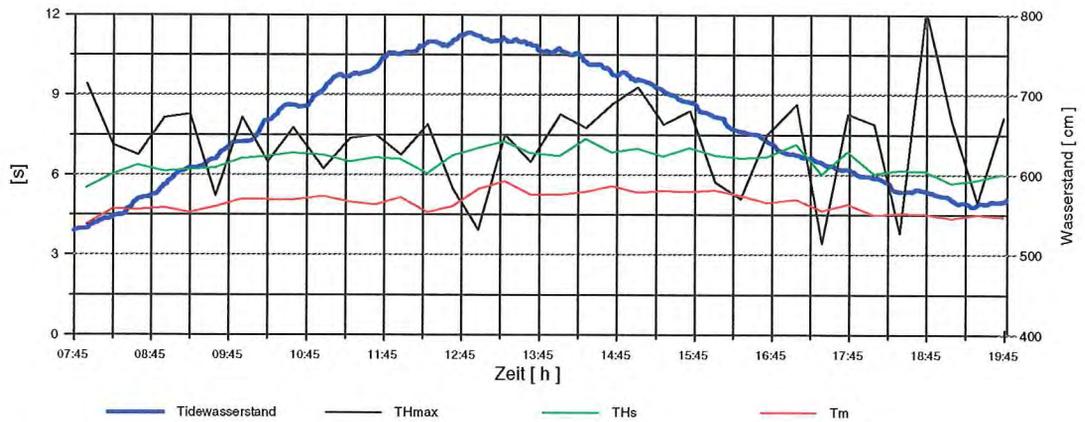


Abb. 56: Charakteristische Perioden des Seegangs auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

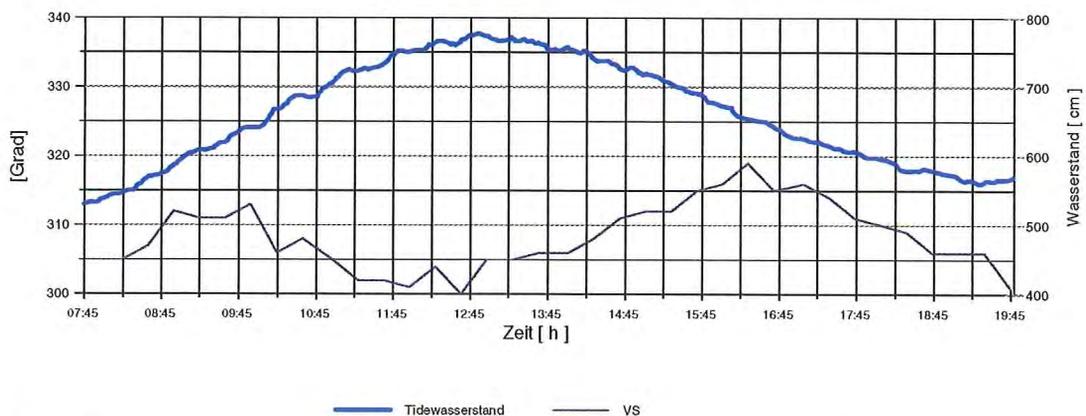


Abb. 57: Wellenanaufrichtung auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

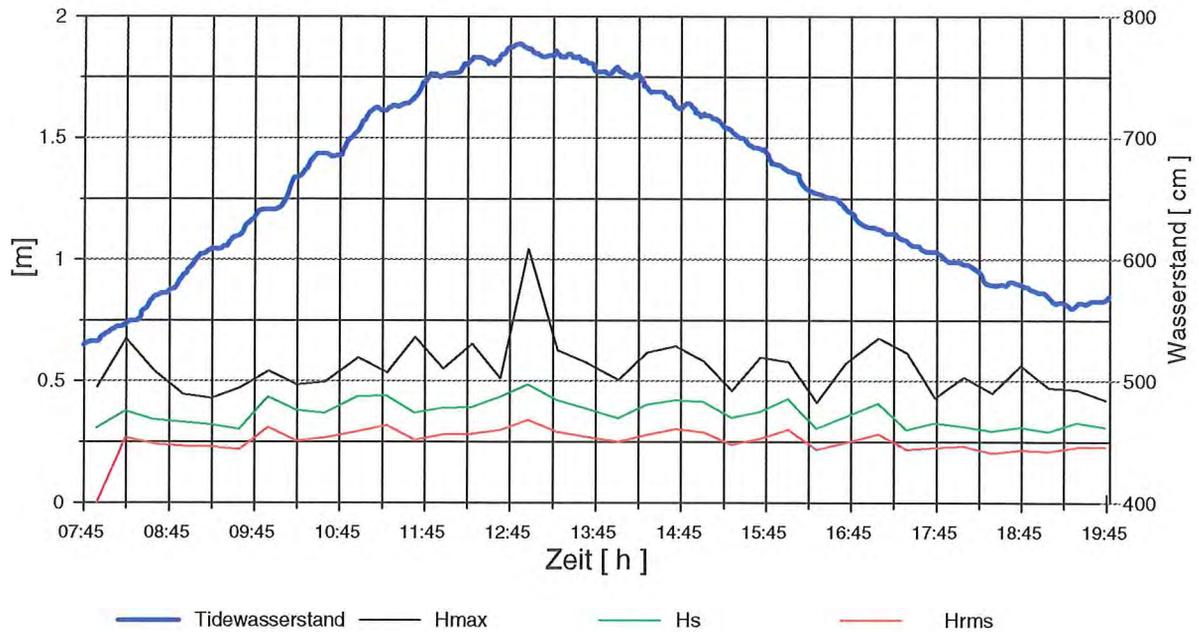


Abb. 58: Charakteristische Höhen langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

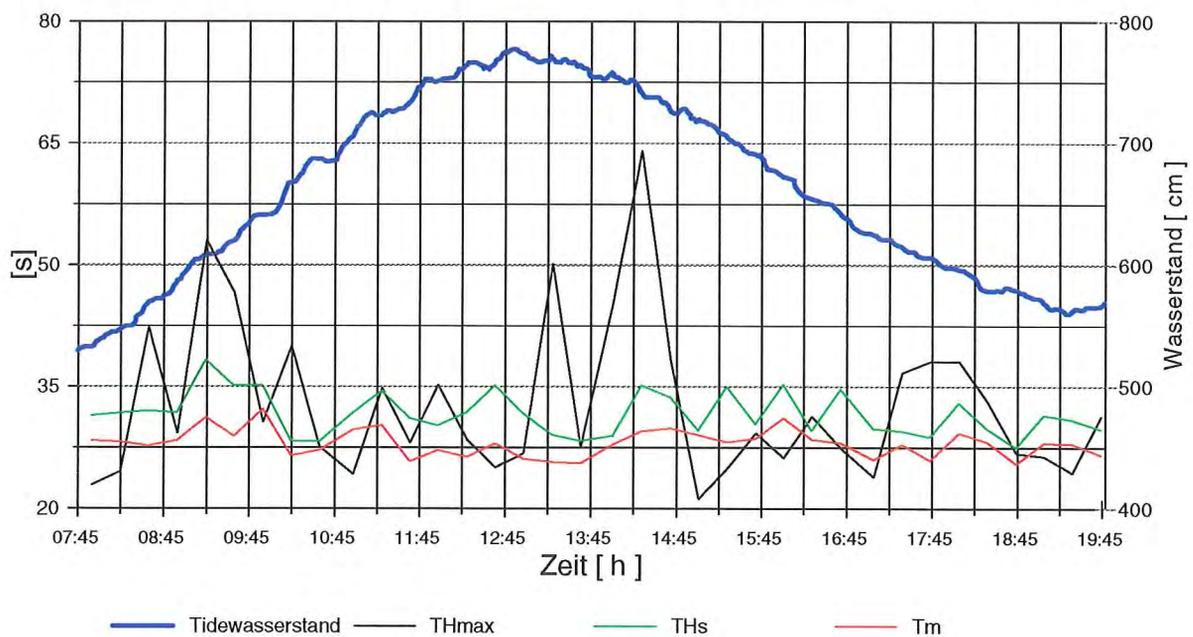


Abb. 59: Charakteristische Perioden auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

Auf dem Vorstrand sind die küstennormalen Strömungen etwa im Stieg bis und im Fall etwa nach halber Tide nahezu ausgeglichen (Abb. 60). Im Bereich der höchsten Wasserstände ist - insbesondere im Stieg - die auflandige Komponente stärker als die ablandige, was signifikant von Messungen bei Sturmfluten im Strandbereich abweicht [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b]. Auch die langperiodischen Anteile weisen für etwa den gleichen Zeitabschnitt eine Dominanz in aufländiger Richtung aus (Abb. 61), hieraus kann gefolgert werden, daß die langperiodischen Strömungen im wesentlichen nicht tidegeprägt sind.

Die küstenparallelen Komponenten weisen - von einem Peak für den Bereich des höheren Geschwindigkeitsspektrums abgesehen - eine klare unterdriftige Tendenz aus (Abb. 62). Die starke Kopplung an den Seegang wird durch die Zu- und Abnahme in Abhängigkeit von den Tidewasserständen deutlich. Die langperiodischen Anteile der Drift weisen diese Eigenschaften in noch stärkerem Maß aus (Abb. 63): Oberdriftige Strömungen treten nur kurzfristig mit relativ geringen Geschwindigkeiten auf und die Variation der Geschwindigkeiten weist eine analog enge Kopplung mit dem Verlauf der Tidewasserstände auf wie der Seegang.

Auf dem Strand im Bereich der Thw-Linie ist die Kopplung des Seegangs an die Tidewasserstände wegen der geringeren Wassertiefen naturgemäß enger als auf dem Vorstrand (Abb. 64 + 65): Die Wellenhöhen und auch die Perioden - mit Ausnahme des auch hier ausgeprägt stochastischen Parameters T_{Hmax} - nehmen etwa gleichsinnig mit den Tidewasserständen ab und zu. Ebenso ist die Wellenangriffsrichtung nahezu einheitlich bei etwa 320° (Abb. 66). vergleichbare Schwankungen - wie sie auf dem Vorstrand beobachtet wurden - treten hier nicht auf. Die Refraktion ist in diesem Bereich offenbar bereits so eingehend in die Richtung eingegangen, daß Wassertiefenänderungen von bis zu etwa 2,8 m keine nachhaltige Auswirkung auf die Wellenangriffsrichtung haben.

Die Wellenerscheinungen im Infrashwerebereich weisen nur für niedrigere Wasserstände im Stieg und Fall bei den Höhen eine schwache Korrelation mit dem Tidenverlauf auf (Abb. 67); für einige Stunden um den Eintritt des Thw ist - insbesondere für die mittleren und signifikanten Höhen - keine ausgeprägte Kopplung erkennbar. Einzelne Spitzen der Maximalwerte sind wahrscheinlich auf das Auftreten von Wellengruppen mit überdurchschnittlichen Höhen zurückzuführen. Diese Entkopplung von Wasserspiegelvariationen im Infrashwerebereich vom Verlauf der Tidewasserstände wird noch deutlicher für deren höhenbezogene Perioden (Abb. 68), die sich in ihren Größenordnungen nicht wesentlich von denen auf dem Vorstrand unterscheiden.

Die höheren Geschwindigkeitsbereiche der strandnormalen Strömungskomponenten (Abb. 69) lassen eine überwiegend auflandige Tendenz für den Bereich höherer Wasserstände erkennen, die mittleren Geschwindigkeiten sind ausgeglichen. Hierin könnte ein Gegensatz zu bisherigen Erkenntnissen über seegangsinduzierte Strömungen bei Sturmfluten [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b] liegen, wonach starke Trecker zu erheblicher Erosion auf Stränden führen. Lediglich im unteren Bereich des Stiegs überwiegen die ablandigen Komponenten. Eine Betrachtung der langperiodischen Anteile relativiert diese Betrachtung (Abb. 70): Für den gesamten Stieg und den Bereich um den Eintritt des Thw überwiegen die ablandigen Komponenten. Langperiodische Strö-

mungerscheinungen wie Trecker sind hinsichtlich der Transportfähigkeit aufgrund ihrer größeren Wirkdauer - insbesondere bei bereits mobilisierten, suspendierten Sedimenten - effektiver sind als hochfrequente. Von daher läßt sich auch aus den hier erfaßten Strömungen eine erodierende Wirkung von Sturmfluten im Quertransport herleiten.

Auch die Drift weist in der Gesamtheit (Abb. 71) als auch in den langperiodischen Anteilen (Abb. 72) eine ausgeprägte unterdriftige Tendenz aus, die im Gegensatz zum Quertransport zu einem Materialversatz führt, der als weitgehend irreversibel anzusehen ist, da - im Gegensatz zum Quertransport- der Längstransport auch bei Normaltiden einen gleichgerichteten Trend aufweist [HOMEIER 1976].

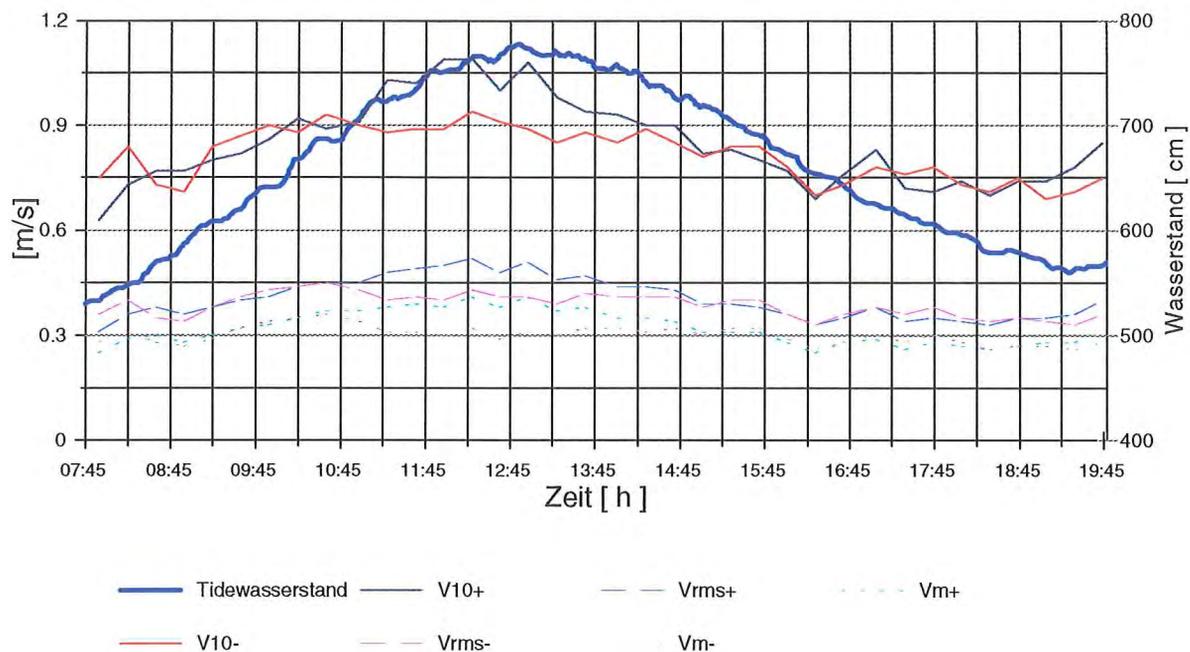


Abb. 60: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

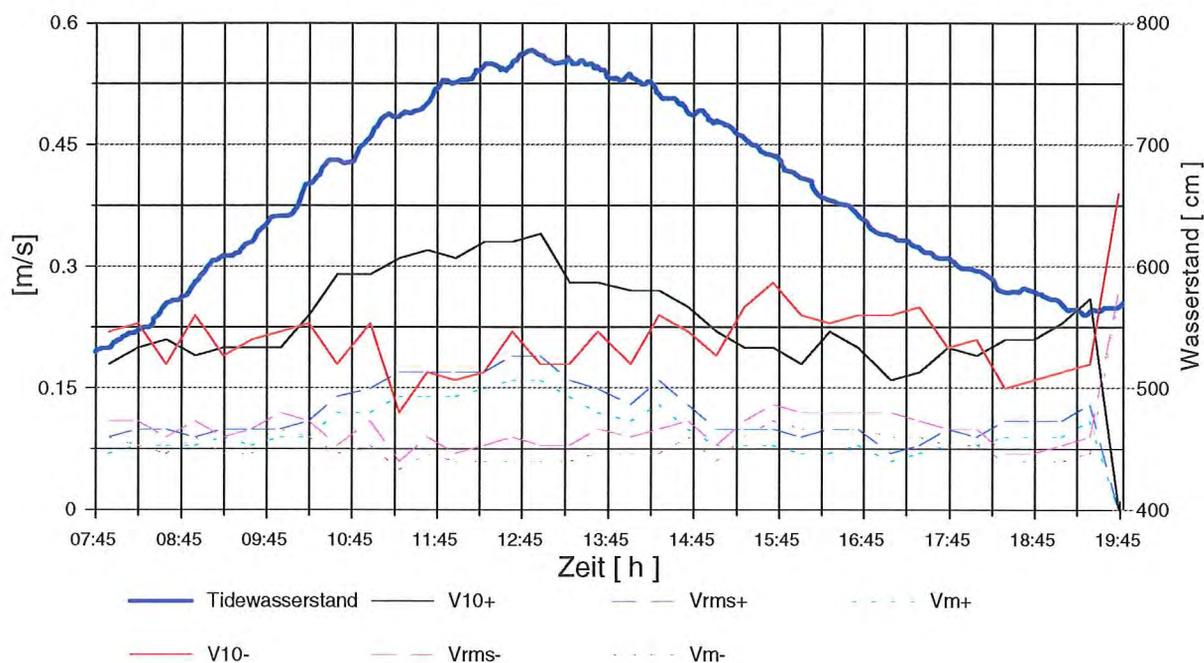


Abb. 61: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen im Infrashwerebereich auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

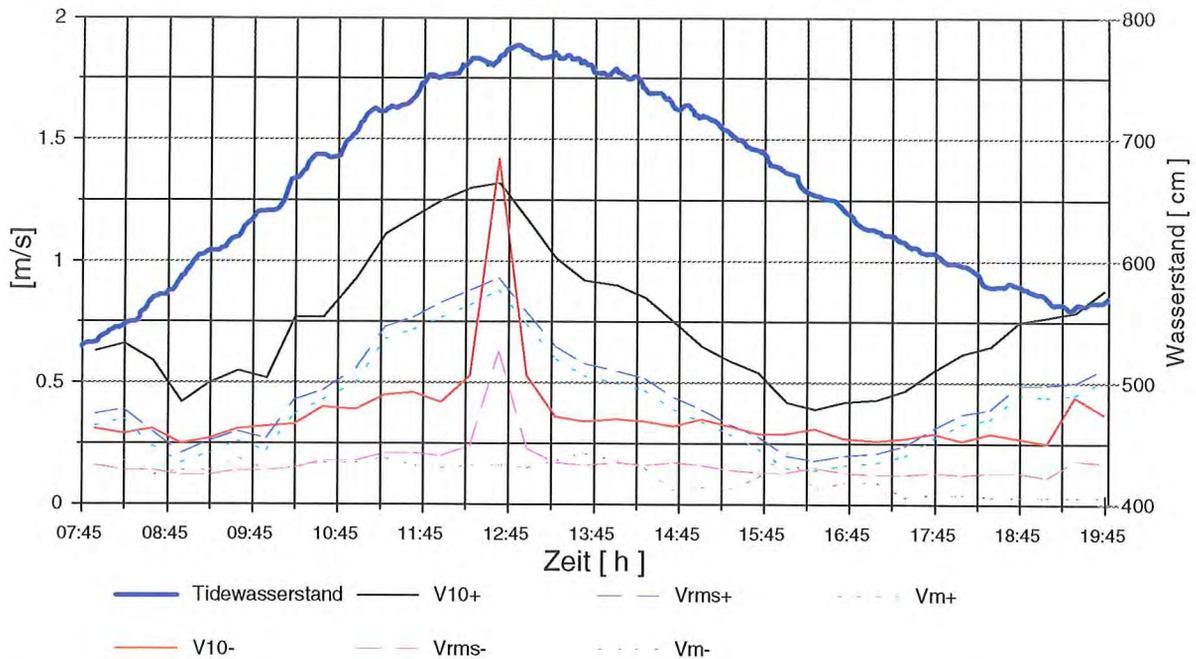


Abb. 62: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

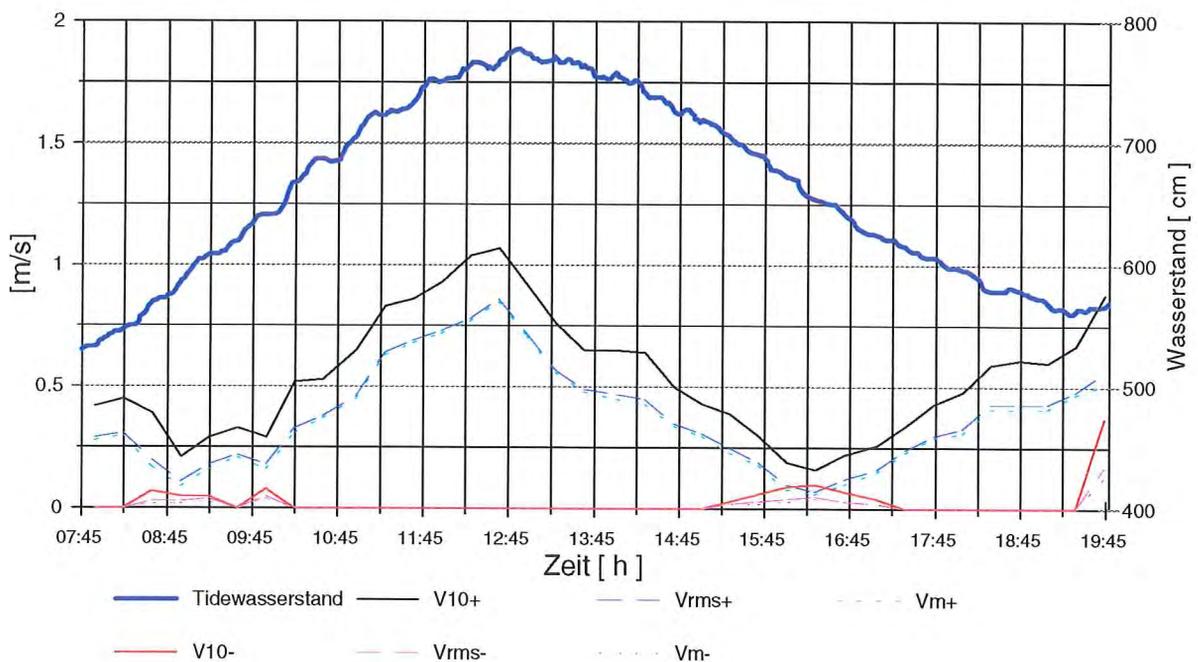


Abb. 63: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen im Infrabereich auf dem Vorstrand und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

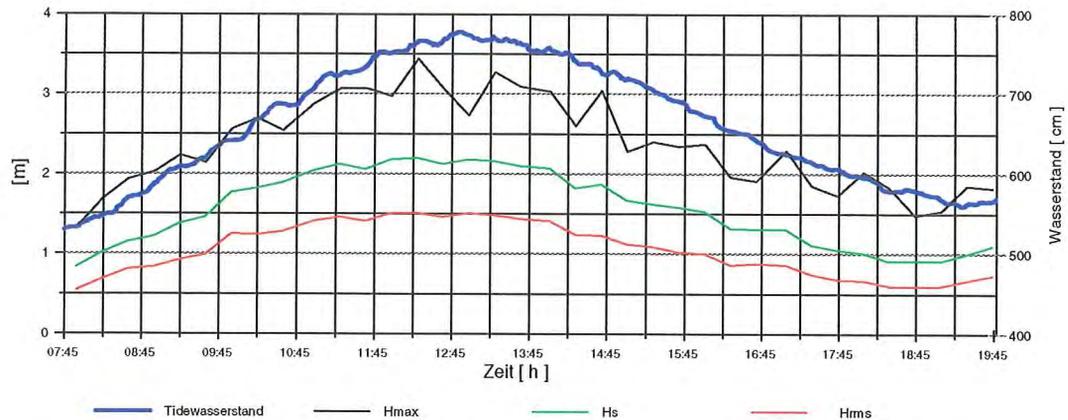


Abb. 64: Charakteristische Wellenhöhen des Seegangs im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

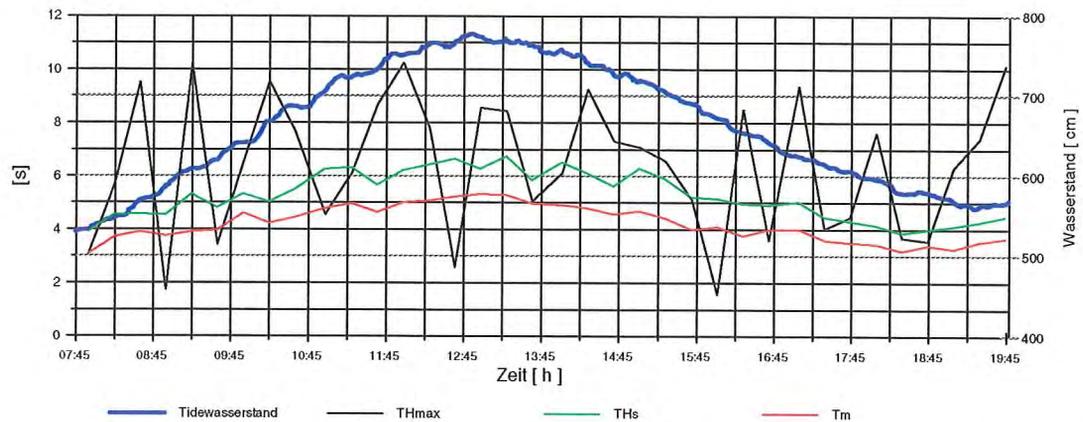


Abb. 65: Charakteristische Perioden des Seegangs im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

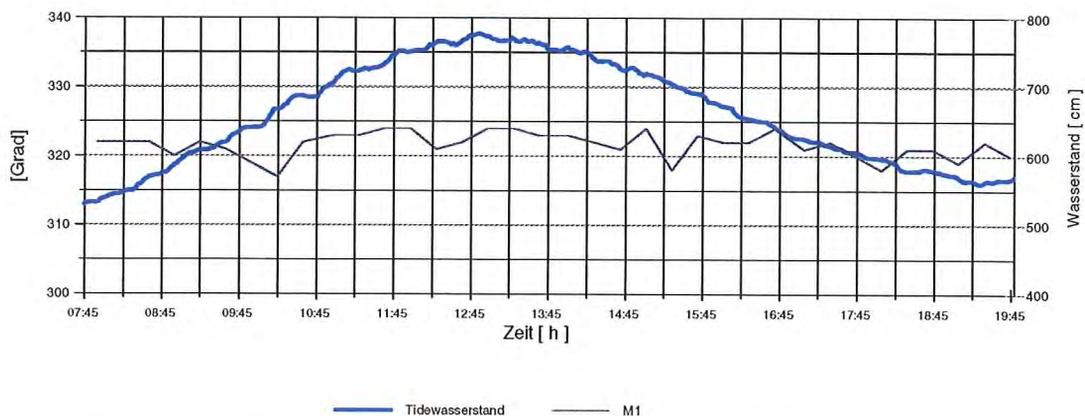


Abb. 66: Wellenanaufrichtung im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

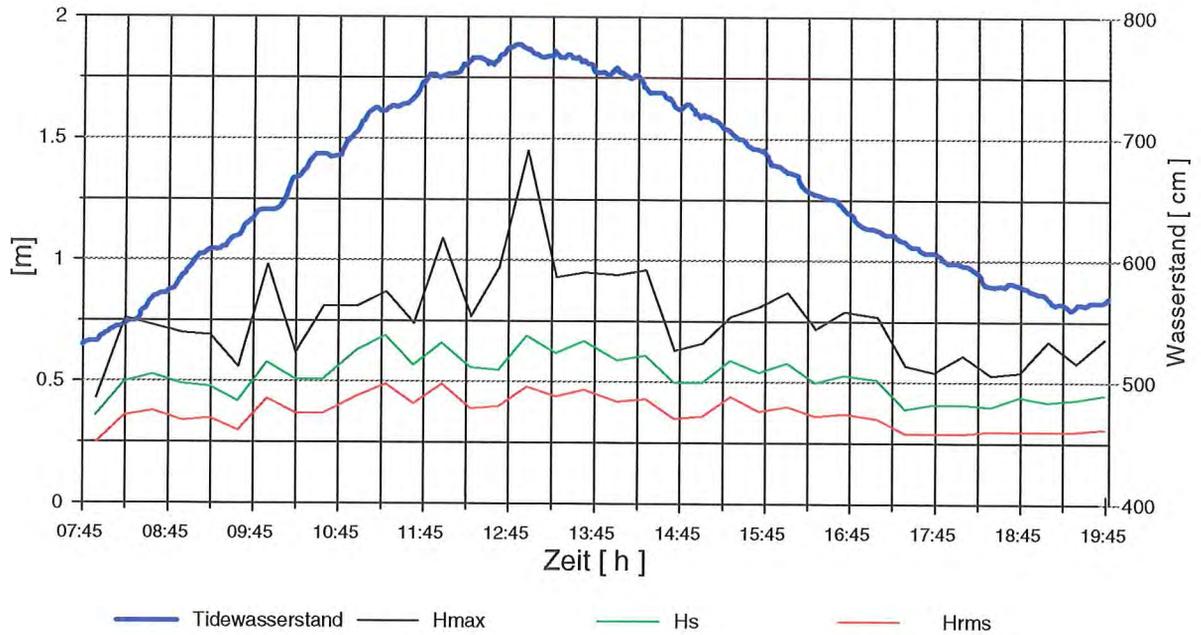


Abb. 67: Charakteristische Höhen langperiodischer Wellen im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

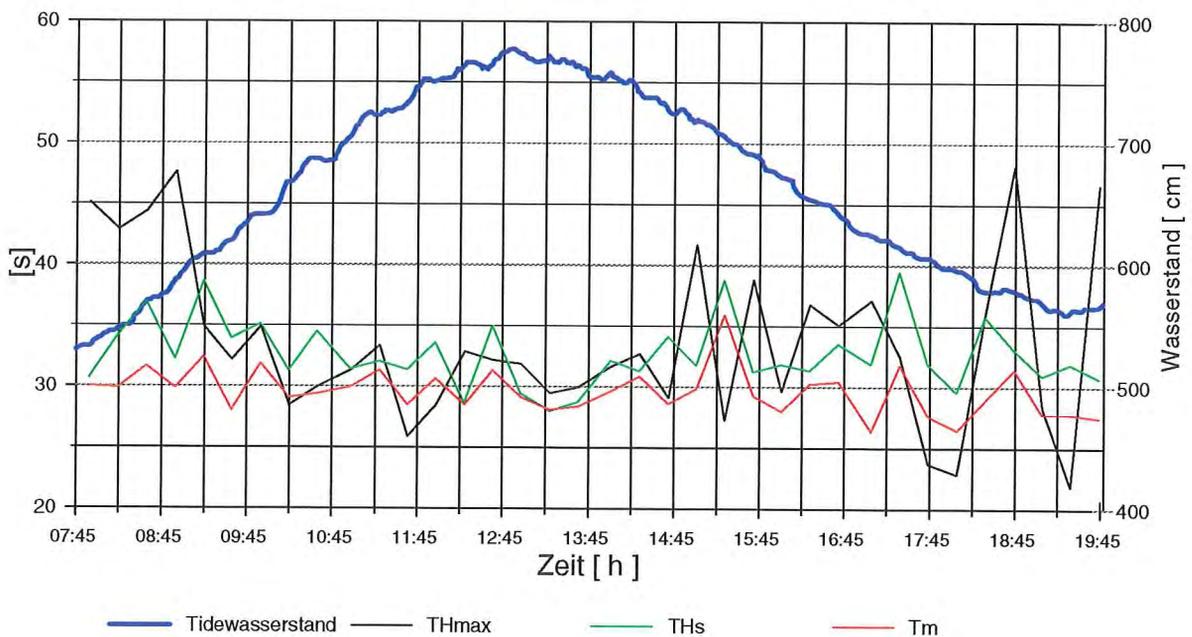


Abb. 68: Charakteristische Perioden im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

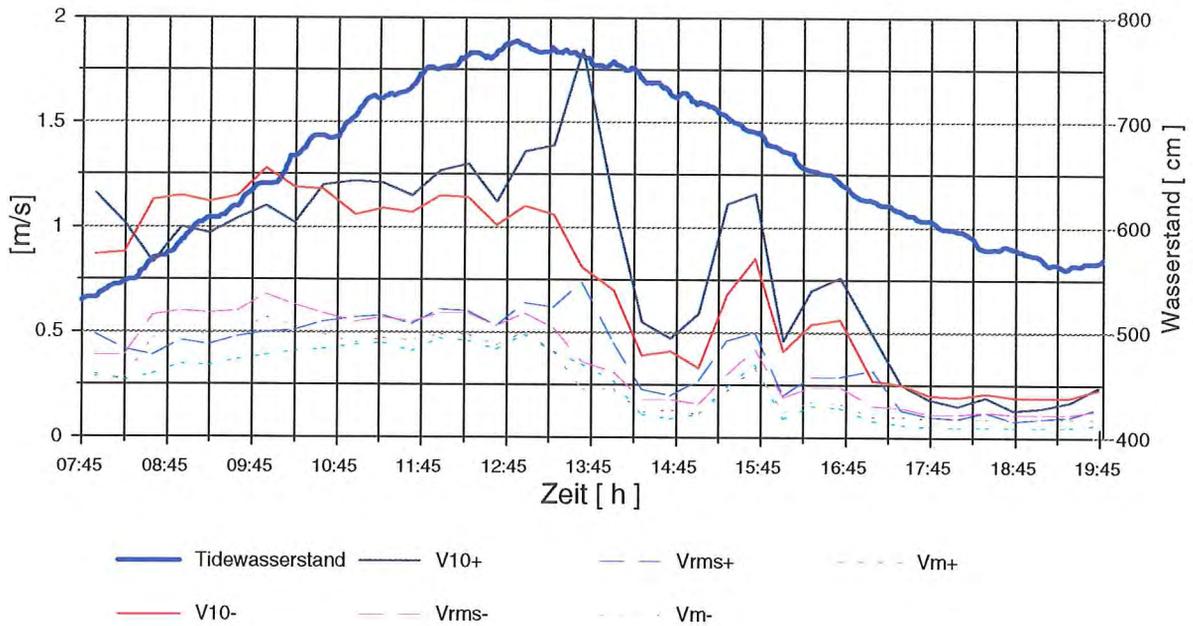


Abb. 69: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

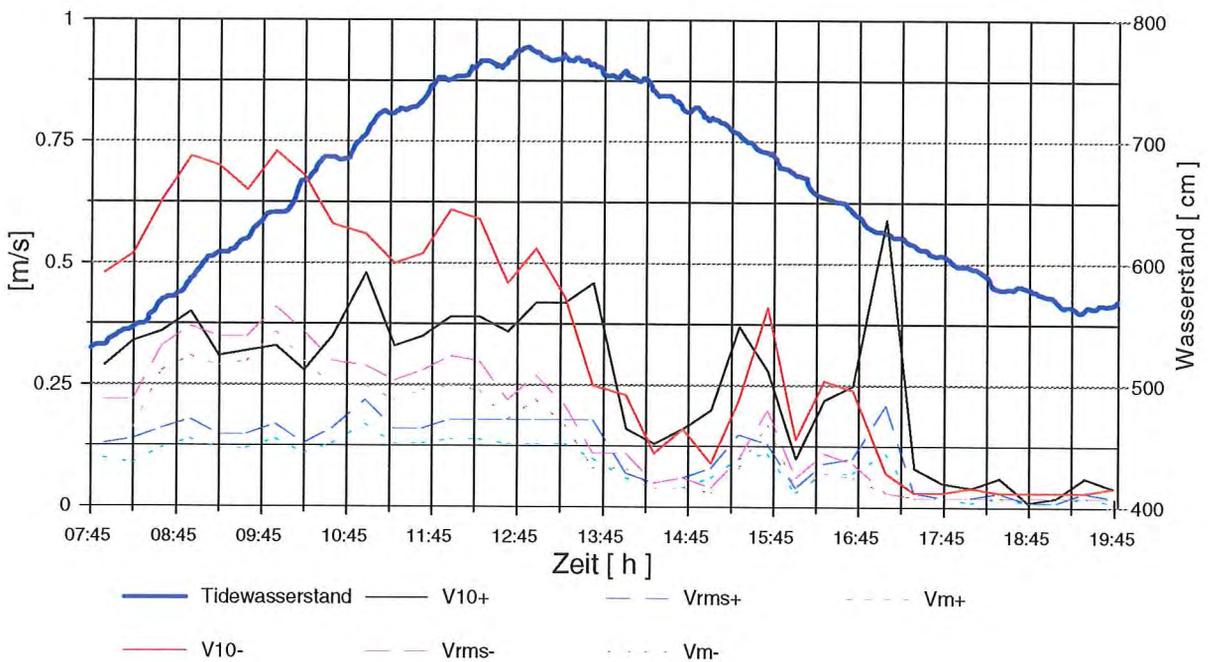


Abb. 70: Geschwindigkeiten küstennormaler Strömungen im Infrarotbereich im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

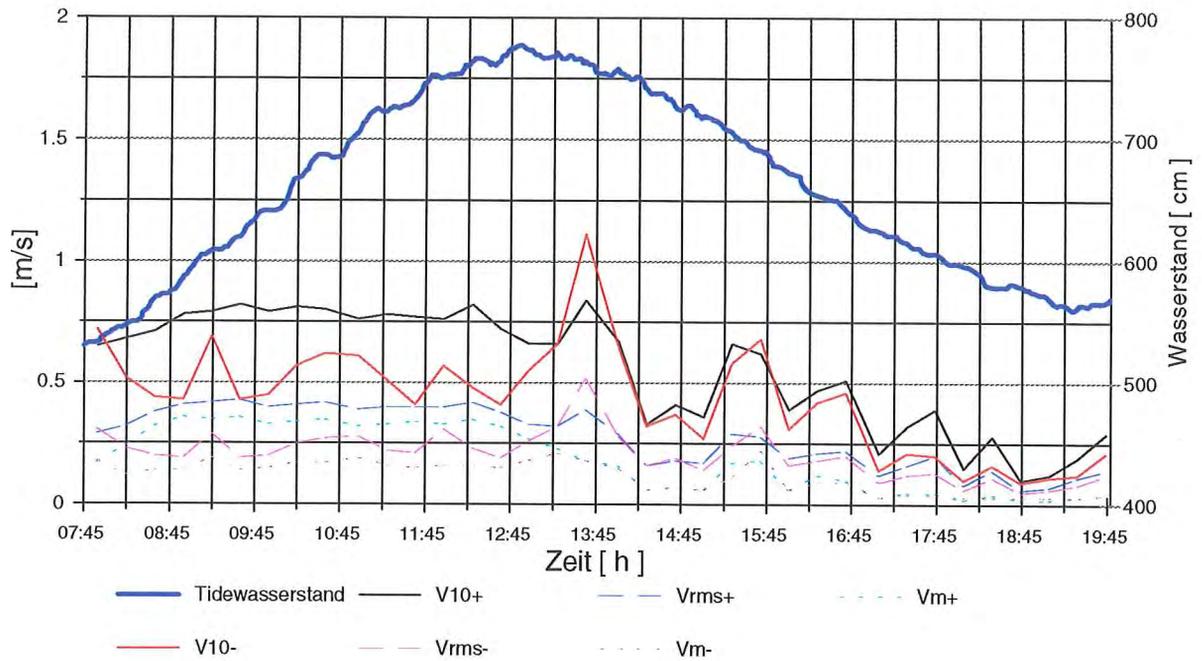


Abb. 71: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

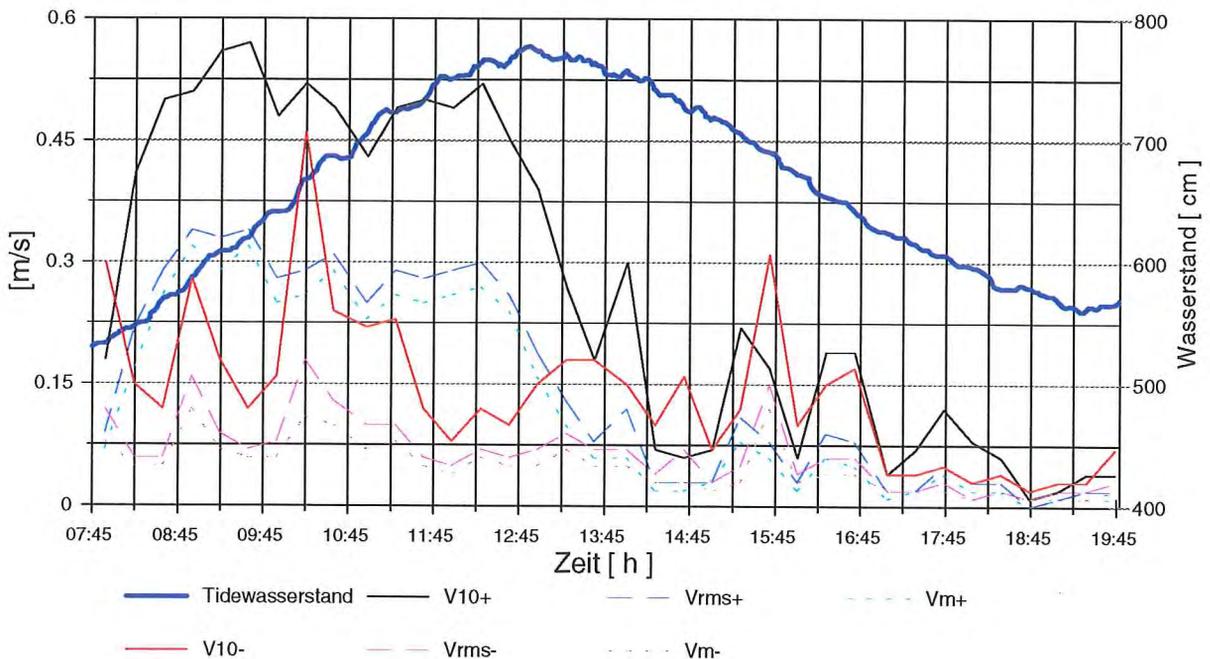


Abb. 72: Geschwindigkeiten küstenparalleler Strömungen im Infrarotbereich im Bereich der Tnw-Linie und Wasserstandsverlauf am Pegel Norderney-Riffgat (Sturmflut vom 21.09.1990)

5.3 Räumliche Variation von Seegang und Strömungen

5.3.1 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Normaltide

Der Seegang variiert in seinen Höhen zeitlich nur wenig, insbesondere nicht für die signifikanten und mittleren Wellenhöhen (Abb. 73 - 75). Dies ist für Dünung typisch; die Länge der Perioden (Abb. 76 - 78) läßt - ebenso wie die Wellenhöhen - als Hauptsystem junge Dünung vermuten. Überlagerungseffekte mit älteren Systemen bewirken die erkennbare Variation der maximalen Wellenhöhen und zugehörigen Perioden. Die Wellenhöhen auf dem Vorstrand und an den Strandstationen M_1 und M_3 unterscheiden sich nur geringfügig; die an der Station M_2 sind hingegen deutlich niedriger (Abb. 73). Hier bewirkt die Brandung eine scheinbare Anomalie, die typisch für die Höhenentwicklung des Seegangs in Wechselwirkung mit der Strandmorphologie ist. Nach Erreichen des kritischen Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnisses und/oder der kritischen Wellensteilheit brechen die einschwingenden Wellen, regenerieren anschließend und steilen bei abnehmender Wassertiefe infolge Shoaling unter Zunahme der Höhen bis zum erneuten und hier endgültigen Branden. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich strandnormal verlagert bei den Stationen O_1 , O_2 und O_3 (Abb. 75); hier setzt das Branden erst nach Passieren der mittleren Station O_2 ein. Die Variation der Perioden T_{Hmax} geht einher mit derjenigen der maximalen Wellenhöhen und nimmt natürlicherweise im Brandungsbereich zu. Die signifikanten und mittleren Perioden weisen nur geringe räumliche Veränderungen auf; es treten aber ähnliche Zu- und Abnahmen über die Strandnormalen auf (Abb. 76 - 78), wie sie brandungsbedingt auch bei den Wellenhöhen zu erkennen sind.

Die langperiodischen Erscheinungen auf dem Vorstrand sind nur gering ausgeprägt mit Höhen von durchweg weniger als ein dm (Abb. 79); eine Identifizierung hinsichtlich der Ursache ist auf dieser Grundlage nicht möglich. In Abhängigkeit vom jeweiligen aus der Höhenentwicklung des Seegangs (Abb. 73) herleitbaren Brandungsgeschehens wechselt die Intensität im Strandbereich in der Mitte des Bühnenfeldes (Abb. 79). In den westlichen und östlichen Bereichen des Bühnenfeldes sind hingegen keine derart ausgeprägten Analogien zum Seegang erkennbar (Abb. 80 + 81). Im westlichen Bereich sind die Absolutwerte der Höhen zudem geringer als im mittleren und östlichen. Dies ist durch unterschiedliche Strandhöhen erklärbar, die durch im Bühnenfeld umlaufende Strömungen entstehen [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b] und zu einem unterschiedlichen Brandungsverhalten des Seegangs führen. Von daher ist es plausibel, daß die auf dem Strand auftretenden langperiodischen Effekte brandungsbedingt sind und nicht primär von Wellengruppeneffekten herrühren. Die Perioden liegen mit Bandbreiten von 20 s bis 50 s (Abb. 82 - 84) in einem typischen Bereich für Infrarotwellen.

Die küstennormalen Komponenten der Strömungen weisen in ihrer Gesamtheit eine auflandige Tendenz im gesamten Bühnenfeld mit zunehmender Intensität im östlichen Teil aus. Die auftretenden Geschwindigkeiten sind dabei durchaus als transportwirksam einzustufen (Abb. 85 - 93). Hier zeigt sich wiederum die bereits früher erkannte Tendenz zu einem auflandigen Transport bei Normaltiden [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b]. Bei den langperiodischen Komponenten ist der Trend hingegen uneinheitlicher, wengleich an den meisten Stationen die ablandige Tendenz vorherrscht

(Abb. 94 - 102). Allerdings sind die Geschwindigkeiten so gering, daß eine wesentliche Transportwirksamkeit nur bei Brandung und resultierender Suspension vorliegen dürfte. Auf jeden Fall sind damit die Transportwege auf den Strandbereich begrenzt.

Überraschend ist, daß für die Drift entweder ausgeglichene Verhältnisse oder eine oberdriftige Tendenz vorliegt (Abb. 103 - 111). Zumindest für die hier untersuchte Normaltide kann daher nicht der Nachweis geführt werden, daß unterdriftig gerichtete Strömungen bei Normaltiden Ursache des kontinuierlichen Strandabtrages sind. Die langperiodischen Komponenten geben keinen eindeutigen Hinweis auf das vorherrschende Transportgeschehen (Abb. 112 - 120); die zugehörigen Geschwindigkeiten weisen zudem eine geringe Transportkapazität aus.

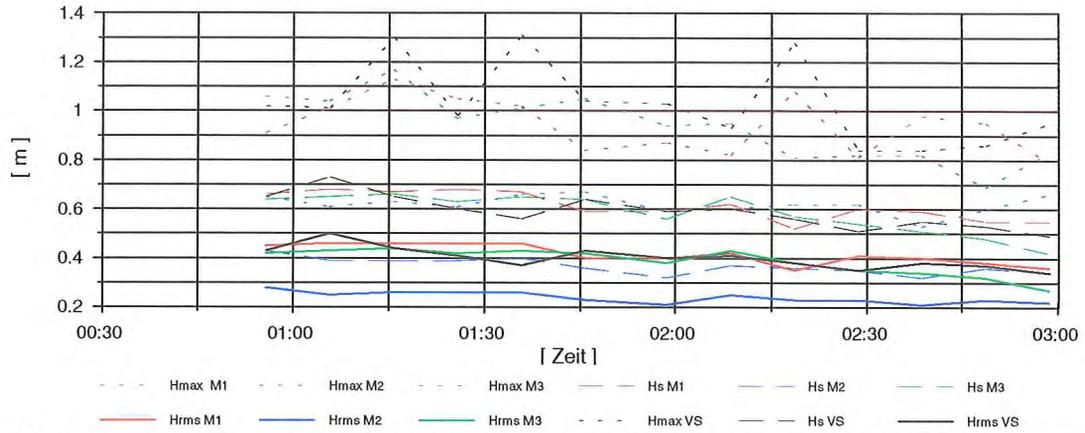


Abb. 73: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

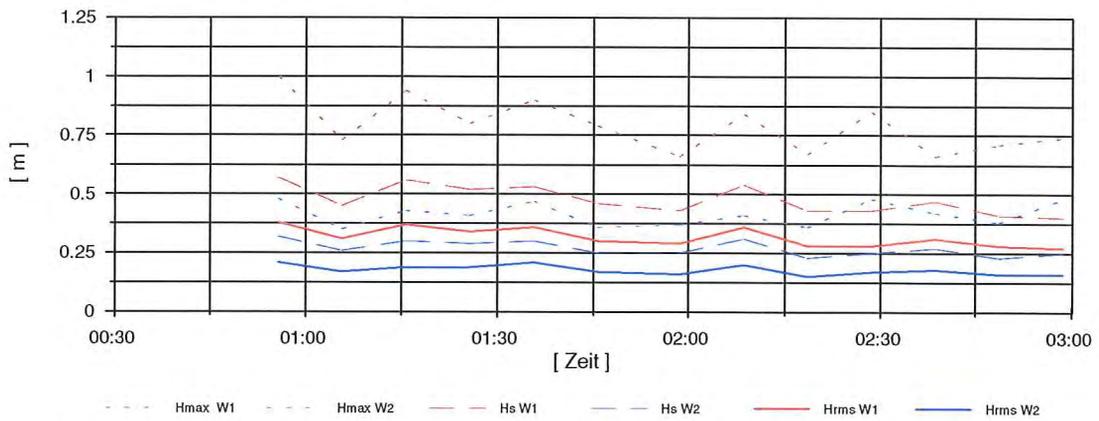


Abb. 74: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

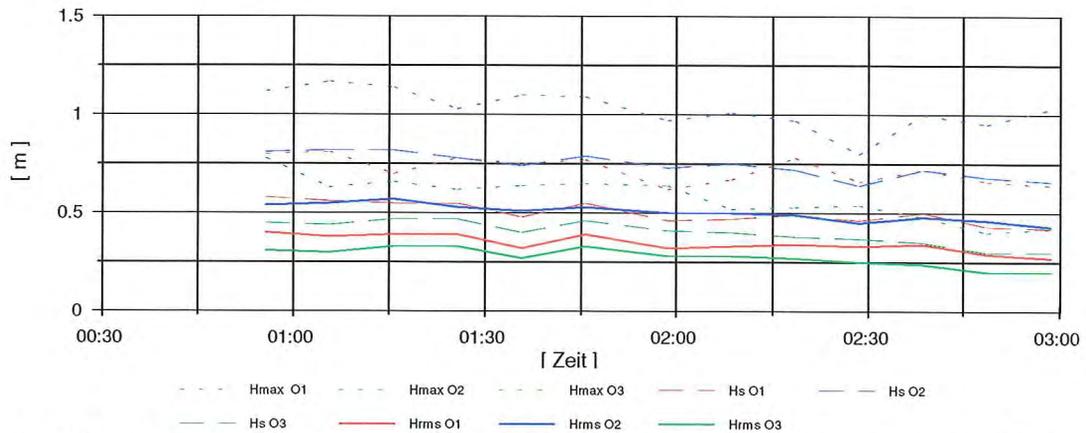


Abb. 75: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

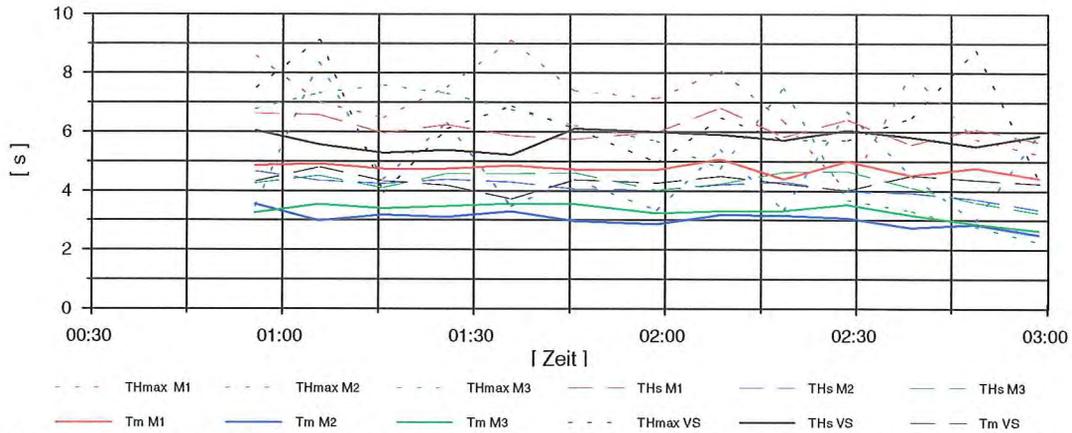


Abb. 76: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

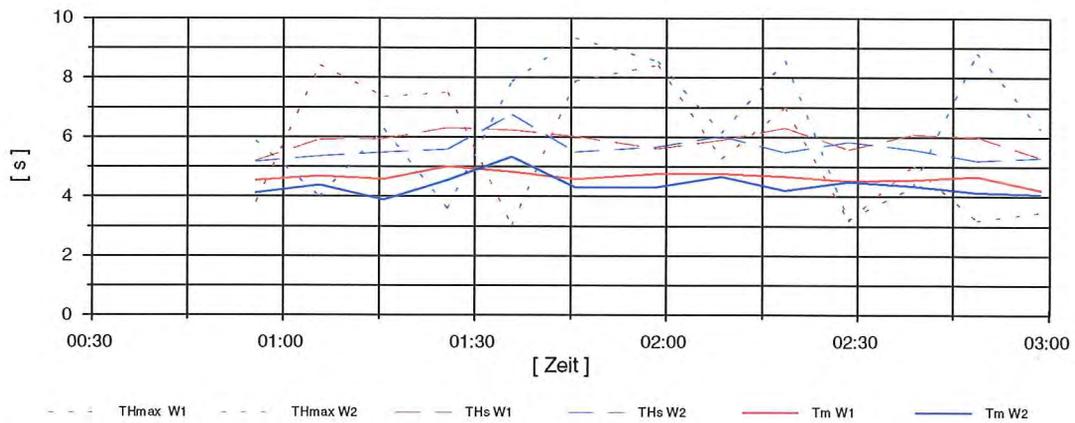


Abb. 77: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

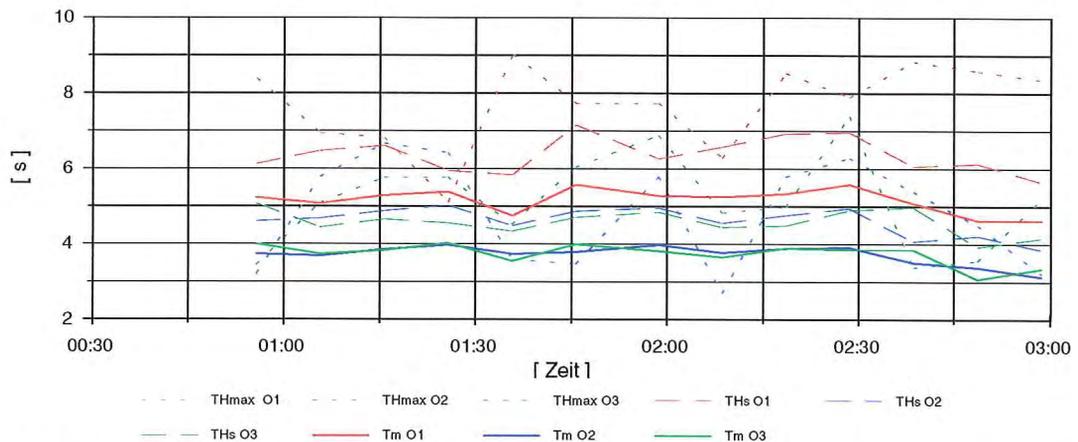


Abb. 78: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

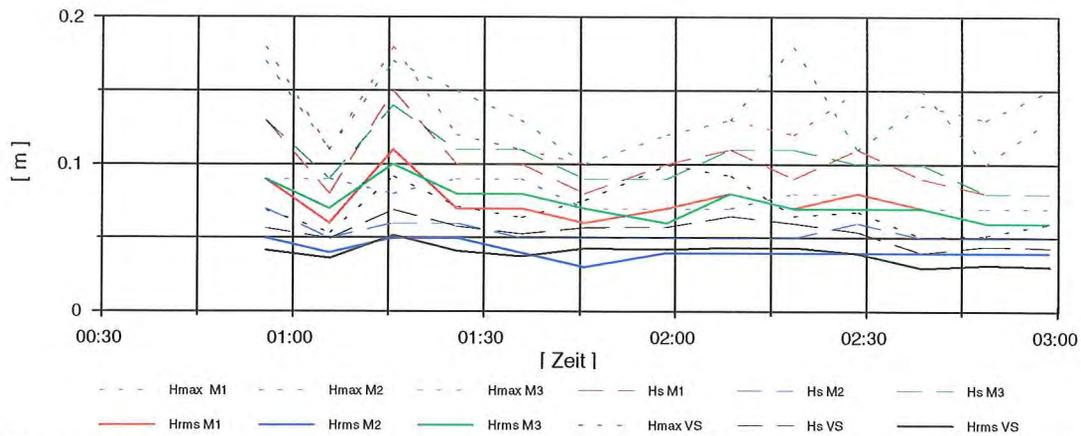


Abb. 79: Charakteristische Höhen langperiodischer Höhen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

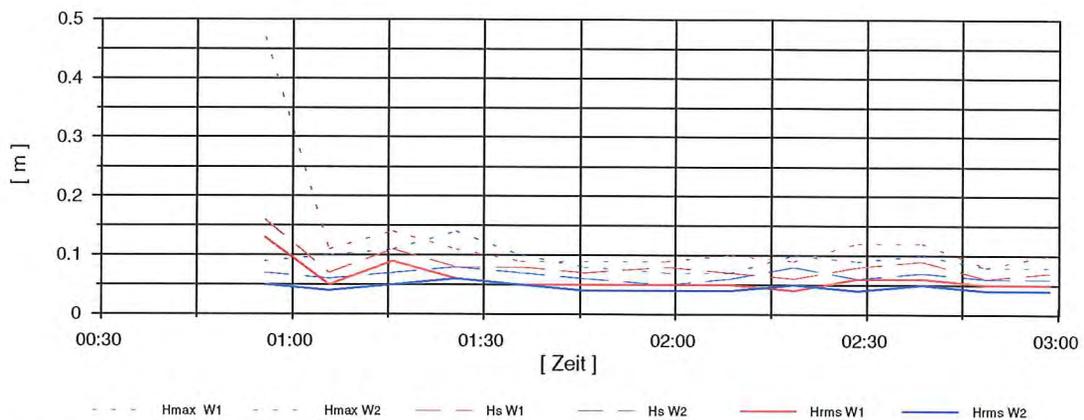


Abb. 80: Charakteristische Höhen langperiodischer Höhen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

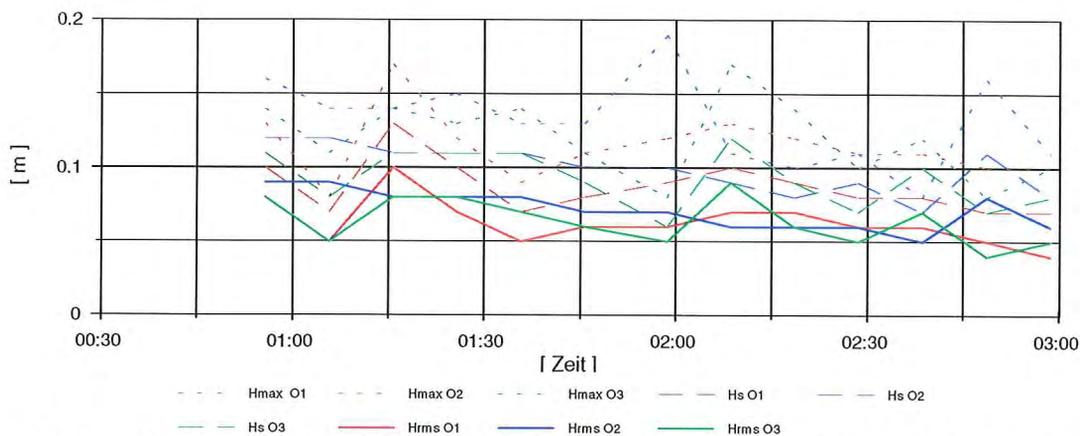


Abb. 81: Charakteristische Höhen langperiodischer Höhen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

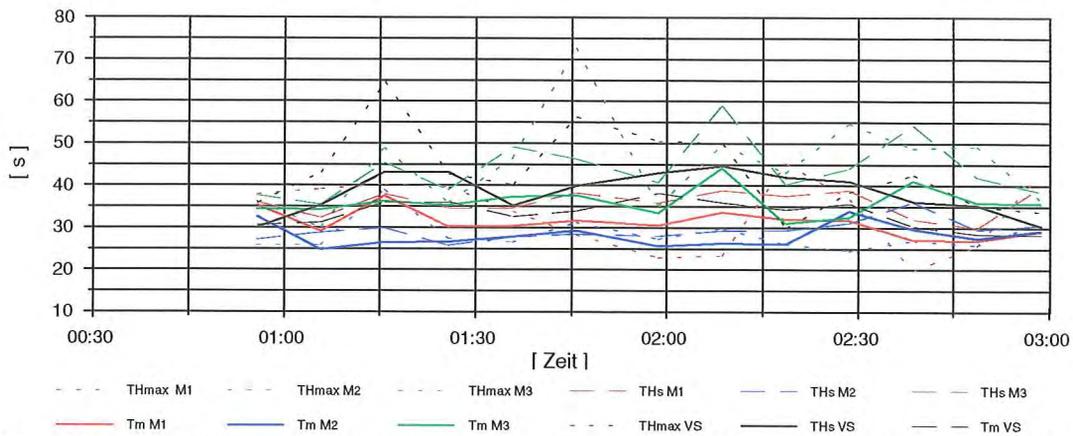


Abb. 82: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

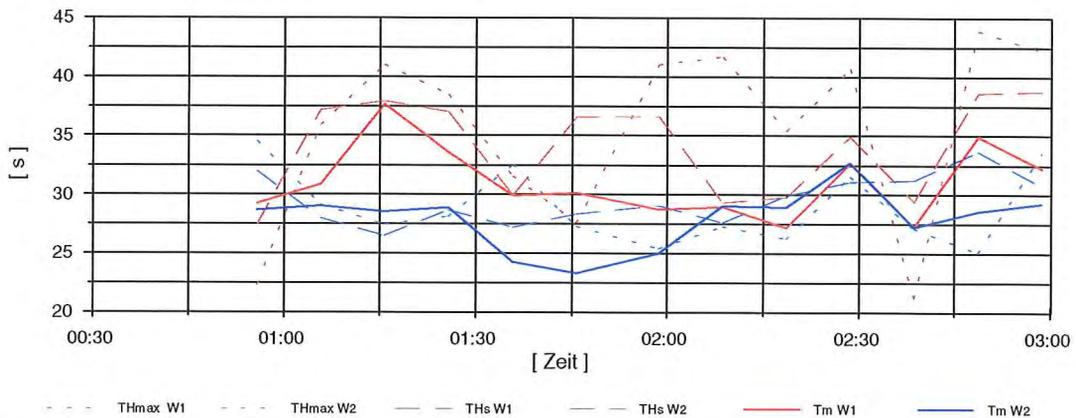


Abb. 83: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

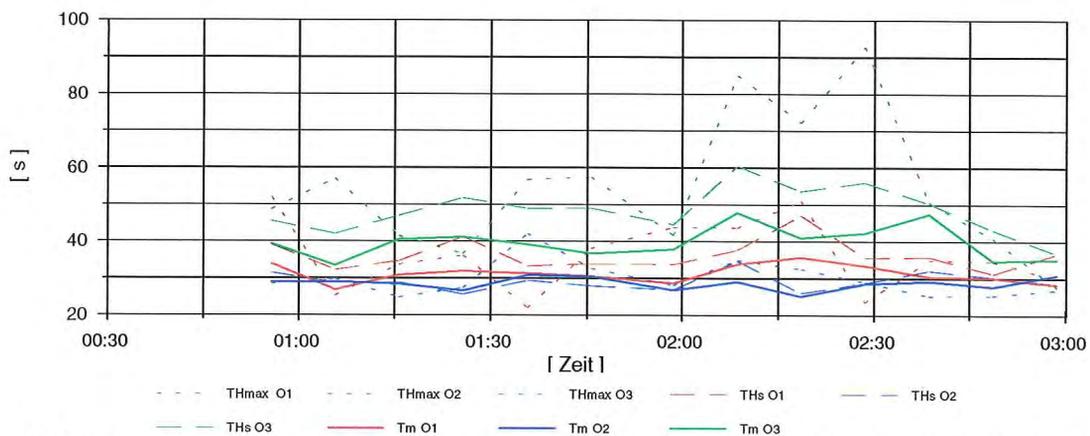


Abb. 84: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

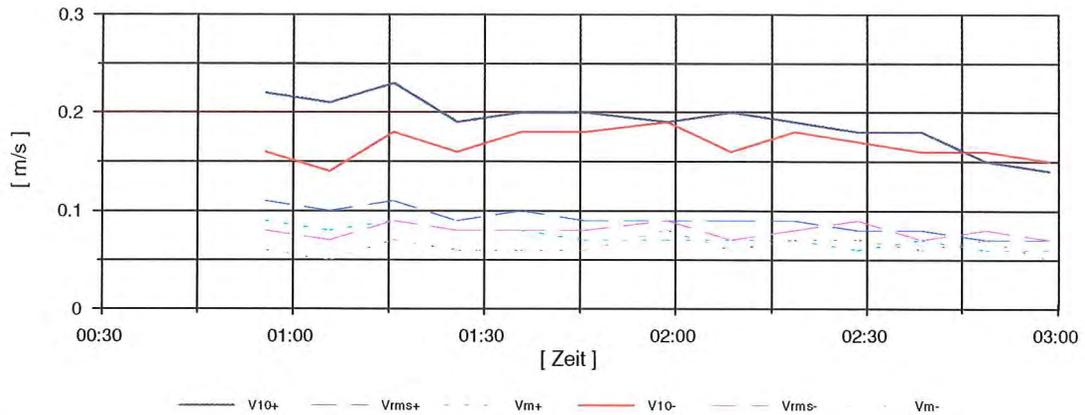


Abb. 85: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

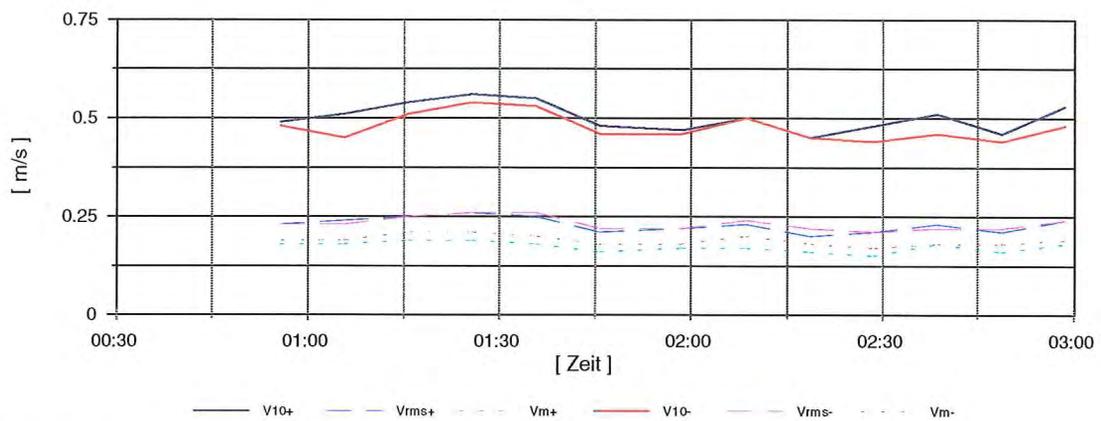


Abb. 86: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

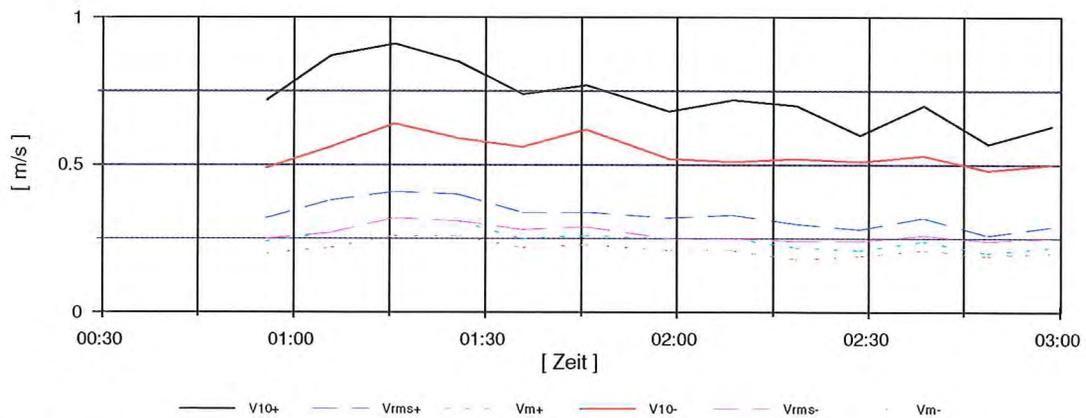


Abb. 87: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

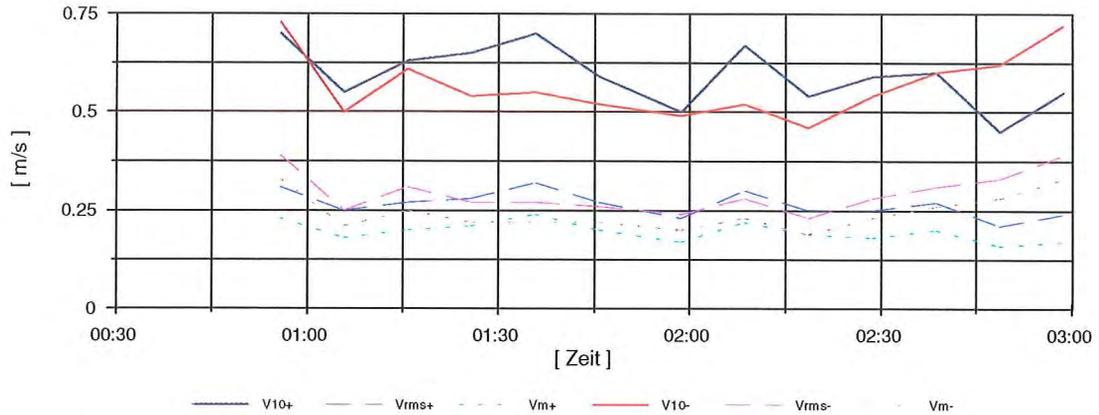


Abb. 88: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

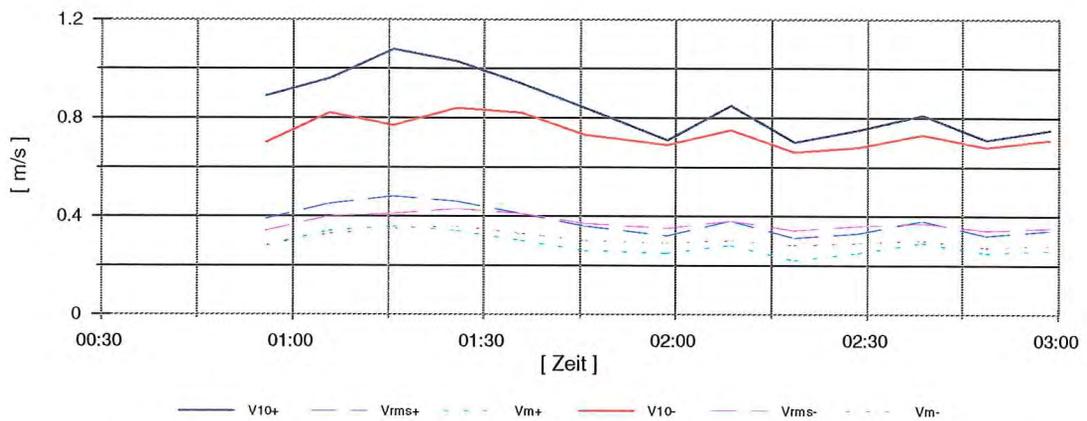


Abb. 89: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

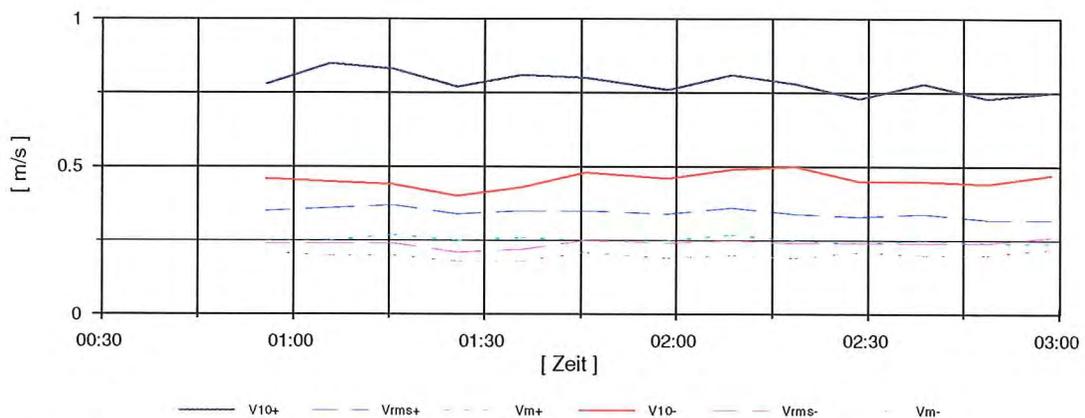


Abb. 90: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

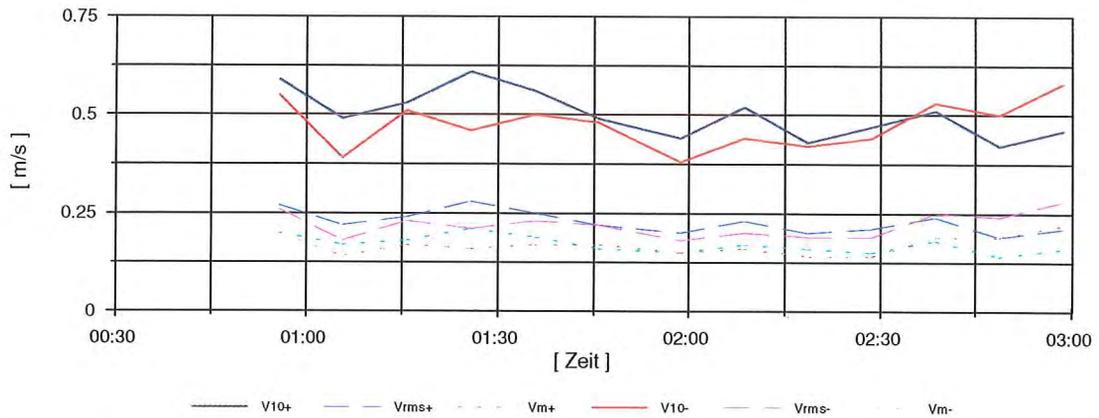


Abb. 91: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

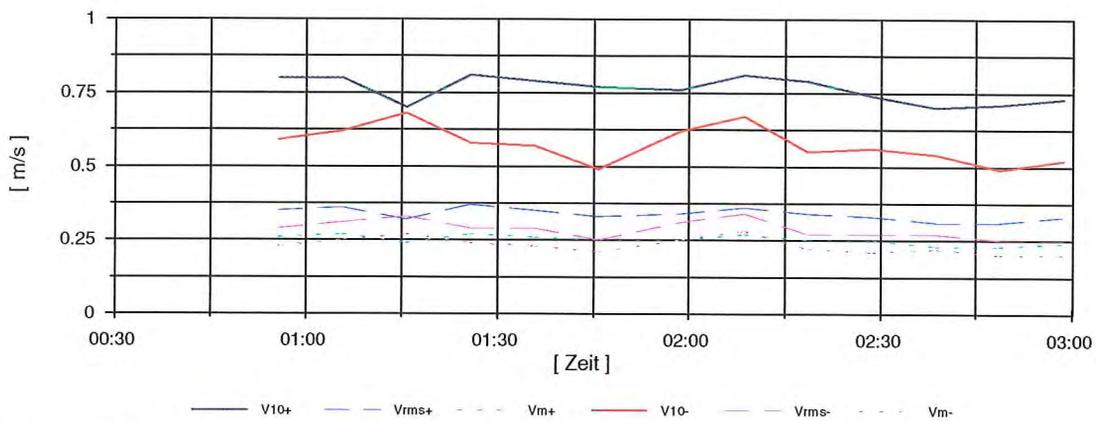


Abb. 92: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

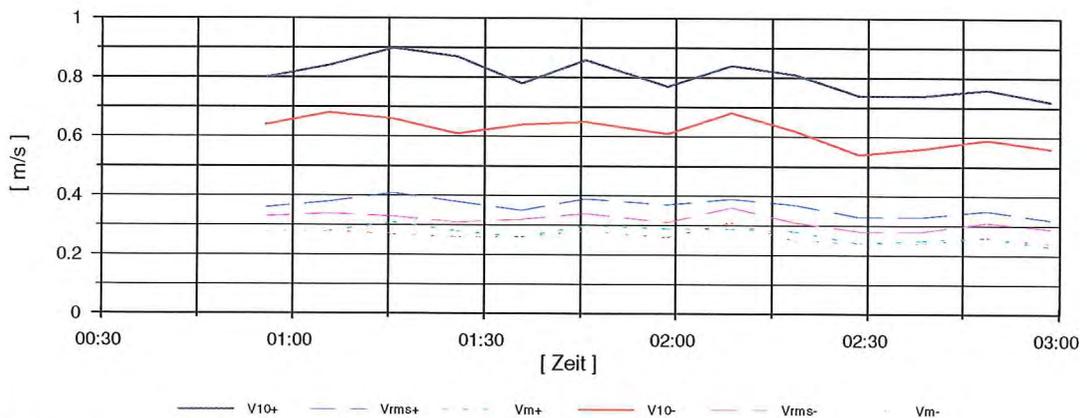


Abb. 93: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

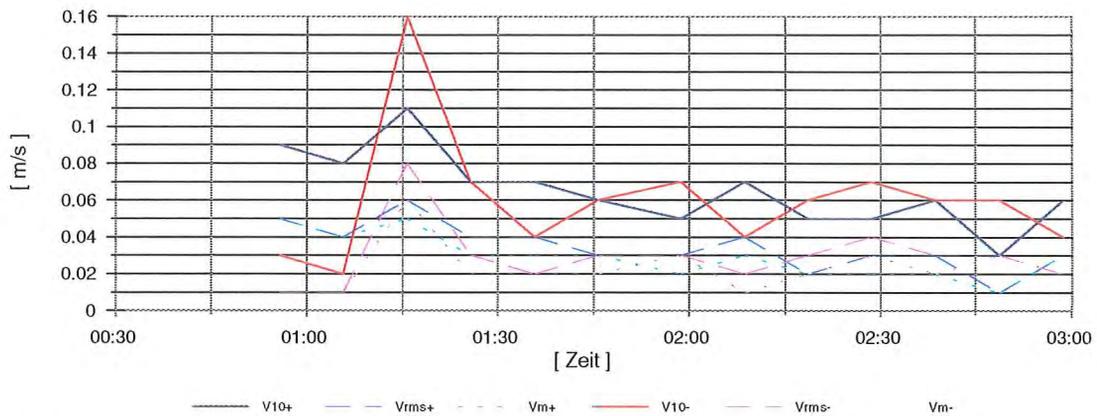


Abb. 94: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

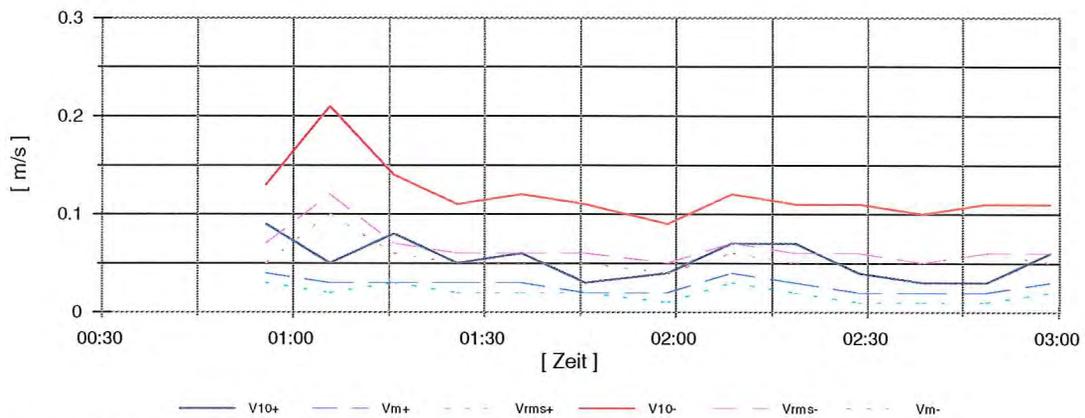


Abb. 95: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

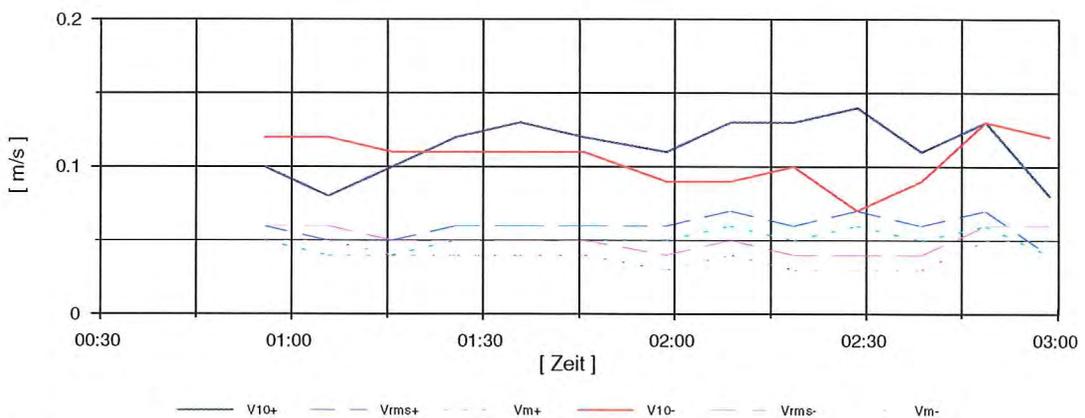


Abb. 96: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

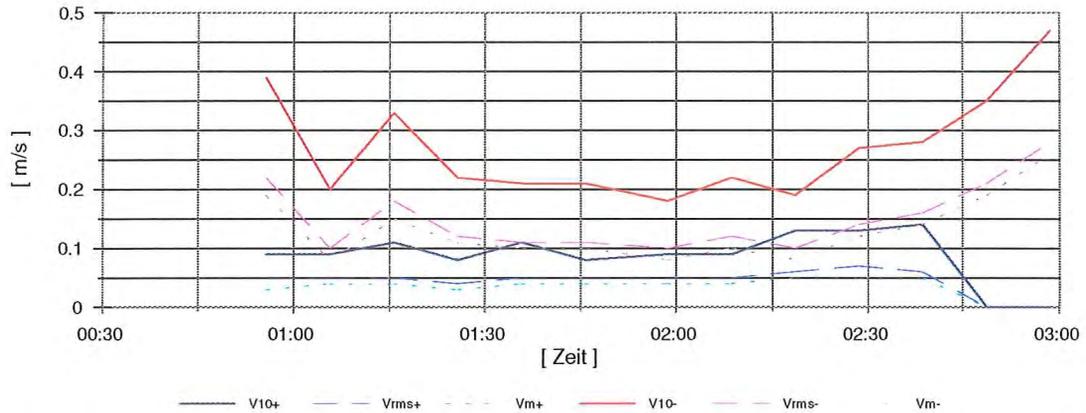


Abb. 97: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

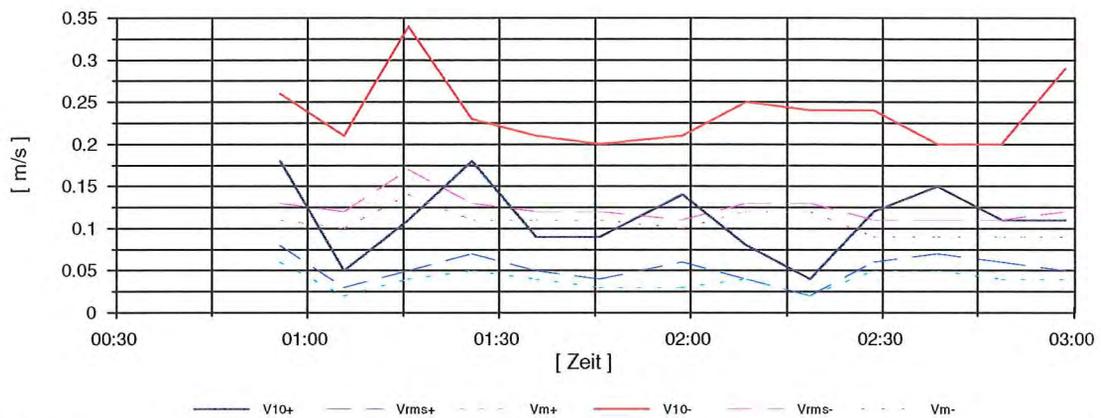


Abb. 98: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

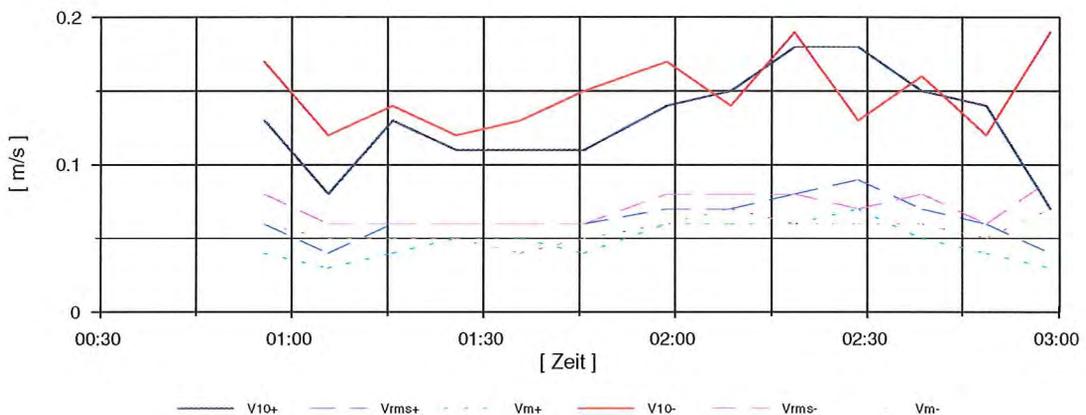


Abb. 99: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

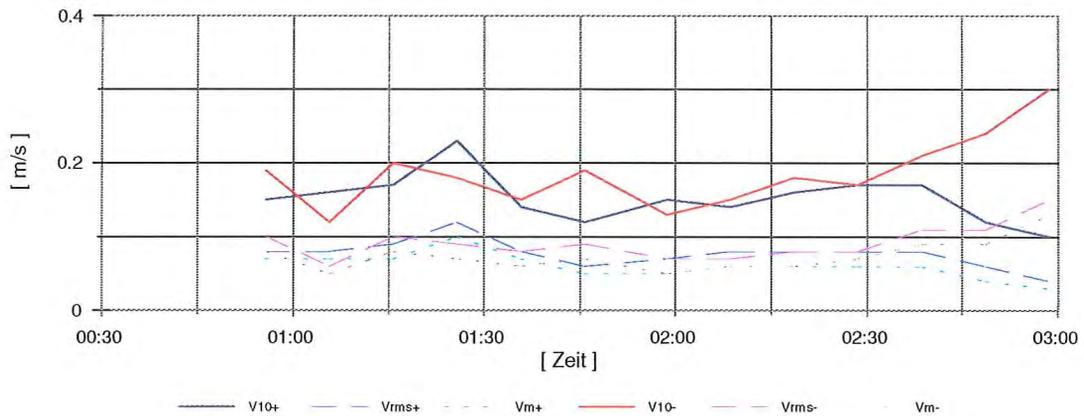


Abb. 100: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

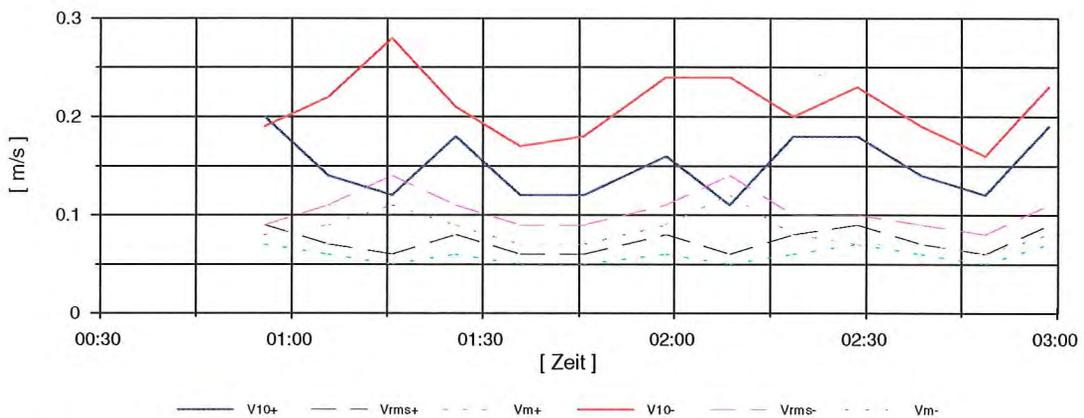


Abb. 101: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

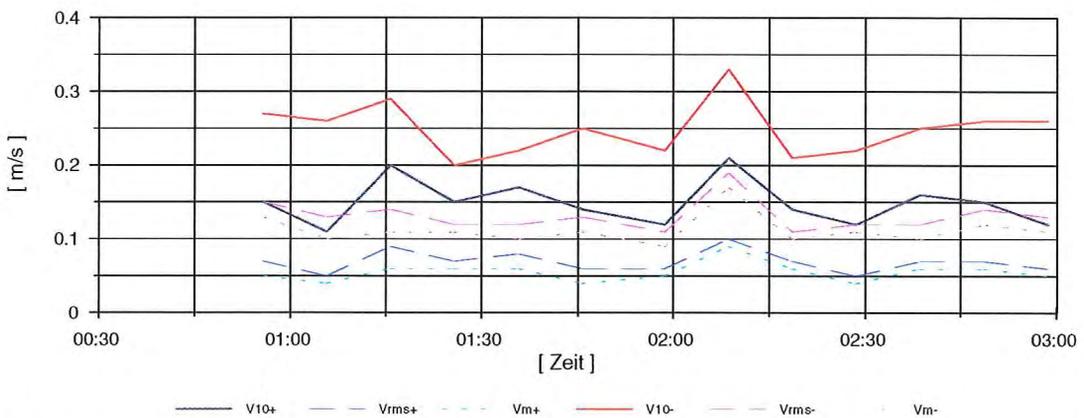


Abb. 102: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

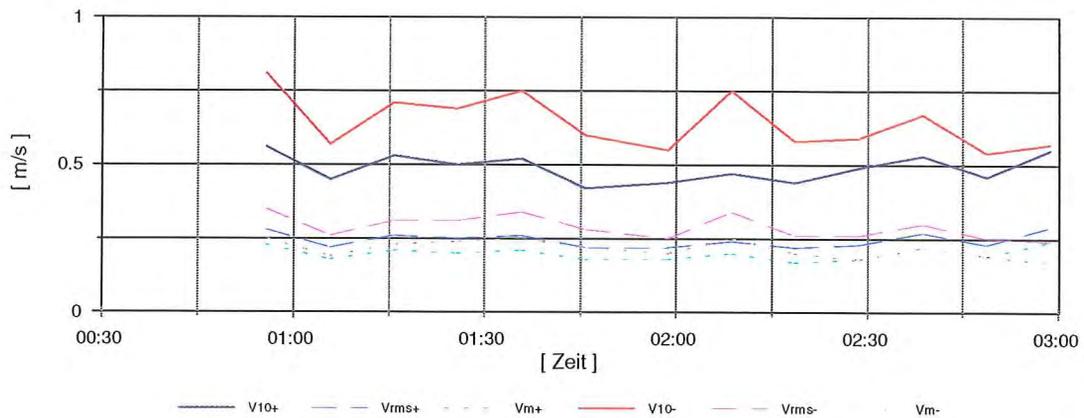


Abb. 103: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

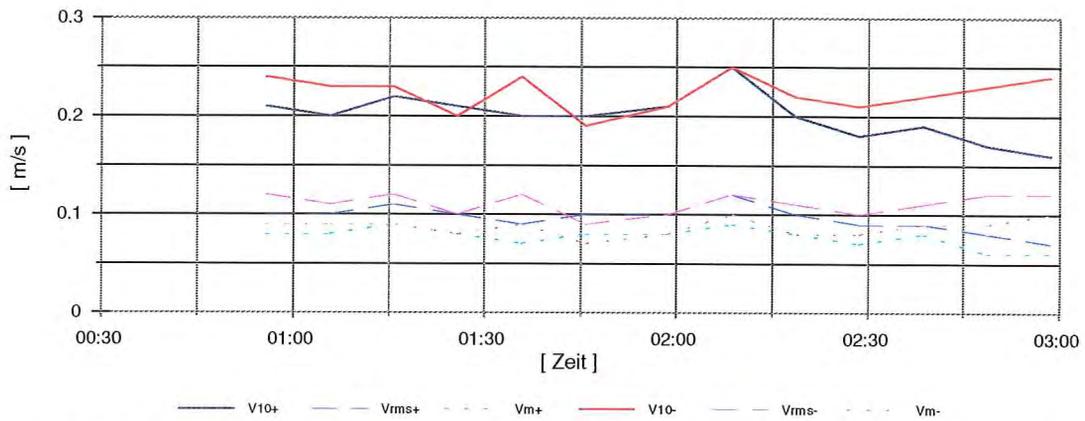


Abb. 104: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

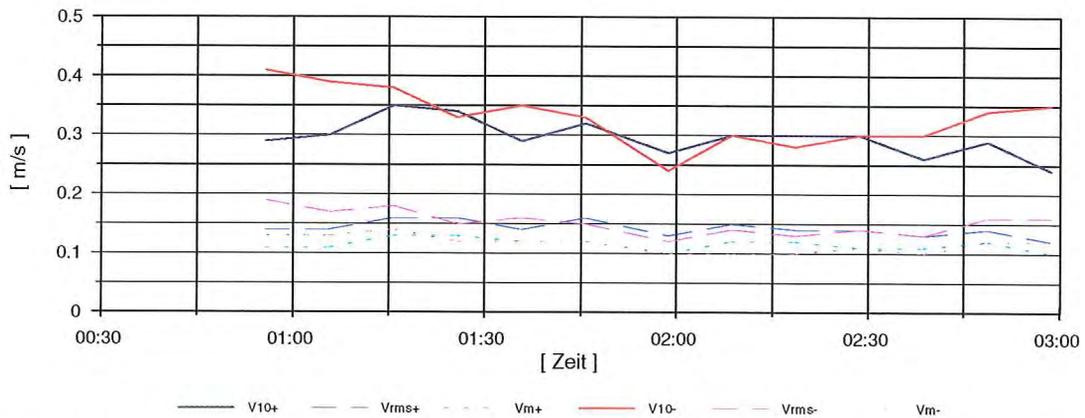


Abb. 105: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

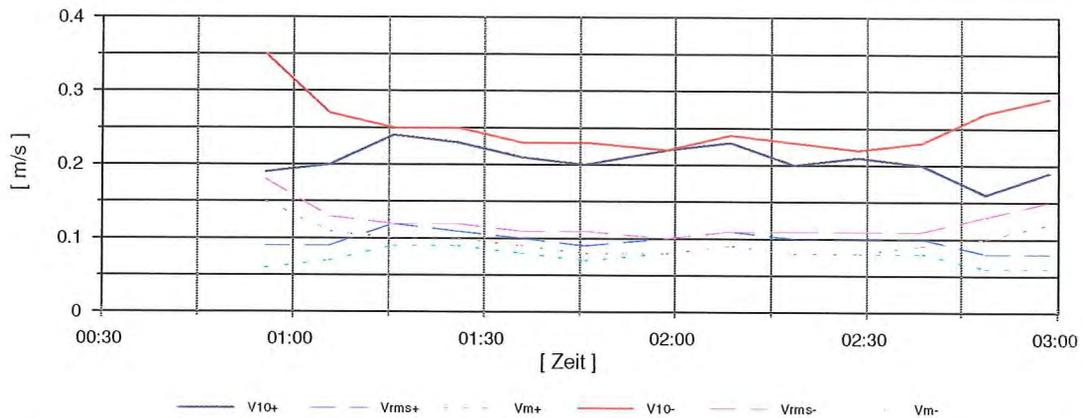


Abb. 106: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

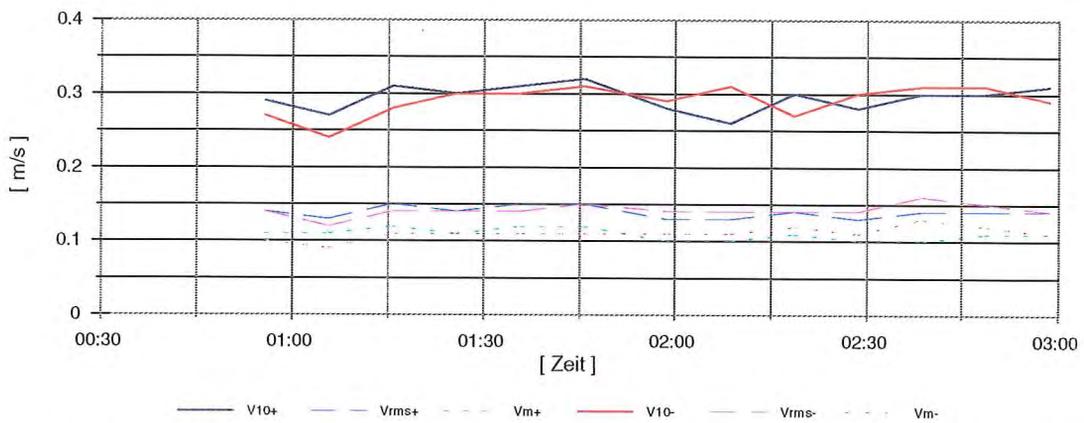


Abb. 107: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

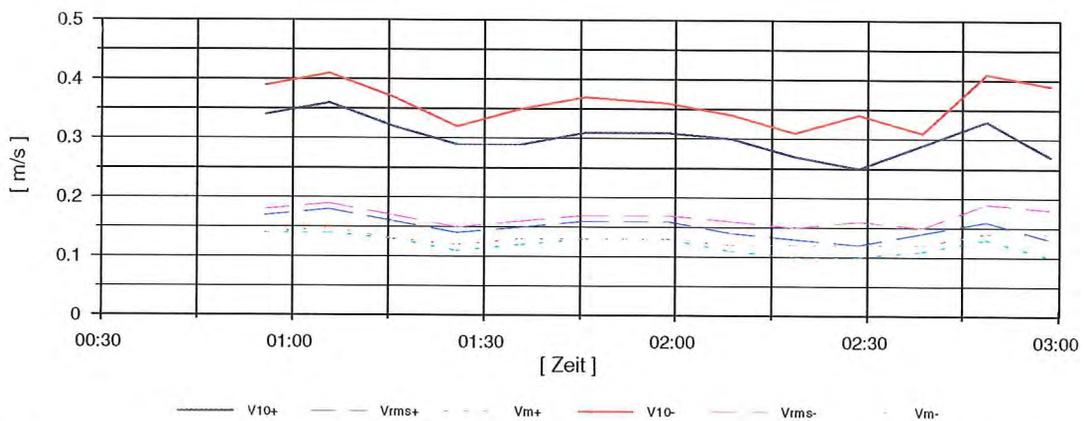


Abb. 108: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

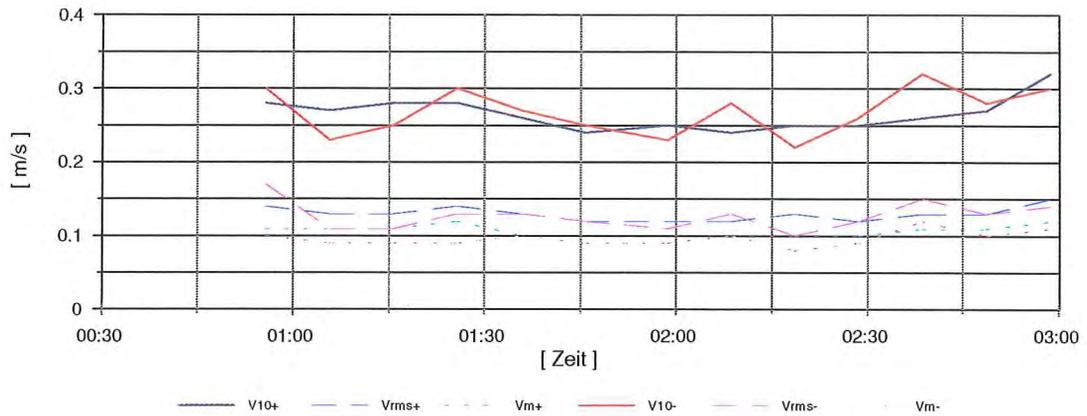


Abb. 109: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

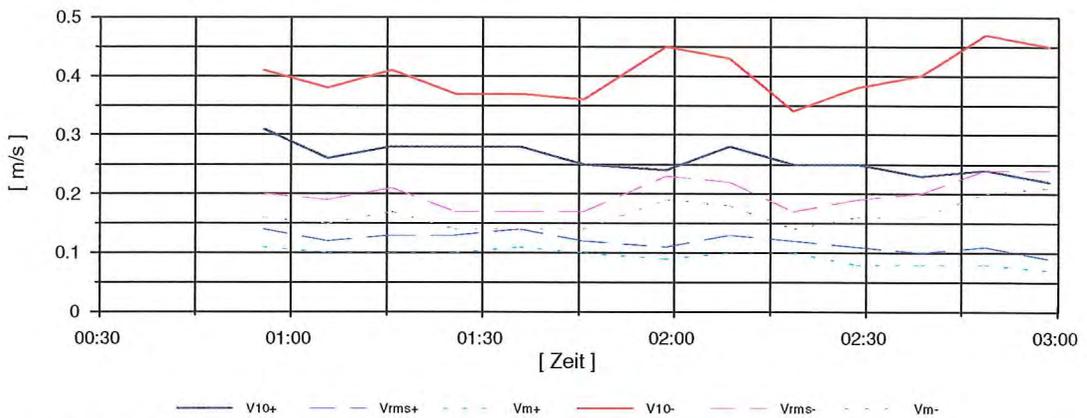


Abb. 110: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

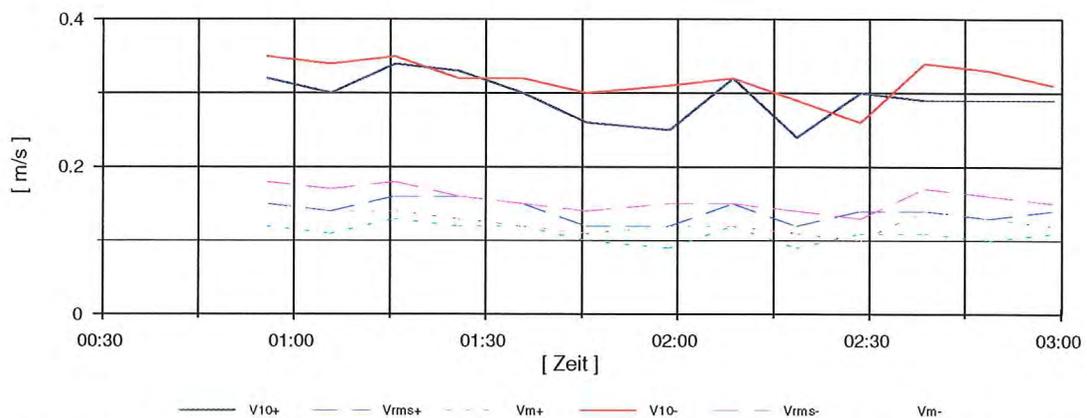


Abb. 111: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

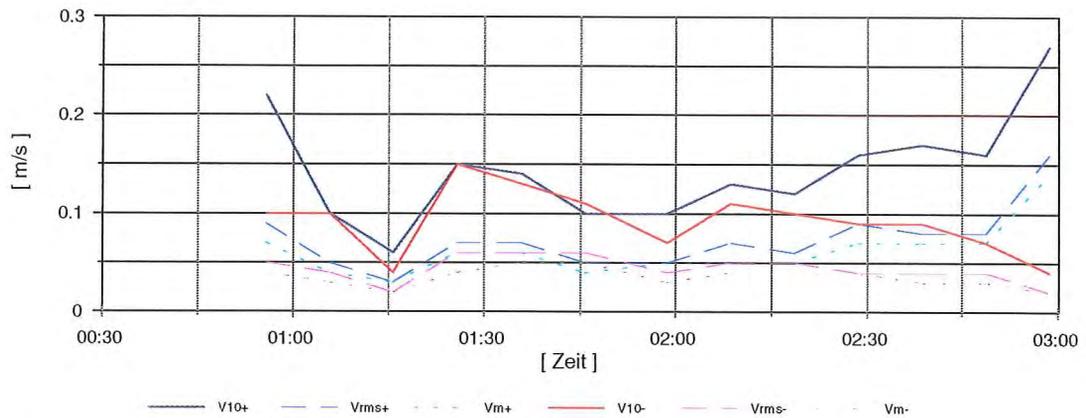


Abb. 112: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

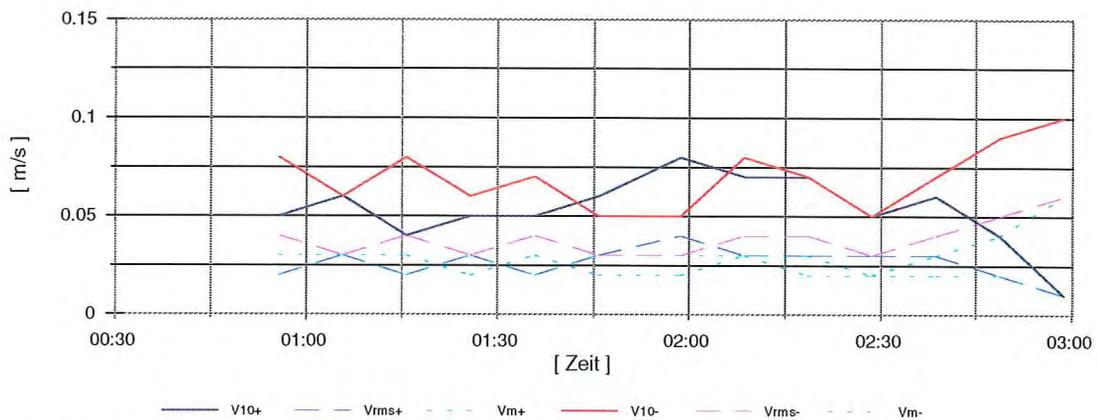


Abb. 113: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

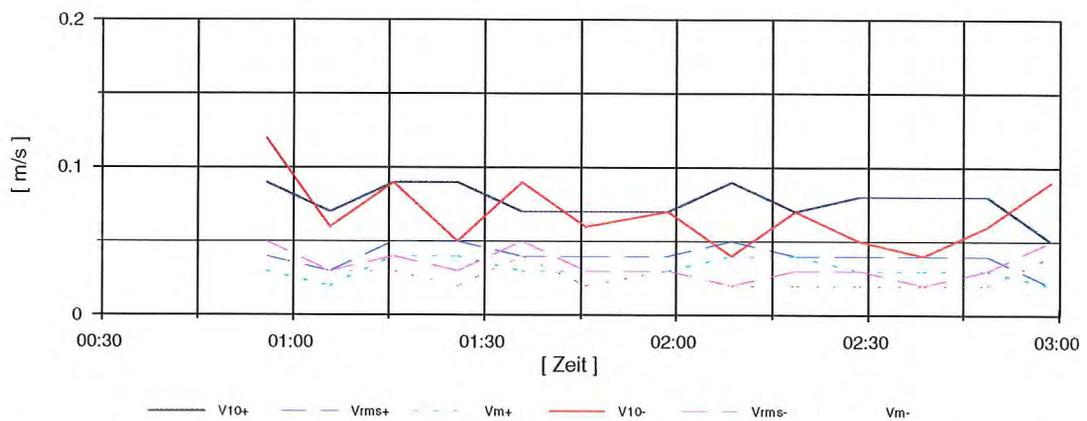


Abb. 114: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

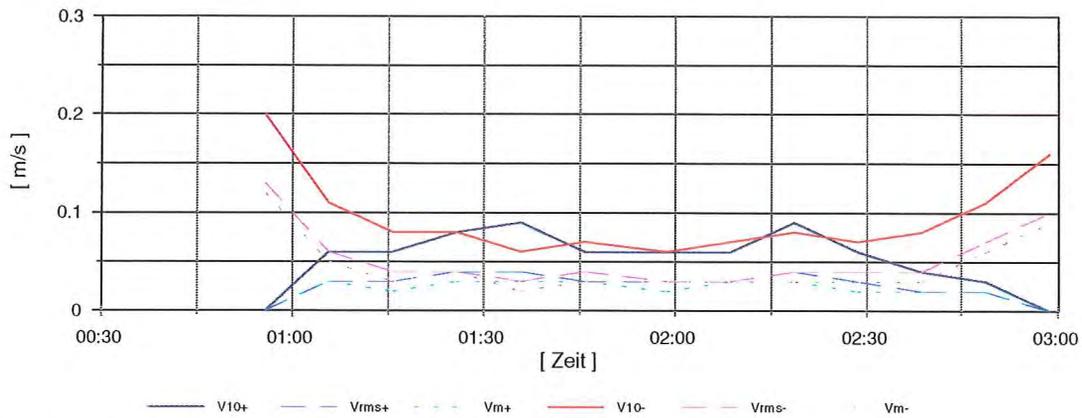


Abb. 115: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

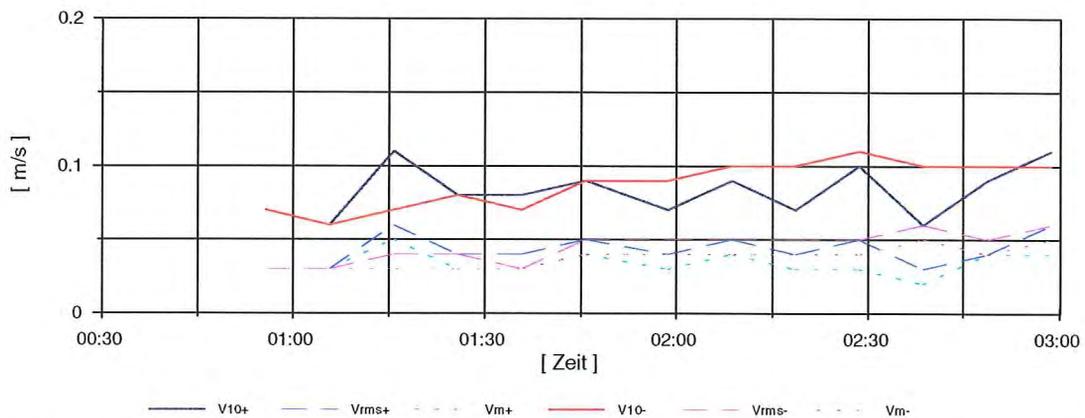


Abb. 116: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

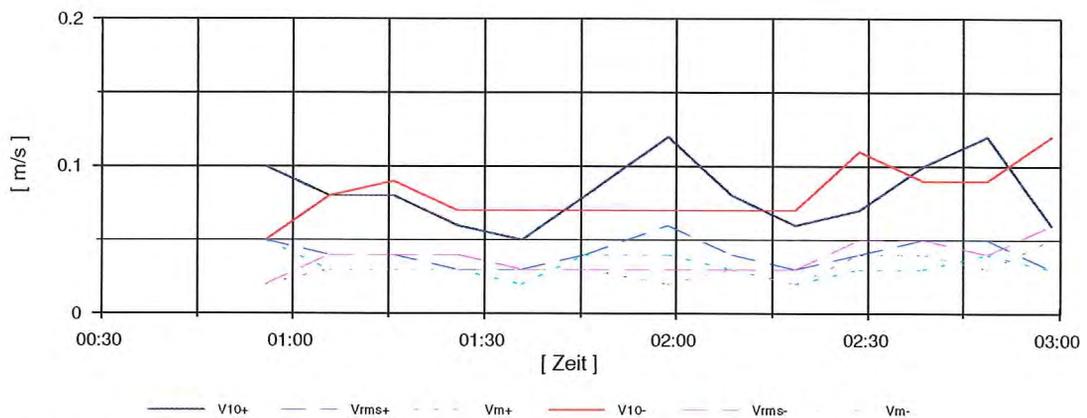


Abb. 117: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

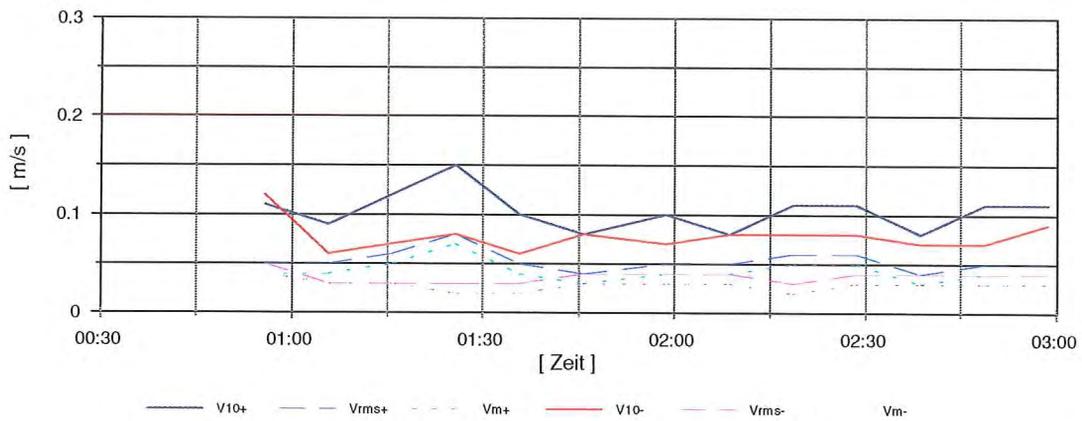


Abb. 118: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

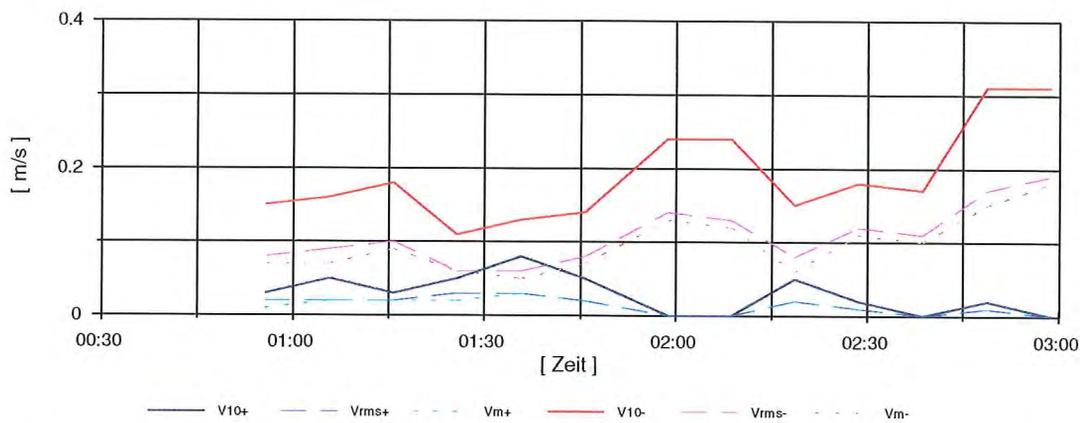


Abb. 119: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

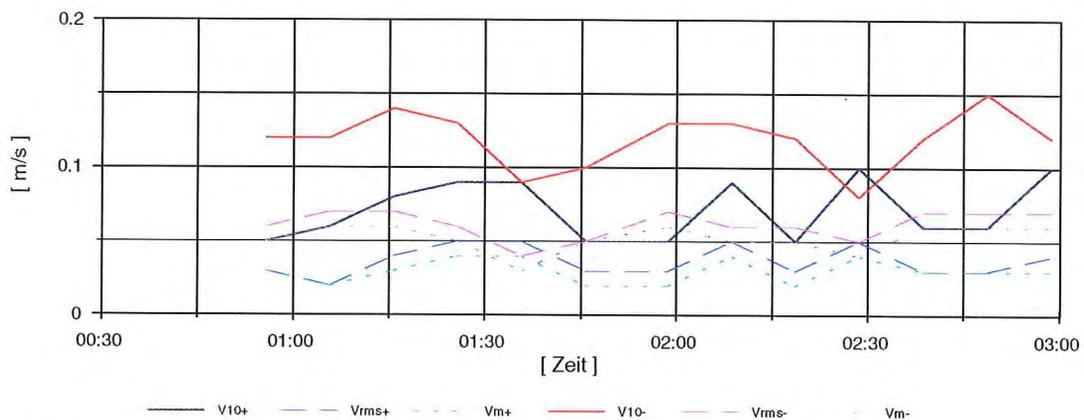


Abb. 120: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

5.3.2 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer erhöhten Tide

In dem untersuchten Zeitraum von zwei Stunden um den Eintritt des Thw weisen die signifikanten, und rms-Wellenhöhen auf dem Strand nur geringe Variationen auf, die sich mit abnehmenden Wassertiefen weiter abschwächen; lediglich auf dem Vorstrand ist eine etwas stärkere Variation dieser Parameter erkennbar (Abb. 121). Hieraus ist zu folgern, daß die Brandung deren Variabilität nicht erhöht, sondern auf dem Strand minimiert. Für die maximalen Wellenhöhen zeigt sich hingegen eine stärkere Variation, die aber auch mit abnehmenden Wassertiefen und damit zunehmender Auswirkungen der Brandung abnimmt (Abb. 121 - 123); eine vergleichbare Änderung über die Zeit - wie sie auf dem Vorstrand mit einer Bandbreite von einem Meter bei einem Höchstwert nahezu 3,5 m für H_{\max} = innerhalb von zwei Stunden eintritt - ist auf dem Strand trotz Brandung weder zeitlich noch räumlich erkennbar. Die Relationen der Wellenhöhen in den einzelnen Reihen lassen erkennen, daß die Lage der Brandungszone und vor allem der Brandungsintensität in dem Bühnenfeld örtlich unterschiedlich ist: Brandung und Energiedissipation sowie nachfolgende Aufsteilung erfolgen im mittleren Bereich bei den Stationen M_2 und M_3 , im östlichen hingegen seewärts versetzt zwischen O_1 und O_2 (Abb. 121 + 123). Der ausgeprägte stochastische Charakter der Perioden der höchsten Wellen auf dem Vorstrand ist für Windsee typisch; der auf dem Strand brandungsbedingt erhalten bleibt (Abb. 124 - 126). Die Veränderungen der signifikanten und mittleren Perioden sind im Vergleich dazu nur als gering anzusehen. In der mittleren Reihe tritt dabei das Phänomen auf, daß die mittleren signifikanten Perioden vorübergehend beim Auflaufen auf den Strand infolge Shoaling abnehmen und anschließend nach dem Branden wieder regenerieren und zunehmen. Die mittlere Periode an der Station M_3 ist fast durchweg über die Dauer von zwei Stunden länger als an der seewärts gelegenen Station M_2 (Abb. 124). Demnach findet in diesem Bereich eine Umlagerung der Seegangsenergie zu - wenn auch geringfügig - niedrigere Frequenzbereiche.

Entsprechend der Seegangs- und Brandungsintensität erreichen die Höhen der langperiodischen Wellenerscheinungen wesentlich höhere Werte als bei der Normaltide (Abb. 127 - 129). Hierbei sind die höchsten Werte für alle drei hier untersuchten Parameter H_{\max} , H_s und H_{rms} nicht auf dem Vorstrand, sondern im Übergang zum Strand im mittleren und östlichen Teil des Bühnenfeldes. Hieraus ist zu vermuten, daß die Infrarotwellen primär auf Strandbrandung zurückzuführen sind und nicht auf Wellengruppeneffekte. Hierfür spricht auch, daß in den strandnormalen Höhenrelationen analoge Aufeinanderfolgen zu denen des Seegangs auftreten, die der Brandung zugeordnet werden konnten. Die Perioden bewegen sich in einer für Infrarotwellen typischen Bandbreite, zumeist bis zu einer Größenordnung von etwa 50 s, die nur von denen der höchsten Wellen in einigen wenigen Fällen übertroffen wird. Hierbei handelt es sich stets um Erscheinungen an landnahen Stationen. Bemerkenswert ist auch, daß dort die längsten Perioden im mittleren und östlichen Bereich des Bühnenfeldes auftreten (Abb. 130 - 132).

Die küstennormalen Strömungen sind im Übergang vom Vorstrand zum Strand noch überwiegend landwärts gerichtet (Abb. 133 - 135); lediglich im westlichen Teil sind sie - insbesondere im Fall - ablandig (Abb. 133). Dagegen sind an allen drei Stationen der mittleren Reihe die ablandig gerichteten Anteile dominant (Abb. 136 - 138), was aus

der Lage der Brandungszone erklärbar ist, die aus der räumlichen Verteilung der Wellenhöhen hergeleitet werden konnte. Eine entsprechende Differenzierung zwischen den Stationen im mittleren und östlichen Teil des Bühnenfeldes wie bei den Wellenhöhenänderungen ist hierbei aber nicht identifizierbar. In den landnahen Stationen sind zwar die höheren Geschwindigkeiten in etwa ausgeglichen; die mittleren Parameter v_{rms} und v_m sind hingegen dominant ablandig. Diese Gegebenheit ist nicht durch das Einwirken langperiodischer Anteile erklärbar, die mit Ausnahme der Station W_1 (Abb. 133 + 142) in ihrem zeitlichen Verlauf (Abb. 142 - 150) signifikant von dem der Gesamtheit (Abb. 133 - 141) abweichen. Über die gesamte Breite des Strandes ist das langperiodisch geprägte Strömungsgeschehen im Tidestieg und um den Eintritt des Thw dominant auflandig, um dann im Fall ebenso dominant ablandig zu sein.

Die küstenparallelen Komponenten bieten ein sehr uneinheitliches Bild, das auf Zirkulationen im Bühnenfeld hindeutet, wie sie bereits früher bei Normaltiden erfaßt worden sind [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b]. Am Übergang vom Vorstrand zum Strand ist im westlichen Bereich eine klare oberdriftige Dominanz vorhanden (Abb. 151), während im mittleren und östlichen Teil ein leichtes Überwiegen der Unterdrift auftritt (Abb. 152+ 153). Insgesamt lassen die geringen Geschwindigkeiten keine hohe Transportwirksamkeit für hochfrequente Strömungen erwarten. An den Stationen W_2 , M_2 und O_2 sind die Verhältnisse noch uneinheitlicher (Abb. 154 - 156): Im westlichen Teil ausgeglichen, im mittleren erst ausgeglichen und dann oberdriftig und im östlichen eindeutig unterdriftig. Angesichts der hier intensiven Brandung und der damit verbundenen Suspension ist trotz der geringen Geschwindigkeiten ein höherer Transport als im seewärtigen Bereich zu erwarten. An den landnahen Stationen sind die küstenparallelen Komponenten im östlichen Teil ausgeglichen (Abb. 159), während im mittleren und westlichen Teil des Bühnenfeldes eine klare Dominanz zur Unterdrift vorherrscht (Abb. 157 + 158). Die langperiodischen Komponenten zeigen eine gänzlich andere Verteilung (Abb. 160 - 168). Hieraus ist ableitbar, daß die bereits früher beobachteten Zirkulationvorgänge [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b] seegangsprägend und hochfrequent sind. Eine dem bekannten langfristigen Trend entsprechende Ausrichtung zur Unterdrift tritt nur zeitweilig an den Stationen im östlichen Teil des Bühnenfeldes auf (Abb. 162, 165, 168). An den anderen Stationen sind die Verhältnisse entweder ausgeglichen oder zeitweilig sogar durch eine oberdriftige Tendenz gekennzeichnet (Abb. 160- 168).

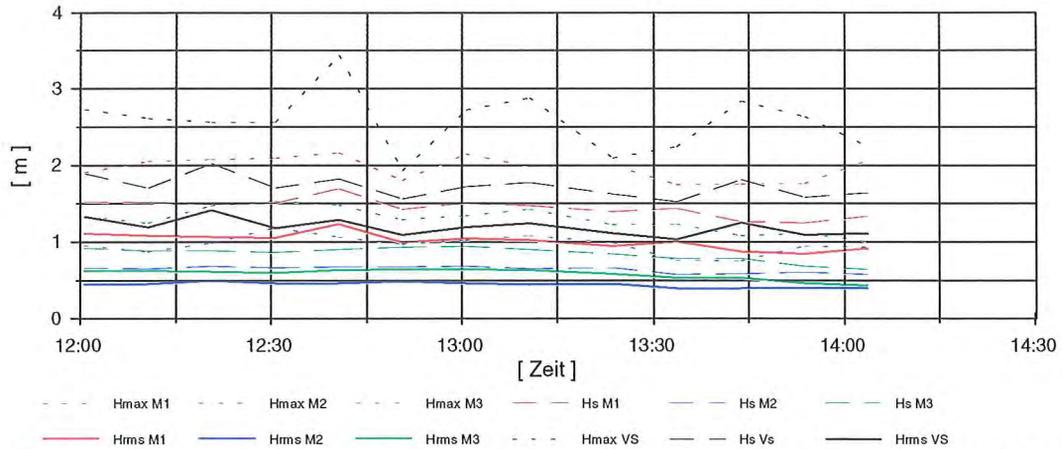


Abb. 121: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

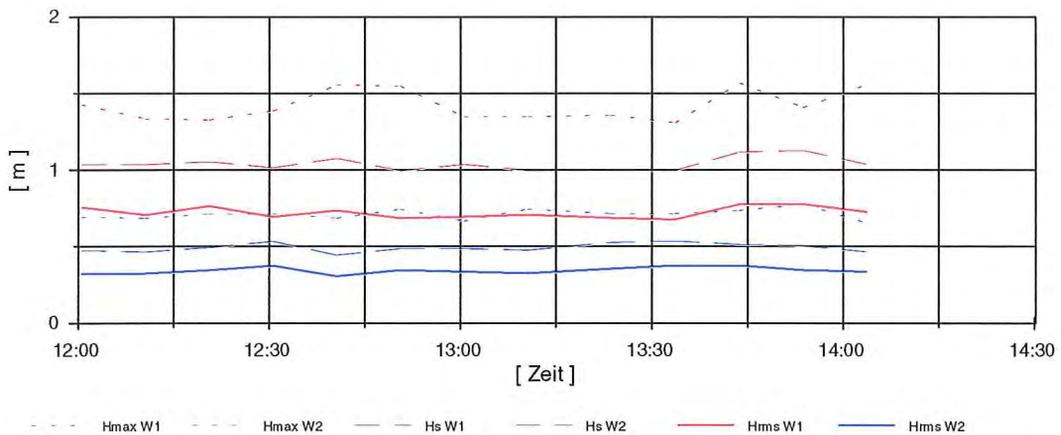


Abb. 122: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

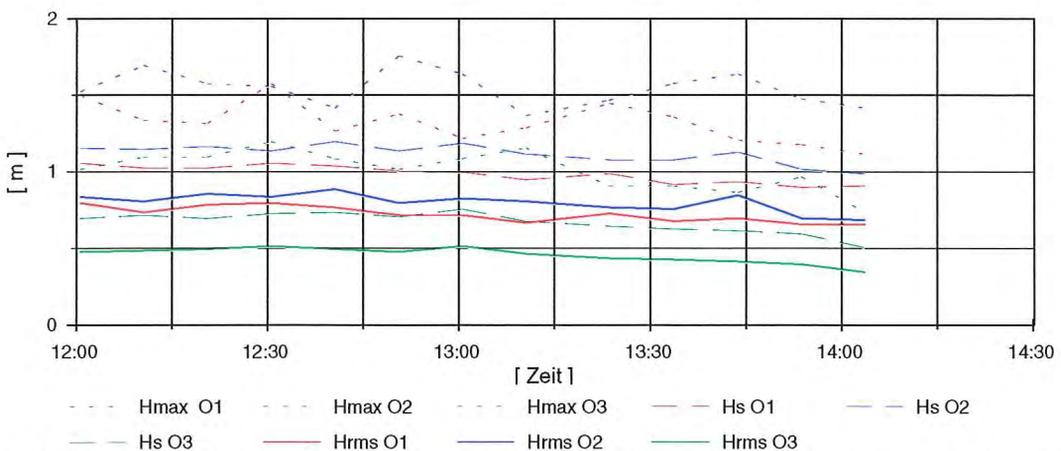


Abb. 123: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

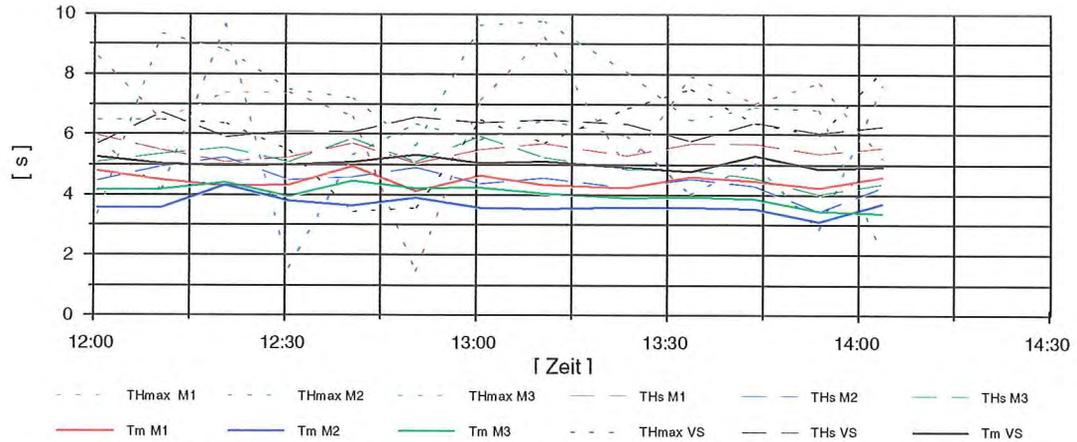


Abb. 124: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

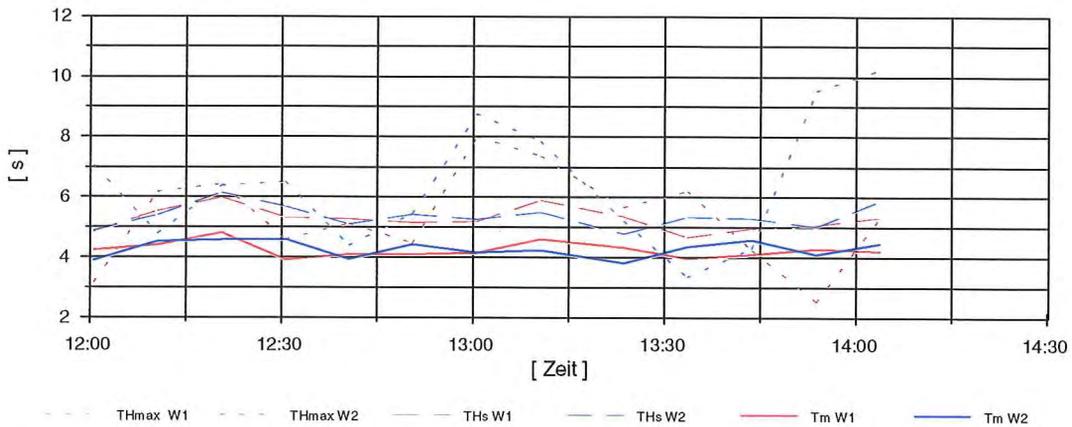


Abb. 125: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

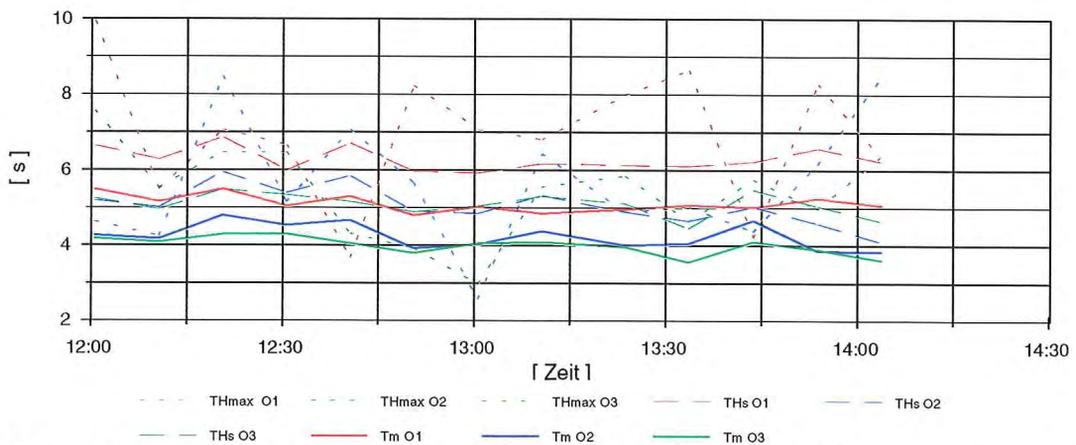


Abb. 126: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

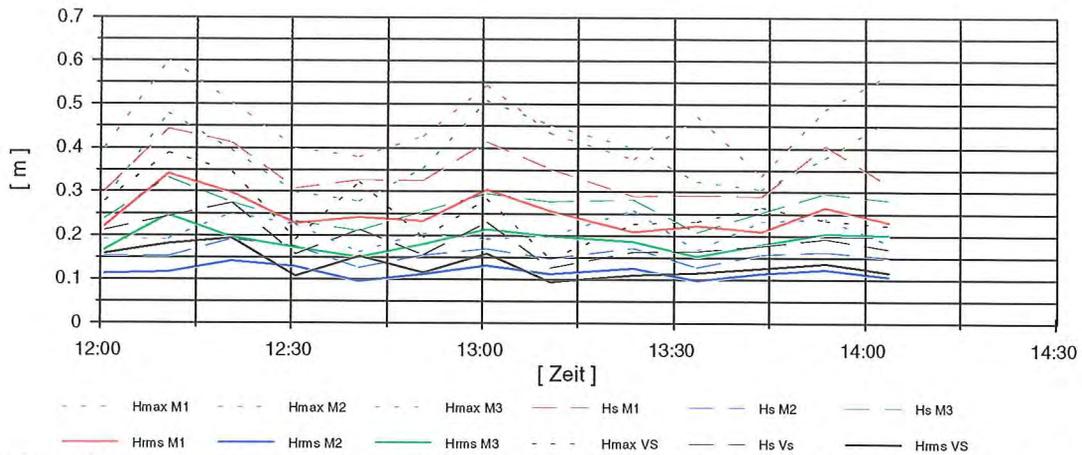


Abb. 127: Charakteristische Höhen langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

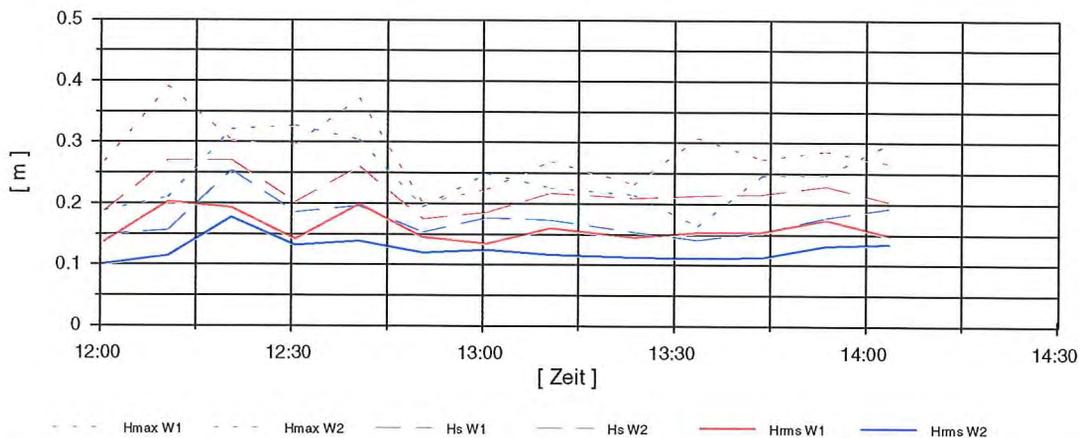


Abb. 128: Charakteristische Höhen langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

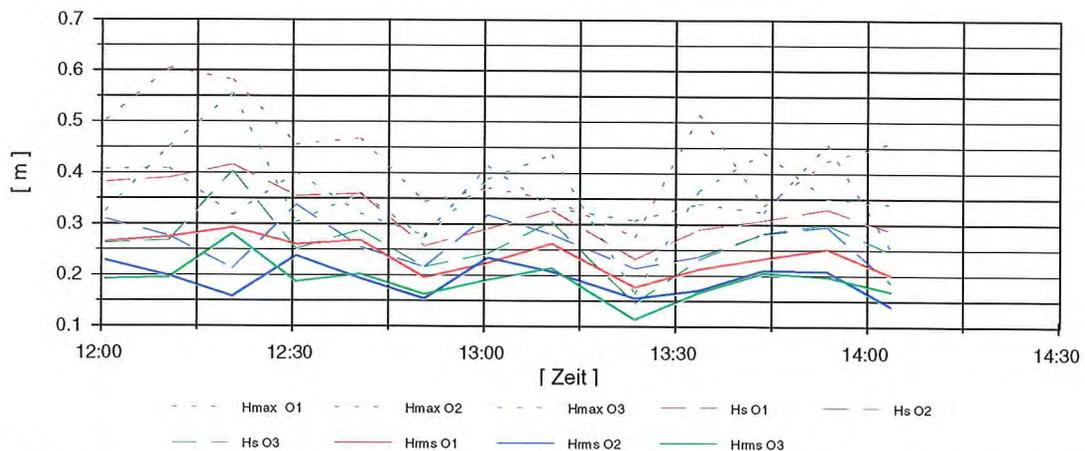


Abb. 129: Charakteristische Höhen langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

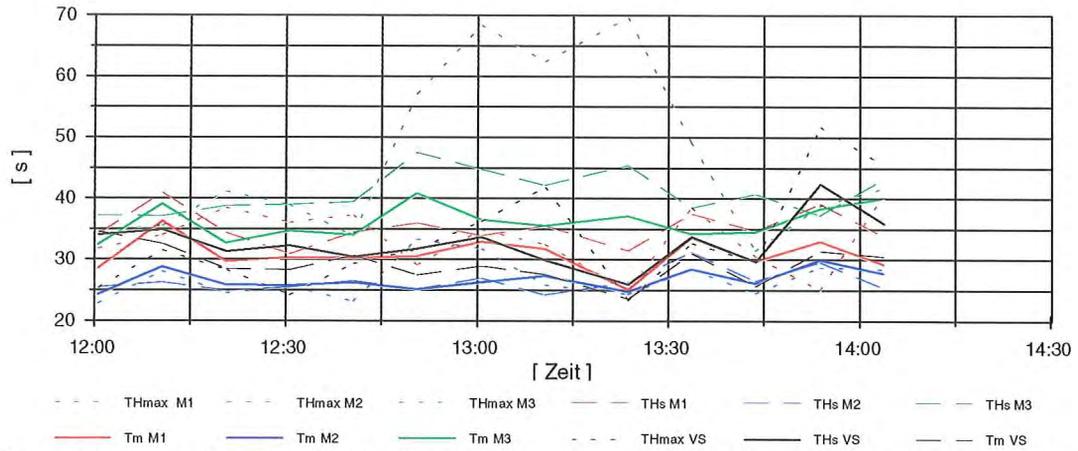


Abb. 130: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

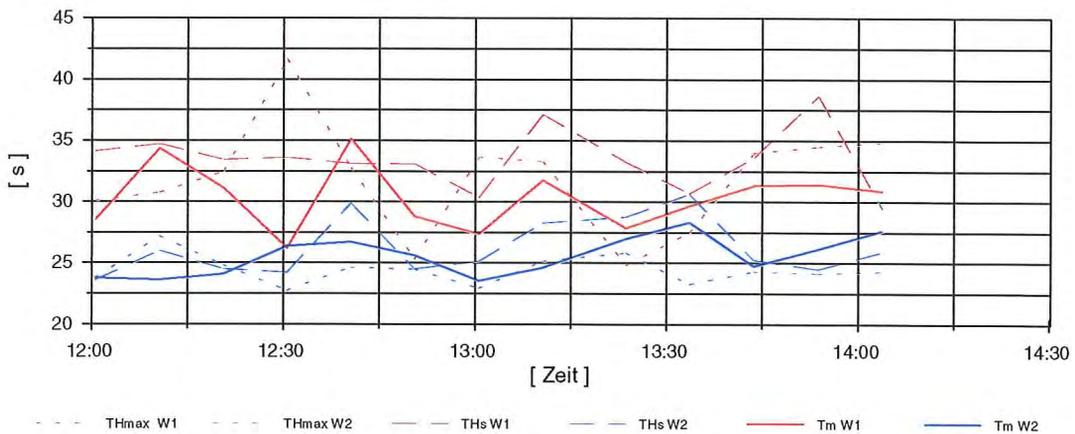


Abb. 131: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

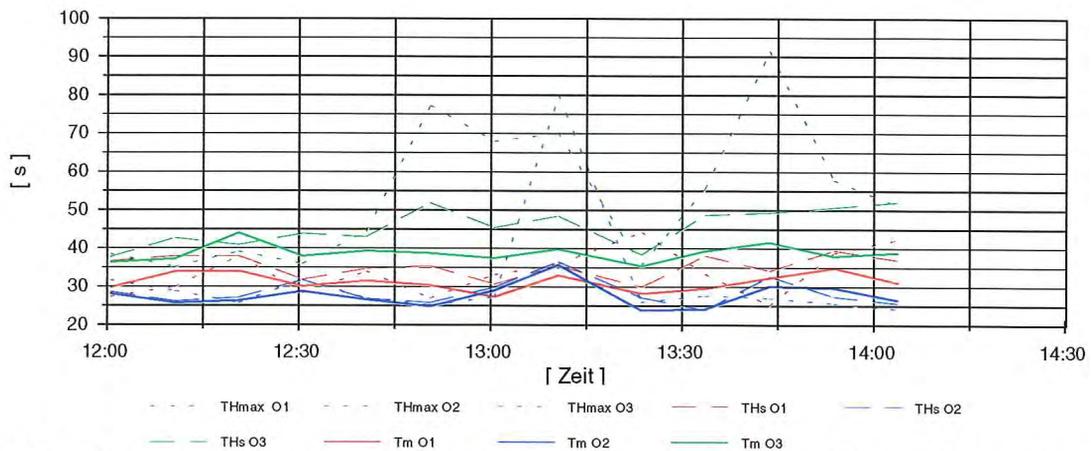


Abb. 132: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

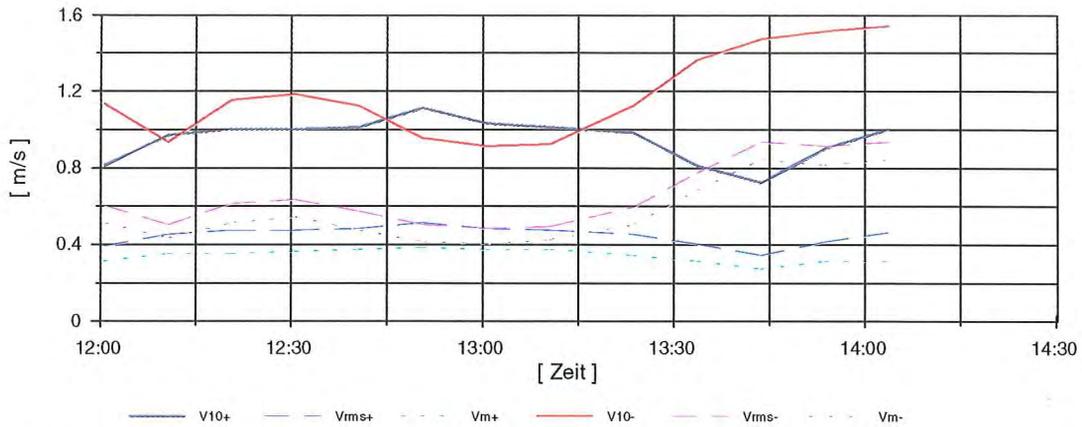


Abb. 133: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

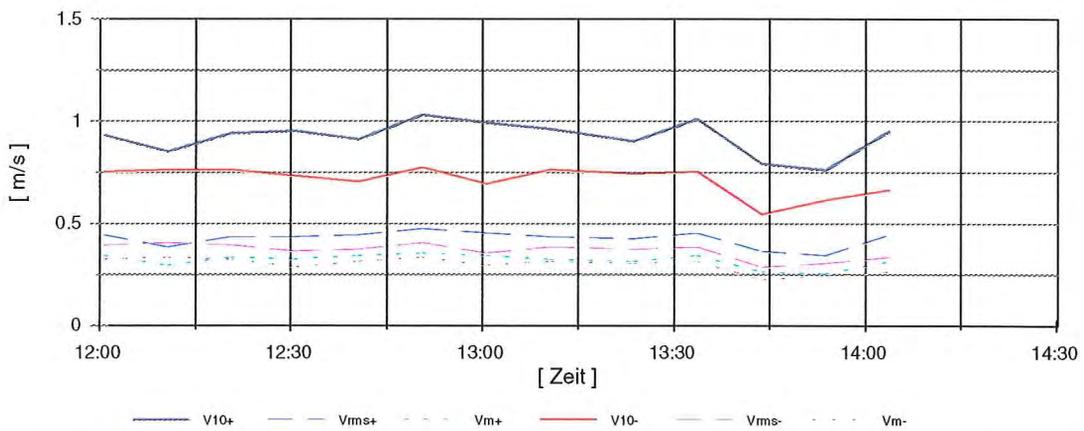


Abb. 134: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

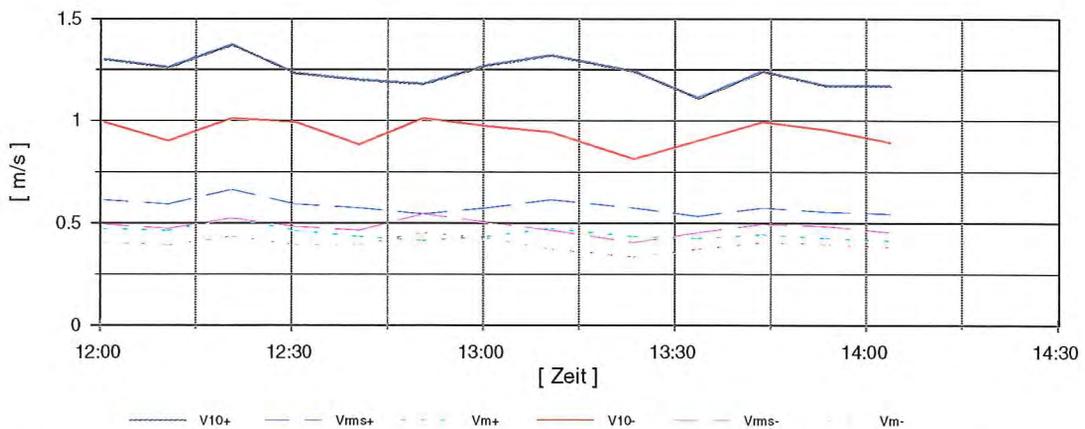


Abb. 135: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

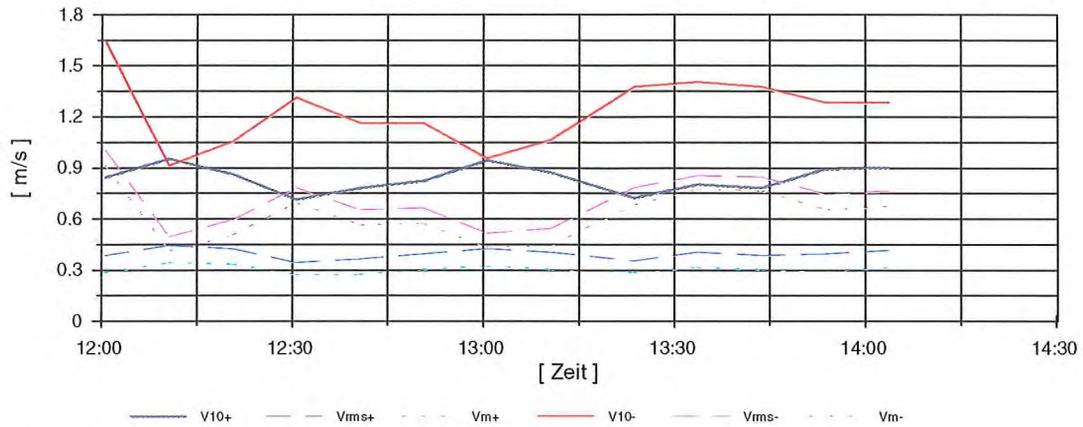


Abb. 136: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

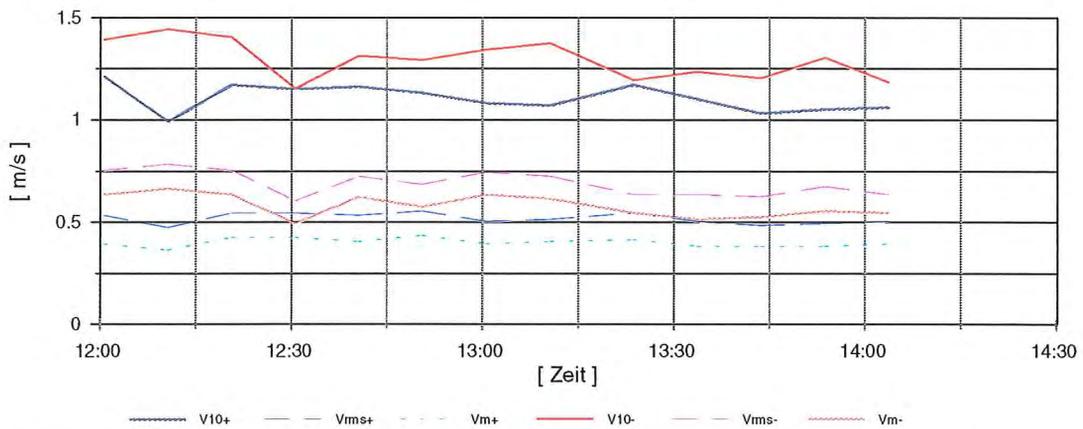


Abb. 137: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

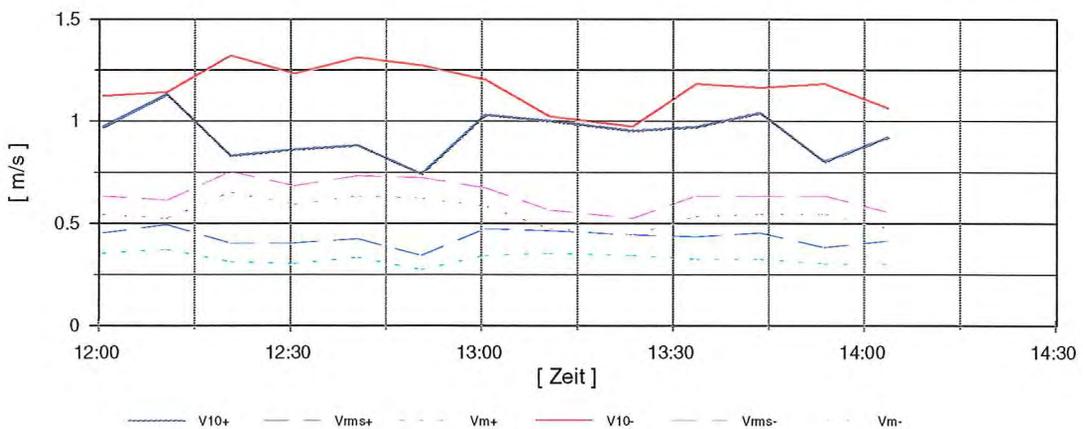


Abb. 138: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

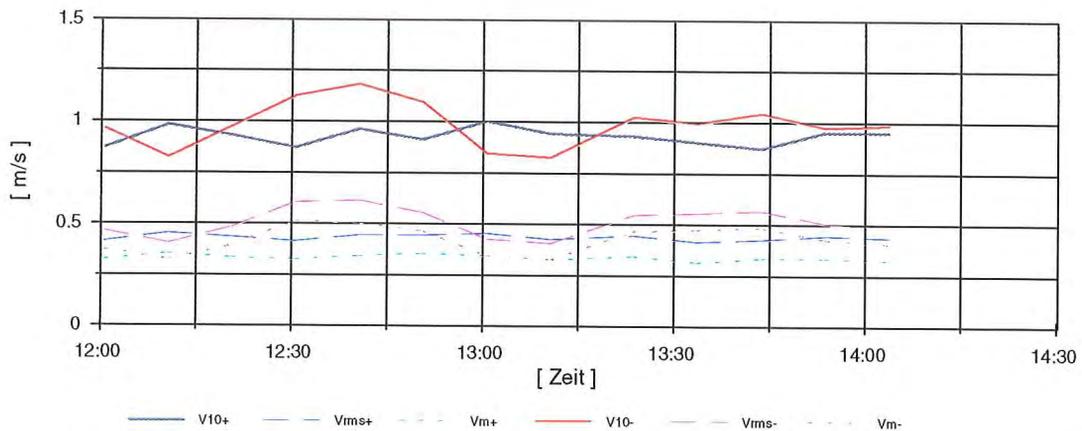


Abb. 139: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

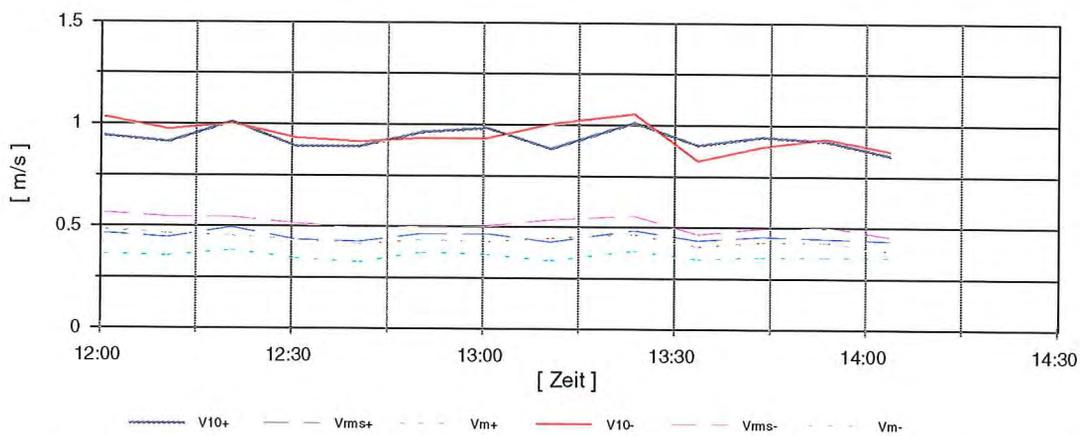


Abb. 140: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

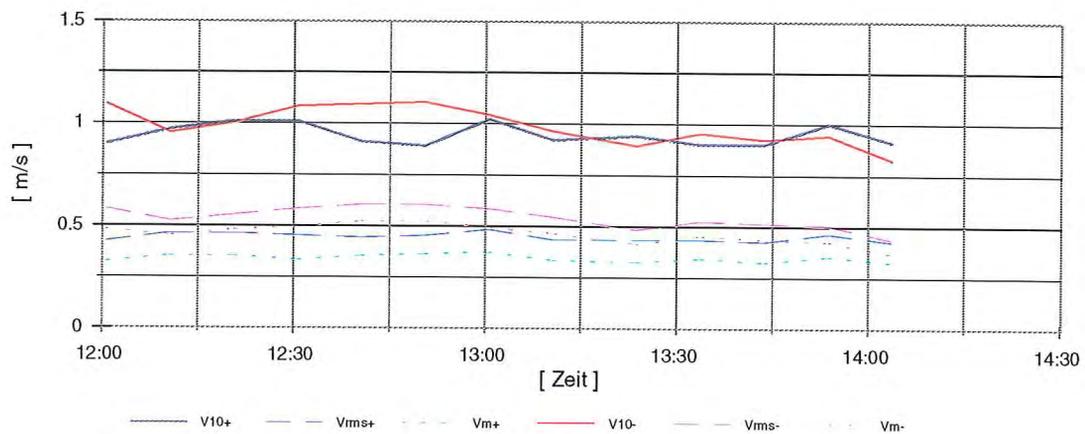


Abb. 141: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

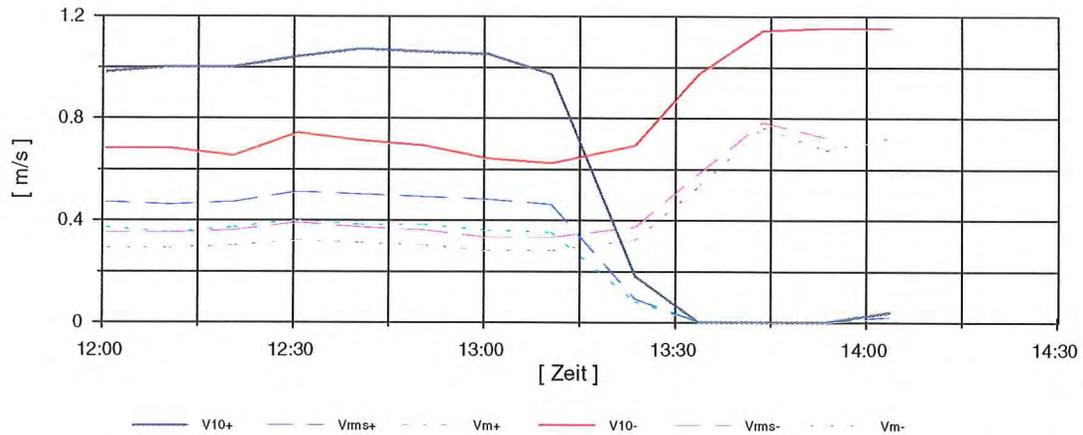


Abb. 142: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

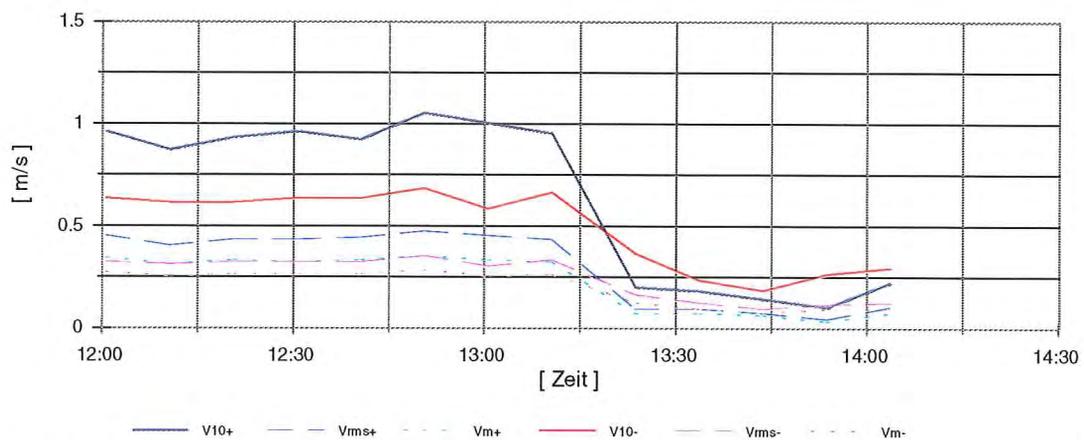


Abb. 143: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

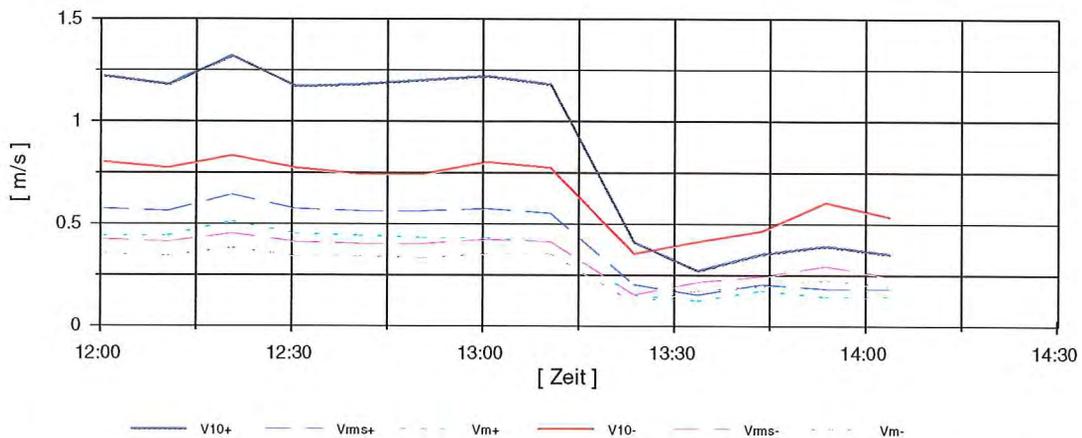


Abb. 144: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

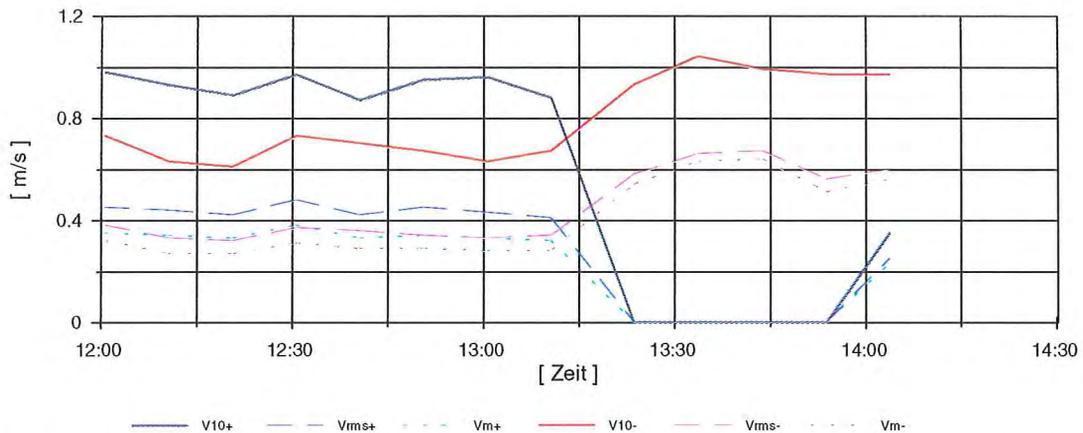


Abb. 145: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

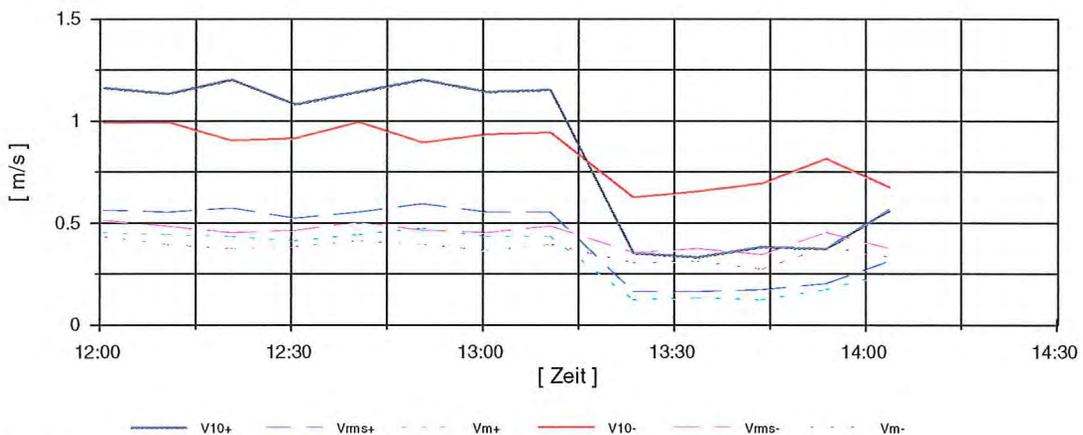


Abb. 146: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

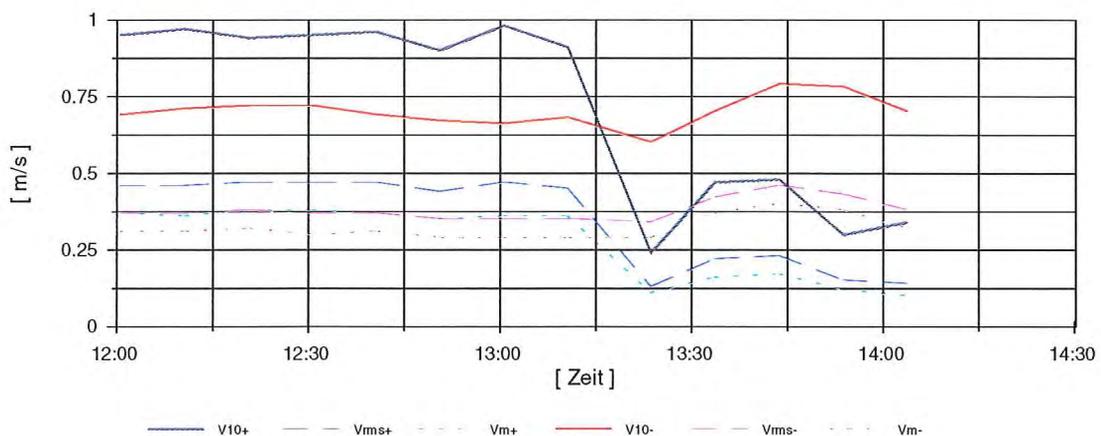


Abb. 147: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

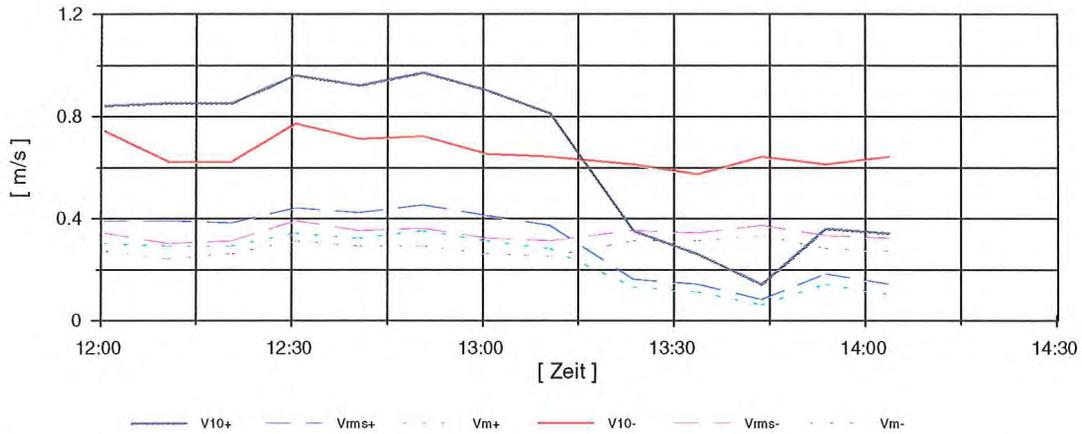


Abb. 148: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

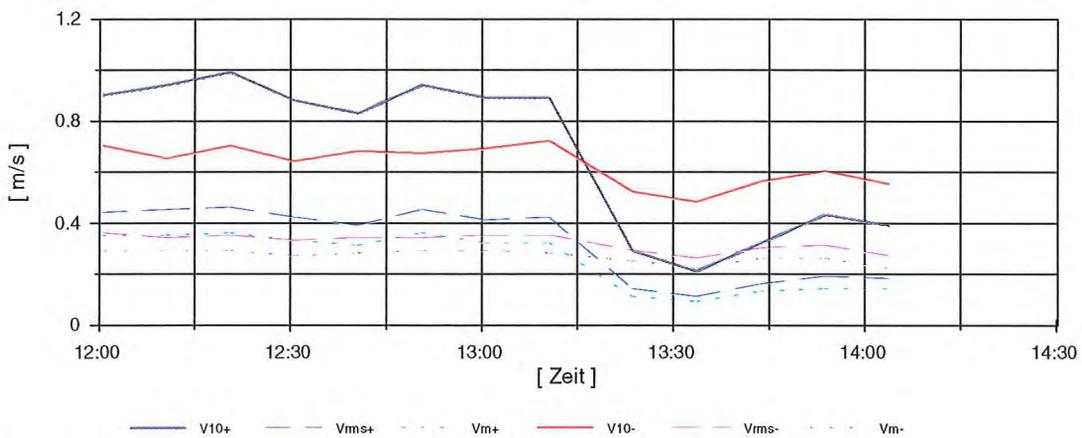


Abb. 149: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

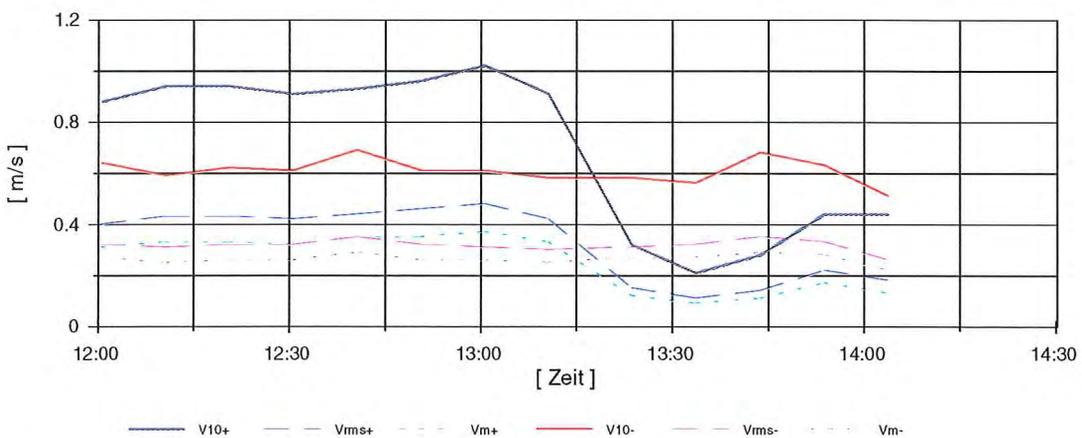


Abb. 150: Langperiodische küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (erhöhte Tide 22.09.1990)

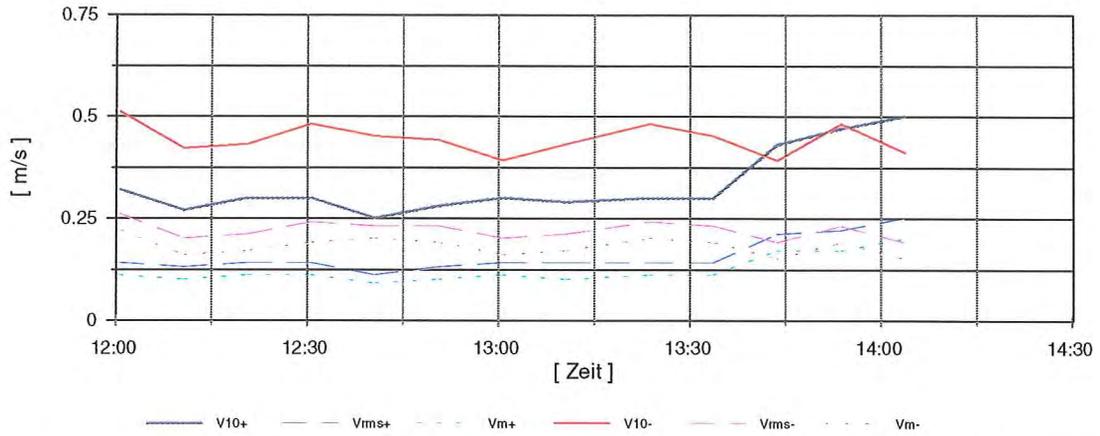


Abb. 151: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

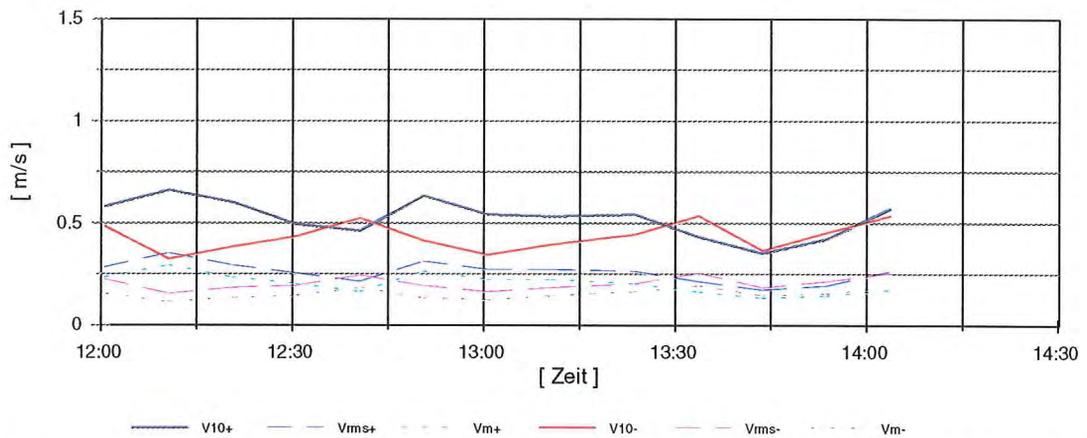


Abb. 152: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

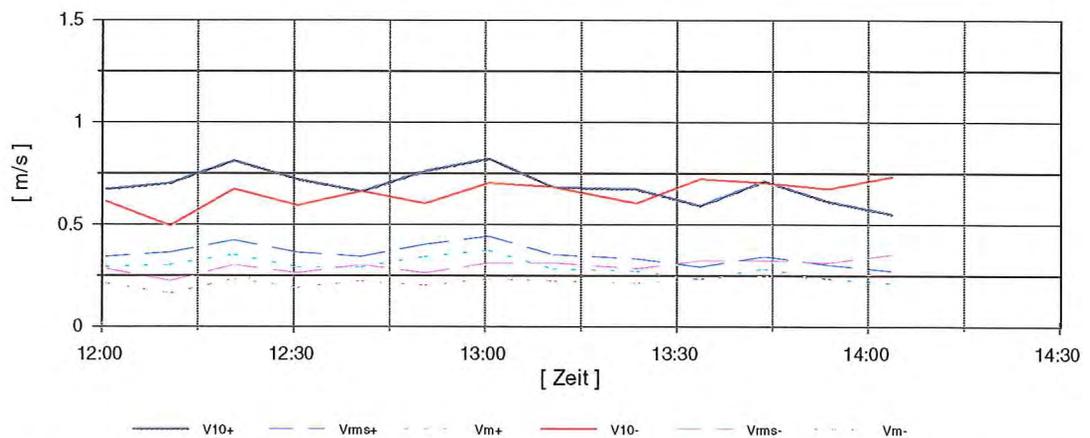


Abb. 153: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

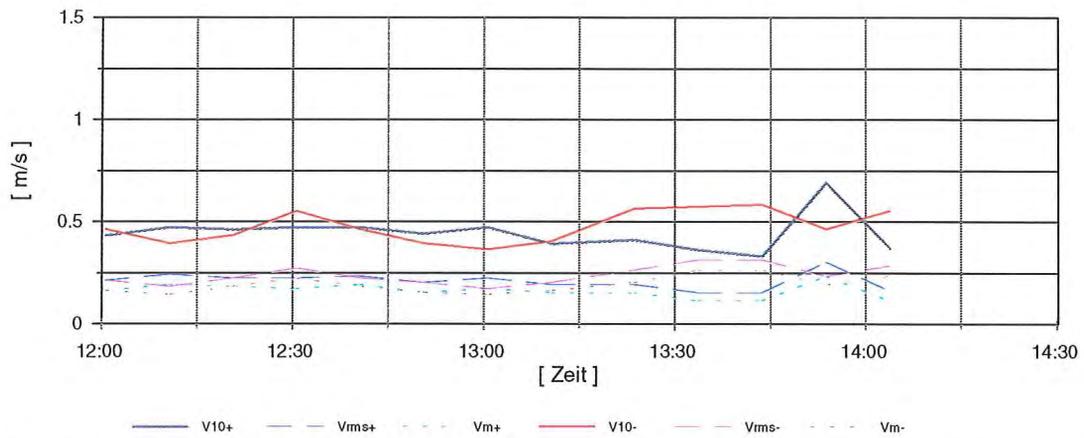


Abb. 154: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

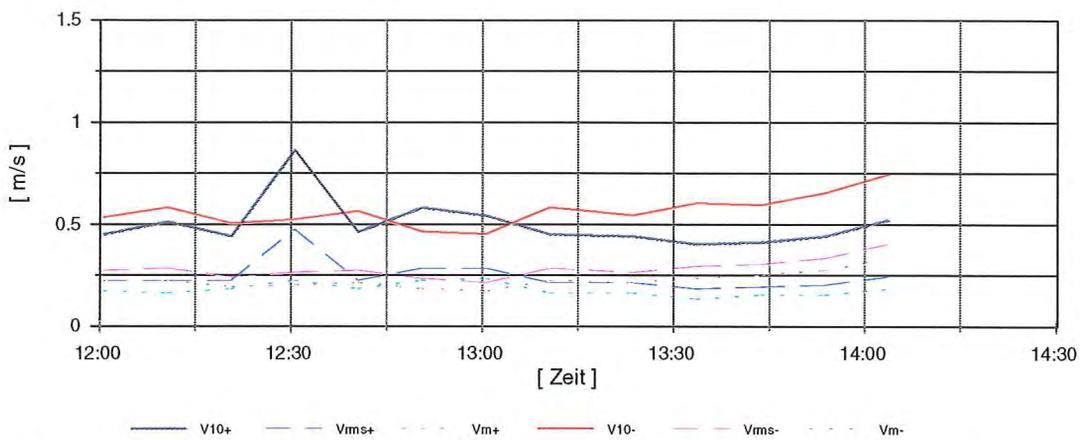


Abb. 155: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

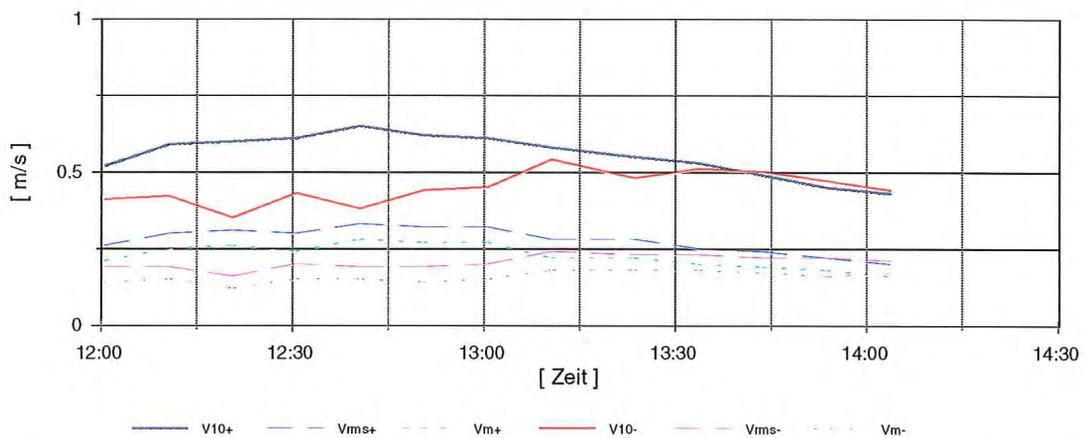


Abb. 156: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

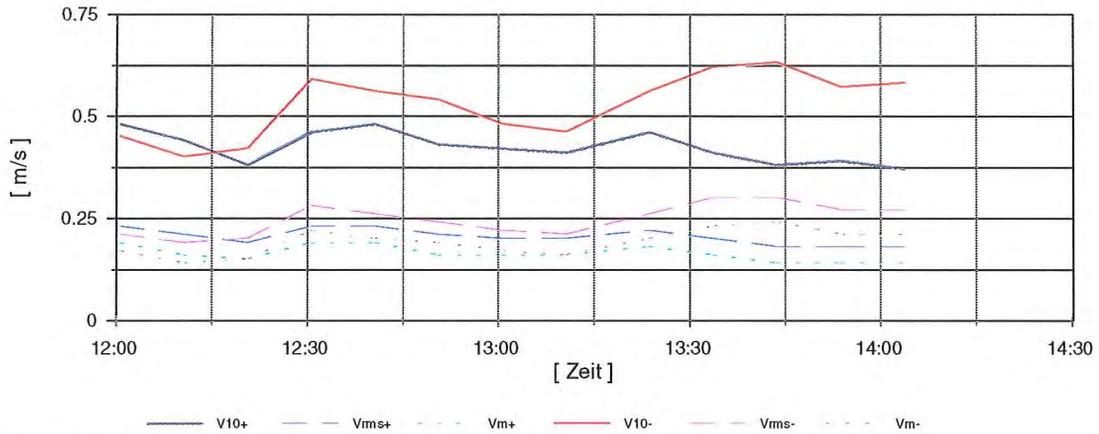


Abb. 157: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

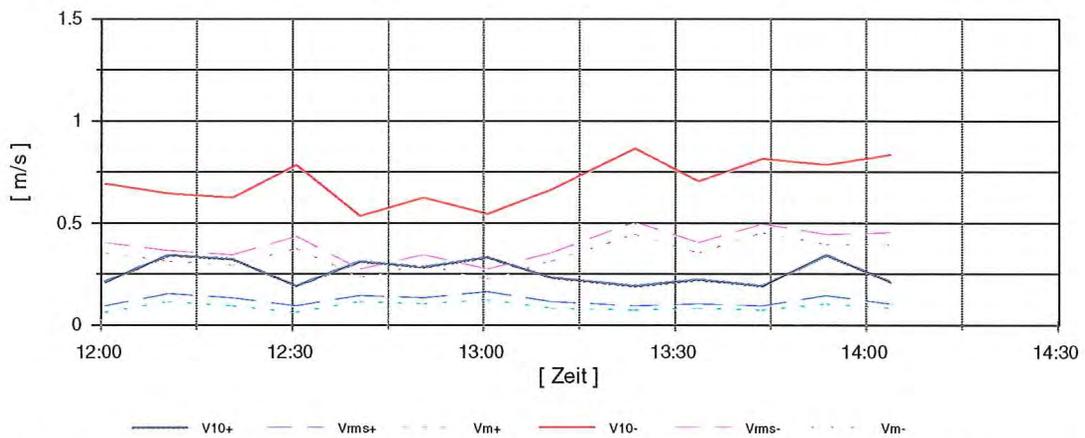


Abb. 158: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

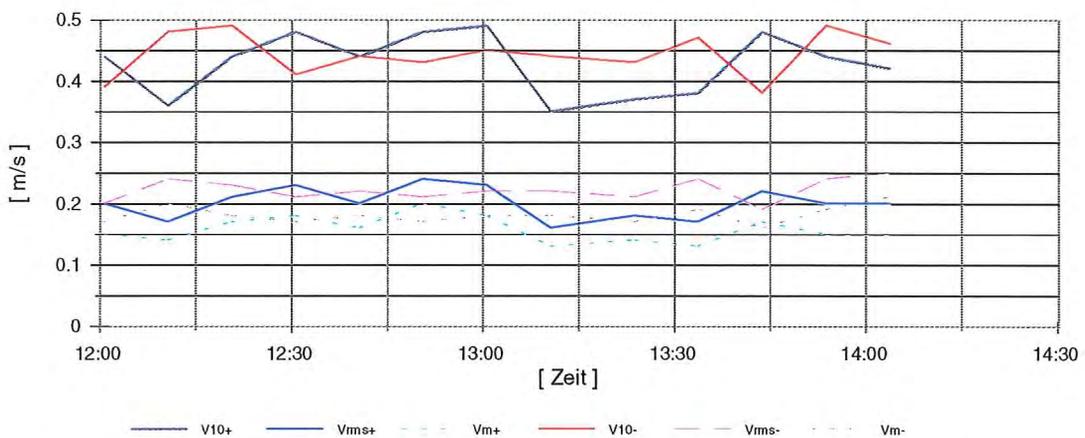


Abb. 159: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

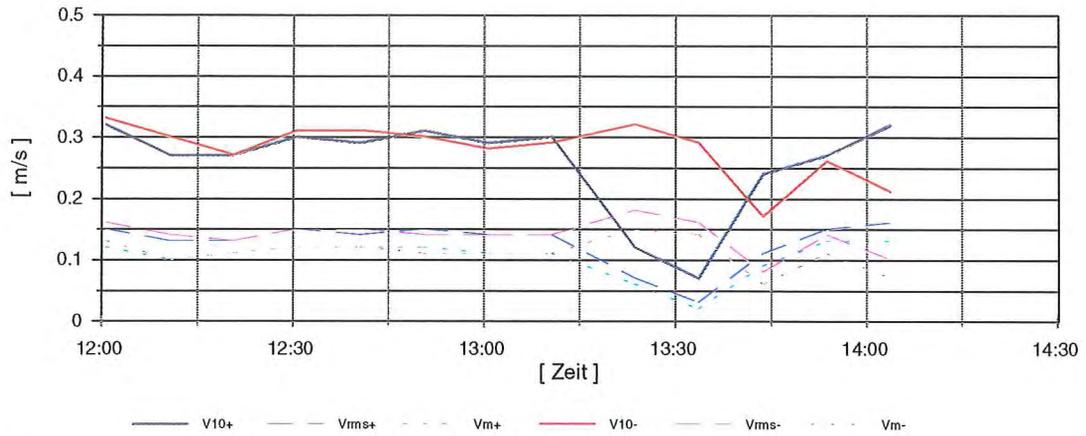


Abb. 160: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

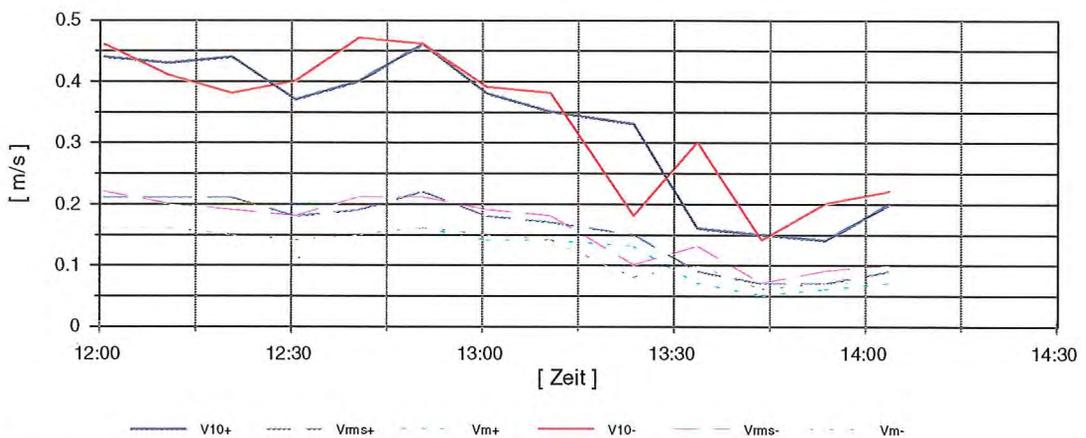


Abb. 161: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

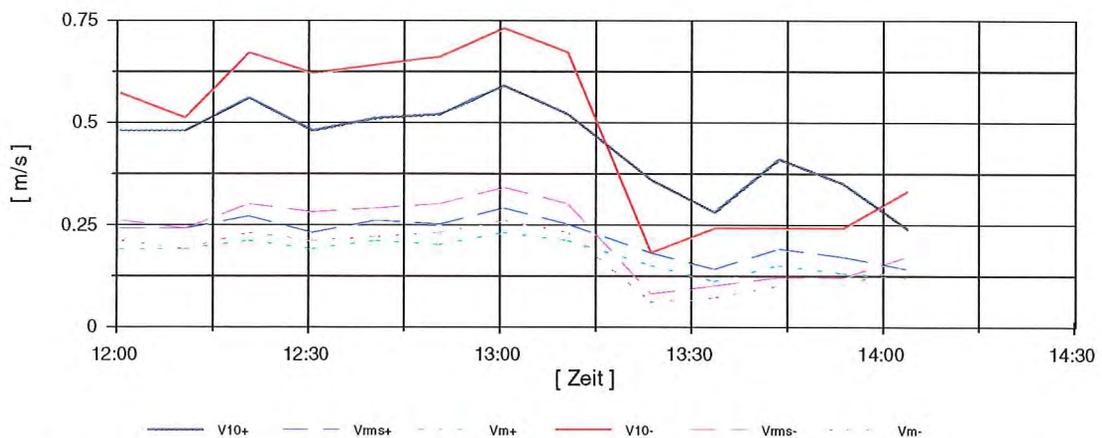


Abb. 162: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

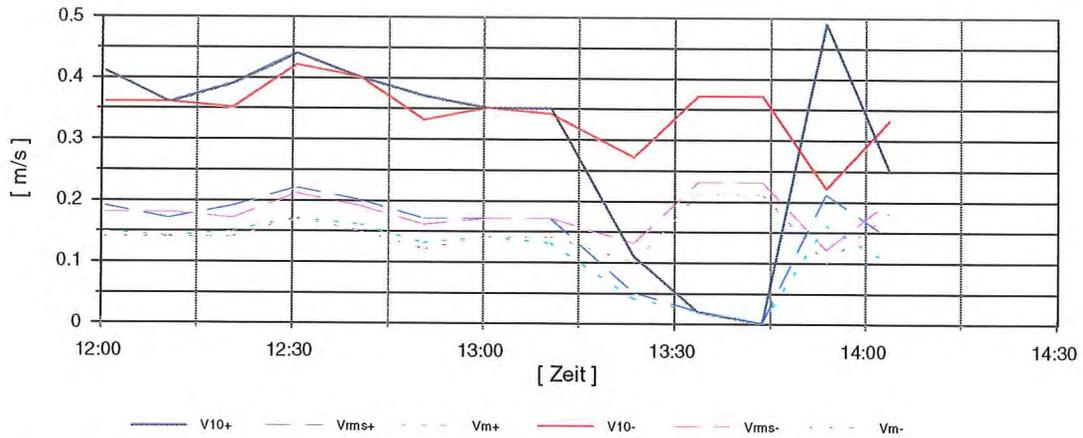


Abb. 163: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

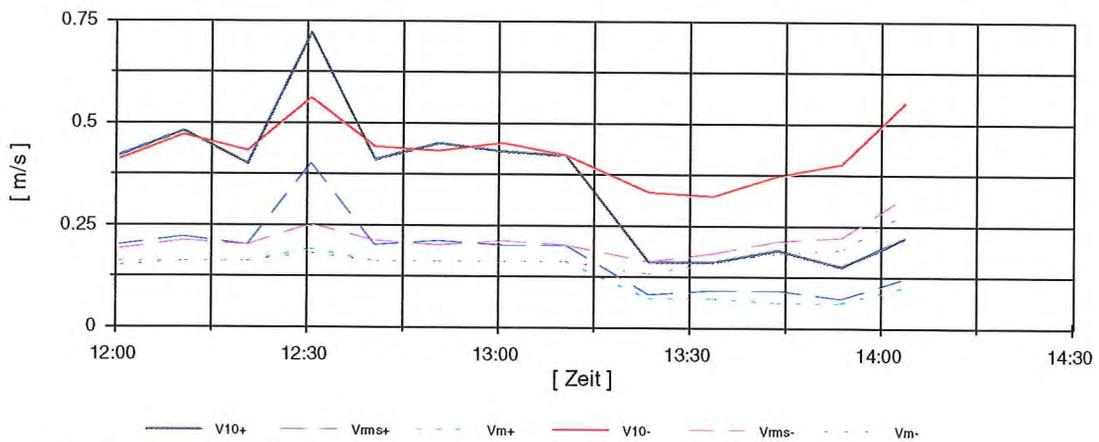


Abb. 164: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

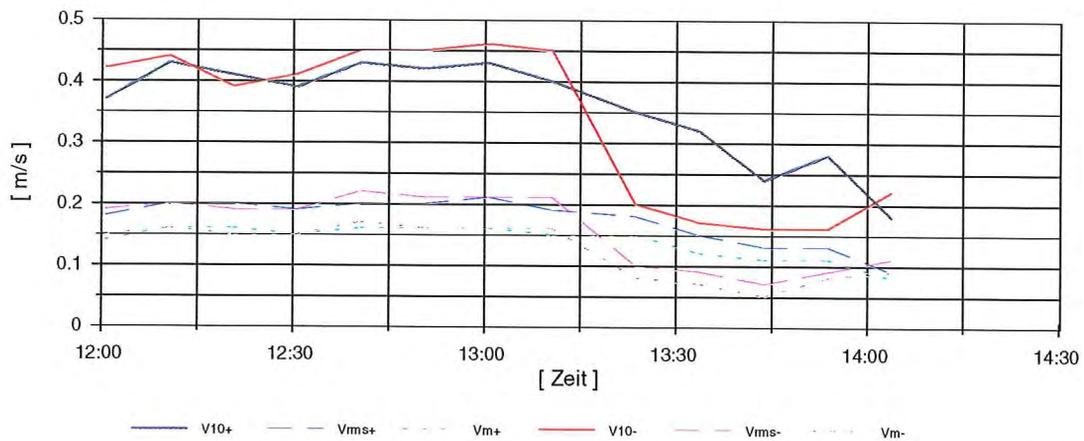


Abb. 165: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

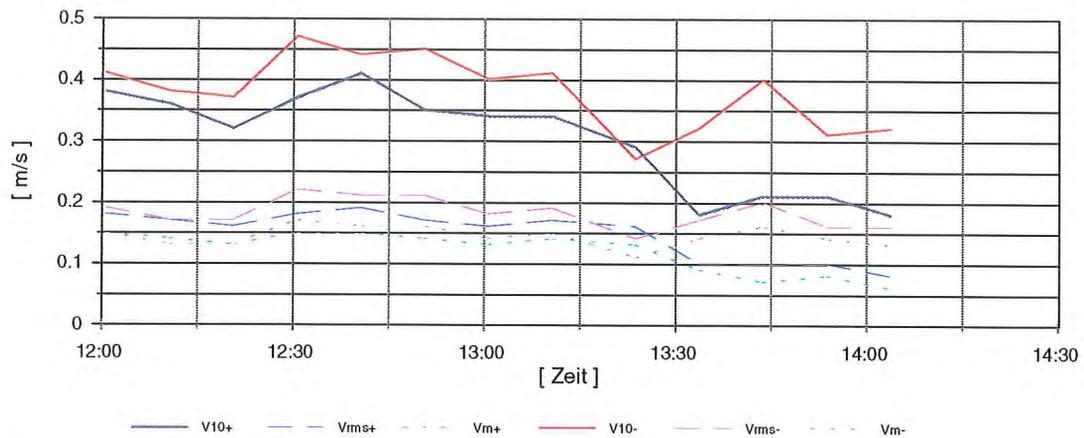


Abb. 166: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

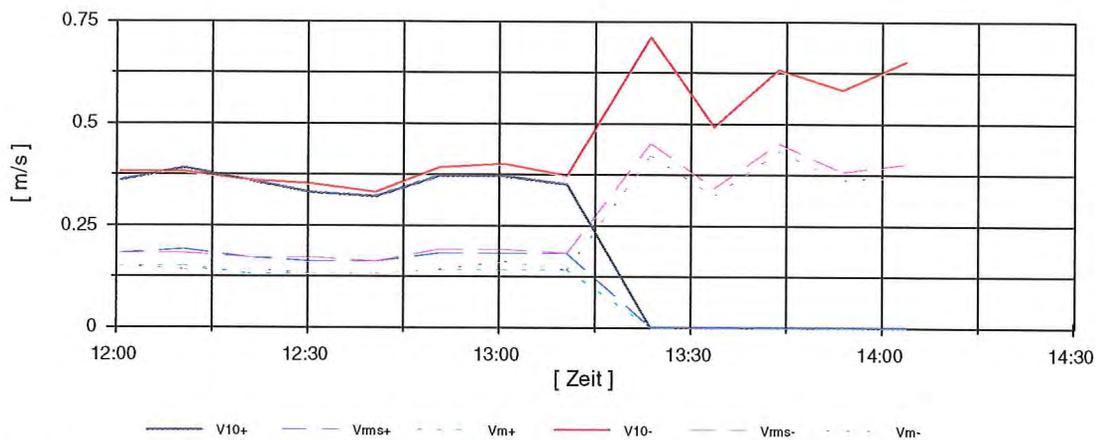


Abb. 167: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

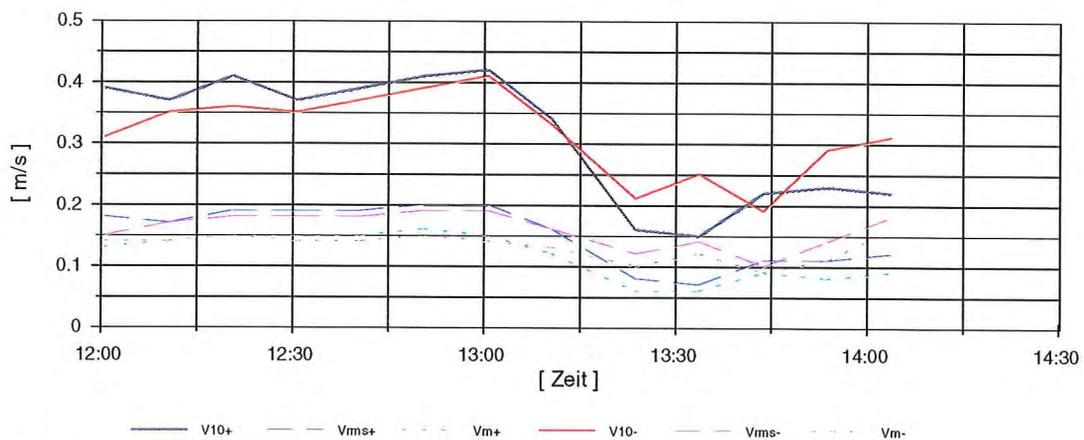


Abb. 168: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (erhöhte Tide vom 22.09.1990)

5.3.3 Seegang und seegangsinduzierte Strömungen bei einer Sturmflut

Der auf dem Vorstrand einschwingende Seegang weist maximale Höhen von mehr als 4,5 m auf. Bemerkenswert ist aber, daß der höchste Seegang auf dem Vorstrand bei etwa gleichbleibenden Wasserständen nicht zwangsläufig synchron zu den höchsten Wellen auf dem Strand führt (Abb. 169). Hier zeigt sich partiell in der Natur die Übertragbarkeit des von FÜHRBÖTER [1974] qualitativ beschriebenen „Paradoxons der Riffbrandung“: Infolge des höheren Seegangs auf dem Vorstrand und entsprechend stärkerer Energieumwandlung treten synchron zum Auftreten des höchsten Seegangs auf dem Vorstrand nicht die höchsten Wellen auf den Strand auf. Dieser Effekt wiederholt sich auf dem Strand in allen drei Meßreihen von der Tnw-Linie zum Strand. (Abb. 169 - 171). Bemerkenswert ist hierbei auch, daß an der landnahen Meßreihe 3 die Wellenhöhen größer sind als in der etwa im Bereich des Tmw seewärts davon befindlichen Reihe 2: Die Wellen branden bereits seeseits der Tmw-Linie und nehmen dadurch erheblich an Höhe ab, um sich danach - ohne eine vergleichbare Dissipation durch Brandung zu erfahren - infolge der abnehmenden Wassertiefen wieder aufzusteilen: Die Perioden der höchsten Wellen weisen - wie zumeist - einen ausgeprägten stochastischen Charakter auf; räumliche Variationen stehen in Zusammenhang mit der Dissipation der höchsten Wellen (Abb. 172 - 174). Die signifikanten und mittleren Wellenperioden weisen hingegen kaum Änderungen über die Vorstrand- und Strandbreite auf; im allgemeinen tritt landwärts gerichtet eine geringe Abnahme auf (Abb. 172 - 174).

Die langperiodischen Anteile des Seegangs weisen erhebliche Höhen auf: es treten auf dem Vorstrand, an der Station O_1 und vor allem an der Station M_1 Maximalwerte von über einem Meter auf (Abb. 175 - 177) mit Perioden zwischen 20 s und 40 s auf (Abb. 178 + 179). Während auf dem Vorstrand eher Wellengruppeneffekte als Ursache für das Auftreten dieser Erscheinungen anzusehen sind, müssen auf dem Strand Sekundärwirkungen von Brandungsvorgängen zwischen Vorstrand und Strand oder sogar zwischen Riffbogen und Vorstrand als deren Quelle vermutet werden. Hierfür spricht auch die Gegebenheit, daß die Aufeinanderfolge hoher und niedriger Wellen nicht von See zu Land hin mit kontinuierlich abnehmender Tendenz erfolgt (Abb. 175 - 177). Ebenso kann der Fakt, daß an den landnächsten Stationen M_3 und O_3 die längsten mittleren Perioden auftreten (Abb. 178 - 180), als Indiz für diese Einordnung angesehen werden.

Die räumliche Verteilung der Strömungen zeigt in weiten Bereichen eine Bestätigung bereits früher beobachteter Phänomene im Bühnenfeld überwiegend seewärts gerichteter Strömungen [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b]. Im hier betrachteten Fall ist aber erkennbar, daß die treibenden Kräfte nicht nur durch weiße Roller erzeugt werden, sondern auch durch einen - allerdings nicht sehr starken - auflandigen gerichteten Transport in Höhe der MTnw-Linie im zentralen und östlichen Teil des Bühnenfeldes, der an den Stationen M_1 und O_1 erkennbar wird (Abb. 182 + 183). In den höheren Bereichen des Strandes sind hingegen die Bilanzen der Strömungen überwiegend ablandig (Abb. 184 - 189). Noch deutlicher wird diese Tendenz bei Betrachtung der langperiodischen Anteile (Abb. 190 - 198): Die hier offenbar wirksamen Trecker [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b] bewirken eine dominant seewärts gerichtete Strömung. Ein sicheres Indiz dafür, daß es sich bei den langperiodischen Strömungen um seegangsinduzierte Strömungen bei Brandung handelt, wird auch anhand der Tatsache deutlich, daß die Geschwindigkeiten landwärts zunehmen.

Die strandparallelen Strömungen sind lediglich im westlichen Bereich des Bühnenfeldes auf der Höhe der MTnw-Linie ausgeglichen bei zeitweilig oberdriftiger Tendenz (Abb. 199). An allen anderen Stationen (Abb. 200 - 207) herrscht eine überwiegend unterdriftige Strömung vor. Effekte der Bühnen sind hierbei nicht erkennbar, da deren Höhenlage landwärts zunimmt, ohne daß damit eine gleichsinnige Abnahme der strandparallelen Geschwindigkeiten einhergeht (Abb. 199 - 207). Auch bei Betrachtung der langperiodischen Anteile ist keine eindeutige Bühnenwirkung feststellbar: Im Bereich der Tnw-Linie sind die Strömungsgeschwindigkeiten beispielsweise an den Stationen W_1 und O_1 , die in Bühnennähe liegen, größer als an der Station M_1 in der Mitte des Bühnenfeldes (Abb. 208 - 210). Die gegenüber der see- und landwärtigen Meßreihe höheren Geschwindigkeiten in der zentralen sind wohl eher auf die Intensität der Brandung als auf Bühnenwirkung zurückzuführen (Abb. 211 - 216).

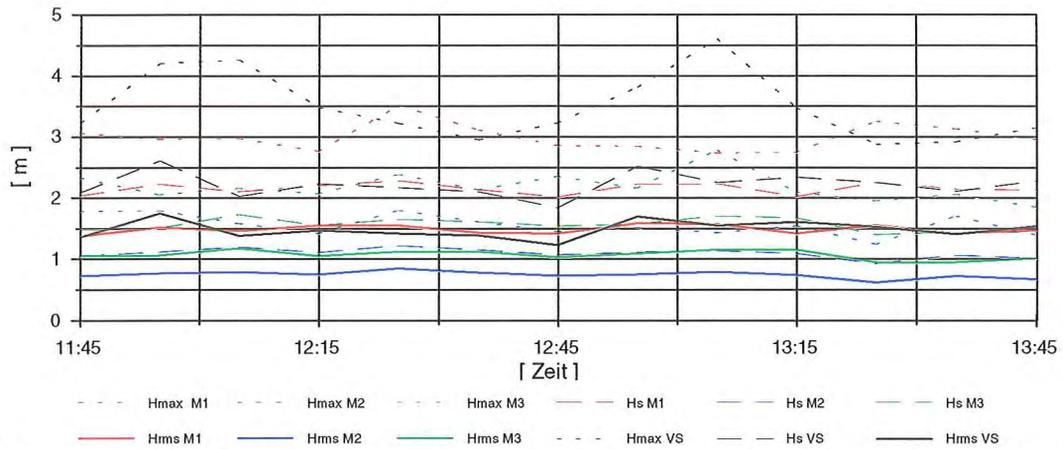


Abb. 169: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

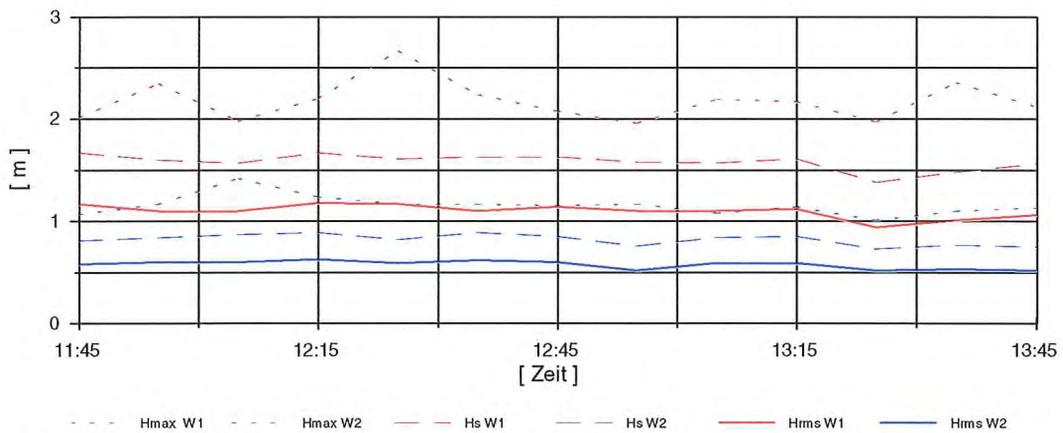


Abb. 170: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

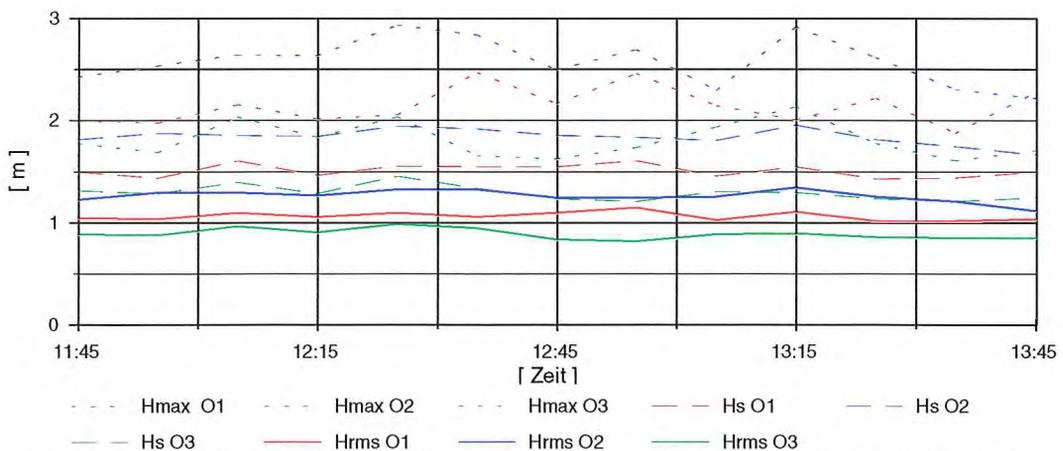


Abb. 171: Charakteristische Wellenhöhen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

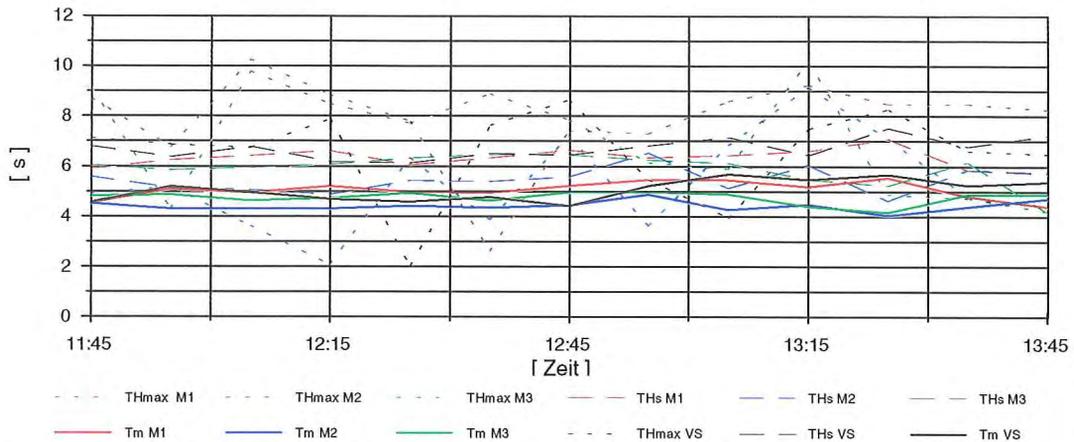


Abb. 172: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

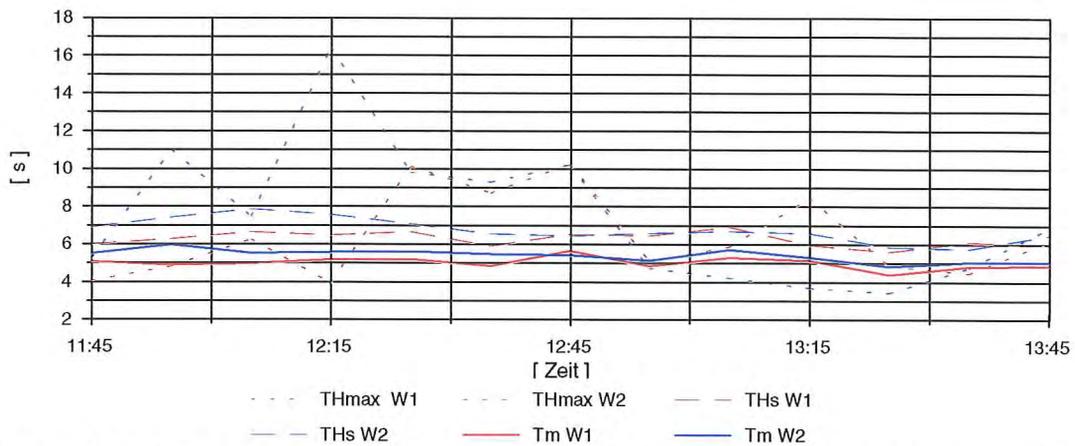


Abb. 173: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

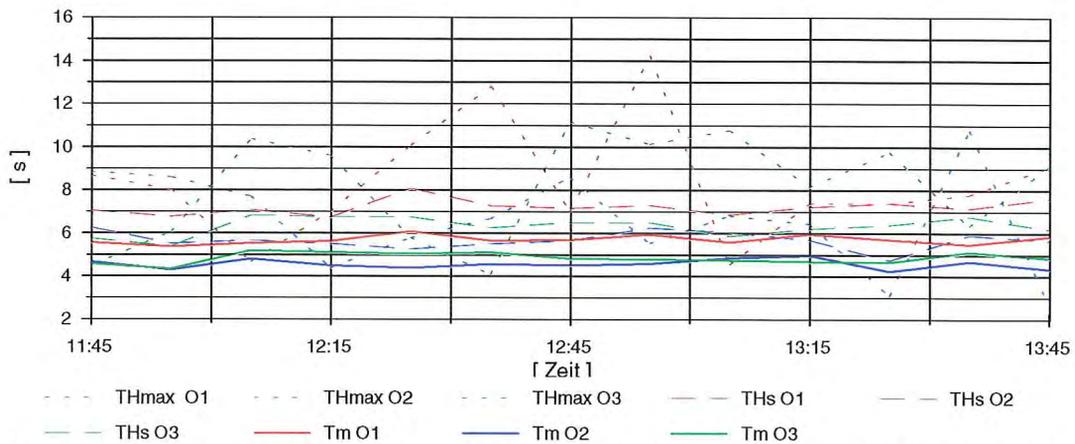


Abb. 174: Charakteristische Wellenperioden auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

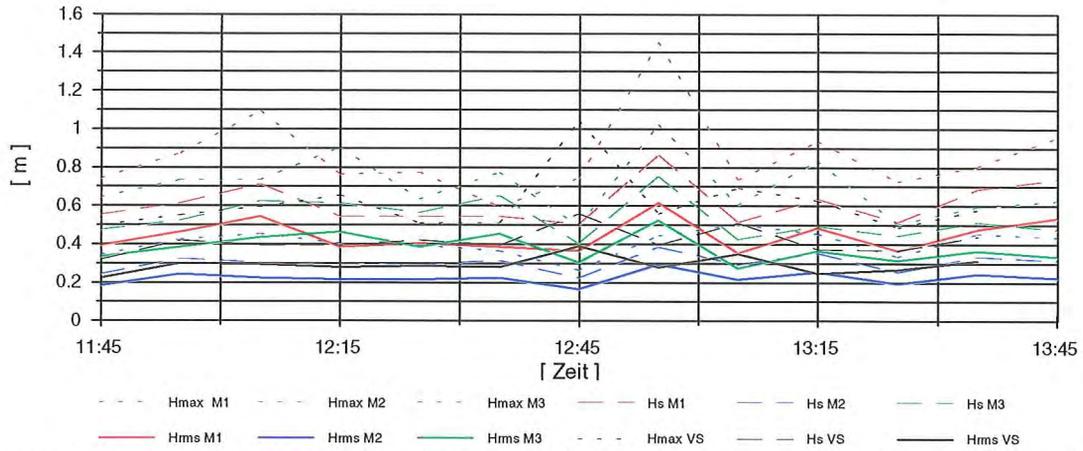


Abb. 175: Charakteristische Höhen langperiodischer Höhen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

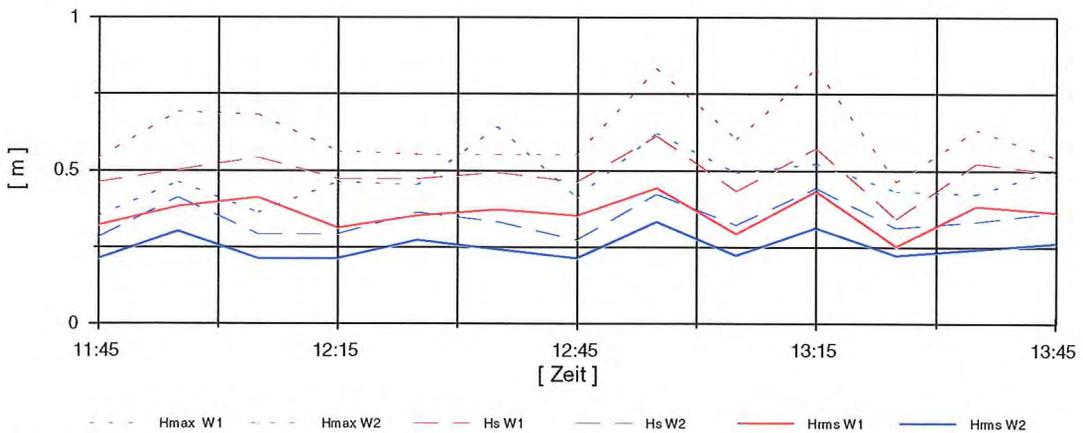


Abb. 176: Charakteristische Höhen langperiodischer Höhen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

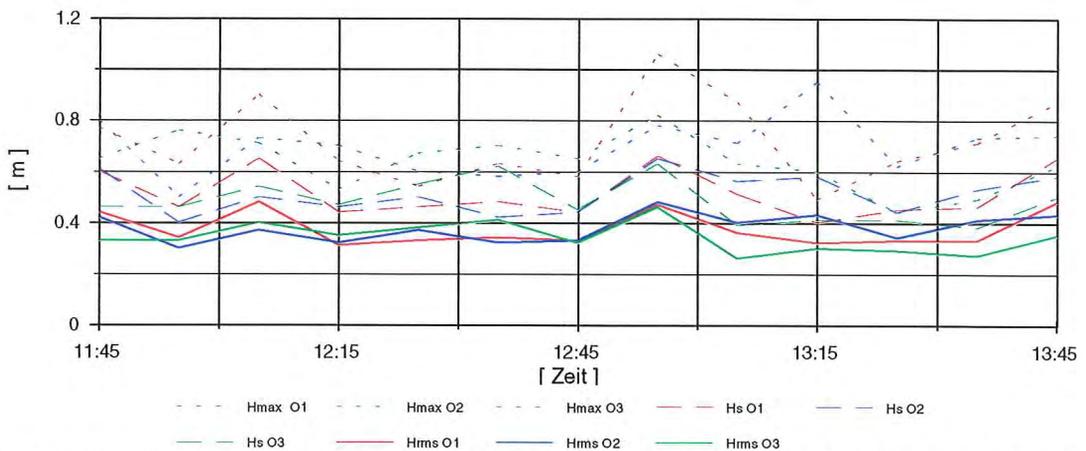


Abb. 177: Charakteristische Höhen langperiodischer Höhen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

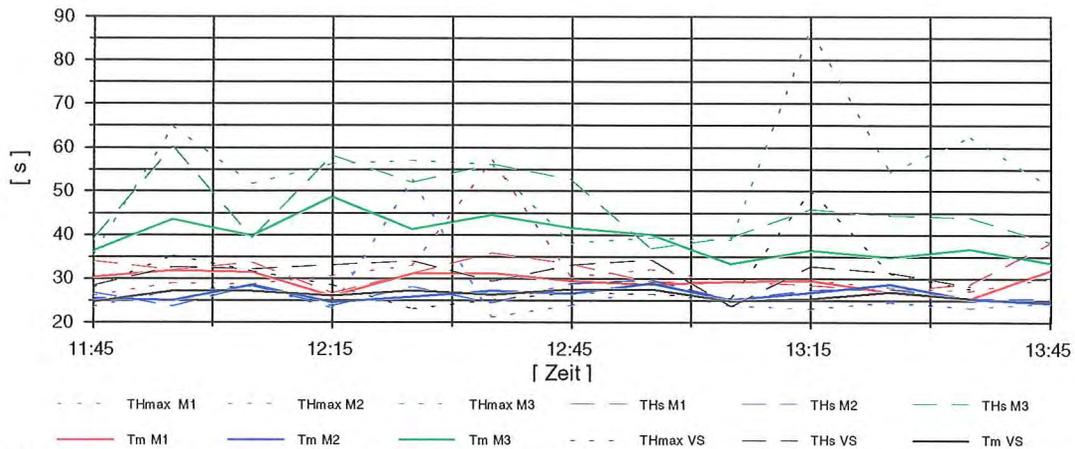


Abb. 178: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im mittleren Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

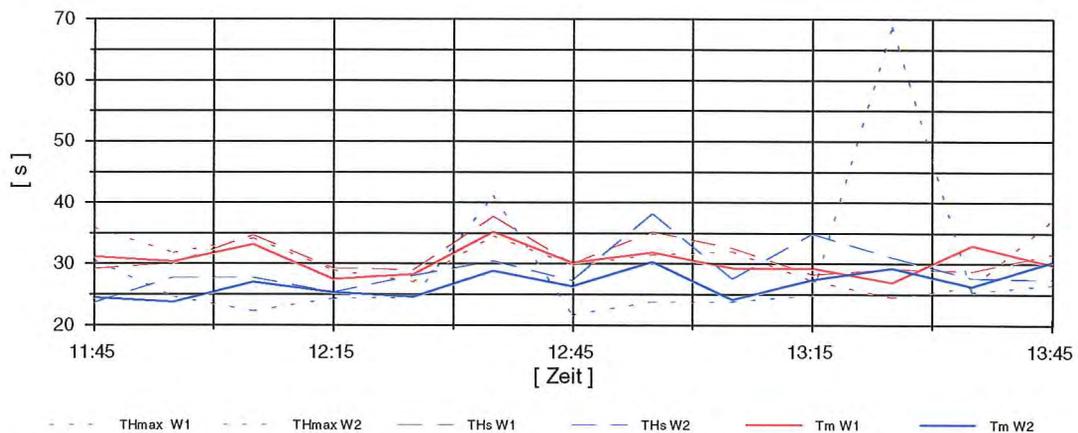


Abb. 179: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im westlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

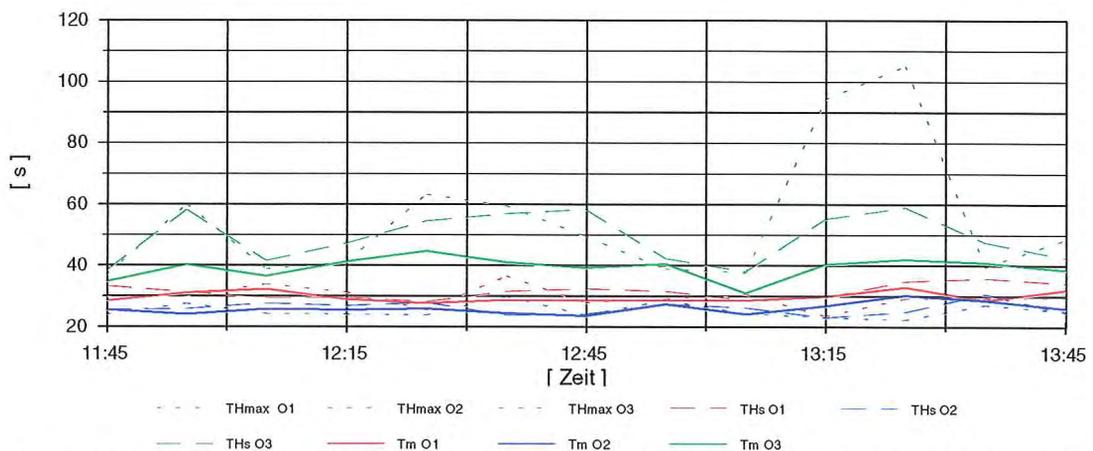


Abb. 180: Charakteristische Perioden langperiodischer Wellen auf dem Vorstrand und im östlichen Bereich des Hauptmeßfeldes um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

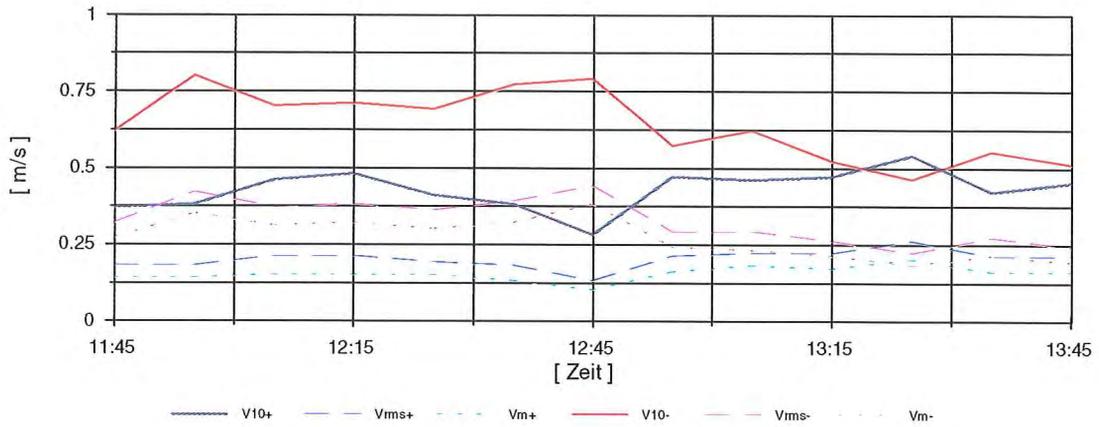


Abb. 181: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

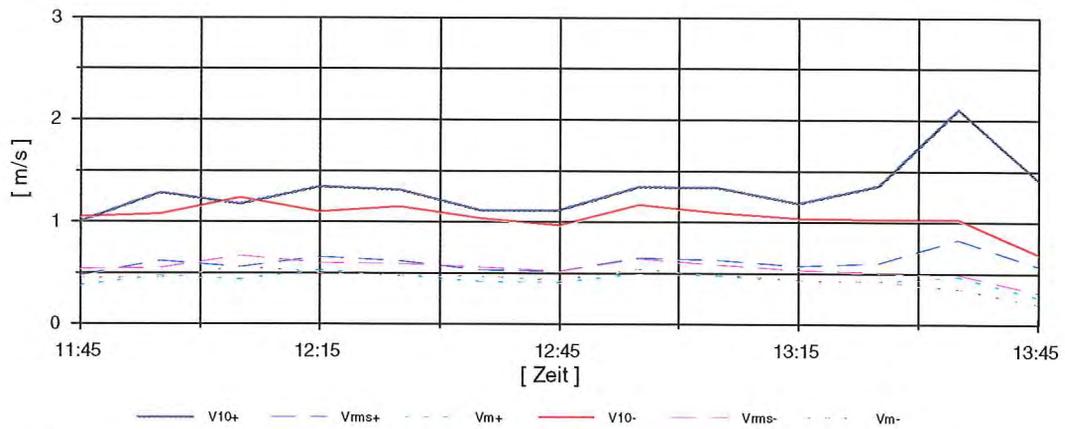


Abb. 182: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

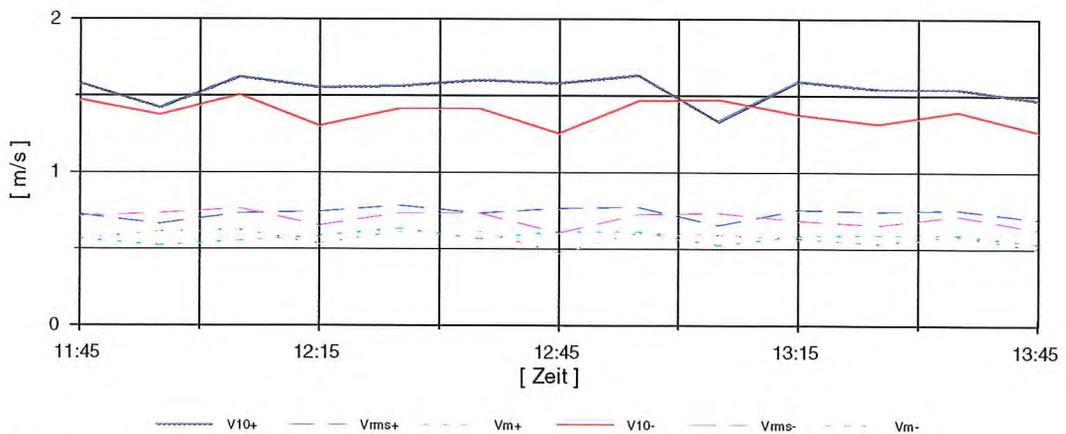


Abb. 183: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

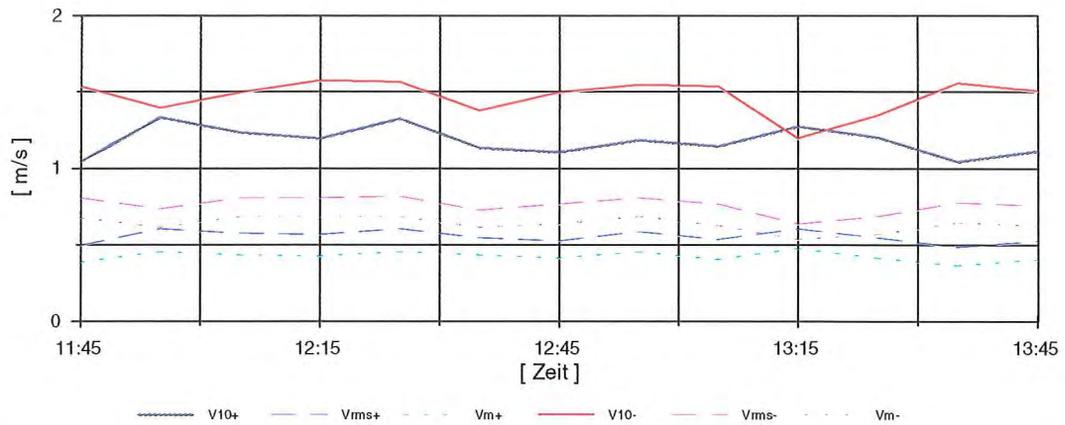


Abb. 184: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

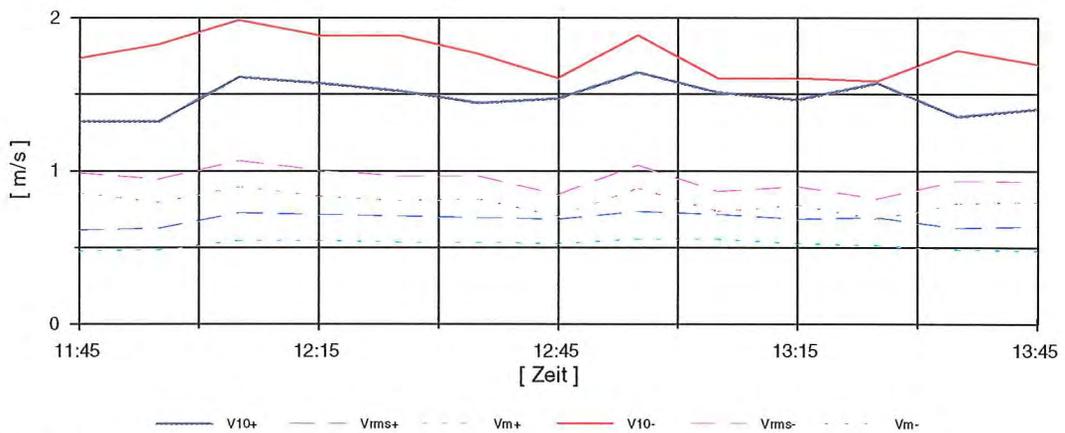


Abb. 185: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

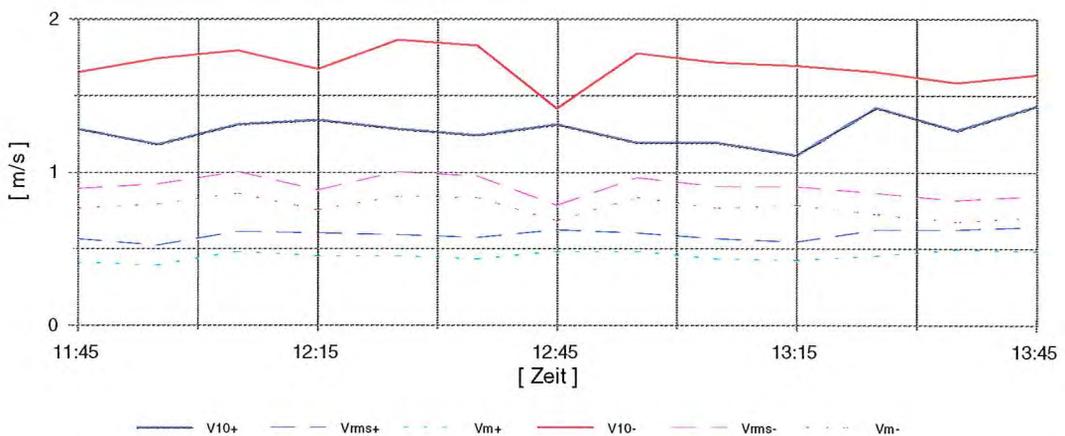


Abb. 186: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

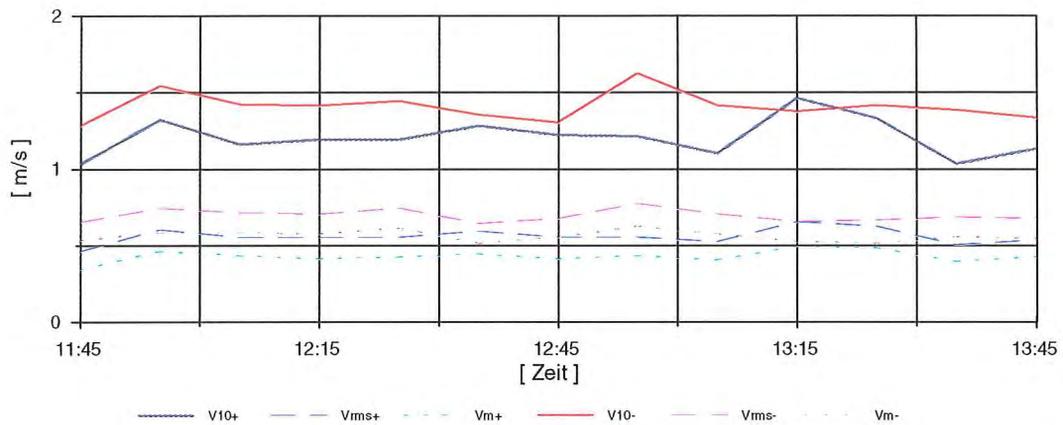


Abb. 187: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

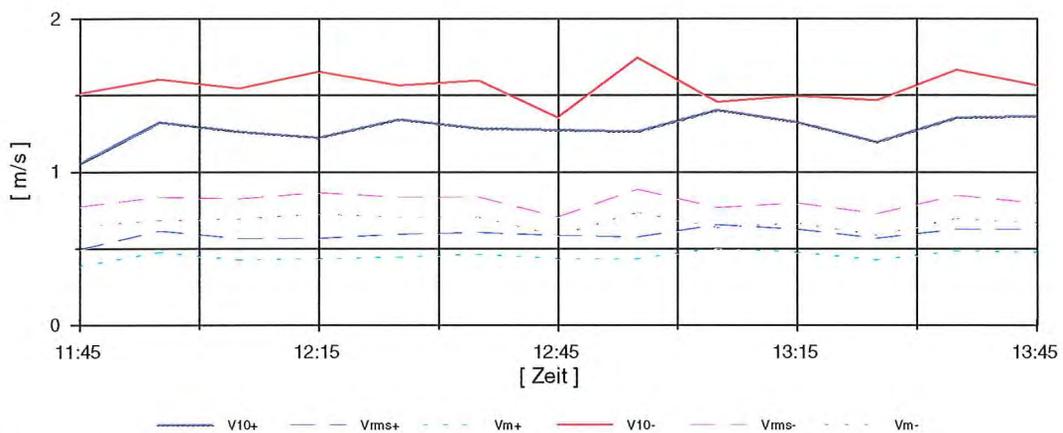


Abb. 188: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Normaltide vom 24.09.1990)

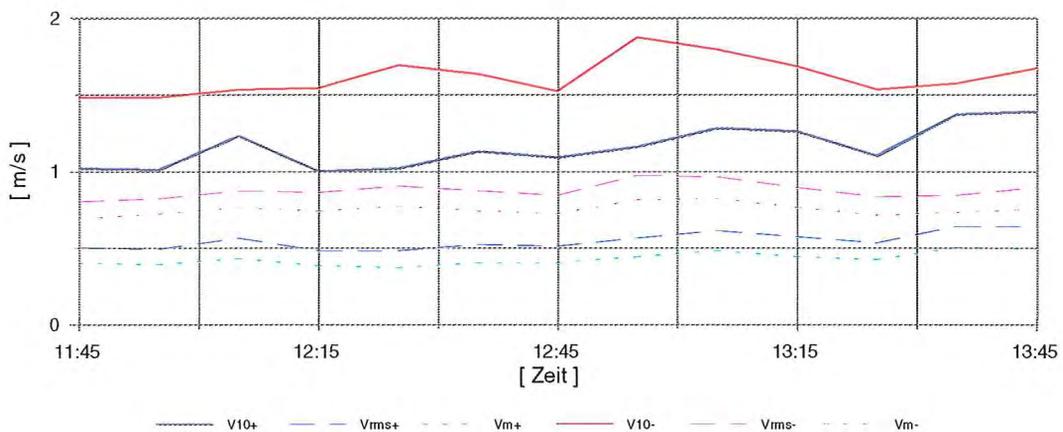


Abb. 189: Küstennormale Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

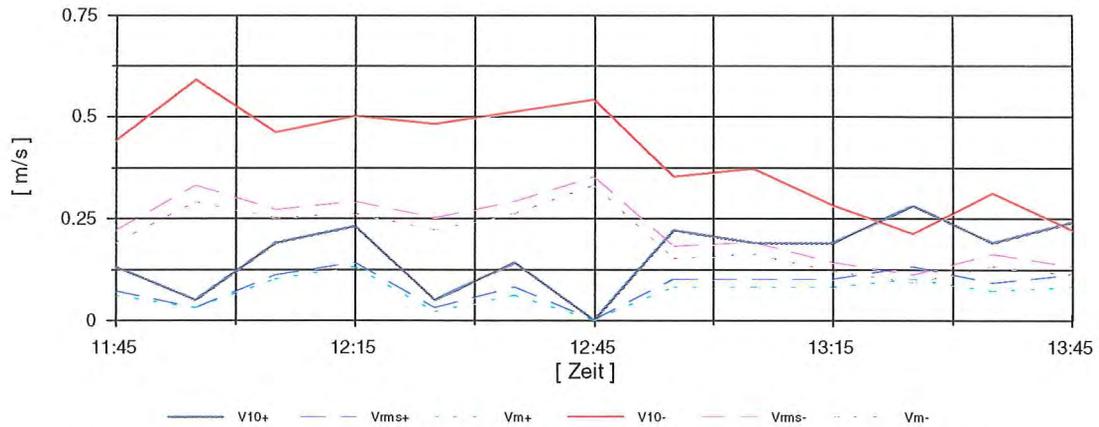


Abb. 190: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

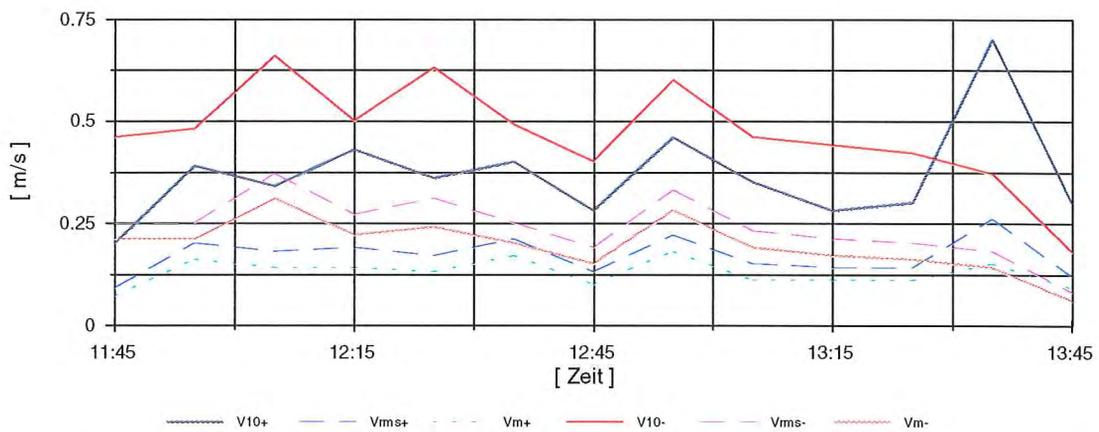


Abb. 191: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

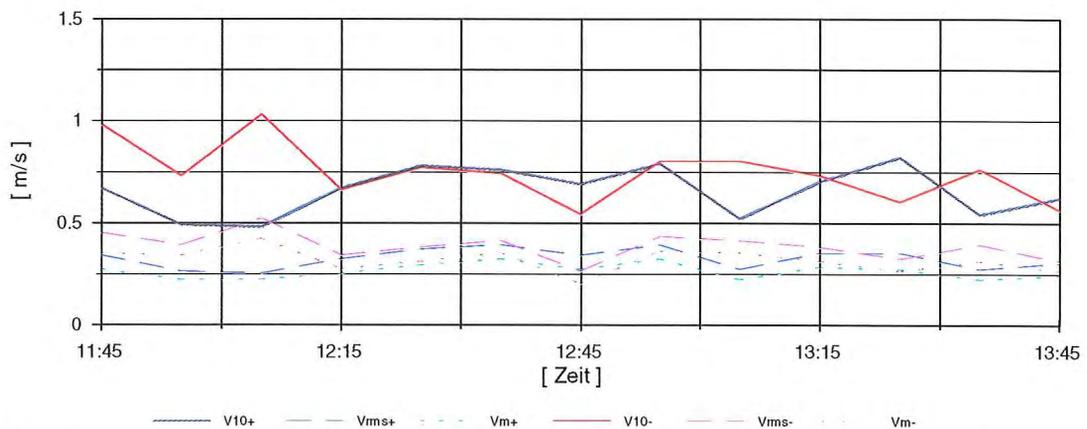


Abb. 192: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

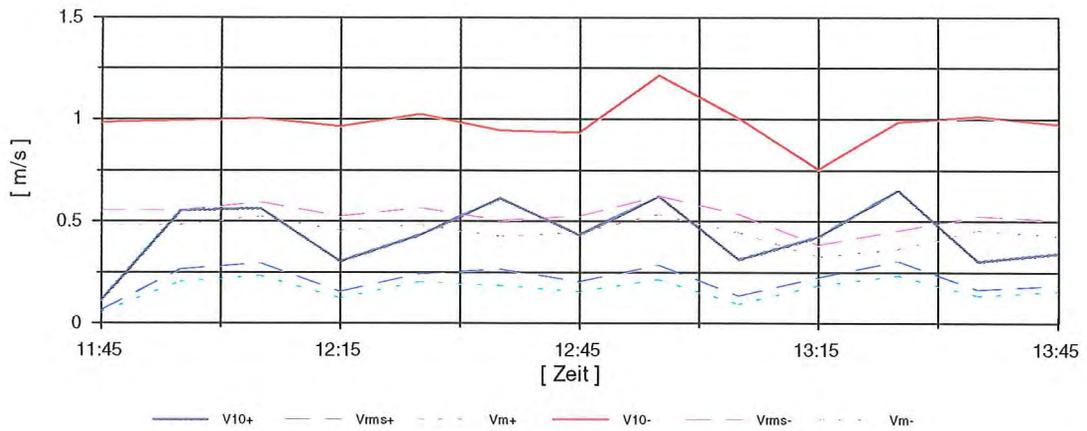


Abb. 193: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

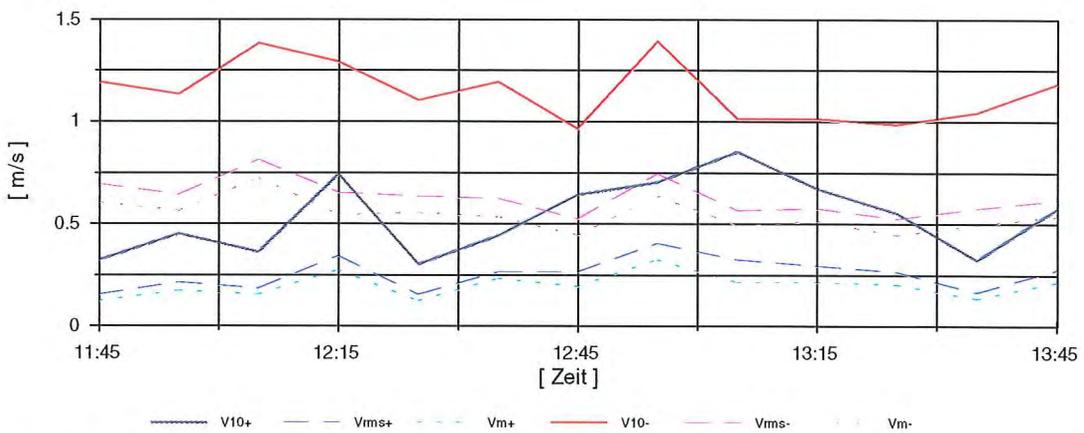


Abb. 194: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

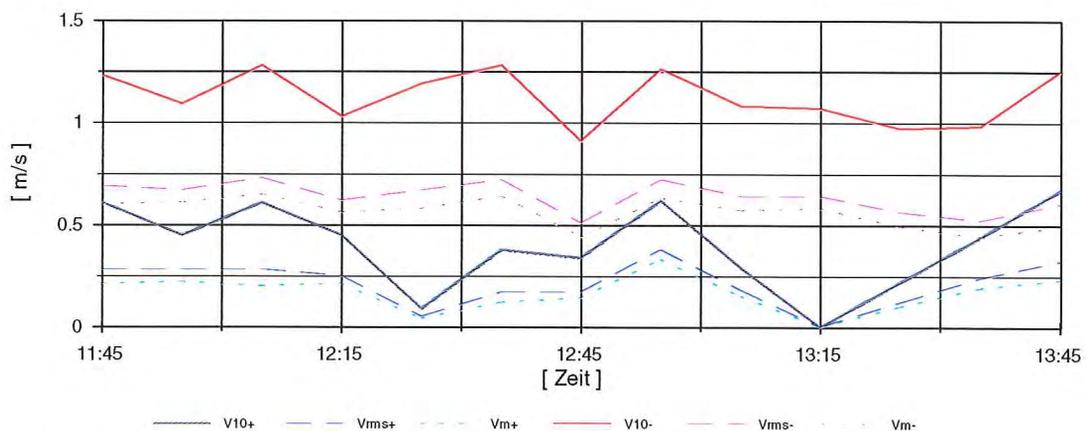


Abb. 195: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

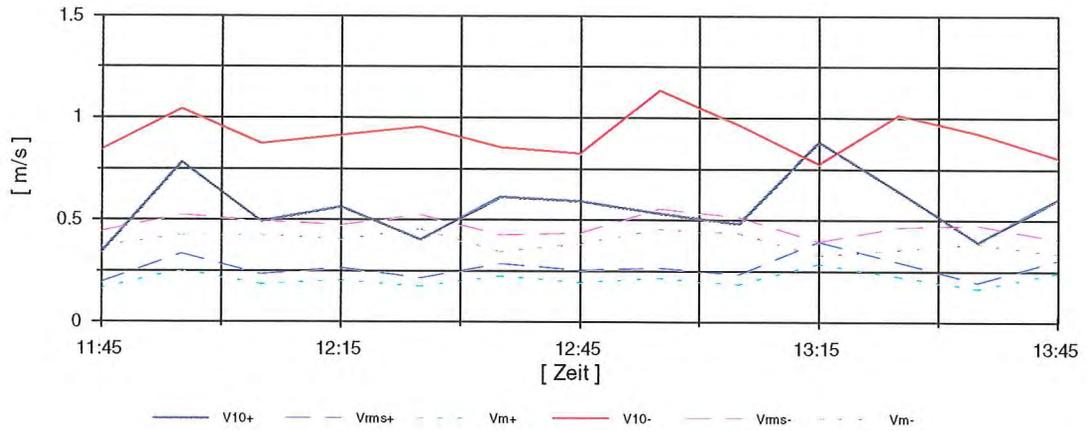


Abb. 196: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

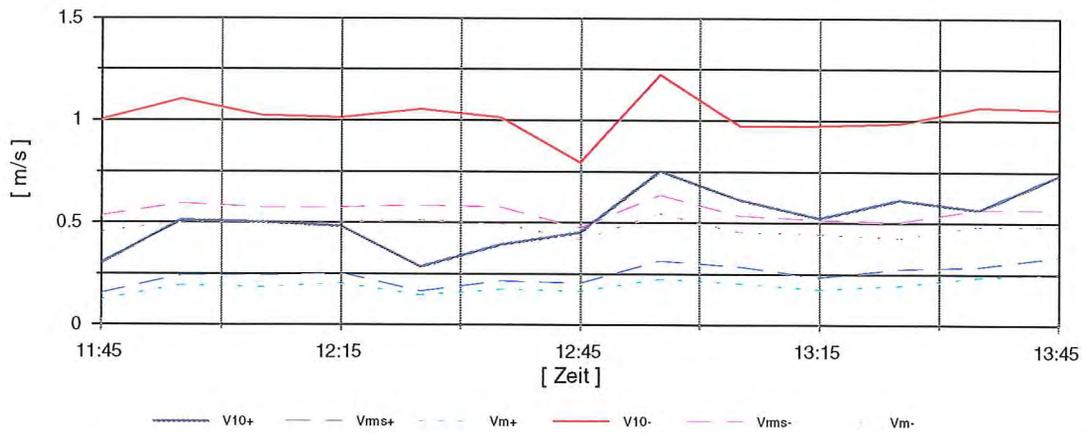


Abb. 197: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

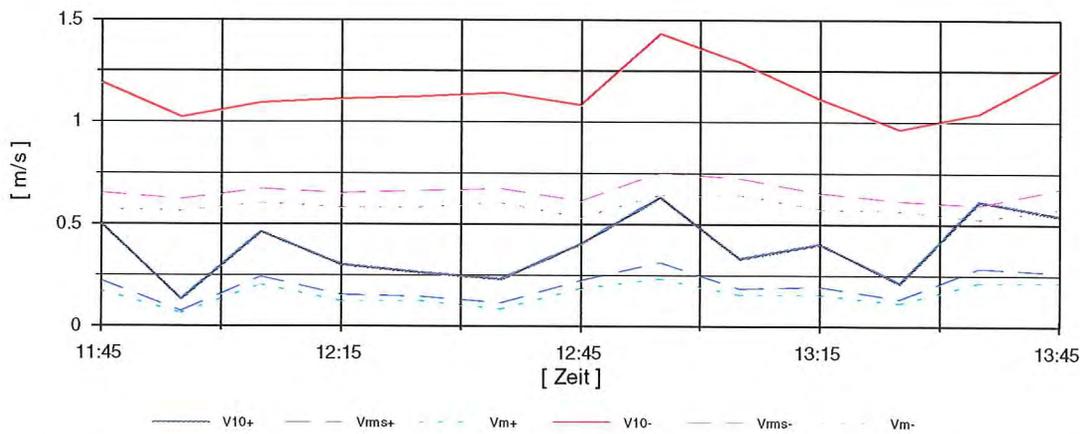


Abb. 198: Langperiodische Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

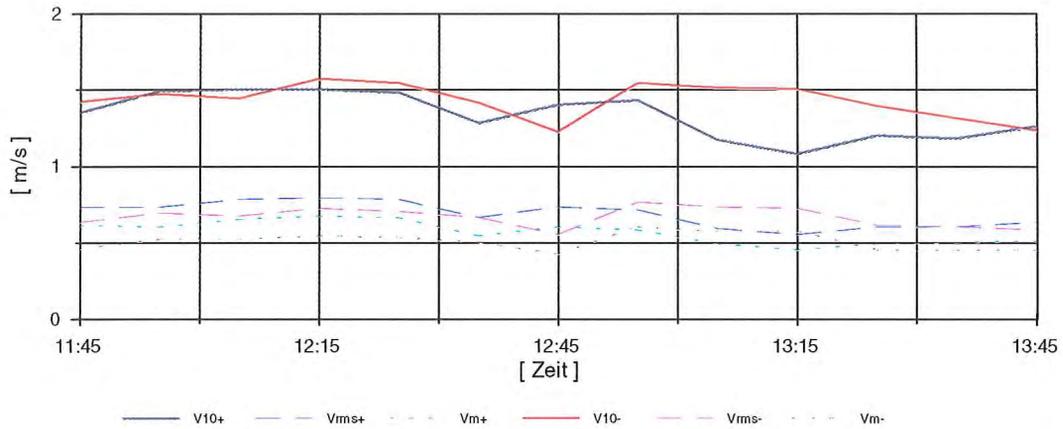


Abb. 199: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

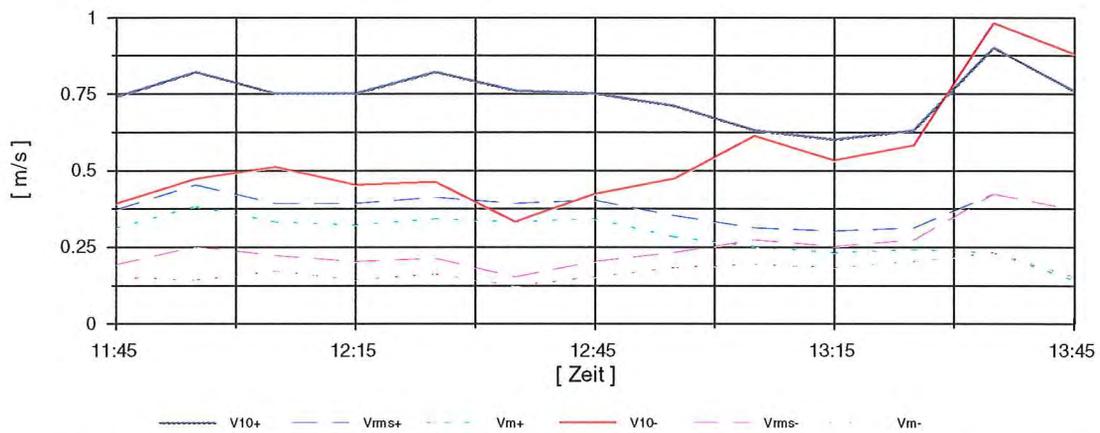


Abb. 200: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

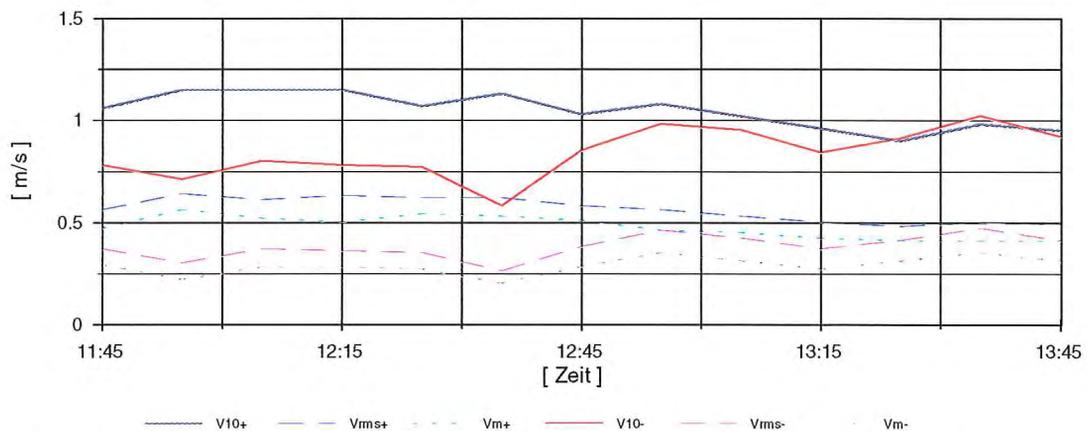


Abb. 201: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

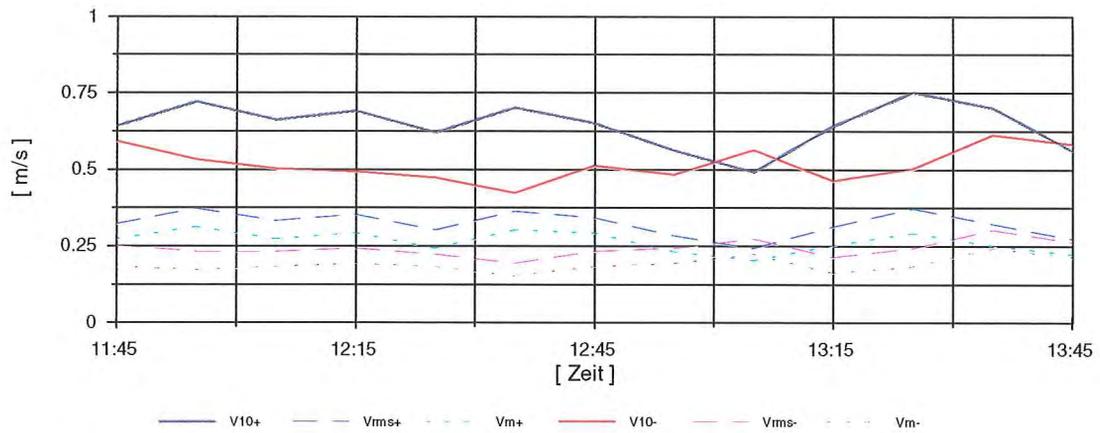


Abb. 202: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

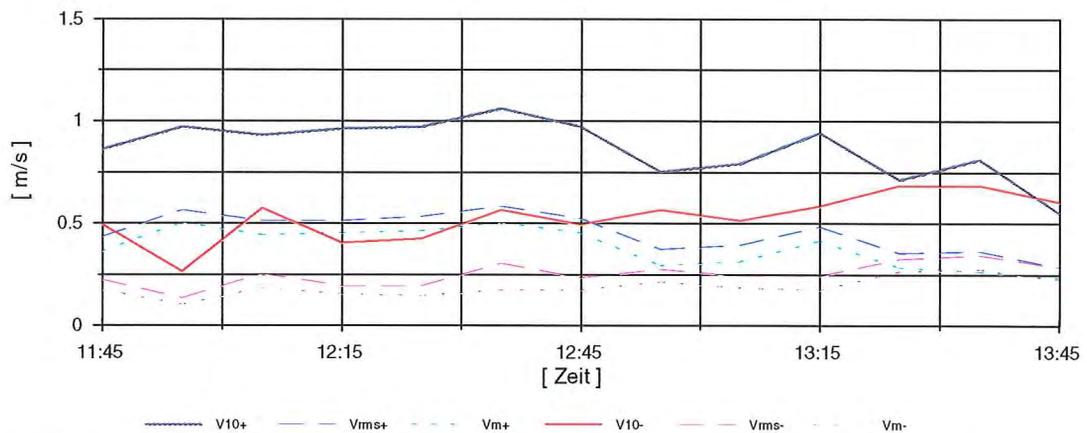


Abb. 203: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

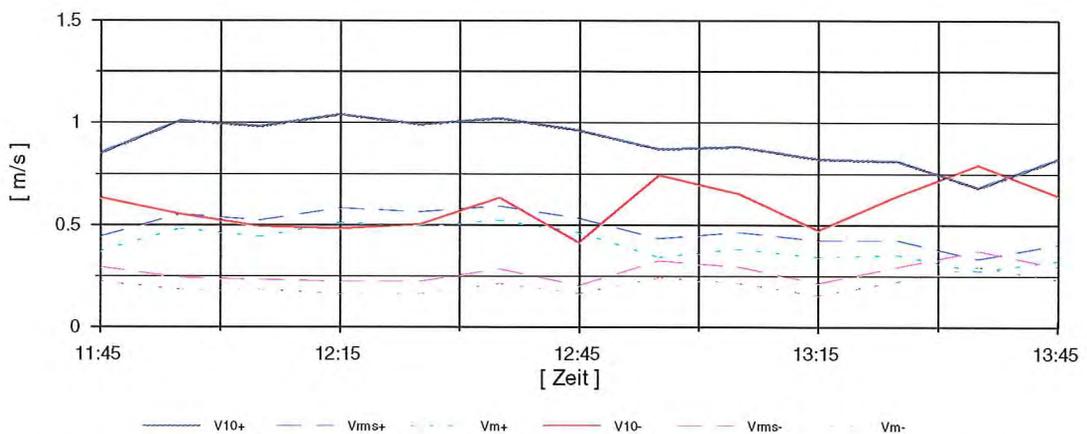


Abb. 204: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

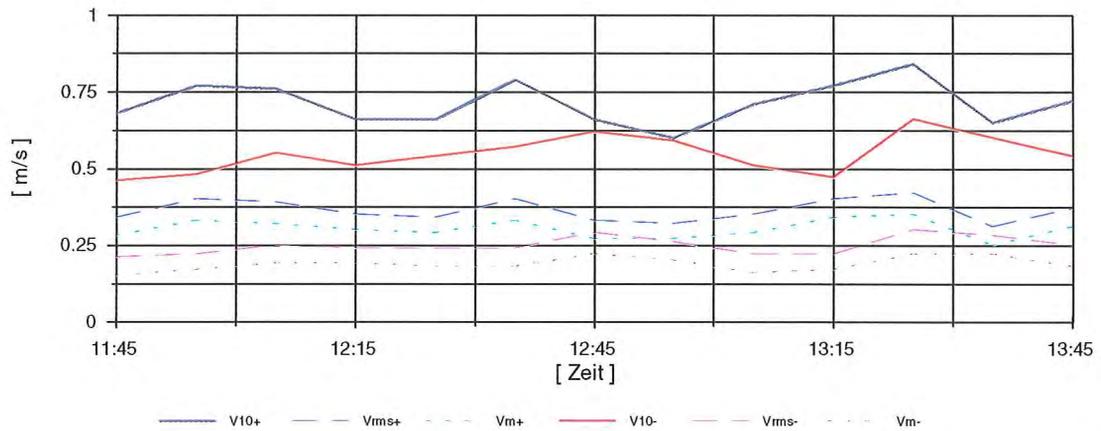


Abb. 205: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

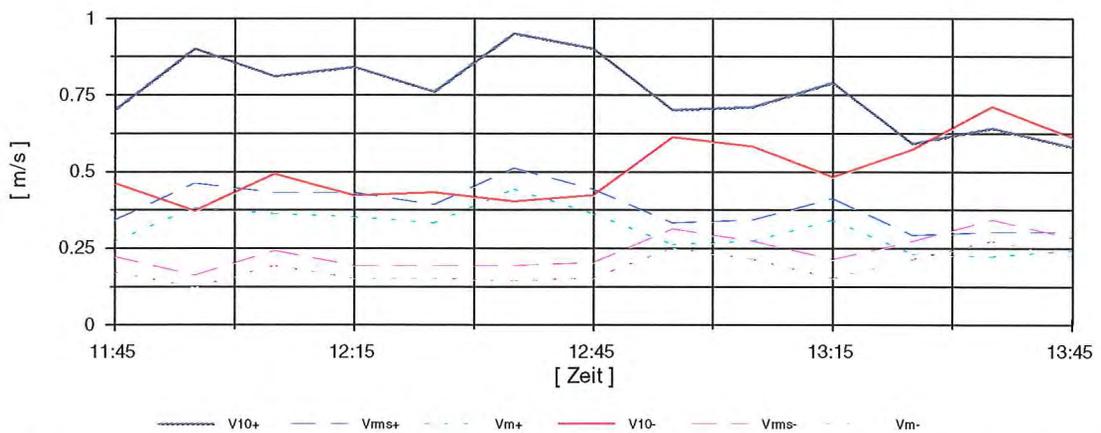


Abb. 206: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

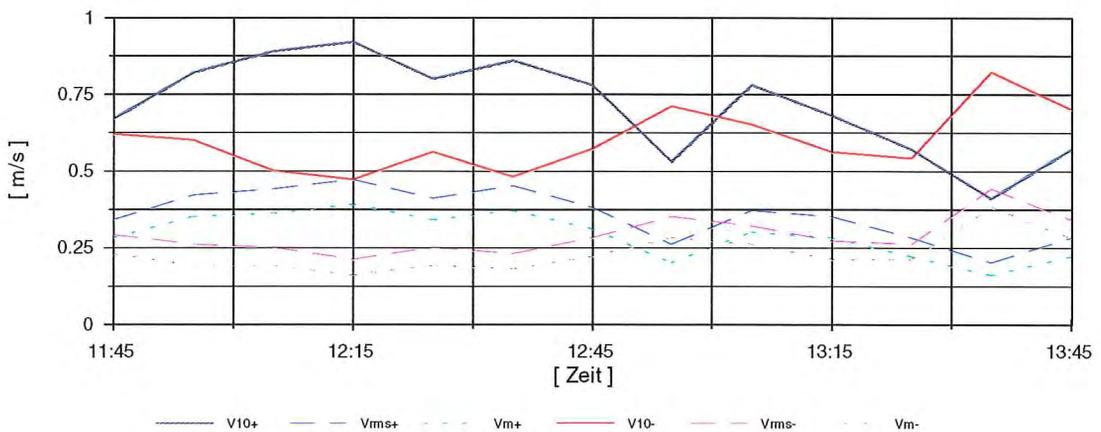


Abb. 207: Küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

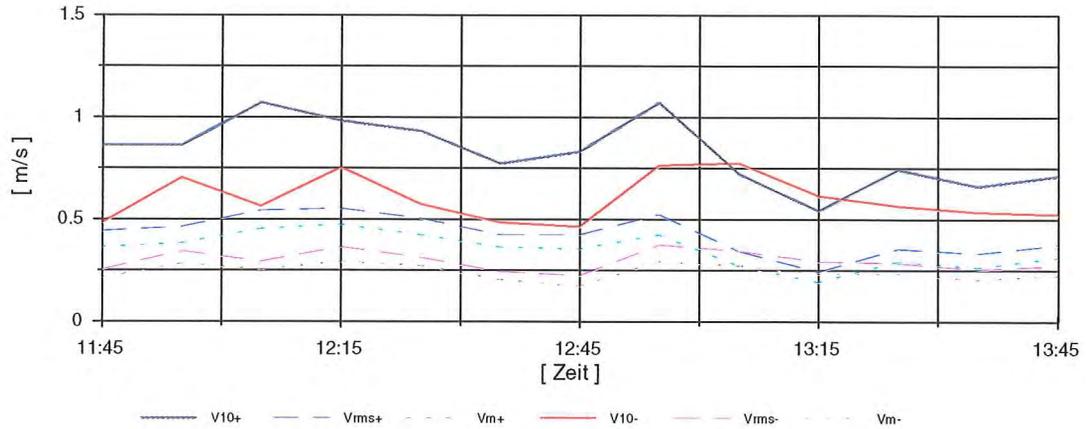


Abb. 208: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

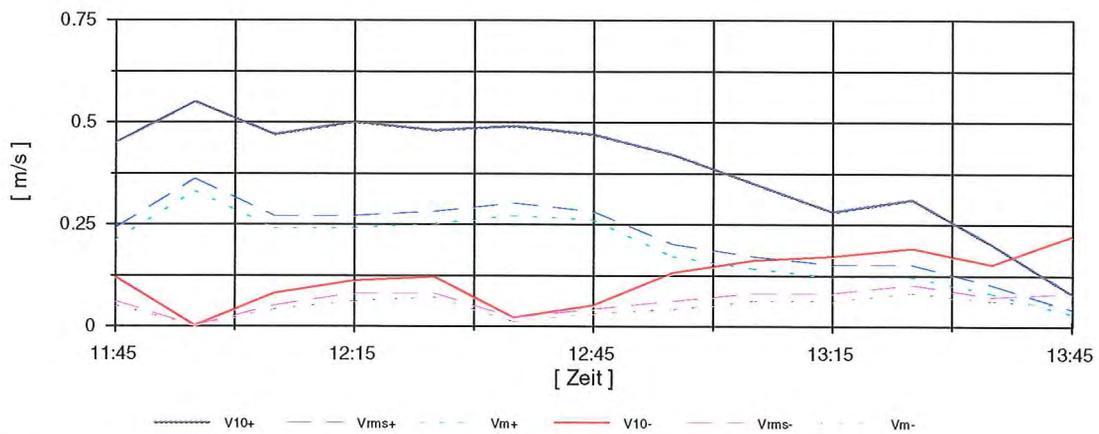


Abb. 209: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

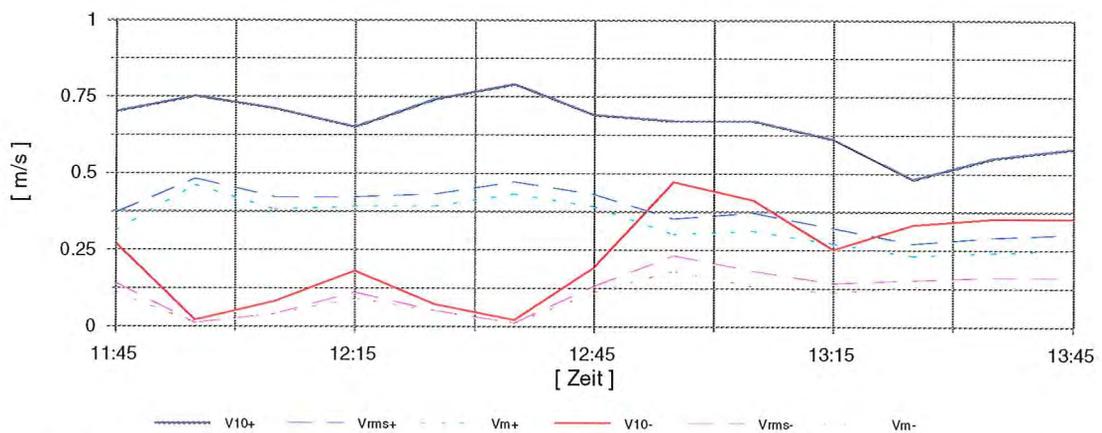


Abb. 210: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_1 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

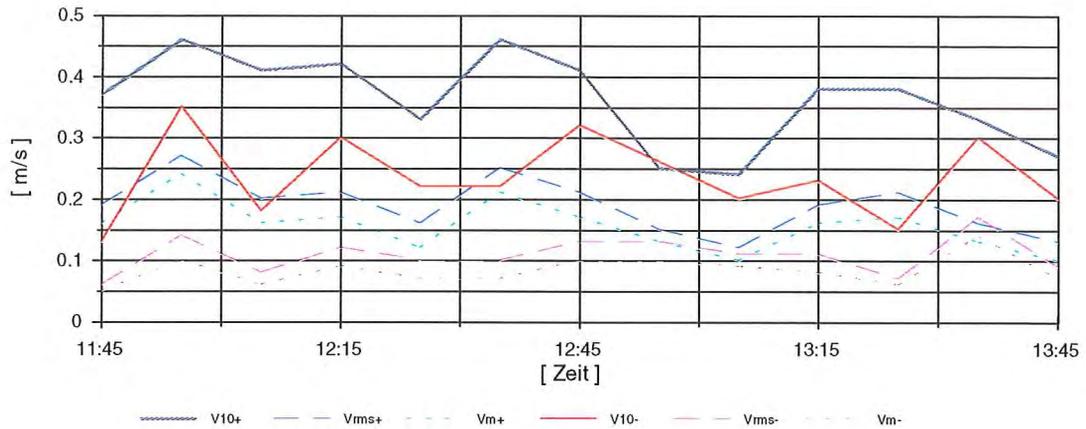


Abb. 211: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

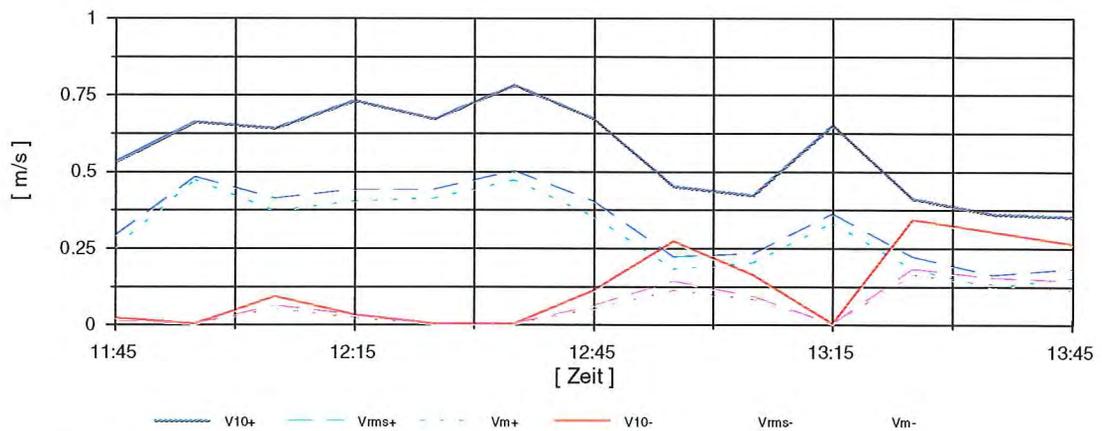


Abb. 212: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

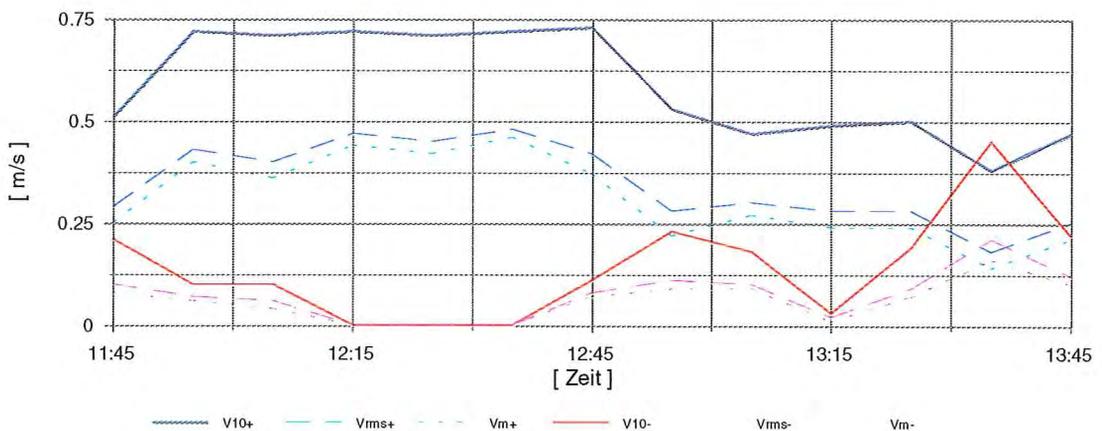


Abb. 213: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_2 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

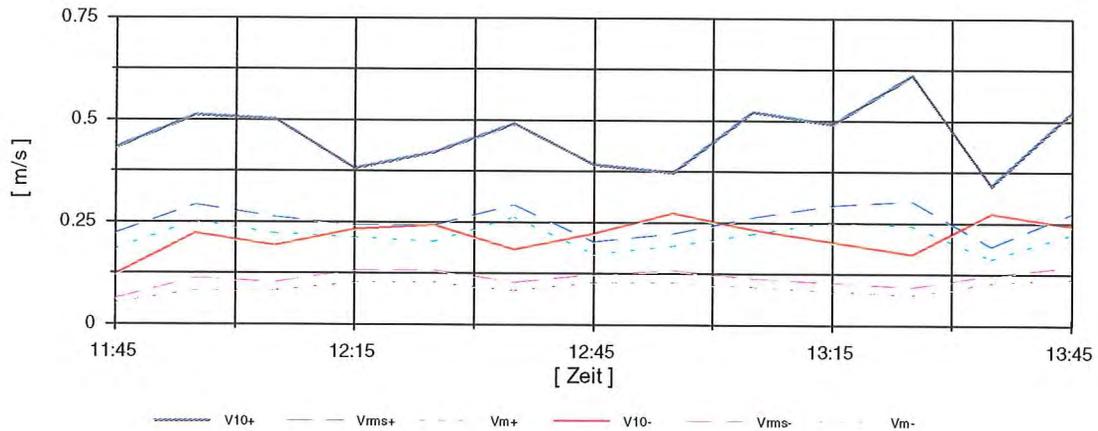


Abb. 214: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station W_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

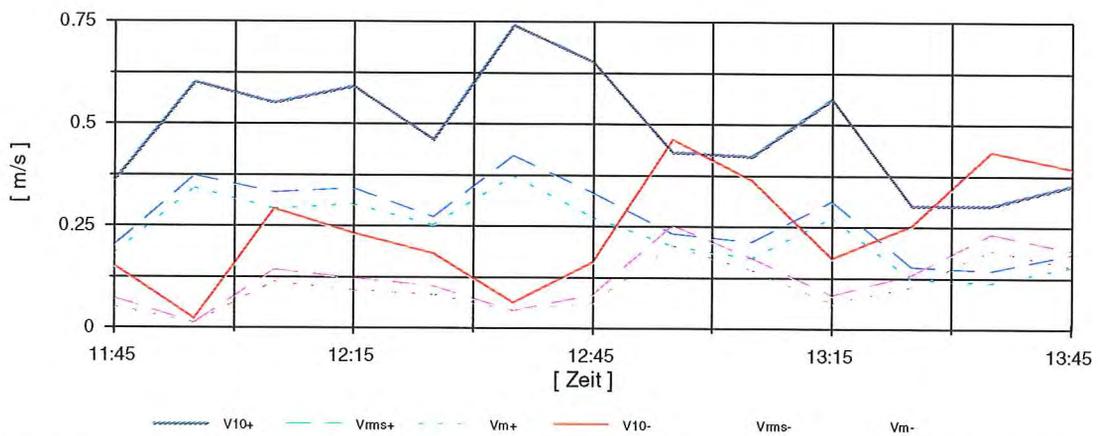


Abb. 215: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station M_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

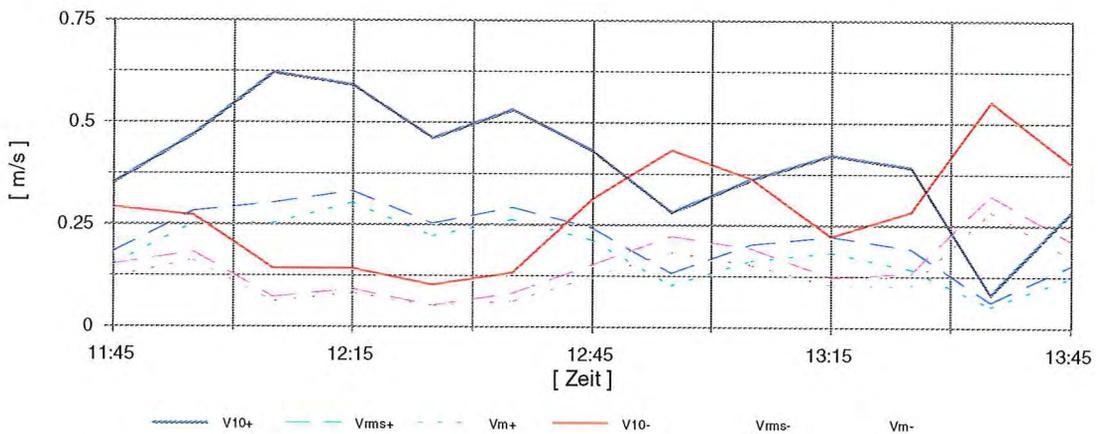


Abb. 216: Langperiodische küstenparallele Geschwindigkeitskomponenten an der Station O_3 um Thw (Sturmflut vom 21.09.1990)

5.4 Richtungsvariation der Strömungen

In den vorstehenden Kapiteln sind die zeitliche und räumliche Variabilität des See- gangs und der Strömungen geschildert worden. Hinsichtlich der als Transportfaktor wirksamen Strömungen ist dabei aus Gründen der Anschaulichkeit eine Unterscheidung nach küstennormalen und küstenparallelen Komponenten des realen Strömungsvektors vorgenommen worden. Im folgenden werden zur Verdeutlichung der wirklichen Gegebenheiten die Stromstärkerosen einer Zeitreihe der hier untersuchten Sturmflut vom 21. 09. 1990 für einen Zeitraum um Thw im Vergleich zu den Komponenten exemplarisch für die Stationen VS, M₁, M₂ und M₃ dargestellt (Abb. 217). Hierbei ist zu bedenken, daß auch bei den Stromstärkerosen eine integrierende Darstellung über die jeweils gewählten Geschwindigkeitsklassen zum einen und über Sektoren von 22,5° zum anderen erfolgt (Abb. 12 + 13). Hierbei wird deutlich, daß die Analyse über gewichtete Geschwindigkeiten der Komponenten stärker den Anteil

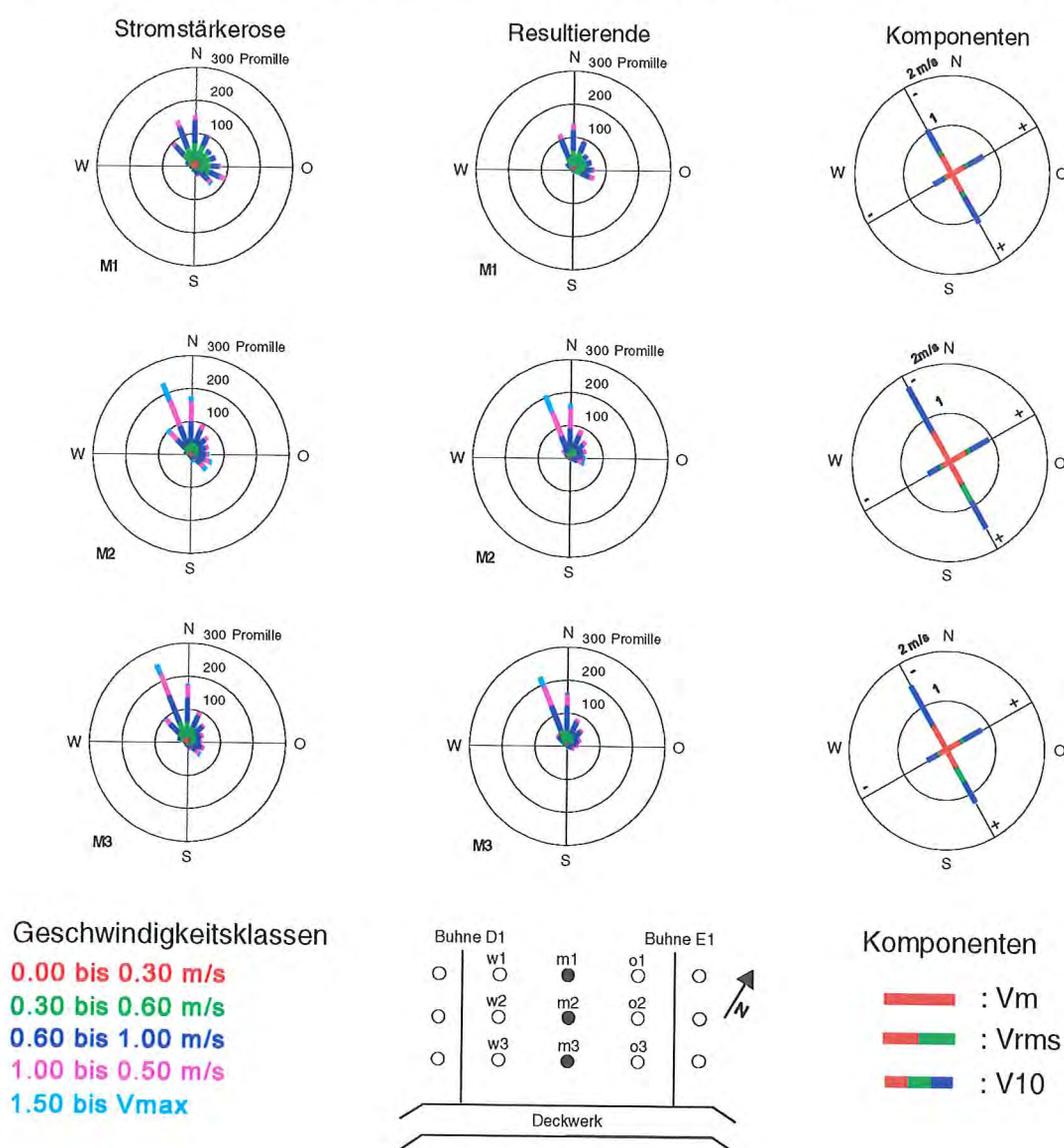


Abb. 217: Vergleich von Darstellungsformen: Stromstärkerosen (links), Resultierende Stromstärkerosen und Geschwindigkeitskomponenten (Tide vom 21.09.90 12:40 bis 13:00)

hoher und somit besonders transportwirksamer Geschwindigkeiten darstellt als die gerichtete Häufigkeitsdarstellung der Stromstärkerosen. Dagegen weisen die Komponenten die Häufigkeitsanteile zum Teil nur unzureichend aus (Abb. 217). Hier ist über weitere methodische Verbesserungen nachzudenken. Es bleibt abschließend anzumerken, daß auf dem Gebiet der Analyse seegangsinduzierter Strömungen noch weiterhin erheblicher Entwicklungsbedarf besteht. Insbesondere gilt dies für - die der Anschauung eher dienlichen - Darstellungen im Zeitbereich. Hier konnte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die in dem Vorgängerprojekt begonnene Pionierarbeit fortgesetzt werden.

5.5. Vertikale Strukturierung der Strömungsfelder

In der Regel sind alle Messungen - wie beschrieben - mit einer Strömungssonde an jeder Meßstation vorgenommen worden. Auf dem Strand sind die Sonden etwa in einer Höhe von 0,3 m über der Sohle angebracht worden, wobei bei den Daten die - hier unbekannte - Fluktuationen der Strandsohle über die Tide in Betracht zu ziehen ist. Am Vorstrand ist die Sonde etwa einen Meter über Grund angebracht, hier sind Sohlfluktuationen sowohl absolut als auch relativ zur Sondenhöhe über der Sohle deutlich geringer als auf dem Strand. Innerhalb der Wassersäule wird somit jeweils ein Punkt erfaßt. Variationen des Strömungsfeldes in der Vertikalen werden somit nicht erkannt. Die Anordnung der Sonden ist daher daran orientiert, in Anlehnung an vorhandene Kenntnisse das Strömungsfeld hinsichtlich der stattfindenden Transportprozesse an relevanten Stellen zu erfassen. Diese Einschränkung war allein aus ökonomischen

Gründen erforderlich, um sowohl Investitionen als auch Betreuungs- und Auswertungsaufwand in machbaren Grenzen zu halten.

Es erschien aber als sinnvoll, exemplarisch durch Konzentration mehrerer Sonden an einer Station Erkenntnisse über die vertikale Zonierung des Strömungsfeldes auf dem Strand und Vorstrand zu erhalten. Als Beispiel wird hier eine Zeitreihe dargestellt und diskutiert, bei der am 07. 04. 1991 an den Stationen VS, M_1 und M_2 drei übereinander angeordnete Strömungssonden die vertikale Variation des Strömungsfeldes erfaßt haben. Die Anordnung der Sonden lag an den Stationen bezogen auf die Sohlage bei etwa: VS: 1,00 m/2,85 m/4,65 m; M_1 : 0,06 m/0,41 m/1,82 m; M_2 : 0,11 m; 0,41 m; 1,17 m. In Abbildung 218 ist beispielhaft die vertikale Anordnung von drei Sonden an in einer Station auf dem Strand festgehalten.

Die Zeitreihe wurde etwa zwei Stunden vor Eintritt des Tidehochwassers bei einer Tide mit einem Sunk von 66 cm bei Thw. Es herrschte schwacher ablandiger Wind um

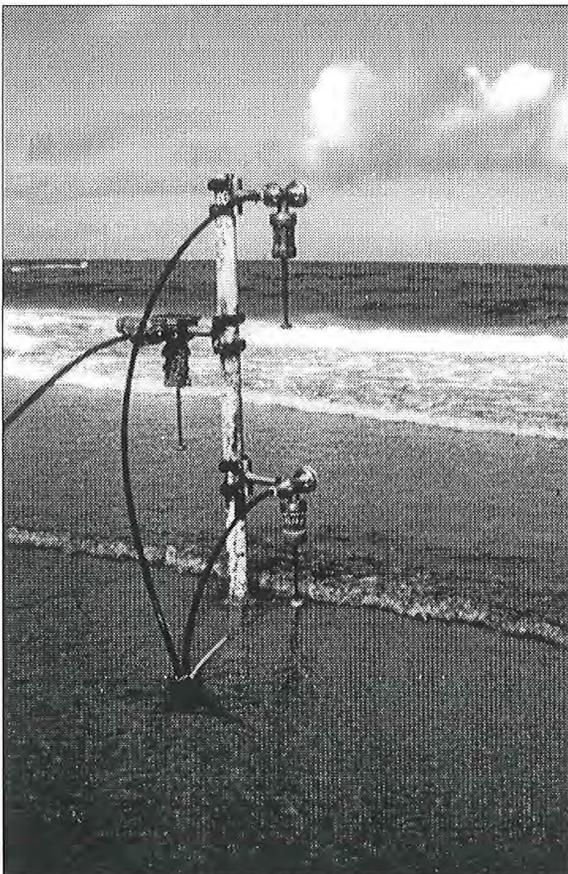


Abb. 218: Vertikale Anordnung der Sonden

Beaufort 3. Auf dem Vorstrand betragen die signifikante Wellenhöhe 0,49 m und die signifikante Wellenperiode 4,0 s bei einer Anlaufrichtung aus 308°. Auf dem Strand wurden entsprechend folgende Werte gemessen: M_1 : $H_s = 0,31$ m, $T_{Hs} = 4,5$ s, $\Theta_{M1} = 323^\circ$; M_2 : $H_s = 0,43$ m, $T_{Hs} = 2,5$ s, $\Theta_{M2} = 323^\circ$.

Auf dem Vorstrand zeigen sich hinsichtlich der Richtungsverteilungen in den unteren beiden Ebenen ein stärkeres Überwiegen in aufländiger Richtung als in der oberen (Abb. 219), wengleich auch dort eine aufländige Dominanz vorliegt, was insbesondere anhand der resultierenden Stromstärkerosen erkennbar wird (Abb. 220). Die Geschwindigkeiten sind hinsichtlich ihrer Transportwirksamkeit als gering einzustufen.

Im Übergangsbereich von Vorstrand und Strand an der Station M_1 zeigt sich ein bereits früher beschriebenes Phänomen (Abb. 219 + 220): Stromstärke und insbesondere resultierende Stromstärkerose weisen im sohnahen Bereich (Ebene M_{11}) ein eindeutig in aufländiger Richtung dominierendes Strömungsgeschehen aus, während in den beiden oberen Ebenen M_{12} und M_{13} die Strömungen überwiegend abländig gerichtet sind. Hier bestätigt sich der früher beobachtet Effekt einer sohnahen, aufländigen Drift

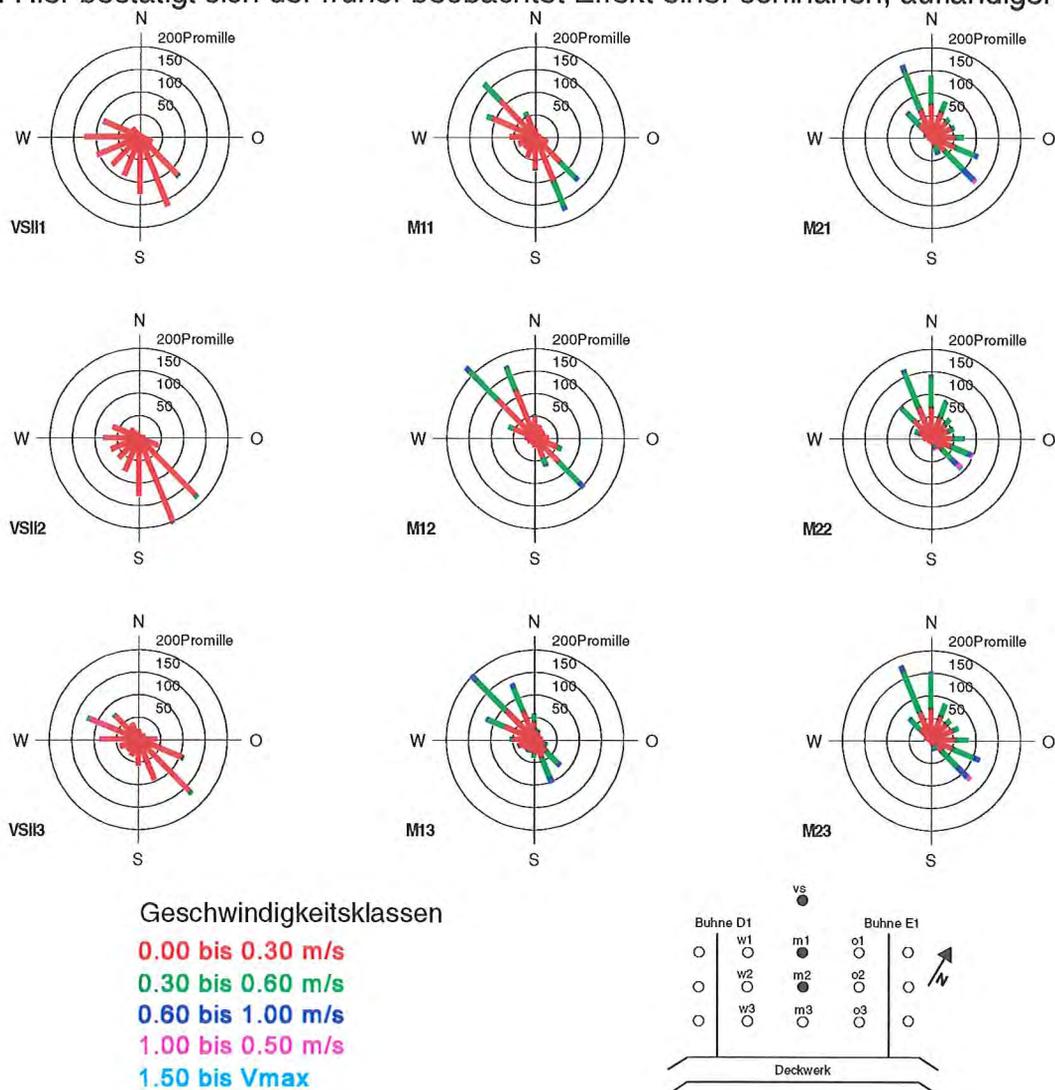


Abb. 219: Stromstärkerosen in drei vertikalen Ebenen (Tide vom 07.04.91 02:09:10 bis 02:29:10)

[NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b] entsprechend der Theorie von LONGUET-HIGGINS [1953]. Diese Erscheinung beleuchtet die hydrodynamische Wirksamkeit des Seegangs bei Normaltiden, nach vorübergehender sturmbedingter Erosion die Strände mit dem in den Vorstrand verdrifteten Material wieder aufzufüllen. Die Erkenntnisse über diese Vorgänge waren ein wesentlicher Beweggrund für die teilweise Auffüllung des Vorstrandbereiches [NIEMEYER 1992b].

Im höheren Strandbereich tritt dieser Effekt hier nicht mehr auf, was aber nach bisherigen Erkenntnissen nicht ortsbedingt ist [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b], sondern auf das lokale Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnis und die daraus resultierende Lage der Brandungszone zurückgeführt werden kann. Die Brandung des Seegangs führt in diesem Bereich wiederum zu den für Trecker typischen ablandigen Strömungskomponenten, so daß im vorliegenden Fall der aufländiger Transport nur den unteren Strandbereich auffüllen kann.

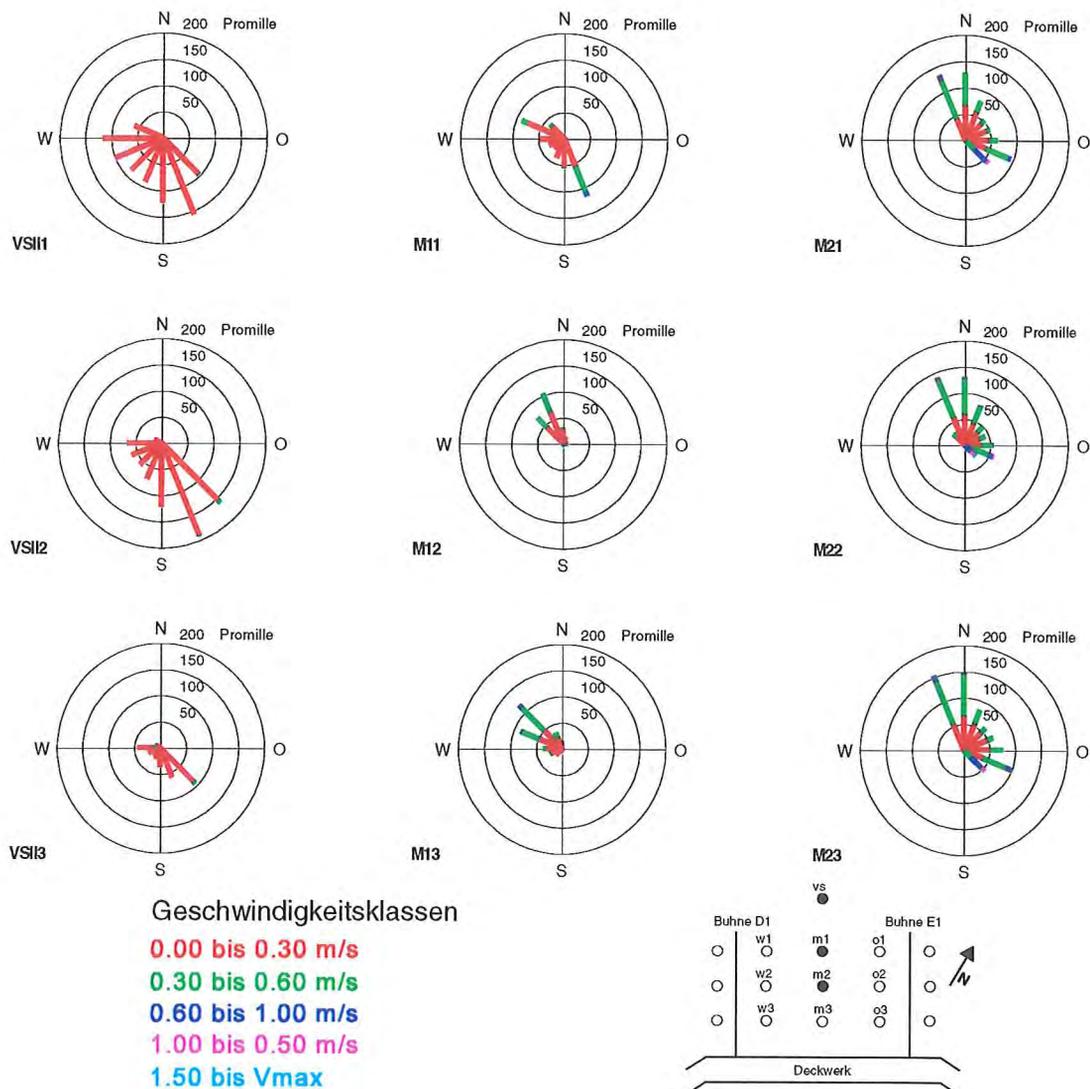


Abb. 220: Resultierende Stromstärkerosen in drei vertikalen Ebenen (Tide vom 07.04.91 02:09:10 bis 02:29:10)

6. EXEMPLARISCHE UNTERSUCHUNG VON TRANSPORTVORGÄNGEN

6.1 Zielsetzung und Methodik

Im küstennahen Bereich überlagern sich wind-, tide- und seegangsinduzierte Strömungen. Von diesen wird neben der Ausbildung der Morphologie des Strandes auch die Sedimentverteilung geprägt und ein flexibles dynamisches Gleichgewicht geschaffen. Die bestimmenden Transportprozesse im Bereich der Insel Norderney wurden bisher sowohl unter sedimentologischen Gesichtspunkten [EITNER et al. 1992, EITNER & RAGUTZKI 1994] als auch unter besonderer Berücksichtigung der Hydrodynamik [NIEMEYER 1991, 1992a, 1992b] allgemein beschrieben. Um zusätzliche Erkenntnisse über die Transportprozesse zu gewinnen, wurde am 19. Oktober 1993 eine interdisziplinäre Versuchsmessung mit gleichzeitiger Aufnahme der treibenden hydrodynamischen Kräfte und der daraus resultierenden sedimentologischen und morphologischen Veränderungen im Hauptmeßfeld (Abb. 8) vorgenommen. Es wurden Beprobungen des Sediments und Messungen der Umlagerungsintensität bei gleichzeitiger Vermessung des nassen Strandes jeweils beim Morgen- und Abend- Tideniedrigwasser ausgeführt. Die hydrodynamischen Parameter sind entsprechend Sondenlage und Wasserstand kontinuierlich aufgenommen worden. Weitere Einzelheiten zum methodischen Vorgehen sind bei EITNER, KAISER & NIEMEYER [1995] dargestellt.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Hydrodynamische Randbedingungen

Die aufeinanderfolgenden Scheitel Tideniedrig-, Tidehoch- und Tideniedrigwasser des Pegel Norderney-Riffgat lagen bei 3,35 m, 6,12 m und 3,54 m über Pegelnull. Damit lag der Scheitel des Tidehochwassers ungefähr auf dem Niveau des 10-jährigen Mittels (1984/93) von 6,16 m. Im Gegensatz dazu lagen die Niedrigwasserscheitelwerte morgens mit 41 cm und abends mit 22 cm signifikant darunter. Damit ergaben sich bezogen auf das 10-jährige Mittel des Tidehubs für den Tidestieg 37 cm und für den Tidefall 18 cm höhere Werte. Die Tideströmungen in dem Untersuchungsgebiet zwischen den Buhnen sind relativ schwach: für die mittleren Ebb- und Flutströmungen betragen die Werte weniger als 5 cm/s bei einem Maximalwert von 11,2 cm/s [NIEMEYER 1987b].

Das Seegangsklima während des Untersuchungszeitraums war mäßig, mit einer maximalen Wellenhöhe von $H_{\max} = 70$ cm und einer signifikanten Wellenhöhe von $H_s = 37$ cm zur Zeit des Tidehochwassers an Station M1 [NIEMEYER et al. 1994]. Eine vergleichende Betrachtung der Zeitreihen von Wasserstand und Wellenhöhen zeigt keinen signifikanten Anstieg der Wellenhöhen mit steigendem Wasserspiegel während der letzten zwei Stunden vor Tidehochwasser, wie es bei stärkerem Seegang der Fall ist [NIEMEYER 1992a; NIEMEYER et al. 1994] (Abb. 221). Die Messung eines bodennahen Geschwindigkeitsprofils mit Heißfilm-Anemometern (Abb. 222, [MÜLLER 1993]) zeigte während der letzten zwei Stunden des Tidestiegs ebensowenig eine signifikante Korrelation zwischen Seegang und Tidewasserständen. Bei den Messungen des bodennahen Geschwindigkeitsprofils scheinen besonders die hohen Geschwindigkeiten während der Übergangsphasen zwischen trockenem und überflutetem Strand erwähnenswert, die unter typischen Swash-Bedingungen charakterisiert werden können [YU et al. 1991]. Leider liefern die Messungen mit den verwendeten

Heißfilm-Sonden nur absolute Geschwindigkeitswerte und keine Richtungsinformationen.

An der seewärtigen Grenze des nassen Strandes (Positionen M_1 und O_1) halten sich während des Tidesiegs die auf- und ablandigen Strömungen nahezu die Waage. In der Höhe der Mittelwasserlinie (Stationen W_2 , M_2 , O_2) sind die typischen Swash-Bedingungen [YU et al. 1991] mit hohen ablandigen Strömungsgeschwindigkeiten deutlich erkennbar, insbesondere an der Station M_2 (Abb. 223, A). Zur Zeit des Tidehochwassers sind an den Positionen M_1 und O_1 ebenfalls auf- und ablandige Strömungen ausgeglichen, während an den ufernäheren Stationen mehr oder weniger ausgeprägt die ablandigen Strömungen überwiegen (Abb. 223, B). Während des Tidesiegs ist der Anteil der höheren Geschwindigkeiten größer, was sich signifikant bei der Station M_2 zeigt. Bei den Betrachtungen ist aber zu berücksichtigen, daß von den Sonden eventuell eine bodennahe aufwärtsgerichtete Driftströmung aus dem Shoaling-Effekt, bedingt durch ihre geringe Schichtdicke bei der relativ schwachen Seegangsausprägung, nicht erfaßt werden kann. Bei anderen Messungen sind derartige nichtlineare Drifteffekte [LONGUET-HIGGINS 1953] beobachtet worden [NIE-MEYER 1991, 1992a, 1992b].

6.2.2 Morphologie und Sedimentumlagerung

Auf der Basis der tachymetrischen Aufnahme des Bühnenfeldes D1-E1 ergaben sich nur geringe Veränderungen bei überwiegender Sedimentation. Parallel zur Bühne E_1 konnte die Bildung einer Rinne beobachtet werden. Obwohl die Vermessungsdaten nur kleine Änderungen zeigten, ergaben die Sedimentumlagerungsanzeiger signifikante Werte. Im folgenden muß beachtet werden, daß die Sedimentumlagerungsanzeiger nur in einem Ausschnitt in der Mitte des Bühnenfeldes eingesetzt wurden, wobei der Schwerpunkt im Umfeld der Station M_2 lag. Um den Eintritt des Tideniedrigwassers am Morgen, ergab sich für den vorausgegangenen Tidezyklus eine maximale Erosionstiefe von 10 cm (Abb. 224). Besonders der Bereich der Mittelwasserlinie in Höhe der Station M_2 war durch hohe maximale Erosionsraten geprägt. Seewärtig davon gingen die maximalen Erosionsraten auf Werte um 3 cm und landseitig auf Null zurück. Das folgende Hochwasser zeigte eine ähnliche Struktur der Meßwerte für die maximalen Erosionsraten, auf einem im Mittel etwas geringeren Niveau und landwärtig verschoben (Abb. 225). Die räumlichen Verteilungen der auf den Zeitpunkt der maximalen Erosion folgenden Sedimentation zeigen ein ähnliches Bild, wenn auch in den Spitzenwerten im Bereich der Mittelwasserlinie etwas geringer liegend (Abb. 226- 227). Dabei zeigt sich sowohl bei der Erosion als auch bei der anschließenden Sedimentation bei den am Morgen aufgenommenen Werten ein ausgeglicheneres Bild als am Abend; die dann erfaßten Werte sind im wesentlichen durch zwei Peaks gekennzeichnet.

Die sich als Differenz ergebende Sedimentbilanz zeigt für die Morgenmessung ein nach verschiedenen Höhenstufen differenziertes Bild. Im seewärts gelegenen Bereich liegt die Sedimentbilanz im Mittel bei Null, fällt im Bereich der Mittelwasserlinie auf negative Werte ab, um dann in höheren Bereich des Strandes wieder auf positive zu steigen (Abb. 228). Für die Abendmessung ergibt sich eine ähnliche Tendenz, die allerdings wiederum im wesentlichen durch einzelne Peaks geprägt ist (Abb. 229). Hieraus darf gefolgert werden, daß - ein für Normaltiden nicht untypischer - strandwärtiger Sedimenttransport stattgefunden hat, was wiederum die Ausbildung einer schwachen, im Höhenprofil unterhalb des Sondenniveaus liegenden nichtlinearen Drift [LONGUET-HIGGINS 1953] als wahrscheinlich ansehen läßt.

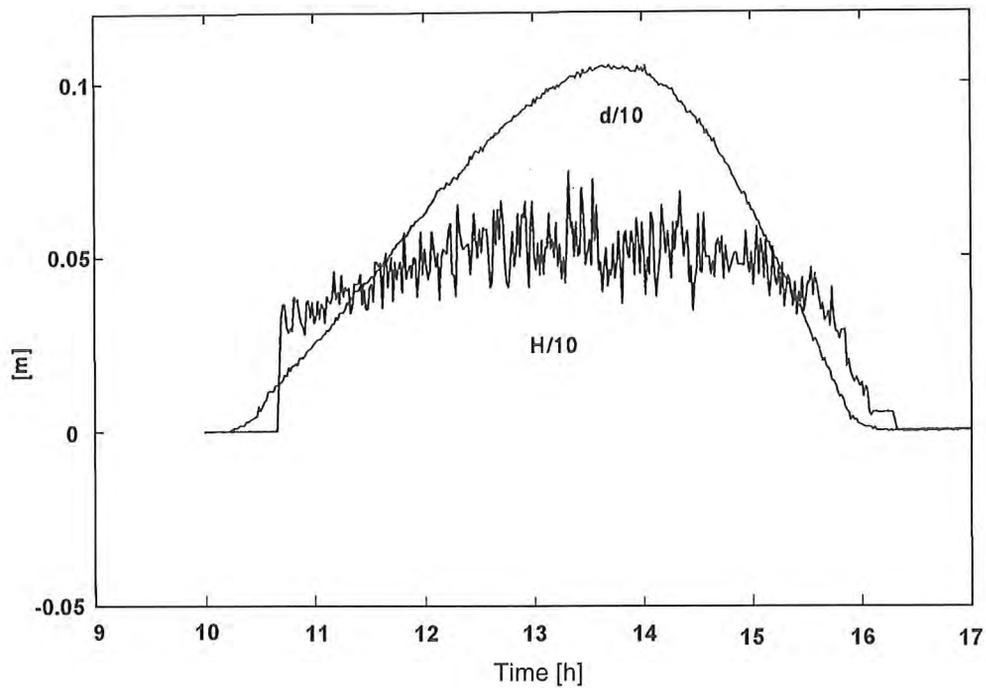


Abb. 221: Zeitserien des Wasserspiegels und der Wellenhöhen an Station M2, 19.10.1993 [Müller 1993]

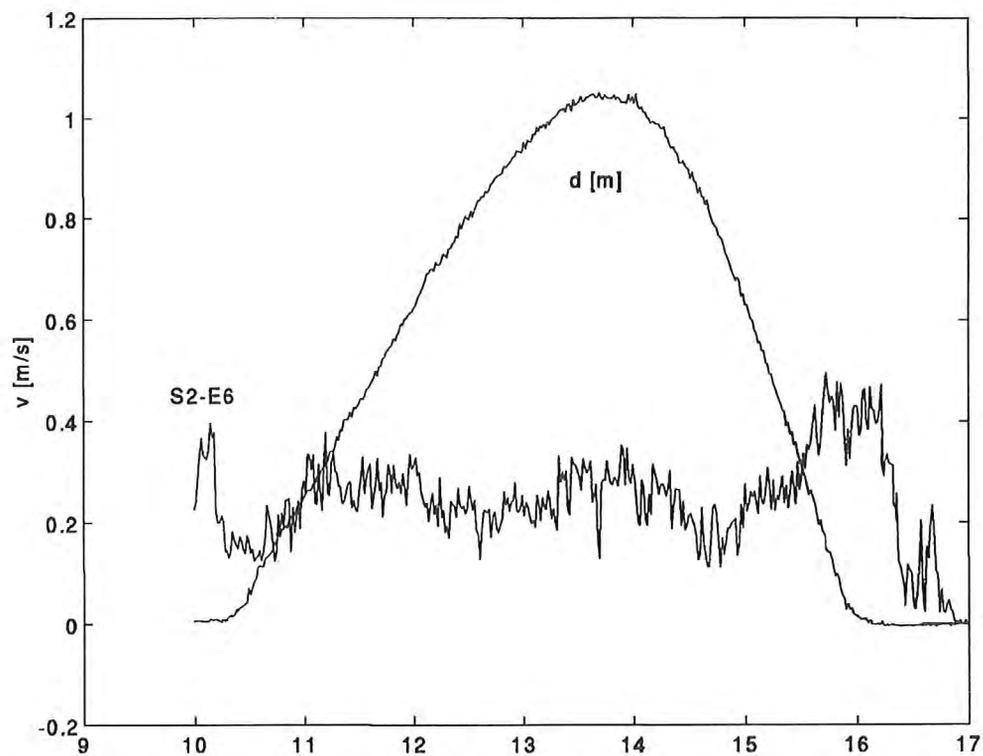


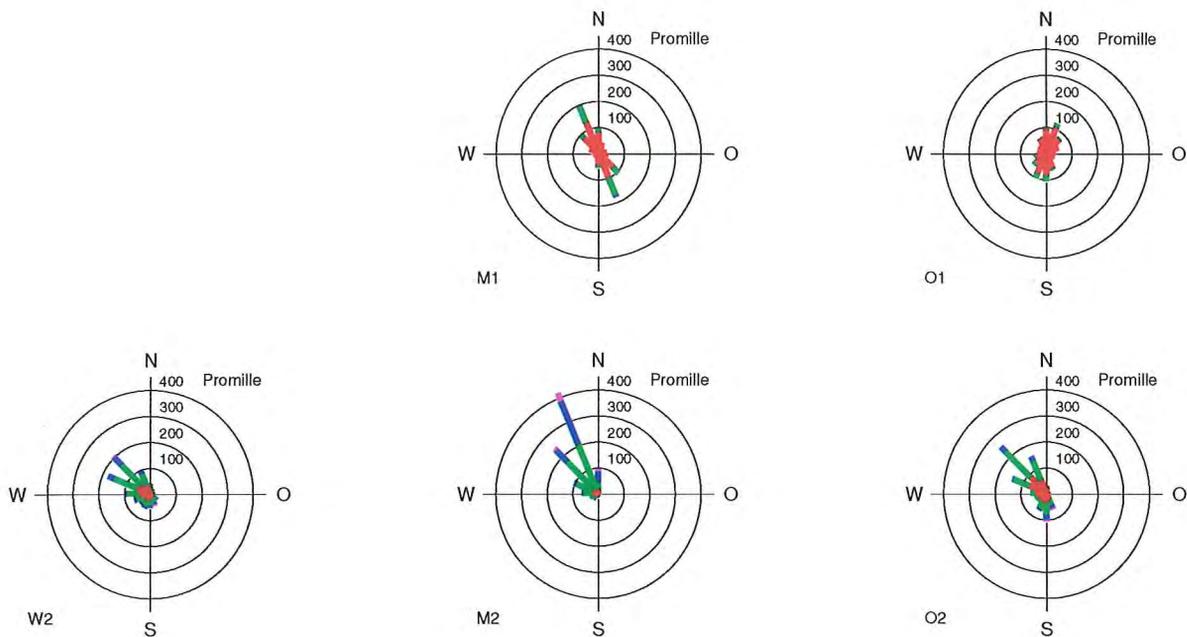
Abb. 222: Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten während einer Tide, 19.10.1993 [MÜLLER 1993]

STROMSTÄRKEROSEN

Datum: 19.10.1993

Meßzeitraum: 11:30 bis 11:50

Auflaufende Tide



0,00 bis 0,25 m/s

0,25 bis 0,50 m/s

0,50 bis 1,00 m/s

1,00 bis 1,50 m/s

1,50 bis Vmax

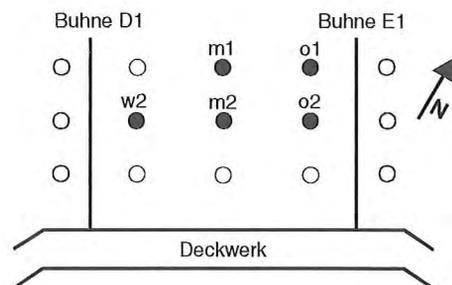


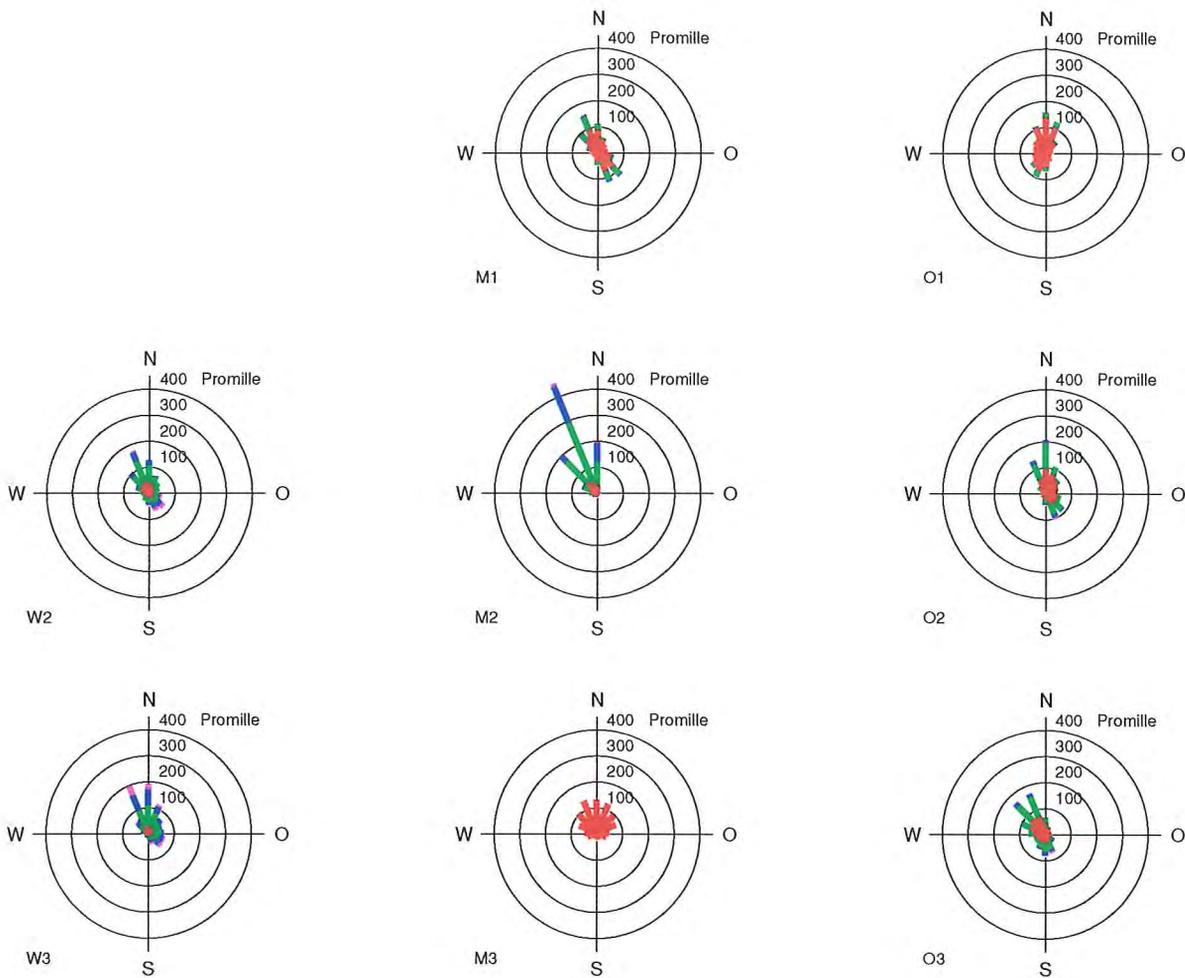
Abb. 223A: Stromstärken an fünf Stationen auf dem Strand [NIEMEYER et al. 1994]

STROMSTÄRKEROSEN

Datum: 19.10.1993

Meßzeitraum: 13:51 bis 14:11

Hochwasser



- 0,00 bis 0,25 m/s
- 0,25 bis 0,50 m/s
- 0,50 bis 1,00 m/s
- 1,00 bis 1,50 m/s
- 1,50 bis Vmax

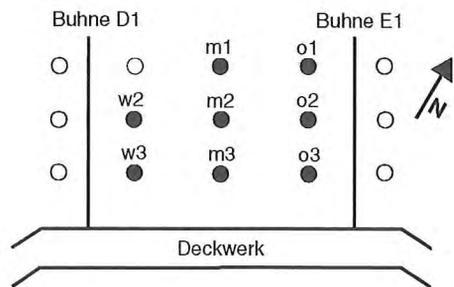


Abb. 223B: Stromstärken an acht Stationen auf dem Strand [NIEMEYER et al. 1994]

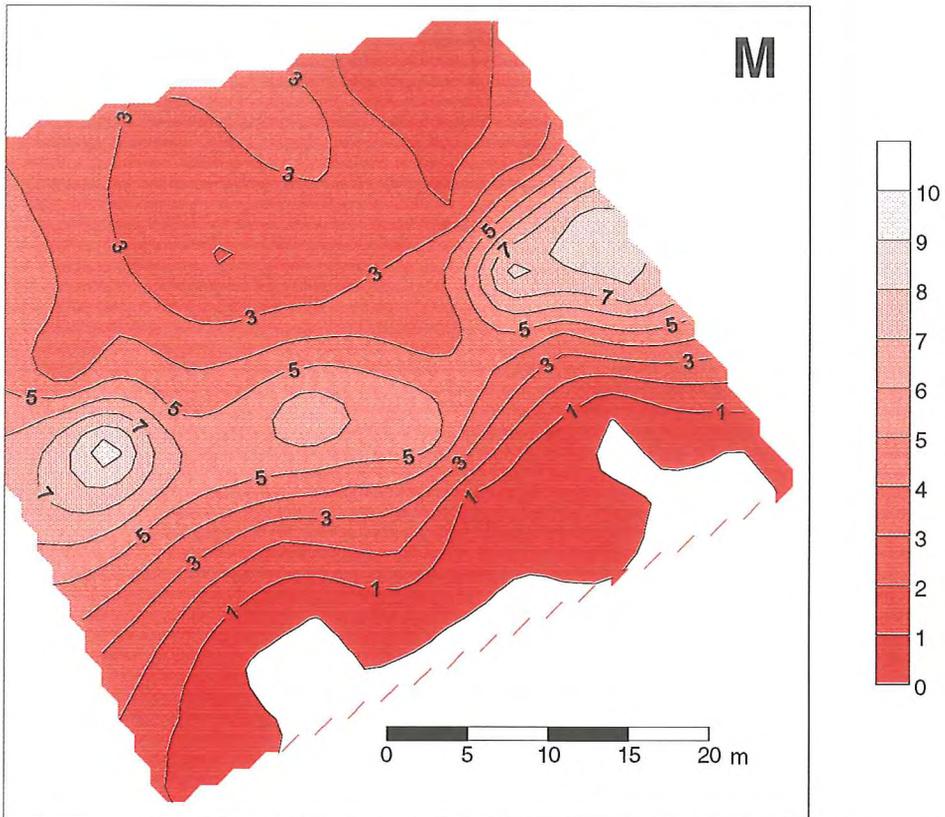


Abb. 224: Erosionstiefen am 19.10.93 morgens (in cm) [EITNER et al. 1995]

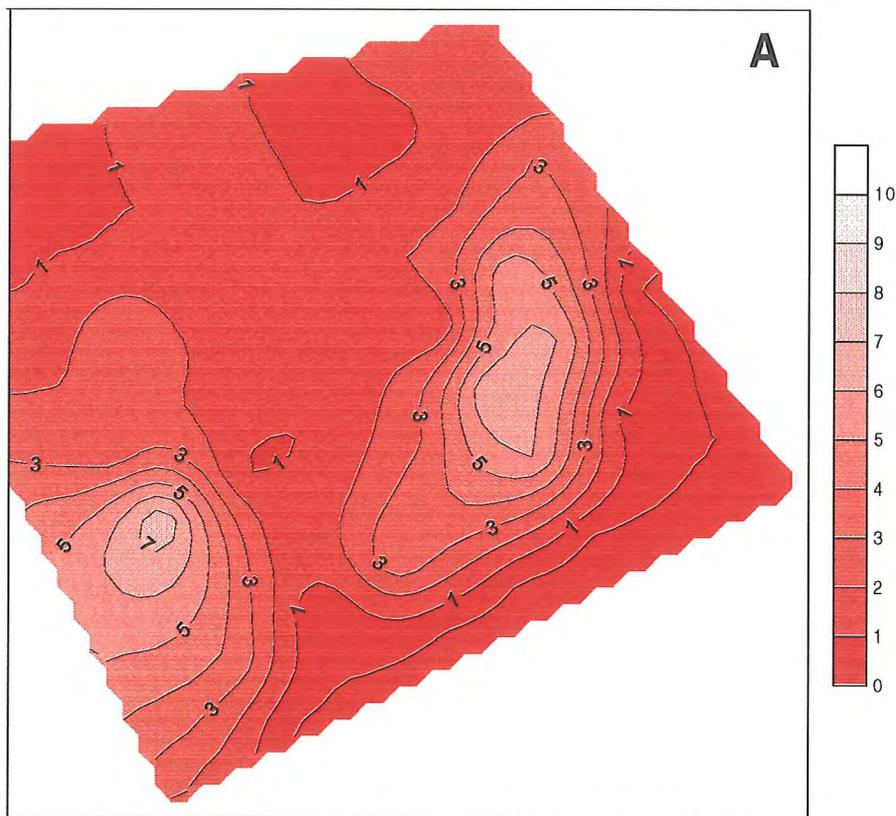


Abb. 225: Erosionstiefen am 19.10.93 abends (in cm) [EITNER et al. 1995]

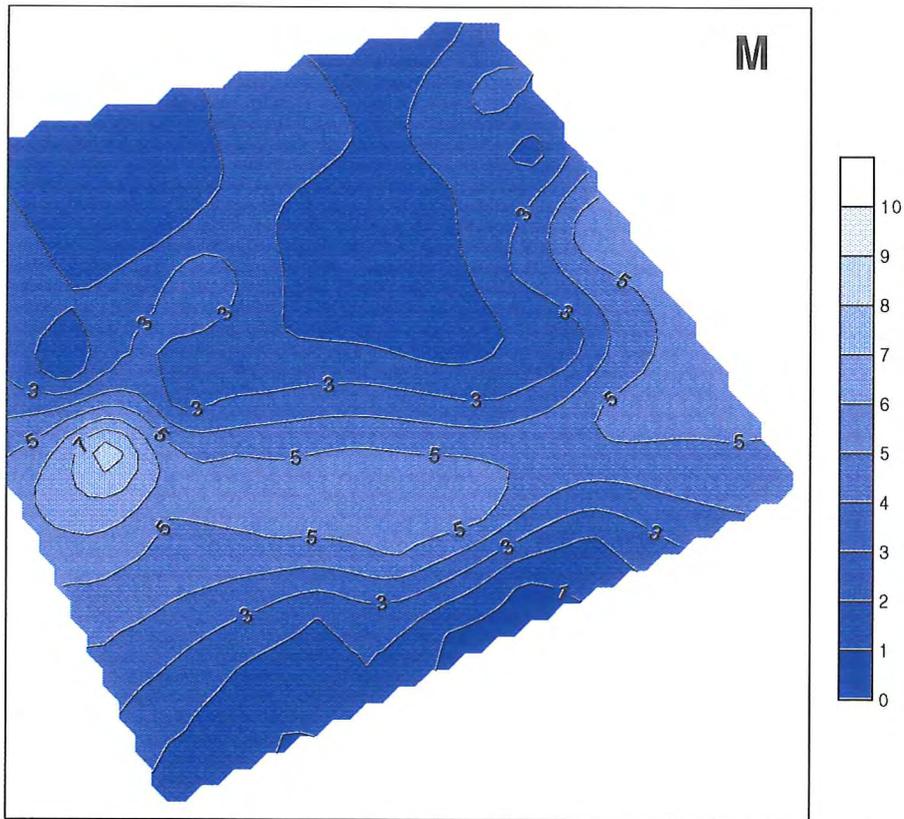


Abb. 226: Sedimentationshöhen am 19.10.93 morgens (in cm) [EITNER et al. 1995]

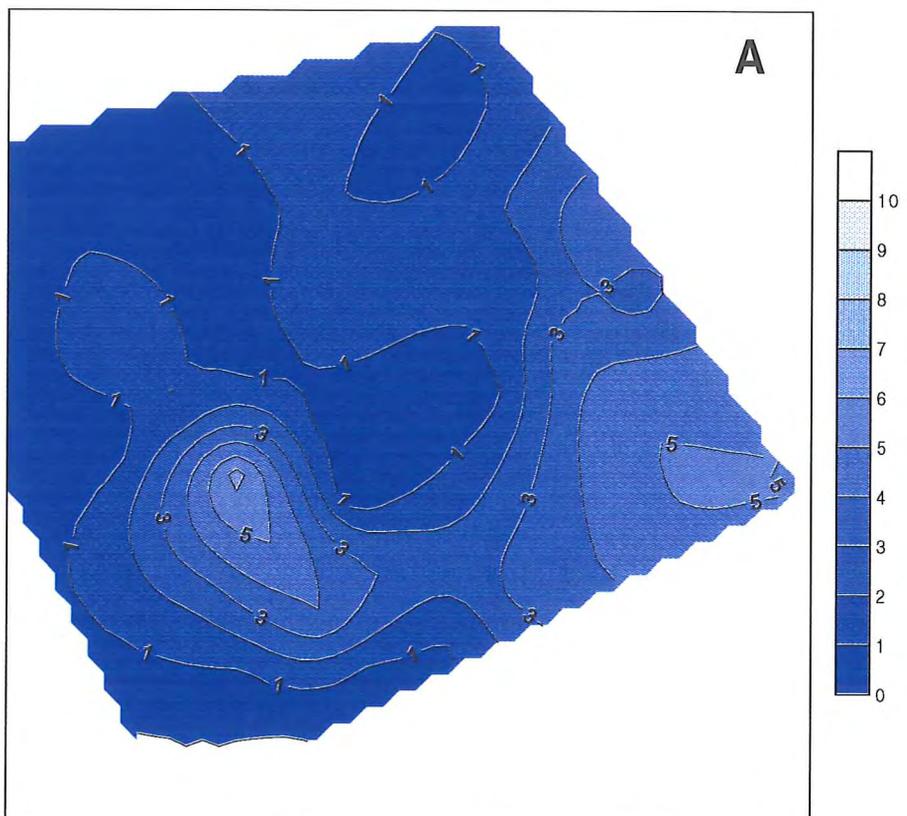


Abb. 227: Sedimentationshöhen am 19.10.93 abends (in cm) [EITNER et al. 1995]

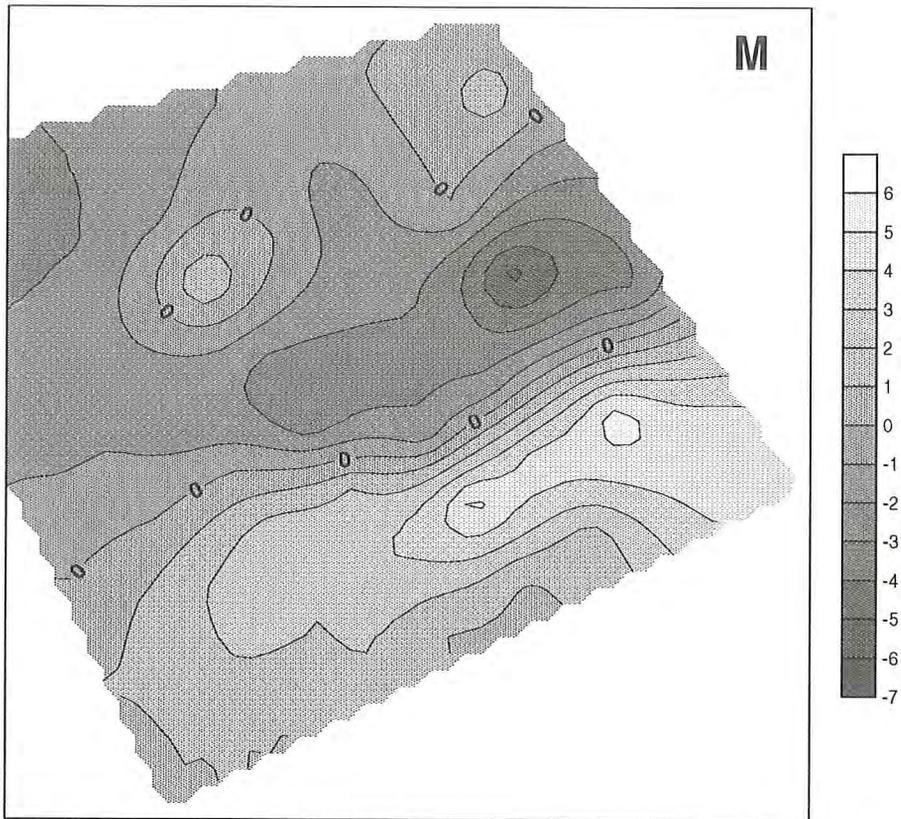


Abb. 228: Sedimentbilanz vom 19.10.93 morgens (in cm) [EITNER et al. 1995]

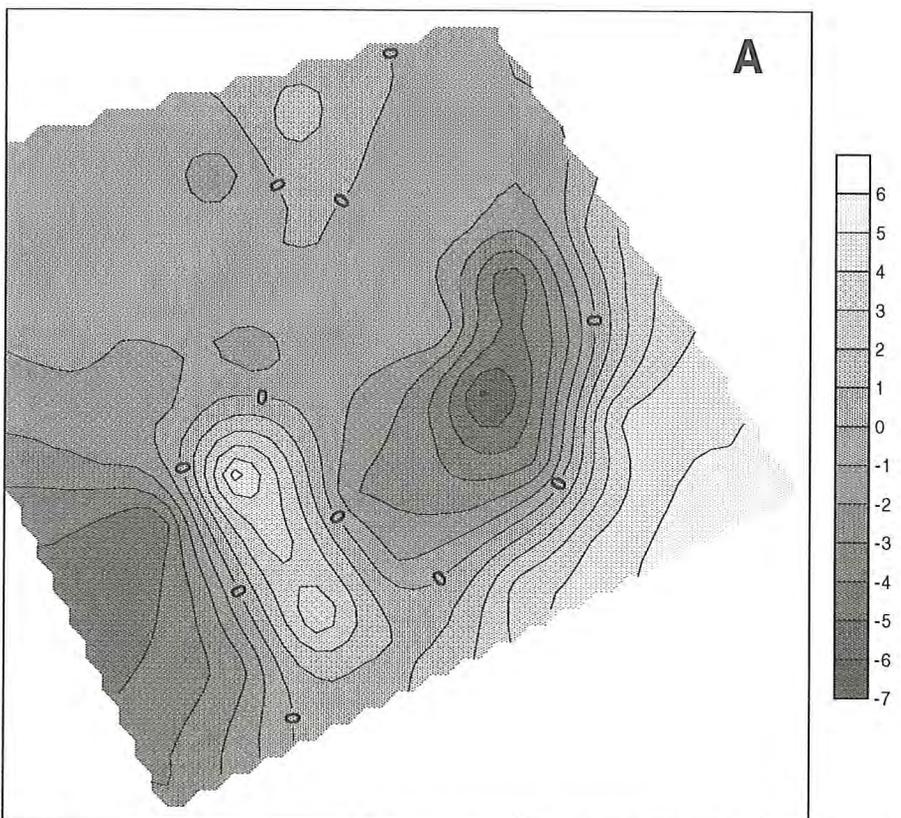


Abb. 229: Sedimentbilanz vom 19.10.93 abends (in cm) [EITNER et al. 1995]

7. GROSSRÄUMIGE RANDBEDINGUNGEN

7.1 Bezug zu Vorstrand- und Strandauffüllungen

Es ist aufgezeigt worden, daß der Riffbogen des Norderneyer Seegats zum einen den küstenparallelen Sedimenttransport um die Strände des westlichen Inseldrittels von Norderney herumführt (Abb. 1) und zum anderen zu einer erheblichen Energieumwandlung des Seegangs führt (Abb. 6) und somit eine beschirmende Wirkung für die Strände in diesem Bereich der Insel ausübt [NIEMEYER 1983, 1986, 1987c]. Nachhaltige Änderungen dieser morphologischen Großform würden zu einem erheblich veränderten Seegangsklima auf dem nordwestlichen Vorstrand, zu einer veränderten Energieumwandlung auf Vorstrand und Strand und somit zu einer veränderten Belastung der aufgefüllten Strandbereiche führen. Hiervon wäre die Lebensdauer einer Strandauffüllung umso stärker betroffen, wie sich das Seegangsklima bei Normaltiden verändern würde. In Ergänzung zu den ausgeführten Untersuchungen zum mittelfristigen Wasserstands- und Seegangsklima vor Norderney [NIEMEYER 1995] wird daher hier geprüft, ob sich die Ausbreitungsbedingungen und Energiedissipation des Seegangs infolge morphologischer Änderungen im Riffbogenbereich verändert haben. Grundlagen hierfür bilden einerseits die Aufnahmen aus diesem Bereich von 1990 und 1995, die mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems erfaßt und analysiert wurden. Entsprechende Auswerteroutinen sind von LIEBIG [1993] entwickelt worden. Ergänzend sind die morphologischen Veränderungen bezogen auf 1975 (Küstenkarte des KFKI 1:25000, Bl. 2208K) und 1960 (Niedersächsische Küste - Topographische Wattkarte 1:25000, Nr. 5) einbezogen worden, um den mittelfristigen Trend einbeziehen zu können. Es ist hierbei anzumerken, daß eine Quantifizierung der morphologischen Veränderungen bereichsweise problematisch ist. Zum einen läßt die unterschiedliche Datenstruktur (Tiefenlinien und positionierte Lotungen) methodisch Unschärfen zu, die insbesondere bei der Verlagerung von Tiefenlinien im Vergleich mit punktuellen Meßdaten zu methodisch bedingten Variationen führen können. Zum anderen können bei unterschiedlicher Datendichte aus den Interpolationen unabgesicherte Veränderungen hergeleitet werden. Aus diesem Grund sind beispielsweise die Veränderungen im landnahen Vorstrandbereich und auf dem Strand nicht einbezogen worden, da beispielsweise die Aufnahme von 1995 hierfür in den strandnahen Zonen eine unzureichende Datendichte aufweist. Es erscheint trotz dieser Einschränkungen legitim, auf dieser Grundlage Veränderungstendenzen aufzuzeigen.

Die Auswirkungen auf das Seegangsklima werden für die morphologischen Zustände von 1990 und 1995 mit Hilfe des mathematischen Seegangsmodells HISWA [HOLT-HUIJSEN & BOOIJ 1987] vorgenommen, dessen Eignung für dieses Gebiet bereits nachgewiesen werden konnte [DEN ADEL et al. 1991; NIEMEYER et al. 1992, 1995a]. Die Begrenzung auf diese beiden Aufnahmen erfolgt zum einen, da hierfür eine geeignete digitale Datenbasis zur Verfügung steht, die eine hinreichende Auflösung der Modellmorphologie ermöglicht. Zum anderen ist damit in etwa ein Zeitraum abgedeckt, in dem einerseits jeweils eine konventionelle Strandauffüllung und eine kombinierte Vorstrand- und Strandauffüllung stattgefunden hat und für den andererseits ein mittelfristiger Vergleich des Seegangsklimas vorliegt [NIEMEYER 1995].

7.2 Morphologische Veränderungen

Ein Vergleich der Aufnahmen von 1975 und 1995 weist erhebliche Abnahmen im Bereich des nordwestlichen Vorstrandes und des Riffbogens aus (Abb. 230), die auf großen Flächen mehr als einen Meter aufweisen. Lediglich in Verlängerung des Talwegs des Seegats entsprechend der Tiefenlinien unterhalb von NN -6 m ist eine signifikante Auflandung von teilweise mehr als einem Meter erkennbar. Weitere Auflandungen sind in diesem Zeitraum zwischen Nordergründen und dem Nordstrand von Norderney sowie westlich der Ebbstromrinne des Seegat im Bereich der Robbenplate aufgetreten. Insgesamt ist diese Veränderung aber weniger dramatisch zu bewerten als dem ersten Anschein nach: aus dem Vergleich zu 1960 zeichnet sich für den Zustand von 1975 eine überwiegende, großflächige Auflandung ab (Abb. 231). Insofern kann aus dem Vergleich der topographischen Aufnahmen von 1975 und 1995 kein sich kontinuierlich fortsetzender Erosionstrend im seewärtigen Vorfeld von Norderney hergeleitet werden. Vielmehr hat nach einer Phase überwiegender Erhöhung zwischen 1960 und 1975 anschließend zwischen 1975 und 1990 eine Abnahme stattgefunden (Abb. 232). Allerdings setzt sich dieser Trend nach 1990 fort: der Vergleich der Aufnahmen von 1990 und 1995 weist weitere Abnahmen auf dem nordwestlichen Vorstrand bis in den Bereich des Riffbogens aus (Abb. 233).

Die Staffelung der Tiefenlinien für die Aufnahmen von 1990 und 1995 weist hinsichtlich der Seegangsausbreitung auf die Strände der Insel Norderney und insbesondere auf deren künstlich aufgefüllte Bereiche folgende wesentliche Merkmale auf (Abb. 234 + 235): Die als Basis des Riffbogens anzusehende NN -5 m -Tiefenlinie [LÜDERS & LUCK 1976] ist im Bereich der Nordergründe und des Dovetiefs 1995 unterbrochen, während sie dort 1990 noch geschlossen ist. Im Vorstrand östlich des Seegats ist die ausgedehnte Fläche oberhalb von NN -4m verschwunden; die Tiefenlinie ist enger an die Insel herangerückt. Insbesondere seeseitig des Nordweststrandes hat sich der Vorstrand vertieft und aufgesteilt: hier liegen die NN -4m bis NN -7m -Tiefenlinien dicht gestaffelt seeseitig des Strandes; die NN -5m -Tiefenlinie ist auf noch größere Länge erheblich näher an die Inselstrände herangerückt. Westlich des Seegats spiegeln sich hingegen deutlich die in den Differenzkarten erkennbaren Auflandungen in der Morphologie wider. Hier hat sich in der früheren Lage des Schluchter trotz seeseitig zunehmender Tiefen der Riffbogen verstärkt: die NN -5m -Linie bildet nach Norden bis auf Höhe der Nordwestgründe eine geschlossene Fläche; Flächen oberhalb NN -4m haben sich hier ebenfalls gebildet.

7.3 Änderungen der Seegangsausbreitung

Exemplarisch werden hier Daten einer Seegangsmessung vom 17. 11. 1995 verwandt, die kurz vor Eintritt des morgendlichen Tidehochwassers mit NN +144 cm am Pegel Norderney-Riffgat stattgefunden hat. Entgegen früheren Erkenntnissen aus Naturmessungen [NIEMEYER 1983, 1986, 1987c] und Modelluntersuchungen [ADEL et al. 1991; NIEMEYER et al. 1992, 1995a] erfolgt zwischen dem Seegebiet und dem Vorstrand eine unerwartet geringe Energieumwandlung: die signifikante Wellenhöhe nimmt um 14,4 %, die Peakperiode um 1,6 % und die Energiedichtekonzentration um 18,1 % ab. Es liegen weitere Datensätze vor, auf die an dieser Stelle nicht näher

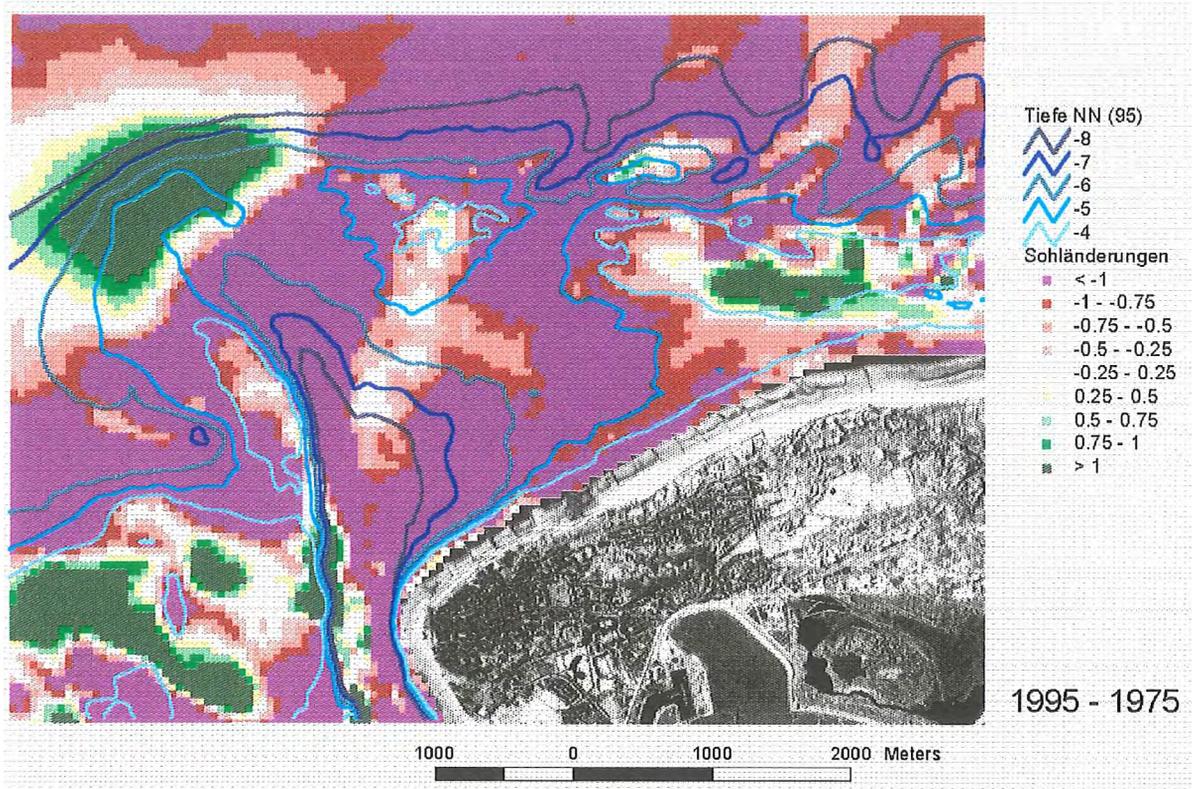


Abb. 230: Differenzkarte der Aufnahmen von 1995 und 1975

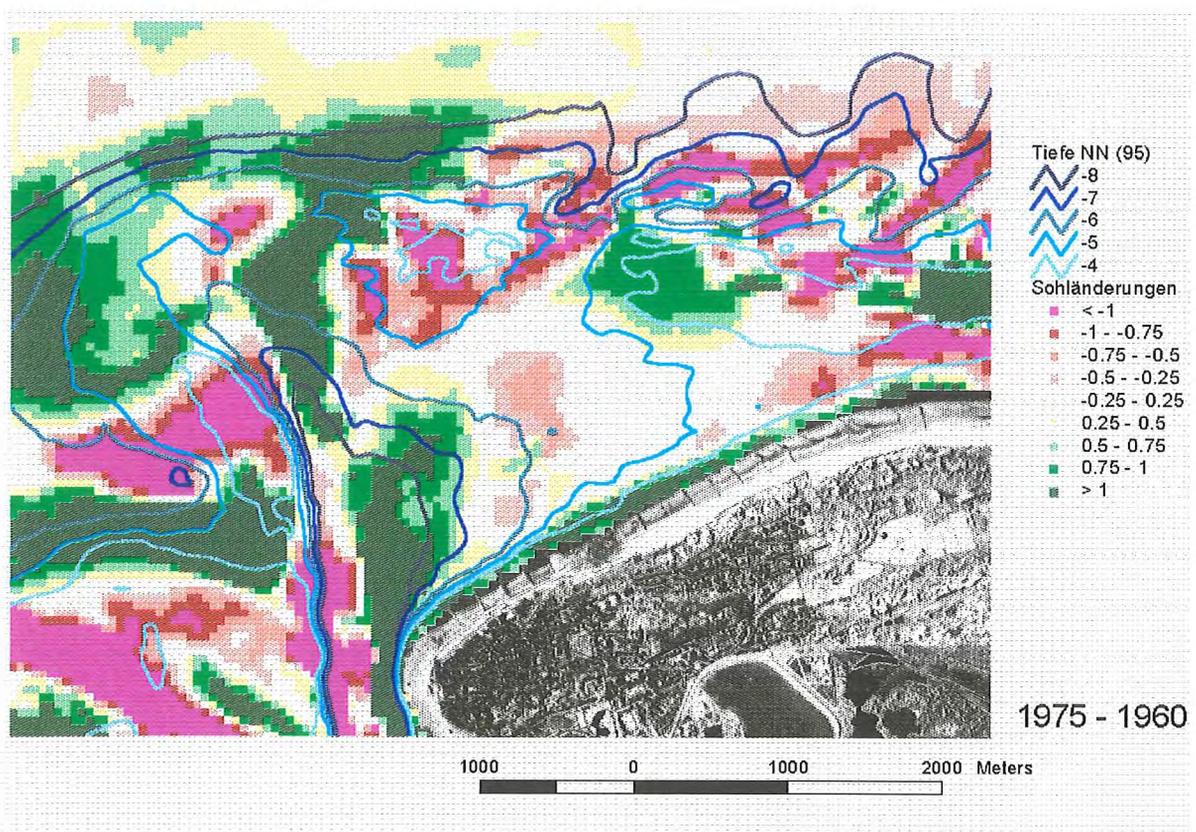


Abb. 231: Differenzkarte der Aufnahmen von 1975 und 1960

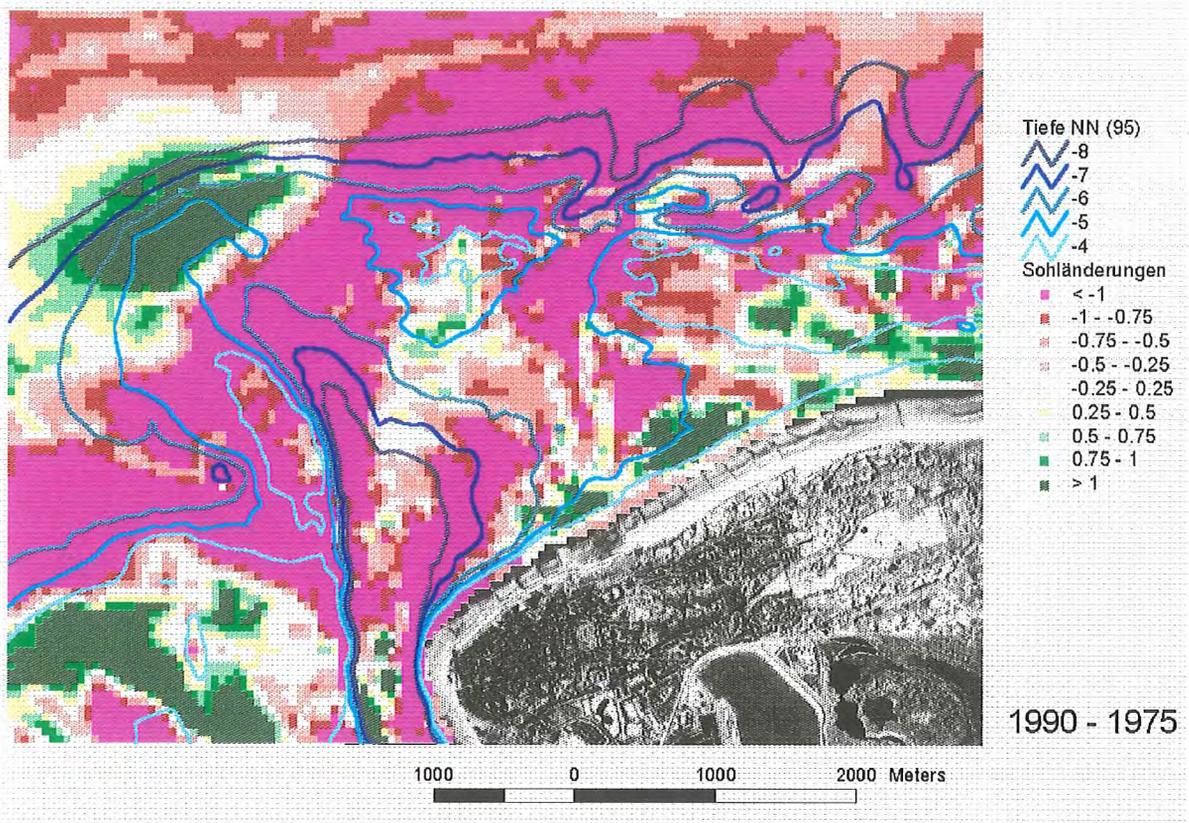


Abb. 232: Differenzkarte der Aufnahmen von 1990 und 1975

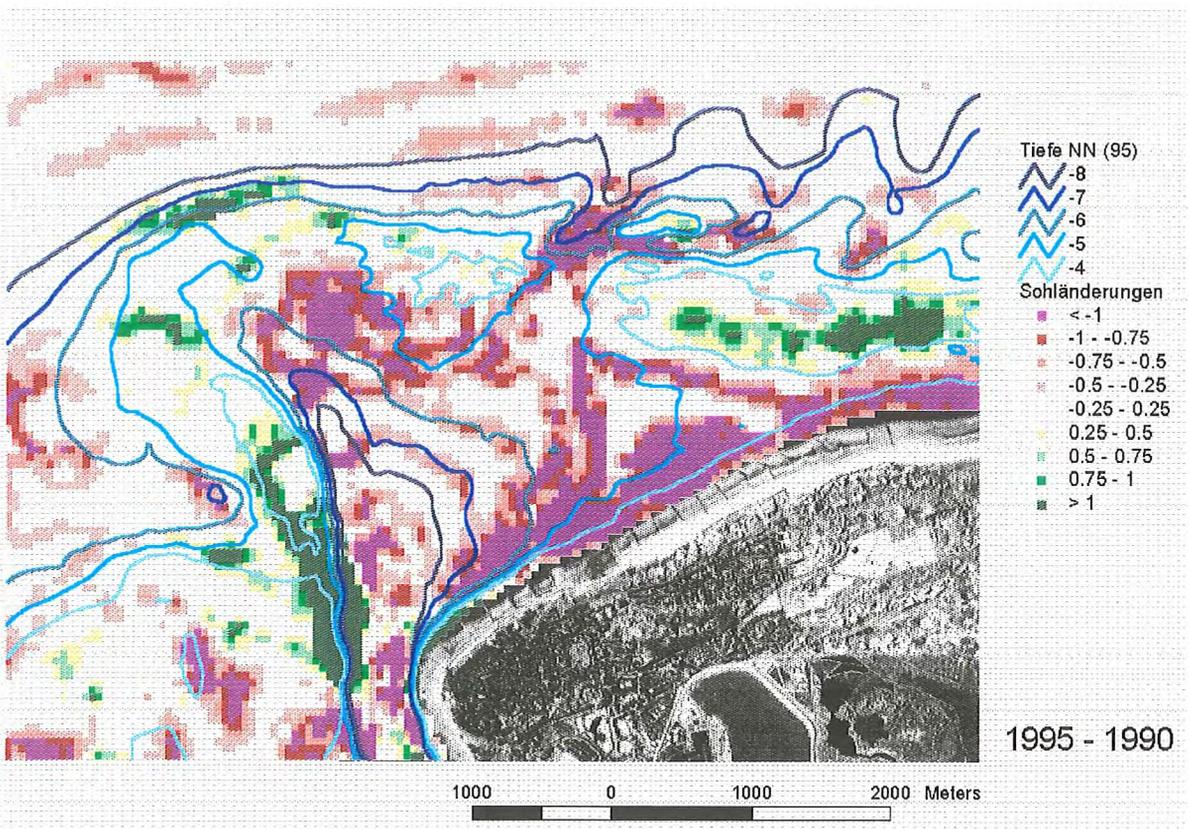


Abb. 233: Differenzkarte der Aufnahmen von 1995 und 1990

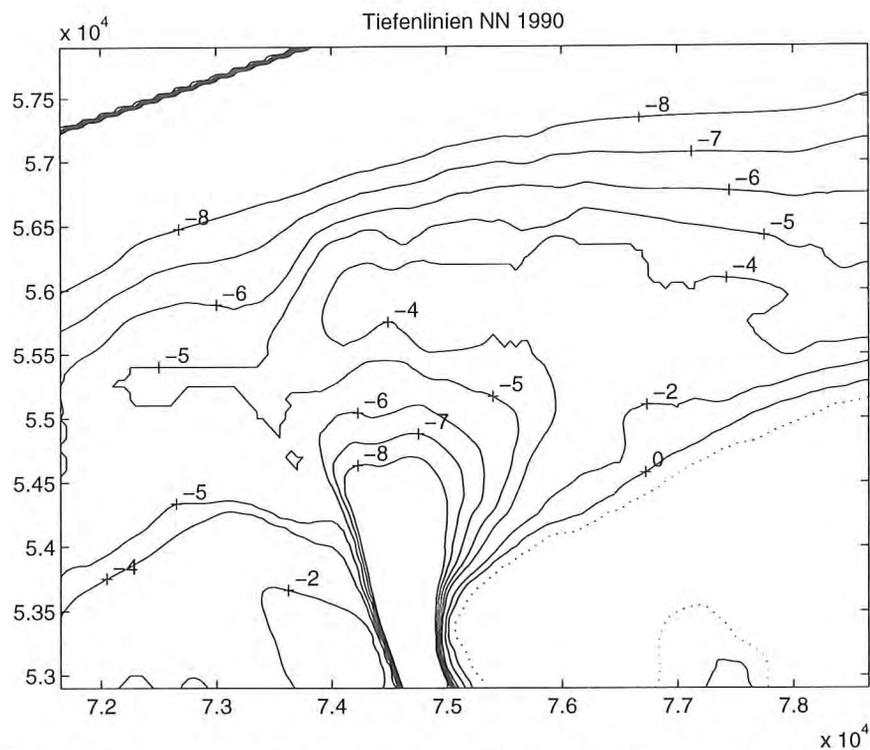


Abb. 234: Auf NN bezogene Tiefenlinien der Topographie von 1990

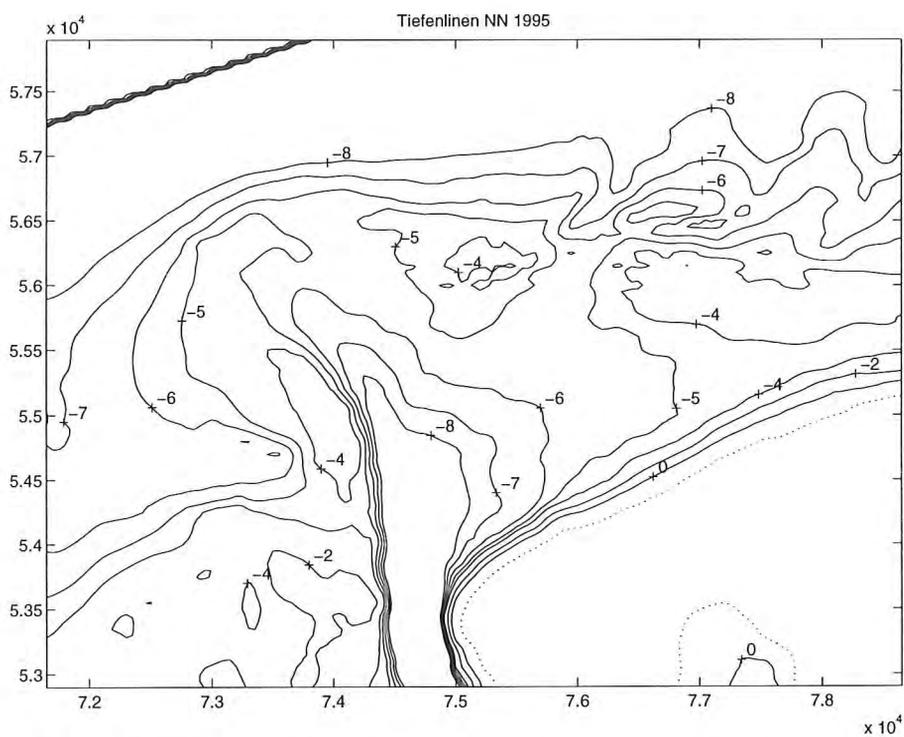


Abb. 235: Auf NN bezogene Tiefenlinien der Topographie von 1995

eingegangen wird, aus denen ähnliche Tendenzen - wie anhand des vorstehend geschilderten Datensatzes - herzuleiten sind. Um hinsichtlich der Ergebnisse der Naturmessungen Einblicke in die gesamte Seegangsausbreitung in diesem Bereich zu erhalten, wurden mit den Datensätzen der Naturmessungen entsprechende Läufe vorgenommen. Das Modell war für diesen Bereich bereits im Rahmen des von der EU und dem BMBF geförderten Forschungsvorhabens NourTEC (Innovative Nourishment Technology) eingerichtet worden [NIEMEYER et al. 1995b]. Für das Modellgebiet (Abb. 236) wurden auf Grundlage der auf der Grundlage der verfügbaren Eingangsdaten für 1990 (Tiefenlinien) und 1995 (positionierte Lotungen) (Abb. 237) bei Eingabe der gleichen seeseitigen Randbedingungen entsprechend den oben angeführten Daten der Naturmessungen. Die im Modell aus Morphologie und Wasserstand sich ergebenden unterschiedlichen Wassertiefen sind zur Anschauung ergänzend dargestellt (Abb. 238 + 239).

Die beiden Modellläufe bestätigen weitgehend die Ergebnisse der Naturmessungen: Für die Morphologie von 1995 zeigen sich deutlich höhere signifikante Wellenhöhen auf dem Vorstrand (Abb. 241) als für die von 1990 (Abb. 240). Insbesondere vor den Strandbereichen zwischen etwa den Bühnen D_1 und F_1 sind die Wellen für 1995 deutlich höher als 1990. Aber auch die beiderseits angrenzenden Bereiche unterliegen einer höheren Seegangsbelastung, was auch an dem Durchschwingen längerer Perioden deutlich wird (Abb. 242 + 243). Insbesondere bei der Ausbildung von signifikanten Wellenhöhen von mehr als zwei Metern für die hier vorherrschenden Randbedingungen sind Überlagerungseffekte des durch die vertieften Rinnen des Schluchter, der in seiner Lage von 1995 eine für die Seegangsförderung auf den Vorstrand und den Nordweststrand von Norderney viel günstigeren Rinnenachsenlage als 1990 aufweist, einschwingenden Seegangs mit Wellensystemen maßgebend, die sich über das ebenfalls gegenüber 1990 eingetiefte Dovetief in Richtung der Inselstrände ausbreiten. Insgesamt sind diese Ergebnisse ein ernstzunehmendes Indiz für eine erfolgte oder zu erwartende Verlagerung des Divergenzbereiches am Nordweststrand.

Im Bereich des Seegats und unmittelbar angrenzender Strände zeigt sich hingegen für die Morphologie von 1995 geringere Seegangsbelastungen ab (Abb. 240 - 243). Hier zeigen sich die Auswirkungen der Verstärkung des Riffbogens westlich des Seegats, die zu einer intensiveren Energieumwandlung führen und somit die in der Ausbreitungsrichtung des Seegangs liegenden Strände abschirmen.

Wenngleich hier in Form einer Fallstudie nur ein Einzelereignis untersucht wurde, so lassen die Ergebnisse allgemeine Schlüsse zu: auf den nordwestlichen Vorstrand von Norderney schwingt bereits bei Normaltiden ein deutlich energiereicherer Seegang ein als in früheren Jahren. Inwieweit diese Gegebenheit unmittelbar auf die Seegangsbelastung der Strände und damit auf die Lebensdauer von Strandauffüllungen Wirkung hat, läßt sich in diesem Stadium noch nicht mit Sicherheit feststellen. Aufgrund bisheriger Erfahrungen zur Riffbrandung [NIEMEYER 1987c] ist es aber durchaus möglich, daß im Bereich der Aufsteilung des Vorstrandes das Einschwingen energiereicheren Seegangs durch eine verstärkte Energieumwandlung kompensiert wird. Die Ergebnisse bieten aber erheblichen Anlaß, dieser Frage weiterhin eindringlich nachzugehen.

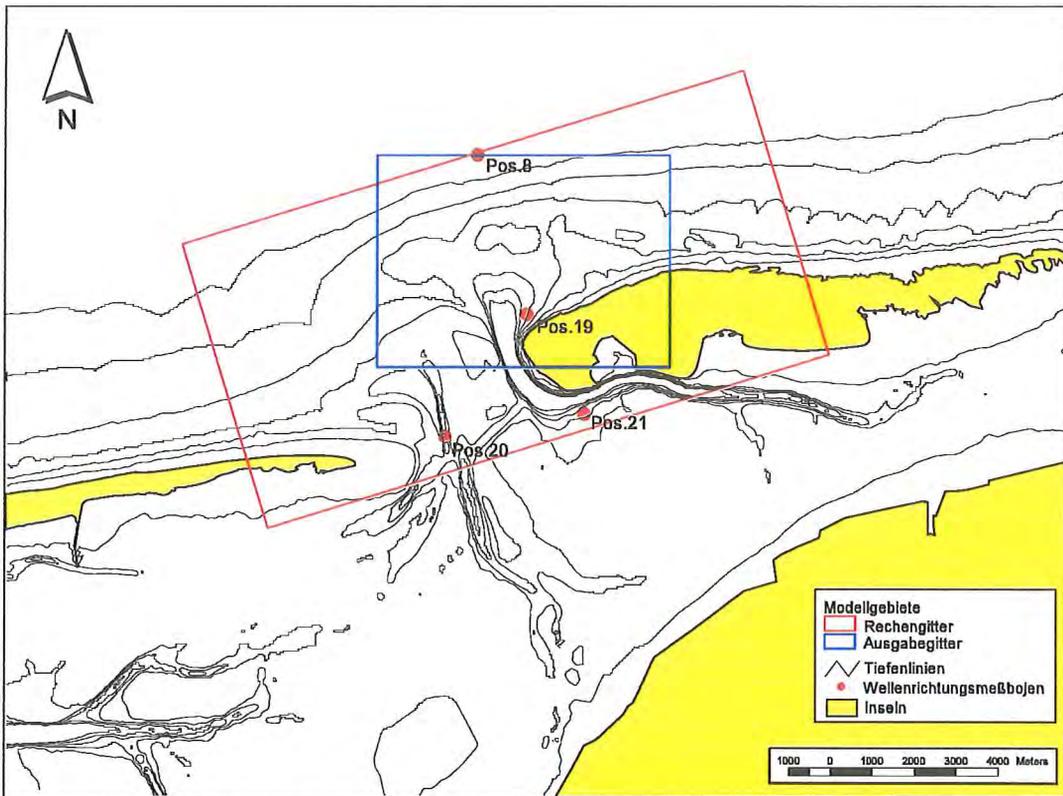


Abb. 236: Modellgebiete für das mathematische Seegangmodell HISWA mit der Topographie von 1990 (Auflösung Rechengitter 35 · 75m)

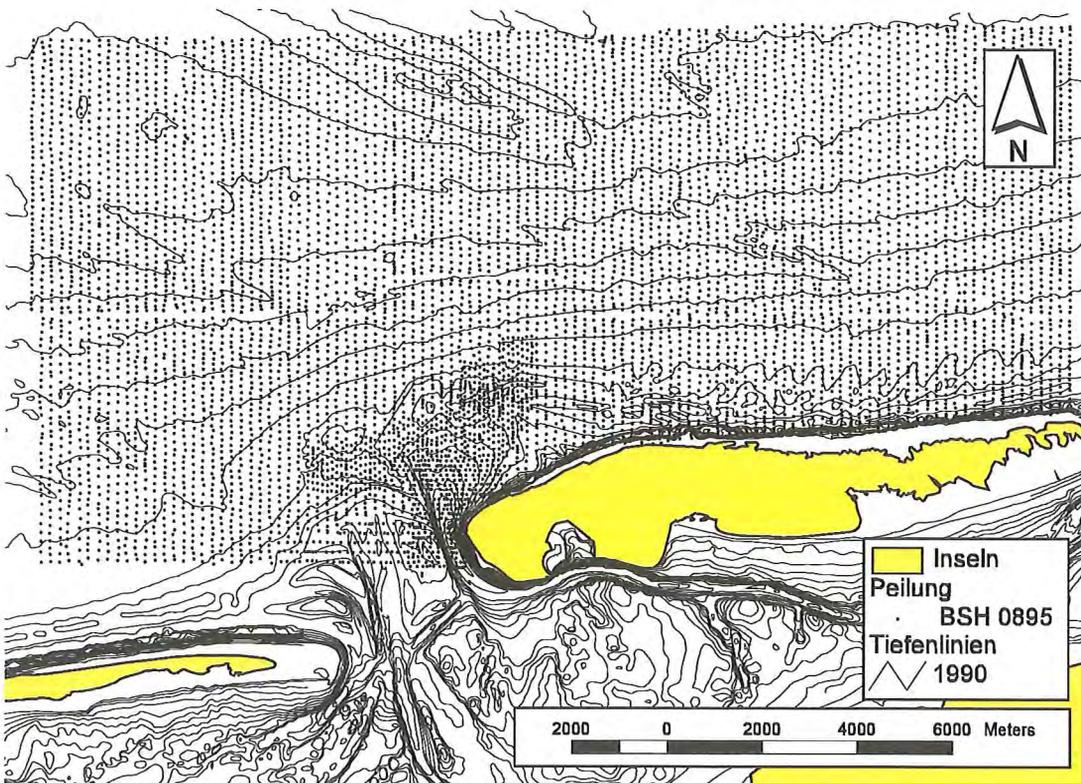


Abb. 237: Datengrundlagen für die Modellmorphologie von HISWA (Tiefenlinien 1990; positionierte Tiefen 1995)

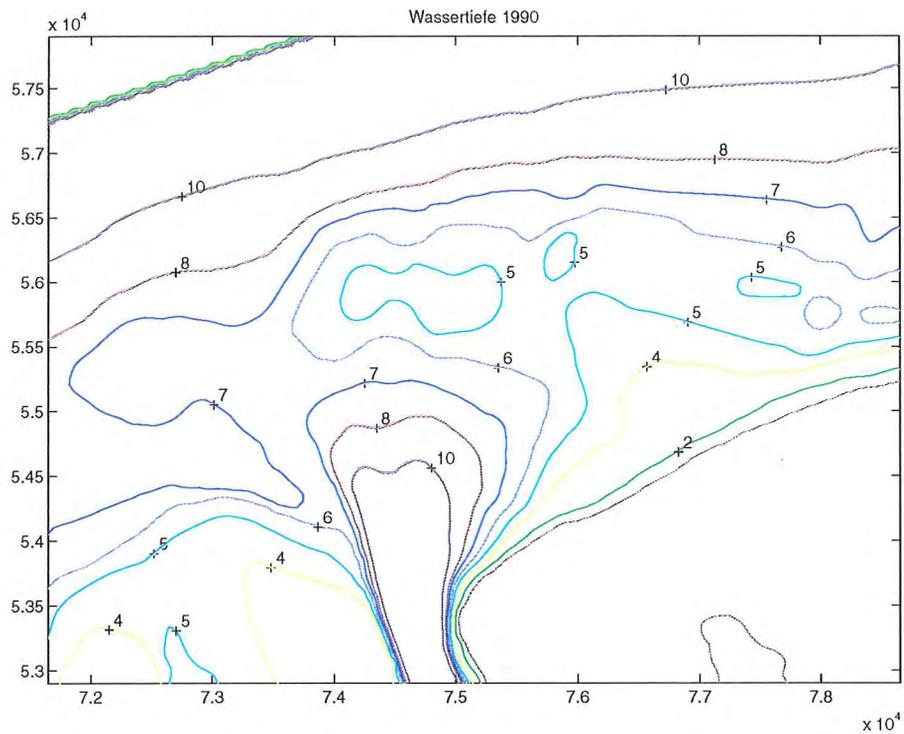


Abb. 238: Wassertiefen im HISWA-Modell (Tide vom 17.11.1995) für die Topographie von 1990

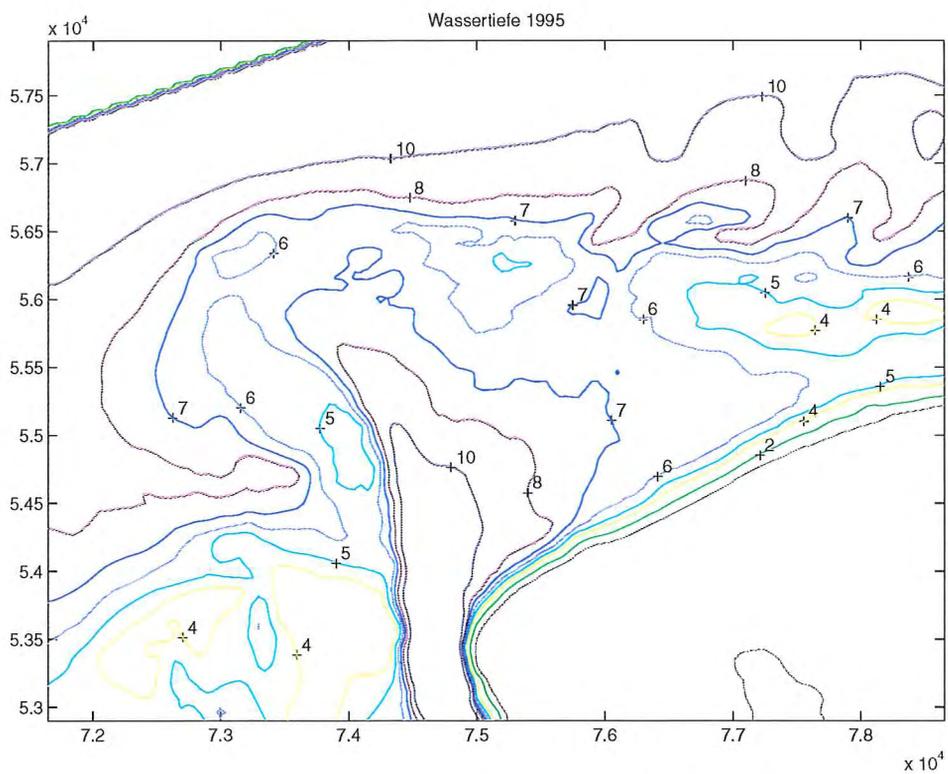


Abb. 239: Wassertiefen im HISWA-Modell (Tide vom 17.11.1995) für die Topographie von 1995

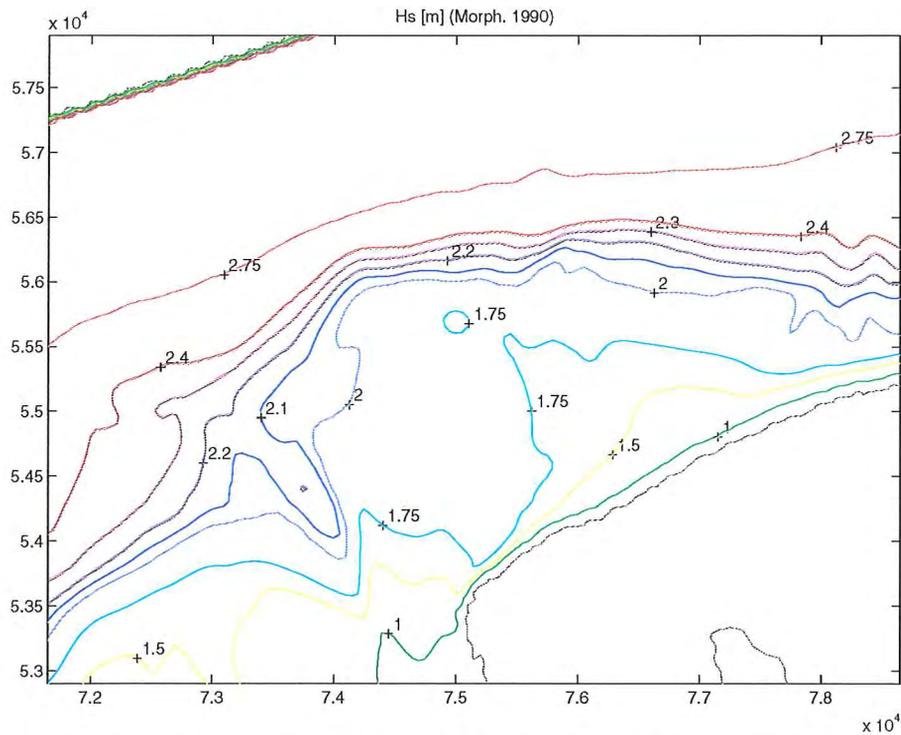


Abb. 240: Signifikante Wellenhöhen aus dem mathematischen Seegangmodell HISWA für die Topographie von 1990 (Tide vom 17.11.1995)

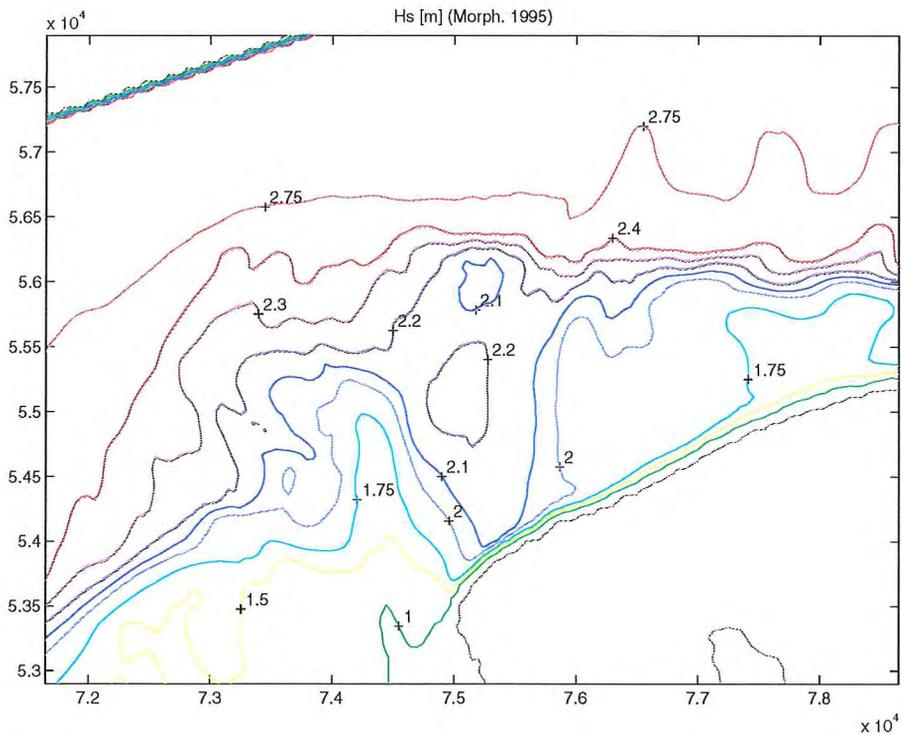


Abb. 241: Signifikante Wellenhöhen aus dem mathematischen Seegangmodell HISWA für die Topographie von 1995 (Tide vom 17.11.1995)

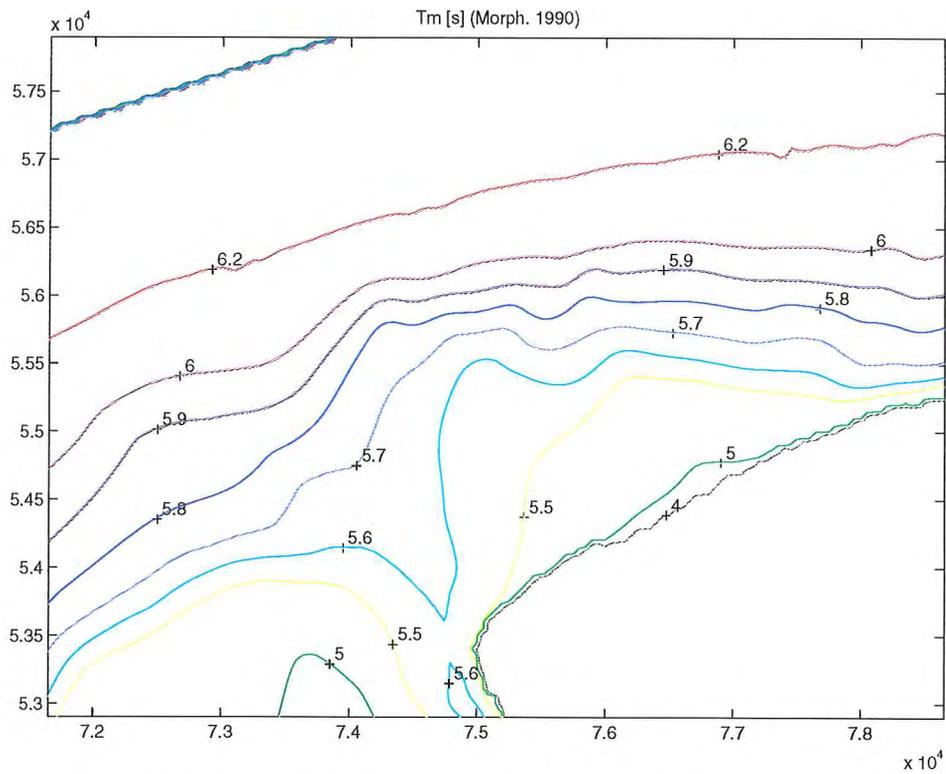


Abb. 242: Mittlere Wellenperioden aus dem mathematischen Seegangmodell HISWA für die Topographie von 1990 (Tide vom 17.11.1995)

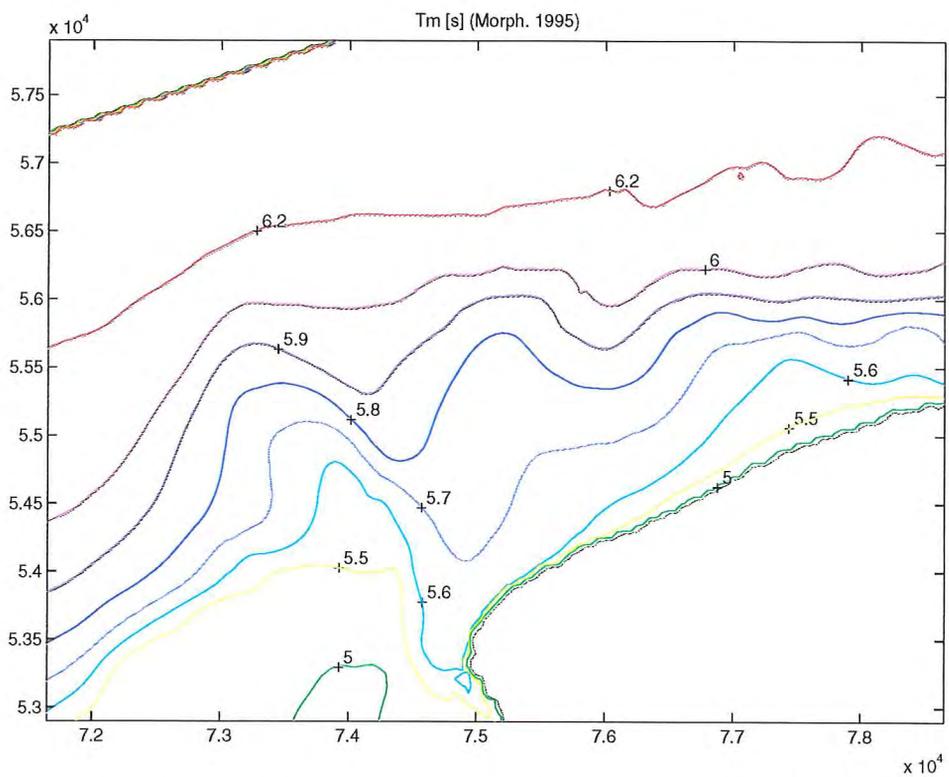


Abb. 243: Mittlere Wellenperioden aus dem mathematischen Seegangmodell HISWA für die Topographie von 1995 (Tide vom 17.11.1995)

Die Strände im Bereich des Seegats erfahren zwar nach diesen Untersuchungsergebnissen eine geringere Seegangsbelastung, was in Einklang mit der morphologischen Entwicklung steht; hinsichtlich der Lebensdauer und daraus abzuleitenden Wiederholungsintervalle der Strandauffüllungen sind aber die Verhältnisse an den nordwestlichen Stränden maßgebend.

8. ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN

Auf Norderney ist 1992 eine kombinierte Vorstrand- und Strandauffüllung vorgenommen worden, deren Gestaltung auf den Erkenntnissen des vorangegangenen vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsvorhabens „Wechselwirkungen von Küstenbauwerken und mariner Umwelt“ beruht. Folgerichtig ist diese Versuchsstrandauffüllung durch ein vom BMBF gefördertes KFKI-Forschungsvorhaben im Sinne einer Erfolgskontrolle begleitet worden. Wesentliches Untersuchungsziel sind dabei eingehendere Erkenntnisse über die für Optimierungen der Gestaltung und damit verbesserter Wirkdauer von künstlichen Auffüllungen stattfindenden Transportprozesse zu gewinnen. Diesem Problembereich ist dieser Bericht gewidmet.

Die kombinierte Vorstrand- und Strandauffüllung auf Norderney hat keine nachhaltige Verbesserung hinsichtlich der Lebensdauer gegenüber vorangegangenen konventionellen Auffüllungen auf Norderney gezeigt. Es ist in diesem Zusammenhang aber festzuhalten, daß die Wiederholungsauffüllung 1992 auf einem höheren Niveau vorhandenen Sandvolumens ausgeführt wurde als frühere Auffüllungen, wie beispielsweise die von 1989. Von daher ist die kürzere Lebensdauer nicht als Bewertungskriterium geeignet. Ebenso wenig hat das mittelfristige Wasserstands- und Seegangsklima auf dem Strand keine Indizien für eine stärkere hydrodynamische Beanspruchung ergeben. Es bleibt somit festzuhalten, daß ein übertragbarer Vergleich hinsichtlich der Effektivität dieser Sonderform mit vorangegangenen konventionellen Auffüllungen wegen der bei höheren Restvolumen als früher erfolgten Wiederauffüllung nicht möglich ist.

Im Hinblick auf die der Gestaltung zugrunde gelegenen Transportprozesse ist festzustellen, daß diese teilweise aus der morphologischen Entwicklung reproduzierbar sind, wie beispielsweise bei der Regeneration trockener Strandbereiche nach vorübergehendem Verschwinden. Auch die exemplarischen Analysen von Transportfaktoren erhärten diese Annahmen weitgehend. Insbesondere zeigen sich bei Vertikalprofilen eindeutig die früher anhand von Einpunktmessungen angenommenen sohnahen, auflandig gerichteten Drifteffekte. Von Bedeutung für die Transportvorgänge sind ebenso langperiodische Vorgänge, die einerseits auf Wellengruppeneffekte zurückzuführen sind und andererseits als Sekundärererscheinungen der Brandung erzwungen werden. Trotz eines sehr einheitlichen Anlaufverhaltens des Seegangs ist keine einheitliche küstenparallele Brandungsströmung in Driftrichtung erkennbar. Es zeigt sich eine erhebliche Richtungsfluktuation, die stark vom Seegangsklima und der jeweiligen Wassertiefe beeinflusst werden. Hierbei mag auch von Bedeutung sein, daß die früher stabile Lage des Divergenzbereiches keineswegs mehr als sicher anzusehen ist.

Für eine seit 1990 erfolgte Verlagerung des Divergenzbereiches sprechen auch die Untersuchungen zu den großräumigen Randbedingungen. Nachhaltige morphologische Änderungen im Bereich des Riffbogens und Vorstrands haben zu einer ebenso nachhaltigen Änderung der Seegangsausbreitung vom Seegebiet bis in das Vorfeld des Auffüllungsbereiches am Nordweststrand geführt: Hier tritt 1995 - bei gleichartigen hydrodynamischen Randbedingungen - energiereicherer Seegang als 1990. Die Lage des Maximums läßt eine Verlagerung des Divergenzbereiches nach Osten - insbesondere in Zusammenhang mit den Analysen küstenparalleler Strömungsvorgänge - als wahrscheinlich ansehen. Aus den hier verfügbaren Daten läßt sich nicht herleiten, ob und inwieweit diese Änderungen zu einer höheren Seegangsbelastung der Strände führen. Die Steilheit im Vorstrandbereich läßt - in Anlehnung an Erkenntnissen zur Riffbrandung - eher erwarten, daß der höhere Seegangseintrag dort durch eine stärkere Energieumwandlung kompensiert wird. Hier liegt weitergehender Untersuchungsbedarf zur Klärung der entstandenen Fragen vor.

Hinsichtlich zukünftiger Gestaltung von Auffüllungen und insbesondere der Frage, ob Auffüllungen im Vorstrandbereich unter den auf Norderney gegebenen Randbedingungen erfolgversprechend sind ist nicht abschließend beantwortbar. Zum einen steht dem die frühzeitige Wiederauffüllung - auf einem im Vergleich zu früheren Eingriffen - höheren Niveau entgegen, die eine eindeutige Vergleichbarkeit ausschließt. Darüber hinaus ist nicht klärbar, ab wann die Ausbreitung energiereicheren Seegangs auf den Vorstrand einsetzte und inwieweit eine daraus resultierende Verschiebung des Divergenzbereiches bereits während der Lebensdauer der kombinierten Vorstrand- und Strandauffüllung wirksam werden konnte.

Signifikant gegenüber konventionellen Strandauffüllungen sind die hohen Anfangsverluste während der Umformung der als Höfte in den Vorstrand getriebenen Aufspülkörper. Zwar waren in dieser Zeit und in den entsprechenden Bereichen keine hydrodynamischen Messungen möglich, doch lassen die verfügbaren Analysen Rückschlüsse auf die dabei wirksamen Transportfaktoren zu. Die Geometrie der Auffüllkörper bedingt dort im Vorstrandbereich eine weitgehende bis vollständige Energieumwandlung des einschwingenden Seegangs auf engem Raum. Das Volumen der ausbrandenden Wellen verteilt sich anschließend auf die Bereiche seitlich des Auffüllkörpers, wo zum Ausgleich der Massenbilanz seewärts gerichtet Rippströmungen entstehen. Hierbei wird mit großer Wahrscheinlichkeit ein erheblicher Teil des sich aus dem Höft lösenden Materials statt landwärts in Richtung See verfrachtet. Sollte die Wiederholung einer Auffüllung im Vorstrandbereich erfolgen, so ist zur Vermeidung derartiger Anfangsverluste und damit zur Erhöhung des Materialdepots im Umlagerungsbereich Vorstrand-Strand eine flächenhafte Einbringung in den Vorstrand dringend zu empfehlen.

9. DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben „Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen“ wurde über das KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE gefördert.

Im Vorhaben wurden umfangreiche Naturuntersuchungen ausgeführt, die nur durch den engagierten und umsichtigen Einsatz der beteiligten Kollegen zu Erfolgen führen konnten, wobei oft bei gerade unerfreulichen Umweltbedingungen das angestrebte Ziel verfolgt werden mußte. Für die Sicherung des Erfolges war nach dem Messen das Erfassen, Speichern und Analysieren umfangreiche Datenmengen erforderlich. Insbesondere die mittlerweile bejahrte Datenferübertragung aus dem Vorgängerprojekt war hierbei eine häufig wiederkehrende Herausforderung für Geist und Körper, deren Bestehen immer wieder neuer Motivation bedurfte. Trotz erheblicher anderer Belastungen haben die Kollegen Günter Brandt, Detlef Glaser, Holger Karow und Georg Münkewarf in beeindruckender Form ihre Verbundenheit mit den ihnen übertragenen Aufgaben durch unermüdliche Eigeninitiativen unter Beweis gestellt und damit die unverzichtbaren Grundlagen für diesen Bericht geschaffen. Die Analyse seegangsinduzierter Strömungen erfordert - insbesondere bei anwendungsbezogenen Fragestellungen wie hier - noch eingehende Fortentwicklungen. Die dafür auszuführenden Programmierarbeiten hat Herr Dipl.-Inf. Jochen Fleßner gleichermaßen mit Effizienz und Präzision vorgenommen. Alle Mühen wäre vergeblich, könnte dem Publikum nicht deren Ergebnis präsentiert werden. Die dazu erforderliche textliche und graphische Berichtserstellung haben die Herren Heiner Alberts und Thomas Hartkens in ansprechender Form vorgenommen.

10. LITERATUR

- ADEL, J. D. DEN, NIEMEYER, H. D., FRANKEN, A. F., BOOIJ, N., DEKKER, J. & VOGEL, J. A. [1991]:** Wave model application in a Wadden Sea area. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York
- ARBEITSGRUPPE NORDERNEY des "Küstenausschuß Nord- und Ostsee" [1952]:** 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
- BATTJES, J. A. [1974]:** Surf similarity. Proc. 14th Int. Conf. Coast. Eng. Copenhagen/Denmark
- BATTJES, J. A. [1988]:** Surf-zone dynamics. Ann. Rev. Fluid Mech. 20.
- BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) [1994]:** Gezeitentafeln für das Jahr 1995. Band I - Europäische Gewässer, Hamburg
- EITNER, V. [1993]:** Sedimentdynamik im Strandbereich einer brandungsbeeinflussten mesotidalen Barriere-Insel unter Berücksichtigung der Auswirkungen künstlicher Strandauffüllungen (Norderney, südl. Nordsee). Diss. Univ. Münster
- EITNER, V., RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. [1992]:** Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge. Die Küste 54, 93-110
- EITNER, V., RAGUTZKI, G., STEPHAN, H.-J. & TADDIGS, R. [1993]:** Sedimentologische und morphologische Ergebnisse eines interdisziplinären Meßeinsatzes im Bühnenfeld D1-E1 am 19. Oktober 1993 sowie die zeitliche Entwicklung der Massenbilanzen. 3. Zwischenber. KFKI-FV MTK 0545 A9, NLÖ - Forschungsst. Küste
- EITNER, V., RAGUTZKI, G., [1994]:** Effects of artificial beach nourishment on nearshore sediment distribution (Island of Norderney, southern North Sea). J. Coast. Res. 10, 637-650
- EITNER V., KAISER, R. & NIEMEYER, H.D. [1995]:** Nearshore sediment transport processes due to moderate hydrodynamical conditions. In: special volume "Geology of siliciclastic shelf seas", Renard Centre of Marine Geology, Gent
- ERCHINGER, H. F. [1986]:** Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste, H. 43

- ERCHINGER, H.F. & TILLMANN, B. [1992]:** Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste 54, 143-168
- ERCHINGER, H.F. & KNAACK, H. [1995]:** Die Versuchsstrandaufspülung 1992 auf Norderney und Messungen äolischen Sandtransport. Die Küste 57: 1-23
- FÜLSCHER [1905]:** Über Schutzbauten zur Erhaltung der ost- und nordfriesischen Inseln. Zeitschr. f. Bauwesen
- GRAAFF, J. VAN DE, NIEMEYER, H.D. & OVEREEM, J. VAN [1991]:** Beach nourishment, philosophy and coastal protection policy. in: GRAAFF, NIEMEYER, H.D. & Overeem J.v. (eds.): Special Issue: Artificial Beach Nourishments. Coast. Eng., Vol. 16, No. 1
- HAGEN, G. [1863]:** Handbuch der Wasserbaukunst - Dritter Teil: Das Meer. Verl. v. Ernst u. Korn, Berlin
- HAYES, M.O. [1975]:** Morphology and sand accumulation in estuaries. in: L. E. Cronin: Estuarine Research, Vol. 2., Academic Press, New York
- HAYES, M.O. [1979]:** Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: S. P. Leatherman: Barrier islands. Academic Press, New York
- HOLTHUIJSEN, L. & BOOIJ, N. [1987]:** A grid model for shallow water waves. Proc. 20th Intern. Conf. o. Coastal Eng. Taipei, ASCE, New York
- HOMEIER, H. [1962]:** Historisches Kartenwerk 1:50 000 der niedersächsischen Küste. Jber. 1961 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 13
- HOMEIER, H. [1976]:** Die Auswirkungen schwerer Sturmtiden auf die ostfriesischen Inselstrände und Randdünen. Jber. 1975 Forsch.-Stelle f. Insel- und Küstenschutz, Bd. 27
- HOMEIER, H. & LUCK, G. [1969]:** Das Historische Kartenwerk 1:50 000 der Niedersächsischen Wasserwirtschaftsverwaltung als Ergebnis historisch-topographischer Untersuchungen und zur kausalen Deutung hydrologisch-morphologischer Gestaltungsvorgänge im Küstengebiet. Göttingen
- KAISER, R.; BRANDT, G.; GÄRTNER, J.; GLASER, D.; GRÜNE, J.; JENSEN, F.; NIEMEYER, H.D. [1995]:** Wave climate study in Wadden Sea areas. Proc. 24th Intern. Conf. o. Coast. Eng. Kobe/Japan, ASCE, New York
- KERSTING, N.F., BAKKER, W.T. & NIEMEYER, H.D. [1994]:** Evaluation of a combined foreshore and beach nourishment at the German Wadden island of Norderney. Delft Univers. o. Technology/The Netherlands, Centre f. Coast. Res.
- KOCH, M. & NIEMEYER, H. D. [1978]:** Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats. Jber. 1977, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 29
- KÖRITZ D. [1955]:** Quantitative Untersuchung der Wasserverdriftung über das Juister Watt. Jber. 1954 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 6
- KRAMER, J. [1957]:** Künstliche Wiederherstellung von Stränden unter besonderer Berücksichtigung der Strandaufspülung Norderney 1951-1952. Jber. 1957 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 9
- KRAMER, J. [1958]:** Die Strandaufspülung Norderney 1951-1952 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7
- KRAMER, J. [1960]:** Beach rehabilitation by use of beach fills and further plans for the protection of the island of Norderney. Proc. 7th Conf. Coast. Eng. Richmond/USA, ASCE, New York
- KRÜGER, W. [1911]:** Meer und Küste bei Wangerooge und die Kräfte die auf ihre Gestaltung einwirken. Zeitschr. f. Bauwesen, Jg. 1911
- KUNZ, H. [1991a]:** Artificial beach nourishment on Norderney, a case study. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, The Netherlands, ASCE, New York
- KUNZ, H. [1991b]:** 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
- KUNZ, H. & STEPHAN, H.-J. [1992]:** Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. Die Küste 54
- KURZAK, G., LINKE, O., DECHEND, W., KRAUSE, H. & THILO, R. [1949]:** Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney. Jber. 1949 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 1
- LASSEN, H. [1991]:** Örtliche und zeitliche Variationen des mittleren Tidemittelwassers in der südöstlichen Nordsee. Z. f. Vermess.wes., 116. Jg., H. 4
- LASSEN, H. & SIEFERT, W. [1991]:** Mittlere Tidewasserstände in der südöstlichen Nordsee - säkularer Trend und Verhältnisse um 1980. (Schlußbericht eines KFKI-Projektes), Die Küste, H. 52
- LIEBIG, W. [1993]:** Wadden Sea Morphology and GIS., Proc. of the Europ. Arc/Info User Congr., Athens
- LONGUET-HIGGINS, M. S. [1953]:** Mass transport in water waves. Philos. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 245
- LONGUET-HIGGINS, M. S. & STEWART, R.W. [1962]:** Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to surf beats. J. Geophys. Res. 13

- LONGUET-HIGGINS, M. S. & STEWART, R.W. [1963]:** Radiation Stresses in water waves, a physical discussion with applications. Deep-Sea Research 21
- LUCK, G. [1970]:** Die zweite Strandaufspülung am Weststrand Norderney. Jber. 1968 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 20
- LUCK, G. [1975]:** 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, 1-81
- LÜDERS, K. & LUCK, G. [1976]:** Kleines Küstenlexikon. 3. neubearb. Aufl., Verl. A. Lax, Hildesheim
- MUNK, W.H. [1949]:** Surf beats. Trans. Amer. Geophys. Union. Vol. 30
- MÜLLER, V., [1993]:** Meßbericht zum Feldversuch am 18.-20.10.1993 Norderney - Bühnenfeld D1-E1. Interner Bericht TU Hamburg-Harburg
- NIEMEYER, H. D. [1976]:** Der Verlauf der Sturmtiden vom Januar 1976 im Bereich der Ostfriesischen Inseln. Jber. 1975, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 27
- NIEMEYER, H. D. [1979a]:** Naturmessungen der Seegangs- und Brandungsbeanspruchungen von Inselstränden und Inseln Schutzwerken. Jber. 1978 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 30
- NIEMEYER, H. D. [1979b]:** Instrumental equipment and data acquisition 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. [1985]:** Zum mittelfristigen Wasserstands- und Seegangsklima vor Norderney. Schlußber. KFKI-FV MTK 0545 Bundesmin. f. Bild. u. Forsch.-Meerestech.
- NIEMEYER, H. D. [1986]:** Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderney. Jber., 1985 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 37, 49-96
- NIEMEYER, H. D. [1987a]:** Zur Klassifikation und Häufigkeit von Sturmtiden. Jber. 1986, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 38
- NIEMEYER, H. D. [1987b]:** Tidestrommessungen in Bühnenfeldern. Jber. 1986, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 38
- NIEMEYER, H. D. [1987c]:** Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. Proc. 20th Intern. Conf. o. Coastal Eng. Taipei, Taiwan, ASCE, New York
- NIEMEYER, H. D. [1990]:** Morphodynamics of tidal inlets. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. - Progr. o. Contin. Educat. 1990) Delft Univ. o. Techn. Intern. - Intern. Civ. Eng.
- NIEMEYER, H. D. [1991]:** Field measurements and analysis of wave-induced near-shore currents. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York
- NIEMEYER, H.D. [1992a]:** Naturuntersuchungen hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen an erodierenden Stränden. Schlußber. KFKI-Forschungsvorh. MTK 385-Teil III, Bundesm. f. Forsch. u. Technol.-Meerestech.
- NIEMEYER, H.D. [1992b]:** Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. Die Küste 54
- NIEMEYER, H. D. [1995a]:** Long-term morphodynamical development of East Frisian Islands and Coast. Proc. 24th Int. Conf. o. Coast. Eng. Kobe/Japan, ASCE, New York
- NIEMEYER, H.D. [1995b]:** Zum mittelfristigen Wasserstands- und Seegangsklima vor Norderney. Schlußbericht KFKI-FV "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen" Teilprojekt: Hydrographie, Teil I
- NIEMEYER, H.D., GÄRTNER, J. & GRÜNE, J. [1992]:** Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. Schlußber. KFKI-Forschungsvorhaben MTK 464 B - Teil I, Bundesmin. f. Forsch. u. Techn.-Meerestech.-
- NIEMEYER, H.D., KAISER, R. & EITNER, V. [1994]:** Combined shoreface and beach nourishment - Island of Norderney/East Frisia. NOURTEC scientific and technical progress report 6/93 - 6/94, MAS2-CT93-0049
- NIEMEYER, H.D.; KAISER, R.; ADEL, J.D. DEN [1995a]:** Anwendung des mathe-matischen Seegangs-modells HISWA auf Wattenmeerbereiche. Die Küste, H. 57
- NIEMEYER, H.D.; BIEGEL, E.; KAISER, R.; KNAACK, H.; LAUSTRUP, C.; MULDER, J.P.M.; SPANHOFF, R.; TOXVIG, H. [1995b]:** General aims of the NOURTEC project -effectiveness and execution of beach and shoreface nourishments-. Proc. 4th Conf. o. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Rio de Janeiro/Brazil
- PÄTZOLD, U. [1982]:** Bilanz und Verformung aufgespülter Sandstrände. Jber. 1980, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 32, 41-55, Norderney
- PEPER, G. [1955]:** Die Entstehung und Entwicklung der Inselschutzwerke auf Norderney mit besonderer Berücksichtigung der Bauten der letzten Jahre. Neues Arch. f. Niedersachs., Bd. 8, H. 3

- PUTNAM, J.A., MUNK, W.H. & TRAYLOR, M.A. [1949]:** Prediction of Longshore Currents. Trans. Am. Geophys. Union 30
- PUTZ, R. R. [1952]:** Statistical distribution for ocean waves. Trans. Am. Geophys. Un., Vol. 33, No. 5
- ROELSE, P., COOSEN, J. & MINNEBOO, F. A. J. [1991]:** Beach Nourishment and monitoring programme. in: GRAAFF, J. v. d., NIEMEYER, H. D. & OVEREEM, J. v. (eds.), Special Issue: Artificial Beach Nourishments. Coast. Eng., Vol. 16, No. 1
- ROHDE, H. [1977]:** Sturmfluthöhen und säkularer Wasserstandsanstieg an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, H. 30
- ROHDE, H. [1979]:** Die neue DIN 4049 - Teil 1 - Hydrologie, Begriffe, quantitativ. Wasser u. Boden, 31. Jg., H. 12
- SCHÜTTRUMPF, R. [1973]:** Über die Bestimmung von Bemessungswellen für den Seebau am Beispiel der südlichen Nordsee. Mitt. d. Franzius-Inst. f. Wasserbau u. Küsteningenieurw., H. 39
- SHEPARD, F.P. & INMAN, D.L. [1951]:** Nearshore Circulation. Proc. 1st Conf. Coast. Eng.
- STEPHAN, H.-J. [1988]:** Fünf Strandauffüllungen auf Norderney - Ergebnisse morphologischer Untersuchungen. Arb. a. d. Forschungsstelle Küste, Nr. 11, Norderney
- STEPHAN, H.-J. & WESTHOFF, T. [1992]:** Zur Ermittlung der Sandmengen vor Norderney. unveröff. Dienstber. NLÖ -Forschungsst. Küste
- 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
- THILO, & KURZAK, G. [1952]:** Die Ursachen der Abbrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney. Die Küste, Jg. 1, H. 1
- TOLLE, A. [1864]:** Die Schutzwerke der Insel Norderney. Zeitschr. Arch.- u. Ing. Vereins f. d. Kgr. Hannover, Neue Folge d. Not.-Bl., Bd. 10, H. 2 + 3
- WITTE, H.-H. [1970]:** Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. Die Küste, H. 19
- YU, Z., NIEMEYER, H.D. & BAKKER, W.T. [1991]:** Site investigations on sand concentration in the sheetflow layer. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft/The Netherlands, ASCE New York

11. Symbole

Zeichen	Einheit	Begriffsbestimmung
V_{10}	m/s	Mittel der 10 % größten Stromgeschwindigkeiten
V_{rms}	m/s	Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate aller Stromgeschwindigkeiten
V_m	m/s	Mittlere Stromgeschwindigkeit
H_{max}	m/s	Maximale Wellenhöhe
H_{rms}	m/s	Quadratwurzel aus der Summe der Quadrate aller Wellenhöhen
H_s	m/s	Signifikante Wellenhöhe; Mittel der 33 % größten Wellenhöhen
TH_{max}	m/s	Periode der höchsten Welle
TH_s	m/s	Signifikante Wellenperiode; mittlere Periode der 33 % höchsten Wellen
T_m	m/s	Mittlere Wellenperiode