

**BUNDESMINISTERIUM  
FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE  
-Meerestechnik und Küsteningenieurwesen-**

**ERMITTLUNG DES BEMESSUNGSSEEGANGS  
FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE UND RANDDÜNEN  
MIT MATHEMATISCHER MODELLIERUNG**

von

**Hanz Dieter Niemeyer & Ralf Kaiser**

**NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE  
-Forschungsstelle Küste-**

# INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung und Problemstellung	1
2. Ziele des Vorhabens	2
3. Das Modell SWAN als Werkzeug	2
4. Die Untersuchungsgebiete	4
4.1 Insel Norderney	4
4.2 Elisabethgroden an der Wanger Küste	6
4.3 Ditmarscher Bucht	7
5. Bemessungsseegang	9
5.1 Inselvorstrand	9
5.1.1 Problemstellung	9
5.1.2 Randbedingungen	11
5.1.2.1 Wind	11
5.1.2.2 Wasserstände	12
5.1.2.3 Seegang	12
5.1.2.4 Morphologie	14
5.1.3 Ergebnisse der Seegangsmodellierung	14
5.1.3.1 Seegang beim HHThw	14
5.1.3.2 Seegang beim Wasserstand NN +5m	16
5.1.3.2.1 Naturspektrum mit $H_s = 6$ m und $T_M = 10$ s	16
5.1.3.2.2 JONSWAP - Spektrum mit $H_s = 8$ m und $T_M = 10$ s	17
5.1.3.2.3 JONSWAP - Spektrum mit $H_s = 10$ m und $T_M = 12$ s	19
5.1.3.2.4 Vergleich der Ergebnisse	20
5.1.4 Festlegung des Bemessungsseegang	23
5.1.4.1 Grundsätze für die Umsetzung der Ergebnisse	23
5.1.4.2 Bewertung und Nachprüfung der Auswahlkriterien	24
5.1.4.3 Vorgaben	24
5.2 Insellee	25
5.2.1 Problemstellung	25
5.2.2 Modellgebiet und Randbedingungen	25
5.2.3 Ergebnisse der Modellierung	26
5.3 Festlandsküste	29
5.3.1 Verfahrensweise und Vorgabe der Randbedingungen	29
5.3.2 Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen	31
5.3.3 Bemessungsseegang für den Elisabethgroden- Deich	33
5.4 Offene Festlandsküste	36
5.4.1 Vorgehensweise	36
5.4.2 Randbedingungen	37
5.4.3 Ergebnisse der Seegangsmodellierung	38

6. Effekte morphologischer Variabilität .....	42
6.1 Riffbögen .....	42
6.1.1 Problemstellung .....	42
6.1.2 Änderungen des lokalen Seegangsklimas seit 1960 .....	42
6.1.2.1 Änderungen der Morphologie des Riffbogens seit 1960	42
6.1.2.2 Modellergebnisse für eine Normaltide mit erhöhtem See-	
gang .....	43
6.1.2.3 Modellergebnisse für eine Sturmide .....	45
6.1.3 Aktuelle Topographie mit fiktiver Erosion im Riffbogen .....	47
6.1.3.1 Problemstellung .....	47
6.1.3.2 Naturspektrum mit $H_S = 6$ m und $T_M = 10$ s .....	49
6.1.2.2 JONWAP-Spektrum mit $H_S = 8$ m und $T_M = 10$ s .....	50
6.1.2.3 JONWAP-Spektrum mit $H_S = 10$ m und $T_M = 12$ s .....	51
6.2 Vorstrand/ Strand .....	52
6.2.1 Problemstellung .....	52
6.2.2 Naturspektrum mit $H_S = 6$ m und $T_M = 10$ s .....	54
6.2.3 JONWAP-Spektrum mit $H_S = 8$ m und $T_M = 10$ s .....	54
6.2.4 JONWAP-Spektrum mit $H_S = 10$ m und $T_M = 12$ s .....	56
6.3 Inseltopographie .....	57
6.3.1 Problemstellung .....	57
6.3.2 Ergebnisse der Sensitivitätsuntersuchung .....	58
7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	61
8. Literatur .....	63
9. Symbole und Abkürzungen .....	66

# 1. Einleitung und Problemstellung

Die Bemessung von Küstenschutzwerken und Randdünen beinhaltet zwei Aspekte von gesellschaftlicher Bedeutung: den der Sicherheit und den der Wirtschaftlichkeit. Zum einen soll mit der Bemessung die Funktion der sturmflutkehrenden Bauwerke und Randdünen gewährleistet werden, damit keine Gefährdung von Leib und Leben sowie Hab und Gut der Bewohner in den überflutungsgefährdeten Küstengebieten eintritt. Zum anderen soll beim Erreichen dieses primären Ziels der Kostenaufwand in einem angemessenen Rahmen gehalten werden. Für die erfolgreiche Überbrückung dieses Spannungsbogens sind verlässliche Methoden eine unerläßliche Voraussetzung.

Die wesentlichen Bemessungsparameter von Küstenschutzwerken und Randdünen hinsichtlich äußerer Belastungen sind Bemessungswasserstände und Bemessungsseegang. Für die Ermittlung von Bemessungswasserständen liegen seit längerem abgesicherte Verfahren und dafür geeignete Datengrundlagen vor, die zwar noch verbesserungswürdig sind aber eine -an üblichen technischen und rechtlichen Standards gemessen- belastbare Handlungsgrundlage darstellen. Hinsichtlich des Bemessungsseegangs bietet sich hingegen -insbesondere für Küstenbereiche mit begrenzten Wassertiefen und stark variierenden Topographien- ein gänzlich anderes Bild: die verfügbaren Zeitreihen von Naturmessungen sind zumeist im Umfang unzureichend für Extrapolationen und vielfach nicht übertragbar. Die empirisch-statischen Vorhersageverfahren sind ebenso untauglich wie Wind-Wellen-Korrelationen, wenn hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen signifikant für das regionale Seegangsklima werden. Dieses Defizit wiegt deshalb schwer, weil einerseits -wie hier am Beispiel eines Deiches gezeigt- der Seegang auf Bereiche mit geringeren Dimensionen wirkt als der Bemessungswasserstand (Abb. 1.1) und andererseits das Versagen von Bauwerken vielfach durch Seegang bewirkt wird (Abb. 4.1).

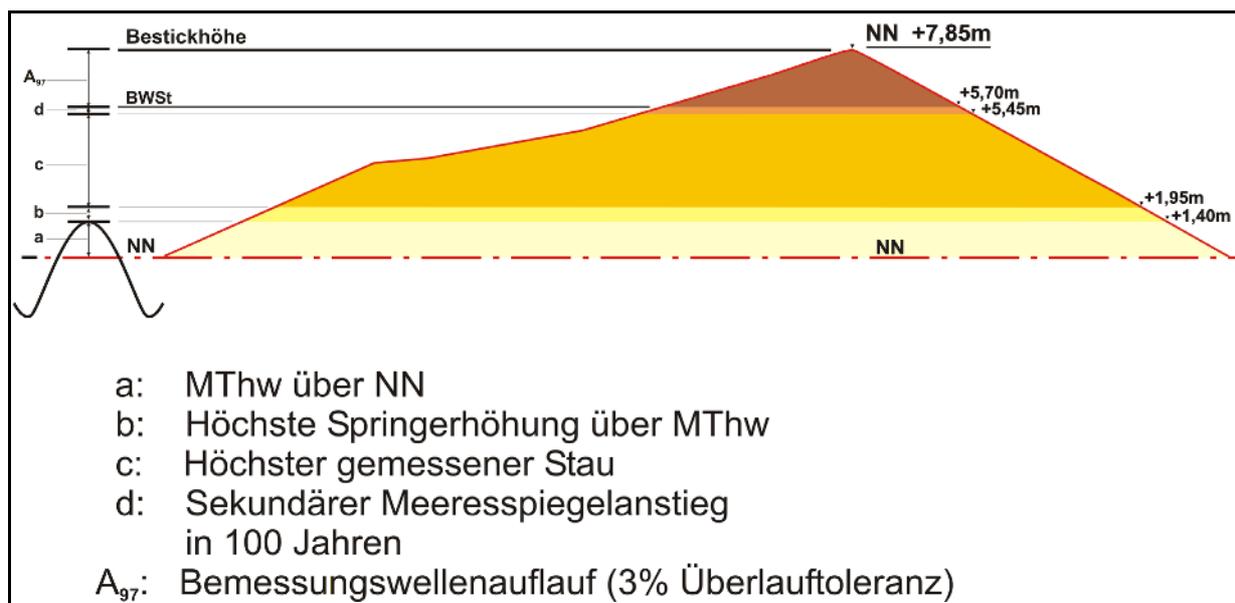


Abb. 1.1: Bemessung von Seedeichen am Beispiel der niedersächsischen Regeln

Die Entwicklung der mathematischen Modellierung des Seegangs hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht und ist mittlerweile dank der implementierten physikalischen Prozesse auch auf Küstengewässer mit stark variierenden topographischen Strukturen anwendbar. Besonders ist dies für Modelle der dritten Generation wie SWAN (Simulation of Waves in Nearshore) zutreffend, einem vollspektralen Modell, das die wesentlichen hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen von Seegang und stark variierender Topographie reproduzieren kann. Dies gilt umso mehr, wenn in Kopplung mit Naturmessungen Naturähnlichkeit und Grenzen der Anwendbarkeit von mathematischen Modellen erfahrbar werden. Dieser Ansatz war Grundlage und Anlaß des Forschungsvorhabens „Bemessungsseegang von Küstenschutzwerken und Randdünen“, das vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE über das KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN unter dem Kennzeichen KIS 004 gefördert worden ist. Der hohe Anwendungsnutzen wird noch dadurch verstärkt, daß bei Verfahren vor Verwaltungsgerichten die Vorhabenträger von Küstenschutzprojekten zunehmend gezwungen sind, die Erfüllung des verfügbaren Stands der Technik nachzuweisen.

Der nachfolgende Bericht stellt in komprimierter Form die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens vor. Dabei werden neben der Validierung von Modellergebnissen vor allem auch Anwendungsprobleme und deren Lösungsmöglichkeiten dargestellt. Darüber hinaus werden exemplarisch die diagnostischen Möglichkeiten von Modellen erhellt, mit denen Auswirkungen wirklichkeitsnaher oder denkbarer Szenarien quantifiziert werden können.

## **2. Ziele des Vorhabens**

Wesentliches Ziel des Vorhabens war es, die sich aufzeigenden Möglichkeiten mathematischer Modelle für die Ermittlung von Bemessungsseegang im deutschen Nordseeküstengebiet auf ihre Belastbarkeit hin zu untersuchen. Ziel war -auf der Grundlage exemplarischer Untersuchungen für repräsentative Bereiche der deutschen Nordseeküste wie Inseln, inselgeschützte und offene Watten- für künftige Nutzer verlässliche Aussagen hinsichtlich der Anwendbarkeit dieser Werkzeuge zur Verfügung zu stellen. Dabei soll erkennbar sein, an welchen Küstenabschnitten unter welchen Randbedingungen eine Ermittlung des Bemessungsseegangs mit mathematischen Modellen im Hinblick auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit empfohlen werden kann.

Im Vordergrund stand dabei auch, die Handhabbarkeit und Verfügbarkeit der Werkzeuge zu untersuchen. Weder sollte die Anwendung der Modelle außergewöhnlich hohe Aufwendungen für eine hinreichende Rechnerinfrastruktur erfordern, noch das Modell selbst nennenswerte Beschaffungskosten verursachen. Weiterhin sollte für absehbare Zeit gewährleistet sein, dass einerseits das Modell weiterentwickelt wird und die Unterstützung der Entwickler bei -aus der Modellstruktur herrührenden- Anwendungsproblemen gegeben ist.

## **3. Das Modell SWAN als Werkzeug**

Hinsichtlich der Auswahlkriterien begrenzter Aufwand an Rechnerinfrastruktur und Beschaffungskosten standen seinerzeit verschiedene Modelle auf dem Markt zur Verfügung. In Bezug auf eine gesicherte Weiterentwicklung und Verfügbarkeit der Entwickler

für Anwender war das von der Sectie Vloeistofmechanica der TU Delft entwickelte Modell SWAN konkurrenzlos, da hierfür eine gesicherte mehrjährige Zusage des U.S. Office of Naval Research und des U.S. Army Corps of Engineers, die mit erheblichen Zuwendungen verbunden war, zur Verfügung stand. Darüber hinaus wurde der Entwickler damit verpflichtet, das Modell allen Anwendern kostenfrei zur Verfügung zu stellen, um durch vielfache Anwendungen umfangreiche Hinweise für Weiterentwicklungen zu erhalten.

Das Modell SWAN ist mit der Zielsetzung entwickelt worden, sowohl für Seegebiete als auch für Küstengewässer, Seen und Flüsse Seegang in vollspektraler unter Berücksichtigung von Wind, Bodentopographie und auftretender Strömungen zu reproduzieren. Die Modellformulierung beruht auf der Impulserhaltung, wodurch im Gegensatz zur Energieerhaltung Effekte von Strömungen einbezogen werden können. Ansätze und Lösungsstrategien des Modells sind von den Entwicklern eingehend in der Fachliteratur dargestellt worden [RIS et al. 1995; BOOIJ et al. 1999].

Das Modell SWAN reproduziert folgende physikalische Prozesse:

1. Anfachung durch Wind,
2. Auflösung des Spektrums in Frequenz und Richtung,
3. Bodenreibung,
4. Refraktion durch Wechselwirkung mit Topographie und Strömung,
5. Shoaling durch Wechselwirkung mit Topographie und Strömung,
6. Blockieren und Reflektion durch gegenläufige Strömung,
7. nichtlineare Wellen-Wellen-Interaktion,
8. Schaumkronenbrechen (Übersteilung),
9. Brechen infolge von Unterschreiten kritischer Wassertiefe.

Es enthält zwar kein Modul zur Reproduktion der Reflektion an Hindernissen, allerdings kann der Effekt totaler oder teilweiser Reflektion parametrisch eingeführt werden. Somit lassen sich -mit Ausnahme der Diffraktion- alle für die Seegangsentwicklung und -ausbreitung in Küstengewässern mit begrenzten Wassertiefen und stark variierenden Topographie maßgebenden physikalischen Prozesse im Modell SWAN reproduzieren. Allerdings sind sie teilweise vereinfachend parametrisiert in das Modell implementiert, um den Rechenaufwand für wirklichtsnahe Anwendungen auf einen handhabbaren Rahmen begrenzen zu können.

Für die Untersuchungen in diesem Projekt sind alle Prozesse von wesentlicher Bedeutung berücksichtigt worden; allerdings sind in den hier ausgewählten Untersuchungsgebieten die Wirkungen der Strömungen nachrangig. Dort tritt überall eine voll reflektierte Tide auf, so dass bei Eintritt des Bemessungswasserstandes der Strom kentert.

## 4. Die Untersuchungsgebiete

### 4.1 Insel Norderney

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 1995).

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 Insel schutzes 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). Mit dem Bau der Schutzwerke konnte - insbesondere nach der Errichtung von Strandbuhnen 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. 4.1). 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 Buhnen erforderlich, um sie sowohl an die abnehmenden Höhenlagen der Strände anzupassen, als auch an die damit verbundene stärkere Belastung aus dem Auflaufen entsprechend stärkeren Seegangs. Diese Arbeiten wurden ironisch auch als „Schutz der Schutzwerke“ bezeichnet, was auf deren geringe Wirksamkeit hinsichtlich des Erhalts der Strände abzielt. Der Bereich unterliegt struktureller Erosion (KURZAK et al. 1949; LUCK 1975), die seit Beginn der fünfziger Jahre dieses Jahrhunderts durch wiederholte künstliche Auffüllungen des Strandes und des Vorstrandes (ARBEITSGRUPPE NORDERNEY 1952; KRAMER 1957, 1960; LUCK 1970; ERCHINGER 1986; STEPHAN 1988; KUNZ & STEPHAN 1992; NIEMEYER et al. 1995) kompensiert wird. Nach den verfügbaren Erkenntnissen über das örtliche Seegangsklima erfahren die Bauwerke in diesem Bereich die stärkste Seegangsbelastung der Norderneyer Inselstrände (NIEMEYER 1983, 1987; NIEMEYER & KAISER 2001).

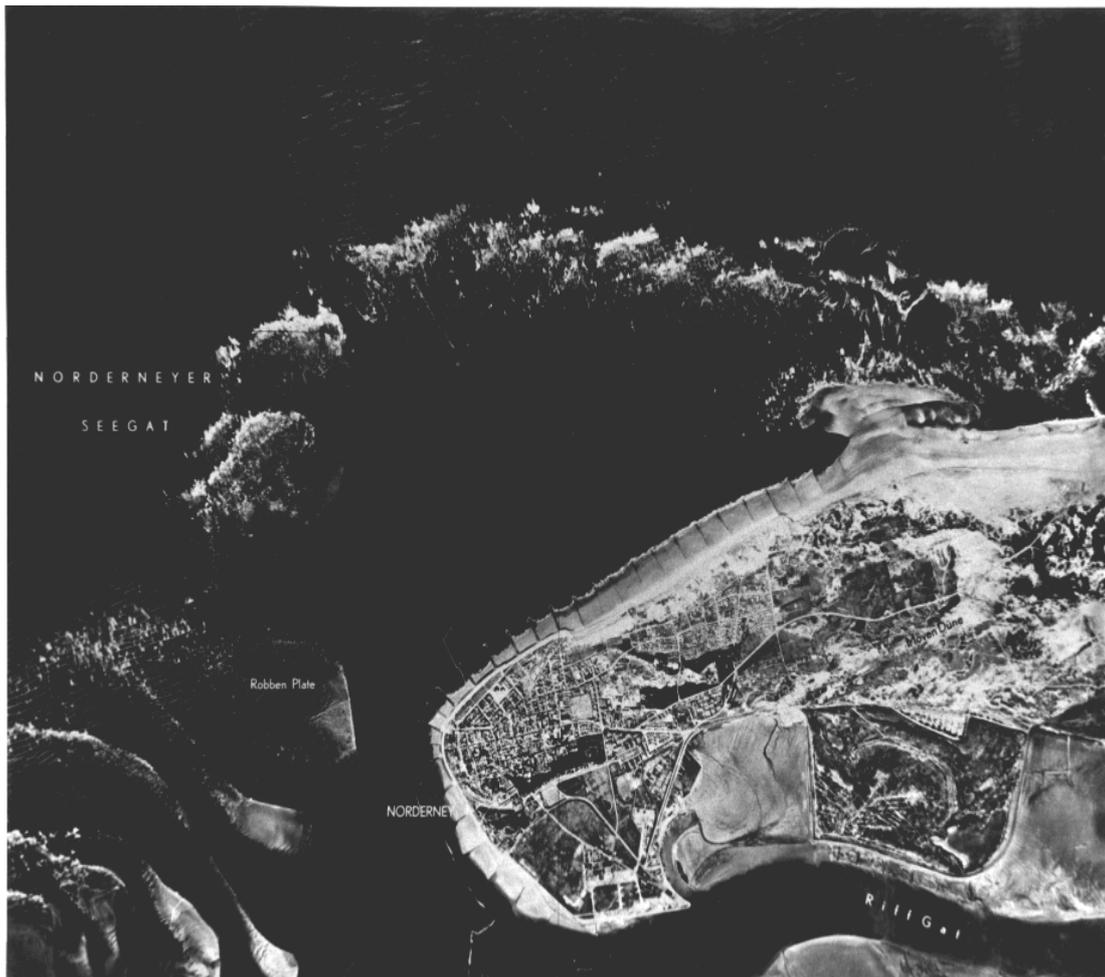


Abb. 4.1: Riffbogen vor dem Norderneyer Seegat und Inselvorstrand mit leichter Brandung, der Anlandungsbereich liegt in Driftrichtung etwa ein Drittel der Insellänge westlich des Seegats

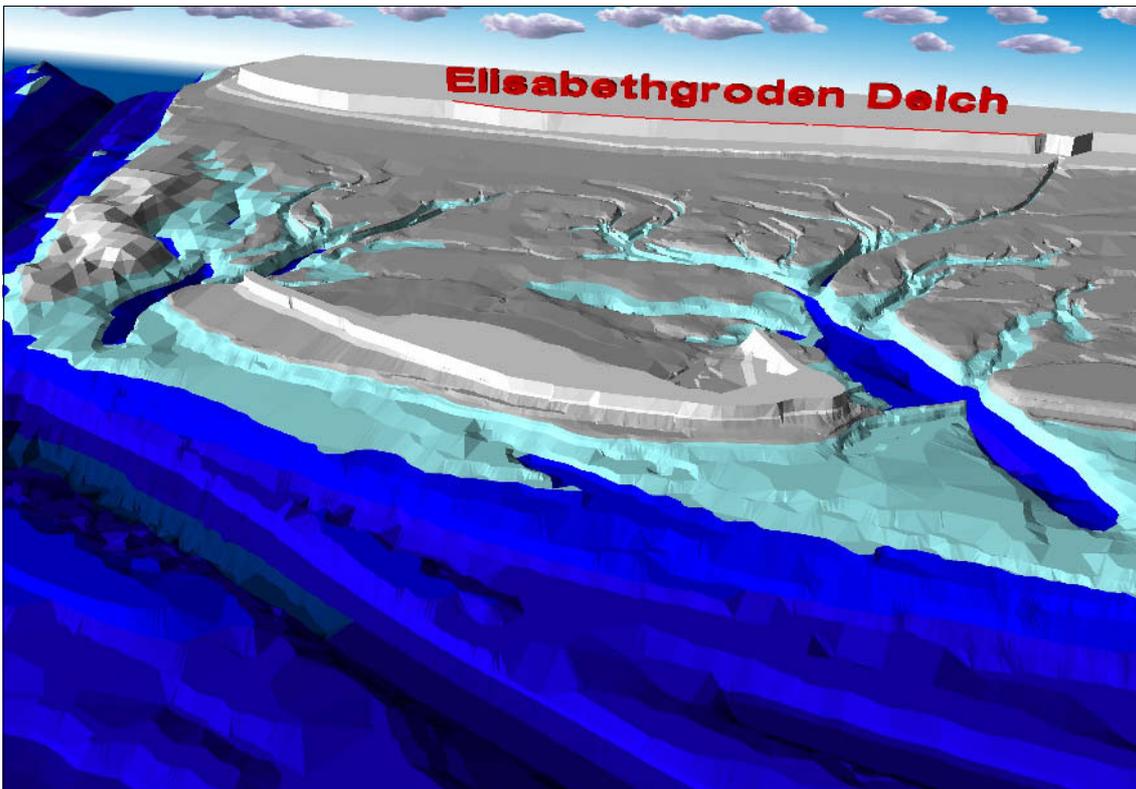


Abb. 4.2: Relief des See- und Wattengebiets vor dem Elisabethgroden im Wangerland

## 4.2 Elisabethgroden an der Wanger Küste

Der 1895 eingepolderte Elisabethgroden (Abb. 4.3) liegt an der Nordküste des Wangerlandes zwischen Harlesiel und Minsen (Abb. 4.2): Seinem 10 km langen Seedeich ist auf voller Länge ein Außengroden von wechselnder Breite vorgelagert: im Westen von 400 m, danach auf 300 bis 400 m abnehmend und etwa 4 km östlich von Harlesiel wieder bis auf etwa 500 m zunehmend. Etwa 7,5 km östlich von Harlesiel nimmt die Breite des Außengroden ab, wobei sie stets leicht oberhalb von 200 Metern liegt. Ein Vergleich der Grodenkanten von 1965 und 1987 zeigt geringe Änderungen (Abb. 4.4): bei örtlich wechselndem Trend von Abbruch und Anwuchs treten nur geringe Variationen auf, so daß von einer relativ stabilen Lage auszugehen ist. Aus dem Jahre 1996 vorliegende Luftaufnahmen bestätigen qualitativ den Erhalt dieses Zustandes. Diese relative Stabilität der Au-

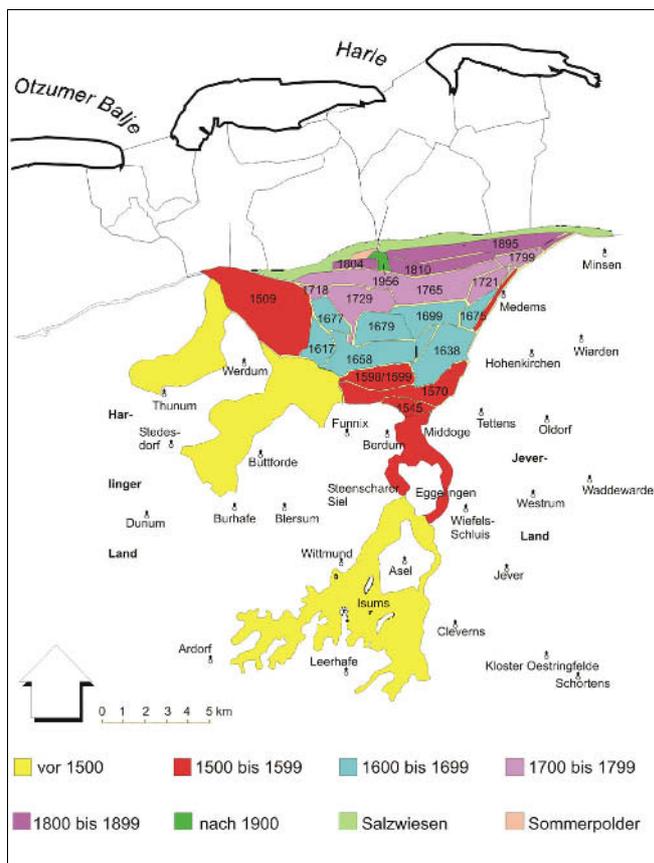


Abb. 4.3: Einpolderung der Harlebucht nach HOMEIER (1969, 1979) mit aktueller Küstenlinie, Inseltopographie und Wattwasserscheiden von Otzumer Balje und Harle (NIEMEYER 1995)



Abb. 4.4: Veränderungen in der Lage der Grodenkante zwischen 1965 und 1987 (grün: Anwachs; rot: Abtrag)

ßengrodenkante läßt ebenso auf ein für den betrachteten Zeitraum etwa gleichbleibendes Seegangsklima schließen wie auf ein morphodynamisches Gleichgewicht im Bereich der vorgelagerten Watten.

Der Wattbereich vor dem Elisabethgroden ist Teil des Einzugsgebietes der Harle, das im Laufe der letzten Jahrhunderte -insbesondere durch die morphodynamischen Vorgänge im Zusammenhang mit der Verlandung der Harlebucht (Abb. 4.3)- erhebliche Veränderungen erfahren hat (HOMEIER 1969, 1979). Das Tidevolumen der Harle hat von 1650 bis 1960 um etwa 50% abgenommen, ihre Einzugsgebietsfläche gleichmäßig auf Watten und Rinnen verteilt sogar um circa 54% (NIEMEYER 1995). Diese erheblichen Änderungen haben -ebenso wie der Bau der Buhne H (LÜDERS 1952)- lange nachgewirkt. Die morphodynamischen Parameter (NIEMEYER 1995; NIEMEYER et al. 1995) deuten aber darauf hin, daß diese Entwicklung im Bereich landwärts der Buhne H mit dem Einpendeln auf ein neues dynamisches Gleichgewicht ihren Abschluss gefunden hat. Trotzdem wirkt der Bau der Buhne H noch nach, da sie die Aufspaltung in Ebb- und Flutrinne verhindert und zu einem von Nordwest nach Südost durchgehend bis weit in das Einzugsgebiet hinein gestrecktem Achsenverlauf der tiefen Seegatrinne geführt hat (Abb. 4.2). Hierdurch wird die Seegangsausbreitung auf die in Inseln liegenden Wattgebiete vor der Festlandsküste erleichtert.

### 4.3 Dithmarscher Bucht

Die Dithmarscher Bucht liegt an der Westküste Schleswig-Holsteins nördlich der Elbmündung (Abb. 4.5). Sie umfaßt eine Fläche von etwa 200 km<sup>2</sup>. Im Gegensatz zum Untersuchungsgebiet Elisabethgroden des Ostfriesischen Wattenmeeres liegt sie offen zur See ohne den Schutz vorgelagerter Düneninseln. Allerdings haben die Inseln Blauort und Trischen morphodynamisch -wenngleich in eingeschränkter Form- eine tendenziell gleichartige Funktion.

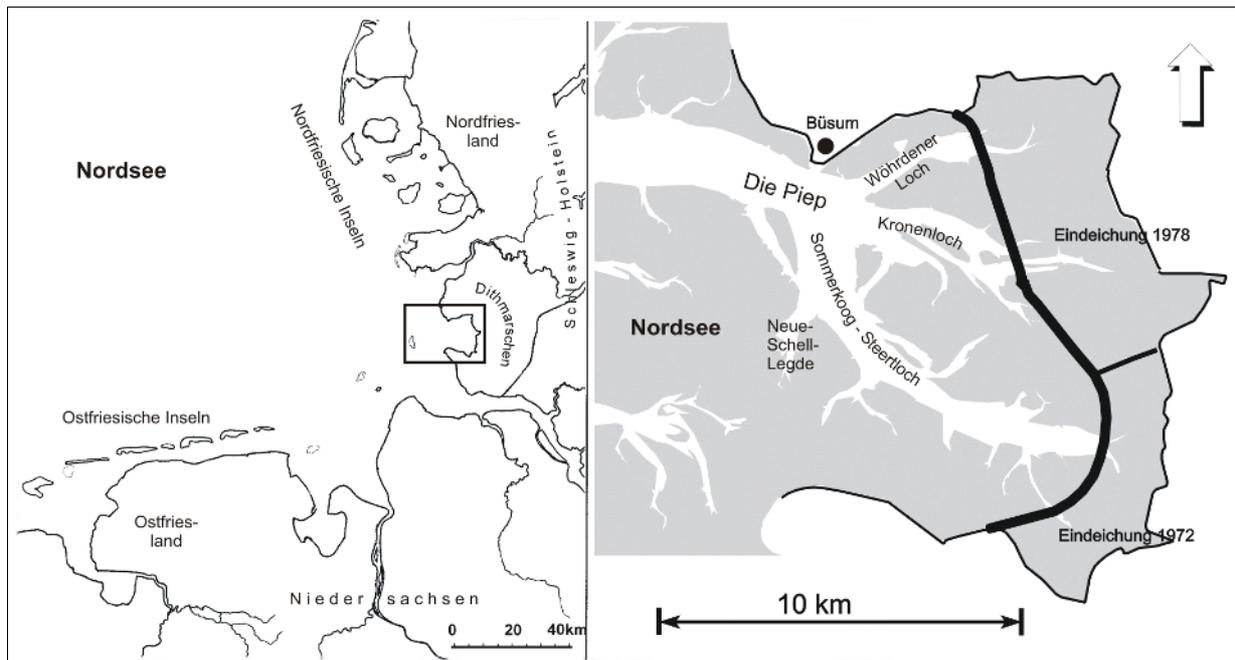


Abb. 4.5: Die Dithmarscher Bucht an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste

Die Bucht entstand während der letzten Jahrhunderte infolge der Aufeinanderfolge von Einbrüchen, anschließender Verlandung und Landgewinnung (WIELAND 1984). Mehr als zwei Drittel ihrer Begrenzung wird durch die Küstenlinie gebildet; wobei sie auf nahezu ihrer gesamten Breite zur See hin offen ist. Der Hauptfluter Die Piep teilt sich im Inneren der Bucht in die Priele Wöhrdener Loch, Kronenloch, Sommerkoog-Steertloch und Neue-Schell-Legde auf. Seine tiefe Rinne liegt im nördlichen Teil der Bucht.

Kennzeichnend für das Gebiet der Dithmarscher Bucht ist das Vordringen des Meeres bis zum heutigen Geestrand vor schon 5000 Jahren. Erst die Ablagerung mariner Sedimente bewirkte damals die Bildung und das langsame seewärts gerichtete Wachstum eines Marsch- und Wattsauemes vor dieser Küste. Dieser Prozeß hat bis zur Gegenwart angehalten (BANTELMANN 1966). Seit dem Beginn des Deichbaus im 14. Jahrhundert wurden bis 1970 im Inneren der Dithmarscher Bucht etwa 30 km<sup>2</sup> Marschland gewonnen. In den Jahren 1970 bis 1978 ist durch den Bau eines neuen, rund 15 km langen Seedeiches in 2 bis 4 km Entfernung von der alten Küstenlinie der 48 km<sup>2</sup> große "Speicherkoog Dithmarschen" geschaffen worden (WIELAND et al. 1987).

## 5 Bemessungsseegang

### 5.1 Inselvorstrand

#### 5.1.1 Problemstellung

Seit der Mitte des letzten Jahrhunderts sind auf der ostfriesischen Insel Norderney wiederholt massive Deckwerke errichtet und erweitert worden (TOLLE 1864; PEPPER 1955; WITTE 1970), so daß insbesondere die früher errichteten mittlerweile aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichen Erstellungsdaten bestehen und eher den Charakter eines -wie im angelsächsischen Fachsprachgebrauch treffender genannten- Seewalls haben. Diese Bauwerke dienen sowohl dem Sturmflutschutz bewohnter Gebiete als auch der Stabilisierung der Küstenlinie (NIEMEYER et al. 1995).

Exemplarisch wurde deshalb für den Seewall am Nordweststrand von Norderney (zwischen Buhne A und H1, Abb. 5.1) der Bemessungsseegangs ermittelt. Diese Ergebnisse konnten zwischenzeitlich auch für die Planung der Grundsanierung des Deckwerks in diesem Bereich genutzt werden (NIEMEYER et al. 2000). Der Bereich unterliegt struktureller Erosion (KURZAK et al. 1949; LUCK 1975). Nach den verfügbaren Erkenntnissen über das örtliche Seegangsklima erfährt dieser Bereich die stärkste Seegangbelastung der Norderneyer Inselstrände (NIEMEYER 1983, 1987; KAISER & NIEMEYER 1999; NIEMEYER & KAISER 2001).

Die Modellierung des Seegangs wird mit dem mittlerweile für weite Küstenbereiche bewährten Modell SWAN (RIS et al 1995; HOLTHUIJSEN et al. 1998) vorgenommen, das

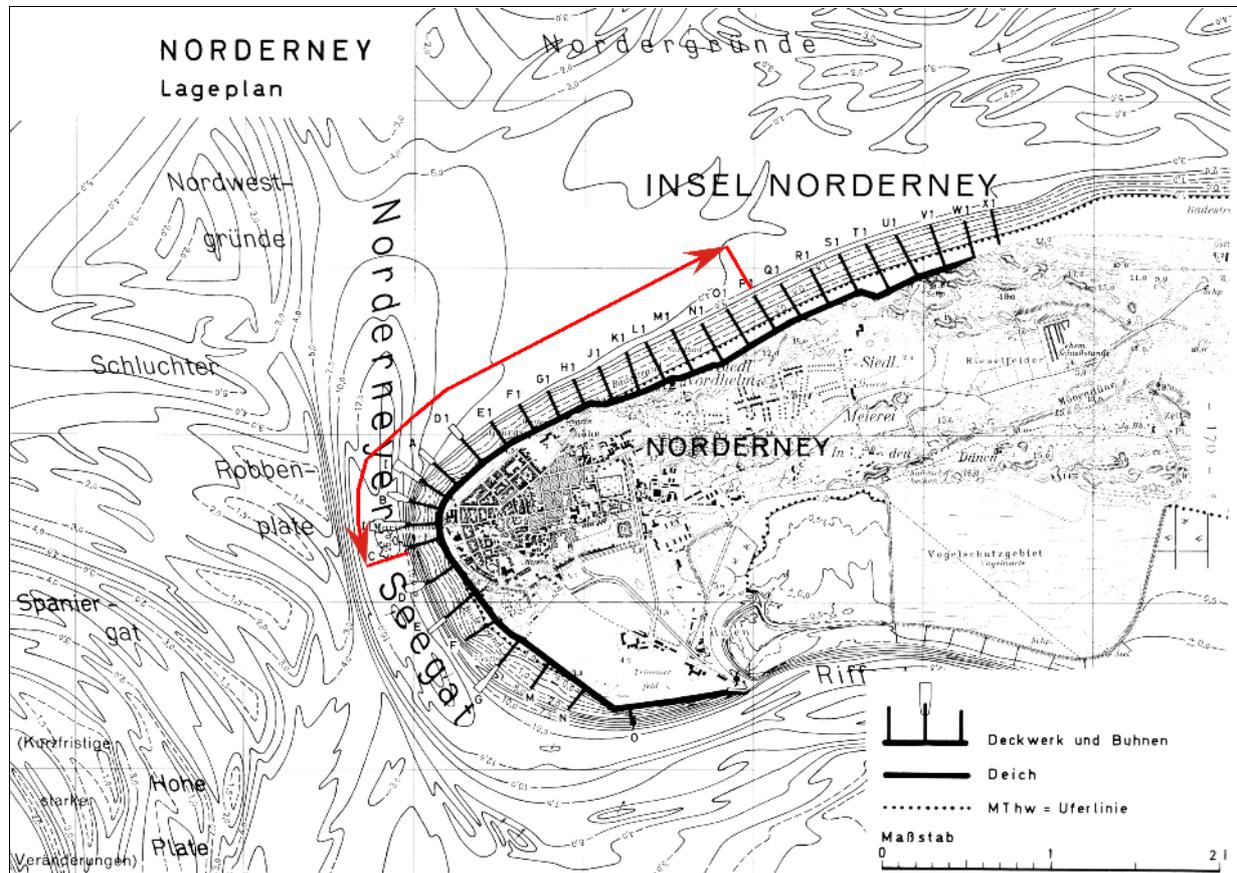


Abb. 5.1: Untersuchungsbereich des Seewalls am Nordweststrand von Norderney

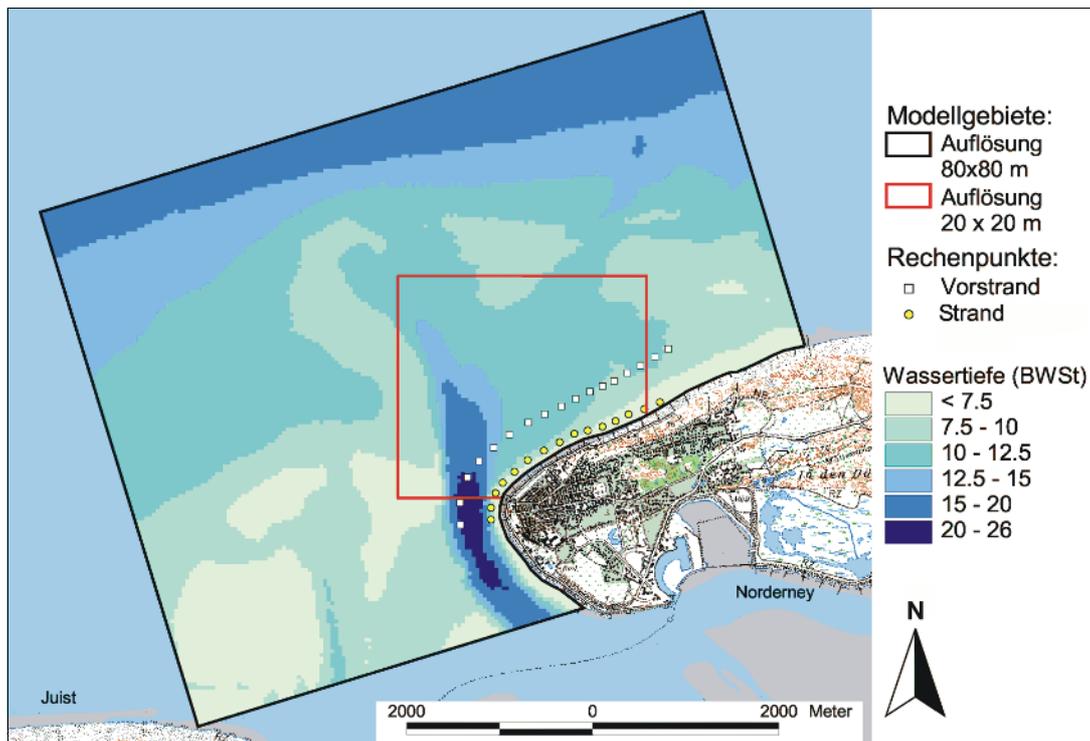


Abb. 5.2: Gebiete für die mathematische Modellierung des Seegangs auf dem nordwestlichen Vorstrand von Norderney

bereits vorher in diesem Gebiet mit Erfolg eingesetzt worden ist (KAISER & NIEMEYER 1999). Im Küstenvorfeld und im Bereich von Riffbogen, Seegat und Vorstrand wird eine Reproduktion der Topographie mit einer räumlichen Auflösung von 80 x 80 m vorgenommen; im Nahbereich der Insel wird ergänzend ein Teilmodell mit einer verfeinerten Auflösung von 20 x 20 m eingerichtet (Abb. 5.2), um eine dem Untersuchungszweck dienliche hinreichende Differenzierung der Seegangbelastung im Untersuchungsbe- reich zu ermöglichen. Das äußere Modell wird durch die Eingabe von Seegangsspektren aus Naturmessungen oder Vorgabe parametrischer Seegangsspektren am seeseitigen Rand gesteuert. Um Randeffekte zu vermeiden, werden die Ergebnisse nur für ein Modellgebiet (Abb. 5.2) ausgegeben, daß nach Westen um etwa 3 km und nach Osten um rund 2 km gegenüber dem rechnerischen Modellgebiet verkleinert worden ist. Das räumlich höher auflösende Teilmodell erhält seine Anfangswerte aus dem übergeordneten Modell, wobei am seeseitigen Rand -entsprechend der höheren Auflösung- die ergänzenden Werte aus Interpolationen zwischen den Spektren des übergeordneten Modells zur Verfügung stehen.

Als Ausgangsdaten für die hydraulischen Modellversuche im Großen Wellenkanal wurden auf dem Inselvorstrand im seeseitigen Drittelpunkt jedes Bühnenfeldes etwa in gleichmäßigem seitlichen Abstand von den Bühnen die kennzeichnenden Seegangsparameter und -spektren bestimmt (Abb. 5.3). Gleichzeitig wurden für interne Qualitätskontrollen im vorgelagerten Bereich repräsentative Punkte -in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen- festgelegt, an denen die Ergebnisse bei verschiedenen Sensitivitätsstudien verglichen werden können (Abb. 5.3). Damit wird sichergestellt, daß die Ergebnisse dieser Untersuchungen in das langfristig angelegte Qualitätsmanagement eingebunden werden, das sowohl frühere als auch zukünftige Studien umfaßt.

Alle Ergebnisse der Modellierung werden in den folgenden flächenhaften Darstellungen in folgender Form kombiniert: Die Ergebnisse werden für das Gesamtmodellgebiet mit

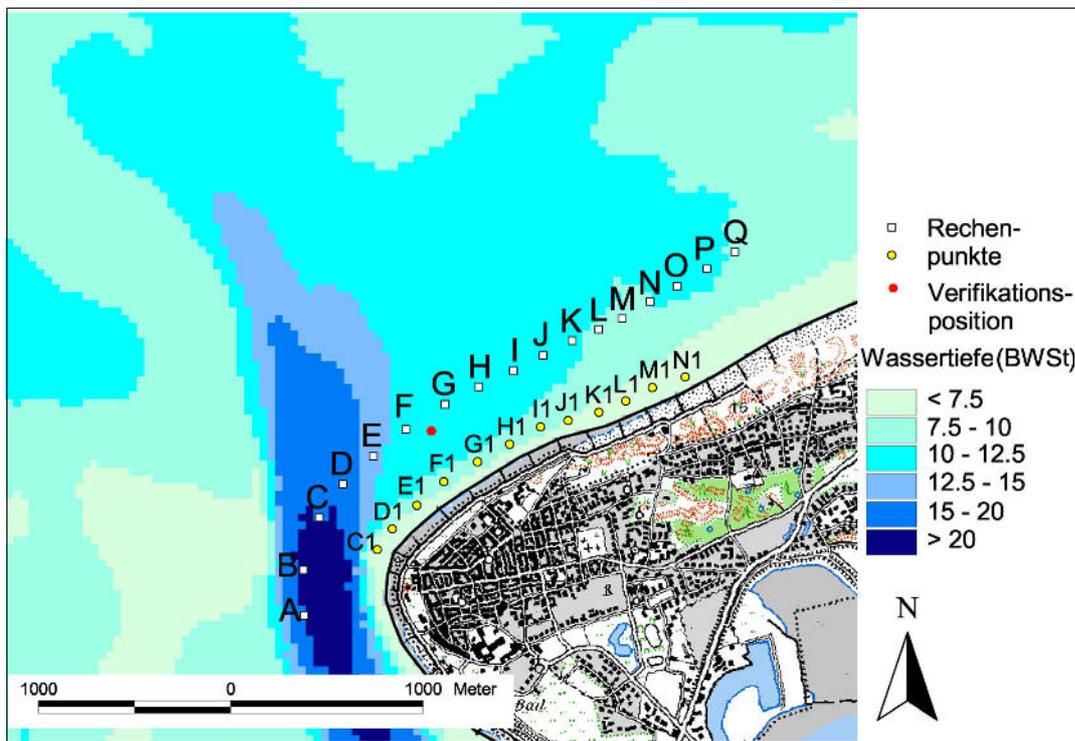


Abb. 5.3: Repräsentative Punkte auf dem Inselvorstrand und im Seegat für das langfristige Qualitätsmanagement (A-Q) und in den Bühnenfeldern (C<sub>1</sub>-N<sub>1</sub>) als Randbedingungen für die hydraulischen Modellversuche im Großen Wellenkanal

einer Auflösung von 80 x 80 m (Abb. 5.2) dargestellt, wobei das rechnerische Modellgebiet -wie bereits erläutert- größer ist; hierin werden die Ergebnisse des verfeinerten Teilmodells für das engere Untersuchungsgebiet mit einer Auflösung von 20 x 20 m (Abb. 5.2) so eingebettet, daß eine Gesamtdarstellung erfolgt.

Bei der Darstellung und Benennung von Ergebnissen für einzelne Rechenpunkte im engeren Untersuchungsgebiet (Abb. 5.3) werden stets Werte aus dem verfeinerten Teilmodell mit der Auflösung von 20 x 20 m (Abb. 5.2) verwandt.

## 5.1.2 Randbedingungen

### 5.1.2.1 Wind

Die Windgeschwindigkeit und -richtung wurden für den Bemessungsfall gleichförmig mit

$$u = 30 \text{ m/s}$$

$$R = 315^\circ$$

angesetzt; eine solche Geschwindigkeit ist nach Untersuchungen der BAW (1997) im Küstenvorfeld bei nordwestlicher Richtung erforderlich, um dort den Stau des nach dem Einzelwertverfahren ermittelten Bemessungswasserstands (NIEMEYER 1997) zu bewirken. Für das HHThw wurde der bei der Sturmflut vom 16. Februar 1962 gemessene Wind mit

$$u = 24,7 \text{ m/s}$$

$$R = 293^\circ$$

angesetzt.

### 5.1.2.2 Wasserstände

Der Bemessungswasserstand nach dem in Niedersachsen verbindlich vorgegebenen Einzelwertverfahren (LÜDERS & LEIS 1964) liegt für Norderney nach jüngeren Ermittlungen bei

$$\mathbf{BWSt}_{2097} = \mathbf{NN+ 4,95\ m}$$

(NIEMEYER & KAISER 1999). Es ist aber davon auszugehen, daß bis zur planerischen und baulichen Umsetzung der Untersuchungsergebnisse einige Jahre vergehen werden. Aus diesem Grund sind die Modellrechnungen alle mit einem Wasserstand von

$$\mathbf{RWS} = \mathbf{NN+ 5,00\ m}$$

ausgeführt worden. Damit soll erreicht werden, daß die Ergebnisse auch in den kommenden Jahren noch planrechtlichen Ansprüchen genügen. Ergänzend wurden Modellrechnungen für das

$$\mathbf{HHThw}_{(16.02.62)} = \mathbf{NN+ 4,12\ m}$$

vorgenommen, um einen Anhalt darüber zu gewinnen, in welchen Größenordnungen bisher eingetretene Seegangsbelastungen mit erheblicher Schadenswirkung im Vergleich zu denjenigen liegen, die für die Bemessung zu berücksichtigen sind.

### 5.1.2.3 Seegang

Für die Modellierung des Bemessungsseegangs mit dem Modell SWAN (RIS et al 1995; HOLTHUIJSEN et al. 1998) wurden drei unterschiedliche Szenarien als seeseitige Randbedingungen Berechnungen für das HHThw vorgegeben:

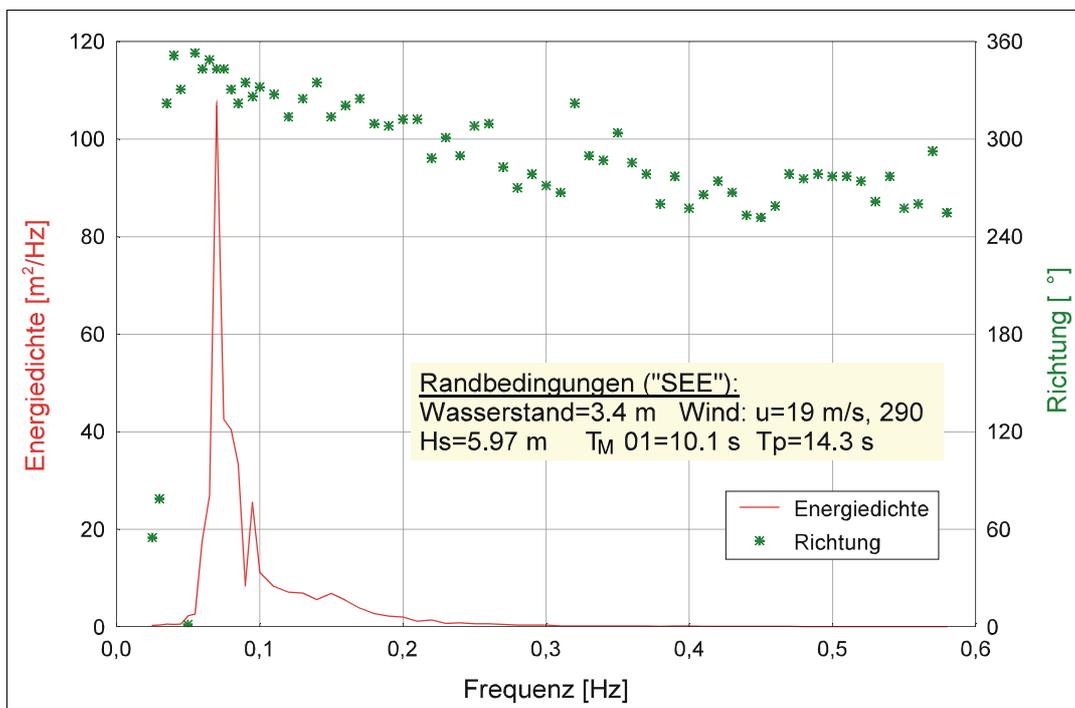


Abb. 5.4: Spektrale Verteilung von Energiedichte und Richtungen des Seegangs im Küstenvorfeld von Norderney um den Scheitel der Sturmflut vom 05. Februar 1999

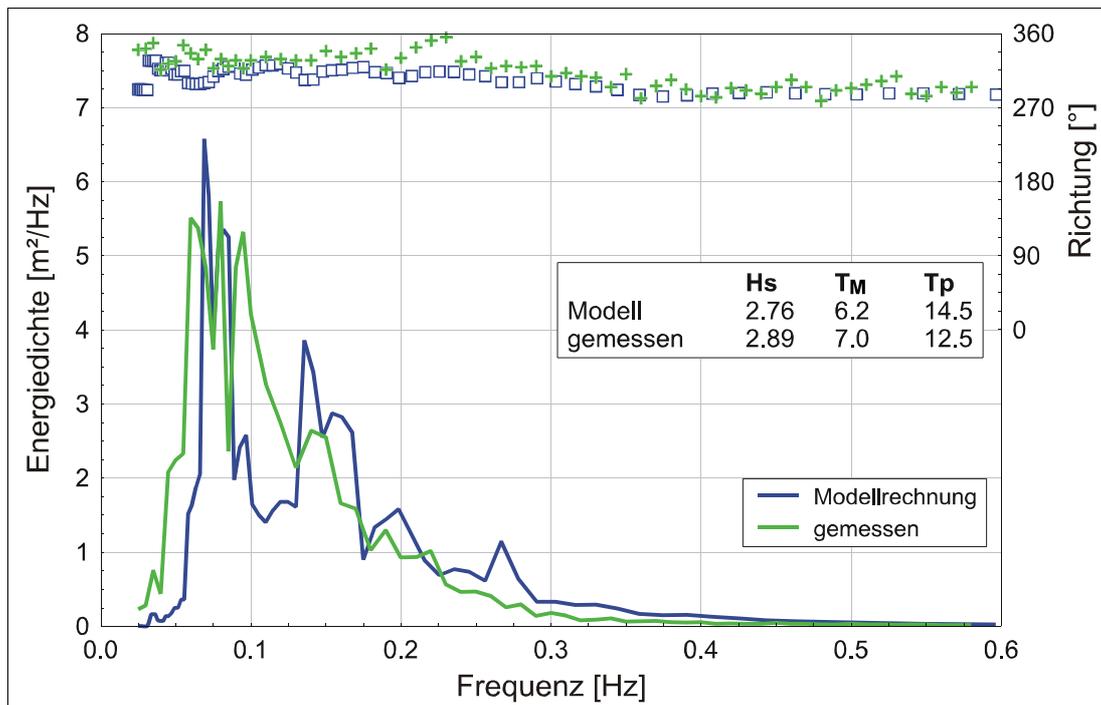


Abb. 5.5: Vergleich der spektrale Verteilung von Energiedichte und Richtungen des Seegangs auf dem Vorstrand von Norderney aus Modell und Messung um den Scheitel der Sturmflut vom 05. Februar 1999

- **Gemessenes Naturspektrum mit  $H_s = 6 \text{ m}$ ;  $T_p = 14 \text{ s}$ ;  $T_M = 10 \text{ s}$ ;**
- **JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 8 \text{ m}$ ;  $T_p = 12 \text{ s}$ ;  $T_M = 10 \text{ s}$ ;**
- **JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10 \text{ m}$ ;  $T_p = 15 \text{ s}$ ;  $T_M = 12 \text{ s}$ .**

Bei früheren Untersuchungen zur Ermittlung des Bemessungsseegangs für Seedeiche an der Festlandsküste (NIEMEYER & KAISER 1998) hatte sich aber ergeben, daß die Wasserstände als limitierender Faktor insoweit wirksam sind, daß dort die Ausbildung stärkeren Seegangs im Küstenvorfeld oberhalb bestimmter Werte keine meßbaren Auswirkungen erzeugt. Ein gemessenes Spektrum mit Kennwerten in ähnlicher Größenordnung wie das hier herangezogene hatte in dem Fall zu denselben Bemessungswerten des Seegangs vor dem Deich geführt, wie ein parametrisiertes mit erheblich höheren Kennwerten. Aus diesem Grund wird hier eine Sensitivitätsstudie vorgenommen, bei der neben dem Naturspektrum für die vorstehend beschriebenen Randbedingungen des Bemessungsfalls zwei JONSWAP-Spektren als seeseitige Ausgangsgrößen in das mathematische Seegangmodell eingespeist werden. Eins dieser parametrisierten Spektren hat die für den Bemessungsfall ermittelte Wellenhöhe (NIEMEYER 1983), das andere den Mittelwert der signifikanten Wellenhöhen des Natur- und des JONSWAP-Spektrums für den Bemessungsfall. Mit dieser Sensitivitätsstudie soll ermittelt werden, ob und in welchem Maß eine Zunahme der Seegangsintensität im Küstenvorfeld bei gleichbleibenden Wasserständen zu wachsenden Seegangsbelastungen von Insel-schutzwerken führt.

#### 5.1.2.4 Morphologie

Für den Gesamtbereich lag eine Vermessung des BUNDESAMTES FÜR SEESCHIFFAHRT UND HYDROGRAPHIE vor, die für das Modell mit der Gitternetzauflösung von 80 x 80 m (Abb. 5.2) genutzt wurden. Für das verfeinerte Teilmodell mit einer räumlichen Auflösung von 20 x 20 m im Vorstrand- und Strandbereich wurden von der NLWK-BETRIEBSSTELLE NORDEN im Mai und Dezember 1998 ergänzende Daten erhoben.

Hinsichtlich der Sensitivitätsanalyse einer verringerten hydrodynamischen Wirksamkeit des Riffbogens wurde der Bereich des Riffbogen im ersten Schritt um 0,5 m und im zweiten um 0,75 m erniedrigt. Ebenso wurden Bereiche des ufernahen Vorstrandes und Strandes um 0,5 m abgesenkt, um das Seegangsklima bei einer entsprechenden Erosion ermitteln zu können. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in Abschnitt 6 näher erläutert.

### 5.1.3 Ergebnisse der Seegangmodellierung

#### 5.1.3.1 Seegang beim HHThw

Für den bisher höchsten meßtechnisch nachgewiesenen Sturmflutscheitelwasserstand am Pegel Norderney, demjenigen der Sturmflut vom 16. Februar 1962, wurden ebenfalls Modellierungen vorgenommen. Hinsichtlich des Reproduzierens der damaligen Situation sind folgende Einschränkungen anzuführen:

1. Die Modelltopographie entspricht der von 1995 und nicht der von 1962. Hinsichtlich der Seegangsbelastung der Deckwerke am Nordweststrand von Norderney ergeben sich somit ungünstigere Randbedingungen, so daß -bezogen auf die Morphologie von Riffbogen und Vorstrand- die im Modell ermittelte Seegangsbelastung als stärker anzusehen ist als die seinerzeit eingetretene.
2. Als Randbedingung wurde das bei der Sturmflut vom 05. Februar 1999 gemessene Spektrum angesetzt. Aufgrund der etwas geringeren Windgeschwindigkeiten und der westlichen anstelle westnordwestlichen Richtung ist davon auszugehen, daß der in das Modell eingesteuerte Seegang etwas schwächer war als der bei der Sturmflut vom 16. Februar 1962 herrschende.

Insgesamt sind diese Abweichungen von der wirklichen Situation so zu bewerten, daß die Modellergebnisse für das eigentliche Untersuchungsgebiet, den Inselvorstrand, mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine stärkere Seegangsintensität ausweisen als sie bei der Sturmflut vom 16. Februar 1962 geherrscht haben. Die unterschiedliche Abminderung der Seegangsdämpfung zwischen Küstenvorfeld und Inselvorstrand im Bereich des Riffbogens für die Zeiträume um 1960 und 1995 (NIEMEYER et al. 1997; KAISER & NIEMEYER 1999) ist hinsichtlich der Seegangsbelastung der Inselfschutzwerte wirksamer als die für diesen Fall anzunehmende geringere Seegangsintensität im Küstenvorfeld. Vor allem bleibt aber festzuhalten, daß mit der hier vorgelegten Modellrechnung die Größenordnung des Seegangs für aktuelle morphologische Randbedingungen ermittelt wurde, nicht aber die Seegangsverhältnisse der am 18. Februar 1962 eingetretenen Sturmflut. Deren naturähnliche Reproduktion wäre nur mit erheblichen höherem Aufwand als hier betrieben möglich; dazu bestand aber angesichts der zentralen Fragestellung einer Ermittlung des Bemessungsseegangs für die Inselfschutzwerte kein hinreichender Anlaß.

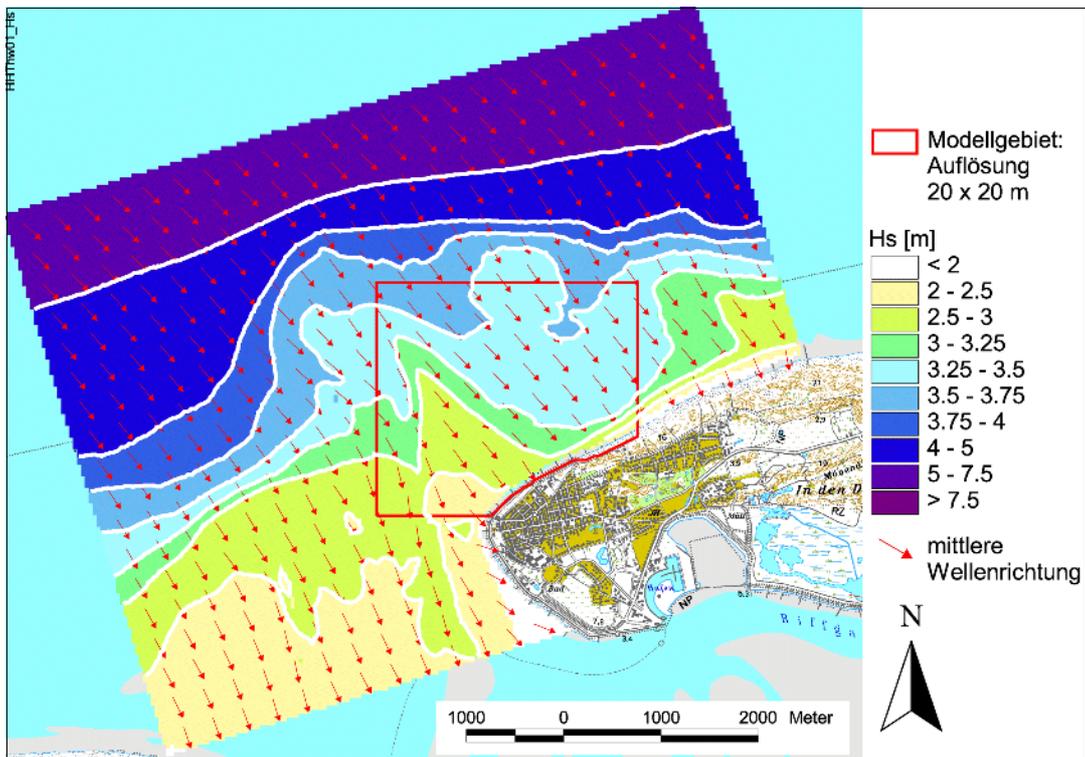


Abb. 5.6: Räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhen im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 4,12 m; Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 6$  m und  $T_M = 10$  s)

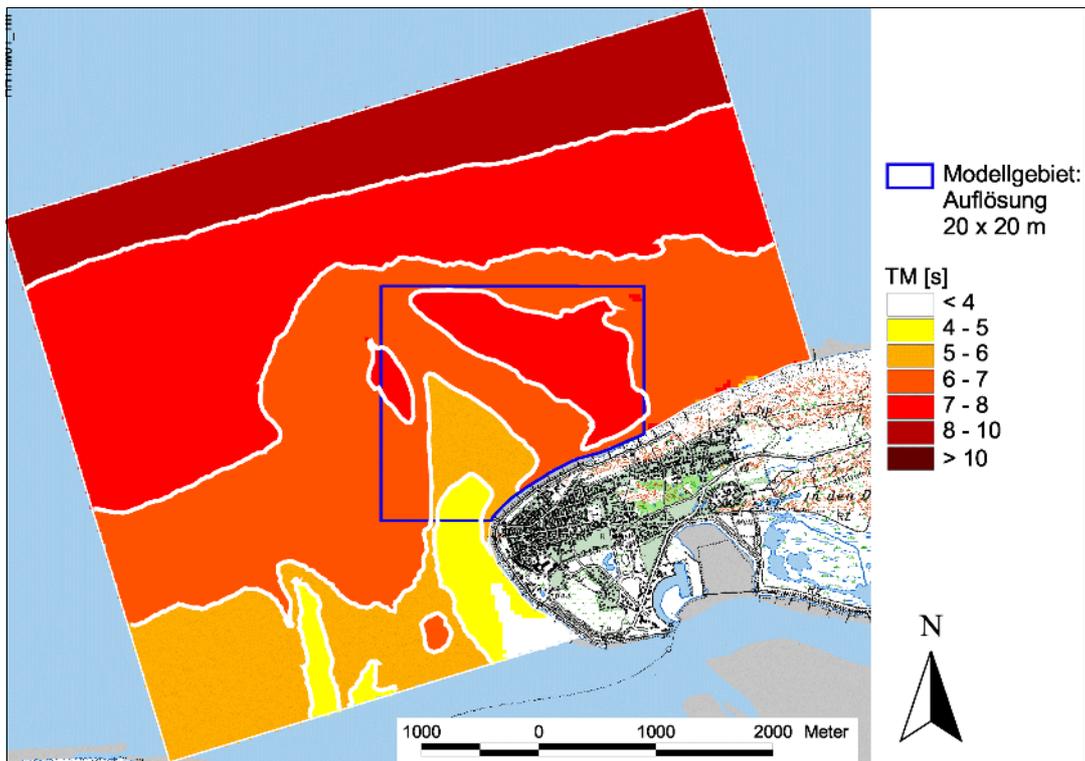


Abb. 5.7: Räumliche Verteilung der mittleren Wellenperioden im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 4,12 m; Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 6$  m und  $T_M = 10$  s)

Die Seegangsdämpfung auf dem Riffbogen führt zu erheblichen Abnahmen der signifikanten Wellenhöhen zwischen Küstenvorfeld und Inselvorstrand sowie Seegat (Abb.

5.6). Auf den inselnahen Vorstrand gelangen dabei nur in einem engen Bereich signifikante Wellenhöhen von 3 m. Vor den Deckwerken im Seegat liegen die entsprechenden Werte nahezu überall unterhalb der Marke von 2 m.

Auch die mittleren Wellenperioden erfahren deutliche Abnahmen zwischen Küstenvorfeld und Inselvorstrand sowie Seegat (Abb. 5.7), wenngleich bis zum Inselvorstrand in relativ geringerem Maß als die signifikanten Wellenhöhen. Dagegen sind die bis zum Seegat erfolgten Abnahmen der mittleren Wellenperioden wesentlich stärker; sie liegen dort bezogen auf die Werte im Küstenvorfeld teilweise unterhalb von 50%.

### 5.1.3.2 Seegang beim Wasserstand NN + 5 m

#### 5.1.3.2.1 Naturspektrum mit $H_s = 6$ m und $T_M = 10$ s

Die im Küstenvorfeld auftretenden großen signifikanten Wellenhöhen werden auch bei dem extrem hohen Wasserstand von NN +5 m beim Einschwingen an die Küste gedämpft, insbesondere im Bereich des dem Seegat und Inselvorstrand vorgelagerten Riffbogens. Daraus resultiert im Modellgebiet eine starke räumliche Variabilität dieses kennzeichnenden Parameters (Abb. 5.8). In der Tendenz stellt sich dabei ein vergleichbares Verhalten ein, wie es bei früheren Untersuchungen sowohl bei Naturmessungen (NIEMEYER 1979, 1983, 1987) als auch mit mathematischen Modellierungen (ADEL et al. 1991; NIEMEYER et al. 1995, 1997; NIEMEYER & KAISER 1998; KAISER & NIEMEYER 1999) bei niedrigeren Wasserständen festgestellt worden ist: Die Dämpfung auf den Platen vor dem Seegat ist stärker als auf denen vor dem Inselvorstrand. Ursache dafür ist, daß sie dort höher, breiter und enger gestaffelt sind als vor dem Inselvorstrand (NIEMEYER 1987). Allerdings hat sich dieser Effekt in den letzten Jahrzehnten aufgrund morphologischer Veränderungen mit signifikanten Auswirkungen auf das lokale Seegangsklima und Strandmorphodynamik verstärkt (NIEMEYER & KAISER 1997; NIE-

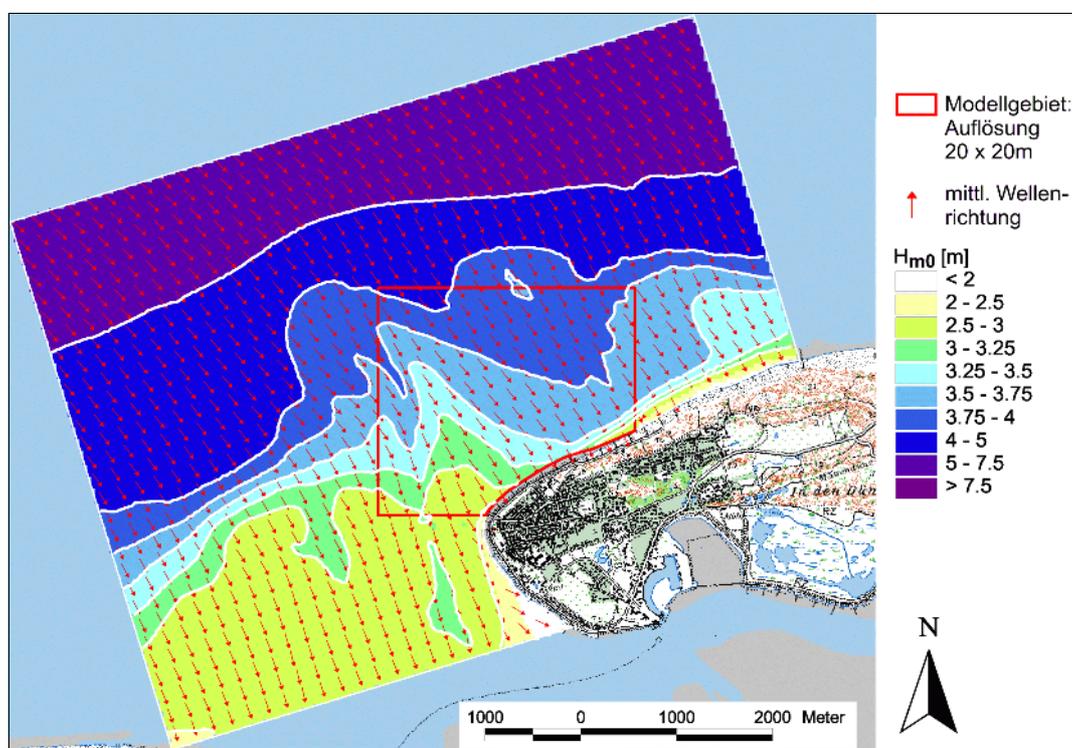


Abb. 5.8: Räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhen im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 5 m; Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 6$  m und  $T_M = 10$  s)

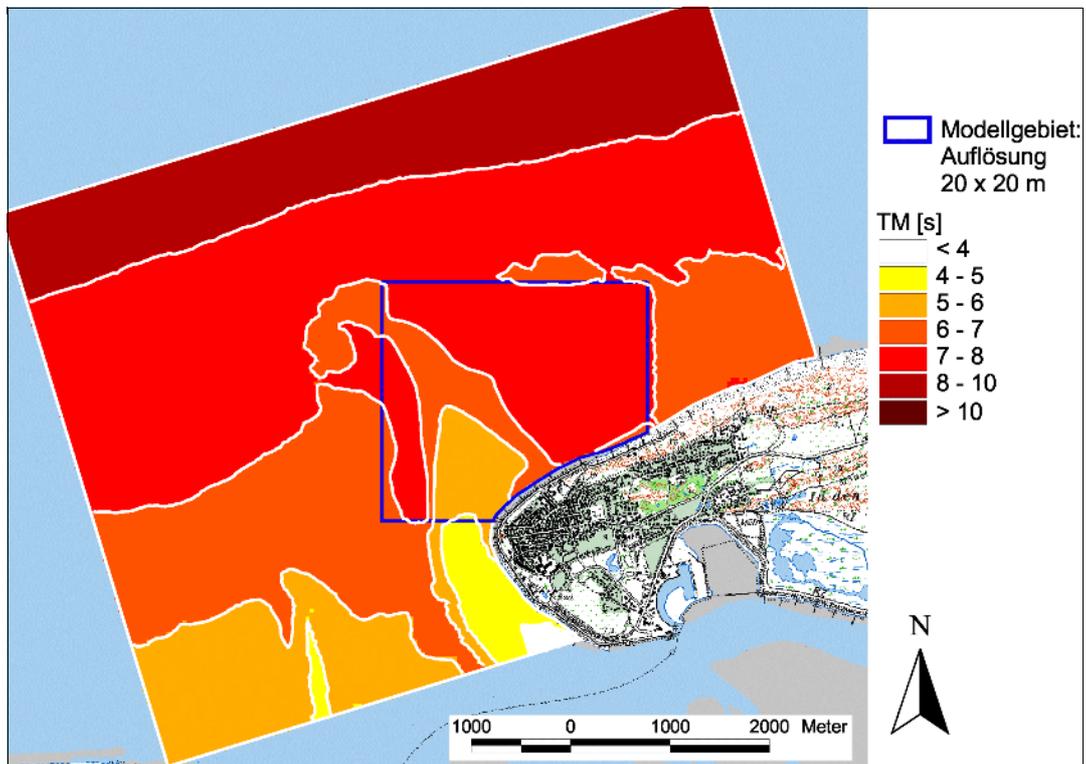


Abb. 5.9: Räumliche Verteilung der mittleren Wellenperioden im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 5 m; Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 6$  m und  $T_M = 10$  s)

MEYER et. al. 1997; KAISER & NIEMEYER 1999). Der Bereich maximaler Seegangsbelastung der Inselstrände und -schutzwerke hat sich dabei im Vergleich zu früheren Verhältnissen nach Osten verlagert, wobei signifikante Wellenhöhen von mehr als drei Metern bis in den Strandbereich gelangen (Abb. 5.8).

Die Änderungen der mittleren Wellenperioden zwischen Küstenvorfeld und dem Nahbereich von Insel und Seegat sind geringer als bei den signifikanten Wellenhöhen; ebenso verhält es sich mit der räumliche Variabilität (Abb. 5.9). Auffallend sind aber die dennoch erkennbaren Gleichartigkeiten in der Struktur der räumlichen Verteilung: zum einen werden auch die mittleren Wellenperioden durch die Brandung auf den vor dem Seegat gelegenen Platen des Riffbogens stärker gedämpft als vor dem Inselvorstrand. Zum anderen wird der selbe Strandabschnitt von den längsten Wellen erreicht (Abb. 5.9), auf den auch die höchsten einschwingen (Abb. 5.8).

#### 5.1.3.2.2 JONSWAP-Spektrum mit $H_s = 8$ m und $T_M = 10$ s

Der höhere Seegang im Küstenvorfeld führt auf dem Inselvorstrand ebenfalls zu höheren signifikanten Wellenhöhen als beim Naturspektrum (Abb. 5.8 + 5.10). Hinsichtlich der räumlichen Variabilität sind ähnliche Strukturen feststellbar. Wesentliche Unterschiede sind neben dem Vordringen höherer Wellen auf den Inselvorstrand die geringeren Wellenhöhen im Seegatbereich: Dort sind -trotz der höheren Wellen im Küstenvorfeld- keine signifikanten Wellenhöhen von mehr als drei Metern festzustellen (Abb. 5.10), wie sie noch bei Einstuern des Naturspektrums auftreten (Abb. 5.8). Dies ist vor allem durch den von Naturmessungen her bekannten Effekt erklärbar, daß bei gleichem Wasserstand höherer Seegang zu stärkerer Energieumwandlung führt (NIEMEYER 1987). Insgesamt ist aber hinsichtlich des Untersuchungsziels festzustellen, daß für die hier ge-

wählten Randbedingung eine stärkere Seegangsbelastung der Inselfschutzwerte durch höhere Wellen zu erwarten ist.

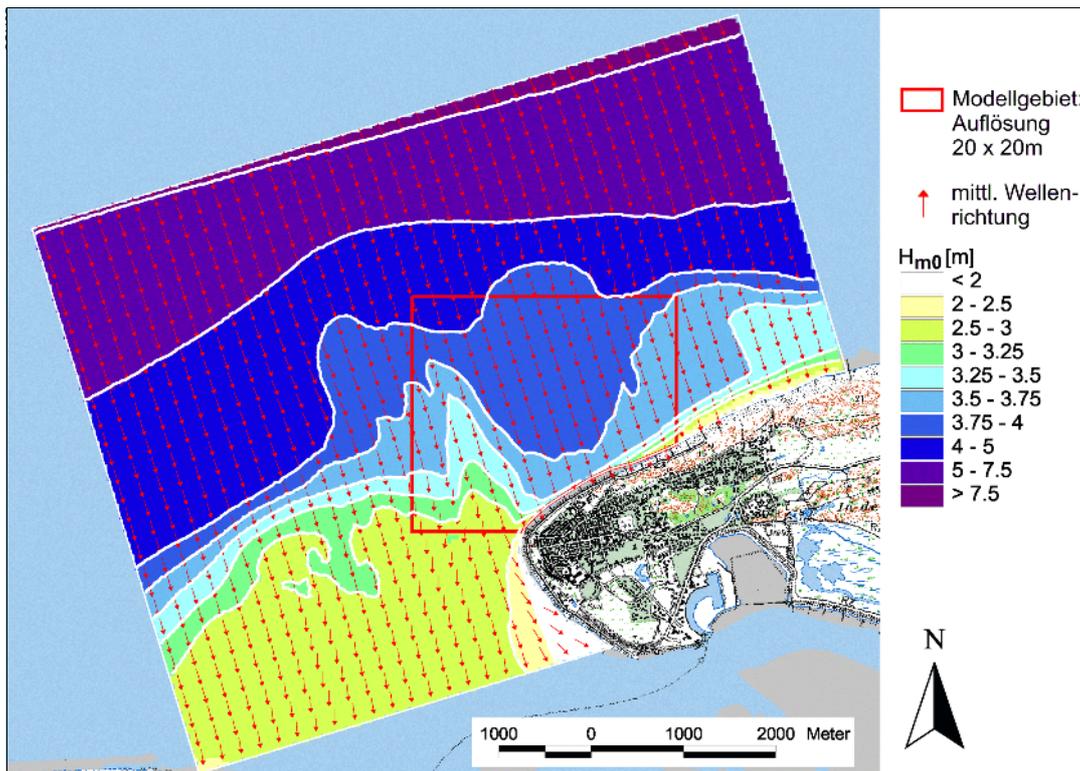


Abb. 5.10: Räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhen im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 5 m; Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 8$  m und  $T_M = 10$  s)

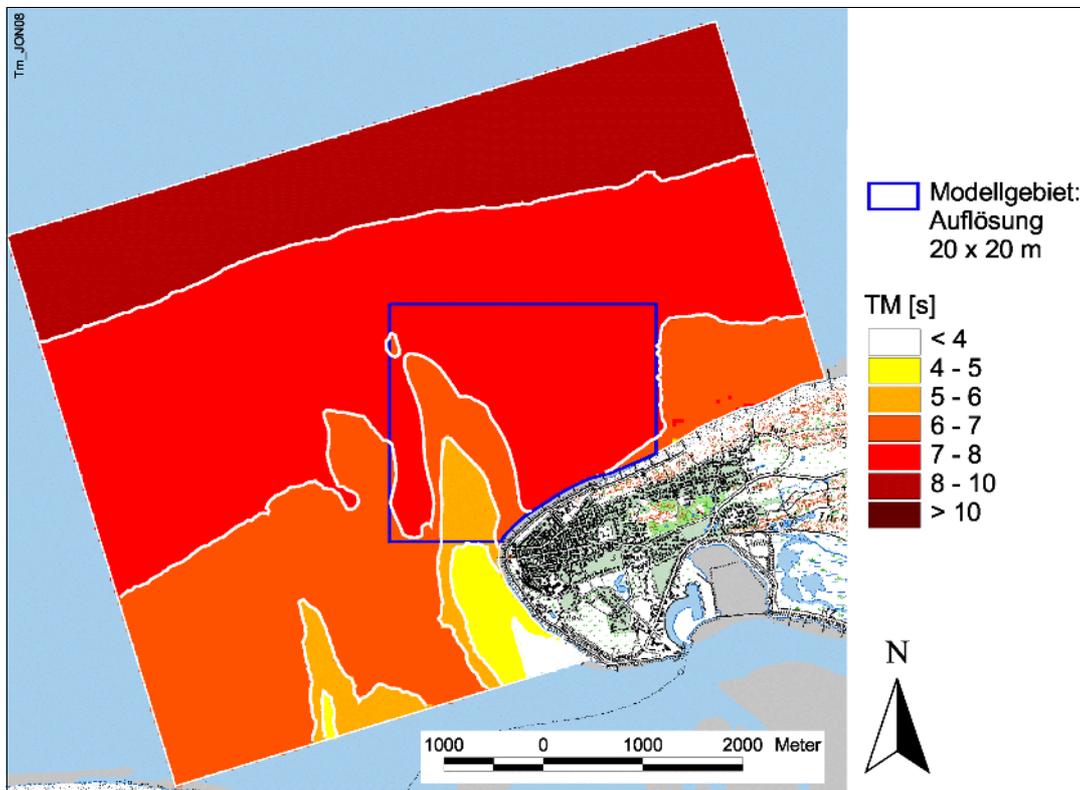


Abb. 5.11: Räumliche Verteilung der mittleren Wellenperioden im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 5 m; Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 8$  m und  $T_M = 10$  s)

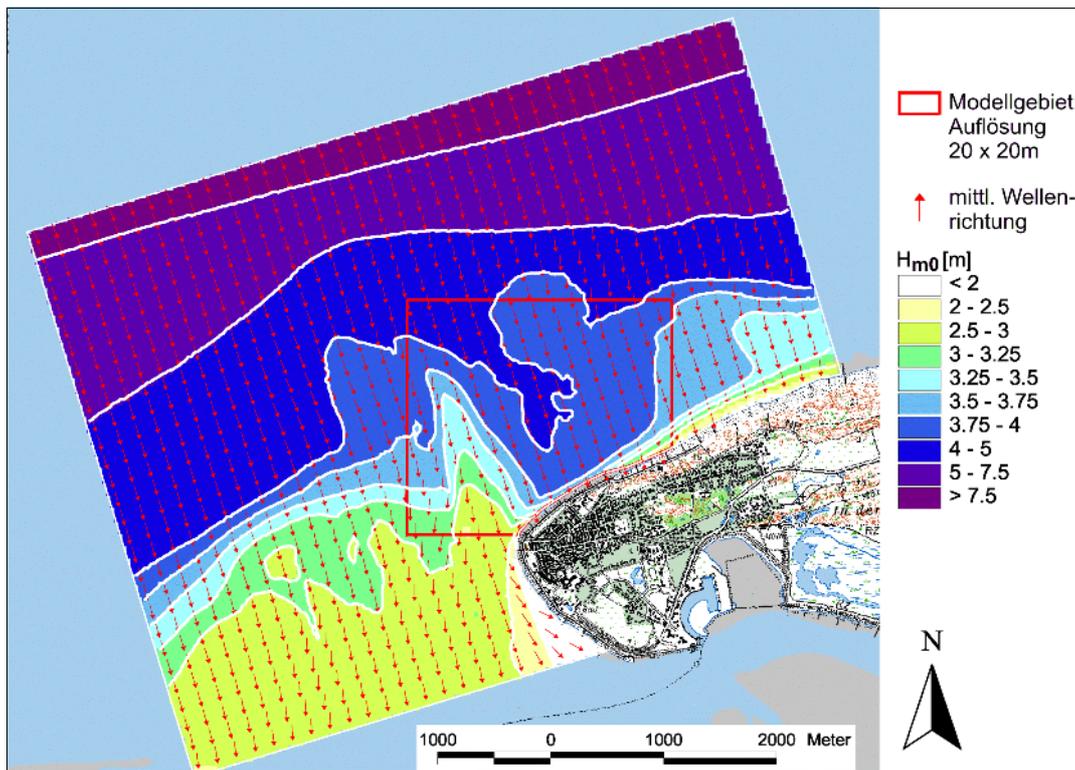


Abb. 5.12: Räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhen im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 5 m; Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_S = 10$  m und  $T_M = 12$  s)

Die dem JONSWAP-Spektrum eigene starke Energiedichtekonzentration führt -trotz der damit und den großen Wellenhöhen verbundenen starken Energieumwandlung- überwiegend zu einer räumlich gleichmäßigeren Verteilung der mittleren Wellenperioden (Abb. 5.11) als beim Naturspektrum (Abb. 5.9). Dabei sind allerdings die Größenordnungen auf dem Inselvorstrand vor den Inseln vor den Inseln etwas höher bei tendenzieller Verlagerung des Bereiches maximaler Werte in östliche Richtung. Lediglich im Seegatbereich ist beim JONSWAP-Spektrum die Variabilität größer, wobei dort auch in größeren Bereichen längere Perioden auftreten als beim Naturspektrum (Abb. 5.11).

#### 5.1.3.2.3 JONSWAP-Spektrum mit $H_S = 10$ m und $T_M = 12$ s

Das als Extrembelastung gewählte Spektrum im Küstenvorfeld bewirkt das Vordringen starken Seegangs mit sehr hohen signifikanten Wellenhöhen in das engere Untersuchungsgebiet (Abb. 5.12). Dieser mit dem verfeinerten Modell besonders naturähnlich reproduzierte Bereich erfährt offensichtlich die stärksten Änderungen bei unterschiedlichen Randbedingungen im Küstenvorfeld. Die Grenzlinie für die landwärtige Ausbreitung signifikanter Wellenhöhen von 5 m ist bei den drei hier untersuchten Spektren noch nahezu gleich (Abb. 5.8, 5.10, 5.12). Diese Übereinstimmung lässt sich in allen drei Fällen aufgrund der dort herrschenden starken Filterwirkung der Morphologie auch für die Abnahme der signifikanten Wellenhöhen im westlichen und östlichen Randbereich des Modellgebiets feststellen, wo sich die unterschiedlichen Seegangsszenarien für das Küstenvorfeld nicht erkennbar auswirken. Hier entsprechen die Ergebnisse früheren Erkenntnissen zur nivellierenden Wirkung des Riffbogens (NIEMEYER 1983, 1987). Im engeren Untersuchungsgebiet schlagen die seeseitig vorgegebenen Randbedingungen jedoch durch: hier bewirkt höherer Seegang im Küstenvorfeld das Auftreten höherer Wellen. Diese Erscheinung steht in Zusammenhang mit den für zurückliegende Jahr-

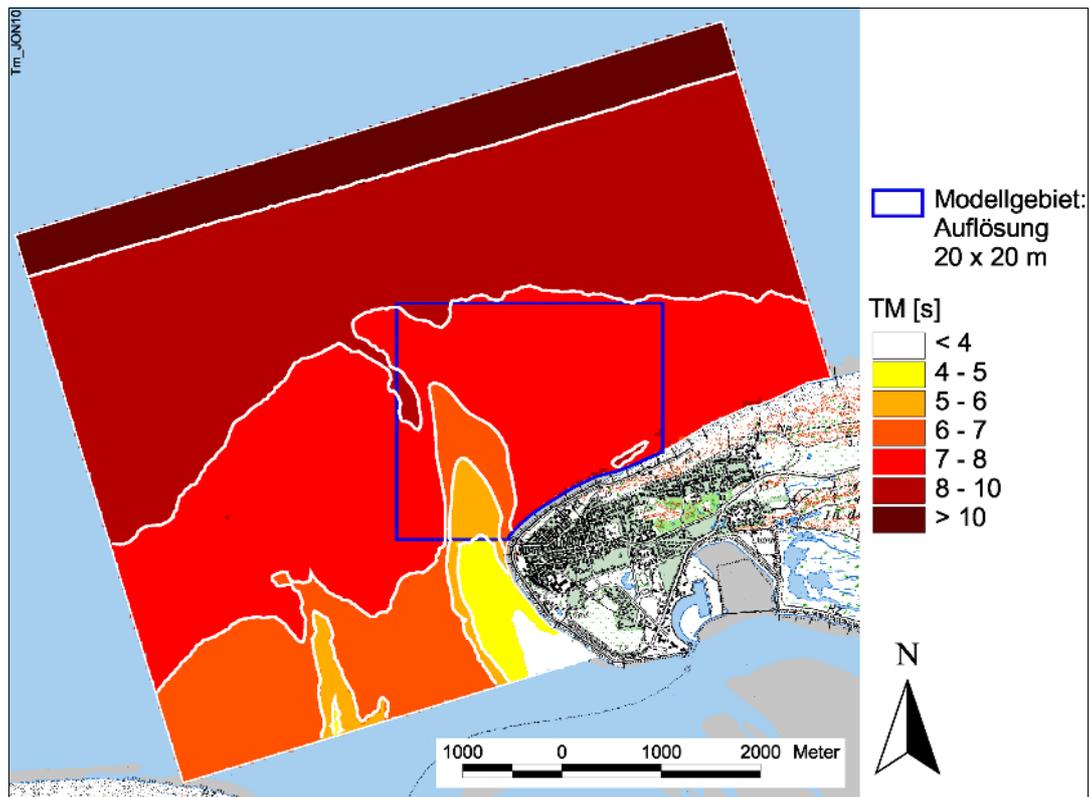


Abb. 5.13: Räumliche Verteilung der mittleren Wellenperioden im Küstenvorfeld, Riffbogen-, Strand- und Seegatbereich bei Norderney (Wasserstand: NN+ 5 m; Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10$  m und  $T_M = 12$  s)

zehnte festgestellten Veränderungen in der Ausdehnung und Höhe der dem Inselvorstrand vorgelagerten Platen (KAISER & NIEMEYER 1999; NIEMEYER & KAISER 1997, 1998; NIEMEYER et al. 1997). Im Seegatbereich zeigt sich wiederum, daß die Wellenhöhen für diesen Fall geringer sind als bei dem Naturspektrum.

Das Auftreten von Seegang mit längeren Perioden im Küstenvorfeld führt zu einer Abnahme der räumlichen Variabilität der mittleren Perioden (Abb. 5.9, 5.11, 5.13). Ausgeprägt spiegeln sich hier in deren Verteilung im wesentlichen nur die morphologischen Strukturen des Seegats und -mit geringerer Ausprägung- die des Kalfamergats wider (Abb. 5.13). Ansonsten ist die räumliche Verteilung der mittleren Perioden ziemlich ausgeglichen. Daher haben sie im engeren Untersuchungsgebiet auf dem Inselvorstrand mit leicht steigender Tendenz nach Osten etwa die gleiche Größenordnung (Abb. 5.13). Sie liegt -insbesondere im westlichen Teil- deutlich über denjenigen der anderen hier untersuchten Seegangsszenarien (Abb. 5.9 + 5.11).

#### 5.1.3.2.4 Vergleich der Ergebnisse

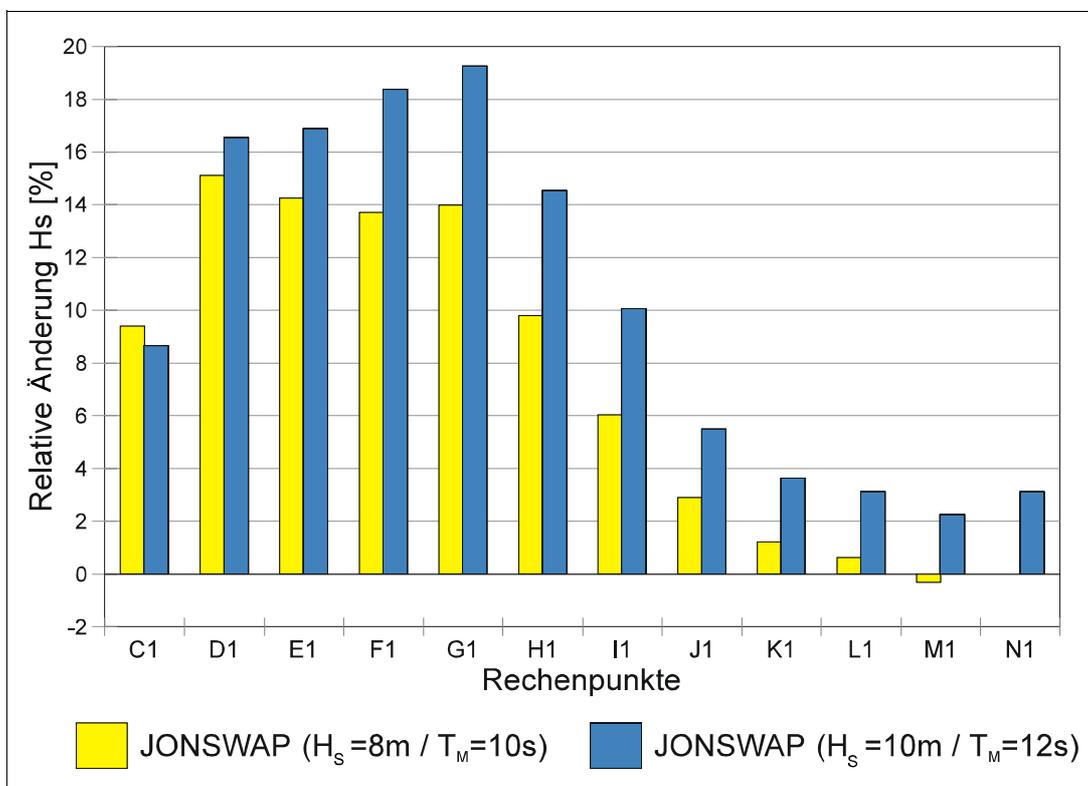
Es zeigt sich durchgängig, daß eine höhere Intensität des Seegangs im Küstenvorfeld als bei der Sturmflut vom 05. Februar 1999 gemessen auf den Inselvorstrand durch schlägt. Bei der aktuellen Topographie ist die Energieumwandlung im Bereich des Riffbogens offenbar nicht so stark, um eine entsprechende Nivellierung des Seegangs zu bewirken. Dementsprechend treten für die Szenarien mit höherer Seegangsintensität im Küstenvorfeld sowohl höherer als auch längerer Seegang auf dem Inselvorstrand auf, wengleich mit erheblichen örtlichen Unterschieden (Abb. 5.3, 5.14, 5.15; Tab.5.1+5.2).

Punkt	Natur-Spektrum 99 ( $H_s = 6\text{m}$ ; $T_M = 10\text{s}$ )	JONSWAP-Spektrum ( $H_s = 8\text{m}$ , $T_M = 10\text{s}$ )	JONSWAP-Spektrum ( $H_s = 10\text{m}$ , $T_M = 12\text{s}$ )
VST1	3,33	3,72	3,87
C1	2,66	2,91	2,89
D1	2,78	3,20	3,24
E1	3,02	3,45	3,53
F1	3,21	3,65	3,80
G1	3,22	3,67	3,84
H1	3,37	3,70	3,86
I1	3,48	3,69	3,83
J1	3,46	3,56	3,65
K1	3,30	3,34	3,42
L1	3,20	3,22	3,30
M1	3,11	3,10	3,18
N1	2,87	2,87	2,96

**Tabelle 5.1:** Vergleich der signifikante Wellenhöhen an den Rechenpunkten VST<sub>1</sub> und C<sub>1</sub> bis N<sub>1</sub> auf dem Inselvorstrand (Abb.1) für die drei untersuchten Seegangsszenarien

Insgesamt wirkt sich der erhöhte Seegang am stärksten in den Rechenpunkten D<sub>1</sub> bis G<sub>1</sub> aus (Abb. 5.14). Dabei verlagert und weitet sich der Bereich, auf den die relativ höchsten Wellen bei dem jeweiligen Seegangsszenario auftreten, schrittweise nach Westen aus: von J<sub>1</sub> und I<sub>1</sub> beim Naturspektrum auf I<sub>1</sub> bis F<sub>1</sub> für das JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 8\text{ m}$  und  $T_M = 10\text{ s}$  und auf I<sub>1</sub> bis F<sub>1</sub> für das JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10\text{ m}$  und  $T_M = 12\text{ s}$  (Tab. 5.1).

Östlich des Rechenpunkts J<sub>1</sub> wirken sich hingegen die im Küstenvorfeld auftretenden höheren Wellen nur noch marginal oder sogar überhaupt nicht aus.



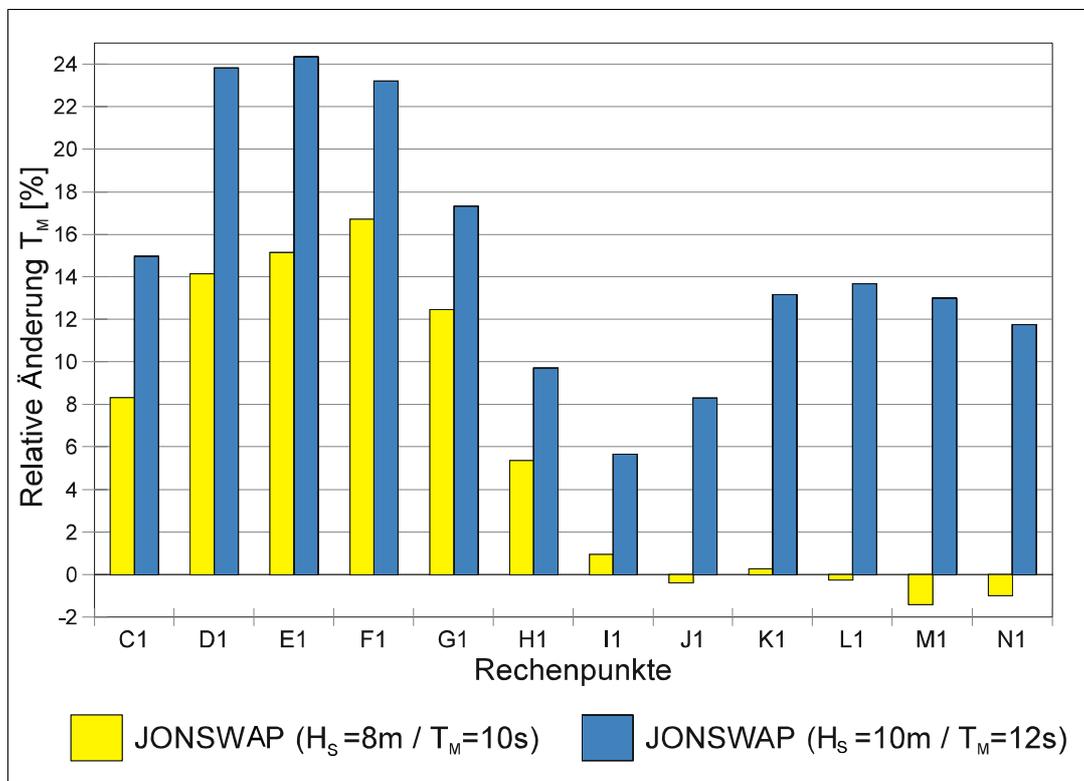
**Abb. 5.14:** Relative Änderung der signifikanten Wellenhöhen im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney an den ausgewählten Rechenpunkten (Abb. 5.6); Bezugswerte für Seegang: Naturspektrum im Küstenvorfeld mit  $H_s = 6\text{ m}$  und  $T_M = 10\text{ s}$

Punkt	Natur- Spektrum 99 ( $H_s = 6\text{m}$ ; $T_M = 10\text{s}$ )	JONSWAP- Spektrum ( $H_s = 8\text{m}$ , $T_M = 10\text{s}$ )	JONSWAP- Spektrum ( $H_s = 10\text{m}$ , $T_M = 12\text{s}$ )
VST1	6,0	7,2	7,5
C1	5,4	5,9	6,2
D1	5,6	6,4	6,9
E1	5,9	6,8	7,3
F1	6,2	7,2	7,6
G1	6,6	7,4	7,7
H1	7,1	7,5	7,8
I1	7,4	7,5	7,8
J1	7,4	7,3	8,0
K1	7,1	7,2	8,1
L1	7,1	7,1	8,1
M1	7,1	7,0	8,0
N1	7,0	6,9	7,8

**Tabelle 5.2:** Vergleich der mittleren Wellenperioden an den Rechenpunkten VST<sub>1</sub> und C<sub>1</sub> bis N<sub>1</sub> auf dem Inselvorstrand (Abb.1) für die drei untersuchten Seegangsszenarien

Für das JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 8\text{ m}$  und  $T_M = 10\text{ s}$  sind dann östlich des Rechenpunkts H<sub>1</sub> keine relativen Änderungen mehr feststellbar, während sie für das JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10\text{ m}$  und  $T_M = 12\text{ s}$  im Punkt I<sub>1</sub> ein Minimum erreichen und dann nach Osten wieder ansteigen.

Die mittleren Wellenperioden erfahren bei den Modellrechnungen mit den parametrisierten Spektren als Randbedingung im Küstenvorfeld unterschiedliche relative Änderungen gegenüber der Modellierung mit dem gemessenen Spektrum als Eingangsgröße im Küstenvorfeld (Abb. 5.15; Tab. 5.2). Zwischen den Rechenpunkten C<sub>1</sub> und G<sub>1</sub> treten dabei die größten Zunahmen auf, insbesondere zwischen D<sub>1</sub> bis F<sub>1</sub>. Für das



**Abb. 5.15:** Relative Änderung der mittleren Wellenperioden im Seegat und auf dem nord-westlichen Inselvorstrand von Norderney an den ausgewählten Rechenpunkten (Abb. 5.6); Bezugswerte für Seegang: Naturspektrum im Küstenvorfeld mit  $H_s = 6\text{ m}$  und  $T_M = 10\text{ s}$

## 5.1.4. Festlegung des Bemessungsseegang

### 5.1.4.1 Grundsätze für die Umsetzung der Ergebnisse

Für die Bemessung des Seewalls am Nordweststrand von Norderney sind hinsichtlich des Seegangs zwei Fälle zu unterscheiden:

1. die unmittelbare Kraftwirkung auf das Bauwerk,
2. die Gefährdung der Standsicherheit durch Unterspülung bei Rückströmung von Überlaufwassermengen.

Für den ersten Fall ist -angesichts der Gegebenheit, daß hier ein bestehendes, erhaltenswertes Bauwerk untersucht wird- der möglichen Maximalbelastung die größte Aufmerksamkeit zu widmen; der Umsetzung einer räumlichen Differenzierung der Belastung sind dabei weitgehend Grenzen gesetzt. Sie wird nur dann nutzbringend anwendbar sein, wenn eine Bauwerkserkundung räumlich unterschiedliche Zustände und Belastbarkeiten ergibt.

Im zweiten Fall ist hingegen eine räumlichen Differenzierung dann sinnvoll, wenn sich aus den ermittelten Belastungen ein Bedarf an baulichen Eingriffen zur Verbesserung der Standsicherheit ergibt. Hierzu ist auch das den Erfordernissen entsprechende, möglichst schadlose Abführen von Überlaufmengen im Nahbereich des Bauwerks zu zählen. In diesem Fall ist eine räumliche Differenzierung der Seegangsbelastung zwingend, um neben dem primären Gebot der Sicherheit auch das der Wirtschaftlichkeit zu befolgen.

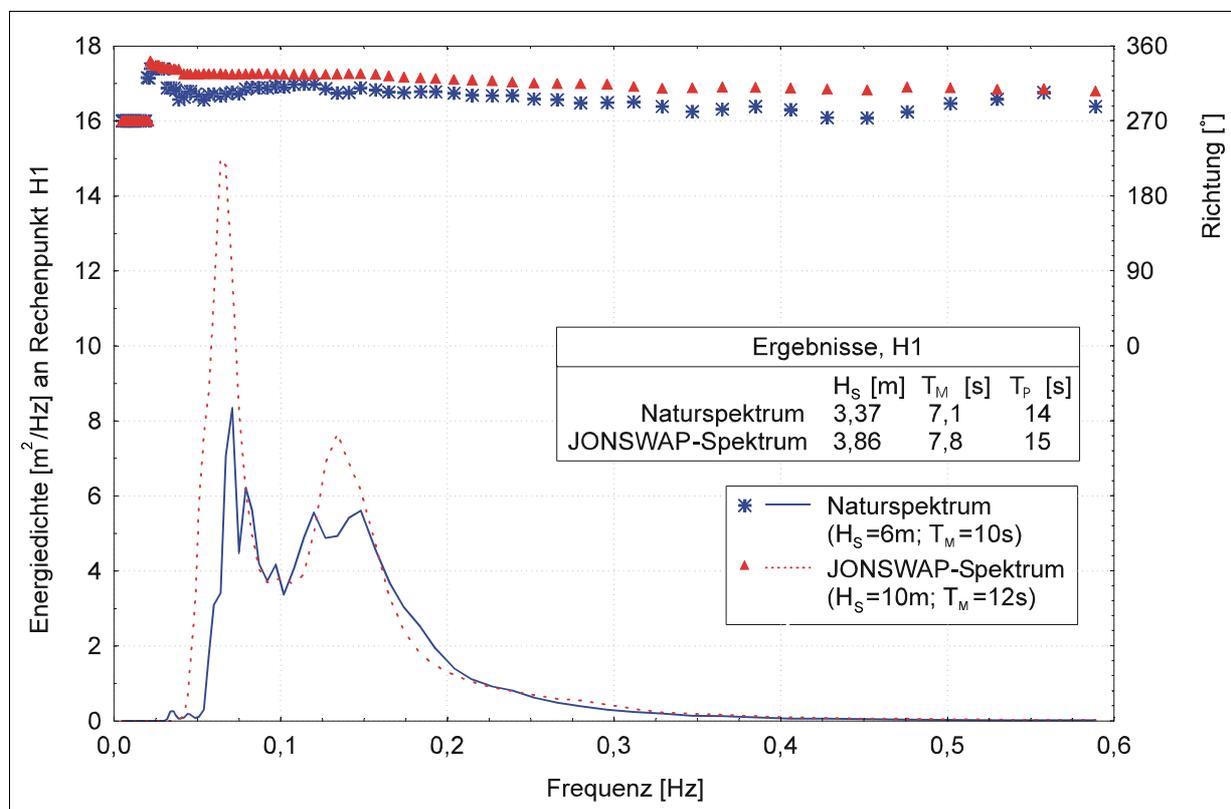


Abb. 5.16: Vergleich der Seegangsspektren am Rechenpunkt H<sub>1</sub> auf dem Inselvorstrand

#### 5.1.4.2 Bewertung und Nachprüfung der Auswahlkriterien

Die ausgewählte Extremsituation orientiert sich an Ergebnissen, die mit Regressionsmodellen für den Bemessungsfall ermittelt wurden (NIEMEYER 1983). Damals sind allerdings nur kennzeichnende Seegangparameter ermittelt worden, die allein unzureichend sind, um als Steuerung eines vollspektralen Modells wie SWAN zu dienen. Daher ist ein entsprechendes parametrisiertes Spektrum ausgewählt worden. Es ist aber bekannt, daß diese eine weniger strukturierte Energieverteilung über die Frequenzen aufweist als Naturspektren. Von daher ist zu fragen, ob erstens damit eine hinreichende Naturähnlichkeit erreichbar ist und wenn nicht, ob die Annahme auf der sicheren Seite liegt.

Zur Klärung wurden folgende zwei Spektren im Rechenpunkt  $H_1$ , für den der höchste Seegang ermittelt wurde (Tab. 1), hinsichtlich der Energieverteilung über die Frequenzen verglichen (Abb. 5.16), die mit dem Modell SWAN für folgende Steuergrößen ermittelt worden sind:

1. Naturspektrum mit  $H_s = 6$  m und  $T_M = 10$  s
2. JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10$  m und  $T_M = 12$  s

Der Vergleich zeigt einerseits deutlich, daß die wesentlichen Strukturen der Energiedichteverteilung über die Frequenzen unabhängig vom als Steuerung eingegebenen Spektrum übereinstimmen (Abb. 5.16): Die Verteilung der Energie auf zwei Hauptsysteme ist in beiden Fällen übereinstimmend. Die Ausbildung von Nebenpeaks in beiden Hauptsystemen beim Naturspektrum ist dagegen nachrangig; sie stellen wegen ihrer geringen relativen Größe beziehungsweise wegen ihrer engen Nähe im Frequenzbereich für die Seegangsbelastung von Bauwerken keine zu besonders berücksichtigenden Elemente dar.

Die Prägung des Seegangs durch die starken Wechselwirkungen mit der Morphologie ist so weitgehend dominant, daß die Struktur des Seegangs im Küstenvorfeld demgegenüber nachrangig wird. Andererseits ist aus diesem Ergebnis zu folgern, daß die hier zu untersuchenden Wechselwirkungen von Seegang und Morphologie auch hinsichtlich der spektralen Struktur mit dem Modell SWAN naturähnlich reproduzier- und vorher-sagbar sind.

#### 5.1.4.3 Vorgaben

Für die maximale Seegangsbelastung wird vorgeschlagen, die Ergebnisse der Modellrechnungen mit der aktuellen Topographie für den Rechenpunkt  $H_1$  heranzuziehen; die spektrale Energiedichteverteilung ist in Abbildung 5.34 bereits dargestellt. Kennzeichnende Parameter sind:

$$H_s = 3,86 \text{ m}$$

$$T_M = 7,8 \text{ s}$$

Die Berechnung des Seegangs mit einem mathematischen Modell erlaubt eine räumlichen Differenzierung der Belastung, die abhängig von der aktuellen Strandmorphologie und Konfiguration des Riffbogen geringer ist. Hierbei sind allerdings mögliche Variationen der Morphologie zu beachten, die im Abschnitt 6 näher beschrieben werden.

## 5.2 Insellee

### 5.2.1 Problemstellung

Bei der Ermittlung des Besticks für den Südstrandpolderdeich auf Norderney, der im Inselschatten liegt, trat die Frage auf, ob das mathematische Seegangmodell SWAN in der Lage ist, den Bemessungsseegang naturähnlich zu reproduzieren. Die dafür erforderlichen Grundsatzuntersuchungen waren innerhalb des Auftragsumfangs nicht zu erbringen. Da auf Grund der Struktur des Modells SWAN, das ohne Diffraktion arbeitet, erhebliche Zweifel bestanden, wurde der Bemessungswellenaufbau herkömmlich über das Extrapolationsverfahren ermittelt (NIEMEYER & KAISER 1999). Die Fragestellung blieb bestehen und wegen ihrer allgemeinen Bedeutung hier innerhalb des Forschungsvorhabens bearbeitet. Teilergebnisse dieser Untersuchungen wurden bei der ICCE 2000 in Sydney und bei WISE 2001 in San Francisco vorgestellt und in den jeweiligen Proceedings veröffentlicht (KAISER et al. 2001, KAISER & NIEMEYER 2002).

### 5.2.2 Modellgebiet und Randbedingungen

Das Modelgebiet umfasst das Norderney Seegat mit Riffbogen bis ungefähr zur NN-12,5m-Linie und hat für das regelmäßige Gitter eine Ausdehnung von ca. 7,7km x 12,6km (Abb. 5.17). Die räumliche Auflösung für dieses Rechengitter beträgt bei 84 x 158 Maschen ca 90m x 80m. Zum Vergleich wurde auch ein Modell mit einem gekrümmt-linearen Gitter mit ungefähr gleicher Maschenanzahl (100 x 130) eingerichtet. Dieses Gitter wurde in Absprache mit den Modelentwicklern so eingerichtet, dass die Gitterlinien entlang der steilen Böschung des Norderneyer Weststrandes verliefen und hier die räumliche Auflösung besonders hoch war. Hiermit sollten eventuelle Energieverluste aus der Lage der Gittermaschen zum steilen Rand vermieden werden.

Die Position See ( Abb. 5.17) liefert die Randbedingung am nördlichen Rand des Modells und die Positionen Vst, SgtKal, SgtNey, und Riffgat dienen der Verifikation. Für

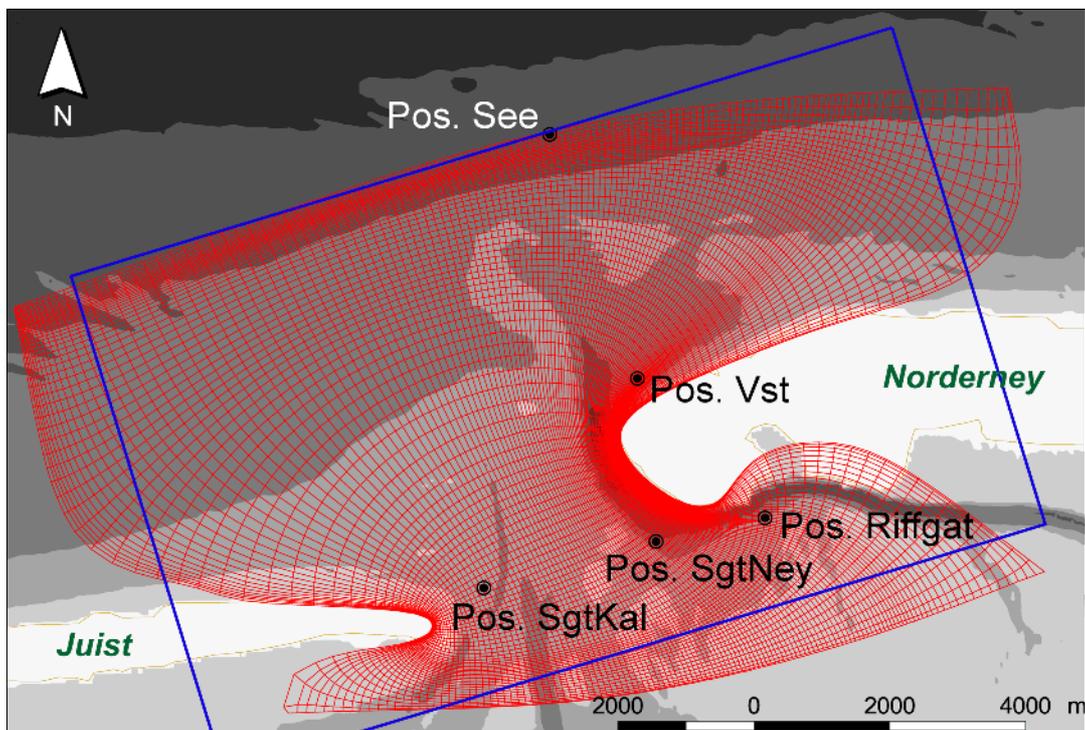


Abb. 5.17: Modelrand für regelmäßiges Rechengitter (blau) und gekrümmt-lineares Gitter (rot) für das Norderneyer Seegat mit Bojenpositionen für Randbedingungen und Verifikation

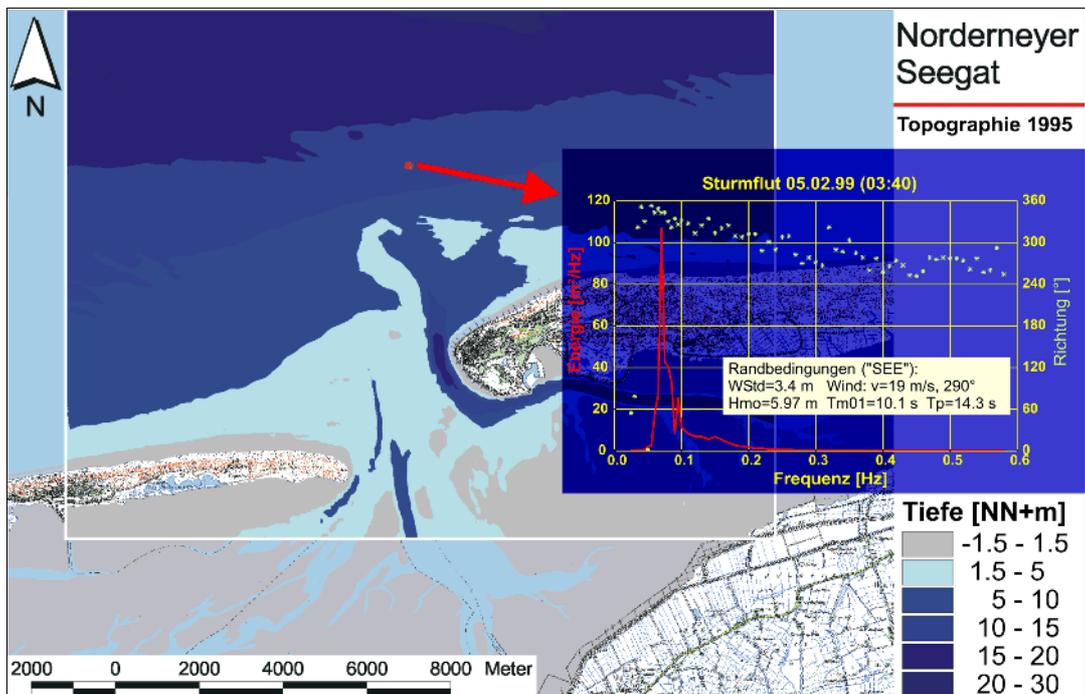


Abb. 5.18: Gemessenes Spektrum am 05.02.1999, 03:40 an der Position 'See' mit Topographie von 1995 im Untersuchungsbereich (weiß gerahmter Kasten)

den Vergleich wurde die Sturmflut vom 5. Februar 1999 ausgewählt. Während dieser Sturmflut wurde bei einem Thw von 8,4m über NN an der Pos. See Seegang mit einer signifikanten Wellenhöhe von  $H_{m0}=5,97\text{m}$  und einer mittleren Wellenperiode  $T_{m01}=10.1\text{s}$  gemessen (Abb 5.18). Das Spektrum hat einen ausgeprägten Peak, dessen Periode bei 14.3s liegt. Der Wind kam mit einer Geschwindigkeit von 19m/s aus 290°.

### 5.2.3 Ergebnisse der Modellierung

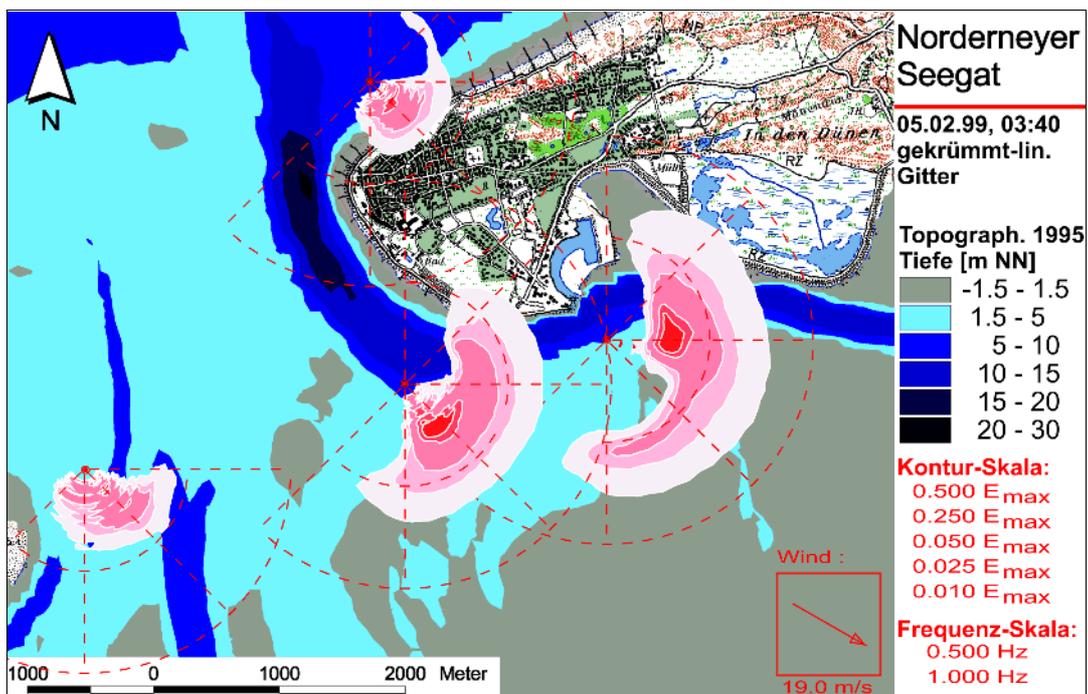


Abb. 5.19: Berechnete, normierte 2-D-Spektren an den Bojenpositionen (gekrümmt lineares Gitter, Topographie von 1995)

Die 2-D-Spektren aus dem Lauf mit dem gekrümmt-linearen Gitter zeigen an den Verifikations-Positionen (Bojen-Positionen) Ergebnisse, die qualitativ den Vorstellungen von der Transformation des Seegangs im Gat entsprechen (Abb. 5.19). Die Form der Spektren lässt deutlich den Einfluss der morphologischen Großformen auf den Seegang erkennen und für die höheren Frequenzen auch den des örtlichen Windeintrags. An der Vorstrand-Position ('Vst') ist das Spektrum klar normal auf den Strand ausgerichtet. Im Kalfamergat ('SgtKal') wird der Seegang in die westliche Rinne des Kalfamer-Gats und das davon östlich gelegene Busetief aufgeteilt. In diesem Sektor wird ein, wenn auch geringer Einfluss des örtliche Windes sichtbar. An den Position 'SgtNey' und 'Riffgat' zeigt sich, wie der längere Seegang entlang der Rinne um den Kopf der Insel herumgeführt wird und sich das Spektrum auch durch den Einfluss des örtlichen Winds aufspreizt. Deutlich wird dies vor allem an der Position Riffgat, an der man die Windsee mit mittleren Perioden um 2 s in Richtung des örtliche Windes deutlich von dem durch Refraktion gebeugten längeren Bestandteilen des Spektrums in Richtung der Rinne unterscheiden kann. Bei der Betrachtung aller Positionen kann man auch die Transformation der Seegangenergie zu den höheren Frequenzen beim Einlaufen in das Seegat erkennen.

Der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Spektren an den Positionen 'Vst', 'SgtNey' und 'Riffgat' zeigt, abhängig von der jeweiligen Lage, eine unterschiedliche Güte der Modellergebnisse (für diesen Termin waren Daten an der Pos. 'SgtKal' nicht verfügbar). Am Nordwest-Strand von Norderney (Pos. 'Vst', Abb. 5.20) zeigen sich zwar Abweichungen der berechneten Spektren vom gemessenen, aber insgesamt wird die Form des Spektrums in der Größenordnung richtig wiedergegeben. Dies gilt vor allem, wenn man die starke Energieumwandlung vom äußeren Rand des Modells (Station 'See', Abb. 5.18) zum Strand berücksichtigt, wie ein Vergleich der Energiedichte der jeweiligen Peaks zeigt (ca. 110 zu 7,5 m<sup>2</sup>/Hz). Die Energiedichte in den niedrigen Frequenzbereichen werden von SWAN unabhängig vom Gitter unterschätzt. Dies hat natürlich auch Auswirkungen auf die mittleren Richtungen in diesem Bereich. Ansonsten stimmen die Richtungen in etwa überein, wobei SWAN dazu tendiert, den Seegang mehr aus westlichen Richtungen anlaufen zu lassen. Ein Vergleich der spektralen Parameter zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der spektralen signifikanten Wellenhöhen und eine Unterschätzung der mittleren Periode Tm01 durch SWAN. Die Differenz in der Peakperiode (T<sub>p</sub>) erklärt sich durch den Verlauf des gemessenen Spektrums mit

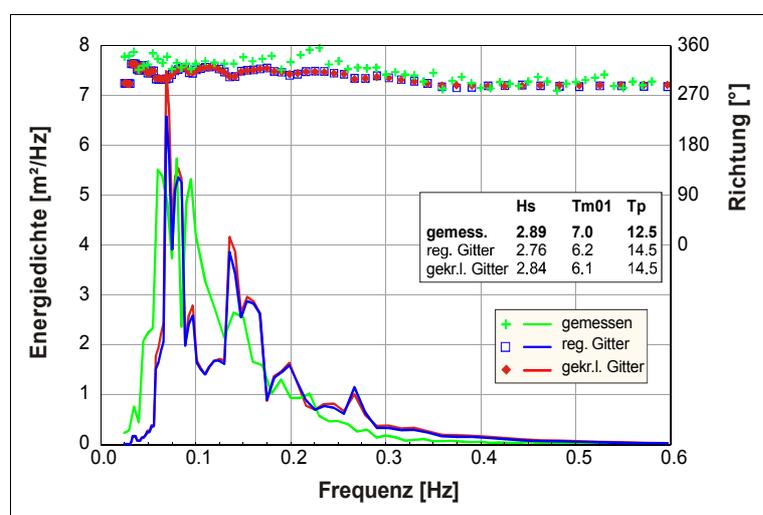


Abb. 5.20: Gemessene und berechnete Spektren (regelmäßiges und gekrümmt-lineares Gitter) an der Pos. 'Vst'

multiplen Peaks und stellt keine fundamentale Abweichung dar.

An der Position 'SgtNey' (Abb. 5.20) findet sich wieder eine generelle Übereinstimmung von gemessenen und gerechneten Spektren bei einer Reduktion der Spitze der Energiedichte um mehr 99% (vgl. Station 'See', Abb. 5.18). SWAN unterschätzt unabhängig vom gewählten Gitter die Energiedichteanteile im längeren Seegang und überschätzt die in den höheren Frequenzen. Die

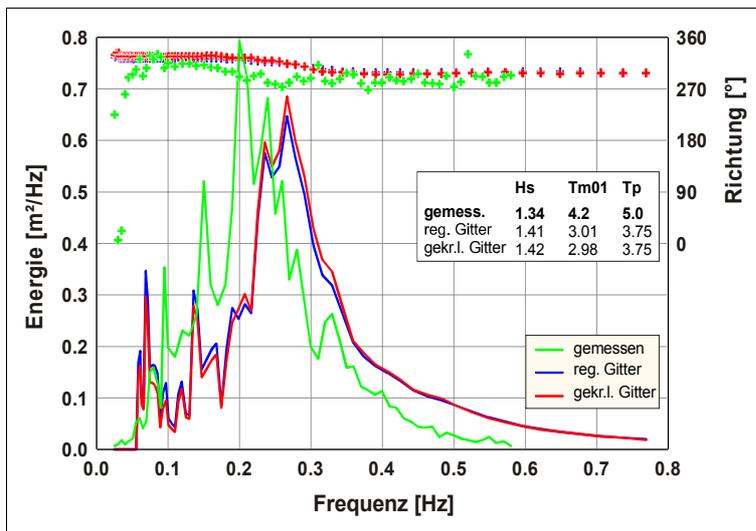


Abb. 5.21: Gemessene und berechnete Spektren (regelmäßiges und gekrümmt-lineares Gitter) an der Pos. 'SgtNey'

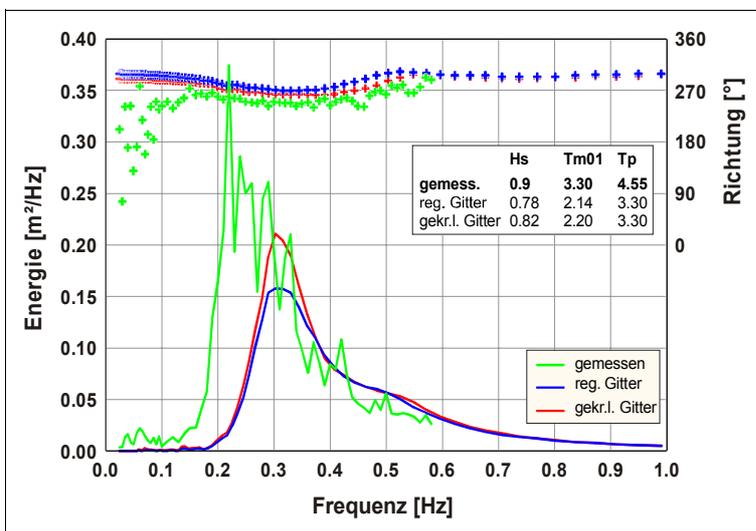


Abb. 5.22: Gemessene und berechnete Spektren (regelmäßiges und gekrümmt-lineares Gitter) an der Pos. 'Riffgat'

Weil der hoch frequente Teil ( $> 0,3$  Hz) relativ gut wiedergegeben wird, scheint die Anregung des Seegangs durch lokalen Wind korrekt zu sein. Ein Vergleich der spektralen Parameter zeigt eine Unterschätzung der signifikanten Wellenhöhe um ca. 10%, was gemessen an der enormen Transformation von Energie ein eher guter Wert ist. Allerdings werden die für die Berechnung des Wellenaufbaus an Deichen wichtigeren mittleren Perioden ebenso wie die Peakperiode signifikant unterschätzt. An der Station Riffgat ist ein nennenswerter Unterschied zwischen regelmäßigem und gekrümmt-linearen Gitter erkennbar. Die Seegangsberechnung mit dem letzteren zeigt spektrale Parameter, die etwas näher an den gemessenen liegen. Auch ist die Abweichung in der mittleren Richtung beim gekrümmt-lineare Gitter geringer.

Im Bereich des Insellee zeigt SWAN die Grenzen für ein Seegangsmodell auf, das ohne Diffraktion arbeitet. Während an den Stationen 'Vst' und 'SgtNey' eine relativ gute Übereinstimmung für die spektralen signifikanten Wellenhöhen und eine leichte Unterschätzung der mittleren Perioden auftritt, liegen die Abweichungen an der Position

Flächen unter den Kurven bleiben damit ungefähr gleich, wie auch ein Vergleich der spektralen signifikanten Wellenhöhen zeigt, die von SWAN sogar leicht überschätzt werden. Der berechnete höhere Energieanteil in den höheren Frequenzen führt zu einer Unterschätzung der mittleren Wellenperiode und die Multi-Peak Struktur der Spektren führt zu einer Differenz in der Peak-Periode. Interessant beim Vergleich der Spektren ist vor allem die Differenz in der Richtung, die ca.  $30^\circ$  über den Frequenzbereich mit der höchsten Energiedichte beträgt. Dieser zentrale Part läuft beim gemessenen Spektrum ungefähr in Richtung Ost, dem Verlauf der Rinne des Riffgats folgend, während die Energie bei den berechneten Spektren in Richtung Südost auf das Festland zu geleitet wird. Ein substantieller Unterschied zwischen den Ergebnissen mit regelmäßigem oder mit gekrümmt linearen Gitter ist an dieser Position nicht zu erkennen.

Daraus folgend zeigt sich an der Station 'Riffgat' im Vergleich

'Riffgat' deutlich höher. Dies wird sehr wahrscheinlich durch die großen Gradienten in der Topographie des südwestlichen Inselkopfes und den Bauwerken mit Fähr-Terminal und Hafeneinfahrt einerseits und dem Fehlen von Diffraktion im Seegangsmo­del­ andererseits verursacht.

### 5.3 Inselgeschützte Festlandsküste

#### 5.3.1 Verfahrensweise und Vorgabe der Randbedingungen

Der Bemessungsseegang für das Untersuchungsgebiet wird mit Hilfe mathematischer Modelle ermittelt. Hierbei wird die Topographie für zwei Untersuchungsbereiche in unterschiedlicher Auflösung reproduziert: Ein umfassendes, vom offenen Seegebiet bis an die Deiche reichendes Gebiet von 14 x 20 km mit einer Auflösung von 100 x 100 m, in das ein kleineres Modellgebiet von 4,2 x 12,5 km mit einer Auflösung von 50 x 50 m eingebettet wird (Abb. 5.23).

Bei beiden Modellen werden der Wind und der Wasserstand flächendeckend vorgegeben. Am seeseitigen Rand des höher auflösenden eingebetteten Modells wird der Seegang aus den Ergebnissen des umfassenderen Modells als Randbedingung übernommen. An diesem seeseitigen Rand ist der Seegang als Steuergröße vorzugeben.

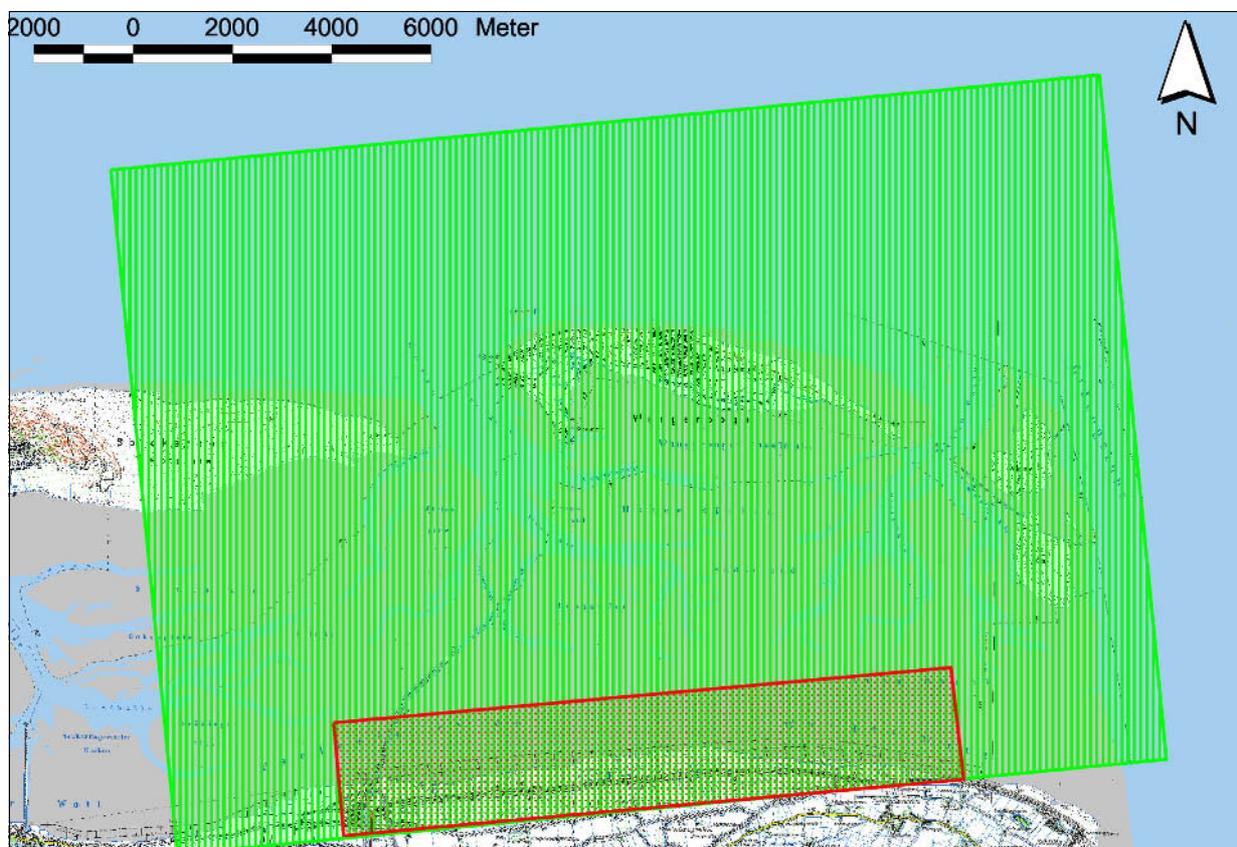


Abb. 5.23: Modellgebiete für das Seegangsmo­del­ SWAN

 : Gitternetz 100 x 100 m;  : genestetes Gitternetz 50 x 50 m.

Als Wasserstand wird der Bemessungswasserstand von

$$NN + 5,6 \text{ m}$$

angesetzt; als Bemessungssturm ein gleichförmiges Windfeld mit folgenden Geschwindigkeiten und Richtungen:

$$u = 30,0 \text{ m/s}$$

$$R = 315^\circ$$

Diese Annahmen liegen auf der sicheren Seite; die Geschwindigkeit entspricht derjenigen, die nach Modellberechnungen gekoppelter Wind- und Tidemodelle (BAW 1997) mit dem Bemessungswasserstand im Emsästuar bei Borkum korreliert. Für Windrichtungen aus nordwestlicher Richtung tritt für das Gebiet der Ostfriesischen Inseln und Küste die relativ stärkste Seegangsanfachung hinsichtlich der Windwirkwege und zugehöriger Wassertiefen auf (NIEMEYER 1983).

Für das vollspektrale Modell SWAN (RIS et al. 1995; BOOIJ et al. 1999) wird ein bei der Sturmflut vom 10. Januar 1995 gemessenes Spektrum (Abb. 5.24) als seeseitige Randbedingung eingegeben, das folgende kennzeichnende Seegangparameter aufweist:

$$H_s = 6,41 \text{ m}$$

$$T_p = 11,1 \text{ s}$$

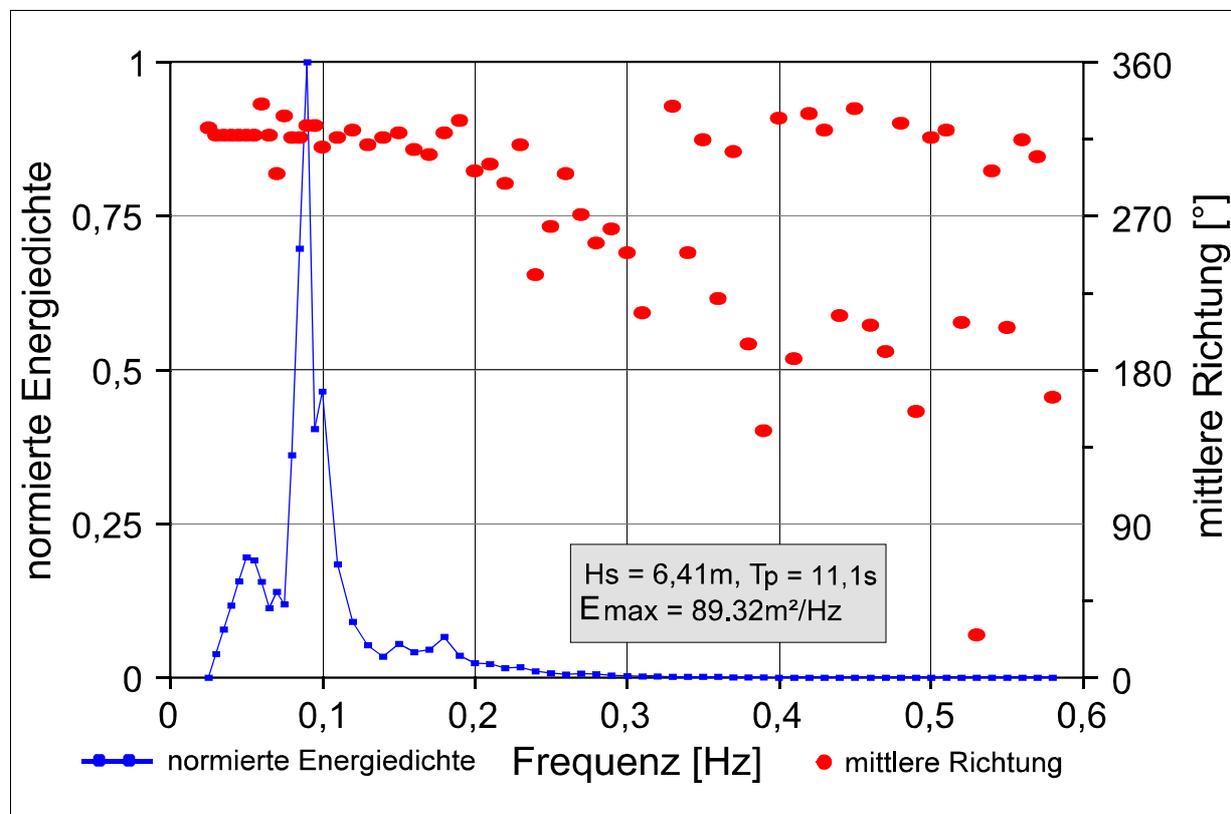


Abb. 5.24: Im Küstenvorfeld der Ostfriesischen Inseln beim Sturm vom 10. Januar 1995 gemessenes Seegangsspektrum

Hiermit wird der Bemessungsseegang ermittelt, wobei von der Voraussetzung ausgegangen wird, daß der Seegang im Untersuchungsgebiet soweit tiefenbegrenzt ist, daß der für die vorgegebenen Randbedingungen zu erwartende höhere Energieeintrag aus dem Küstenvorfeld wegen der damit verbundenen stärkeren Energieumwandlung keine nennenswert ungünstigeren Werte liefern wird. Zur Absicherung dieser These sind sowohl mit dem parametrischen Modell HISWA (HOLTHUIJSEN & BOOIJ 1987; BOOIJ & HOLTHUIJSEN 1992) als auch mit dem vollspektralen Modell SWAN (RIS et al. 1995; BOOIJ et al. 1999) vergleichende Untersuchungen vorgenommen worden: Hierbei wurden sowohl die Parameter des am 10. Januar 1995 gemessenen Spektrums als Randbedingungen verwandt als auch das folgende Szenario:

$$H_s = 8,0 \text{ m}$$

$$T_p = 12,0 \text{ s}$$

Bei der Vorgabe dieses Parameter-Szenarios wird über die Algorithmen des Modells SWAN eigenständig ein Spektrum ausgebildet.

### 5.3.2 Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen

Es zeigt sich deutlich, daß die Annahme des tiefenbegrenzten Seegangs im Watt zutreffend ist. Für beide Randbedingungen ergeben sich trotz der erheblichen Unterschiede in der Größenordnung der kennzeichnenden Seegangparameter im Küstenvorfeld des Deiches nur äußerst geringe Unterschiede auf dem Watt und Heller vor dem Deich. Die Verhältniswerte für die Modellrechnungen mit den beiden unterschiedlichen Randbedingungen betragen auf dem Watt und dem Heller vor dem Elisabethgroden-Deich für die signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  maximal  $\pm 5\%$  (Abb. 5.25a). Für die Perioden des

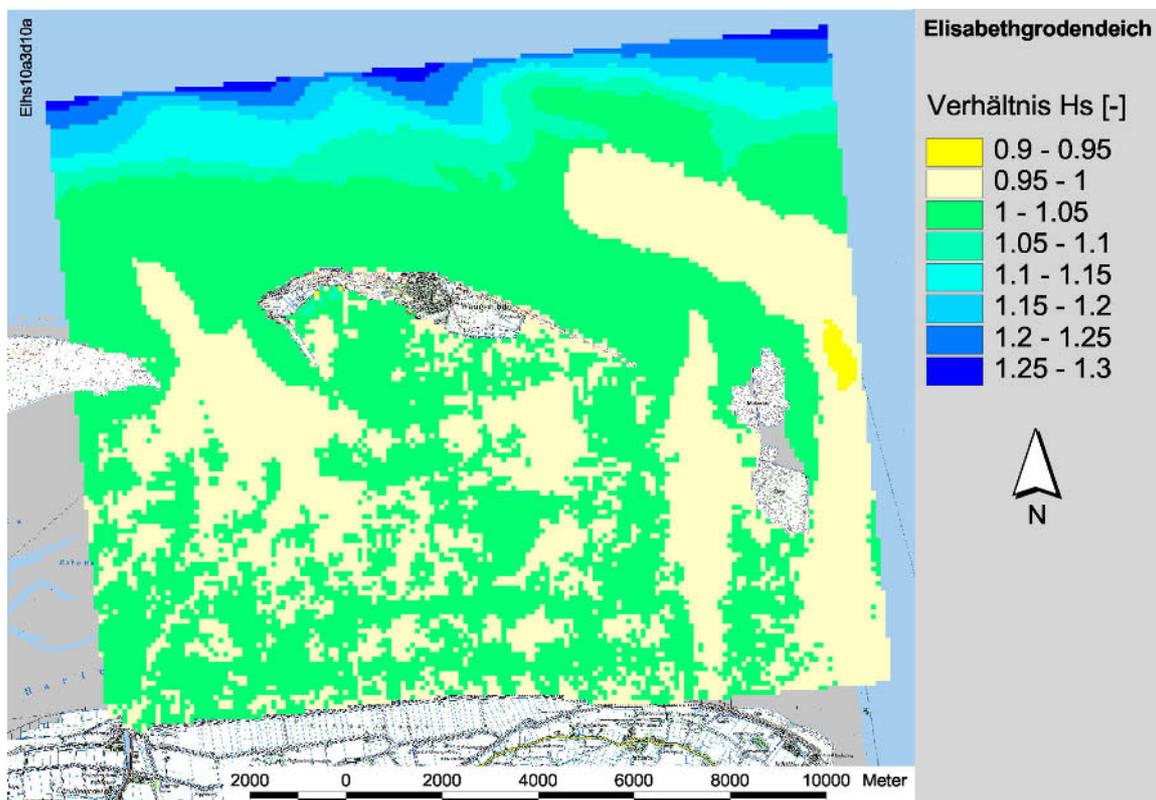


Abb. 5.25a: Verhältniswerte der Modellergebnisse für die signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  mit unterschiedlichen Randbedingungen im Seegebiet

Energiedichtemaximums liegen sie dort sogar nur zwischen -2,5% und 0 (Abb. 5.25b). Auch für die mittleren Wellenrichtungen ergeben sich fast nur geringe Abweichungen (Abb. 5.25c); auf den Watten vor dem Elisabethgroden sind sie durchgängig unterhalb der Schwelle  $\pm 0,5^\circ$ .

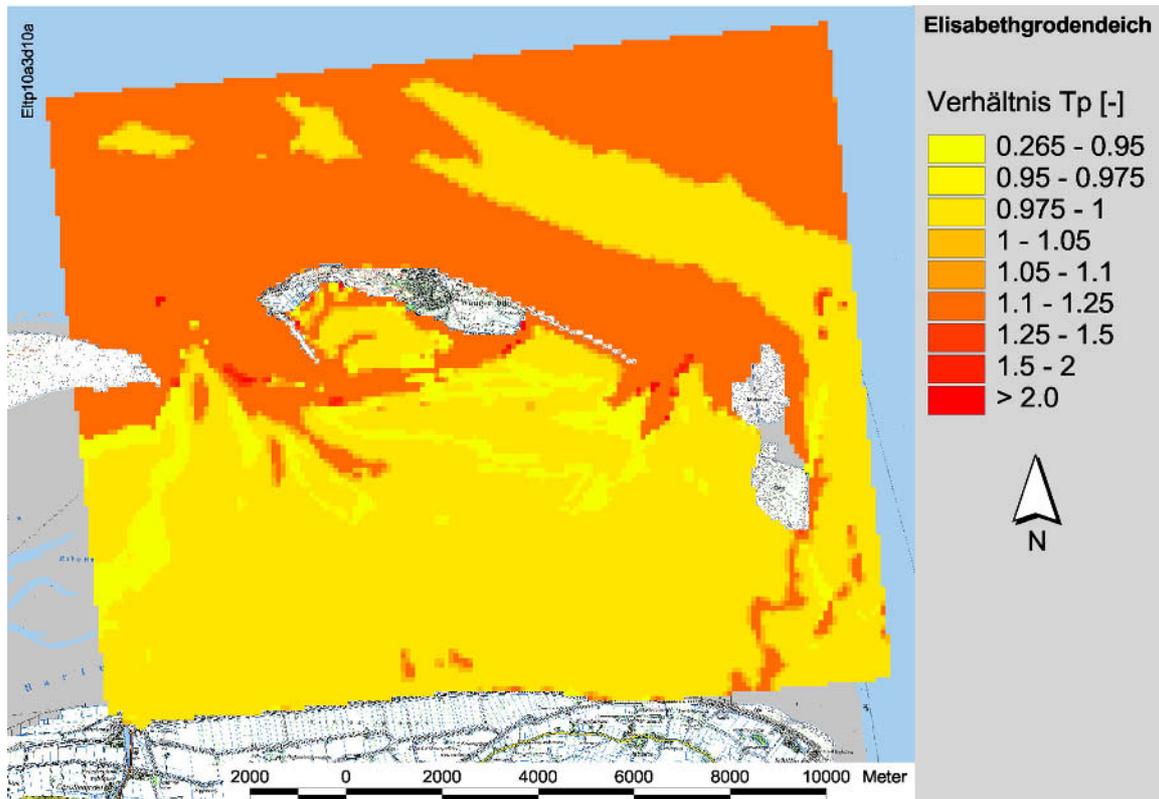


Abb. 5.25b: Verhältniswerte der Modellergebnisse für die Perioden des Energiedichtemaximums  $T_p$  mit unterschiedlichen Randbedingungen im Seegebiet

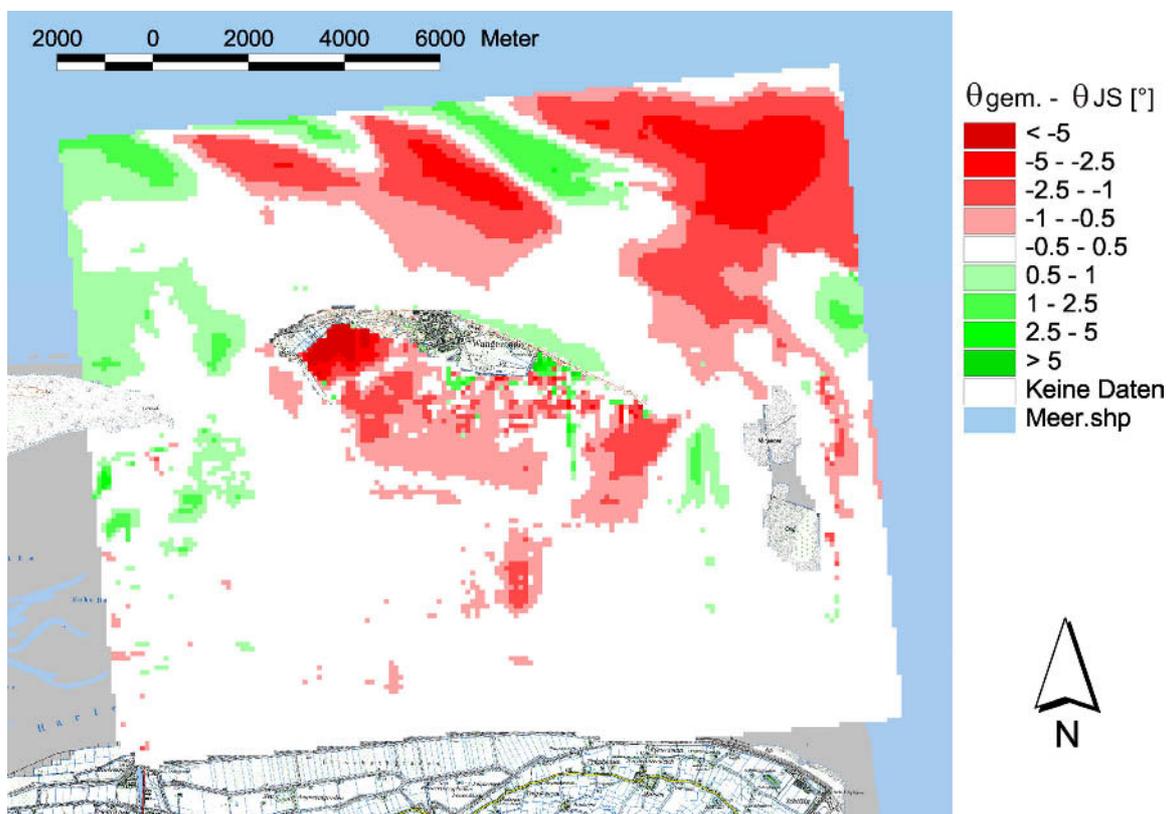


Abb. 5.25c: Differenz der mittleren Wellenrichtungen für unterschiedliche Randbedingungen im Seegebiet

Die sehr kleinen Differenzen weisen aus, daß bei Nutzung des gemessenen Spektrums als Eingangswert für die Modellierung keine Unterschätzung des Bemessungsseegangs vor dem Elisabethgroden-Deich erfolgt (Abb. 5.25a + 5.25b) und daß dadurch kein Sicherheitsrisiko eingegangen wird. Die weiteren Berechnungen zur Ermittlung des Bemessungsseegangs für den Elisabethgroden-Deich erfolgen somit auf der Grundlage der hier formulierten Randbedingungen unter Verwendung des am 10. Januar 1995 gemessenen Spektrums.

### 5.3.3 Bemessungsseegang für den Elisabethgroden-Deich

Die Rechenläufe mit dem vollspektralen Modell SWAN (RIS et al. 1995; BOOIJ et al. 1999) weisen nach den Ergebnissen für die mittleren Richtungen aus, daß der Seegang vor dem Elisabethgroden-Deich von einem von der Nordsee über das Seegat Harle dorthin einschwingenden System dominiert wird (Abb. 5.26a). Hieraus ist aber nicht abzuleiten, daß auf den Watten keine Überlagerungen mit sekundären und tertiären Teilsystemen erfolgen, die dorthin vom Seegat Blaue Balje schwingen oder als lokale Windsee angeregt werden. Auffallend -wenngleich in Einklang mit früheren Seegangsuntersuchungen an der ostfriesischen Küste (NIEMEYER 1983, 1984, 1991)- ist die Gegebenheit, daß sowohl in Seegatnähe als auch auf den festlandsnahen Watten deutliche Diskrepanzen zwischen Wind- und Seegangsrichtungen auftreten (Abb. 5.26a). Im Vorfeld des Elisabethgroden-Deich sind die Wellenrichtungen weitgehend gleichgerichtet mit nur noch sehr geringen Unterschieden.

Die signifikanten Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet nehmen von der offenen See bis zum Seegat Harle erheblich ab (Abb. 5.26a). Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für das Seegat Blaue Balje. Ursache hierfür ist die enorme, für ostfriesische Seegaten in dieser Ausprägung charakteristische Energieumwandlung des Seegangs auf den vor-

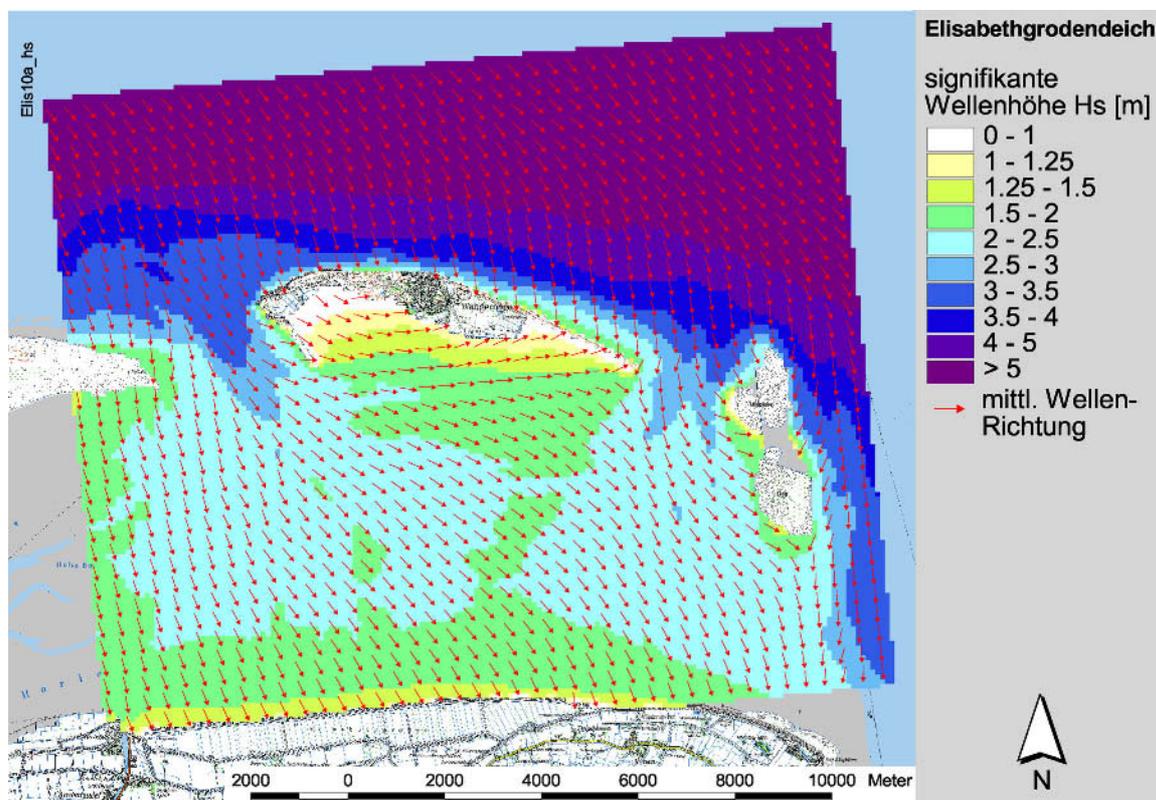


Abb. 5.26a: Signifikante Wellenhöhen  $H_s$  für das See- und Wattengebiet vor dem Elisabethgroden-Deich (SWAN-Modellierung mit Gitternetz 100 x 100 m)

gelagerten Riffbögen. Dieser Effekt ist sowohl durch Naturmessungen in den Bereichen des Norderneyer Seegats (NIEMEYER 1983, 1987) und der Otzumer Balje (NIEMEYER & KAISER 1994, 1998) als auch mit mathematischen Modellierungen (NIEMEYER et al. 1995; 1997; NIEMEYER & KAISER 1998) nachgewiesen. Zwar liegen für das Gebiet der Harle keine vergleichbaren Naturmessungen vor, doch läßt sich aus der Analogie der morphodynamischen Strukturierung zu den beiden bisher untersuchten Riffbogen-See-gat-Systemen die Stimmigkeit der Modellergebnisse ableiten.

Die Abnahme der Wellenhöhen bei der Ausbreitung auf den Watten erfolgt hingegen allmählicher (Abb. 5.26a + 5.26b). Zum einen sind hier die Variationen der morphologischen Formen weniger diskontinuierlich als im Bereich der Riffbögen von Harle und Blauer Balje. Wellen- und Wathöhen bilden zunehmend ein morphodynamisches Gleichgewicht (NIEMEYER 1983, 1984, 1991) aus, das auf dem Watt und Heller vor dem Elisabethgroden-Deich zu nahezu gleich großen signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  führt (Abb. 5.26b). Sie liegen in einer Entfernung von etwa 50 Metern seawärts des Deiches in einer Größenordnung von

$$1,25 \text{ m} < H_s < 1,50 \text{ m}.$$

Die weitgehende Gleichförmigkeit der Wellenhöhen setzt aber bereits in größerer Entfernung von der Deichlinie ein (Abb. 5.26b): Etwa 1 Kilometer seawärts der Deichlinie hat das morphodynamische Gleichgewicht zu einer engen Bandbreite der signifikanten Wellenhöhen von

$$1,75 \text{ m} < H_s < 2,00 \text{ m}$$

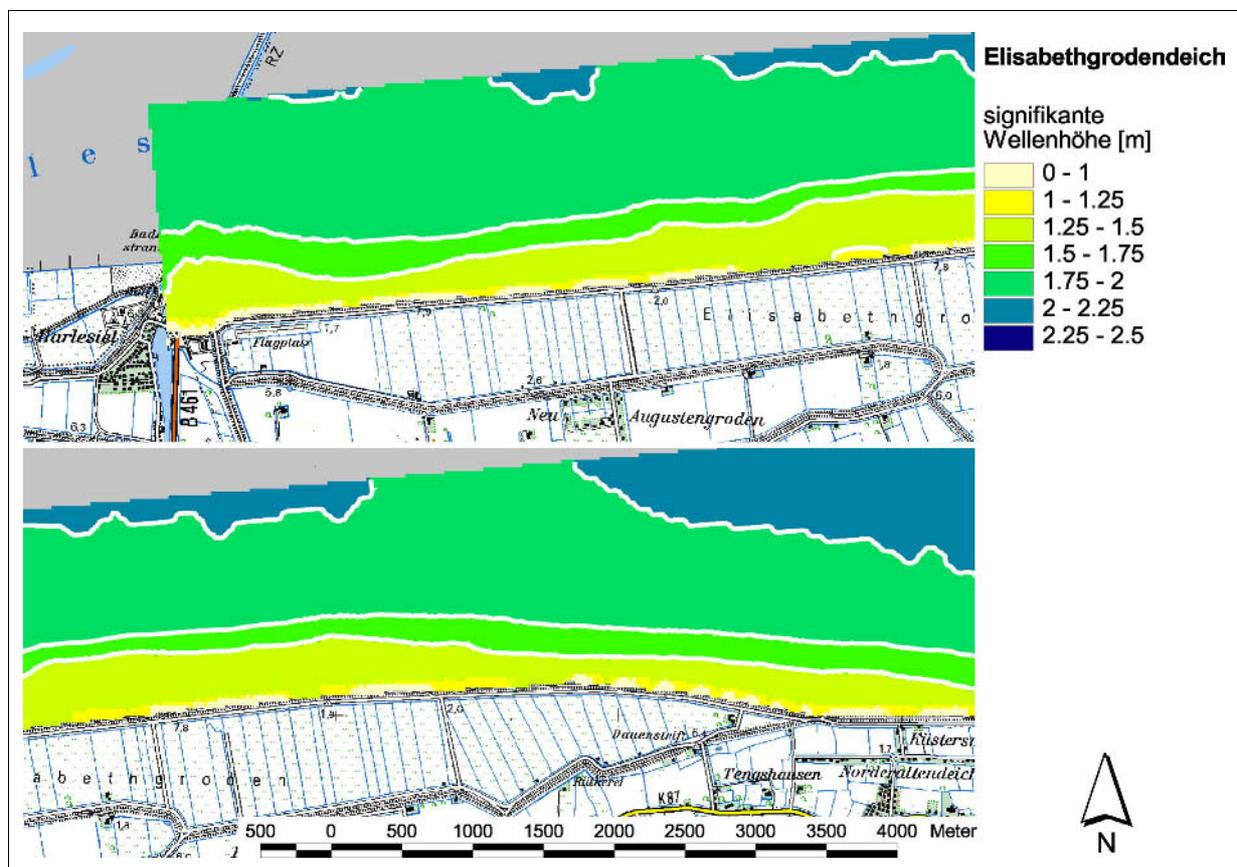


Abb. 5.26b: Signifikante Wellenhöhen  $H_s$  für den Watten- und Hellerbereich vor dem Elisabethgroden-Deich (SWAN-Modellierung mit Gitternetz 50 x 50 m)

geführt, die dann bei allmählicher Abnahme der Wellenhöhen bis in das unmittelbare Deichvorfeld bestehen bleibt. Im Detail wird erkennbar, daß die Wellenhöhen im Deichvorfeld in west-östlicher Richtung erst leicht ab- und dann vorübergehend wieder leicht zunehmen. Während die anfängliche Abnahme mit der Lage zum Seegat Harle zu erklären ist, können die erneuten Zunahmen in östlicher Richtung auf Überlagerungen mit sekundären und tertiären Teilsystemen aus der Blauen Balje und örtlicher Windwirkung zurückgeführt werden.

In Einklang mit den klassischen Brecherkriterien für Flachwasser (MC COWAN 1894; MICHE 1944) ist dabei eine signifikante seegangsdämpfende Wirkung des Vorlandes, wie sie angenommen worden ist (FÜHRBÖTER 1974; ERCHINGER 1977), nicht erkennbar. Auch hier stehen die Ergebnisse der Modellierungen in Einklang mit Naturmessungen von Wattseegang auf Watten vor Uithuizen, im Bereich der Leybucht und im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats (NIEMEYER 1983, 1984, 1991) sowie mathematischen Modellierungen (NIEMEYER et al. 2000; NIEMEYER & KAISER 2001).

Die Perioden des Energiedichtemaximums  $T_p$  verkürzen sich analog zu den Wellenhöhen beim Einschwingen vom Küstenvorfeld auf das Watt (Abb. 5.27a). Dort finden dann keine erheblichen Veränderungen mehr statt; die Werte nähern sich umso mehr aneinander an, je näher der Seegang an die Festlandsküste gelangt. Vor dem Elisabethgroden-Deich treten daher nur einheitliche Werte von  $T_p$  auf (Abb. 5.27b). Hieran wird deutlich, daß ein Seegangssystem hier dominant ist. Die sekundären und tertiären Systeme aus dem Seegat Blaue Balje und örtlicher Windsee überlagern hier zwar den Seegang aus der Harle; sie haben aber wegen ihrer Nachrangigkeit gegenüber dem primären System keinen Einfluß auf die Lage des Energiedichtemaximums im Frequenzbereich und dessen Periode.

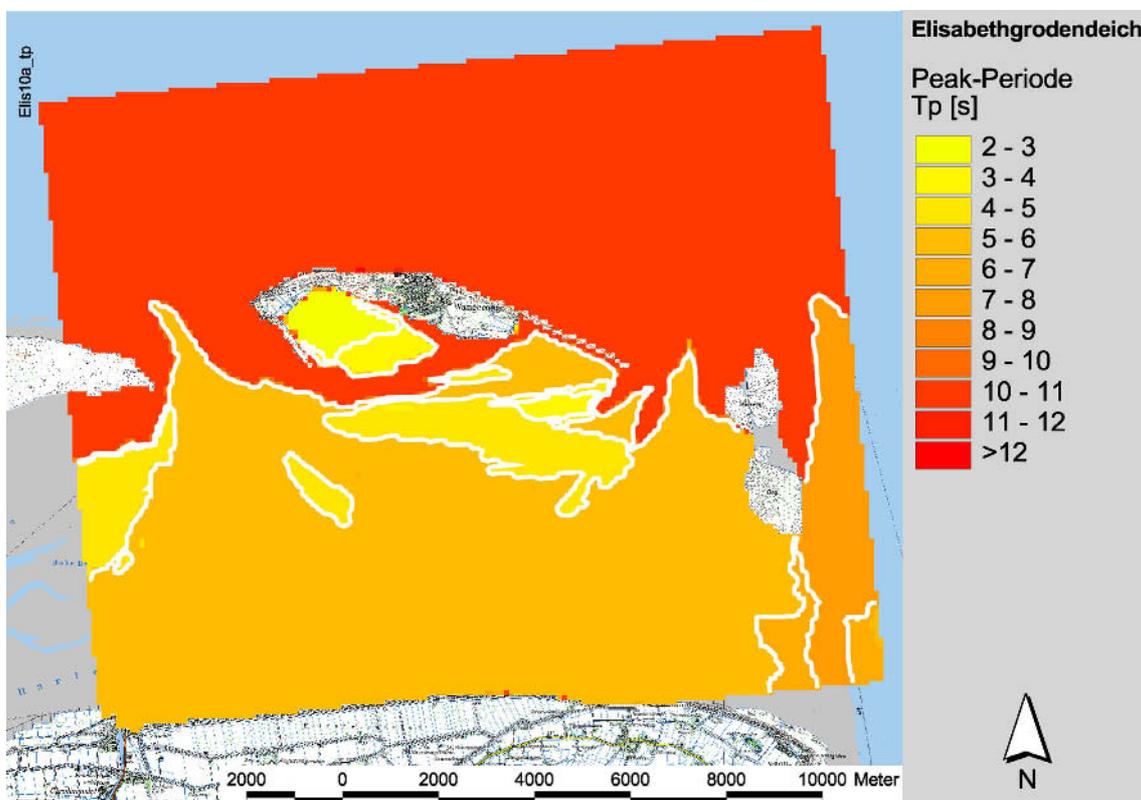


Abb. 5.27a: Perioden des Energiedichtemaximums  $T_p$  im See- und Wattengebiet vor dem Elisabethgroden-Deich (SWAN-Modellierung mit Gitternetz 100 x 100 m)

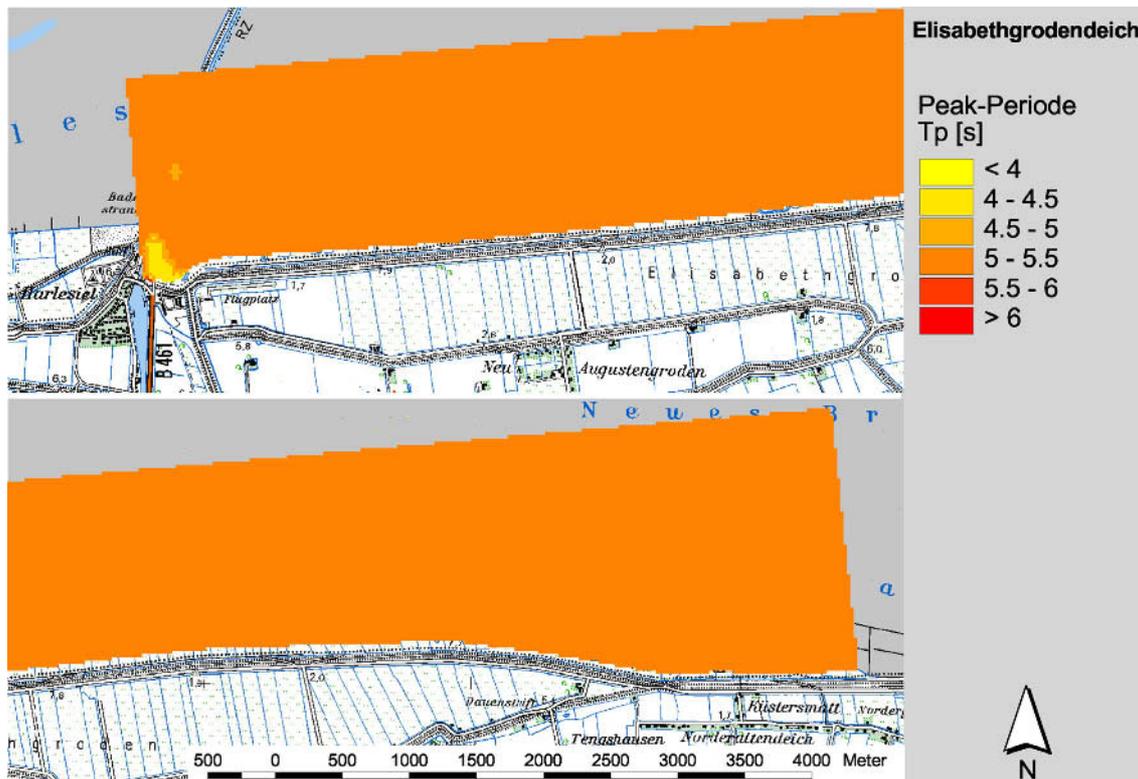


Abb. 5.27b: Perioden des Energiedichtemaximums  $T_p$  für den Watten- und Hellerbereich vor dem Elisabethgroden-Deich (SWAN-Modellierung mit Gitternetz 50 x 50 m)

## 5.4 Offene Festlandsküste

### 5.4.1 Vorgehensweise

Im gesamten Gebiet wird die Reproduktion der Topographie mit einer räumlichen Auflösung von 160 x 160 m vorgenommen; im Nahbereich der Dithmarscher Bucht wird sie für ein eingebettetes Teilmodell auf 80 x 80 m verfeinert (Abb. 5.28).

Die Morphologie setzt sich zusammen aus Daten vom BSH (1996, 1997, 1995), aus Daten vom ALR-Husum (1994, 1995) und aus digitalisierten Wattgrundkarten des Jahres 1990.

Das äußere Modell wird durch die Eingabe eines 2-dimensionalen Seegangsspektrums aus Naturmessungen oder Vorgabe parametrischer Seegangsspektren gesteuert, das konstant für den gesamten westlichen Rand gilt (SCHULZ et al. 2002). Am nördlichen und südlichen Rand werden parametrisierte 1-dimensionale Wellenspektren eingesteuert. Diese Spektren sind Ergebnisse eines vorweg ausgeführten 1-dimensionalen SWAN-Laufes am nördlichen bzw. südlichen Modellrand mit dem 2-dimensionalen Spektrum als Randbedingung.

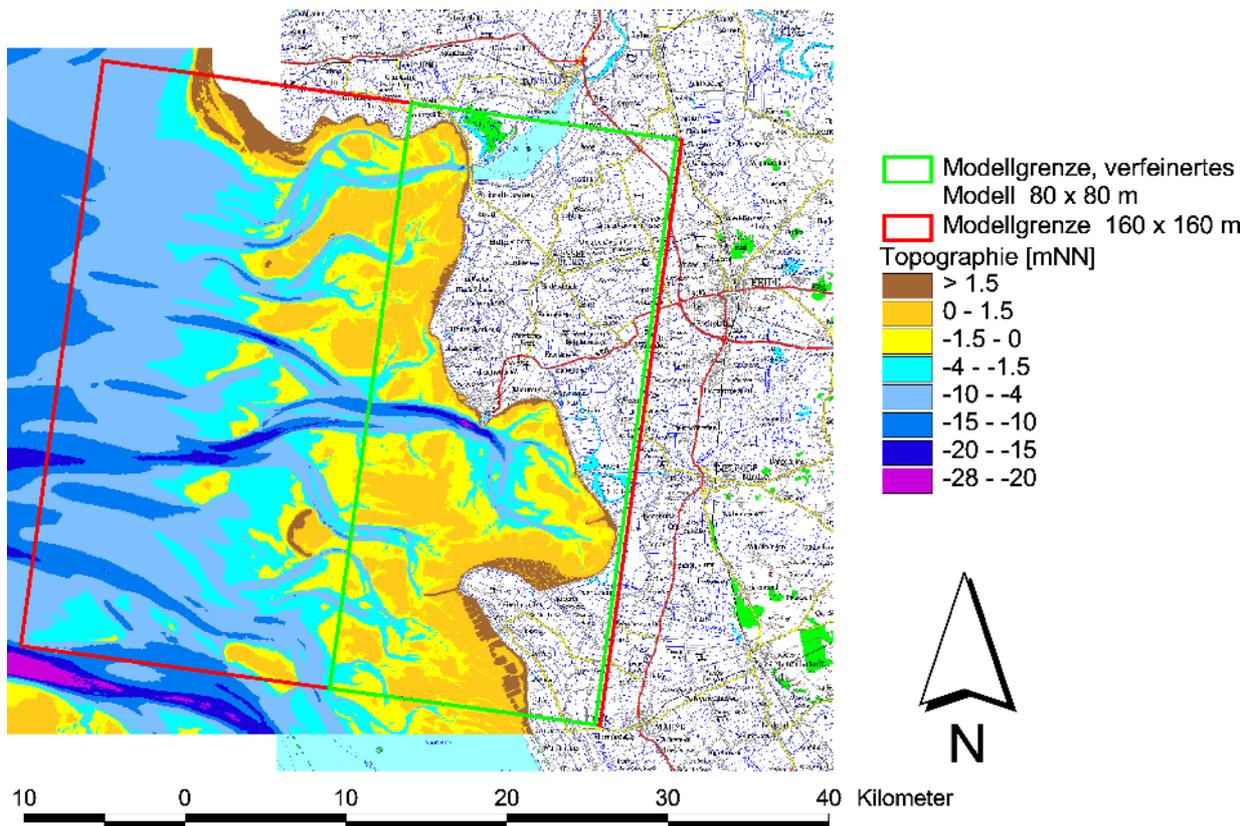


Abb. 5.28: Topographie, Modellgrenze und Grenze des verfeinerten Modells

#### 5.4.2 Randbedingungen

Die Wasserstände wurden für das Modellgebiet in Anlehnung an die gültigen Bemessungswasserstände mit

**NN + 5,6 m** für Büsum

**NN + 5,8 m** für Speicherkoog Dithmarschen

angesetzt. Bis zum seeseitigen Modellrand wurde ein Gefälle von 0,1 m angenommen.

Als entsprechende Windgeschwindigkeit und -richtung wurden

**$u = 30 \text{ m/s}$**

**$R = 270^\circ$**

angesetzt.

Für die Modellierung des Seegangs mit dem Modell SWAN wurden unterschiedliche Szenarien als seeseitige Randbedingungen vorgegeben:

- **JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10 \text{ m}$ ;  $T_p = 15 \text{ s}$**
- **gemessenes Naturspektrum mit  $H_s = 6 \text{ m}$ ;  $T_p = 14 \text{ s}$ ;  $T_M = 10 \text{ s}$**

Das Naturspektrum (Abb. 5.4) wurde vor Norderney gemessen. Um es als Randbedingung für die Modellierung des Seegangs in der Dithmarscher Bucht einsetzen zu können mußte es entsprechend der natürlichen Gegebenheiten für die Ausbildung schwerer Sturmfluten modifiziert werden. Als Ergebnis ergibt sich ein hinsichtlich der Richtungen modifiziertes Spektrum (Abb. 5.29).

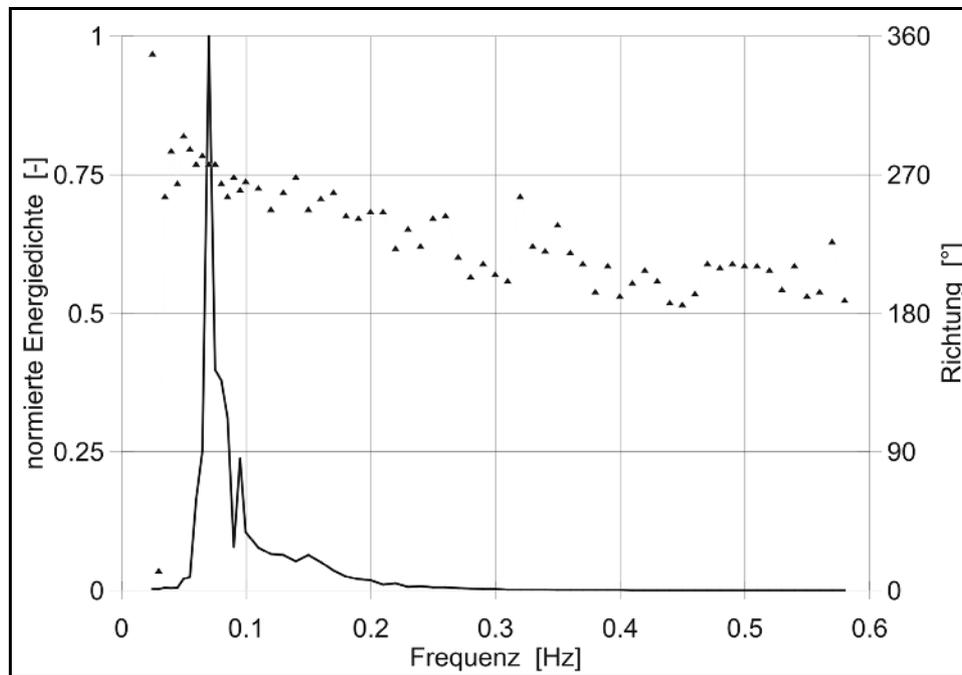


Abb. 5.29: Naturspektrum mit modifizierten Wellenrichtungen

### 5.4.3 Ergebnisse der Seegangmodellierung

Die spektralen signifikanten Wellenhöhen nehmen von der offenen See bis zur Küste Dithmarschens und der Dithmarscher Bucht erheblich aber nicht stetig ab (Abb. 5.30, 5.31). In einer Entfernung von 500m von der Deichlinie lassen sich im gesamten Modell-

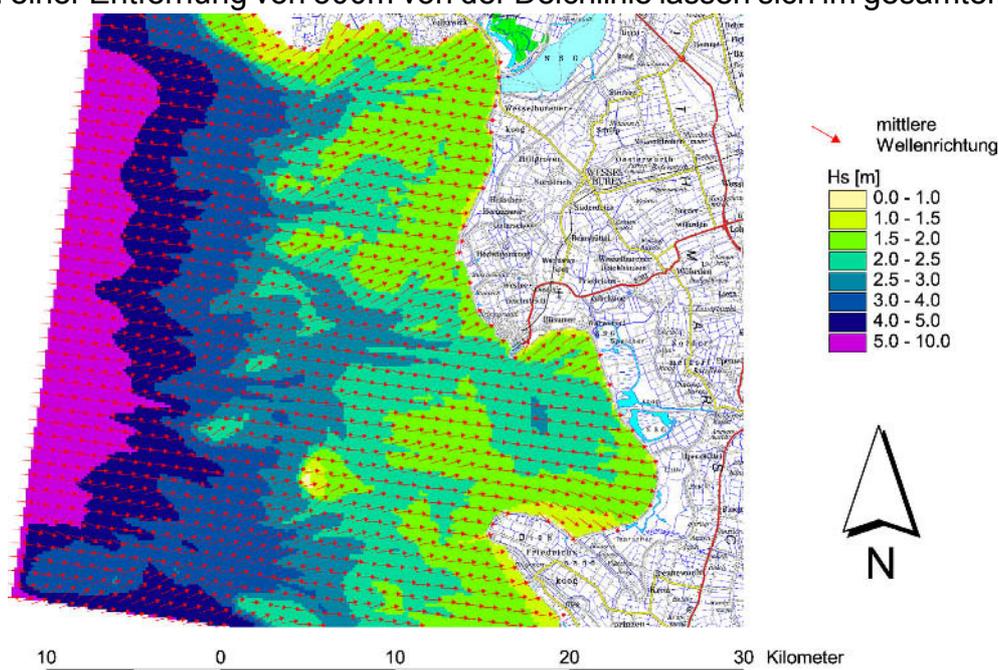


Abb. 5.30: Spektrale signifikante Wellenhöhe im gesamten Modellgebiet (Randbed.: Jonswap 1015 270)

gebiet keine Wellenhöhen von mehr als 2,50 m ausmachen. Der Grund für die Unstetigkeit in der Abnahme der Wellenhöhen ist in der stark gegliederten Topographie zu suchen. Der Küste vorgelagert sind Sände, die infolge Brechen zur Abnahme der Wellenhöhen führen.

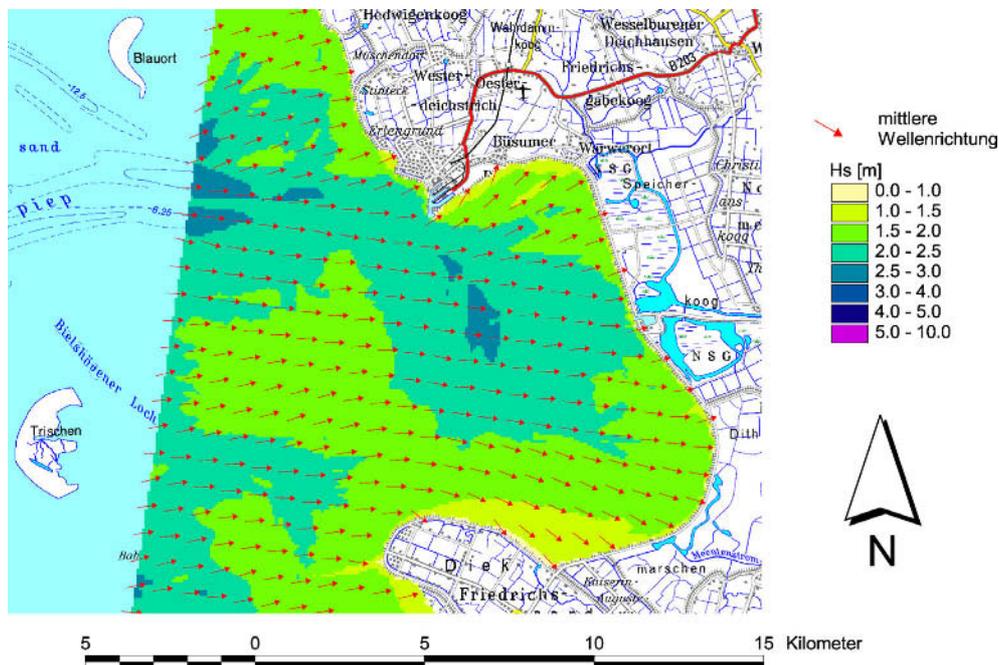


Abb. 5.31: Spektrale signifikante Wellenhöhe im verfeinerten Modellgebiet (Randbed.: Jonswap 1015 270)

Ähnlich wie die Wellenhöhen nimmt die Energieperiode von der See zur Küste hin ab. Auch hier ist eine Unstetigkeit der Abnahme zu erkennen. Es wird deutlich, dass die Energiedissipation nicht nur zu verminderten Wellenhöhen führt, sondern auch zu deutlich kürzeren Perioden (Abb. 5.32 + 5.33).

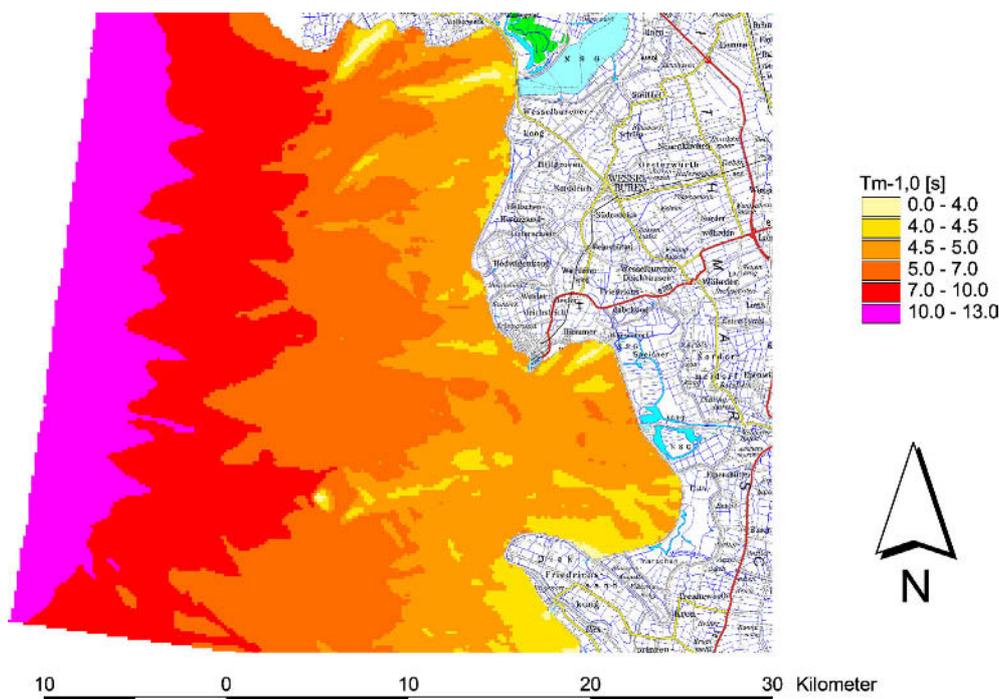


Abb. 5.32: Energieperiode  $T_{m-1,0}$  im gesamten Modellgebiet (Randbed.: Jonswap 1015 270)

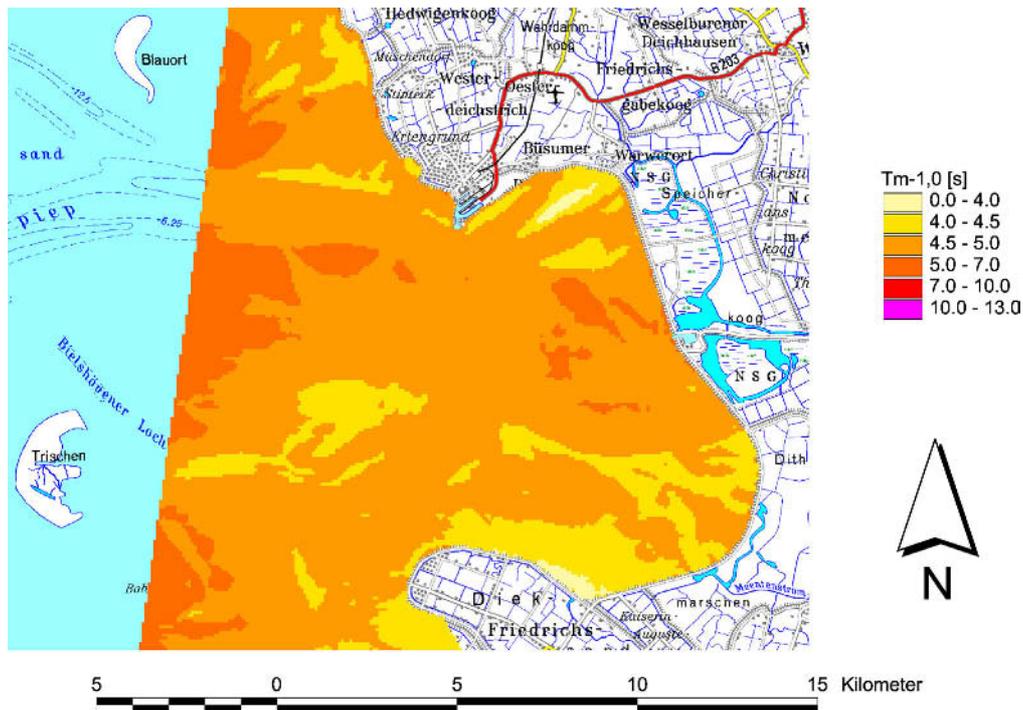


Abb. 5.33: Energieperiode  $T_{m-1,0}$  im verfeinerten Modellgebiet (Randbed.: Jonswap 1015 270)

Für den im Bereich inselgeschützter Watten liegenden Untersuchungsbereich Elisabethgroden ist eine morphologisch bedingte Filterung des vom Küstenvorfeld einschwindenden Seegangs festgestellt worden: trotz dort herrschender deutlicher Unterschiede tritt vor den Deichen nahezu gleichartiger Seegang auf. Es stellt sich für das Untersuchungsgebiet Dithmarscher Bucht von daher die Frage, ob und inwieweit dieser Effekt auch auf offenen Watten eintritt.

Entsprechende Vergleiche weisen aus, dass der Effekt auf offenen Watten sogar noch etwas stärker ausgeprägt ist als auf inselgeschützten und zwar sowohl für die Wellenhöhen (Abb. 5.25a + 5.34a) als auch für die Perioden (Abb. 5.25b + 5.34b). Es ist anzunehmen, dass die stärkere morphologische Filterung des Seegangs auf offenen Watten auf die dort längere, vom Seegang bis an die Deiche zurückzulegenden Laufstrecke zurückzuführen ist.

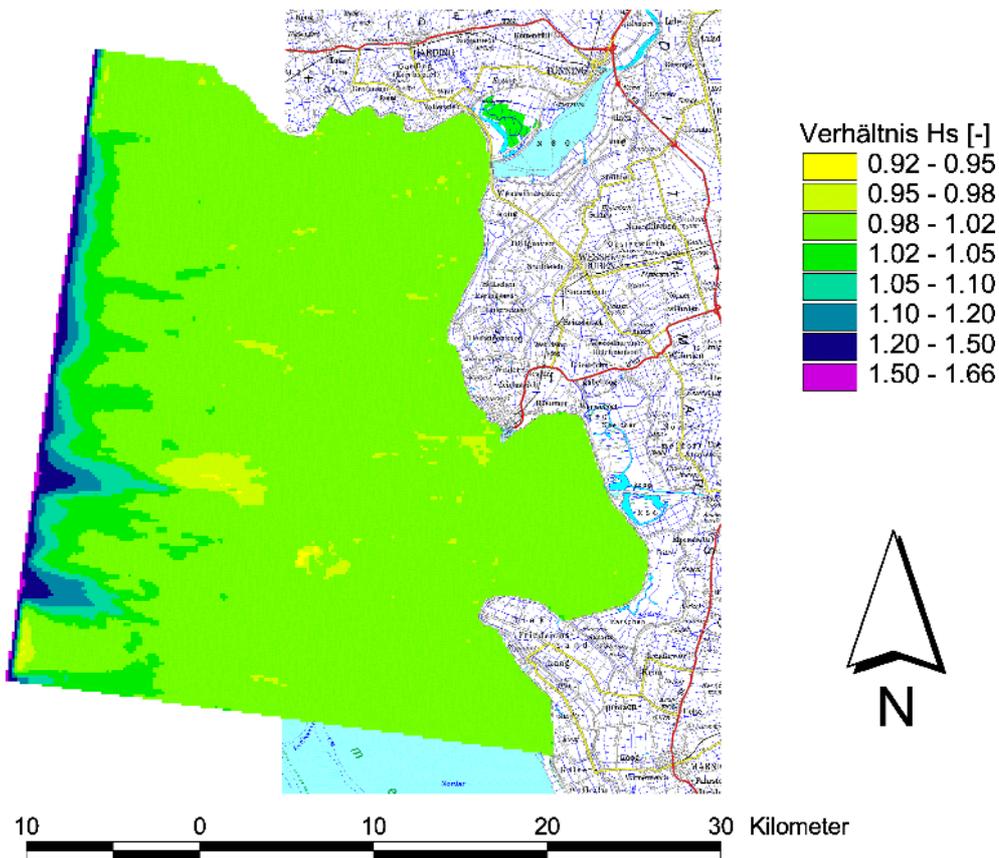


Abb. 5.34a: Verhältniszerte der Modellergebnisse für die signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  mit unterschiedlichen Randbedingungen im Seegebiet

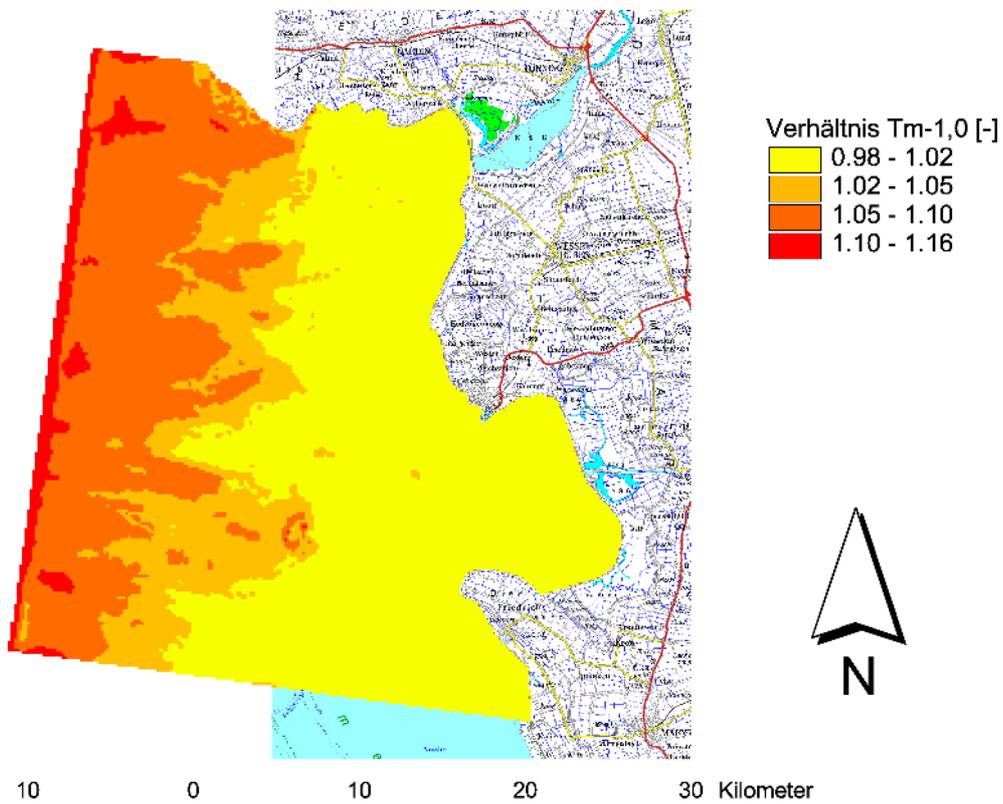


Abb. 5.34b: Verhältniszerte der Modellergebnisse für die Perioden der Energiedichte  $T_{m-1,0}$  mit unterschiedlichen Randbedingungen im Seegebiet

## **6 Effekte morphologischer Variabilität**

### **6.1 Riffbögen**

#### **6.1.1 Problemstellung**

Exemplarische Modellierungen der Seegangsausbreitung vom Küstenvorfeld in den Vorstrand- und Strandbereich der Insel Norderney haben in Übereinstimmung mit Naturmessungen gezeigt, daß morphologische Änderungen im Bereich des Riffbogens nachhaltige Auswirkungen auf das lokale Seegangsklima haben können (NIEMEYER & KAISER 1997).

Maßgebend für die Ausprägungen des Seegangs im Vorstrand- und Strandbereich, und damit für die Belastung der Bauwerke dort, sind neben dem erzeugenden Wind im Seegebiet die Wechselwirkungen des Seegangs mit den morphologischen Großformen beim Einschwingen aus dem Küstenvorfeld. Der Riffbogen des Norderneyer Seegats (Abb 4.1) führt zu einem den küstenparallelen Sedimenttransport um die Strände des westlichen Inseldrittels von Norderney herum und zum anderen bewirkt er eine erheblichen Energieumwandlung des Seegangs. Hierdurch übt er eine beschirmende Wirkung für die Strände in diesem Bereich der Insel aus (NIEMEYER 1983, 1986, 1987). Nachhaltige Änderungen dieser morphologischen Großform führen zu einem erheblich veränderten Seegangsklima auf dem nordwestlichen Vorstrand, zu einer veränderten Energieumwandlung auf Vorstrand und Strand und somit zu einer veränderten Belastung der dortigen Bauwerke. Für eine Einschätzung der Standsicherheit der Bauwerke ist deshalb zu prüfen, ob sich die Ausbreitungsbedingungen und Energiedissipation des Seegangs infolge morphologischer Änderungen im Riffbogenbereich signifikant ändern. Dabei ist die Frage nach der zukünftigen Entwicklung und deren Auswirkung zu beantworten. Es ist weiterhin zu prüfen, ob sich die Änderung der Seegangsausbreitung durch Umformung des Riffbogens bis zu den Festlandsdeichen auswirkt.

#### **6.1.2 Änderung des lokalen Seegangsklimas seit 1960**

##### **6.1.2.1 Änderungen der Morphologie des Riffbogens seit 1960**

Die topographischen Grundlagen hierfür bilden einerseits die Aufnahmen aus diesem Bereich von 1990 und 1995, die mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems erfasst und analysiert wurden. 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.

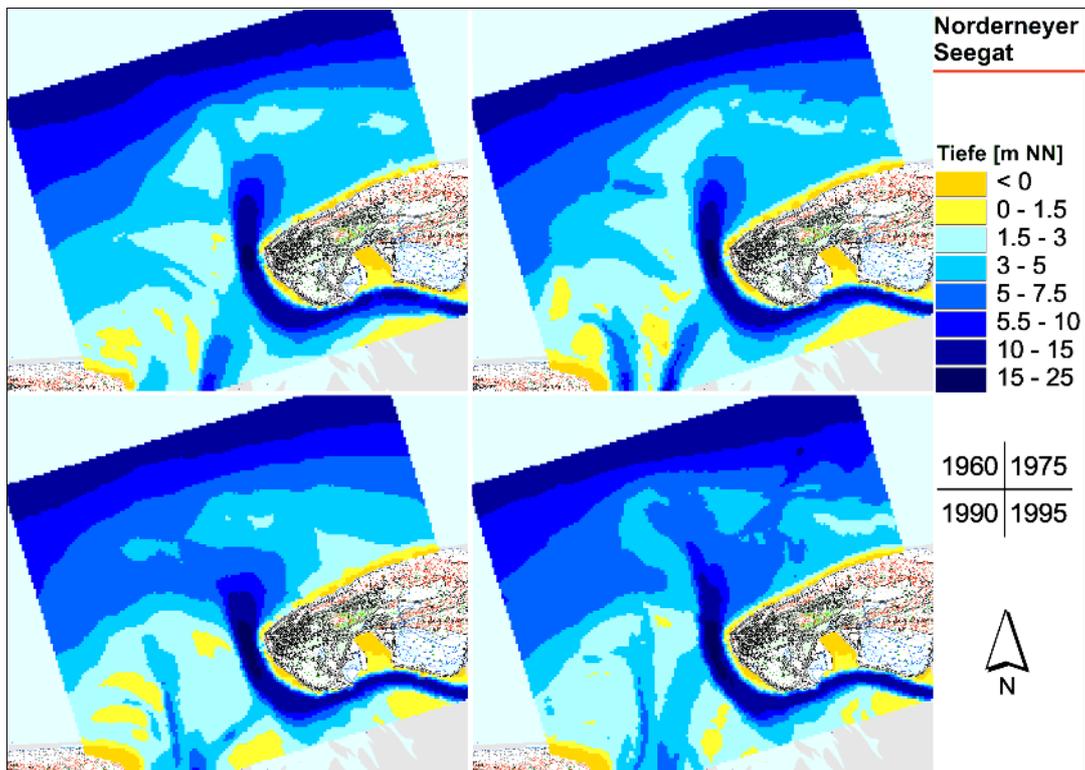


Abb. 6.1: Topographie des Untersuchungsgebietes mit Riffbogen für die Situationen 1960, 1975, 1990 und 1995 (Tiefen bezogen auf NN)

Ein Vergleich der vier Momentaufnahmen der Morphologie des Riffbogens (Abb. 6.1) zeigt die signifikanten Änderungen deutlich auf. In den Jahren 1960 ist der Riffbogen deutlich ausgebildet und füllt sich bezogen auf die NN-3m-Linie im Bereich des Schluchter sogar noch auf. Allerdings ist 1975 im äußeren Verlauf des Schluchter schon der Beginn einer Eintiefung zu erkennen, die sich bis zum Jahr 1990 erheblich verstärkt. In der Morphologie von 1990 ist dort die als Basis des Riffbogens anzusehende NN-5m-Tiefenlinie (LÜDERS & LUCK 1976) von einer breiten Rinne unterbrochen. Bis zum Jahr 1995 schwenkt der Rinnenverlauf in Richtung Nord, wobei sich die bereits 1990 erkennbare Zweiteilung verstärkt. Diese morphologischen Änderungen ermöglichen das Einschwingen energiereicheren Seegangs in den Vorstrandbereich Norderneys.

### 6.1.2.2 Modellergebnisse für eine Normaltide mit erhöhtem Seegang

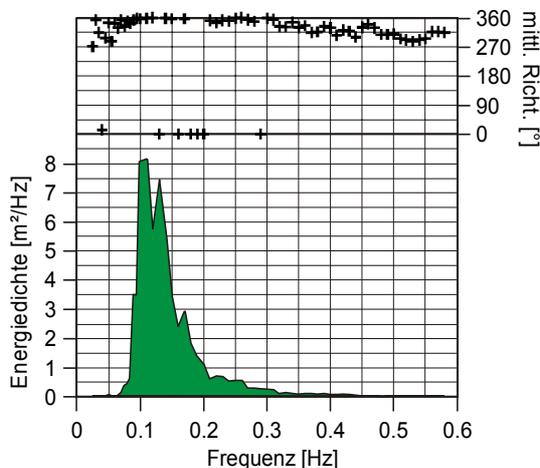


Abb. 6.2: Gemessenes Spektrum an der Pos. 'See' am 17.11.1995, 05:00

Die Seegangmodellierung wurde mit SWAN für zwei typische Situationen durchgeführt. Exemplarisch für eine 'Normal'-Tide wurde der 17.11.1995 ausgewählt, an dem um 5 Uhr folgende Randbedingungen aufgezeichnet wurden. An der Position 'See' wurde ein Seegang mit einer spektralen signifikanten Wellenhöhe von 2,98m und einer Peakperiode von 6,4 s gemessen (Spektrum in Abb. 6.2). Der Wasserspiegel lag zu dieser Zeit bei NN+1,42m, der Wind kam mit 8.2m/s aus 344°. Die Modellergebnisse zeigen deutlich das verstärkte Einschwingen energiereichen Seegangs in den Vorstrandbereich. Im Vergleich der Situationen

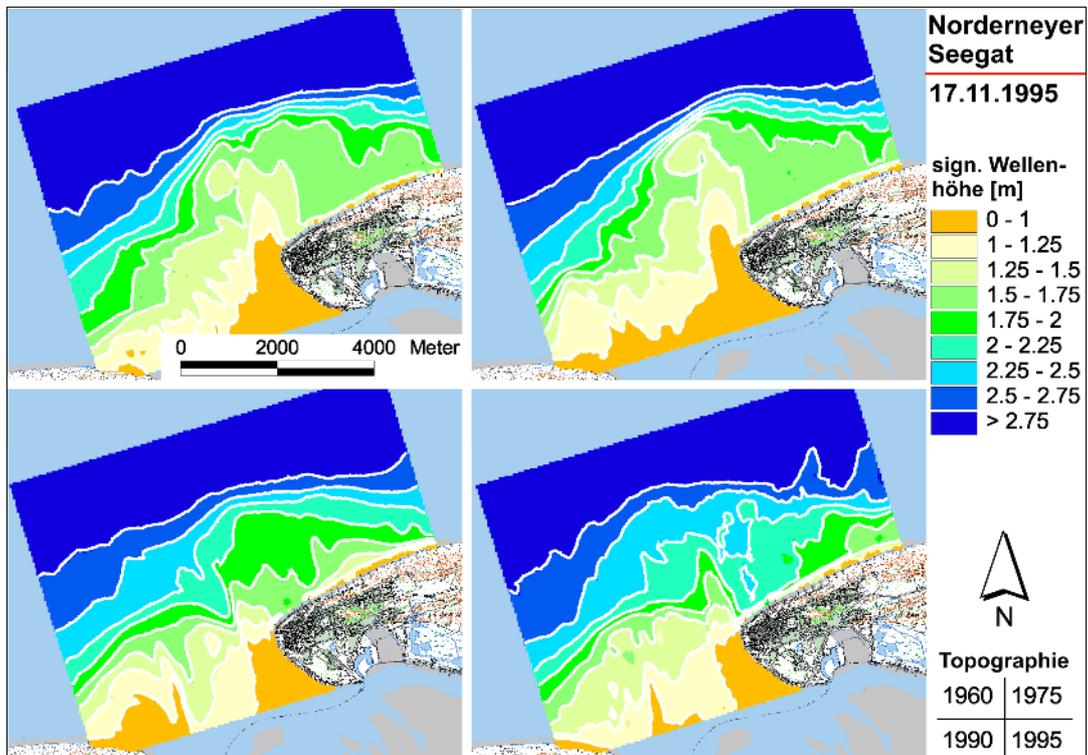


Abb. 6.3: Signifikante Wellenhöhen im Seegat von Norderney für die Topographie von 1960, 1975, 1990, und 1995 mit den Randbedingungen vom 17.11.1995, 5 Uhr

von 1960 und 1975 lassen sich keine signifikanten Änderungen erkennen (Abb. 6.3). Aber die Änderungen in der Morphologie zwischen 1975 und 1990 führen zu einem Eindringen höheren Seegangs mit signifikanten Wellenhöhen zwischen 1,75m und 2,00m über den Riffbogen bis in den Vorstrandbereich. Für die Situation von 1995

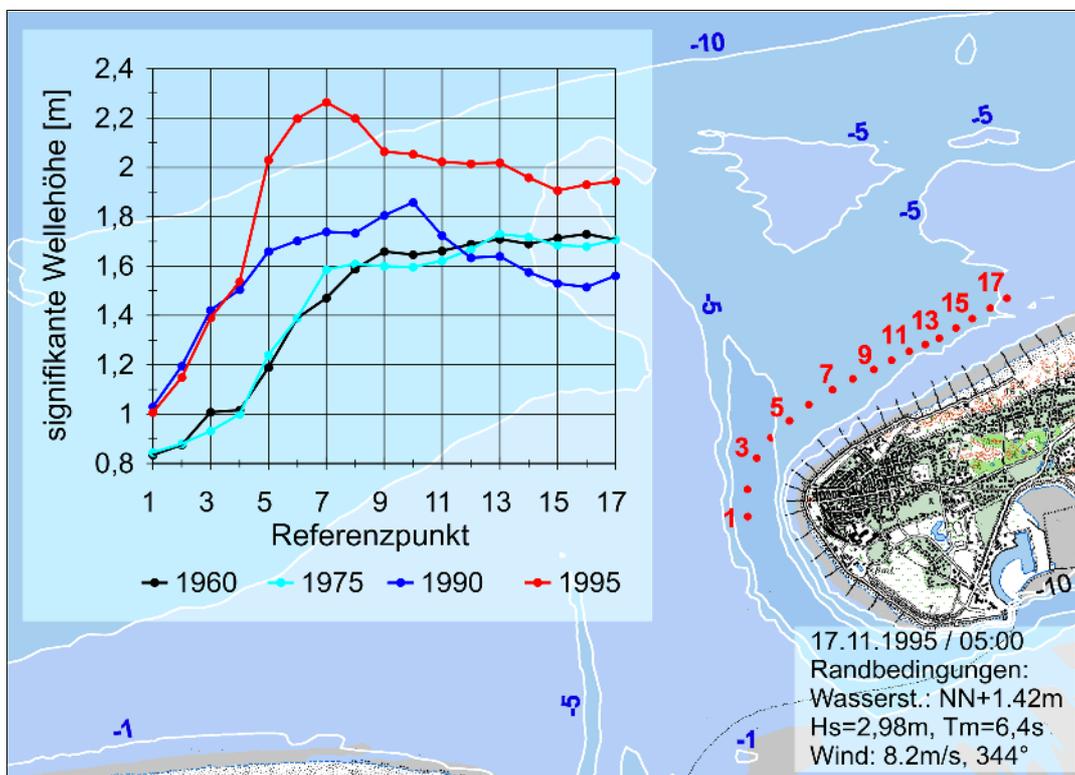


Abb. 6.4: Signifikante Wellenhöhen an den Referenzpunkte für die unterschiedlichen Topographien der Jahre 1960, 1975, 1990, 1995 mit den Randbed. vom 17.11.1995, 05:00

zeigen sich signifikante Wellenhöhen mit  $H_s > 2,00$  m entlang des gesamten Vorstrandbereichs des Nordweststrands von Norderney. Diese Entwicklung konnte auch durch Naturmessungen bestätigt werden.

Um die Auswirkungen der Änderungen des lokalen Seegangsklimas und deren Auswirkung auf Strand und Bauwerke des Nordweststrands zu verdeutlichen, wurden an 17 ausgewählten Punkte im Vorstrandbereich parallel zum Strand die signifikanten Wellenhöhen der vier morphologischen Aufnahmen verglichen (Abb. 6.4). Auch hier zeigt sich wie in der flächenhaften Darstellung (Abb. 6.3), dass die Zustände von 1960 und 1975 keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Für 1990 ergibt sich im westlichen Bereich eine deutliche Erhöhung der signifikanten Wellenhöhe um ca. 20 bis 40%, während ganz im Osten des betrachteten Gebietes eine leichte Abnahme der Wellenhöhe festzustellen ist. Im Jahr 1995 treten in der tiefen Rinne des Norderneyer Seegats nahezu die gleichen Wellenhöhen auf wie 1990, während östlich davon (ab Punkt 5) die Wellenhöhen nochmals signifikant ansteigen. Im zentralen Bereich (Punkt 7) ist damit ein Anstieg der Wellenhöhen von 70% im Vergleich zur Situation von 1960 zu verzeichnen.

### 6.1.2.3 Modellergebnisse für eine Sturmflut

Kennzeichnend für eine Sturmsituation ist die Messung vom 10.01.1995 um 5 Uhr mit einem Wasserstand von NN+3,46m (entsprechend 2,3m über MTHw), einer signifikanten Wellenhöhe von  $H_s=6.41$ m und einer Peakperiode von 11,1s an der Station 'See' (Abb. 6.5). Der Wind kam mit einer Geschwindigkeit von 22m/s aus  $295^\circ$ . Genauso wie bei der 'Normal'-Tide zeigen sich bei einem flächenhaften Vergleich der Seegangsausbreitung für die Sturmflut nur geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen für die Topographien von 1960 und 1975 (Abb. 6.6). Mit der Topographie von 1990 ist höherer Seegang im Vorstrandbereich mit  $2,5\text{m} < H_s < 2,75\text{m}$  festzustellen. Auch in den Rinnenbereich des Norderneyer Seegats schwingt höherer Seegang insbesondere aus dem Schluchter ein. Durch die weitergehende Erosion des zentralen Teils des Riffbogens bis 1995 hat dieser in seiner Funktion als Wellenbrecher für den Nordwest- und Nordstrand und die dort befindlichen Bauwerke erheblich an Wirkung eingebüßt. Seegang mit einer signifikanten Wellenhöhe von mehr als 3m erreicht dort den Vorstrand.

Bei einem Vergleich der spektralen signifikanten Wellenhöhen für die Referenzpunkte parallel zum Strand zeigt sich wie bei der Normaltide kein nennenswerter Unterschied zwischen den Situationen von 1960 und 1975. Die Wellenhöhen steigen von der tiefen Rinne bis zum Punkt 8 von 1,75m auf 2,6m an

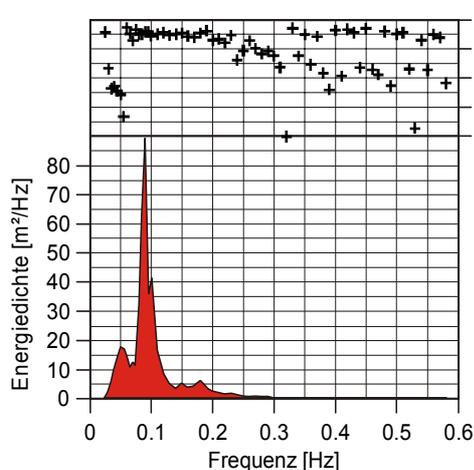


Abb. 6.5: Gemessenes Spektrum an der Pos. 'See' am 17.01.1995, 05:00

und bleiben dann im weiteren Verlauf Richtung Osten nahezu konstant (Abb. 6.7). Mit der Topographie von 1990 steigt die Wellenhöhe wesentlich schneller an (von 1,65m auf ca. 3,0m im Pkt 9) um im weiteren Verlauf sogar unter die Werte von 1960 zu sinken. Die Situation von 1995 zeigt für alle Referenzpunkte östlich vom Punkt 6 die maximalen signifikanten Wellenhöhen. Vergleicht man die Berechnungen für die Topographien von 1960 und 1995, so ist ein Anstieg der signifikanten Wellenhöhen von höchstens 25%-30% zwischen den Position 6 und 11 festzustellen. Dies ist verglichen mit den Berechnungen für die 'Normaltide' (Anstieg der

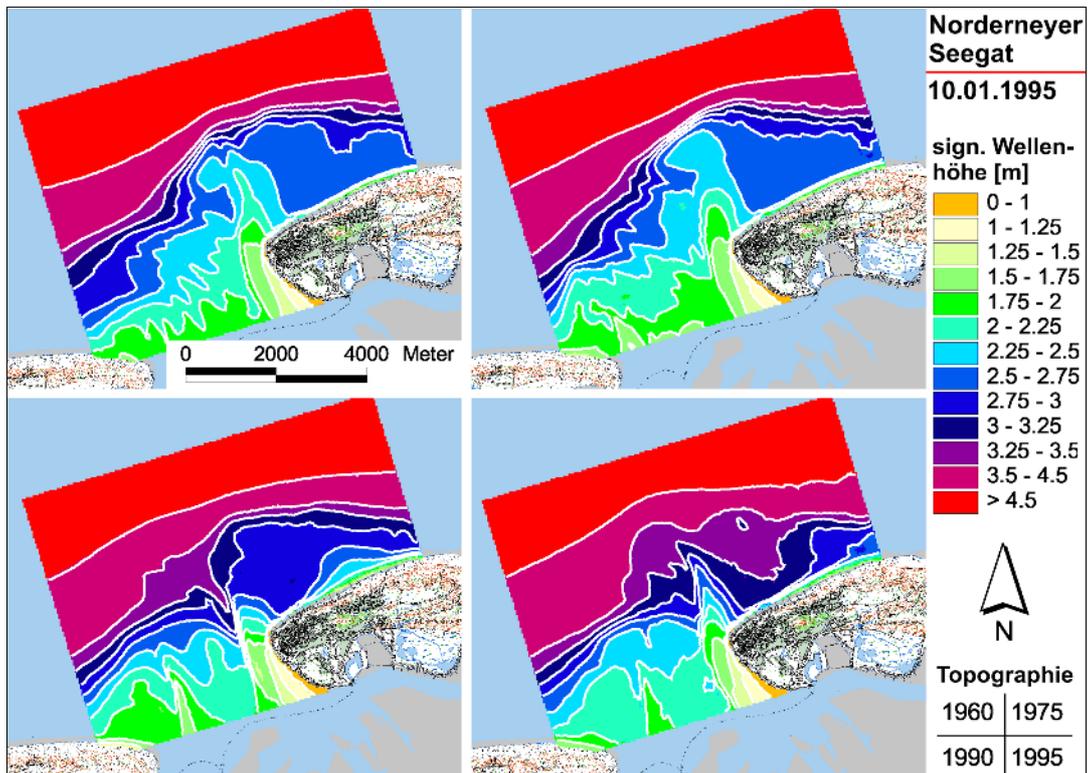


Abb. 6.6: Signifikante Wellenhöhen im Seegat von Norderney für die Topographie von 1960, 1975, 1990, und 1995 mit den Randbedingungen vom 17.11.1995, 5 Uhr

signifikanten Wellenhöhen in der Spitze von 70% Abb. 6.8) deutlich geringer. Die Auswirkungen der Änderungen des Riffbogens zwischen 1960 und 1995 sind somit für Normaltiden wesentlich gravierender. Diese lassen sich auch über die erhöhten Erosionsraten des Strands in dem betreffenden Bereich nachweisen (NIEMEYER et al. 1997).

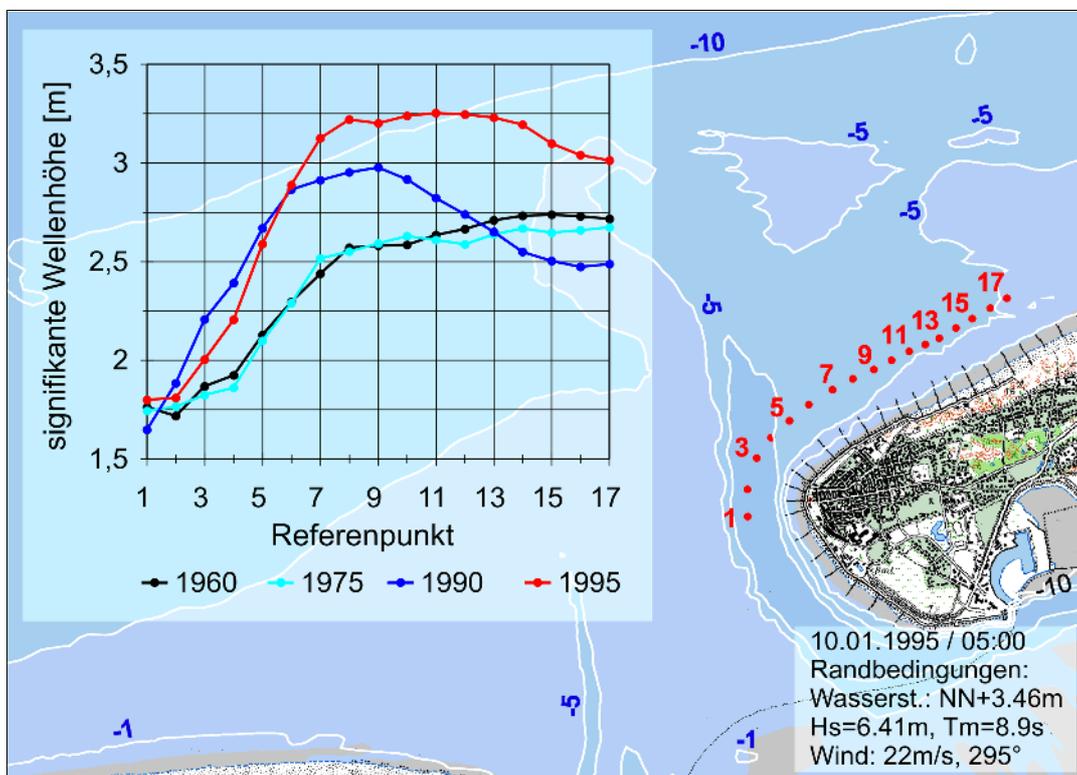


Abb. 6.7: Signifikante Wellenhöhen an den Referenzpunkten für die unterschiedlichen Topographien der Jahre 1960, 1975, 1990, 1995 mit den Randbed. vom 10.01.1995, 05:00

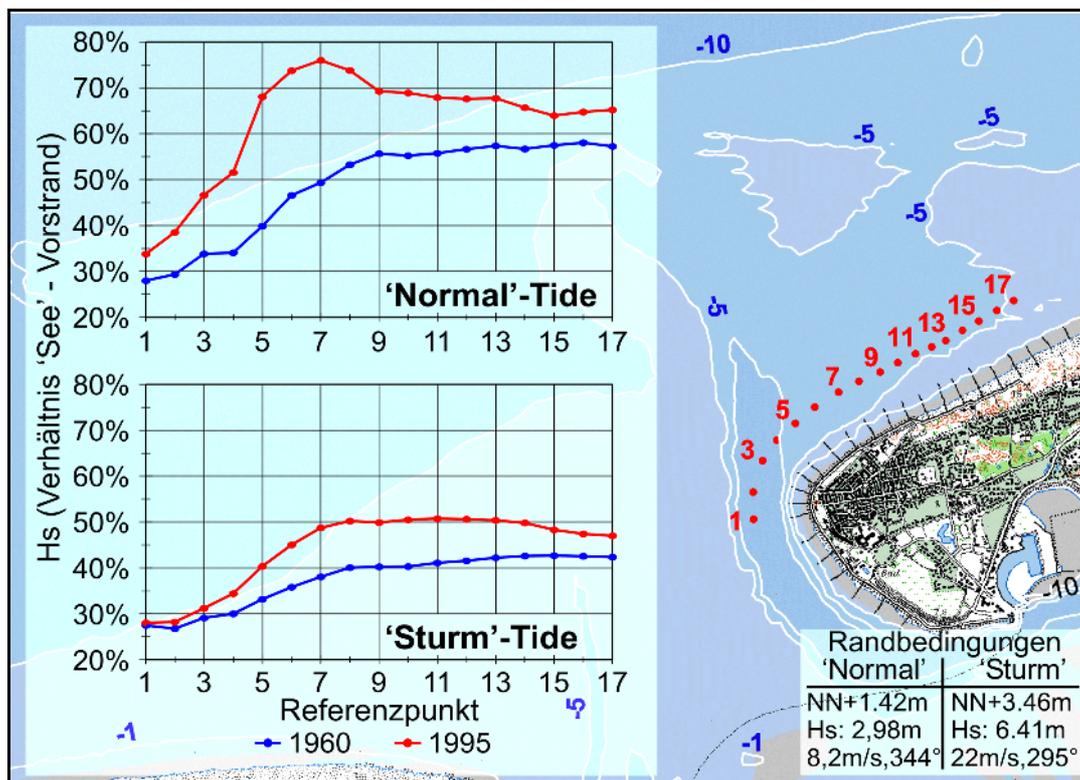


Abb. 6.8: Relative Änderung der signifikanten Wellenhöhen vom Küstenvorfeld zum Vorstrand für 'Normal'- und 'Sturm'-Tide

### 6.1.3 Aktuelle Topographie mit fiktiver Erosion im Riffbogen

#### 6.1.3.1 Problemstellung

Die für die Unterhaltung und Neubauplanung des Seewalls auf Norderney zuständige Betriebsstelle Norden befürchtete eine Zunahme der Seegangbelastung, wenn sich die hydrodynamische Wirksamkeit des Riffbogens bei fortschreitender Erosion weiter verringert, wie für die zurückliegenden Jahrzehnte erwiesen (NIEMEYER et al. 1997; NIEMEYER & KAISER 1998; KAISER & NIEMEYER 1999). Mangels begründeter Prognosen wurde zur Abschätzung möglicher derartiger Effekte eine empirisch-induktive Vorgehensweise gewählt: Für den Riffbogenbereich wurde schrittweise Szenarien einer fiktiven Platenerosion in die Modelltopographie eingebaut und anschließend deren Auswirkung auf die Seegangsdämpfung über Modellrechnungen erfaßt. Der Vorgang ist solange zu wiederholen, bis zwei aufeinanderfolgende Rechnungen keine nennenswerten Änderungen mehr erbringen. Als erstes Szenario wurde im Riffbogenbereich eine Erosion von bis zu 0,5 m so eingebaut, daß eine morphologisch realistische Topographie mit stetigen Übergängen zu den unverändert gebliebenen Bereichen entstand (Abb. 6.9). Anschließend wurde nach der gleichen Methodik eine zweite fiktive Modelltopographie erstellt, bei der eine Erosion von bis zu 0,75 m im Bereich des Riffbogens implementiert wurde (Abb. 6.10). Für diese beide Modelltopographien wurden zum Vergleich für den Wasserstand von NN + 5 m Modellrechnungen mit allen drei Seegangsszenarien als Randbedingung vorgenommen, wie sie für die der aktuellen Morphologie entsprechenden Modelltopographie bereits ausgeführt worden sind. Wesentlicher Effekt dieser Szenarien ist, daß insbesondere die Abschirmung gegen die Haupteinschwingrichtung des Seegangs im Bereich des Mündungsarms Schlucher des Norderneyer Seegats (Abb. 5.1) vermindert wird (Abb. 6.9 + 6.10).

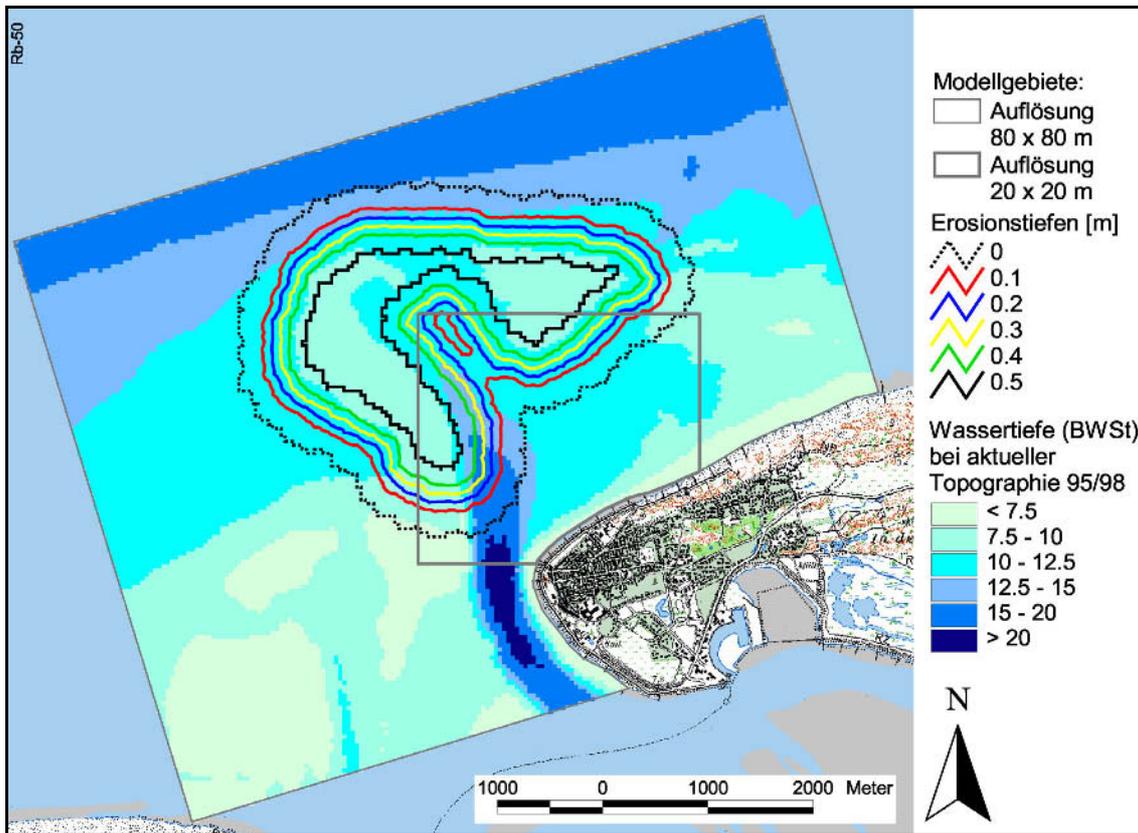


Abb. 6.9: Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation

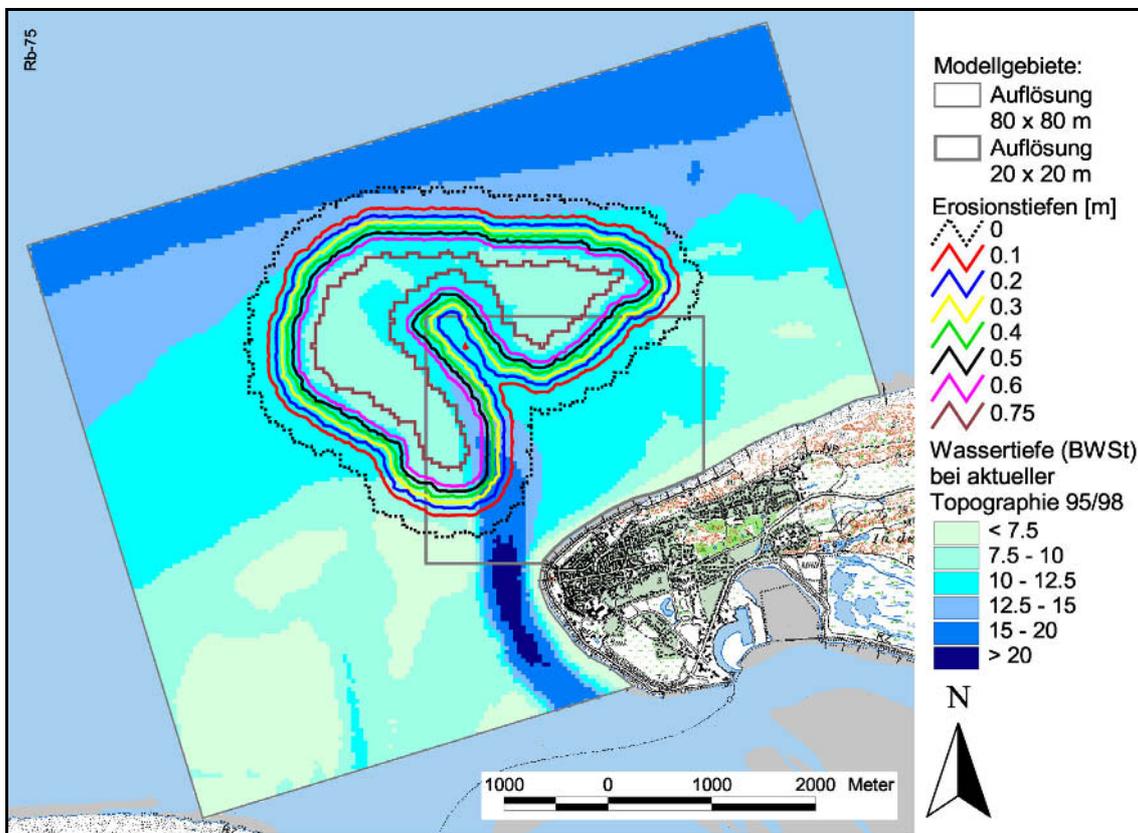


Abb. 6.10: Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,75 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation

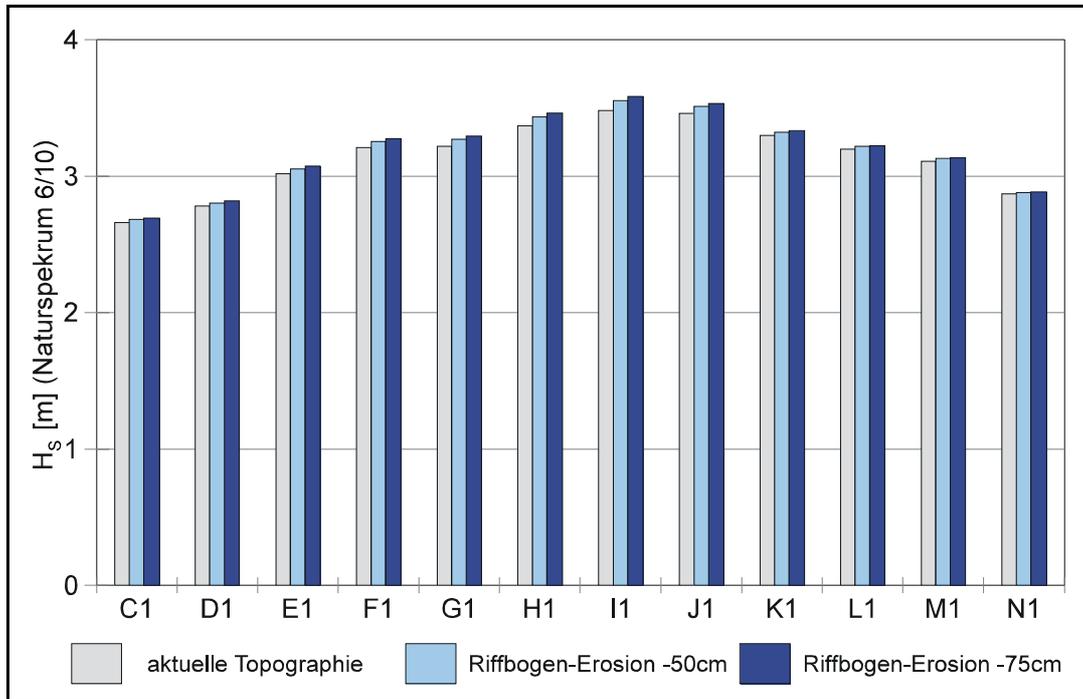


Abb. 6.11: Veränderung der signifikanten Wellenhöhen im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei schrittweiser Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m und 0,75 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 6$  m und  $T_M = 10$  s)

### 6.1.3.2 Naturspektrum mit $H_s = 6$ m und $T_M = 10$ s

Die hier angesetzten Szenarien einer über die zwischen 1975 und 1995 beobachteten Abnahmen der Riffbogenplatten (NIEMEYER et al. 1997) hinausgehenden weiteren Erosion führen für das gemessene Naturspektrum zu keiner Verstärkung der Seegangsbe-

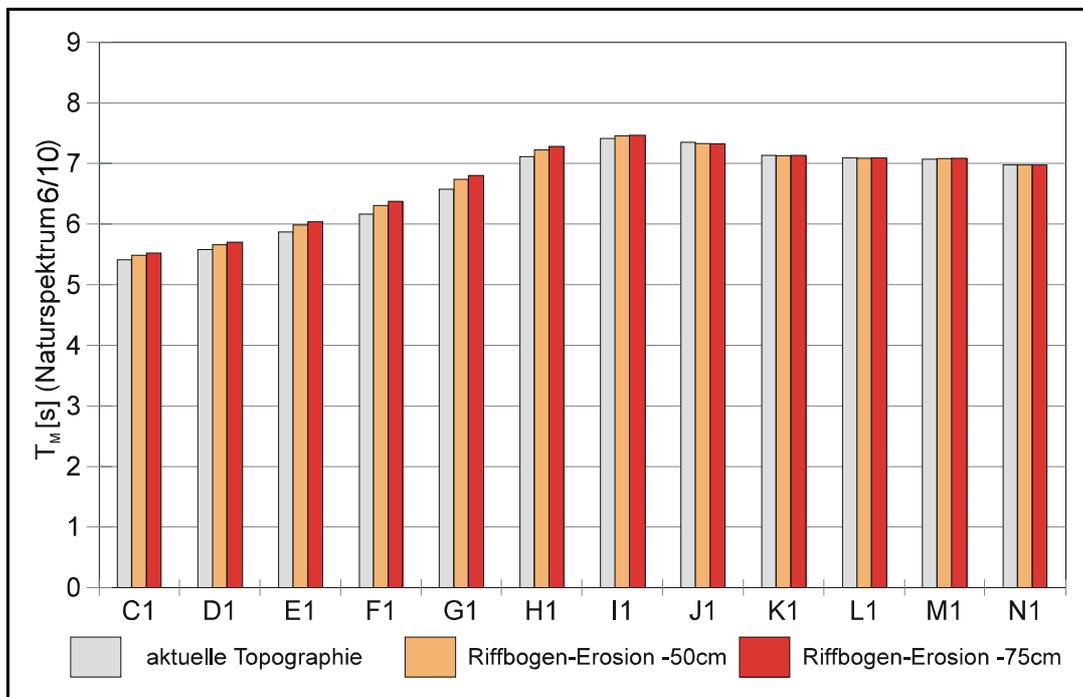


Abb. 6.12: Veränderung der mittleren Wellenperioden im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei schrittweiser Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m und 0,75 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 6$  m und  $T_M = 10$  s)

lastung auf dem Vorstrand: Alle Änderungen liegen innerhalb der Grenzen der Modellgenauigkeit (Abb. 6.11 + 6.12). Bei den signifikanten Wellenhöhen ist ebenso wie bei den mittleren Wellenperioden davon auszugehen, daß die Änderungen teilweise nur auf die Rundung zurückzuführen sind (Abb. 6.11). Für die hier angesetzten Seegangsverhältnisse im Küstenvorfeld kann somit auch bei einer über das hier angesetzte Maß hinausgehenden Erosion im Riffbogenbereich ausgeschlossen werden, daß die Seegangintensität auf dem Vorstrand weiter zunimmt.

### 6.1.3.3 JONSWAP-Spektrum mit $H_s = 8$ m und $T_M = 10$ s

Trotz der größeren Wellenhöhen im Küstenvorfeld und der stärkeren Energiekonzentration im Peakbereich sind auch für diese Randbedingung nur marginale Änderungen der kennzeichnenden Seegangparameter auf dem Inselvorstrand festzustellen (Abb. 6.13 + 6.14): sie liegen insgesamt unter der Marke von 1%. Allerdings ist dieses Ergebnis vor dem Hintergrund früherer Untersuchungen zum Prozeß der Riffbrandung in Zusammenhang mit den Ergebnissen für das Naturspektrum im Küstenvorfeld (Abb. 6.11 + 6.12) weniger überraschend: Es hatte sich gezeigt, daß für das Ausmaß der Energieumwandlung auf dem Riffbogen weniger die relative Wellenhöhe und damit die MC COWAN-Formulierung des Brecherkriteriums als die Wellensteilheit und somit die MICHE-Formulierung des Brecherkriteriums dominiert (NIEMEYER 1987). Die Ergebnisse weisen eindeutig aus, daß selbst bei einer über das hier angesetzte Maß hinausgehenden Erosion im Riffbogenbereich keine größere Seegangintensität auf dem Inselvorstrand zu erwarten ist.

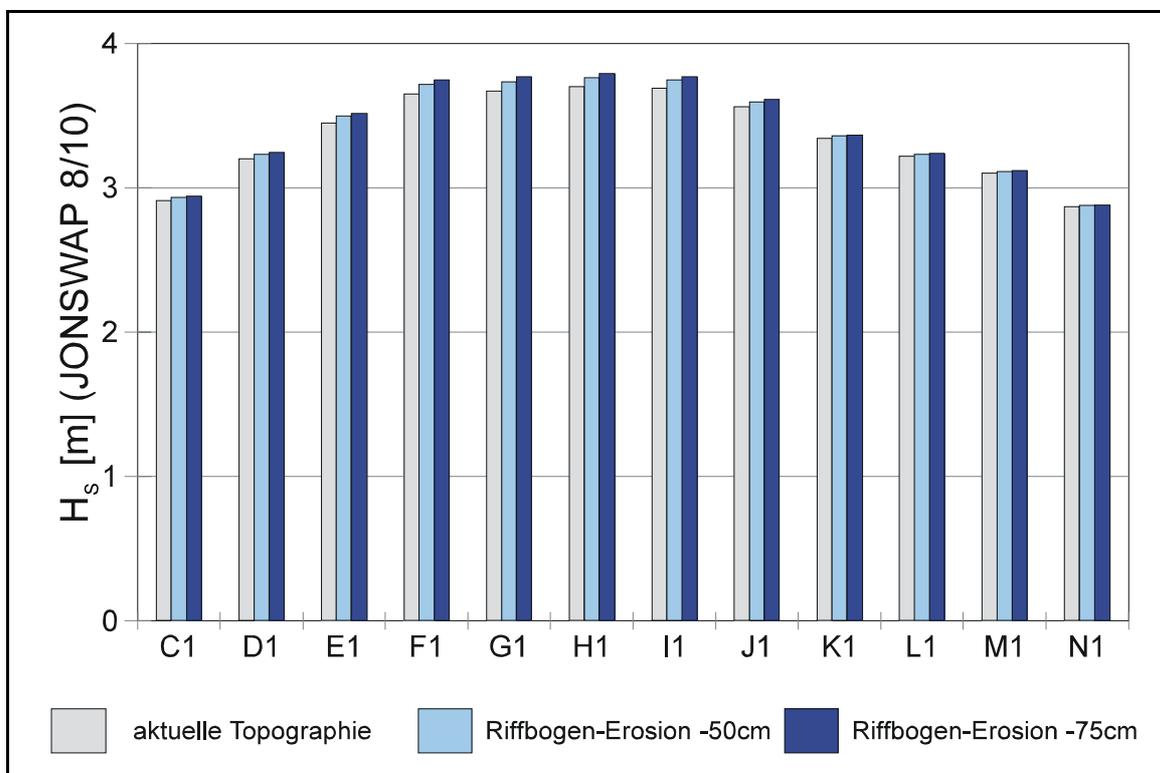


Abb. 6.13: Veränderung der signifikanten Wellenhöhen im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei schrittweiser Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m und 0,75 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 8$  m und  $T_M = 10$  s)

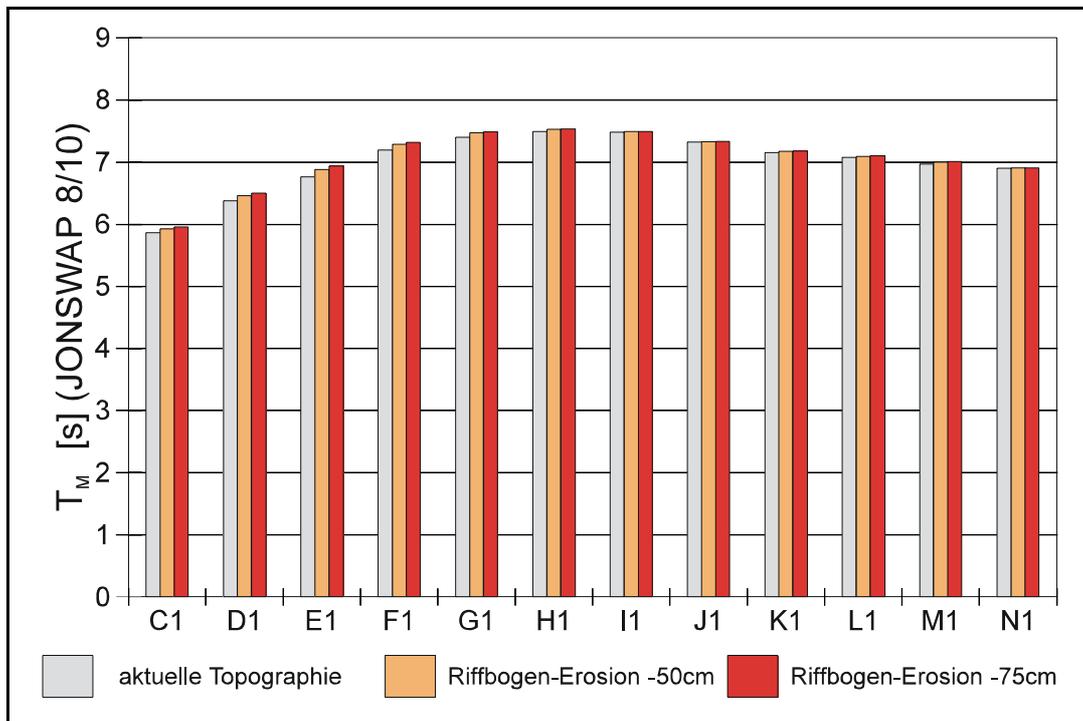


Abb. 6.14: Veränderung der mittleren Wellenperioden im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei schrittweiser Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m und 0,75 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 8$  m und  $T_M = 10$  s)

#### 6.1.3.4 JONSWAP-Spektrum mit $H_s = 10$ m und $T_M = 12$ s

Selbst für den Fall sehr hohen Seegangs im Küstenvorfeld, bei dem bereits dort die höchsten relativen Wellenhöhen den kritischen Wert für Flachwasserbranden erreichen

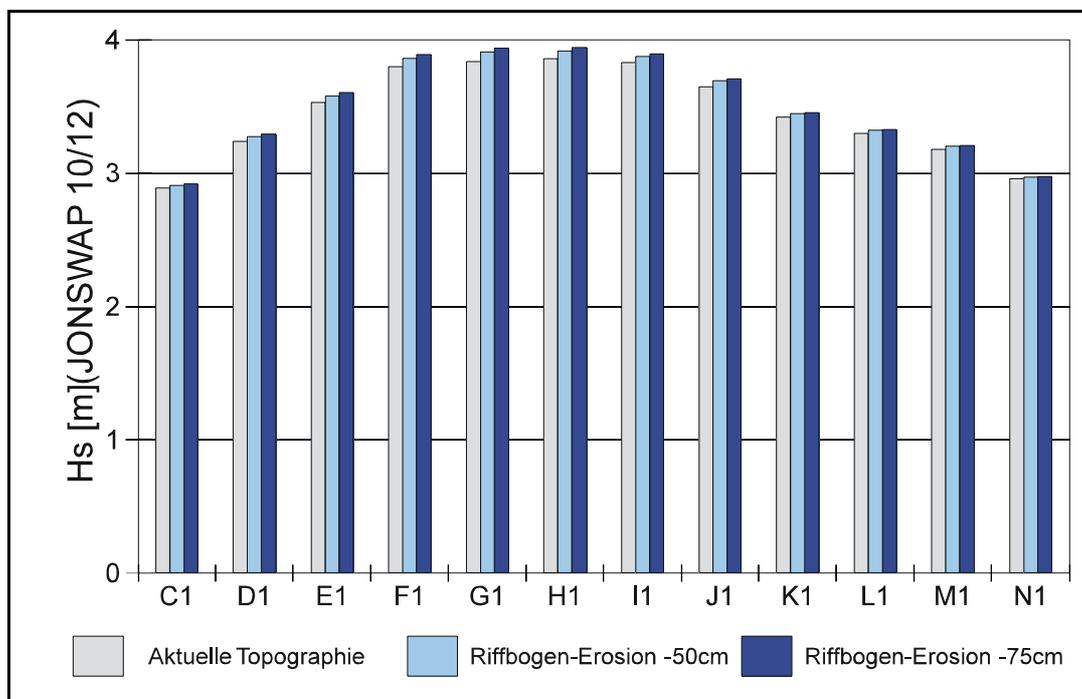


Abb. 6.15: Veränderung der signifikanten Wellenhöhen im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei schrittweiser Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m und 0,75 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10$  m und  $T_M = 12$  s)

und sogar überschreiten, ist keine signifikante Zunahme der Seegangsintensität auf dem Inselvorstrand festzustellen (Abb. 6.15 + 6.16). Für die signifikanten Wellenhöhen wie auch für die mittleren Wellenperioden liegen die Veränderungen insgesamt immer unterhalb der 1%-Marge (Abb. 6.15). Daraus läßt sich ableiten, daß die hier angesetzten Szenarien einer Erosion im Riffbogen auch bei der für den angesetzten Wasserstand als extrem zu betrachtenden Seegangsintensität im Küstenvorfeld zu keiner wachsenden Seegangsbelastung der Strände und Schutzwerke im Nordwesten der Insel der Norderney führen werden. Damit ist auch eindeutig im Sinne eines induktiven Schlusses, daß selbst bei einer über das hier angesetzte Maß hinausgehenden Erosion im Riffbogenbereich keine Zunahme der Seegangsintensität auf dem nordwestlichen Inselvorstrand und damit einhergehende höhere Belastung der dort anschließenden Inselstrände und -schutzwerke bei Auftreten extremen Seegangs im Küstenvorfeld zu erwarten ist.

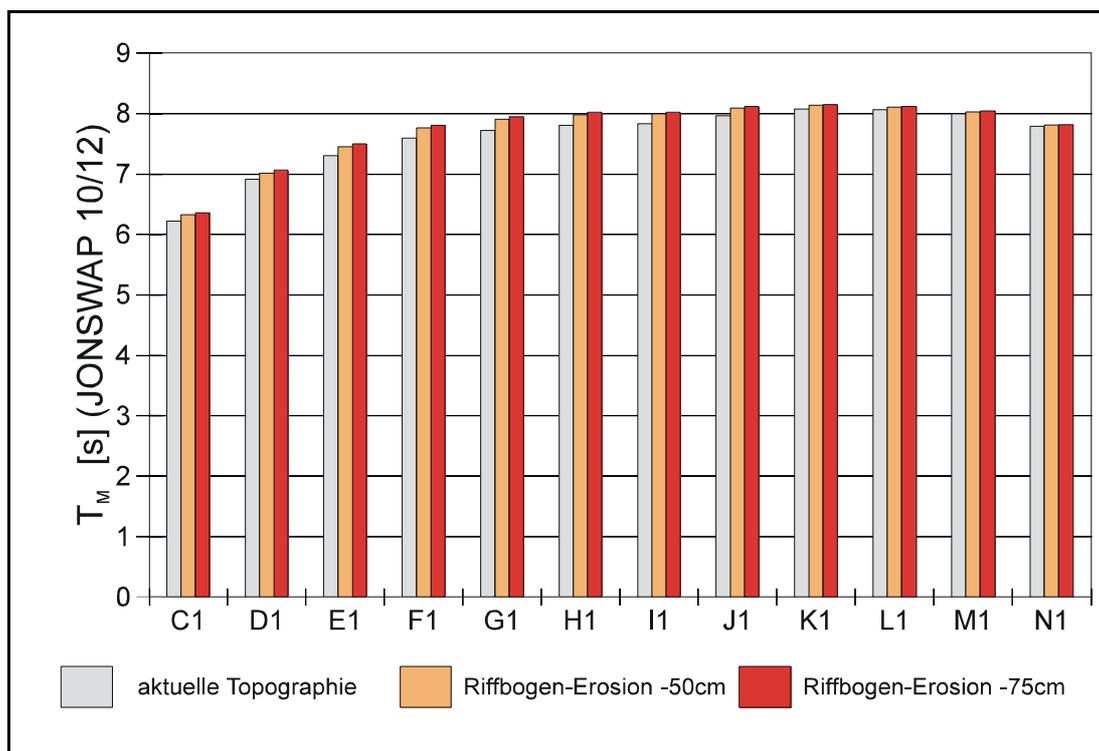


Abb. 6.16: Veränderung der mittleren Wellenperioden im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei schrittweiser Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m und 0,75 m im Riffbogenbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10$  m und  $T_M = 12$  s)

## 6.2 Aktuelle Topographie mit fiktiver Stranderosion

### 6.2.1 Problemstellung

Die in die Modelltopographie eingegangene Lage des ufernahen Vorstrandes und des Strandes war unmittelbar vor einer nachfolgenden Strandauffüllung vorgenommen worden. Somit war eine relativ niedrige Vorstrand- und Strandlage als Grundlage für die Modelltopographie gewählt worden. Sie war aber dennoch höher als teilweise in der Vergangenheit festgestellt; Beispiele für derartige Strandlagen in den letzten Jahrzehnten sind von KRAMER (1957) und STEPHAN (1988) dokumentiert worden. Um die Auswirkungen niedrigerer Strände als in der aktuellen Topographie enthalten auf den Seegang und die Seegangsbelastung der Deckwerke ebenfalls ermitteln zu können,

wurde die Modelltopographie im Vorstrand- und Strandbereich um bis zu 0,5 m abgesenkt (Abb. 6.17). Bei gleichen äußeren Randbedingungen wurde der Seegang im Modell ermittelt, so daß auch für diesen Fall entsprechende Ausgangsdaten für die Versuche im Großen Wellenkanal vorlagen.

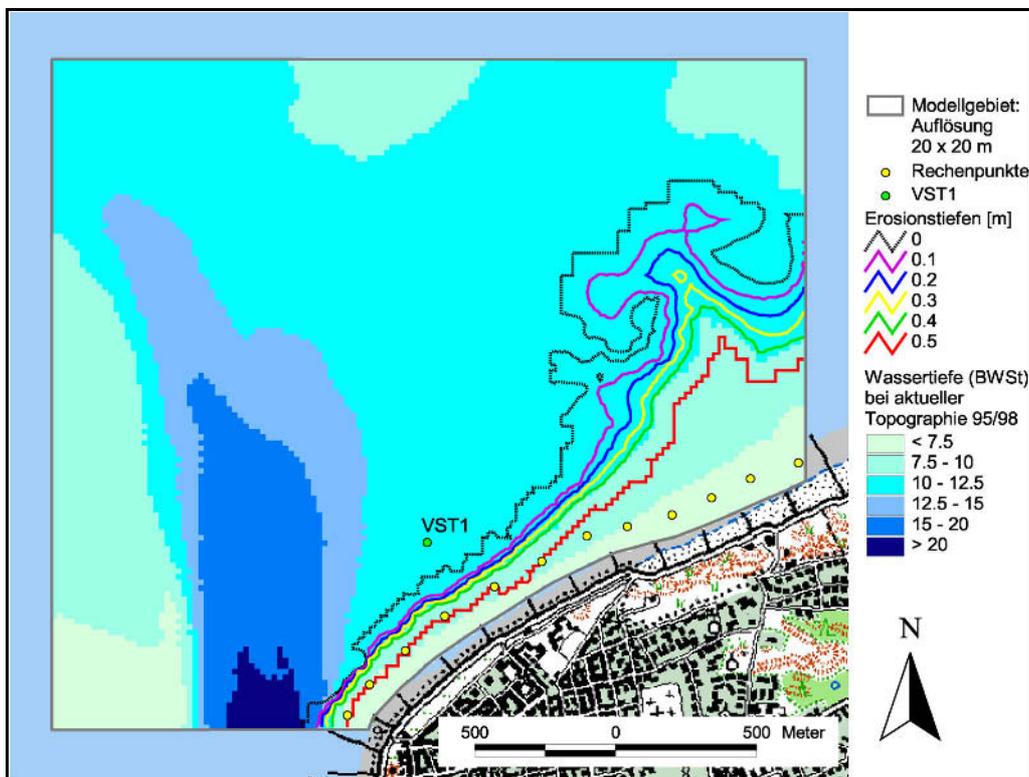


Abb. 6.17: Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation

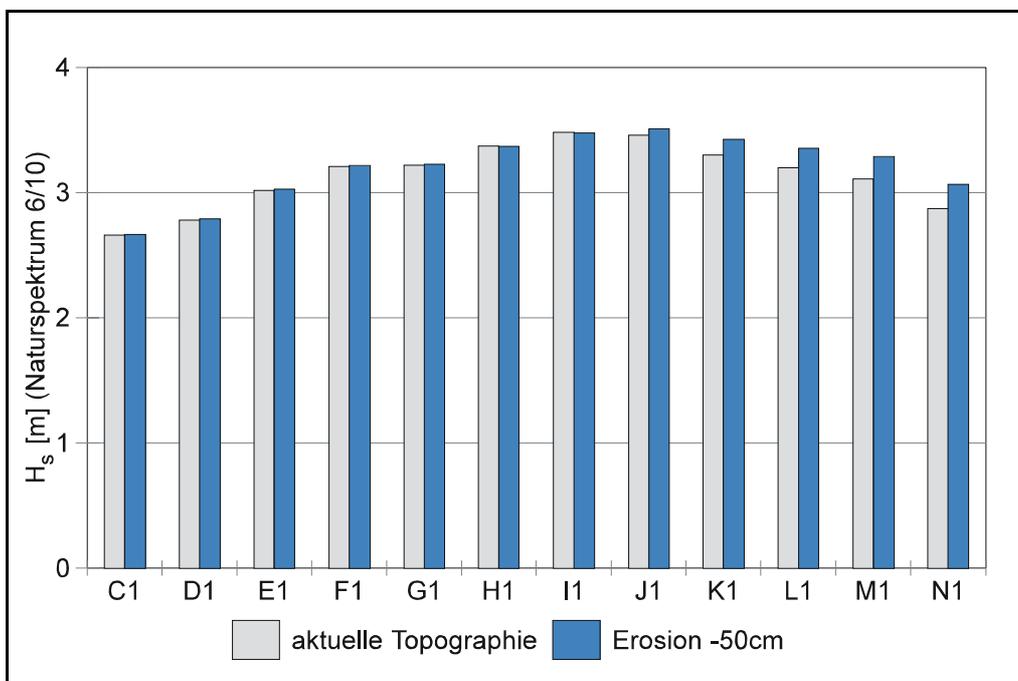


Abb. 6.18: Veränderung der signifikanten Wellenhöhen im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselstrand von Norderney bei Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation ( Seegang im Küstenvorfeld: Naturespektrum mit  $H_s = 6\text{ m}$  und  $T_M = 10\text{ s}$ )

### 6.2.2 Naturspektrum mit $H_S = 6 \text{ m}$ und $T_M = 10 \text{ s}$

Im westlichen Teil des Inselvorstrandes zeigen sich bei der Implementation einer Abnahme von bis zu 0,5 m keine als bedeutsam zu bewertenden Änderungen der signifikanten Wellenhöhen (Abb. 6.18) und mittleren Wellenperioden (Abb. 6.19). Die relativen Abnahmen der mittleren Wellenperioden an den Rechenpunkten C<sub>1</sub> bis G<sub>1</sub> (Abb. 5.3) sind zu gering, um Effekt bewertet werden zu können. Auch der gegenläufige Trend des Auftretens längerer Perioden zwischen den Rechenpunkten I<sub>1</sub> bis N<sub>1</sub> (Abb. 5.3) liegt deutlich unterhalb der Signifikanzmarge von 5% (Abb. 6.19).

Dieser Wert wird lediglich für die signifikanten Wellenhöhen in den Rechenpunkten M<sub>1</sub> und N<sub>1</sub> (Abb. 5.3) überschritten; die an den Rechenpunkten J<sub>1</sub> bis N<sub>1</sub> (Abb. 5.3) auftretenden Änderungen dieses kennzeichnenden Seegangsparemeters sind ebenfalls unterhalb des genannten Schwellenwertes (Abb. 6.18). Insgesamt kann festgehalten werden, daß beim Bemessungswasserstand eine um bis zu 0,5 m tiefere Strandlage lediglich im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes, der durch die Rechenpunkte M<sub>1</sub> und N<sub>1</sub> (Abb. 5.3) repräsentiert wird, geringfügig höhere signifikante Wellenhöhen auftreten. Im Bereich der höchsten Seegangbelastungen, der für die hier untersuchte Randbedingung des gemessenen Naturspektrums vom 05. Februar 1999 durch die Rechenpunkte I<sub>1</sub> und J<sub>1</sub> (Abb. 5.3) repräsentiert wird, wirkt eine derartige Stranderosion praktisch nicht belastungserhöhend aus (Abb. 6.18 + 6.19).

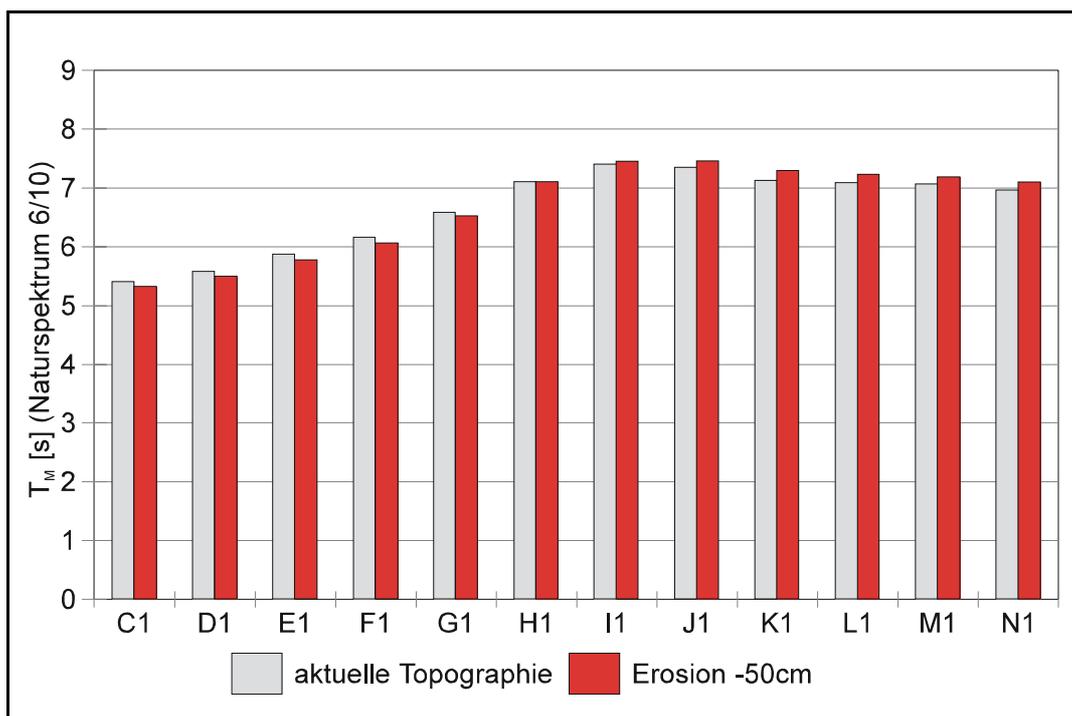


Abb. 6.19: Veränderung der mittleren Wellenperioden im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation ( Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_S = 6 \text{ m}$  und  $T_M = 10 \text{ s}$ )

### 6.2.3 JONSWAP-Spektrum mit $H_S = 8 \text{ m}$ und $T_M = 10 \text{ s}$

Auch beim Ansatz der fiktiven Randbedingung eines parametrisierten Seegangsspektrums mit höherer signifikanter Wellenhöhe als beim gemessenen Naturspektrum sind für die mittleren Wellenperioden (Abb. 6.21) keine signifikanten Änderungen bei Ansatz einer

Erosion bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich festzustellen. Auch für die signifikanten Wellenhöhen treten bei dieser fiktiven Modelltopographie fast überall und insbesondere im Bereich der stärksten Seegangbelastung zwischen den Rechenpunkten J<sub>1</sub> bis N<sub>1</sub> (Abb. 5.3) keine nennenswerten Änderungen auf (Abb. 6.20). Lediglich im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes wirkt sich die angenommene Erosion aus: In den Rechenpunkten M<sub>1</sub> und N<sub>1</sub> (Abb. 5.3) treten dann um mehr als 5% höhere signifikante Wellenhöhen auf. Aber auch diese Änderungen sind deutlich geringer als 10% (Abb. 6.20).

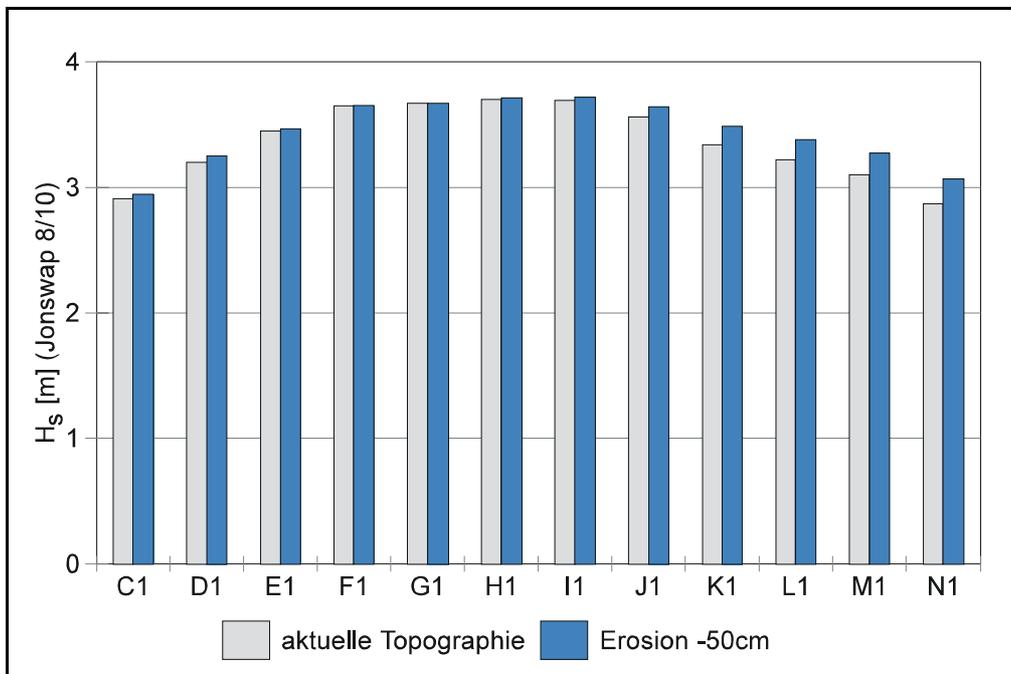


Abb. 6.20: Veränderung der signifikanten Wellenhöhen im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselstrand von Norderney bei Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation ( Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 8$  m und  $T_M = 10$  s)

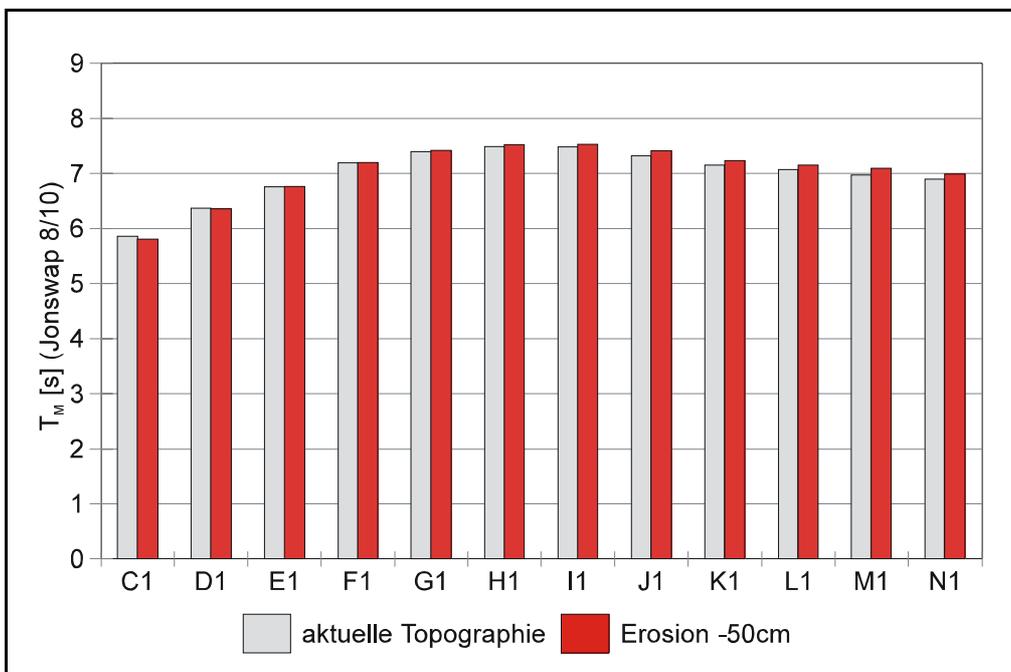


Abb. 6.21: Veränderung der mittleren Wellenperioden im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation ( Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 8$  m und  $T_M = 10$  s)

## 6.2.4 JONSWAP-Spektrum mit $H_s = 10$ m und $T_M = 12$ s

Für das als Extremsituation des Seegangs im Küstenvorfeld eingeführte JONSWAP-Spektrum ergeben sich bei den mittleren Wellenperioden (Abb. 6.23) nur marginale Änderungen. Offensichtlich werden die Wechselwirkungen mit der Morphologie bei längeren Perioden und damit auch Wellenlängen durch das hier angesetzte Maß für die Stranderosion nur noch unwesentlich verändert, so daß hierdurch das Durchschwingen längerer Wellenperioden nicht mehr begünstigt wird.

Für die signifikanten Wellenhöhen (Abb. 6.22) ergibt sich für den größten Teil des Untersuchungsgebiets zwischen den Rechenpunkten  $C_1$  bis  $I_1$  (Abb. 5.3) ein vergleichbarer Trend wie für die mittleren Wellenperioden: die Änderungen sind marginal. Auch im östlich anschließenden Rechenpunkt  $J_1$  ist die Zunahme bei Erosion noch deutlich unterhalb der 5%-Marke. Im östlichen Endbereich des Untersuchungsgebietes, das eine geringeren Seegangsbelastung ausgesetzt ist als der Zentralbereich, treten hingegen in den Rechenpunkten  $K_1$  bis  $N_1$  Zunahmen der signifikanten Wellenhöhen bei dem hier angesetzten Maß einer Vorstrand- und Stranderosion von etwa 5% oder mehr auf; das Maximum liegt im Rechenpunkt  $K_1$  mit ungefähr 10% (Abb. 6.22). Es bleibt aber festzuhalten, daß sich im Bereich der ermittelten höchsten Seegangsbelastungen der Inselchutzwerke eine weitergehenden Absenkung des Vorstrand- und Strandbereiches um das hier angesetzte Maß von 0,5 m nicht belastungsverstärkend wirken wird.

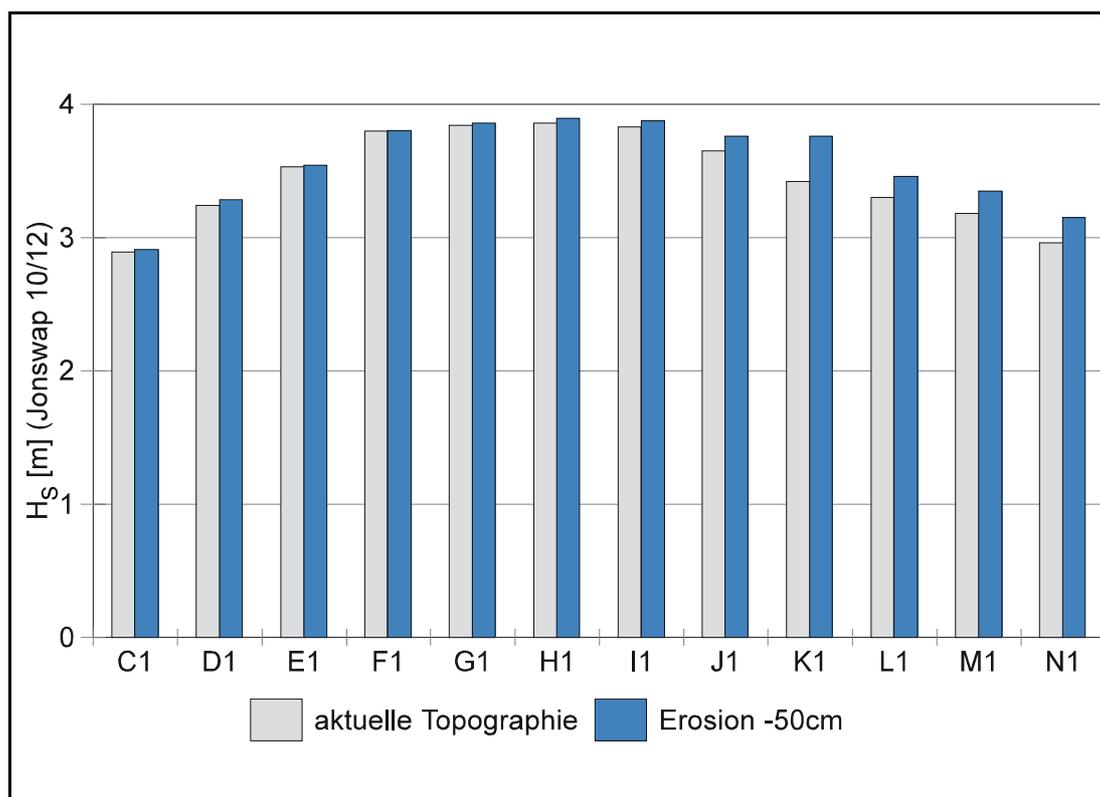


Abb. 6.22: Veränderung der signifikanten Wellenhöhen im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselstrand von Norderney bei Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: Naturspektrum mit  $H_s = 10$  m und  $T_M = 12$  s)

Für die mittleren Wellenperioden zeigen sich an allen Rechenpunkten keine Änderungen, die als signifikant zu bezeichnen sind. Für diesen kennzeichnenden Parameter ist eine weitergehende Strandabnahme offensichtlich irrelevant.

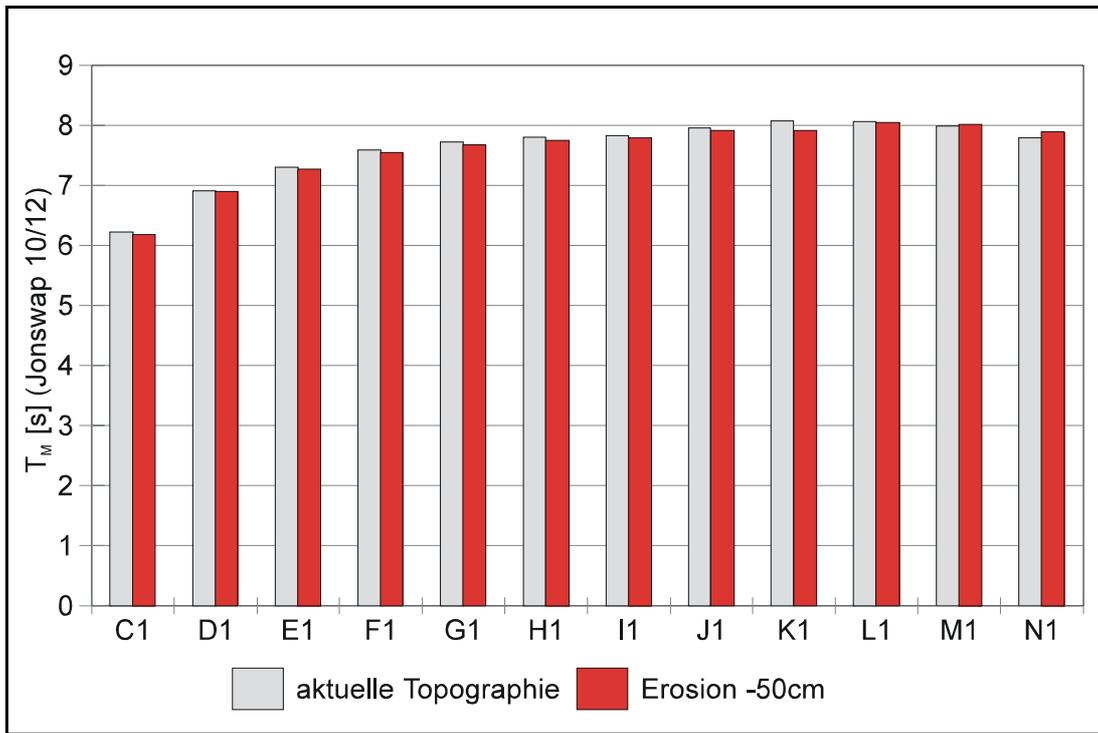


Abb. 6.23: Veränderung der mittleren Wellenperioden im Seegat und auf dem nordwestlichen Inselvorstrand von Norderney bei Implementation einer fiktiven Erosion von bis zu 0,5 m im Vorstrand- und Strandbereich in die Modelltopographie der aktuellen Situation (Seegang im Küstenvorfeld: JONSWAP-Spektrum mit  $H_s = 10$  m und  $T_M = 12$  s)

## 6.3 Inseltopographie

### 6.3.1 Problemstellung

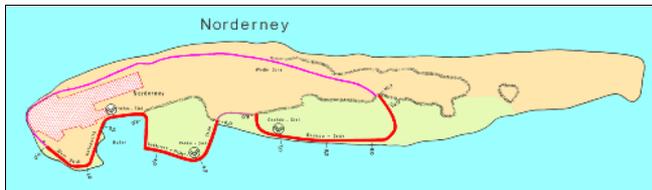


Abb. 6.24: Geschütztes Gebiet auf Norderney (Generalplan Küstenschutz Nds.)

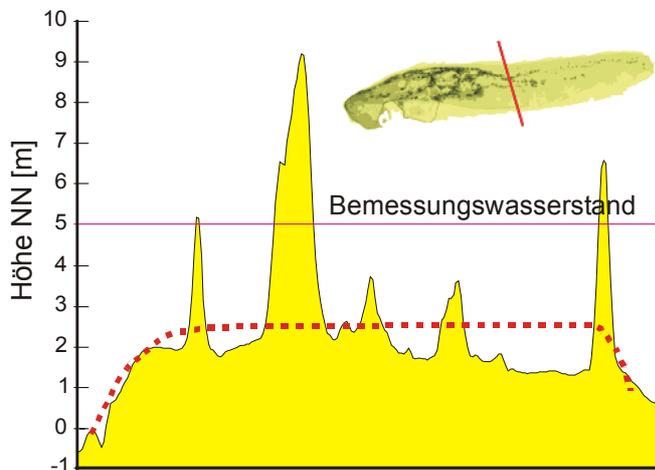


Abb. 6.25: Typisches Profil Norderney, ermittelt aus digitalem Geländemodell LGN

Neben den bekannten Schwierigkeiten bei der Erstellung von Modelltopographien für mathematische Modellierungen, ist bei der Ermittlung des Bemessungsseegangs auch abzuschätzen, wie die Morphologie des Modellgebietes beim Eintritt dieses Ereignisses aussehen könnte. Ein Aspekt ist die Frage nach der weiteren Entwicklung der Inseln (hier vor allem die Bereiche, die nicht als geschütztes Gebiet im Generalplan Küstenschutz festgelegt wurden) als Teil des natürlichen Schutzsystems der Festlandsküste. Wenngleich es zur Zeit unmöglich ist, diese Fragestellungen für längere Zeiträume befriedigend zu beantworten, so ist es doch sinnvoll, die Sensitivität des Bemessungsseegangs hinsichtlich entsprechender möglicher Änderungen zu ermitteln.

Auf den Inseln gibt es neben den geschützten Gebieten (Abb. 6.24) weite Bereiche mit Dünen, die den Bemessungswasserstand überragen. Ein Ansicht von Norden auf die Insel vermittelt den Eindruck einer geschlossenen Dünenkette auch wenn diese in Wirklichkeit an einigen Stellen unterbrochen ist. Für die Erstellung der Modelltopographie wird die Insel bis auf den Strand- und Hellerbereich üblicherweise als trocken angesehen, insbesondere weil der Seegang die vorhandene Morphologie nicht durchdringen kann. Um Änderungen der Dünenmorphologie vereinfacht abzuschätzen, wurde für die Sensitivitätsuntersuchungen östlich des geschützten Bereichs die Dünenmorphologie zunächst durch einen gleichförmigen Strand ersetzt (Abb. 6.25), der je nach eingegebenem Wasserstand bedeckt ist.

### 6.3.2 Ergebnisse der Sensitivitätsuntersuchungen

Für die Untersuchungen wurde das mathematische Seegangsmodell SWAN (Booij et al. 1999) eingesetzt. Das Modellgebiet reichte von Mitte Juist im Westen bis zur Westspitze von Langeoog und von der -12.5m Linie bis zum Festland (Abb. 6.26). Das Modellgitter ist gekrümmt-linear, um bei einer noch handhabbaren Modellgröße (609 x 561 Gitterpunkte) eine den morphologischen Formen entsprechende räumliche Auflösung zu erreichen. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Seegaten 'Norderneyer Seegat' und 'Wichter Ee' mit den vorgelagerten Riffbögen. Gerechnet wurde mit dem Bemessungswasserstand für Norderney und dem während der Sturmflut vom 5. Februar 1999 gemessenen Spektrum (Abb. 5.4) am nördlichen Rand: signifikante Wellenhöhe  $H_s=6m$ , Peakperiode  $T_p=14s$ . Der Wind wurde mit 30m/s aus 315° angenommen. Die Höhe des gleichförmigen Strands, der für die Sensitivitätsuntersuchungen den Bereich der Dünen außerhalb des geschützten Gebiets ersetzt, wurde mit NN+2,5m angesetzt.

Die Ergebnisse für die signifikanten Wellenhöhen und mittleren Wellenrichtungen (Abb. 6.27 zeigen deutlich den Einfluss der Inseln auf das Wattgebiet im Vorfeld des Fest-

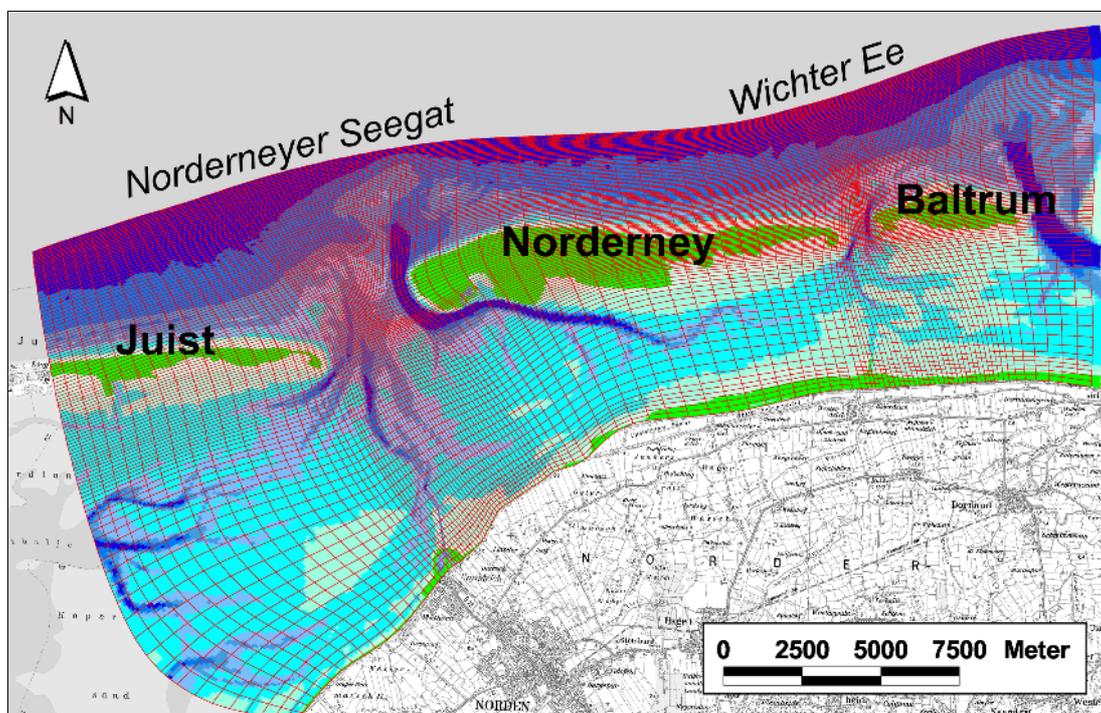


Abb. 6.26: Untersuchungsgebiet für Sensitivitätsuntersuchungen hinsichtlich Änderungen in der Inseltopographie mit Modelltopographie und Modellgitter. Beim Modellgitter wird nur jede 5. Linie je Richtung dargestellt

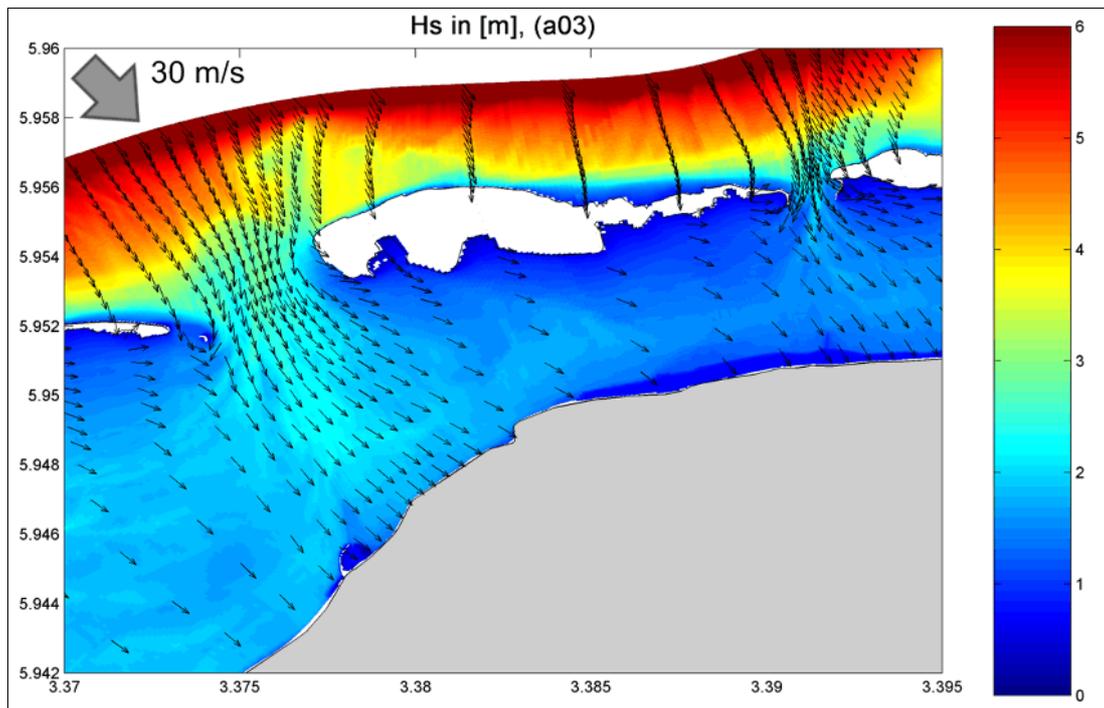


Abb. 6.28: Spektrale signifikante Wellenhöhe und mittlere Wellenrichtung für die aktuelle Topographie. Randbedingungen: Wasserstand: NN+5m, Hs=6m, Tp=14s, Tm=10s

lands. Der Seegang kann nur durch die Seegaten einschwingen und breitet sich hinter den Inseln aus. Die Beugung des Seegangs an den Inselköpfen spiegelt sich im Verlauf der mittleren Richtungen dort wider. Das Festland wird in dem Bereich am stärksten beeinflusst, der den Seegaten am nächsten liegt, insbesondere im Bereich des Norderneyer Seegats. Östlich davon nimmt die Wellenhöhe nahezu stetig ab. Deutlicher tritt dieser Gradient bei der Energieperiode Tm-1,0 auf (Abb. 6.28).

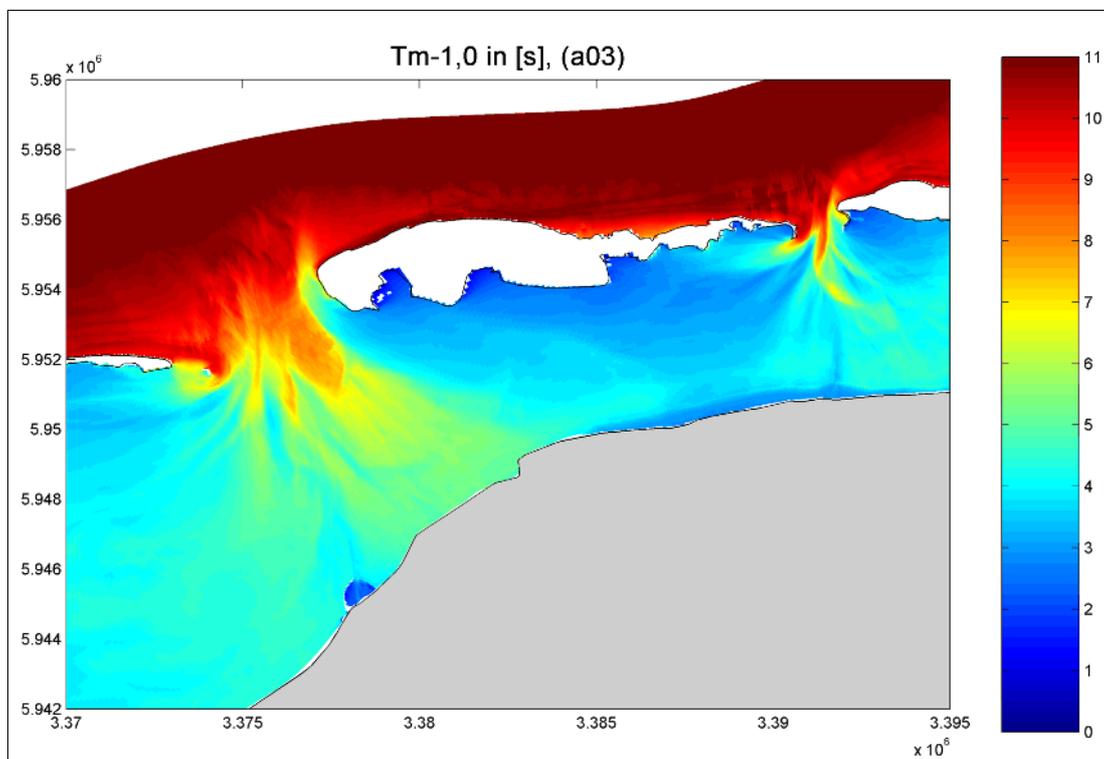


Abb. 6.27: Energieperiode Tm-1,0 für die aktuelle Topographie. Randbedingungen: Wasserstand: NN+5m, Hs=6m, Tp=14s, Tm=10s

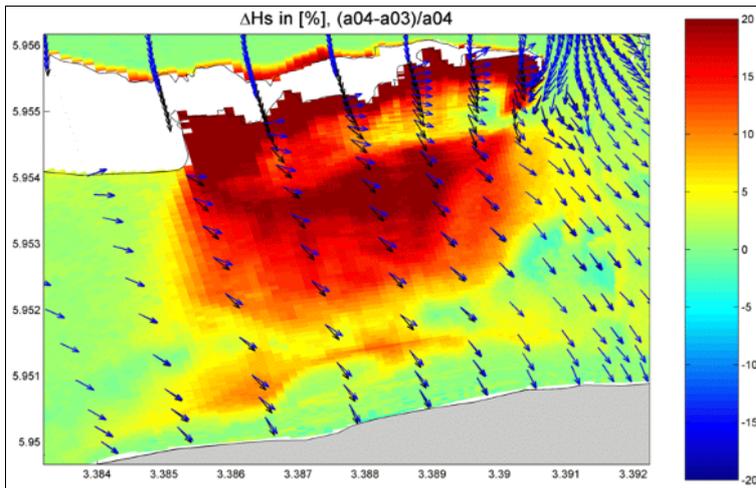


Abb. 6.29: Zunahme der signifikanten Wellenhöhe nach Ersetzung der Dünen durch Strand mit  $h=NN+2,5m$  in %. (Ausschnitt mit dem östlichen Bereich Norderneys mit dem Watt bis zum Festland)

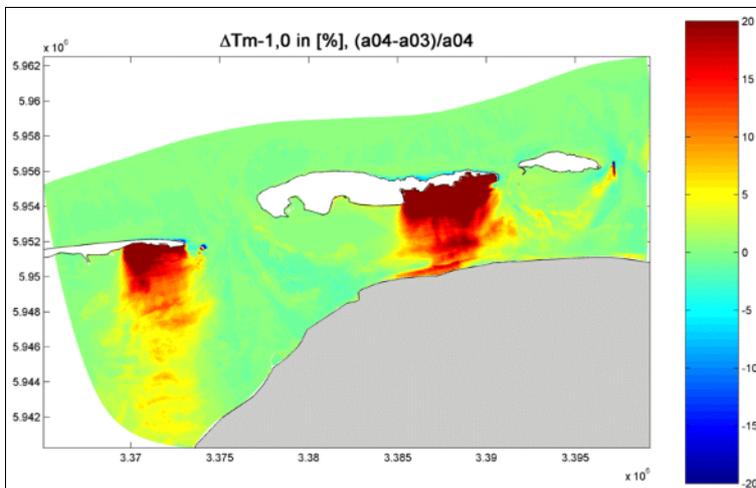


Abb. 6.30: Zunahme der Energieperiode nach Ersetzung der Dünen durch Strand mit  $h=NN+2,5m$  in %.

(Abb 6.30). Bei größerer Entfernung der Inseln vom Festland (östlicher Bereich von Juist) werden die Unterschiede geringer.

Der Vergleich der signifikanten Wellenhöhen und der mittleren Wellenrichtungen für die beiden morphologischen Zustände zeigt für die fiktive Topographie, dass beim Bemessungswasserstand der Seegang im bisher im Insel-Lee gelegenen Bereich deutlich zunimmt. Dabei nimmt der Einfluss der Änderung der Inseltopographie auf die signifikante Wellenhöhe in Richtung auf des Festland ab und geht im Vorlandbereich gegen Null (Abb. 6.29). Auch bei den mittleren Richtungen zeigen sich deutliche Differenzen, weil bei der fiktiven Topographie der Seegang über den Strand einlaufen kann (schwarze Pfeile, Abb. 6.29). Wie bei der signifikanten Wellenhöhe nehmen die Differenzen mit zunehmender Festlandsnähe ab.

Der Vergleich für die bei der Ermittlung des Wellenaufbaus bedeutsamere Energieperiode  $T_{m-1,0}$  zeigt dagegen für die fiktive Topographie einen signifikanten Anstieg, der im östlichen Bereich von Norderney bis an den Deichfuß reicht

## 7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Für die Ermittlung des Bemessungswasserstandes steht ein seit Jahrzehnten bewährtes Verfahren zur Verfügung; für die Ermittlung des Bemessungsseegangs war und ist dagegen in Gebieten mit begrenzten und abnehmenden Wassertiefen und stark gegliederten morphologischem Formeninventar noch Pionierarbeit erforderlich. Dies gilt umso mehr, wenn die erheblich verbesserten Möglichkeiten der Meß- und Analysetechnik genutzt werden sollen, die in den letzten Jahren verfügbar geworden sind. In Orientierung an dieser grundsätzlichen Zielsetzung sind eingehende und umfangreiche mathematische Modellierungen mit dem Modell SWAN vorgenommen worden. Großer Wert wurde dabei auf die zwei essentiellen Aspekte gelegt, die neben handwerklicher Akkutaressen für erfolgreiche Modellierungen im Sinne der Produktion verlässlicher und belastbarer Ergebnisse unverzichtbar sind:

1. die Erstellung einer Modelltopographie, die dem Anspruch der Naturähnlichkeit genügt. Dabei sind hier zusätzlich die Effekte möglicher nachteiliger morphologischer Änderungen einbezogen worden.
2. Die Auswahl von Randbedingungen, die sowohl einerseits als naturähnlich einzustufen sind und andererseits auch mögliche Extrembelastungen wirklichkeitsnah und planrechtlich belastbar repräsentieren.

Es sind für vier typische Bereiche des deutschen Nordseeküstengebiets exemplarisch Ermittlungen des Bemessungsseegang mit mathematischer Modellierung vorgenommen worden:

- Inselvorstrand von Norderney,
- Insellee von Norderney,
- inselgeschütztes Watt vor dem Elisabethgroden,
- offenes Watt in der Dithmarscher Bucht.

Vergleiche mit Naturmessungen im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats haben gezeigt, dass sowohl auf Inselvorstränden als auch auf Wattflächen der dort auftretende Seegang mit dem mathematischen Modell SWAN hinreichend naturähnlich reproduziert werden kann. Im Insellee sind mit dem Modell hingegen keine verlässlichen Ergebnisse erreichbar. Offenbar wirkt dort der im Modell nicht implementierte physikalische Prozeß der Diffraktion zu stark auf das lokale Seegangsklima, um bei seiner Vernachlässigung noch brauchbare Ergebnisse erzielen zu können.

Ein wesentliches weiteres Ergebnis ist, dass das Einführen von Szenarien des beim Bemessungswasserstand im Küstenvorfeld auftretenden Seegangs auch in Form parametrisierter Spektren zu realistischem Bemessungsseegang führt. Dies wird zum einen besonders deutlich, dass selbst beim Einsteuern parametrisierter Spektren auf dem Inselvorstrand die bei der Nachbildung von Naturspektren erkennbare spektrale Verformung in ihren typischen Merkmalen reproduziert wird. Im Modell werden die dominanten hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen so naturähnlich nachgebildet, dass sie auch in diesen Fällen reproduziert werden.

Zum anderen wird deutlich, dass oberhalb einer bestimmten -bereits bei gelaufenen Sturmfluten überschrittenen Schwelle die Zunahme der Seegangintensität im Küstenvorfeld für die Seegangsbelastung von Küstenschutzwerken an Festlandsküsten in Lee inselgeschützter und offener Watten nachrangig ist. Diese morphologischen Formationen üben auf den von See her einschwingenden Seegang eine nachhaltige morphologische Filterung aus; sie wirken auf ihn als großflächiger Drempel. Die Modellergebnisse stehen dabei in vollem Einklang mit dem in den letzten Jahrzehnten bei der Analyse von Naturmessungen festgestelltem morphodynamischen Gleichgewicht von Seegang und Watthöhen.

Die Ergebnisse der Modellierungen boten Anlaß und verlässliche Grundlage mit dem Werkzeug SWAN auch die Auswirkungen angenommener morphologischer Veränderungen auf lokales Seegangsklima zu betrachten. Die unterschiedlichen beleuchteten Szenarien wie Erosion eines Riffbogens oder Inselvorstrands oder von Dünen ergaben einerseits plausible Ergebnisse und zeigen andererseits die sich aus einer fundiert abgesicherten Modellanwendung ergebenden weitreichenden Möglichkeiten für Vorsorgeplanung im Insel- und Küstenschutz.

## 8. LITERATUR

- ADEL, J. D. DEN; NIEMEYER, H. D.; FRANKEN, A.; 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
- BANTELMANN, A. [1966]:** Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste, dargestellt am Beispiel Nordfriesland. Die Küste, Jg. 14, H. 2, Heide
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) [1997]:** Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum-Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände. Gutachten BAW 97 53 3449 (Bearbeiter: E. Rudolph & G. Flügge). Hamburg-Rissen (unveröff.)
- BOOIJ, N. & HOLTHUIJSEN, L. [1992]:** HISWA user manual. Prediction of short-crested, stationary waves with ambient currents. TU Delft, Facult. Civ. Techn.
- BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. [1999]:** A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions. Part I, Model Description and Validation, J. Geophys. Research, 104, C4
- ERCHINGER, H.F. [1977]:** Naturmessungen des Wellenaufbaus mit neuentwickelten Geräten. Die Küste, H. 31
- ERCHINGER, H. F. [1986]:** Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste, H. 43
- FÜHRBÖTER, A. [1974]:** Küstenschutz auf neuen Wegen. VDI-Zeitschr. 116, H. 8
- 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
- HOLTHUIJSEN, L. H. & BOOIJ, N. [1987]:** A grid model for shallow water waves. Proc. 20th Int. Conf. Coast. Eng. Taipei/Taiwan, ASCE, New York
- HOLTHUIJSEN, L.H.; RIS, R.C. & BOOIJ, N. [1998]:** A Verification of the Third-generation Model "SWAN". 5<sup>th</sup> Int. Worksh. Wave Hindcast. & Forecast.; Melbourne / FI, USA
- HOMEIER, H. [1962]:** Historisches Kartenwerk 1:50 000 der niedersächsischen Küste. Jber. 1961 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 13
- HOMEIER, H. [1969]:** Der Gestaltwandel der ostfriesischen Küste im Laufe der Jahrhunderte. In: J. Ohling (Hrsg.): Ostfriesland im Schutze des Deiches, Bd. 2 Eigenverl., Deichacht Krummhörn
- HOMEIER, H. [1979]:** Die Verlandung der Harlebucht bis 1600 auf der Grundlage neuerer Befunde. Jber. 1978 Forsch.-Stelle Küste, Bd. 30
- 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. & NIEMEYER, H. D. [1999]:** Changing of local wave climate due to ebb-delta migration. Proc. 26th Int. Conf. Coast. Eng., Copenhagen/Denmark, ASCE, New York
- KAISER, R. & NIEMEYER H.D. [2002]:** Analysis of Directional Spectra in Shallow Environment, Comparison of Field Data and Results from Mathematical Modeling. Proc. 4th Intern. Symp. Waves 2001, San Francisco/CA, ASCE, Reston

- KAISER, R., WEILER, B. & NIEMEYER H.D. [2001]:** Evaluation of Design Waves for Coastal Protection Structures in the Wadden Sea. Proc. 27th Intern. Conf. o. Coast. Eng., Sydney/Australia, ASCE, New York
- KRÜGER, W. [1911]:** Meer und Küste bei Wangerooge und die Kräfte die auf ihre Gestaltung einwirken. Zeitschr. f. Bauwesen, Jg. 1911
- 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. [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
- 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
- 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
- LÜDERS, K. [1952]:** Die Wirkung der Buhne H in Wangerooge-West auf das Seegat "Harle". Die Küste, H. 1, Jg. 1.
- LÜDERS, K. & LEIS, G. [1964]:** Niedersächsisches Deichgesetz-Kommentar. Verl. Wasser u. Boden, Hamburg
- LÜDERS, K. & LUCK, G. (1976):** Kleines Küstenlexikon. 3. neubearb. Aufl., Verl. A. Lax, Hildesheim
- MC COWAN, J. [1894]:** On the highest wave of permanent type. Phil. Mag., Vol 5, 38
- MICHE, R. [1944]:** Mouvement ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Ann. Ponts Chaussées, 114
- NIEMEYER, H. D. [1983]:** Über den Seegang an einer inselgeschützten Watteküste. BMFT -Forschungsber. MF 0203
- NIEMEYER, H.D. [1984]:** Hydrographische Untersuchungen in der Leybucht zum Bauvorhaben Leyhörn. Jber. 1983 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 35
- 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. [1987]:** Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. -Proc. 20th Intern. Conf. o. Coastal Eng. Taipei/ROCTaiwan. ASCE, New York
- NIEMEYER, H.D. [1991]:** Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. 3rd Conf. o. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Mombasa/Kenya
- NIEMEYER, H. D. [1995]:** 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. [1997]:** Überprüfung der Bestickhöhen von Deichstrecken an der Unterems. Dienstber. Forsch.-Stelle Küste 05/97. Veröff. in: Niemeyer, H.D. & Kaiser, R. [1999]: Untersuchungen zur Deichsicherheit an der Unterems. Arb. Forsch.-Stelle Küste 13, I
- NIEMEYER, H.D. & KAISER, RALF [1994]:** Hydrodynamik im Ökosystem Wattenmeer. Texte Umweltbundesamt, 26/94
- NIEMEYER, H. D. & KAISER, R. [1997]:** Variationen im lokalen Seegangsklima infolge morphologischer Veränderungen im Riffbogen. Ber. Forsch.-Stelle Küste, Bd. 41

- NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. [1998]:** Hydrodynamik als ökosystemarer Gestaltungsfaktor im Wattenmeer. *in:* C. Preu (Hsg.). Aktuelle Beiträge zur interdisziplinären Meeres- und Küstenforschung. Ansätze-Methoden-Perspektiven. Vechtaer Stud. z. Angew. Geogr. u. Regionalwiss., Bd. 20
- NIEMEYER, H. D. & KAISER, R. [1998]:** Effects of ebb delta migration on local wave climate. Proc. 3rd Int. Conf. Hydrodynamics '98, Seoul/Korea
- NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. [1999]:** Untersuchungen zur Deichsicherheit an der Unterems. Arb. a. d. Forsch.-Stelle Küste 13
- NIEMEYER, H.D. & KAISER, R. [2001]:** Design Wave Evaluation for Coastal Protection Structures in the Wadden Sea. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. Ocean Wave Meas. & Analysis 2001. San Francisco. ASCE, Reston/Va., USA
- NIEMEYER, H.D.; BIEGEL, E.; KAISER, R.; KNAACK, H.; LAUSTRUP, C.; MULDER, J.P.M.; SPANHOFF, R.; TOXVIG, H. [1995]:** 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
- NIEMEYER, H. D.; KAISER, R. & ADEL, J. D. DEN [1995]:** Anwendung des mathematischen Seegangmodells HISWA auf Wattenmeerbereiche. Die Küste, H. 57
- NIEMEYER, H. D.; KAISER, R. & KNAACK, H. [1997]:** Effectiveness of a combined beach and shoreface nourishment on the island of Norderney/East Frisia, Germany. Proc. 25th Int. Conf. o. Coast. Eng. Orlando/Fl., USA. ASCE, New York
- NIEMEYER, H.D.; KAISER, R.; WEILER, B. [2000]:** Design Wave Evaluation for Coastal Protection Structures in the Wadden Sea. Proc. 6th Int. Worksh. Wave Hindcast. & Forecast., Monterey/Californ., USA, Met. Serv. o. Canada
- 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
- RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H.; BOOIJ, N. [1995]:** A Spectral Model for Water Waves in the Near Shore Zone. Proc. 24th Intern. Conf. o. Coast. Engg., Kobe/Japan. Am. Soc. Civ. Eng., New York
- SCHULZ, D., NIEMEYER, H. D., KAISER, R. [2002]:** Ermittlung des Bemessungsseegangs in der Dithmarscher Bucht. int. Dienstber. Forsch.-Stelle Küste (unveröff.)
- STEPHAN, H.-J. [1988]:** Fünf Strandauffüllungen auf Norderney - Ergebnisse morphologischer Untersuchungen. Arb. a. d. Forschungsstelle Küste, Nr. 11, Norderney
- 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
- WIELAND, P. [1984]:** Untersuchung über geomorphologische Veränderungen in der Dithmarscher Bucht. Die Küste, H. 40, Heide
- WIELAND, P.; THIES, E. & BERGHEIM, V. [1987]:** Bilanz hydrologischer und morphologischer Untersuchungen in der Dithmarscher Bucht. Büsumer Gewässerkundliche Berichte, Heft 54, ALW Heide, Dez. Gewässerkunde, Büsum
- WITTE, H.-H. [1970]:** Die Schutzarbeiten auf den Ostfriesischen Inseln. Die Küste, H. 19

## 9. Symbole und Abkürzungen

<b>A<sub>97</sub></b>	: Bemessungswellenauflauf mit 3% Überlauftoleranz
<b>BWSt</b>	: Bemessungswasserstand [NN +m]
<b>E<sub>max</sub></b>	: Energiedichte maximum
<b>g</b>	: Erdbeschleunigungskonstante = 9,81 m/s <sup>2</sup>
<b>HHThw</b>	: Höchstes Tidehochwasser [NN +m]
<b>H<sub>m0</sub>, H<sub>s</sub></b>	: signifikante Wellenhöhe [m]
<b>NN</b>	: Normal Null
<b>R</b>	: Windrichtung [°]
<b>RWS</b>	: Ruhewasserspiegel
<b>T<sub>p</sub></b>	: mit dem Energiedichtemaximum korrespondierende Periode [s]
<b>T<sub>M</sub></b>	: mittlere Wellenperiode [s]
<b>T<sub>M-1,0</sub></b>	: Energieperiode [s]
<b>u</b>	: Windgeschwindigkeit [m/s]
<b>WStd</b>	: Wasserstand
<b>θ</b>	: mittlere Wellenfortschrittsrichtung