

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Niemeyer, Hanz D.; Kaiser, Ralf; Adel den, Hans

Anwendung des mathematischen Seegangmodells HISWA auf Wattenmeerbereiche

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101382>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Niemeyer, Hanz D.; Kaiser, Ralf; Adel den, Hans (1995): Anwendung des mathematischen Seegangmodells HISWA auf Wattenmeerbereiche. In: Die Küste 57. Heide, Holstein: Boyens. S. 157-185.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Anwendung des mathematischen Seegangmodells HISWA auf Wattenmeerbereiche

Von HANZ DIETER NIEMEYER, RALF KAISER und HANS DEN ADEL

Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungsvorhabens „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarien der Deutschen Bucht“ wurde u. a. das mathematische Seegangmodell HISWA für das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats angewandt und verifiziert. Eine Eignungsprüfung für die speziellen Anforderungen des Modellgebiets ergab eine hinreichend genaue Reproduktion des natürlichen Seegangs. Da durch das Modell die Möglichkeit besteht, aus punktuellen Naturdaten die räumliche Verteilung signifikanter Seegangsparameter abzuschätzen, wurde anhand ausgewählter Beispiele versucht, mit diesem leistungsfähigen Werkzeug tiefergehende Einblicke in die Physik der Prozesse seegangsbedingter hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen zu gewinnen.

Summary

In the framework of the research programme „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarien der Deutschen Bucht“ a verification study of the numerical 2D wave propagation model HISWA was executed for the complex coastal area of the Norderneyer Seegat. Model predictions confronted with field measurements show quite good results. Waves entering shallow water are affected by often mutually superimposing physical processes due to interaction with coastal morphology and additionally with currents. In order to get an insight into these processes for coastal engineering purpose, wave propagation models are powerful tools in estimating nearshore wave conditions from offshore available wave data, by considering the on-shore wave processes. With selected data sets and the help of the powerful tool HISWA deeper insights into the processes of wave-driven hydrodynamical-morphological interactions were gained.

Inhalt

1. Einleitung	157
2. Das Modell, Grundlagen	159
3. Operationshandhabung und Modellbetrieb	160
3.1 Ein- und Ausgabedaten	160
3.2 Frequenzmodulation	160
3.3 Energielecks und sektorale Energieausbreitung	160
4. Fehlerabschätzungen	163
5. Morphologie des Modellgebietes	164
6. Ausgewählte Ergebnisse	165
6.1 Randbedingungen	165
6.2 Berechnungsergebnisse für einzelne Seegangereignisse	165
6.2.1 Modellrechnung 01	165
6.2.2 Modellrechnung 02	168

6.2.3 Modellrechnungen 05 und 07	170
6.3 Veränderungen kennzeichnen der Seegangparameter	173
6.3.1 Vergleich von Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnissen	173
6.3.2 Wellensteilheiten	175
6.3.3 Zusammenhänge von mittlerer Wellenlänge und Wind	176
6.4 Modellierung der Seengangausbreitung	178
6.4.1 Wellenhöhenentwicklung bei Sturmfluten	178
6.4.2 Wellenlängenentwicklung unter Sturmflutbedingungen	182
7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	183
8. Danksagung	184
9. Schriftenverzeichnis	184

1. Einleitung

Im Rahmen des vom BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE über das KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN geförderten Forschungsvorhabens „Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld und in den Ästuarien der Deutschen Bucht (MTK 464)“ wurden zwei Teilprojekte eingerichtet. Im ersten wurden Naturmessungen im Elbeästuar und schwerpunktmäßig die Entwicklung einer Modellfamilie mit den Komponenten Wind, Tide und Seegang angestrebt.

Die Zielsetzungen des zweiten Projektes liefen darauf hinaus, über Naturmessungen in Wattgebieten bisherige Erkenntnisse (SIEFERT, 1974; NIEMEYER, 1983, 1984) so abzusichern und zu erweitern. Ziel war dabei zum einen, auf dieser Grundlage Bemessungswerte für Zwecke des Küsteningenieurwesens herleiten zu können. Zum anderen sollten die Messungen aber auch dazu dienen, vertiefte Einblicke in seegangsbedingte hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen im Wattenmeer zu erhalten. In Verbindung hiermit sollten auch eingehendere Kenntnisse zum physikalischen Hintergrund der Vorgänge gewonnen werden, die mit der Entwicklung und Ausbreitung von Seegang im Küstenvorfeld und Wattenmeer verbunden sind.

In diesem Zusammenhang wurde es von Antragsteller und Förderer als sinnvoll angesehen, parallel zu der angestrebten – mit hohem Aufwand verbundenen Neuentwicklung – ein vorhandenes, marktgängiges Modell hinsichtlich seiner Eignung für die verschiedenen Bereiche des Wattenmeeres und den Anforderungen aus der Praxis des Küsteningenieurwesens zu testen. Dieser Ansatz konnte unter Einsatz eng begrenzter Mittel erreicht werden, da hierfür das bei der FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE – aus einer Kooperation mit dem RIJKSWATERSTAAT-DIENST GETIJDWATEREN, WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM und der SEKTION STRÖMUNGMECHANIK der TU DELFT – zur Verfügung stehende mathematische Seegangsmodell HISWA (HOLTHUIJZEN, BOOIJ u. HERBERS, 1989; BOOIJ u. HOLTHUIJZEN, 1992) genutzt werden konnte, das zudem bereits für das Seegat Marsdiep im Westfriesischen Wattenmeer mit Erfolg (VOGEL, RADDER u. DE REUS, 1989) eingesetzt worden war.

Als Anwendungsgebiet wurde das See- und Wattengebiet bei Norderney ausgewählt. Hierfür standen nicht nur geeignete Naturmessungen zur Prüfung der Naturähnlichkeit des Modells, sondern auch eingehende Kenntnisse zu den bestimmenden Prozessen der intensiven Wechselwirkungen zwischen von See einschwingendem Seegang und den morphologischen Formationen des Küstengebietes zur Verfügung (NIEMEYER, 1983, 1984, 1986, 1987a, 1987b, 1987c, 1991). Ziel der Untersuchungen war nicht allein, die Naturähnlichkeit des Modells zu prüfen. Das Modell sollte zudem als Werkzeug genutzt werden, um auch mit seinen verfahrensmäßigen Möglichkeiten physikalische Hintergründe der Seengangsentwicklung und -ausbreitung im Wattenmeer zu erhellen.

Für insgesamt zehn Ereignisse sind mit dem Modell Veränderungen der signifikanten Wellenhöhen vom Küstenvorfeld bis zum Inselvorstrand von Norderney berechnet und mit Naturmessungen verglichen worden. Die stärkste Energieumwandlung erfährt der Seegang im Modellgebiet durch die Energieumwandlung auf dem Riffbogen des Norderneyer Seegats. Alle wesentlichen in HISWA enthaltenen Mechanismen mit Ausnahme der Wechselwirkungen von Seegang und Strömungen treten in diesem Bereich evident auf. Über den Eignungstest wird in DEN ADEL et al. (1991) berichtet. Über die 10 Berechnungsfälle ist ein mittlerer prozentualer Fehler von - 4% bei den Wellenperioden und + 12 % bei den signifikanten Wellenhöhen eingetreten. Während bei den Perioden nur eine geringe Schwankungsbreite vorhanden ist, ist bei den signifikanten Wellenhöhen eine Abnahme des Fehlers mit wachsenden Höhen erkennbar. Die Übereinstimmung zwischen Modell- und Meßwerten wird – insbesondere hinsichtlich der mit der Wellenhöhe steigenden Qualität – als ermutigend empfunden, zumal durch die zusätzliche Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Seegang und Strömungen noch weitere Optimierungsreserven in dem Modell stecken.

2. Das Modell, Grundlagen

Das Seegangsmodell HISWA macht sich – im Gegensatz zu hergebrachten Modellierungsansätzen, die auf dem Prinzip der Energieerhaltung basierten – in seiner mathematischen Formulierung des Wellenfortschritts das physikalische Prinzip der Impulserhaltung zu Nutzen. Hiermit ist der Zweck verbunden, die Einwirkungen von Strömungen berücksichtigen zu können. Zudem wurde aus Gründen rechnerischer Effizienz auf die konventionelle EULERSche Betrachtungsweise in Form von Charakteristiken verzichtet, und eine LAGRANGESche Darstellungsweise eingeführt, wobei ein Gitternetz von Berechnungspunkten gewählt wird. Hierbei wird gleichzeitig der sektorale Energiefortpflanzung, wie sie für kurz-kämmigen Seegang charakteristisch ist, Rechnung getragen. Für die äußeren Einwirkungen durch Wind, Bodenreibung, Wellenbrechen und Blockieren durch Strömungen. Hierfür werden folgende Ansätze verwandt:

1. Windwirkung wird durch das mehrfach fortentwickelte empirische SMB-Verfahren in der Formulierung nach CERC (1973) berücksichtigt (HOLTHUISEN u. BOOIJ, 1987).
2. Bodenreibung wird als Produkt von Orbitalgeschwindigkeit und Bodenschubspannung berücksichtigt. Es wird der von PUTNAM und JOHNSON (1949) erstellte Ansatz für reguläre Wellen in der von DINGEMANS (1983) formulierten Erweiterung für Seegang genutzt.
3. Wellenbrechen infolge Übersteilung oder Überschreiten des Grenzwertes für die Wellenhöhen-Wassertiefen-Relation wird im Modell nach der Formulierung von BATTJES und JANSSEN (1979) ermittelt, die auf das Kriterium nach MICHE (1944) aufbaut.
4. Das Blockieren der Strömungen wird auf Grundlage der Dispersionsbeziehung der linearen Wellentheorie als Energiedissipation mit Hilfe eines einfachen Relaxationsmodells bestimmt. Hierbei wird die verbleibende Gesamtenergie und deren mittlere Frequenz ermittelt.

3. Operationshandhabung und Modellbetrieb

3.1 Ein- und Ausgabedaten

Als Randwerte sind für den Betrieb von HISWA folgende Seegangsgrößen erforderlich:

- signifikante Wellenhöhe,
- mittlere Periode,
- mittlere Seegangsrichtung,
- sektorale Seegangsausbreitung,
- Wassertiefen.

Darüber hinaus können Geschwindigkeiten und -richtungen von Wind und Strömungen als prägende Randbedingungen in das Modell eingegeben werden. Die empirischen Terme für Reibung und Brechen sind standardmäßig vorgegeben, können aber variiert werden.

Die Ergebnisse des Modells umfassen folgende Parametrisierungen: signifikante Wellenhöhe, mittlere Periode, mittlere Wellenlänge, Richtungsausbreitung der Energie und Energiedissipation.

3.2 Frequenzmodulation

Bei Anwendungen des Seegangsmodells HISWA ist in einigen Fällen ohne Frequenzmodulation für die Energiedissipation infolge von Reibung und Brechen gearbeitet worden. Nach Untersuchungen von DINGEMANS (1987) ist der Modellierungsansatz hierfür physikalisch nicht von hinreichender Exaktheit. Nach seinen hydraulischen Modellversuchen werden bei Berechnungen mit HISWA zu niedrige Perioden ermittelt. Andererseits bestehen gegen das partielle Ausfiltern der Frequenzmodulation erhebliche Vorbehalte, da hier per Definition die Naturähnlichkeit verletzt wird, und hierdurch auch andere Elemente der Modellierung wie die Refraktion mittelbar beeinflusst werden.

Verifikationsuntersuchungen in der Natur (VOGEL, RADDER u. DE REUS, 1989) ergaben hingegen, daß bei vollständiger Frequenzmodulation das Modell im Mittel um 7% längere Perioden ermittelte als gemessen worden waren. Diese widersprüchlichen Ergebnisse gaben Veranlassung, dieser Frage für das Untersuchungsgebiet bei Norderney gezielt nachzugehen. Mit Hilfe vergleichender Rechnungen, bei denen das Modell für dieselben Datensätze parallel mit vollständiger und mit partiell ausgeblendeter Frequenzmodulation gerechnet wurde. Die Modellergebnisse zeigen sowohl für die Perioden als auch für die Wellenhöhen bei den Testbeispielen geringere Abweichungen von den Naturdaten für die vollständige Berücksichtigung der Frequenzmodulation (Abb. 1 u. 2), was auch durch die Standardabweichungen und den mittleren prozentualen Fehler

$$e(P) [\%] = 100 \cdot \frac{P_{\text{mod}} - P_{\text{mess}}}{P_{\text{mess}}}$$

objektiviert wird.

3.3 Energielecks und sektorale Energieausbreitung

Die sektorale Seegangsausbreitung, die bei zunehmender Kurzkämmigkeit wachsende Bedeutung hat, wird bei dem Modell HISWA durch Vorgabe eines Sektors berücksichtigt. Aus Gründen der numerischen Stabilität läßt sich der Winkel dieses Sektors aber nicht be-

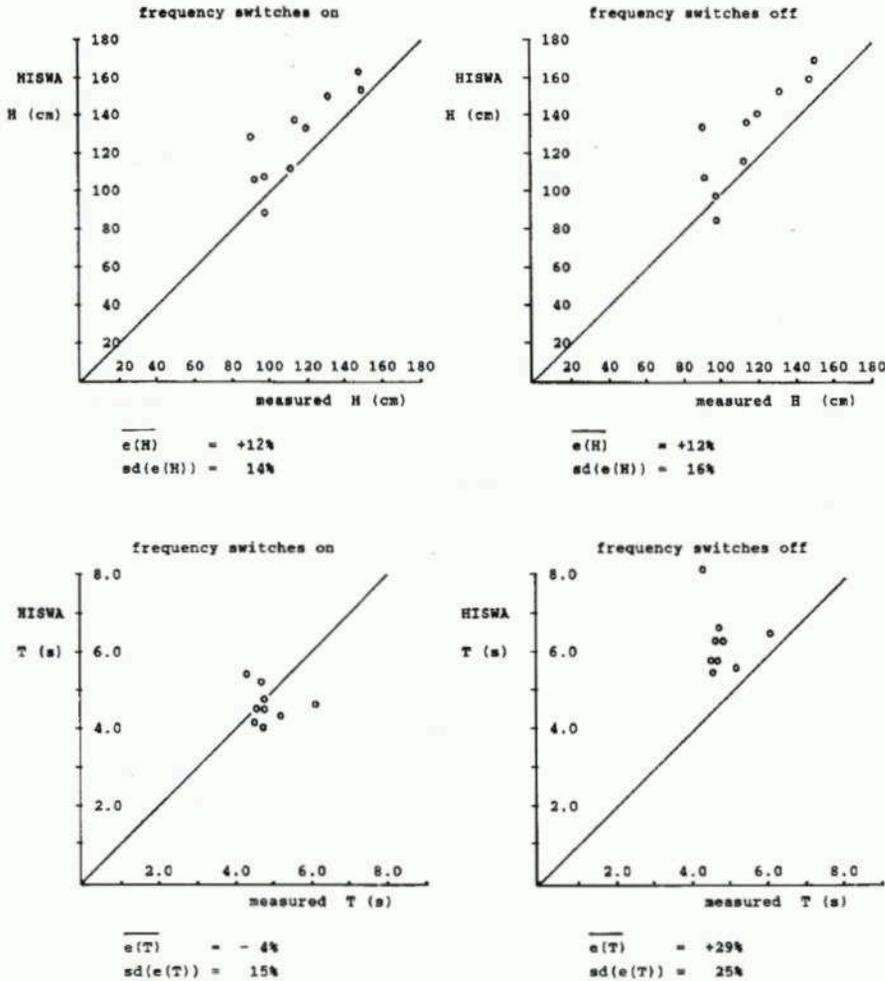


Abb. 1 (oben) u. 2 (unten): Vergleich (Naturmessungen – Berechnungsergebnisse) von Wellenhöhen und -perioden bei vollständiger bzw. partiell ausgeblendeter Frequenzmodulation

liebig erweitern. Darüber hinaus wird der Modellbetrieb bei wachsenden Winkeln dieses Sektors erheblich rechenaufwendiger. Der Anteil sich lateral ausbreitenden Seegangs, der in dem vorgegebenen Sektor nicht mehr erfasst werden kann, ist als nicht naturgegebenes, systembedingtes Energieleck des Modells anzusehen.

Zur Abschätzung der quantitativen Bedeutung dieser Fehlerquelle wurde der für den Normalbetrieb übliche Berechnungssektor von 120 in Einzeltests auf 142 und auf das Maximum von 162 erweitert, was aber für den normalen Modellbetrieb eine erhebliche Erhöhung des Rechenaufwandes beinhalten würde. Als Untersuchungsbereich wurden die steilen Randbereiche der tiefen Rinnen ausgewählt, an denen wegen der starken Beugungseffekte optimale Voraussetzungen für laterale Seegangsausbreitung gegeben sind.

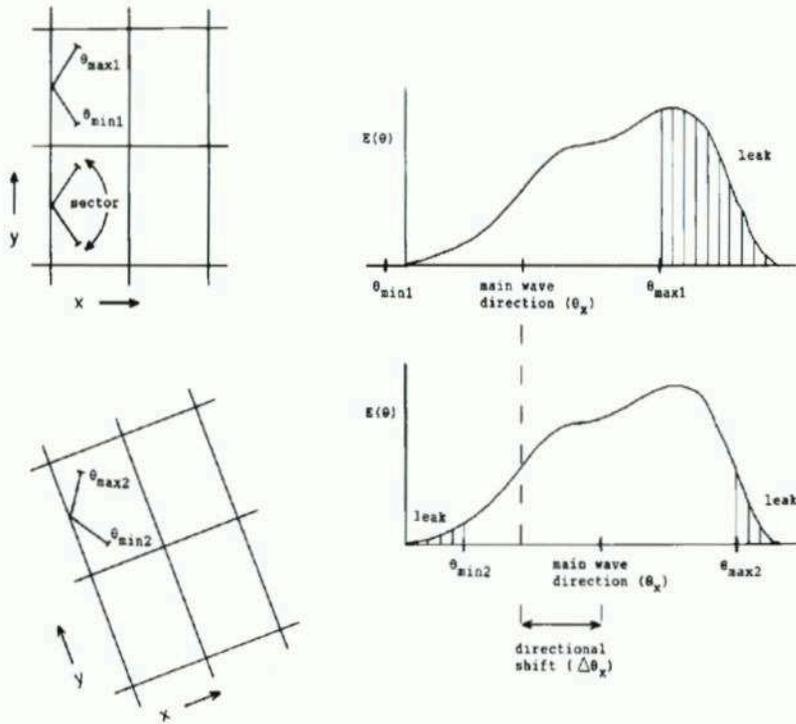


Abb. 3: Verminderung des Energielecks durch geeignete Drehung des Rechengitters

Insgesamt läßt sich das Ergebnis dieser Tests wie folgt zusammenfassen: Bei weitester Öffnung des Winkels auf 162° konnte das Energieleck auf ein Drittel reduziert werden (DEN ADEL et al., 1991), die signifikante Wellenhöhe veränderte sich hierdurch nur um 4%. Hiermit dürfte aufgrund der gewählten extremen Randbedingungen der Tests auch eine Marge für die obere Fehlergrenze für die im Modell zu erwartenden Fehler infolge von Energielecks gegeben sein.

Eine Reduzierung von Energielecks wird zudem durch die vollständige Frequenzmodulation erreicht. In der Regel nehmen die Perioden beim Einschwingen vom See- in das Küstengebiet und bei der Ausbreitung im Wattenmeer ab (NIEMEYER, 1983). Hierdurch bleibt die relative Wassertiefe größer als bei nicht modulierten Frequenzen, wodurch wiederum die Ausbildung von Energielecks begünstigende Refraktion weniger stark ausgeprägt wird.

Darüber hinaus ist unabhängig von den eigentlichen Rechenoperationen eine weitgehende Minimierung von Energielecks durch geeignete Drehungen des Rechengitters möglich. Hierzu ist es erforderlich, durch Vorkenntnisse oder Voruntersuchungen das Rechengitter optimal an die Fortpflanzungsrichtung des Seegangs anzupassen. Ein schematisches Beispiel für die Minimierung eines Energielecks durch verbesserte Anpassung an die mittlere Fortschrittsrichtung des Seegangs ist in Abb. 3 wiedergegeben. In Küstengebieten mit starken hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen ist eine derartige Abschätzung durch erfahrenes Personal ohne Schwierigkeiten zu treffen. Die Schwankungsbereiche sind hier zumeist sehr eng, so daß die Notwendigkeit ständiger Anpassungen nicht gegeben ist.

4. Fehlerabschätzungen

Die stärkste Energieumwandlung erfährt der Seegang im Modellgebiet durch die Energieumwandlung auf dem Riffbogen des Norderneyer Seegats (NIEMEYER, 1983, 1986, 1987). Alle wesentlichen in HISWA enthaltenen Mechanismen mit Ausnahme der Wechselwirkungen von Seegang und Strömungen treten in diesem Bereich evident auf. Von daher erscheint es zweckdienlich, Fehlerabschätzungen in einem ersten Schritt für diesen Bereich außerordentlich starker Änderungen des Seegangs vorzunehmen. Vorab ist mit zwei Datensätzen eine Optimierung für die Parameter des Brecherkriteriums im Modell nach BATTJES und JANSSEN (1979) vorgenommen worden.

Für insgesamt zehn Berechnungsfälle sind die im Modell berechneten Veränderungen der signifikanten Wellenhöhen vom Küstenvorfeld bis zum Inselvorstrand von Norderney mit Naturmessungen verglichen worden. Hierbei ist ein mittlerer prozentualer Fehler von -4% bei den Wellenperioden und +12% bei den signifikanten Wellenhöhen eingetreten. Während bei den Perioden nur eine geringe Schwankungsbreite vorhanden ist, ist bei den signifikanten Wellenhöhen eine Abnahme des Fehlers mit wachsenden Höhen erkennbar (Abb. 1 u. 2). Die Übereinstimmung zwischen Modell- und Meßwerten wird – insbesondere hinsichtlich der mit der Wellenhöhe steigenden Qualität – als ermutigend empfunden, zumal durch die zusätzliche Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Seegang und Strömungen noch weitere Optimierungsreserven in dem Modell stecken.

In diesem Zusammenhang ist für einen Berechnungsfall separat die anteilige Wirksamkeit der hier bei der Modellierung berücksichtigten Quellen und Senken für diesen Bereich untersucht worden (Abb. 4). Das Modell wurde im Referenzfall mit der Wirkung von örtlichem Wind, Bodenreibung und Brechen gerechnet. Danach wurde sukzessiv jeder dieser Wirkgrößen bei einem Rechenlauf des Modells eliminiert. Das Gesamtergebnis zeigt, daß bei Berücksichtigung aller Quellen und Senken das optimale Ergebnis im Vergleich zu den Na-

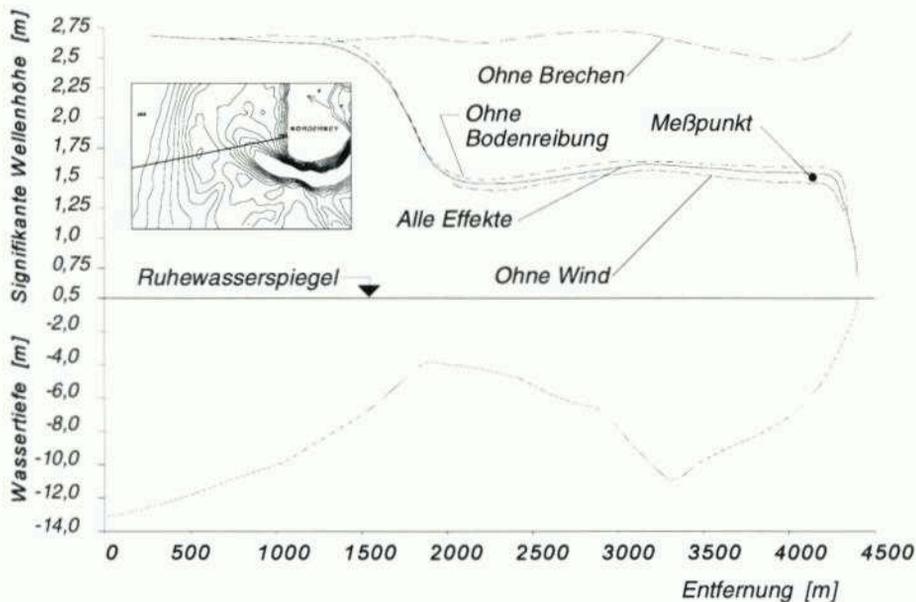


Abb. 4: Anteilige Wirksamkeit von örtlichem Wind, Bodenreibung und Brechen auf die Modellergebnisse (DEN ADEL et. al., 1991)

turdaten erreicht wird (Abb. 4). Der im Modell ermittelte Wert mit einer Reduktion von 43% liegt nicht nur eng bei dem Wert der Vergleichsmeßreihe, sondern entspricht auch nahezu deckungsgleich dem von NIEMEYER (1983, 1987c) ermittelten Durchschnittswert einer Vielzahl von Naturmessungen.

5. Morphologie des Modellgebietes

Das Modellgebiet umfaßt das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats einschließlich des vorgelagerten Küstenvorfeldes. Als Teil des Ostfriesischen Wattenmeeres wird es durch für dieses Gebiet charakteristische morphologische Großformen geprägt: Düneninseln, Seegat mit Ebb- und Flutdelta sowie ein Tidebecken mit den tributären Rinnensystemen des Seegats und Wattwasserscheiden (Abb. 5). Wesentlich für die Gesamtabläufe im System ist die Kette seewärts vorgelagerter Düneninseln, die vom Festland durch Watten wechselnder Ausdehnung getrennt sind. Die Füllung und Entleerung dieser Gebiete erfolgt im Tiderhythmus durch die Seegaten mit schmalen, tiefen Rinnen über ein weitverzweigtes System von Baljen und Prielen. Seewärts sind die Seegaten von Riffbögen (Ebbdeltas) begrenzt. In dieser Gleichgewichtsformation von Seegang und Strömungen und des daraus resultierenden Küstenquer- und -längstransports verzweigt sich das Seegat in eine Anzahl von Stromrinnen, die von einer Kette amphibischer Platen separiert werden. Über die Riffbögen erfolgt zum einen die Litoraldrift zwischen den Düneninseln und zum anderen der Materialaustausch zwischen offener See und Watt, für den die Riffbögen eine Pufferfunktion (STIVE u. EYSINK, 1989; NIEMEYER, 1990) haben.

Die Seegaten bilden die Verbindung zwischen dem Seegebiet und dem Wattenmeer, das in deren Nähe noch stark in Rinnen und amphibische Bereiche gegliedert ist. Mit wachsender Entfernung vom Seegat werden die amphibischen Bereiche zunehmend großflächiger und höher als in Nähe des Seegats bis hin zur Ausbildung von Verlandungsbereichen als Übergang zu Hellern oder Salzwiesen. Das vielfältige morphologische Formeninventar wird von der gestaltenden Kraft des Seegangs mitgeprägt, verändert ihn aber auch in erheblichem Maß bei seinem Fortschritt von der offenen See in das Küstenvorfeld und bei seiner Fortpflanzung auf den Watten vor dem Erreichen der Insel- und Festlandsküsten. Es war daher nicht nur sinnvoll, sondern auch erforderlich, die Topographie des Untersuchungsgebietes bei der Konzeption des Modells zu berücksichtigen.

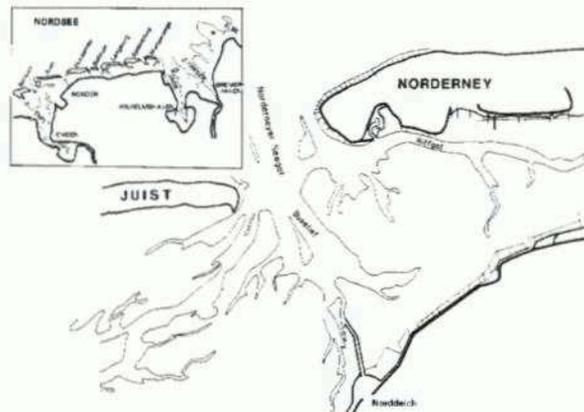


Abb. 5: Lageplan des Einzugsgebietes des Norderneyer Seegats

Der mittlere Tidenhub variiert im gesamten Tidebecken nur geringfügig zwischen 2,4 m am Pegel Norderney und 2,6 m nahe der Festlandsküste und liegt somit insgesamt im hoch mesotidalen Bereich. Die aus Phasenverschiebungen entstehenden Gradienten erreichen bei Normaltiden sowohl in West-Ost- als auch in Nord-Süd-Richtung Maximalwerte von 2 bis 3 dm (NIEMEYER, 1990). Nipp- und Springtiden modulieren den Tidenhub um bis zu $\pm 0,7$ m. Der höchste bei Sturmfluten gemessene Stau betrug am 16. Februar 1962 am Pegel Norderney 2,87 m. Nach der hydrodynamischen Seegatklassifikation (NIEMEYER, 1990) ist das Norderneyer Seegat mit einem mittleren Tidenhub von 2,4 m und einer im Jahresmittel zwischen 0,7 bis 1,0 m betragenden signifikanten Wellenhöhe im Küstenvorfeld als tide- und seegangsgeprägtes Seegat mit überwiegender Tideeinwirkung zu klassifizieren.

Hinsichtlich der Ausbildung von Seegang im Küstenvorfeld, der auf die Watten ein- schwingt, ist der Sektor der Windrichtungen von West bis Nordost bedeutsam; für die Entwicklung erhöhter Wasserstände, die eine Fortpflanzung energiereichen Seegangs ermöglichen, der von West bis Nordwest. Außer bei erniedrigten Wasserständen tritt die Entwicklung ortständiger Windsee im Wattenmeer vornehmlich bei östlichen bis südwestlichen Windrichtungen auf. Der aus der Nordsee in das Wattenmeer einschwingende Seegang wird durch die Riffbrandung im Bereich des Ebbdeltas vollständig umgewandelt, wobei ein neues Seegangssystem angeregt wird, das sich – primär bestimmt von Wechselwirkungen mit den morphologischen Formationen – über das Seegat und dessen tributäre Rinnen auf die Watten bis an die Insel- und Festlandsküsten fortpflanzt.

6. Ausgewählte Ergebnisse

6.1 Randbedingungen

Das HISWA-Modell für das Küstenvorfeld und das Wattenmeer bei Norderney wird durch gemessene Parameter des Seegangs als Anfangsbedingung am seawärtigen Rand gesteuert. Darüber hinaus werden die Wasserstände am Pegel Norderney-Riffgat und die Winddaten der Wetterstation Norderney als Randwerte in das Modell eingegeben. Eine Übersicht dieser Steuergrößen ist in Tab. 1 zusammengefaßt. Im folgenden werden anhand ausgewählter Berechnungsbeispiele einige für das Untersuchungsgebiet charakteristische Vorgänge seegangsbedingter hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen im Zusammenhang mit den aus bisherigen Naturuntersuchungen vorhandenen Erkenntnissen diskutiert. Primäres Ziel ist hierbei zu prüfen, ob und inwieweit das Modell in der Lage ist, die physikalisch relevanten Prozesse naturähnlich zu reproduzieren, und in welchem Umfang das Modell die Möglichkeit bietet, vertiefte Einsichten in die Physik der Vorgänge zu gewinnen und punktuell vorhandenes Wissen zu erweitern. Ergänzend sind in einem Anhang weitere Ergebnisse von Modellrechnungen in Form von Ergebnisgrafiken zusammengefaßt, die zusätzliche Einblicke in die Leistungsfähigkeit des Modells gewähren.

6.2 Berechnungsergebnisse für einzelne Seegangereignisse

6.2.1 Modellrechnung 01

Bei einem Wasserstand von NN + 2,10m am Pegel Norderney-Riffgat und einer signifikanten Wellenhöhe von

$$H_s = 2,69 \text{ m}$$

Tabelle 1: Hydrographische und meteorologische Steuergrößen für das Modell

Sturmereignis			Randbedingungen am seewärtigen Modellrand des äußeren Teilmodells				Meteorologische Randbedingungen	
Nr	Meßzeitraum	zugehörige Hoch/Niedrigwasserereintrittszeiten	Wasserstand [NN+ m]	sign. Wellenhöhe [m]	Wellenperiode [s]	mittl. Wellenangriffsrichtung	Windgeschwindigkeit [m/s]	Windrichtung
01	24.01.86 09:32-09:42	10:10 16:24	+2.10	2.69	6.4	317°	13.8	310°
02	24.01.86 10:05-10:15	10:10 16:24	+2.20	2.61	7.6	315°	14.6	300°
03	20.10.86 20:34-20:44	00:40 18:20	+0.35	1.53	5.5	360°	16.7	350°
04	20.10.86 22:34-22:44	00:40 18:20	+1.35	1.70	6.2	325°	15.8	320°
05	21.10.86 00:34-00:44	00:40 18:20	+2.09	1.65	6.2	320°	14.4	320°
06	21.10.86 02:34-02:44	00:40 18:20	+1.78	1.69	5.4	310°	16.4	300°
07	21.10.86 04:34-04:44	00:40 18:20	+0.70	1.77	5.7	310°	14.9	300°
08	10.09.84 15:11-15:21	12:10 19:20	+1.28	1.69	5.7	317°	18.6	320°
09	11.09.84 03:58-04:11	00:45 07:20	+0.20	1.93	6.6	313°	10.3	290°
10	02.02.83 02:22-02:32	03:22 10:53	+3.35	4.04	8.08	310°	18.5	300°

am äußeren Rand des Modells im Küstenvorfeld ergeben sich im Modellgebiet Isolinien der signifikanten Wellenhöhen, die etwa bis zu einer Tiefe von NN -6,00 m mit $H_s = 2,5$ m parallel zu den Konturen der Bodentopographie verlaufen (Abb. 6). Danach setzen starke Wechselwirkungen mit der stark gegliederten Morphologie des Riffbogens ein, die zu Deformationen der Wellenhöhenisolinien führen. Die Umformungen in Anpassung an die Morpho-

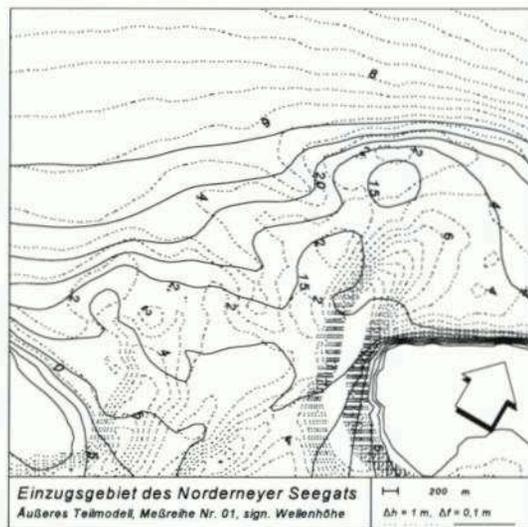


Abb. 6: Isolinien der signifikanten Wellenhöhen für den Berechnungsfall 1 mit hinterlegter Bodentopographie (gepunktete Linien, dünne Beschriftung)

logie sind um so ausgeprägter, je mehr die Formationen in Richtung der Wellenfortpflanzung liegen. Im Bereich von Kalfamergat, Spaniergat und Schluchter richten sich die Isolinien der Wellenhöhen daher stärker an den Tiefenlinien aus als im wesentlich tieferen Norderneyer Seegat, das fast quer zur Einschwingrichtung des Seegangs liegt. Bis zum Erreichen des Norderneyer Seegats hat der von See einlaufende Seegang erheblich intensivere Umformungen erfahren als in den Rinnen des Ebbdeltas. Wesentlichstes Merkmal der Wechselwirkungen von Seegang und Morphologie im Bereich des Ebbdeltas ist die enorme Energiedissipation auf dem Riffbogen, die auf den Nordwestgründen im östlichen Teil viel stärker konzentriert ist als im zentralen oder westlichen Bereich und sich auch in einer starken Abnahme der Wellenhöhen widerspiegelt (Abb. 7). Ein Grund hierfür ist in dem steilen Anstieg des Untergrunds zu suchen, wie bereits bei Naturuntersuchungen (NIEMEYER, 1987a) ermittelt worden ist.

Wesentlich nachhaltiger auf den Seegang ist die Wirkung der tiefen Rinne des Norderneyer Seegats auf die räumliche Verteilung der mittleren Wellenperioden, die beim Durchschwingen durch die Rinne kaum verändert werden, während die Wellenhöhen abnehmen. Die stärksten Änderungen der mittleren Periode des Seegangs findet auch im Bereich der stärksten Energiedissipation auf den Nordwestgründen statt. Ähnlich wie bei den Perioden verhalten sich – nicht unerwartet – die mittleren Wellenlängen (Abb. 8), wobei die Kopplung von Isolinien und Tiefenlinien insbesondere im Norderneyer Seegat bei den Wellenlängen noch deutlicher ist als bei den Perioden. Trotz der intensiven seawärts vorgelagerten Energiedissipation des Seegangs auf den Nordwestgründen schwingen die relativ längsten Wellen in die tiefe Rinne des Norderneyer Seegats ein.

Im äußeren Teilmodell prägen die Wechselwirkungen von Rinnen und Platen mit dem Seegang deutlich den Verlauf der Isolinien der signifikanten Wellenhöhen. Nach Passieren von Riffbogen und Seegat lassen sich vergleichbare Auswirkungen morphologischer Formen auf die Ausbreitung des Seegangs kaum noch erkennen. So breitet sich der Seegang mit den relativ größten Wellenhöhen dort am stärksten über die Steinplate aus, und auf dem Watt Rücken Hohes Riff sind höhere Wellen als im inneren Teil des Riffgats. Nachdem der Seegang auf den Platen des Riffbogens eine erhebliche Verformung und Abschwächung erfahren hat,

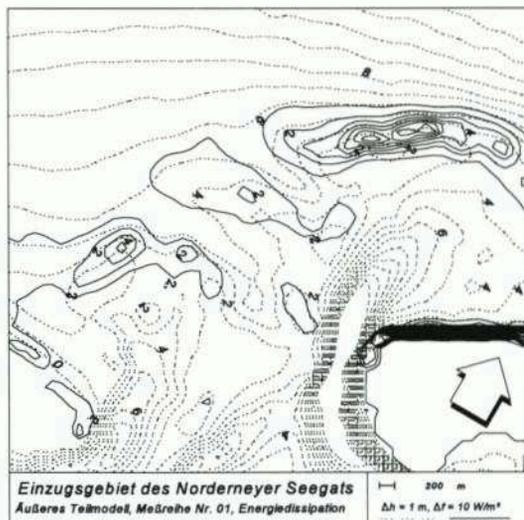


Abb. 7: Isolinien der Energiedissipation mit Bodentopographie

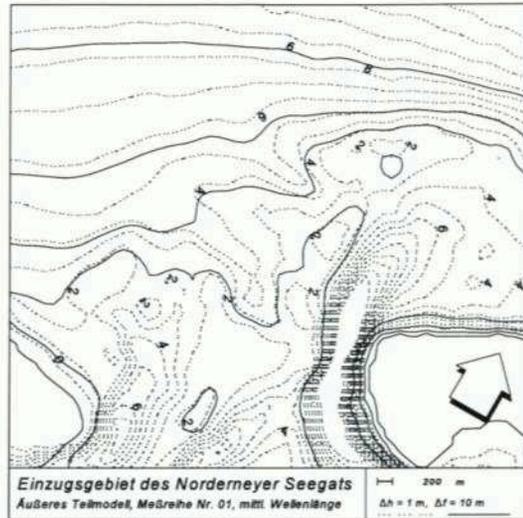


Abb. 8: Isolinien der mittleren Wellenlängen mit Bodentopographie

sind die größeren Wassertiefen in den Rinnen offensichtlich von nachrangiger Bedeutung für seine Höhenentwicklung. Selbst Wassertiefen von mehr als 10 m, wie die im Busetief, bleiben ohne erkennbaren Einfluß auf die Isolinien der Wellenhöhen. Einzig die Itzendorfer Plate ist aufgrund ihres hohen Geländeniveaus eine bereichsweise signifikant den Seegang dämpfende morphologische Großform.

Die enormen Veränderungen des Seegangs beim Einschwingen von See auf die Küste lassen sich ebenfalls mit Hilfe einer dreidimensionalen Darstellung von Watttopographie und Isolinien der signifikanten Wellenhöhen besonders verdeutlichen (Abb. 9 u. 10). Diese Grafiken basieren auf Daten einer Modellrechnung, bei der die unmittelbare Windwirkung im Modell eliminiert worden ist. Der ausgeprägte Peak im Hintergrund läßt die starke Abnahme der Wellenhöhen am Nordstrand von Norderney, die in vergleichbarer Form auch im Bereich des Seegats auftreten, deutlich erkennbar werden. Bei der Ausbreitung wattseitig des Seegats erfährt der unmittelbar vom Seegat auf die Festlandküste einschwingende Seegang die geringsten Höhenverluste, wodurch der in unmittelbarer Wirkrichtung des Seegats liegende Abschnitt den stärksten Seegangsbelastungen der Festlandsküstenbereiche im Einzugsgebiet ausgesetzt ist. Dieser sogenannte Tunneleffekt der Seegaten spiegelte sich in der Vergangenheit in Landverlusten wider, die sich mit der Verlagerung der Seegaten ebenfalls in wechselnden Festlandsbereichen auswirkten (NIEMEYER, 1990). In Lee der Inseln breitet sich hingegen nur schwächerer Seegang aus, der zu den Wattwasserscheiden hin weiter abnimmt und so die Voraussetzungen für höherliegende Watten mit feiner werdenden Sedimenten bis hin zu Verlandungsbereichen und der Ausbildung von Salzwiesen ermöglicht (NIEMEYER, 1983, 1987b).

6.2.2 Modellrechnung 02

Die Randbedingungen des Fallbeispiels 2 ähneln denen des Falls 1 hinsichtlich der meisten Parameter (Tab. 1). Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß die mittlere Wellenperiode mit 6,7 s gegenüber 5,3 s um etwa 20% länger ist. Hinsichtlich der räumlichen Ver-

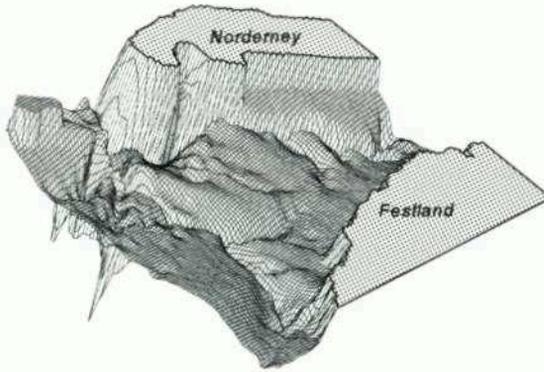


Abb. 9: Topographie des inneren Modellgebietes mit Blick auf die Insel Norderney

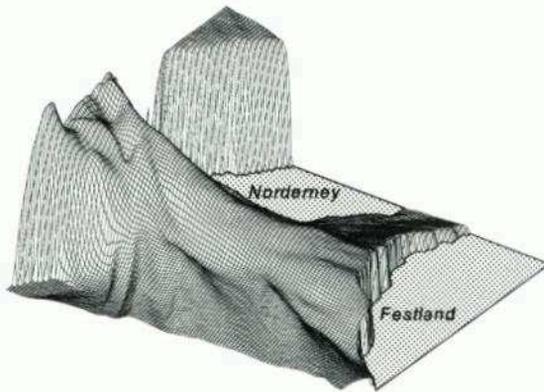


Abb. 10: Verteilung der Wellenhöhen im inneren Modellgebiet

teilung der signifikanten Wellenhöhen hat aber diese Differenz kaum Auswirkungen, wie der Verlauf von deren Isolinien im Modellgebiet zeigt (Abb. 11 u. 6). Der unmittelbare Vergleich absoluter Wellenhöhen veranschaulicht hingegen, daß trotz nur geringerer Unterschiede der Ausgangswellenhöhen im zweiten Fall die Wellenhöhen während des gesamten Umformungsvorganges auf den Platen etwa 10% höher sind als im ersten. Im Norderneyer Seegat sind die Isolinien der signifikanten Wellenhöhen für beide Berechnungsbeispiele unterhalb einer Wellenhöhe von

$$H_s \leq 1,25\text{m}$$

nahezu identisch (Abb. 12). Insgesamt ist aber die Energiedissipation trotz der geringeren Höhenabnahmen bei ähnlichem Verlauf im zweiten Fall höher als im ersten (Abb. 13). Die Isolinien der mittleren Wellenperiode sind auf höherem Niveau kongruent zu denen des ersten Falls (Abb. 14). Auch hier zeigt sich der große Einfluß der tiefen Rinnen des Norderneyer Seegats und des Kalfamergats, eine Einschätzung die auch für den Verlauf der mittleren Wellenlängen zutrifft (Abb. 15).

6.2.3 Modellrechnungen 05 und 07

Die äußeren Randbedingungen sind bis auf die um mehr als einen Meter niedrigere signifikante Wellenhöhe nahezu identisch mit denen des Falls 1, der auch hier als Referenz dienen soll. Ein unmittelbarer Vergleich der Isolinien für die signifikanten Wellenhöhen (Abb. 16) veranschaulicht deutlich die höhenlimitierende Wirkung des Riffbogens. Nach Querung des Platenbereichs des Ebbdeltas ergeben sich – trotz der stark unterschiedlichen Ausgangswellenhöhe – nahezu identische Isolinien mit Wellenhöhen von 1,5m. Größere Unterschiede für die Wellenhöhen in einer Größenordnung von etwa 15–20% ergeben sich nur in der tiefen Rinne des inneren Teils des Norderneyer Seegats.

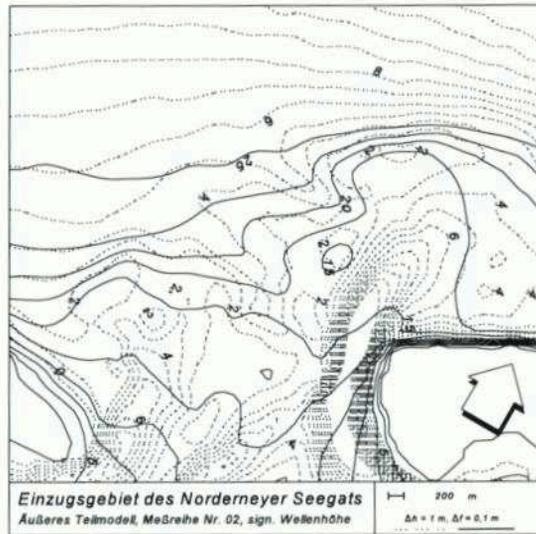


Abb. 11: Isolinien der signifikanten Wellenhöhen für den Berechnungsfall 2

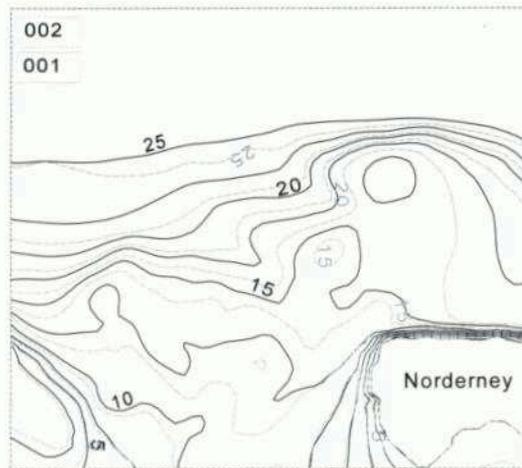


Abb. 12: Vergleich der sign. Wellenhöhen der Berechnungsfälle 1 u. 2, Angabe der Wellenhöhen in (dm)

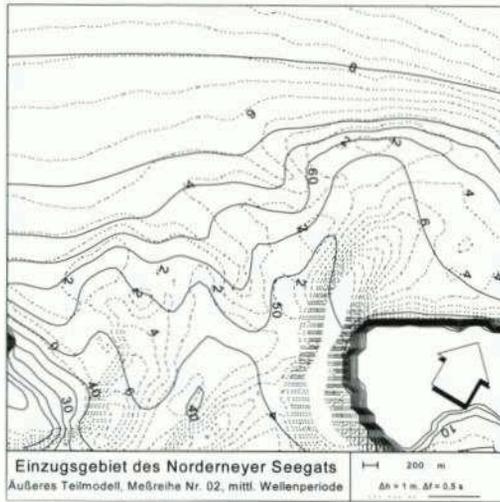


Abb. 13: Isolinien der mittl. Wellenperiode für den Berechnungsfall 2, Angaben der Perioden in (0,1 s)

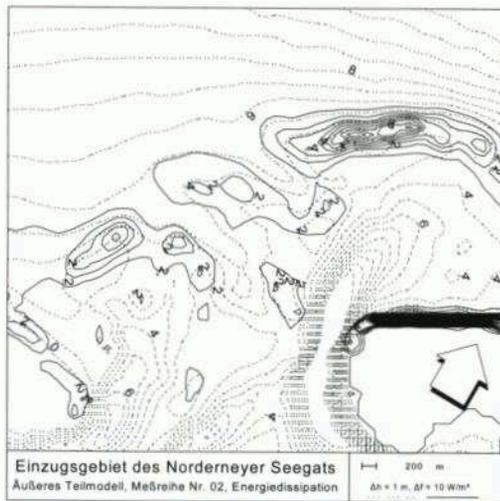


Abb. 14: Isolinien der Energiedissipation für den Berechnungsfall 2

Die Bedeutung der Wassertiefen auf dem Riffbogen wird für den Fall 7 mit erheblich niedrigeren Wasserständen (Tab. 1) evident: Die Abnahme der signifikanten Wellenhöhen nimmt – bei annähernd gleichen Ausgangswellenhöhen – deutlich zu. Die mittleren Wellenperioden verteilen sich gemäß der Isolinien zwar gleichförmig, doch sie sind im Fall 5 – analog zu den Ausgangswerten – länger (Abb. 17). Allerdings sind offensichtlich die Ausgangsbedingungen hierfür nicht primär maßgebend: Die mittleren Wellenlängen sind im Fall 5 am äußeren Rand des Berechnungsgebietes noch geringfügig kürzer, was aufgrund der Zusammenhänge von relativer Wassertiefe, Wellenperiode und -länge zwingend ist, nach der Verformung des Seegangs im Bereich des Riffbogens aber durchweg etwas länger als im Fall 1.

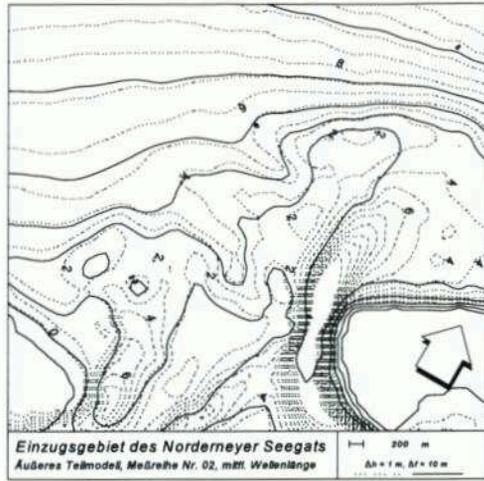


Abb. 15: Isolinen der mittl. Wellenlänge für den Berechnungsfall 2

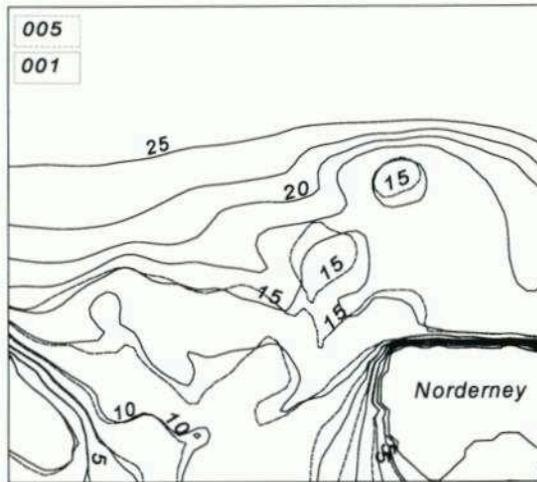


Abb. 16: Vergleich der Isolinen der sign. Wellenhöhen der Berechnungsfälle 1 u. 5, Angabe der Wellenhöhen in (dm)

Diese Unterschiede sind aber nach dem Passieren des Seegats bei der Ausbreitung des Seegangs im Tidebecken des Norderneyer Seegats nicht mehr vorhanden. Dieser Vorgang entspricht früheren phänomenologischen Analysen des Seegangsklimas auf der Grundlage von Naturmessungen in diesem Gebiet. Hierbei wurde festgestellt, daß der Seegang im Seegat eine Filterung erfährt, die zu einem – weitgehend von Wasserstand und Anlaufrichtung unabhängigen – einheitlichen Ausbreitungsverhalten im Tidebecken des Seegats führt (NIE-MEYER, 1983, 1986).

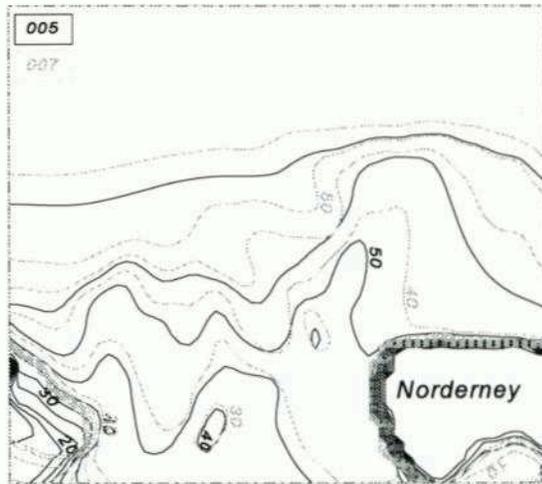


Abb. 17: Isolinen der mittl. Wellenperioden der Berechnungsfälle 5 und 7, Angaben der Perioden in (0,1 s)

6.3 Veränderungen kennzeichnender Seegangparameter

6.3.1 Vergleich von Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnissen

Das Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnis ist nach Naturuntersuchungen des Seegangs im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste sowohl für die Energieumwandlung auf den Riffbögen der Seegaten (NIEMEYER, 1983, 1986, 1987a) als auch für hydrodynamisch-morphologische Wechselwirkungen im Wattengebiet (NIEMEYER, 1983, 1984, 1991; NIEMEYER, GÄRTNER u. GRÜNE, 1992) ein bedeutsamer Faktor. Aus diesem Grund wurden ergänzend zu den Standardausgaben des Modells HISWA für die Modellrechnungen auch Ergebnisgrafiken für diese Parametrisierung erstellt.

Es werden die Ergebnisse der Modellrechnungen für die Fälle 1, 5 und 7 verglichen. Hierbei sind folgende Variationen der Anfangs- und Randbedingungen (Tab. 1) von Interesse: Die Fälle 1 und 5 weisen annähernd gleich hohe Wasserstände mit einem Stau von etwa einem Meter auf, während sich die signifikanten Wellenhöhen im Küstenvorfeld um etwa die gleiche Größenordnung unterscheiden. Die Berechnungsbeispiele 5 und 7 weisen hingegen annähernd gleich hohe signifikante Wellenhöhen im Seegebiet bei einer Wasserstands Differenz von etwa 1,3 m auf.

In allen drei Fällen erhöhen sich die Verhältniszahlen von Wellenhöhen und Wassertiefen beim Einschwingen des Seegangs vom Küstenvorfeld in den Bereich des Ebbdeltas und nehmen ab, nachdem der Seegang die Platen des Riffbogens passiert hat. Erwartungsgemäß zeigen Betrachtungen der relativen Wellenhöhen H/h (Abb. 18 u. 20) im äußeren Modellgebiet sehr deutlich die intensiven Wechselwirkungen zwischen Seegang und morphologischen Formationen im Bereich des Riffbogens. Auch quantitativ wird deutlich, daß die Energieumwandlung im Bereich des Ebbdeltas – wie anhand von Naturmessungen bereits analysiert – mit der Wellenhöhen-Wassertiefen-Relation steigt. Dementsprechend hat die hohe Energiedissipation im Berechnungsfall 1 dazu geführt, daß der Verhältniszahl nach Passieren des Riffbogens so stark abgenommen hat, daß die Unterschiede zu den Seegangsverhält-

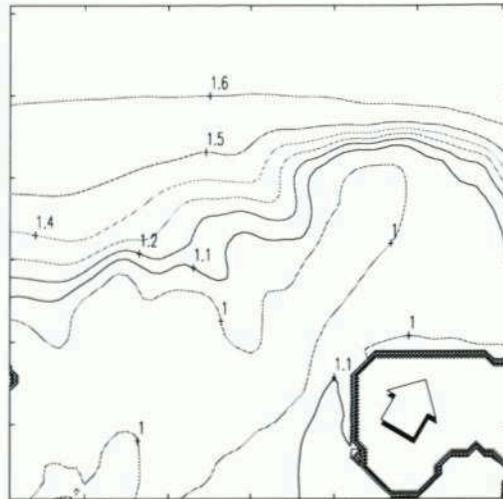
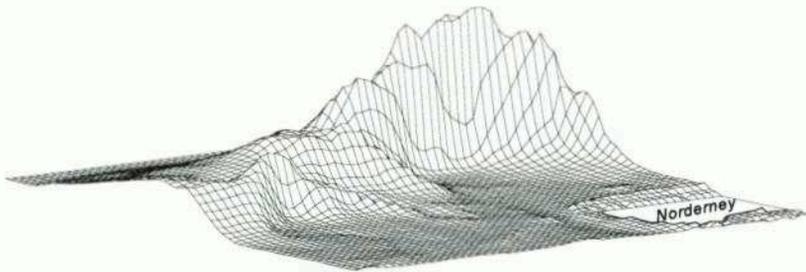
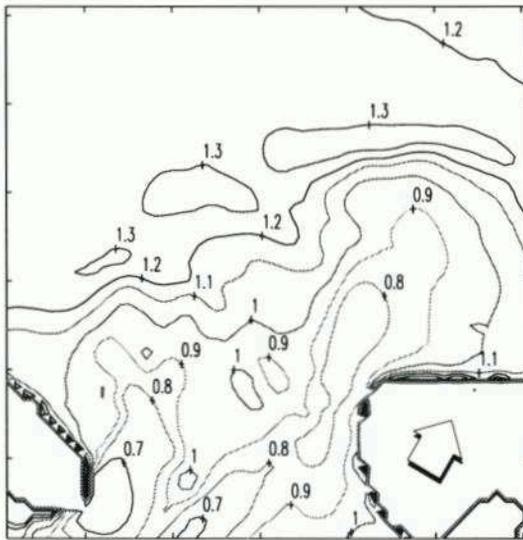


Abb. 18: Verhältnis (Fall 1/Fall 5) relativer Wellenhöhen (H/h)

nissen des Berechnungsfall 5 fast vollständig abgebaut worden sind. Diese Aussagen erfahren eine klare Bestätigung bei unmittelbarem Bezug der Energiedissipation zur Wassertiefe (Abb. 19). Die Modellergebnisse liefern somit – in Einklang mit bisherigen Erkenntnissen – glaubwürdige quantitative Angaben: Im Berechnungsbeispiel 1 mit dem deutlich stärkeren Seegang im Küstenvorfeld findet auf dem Riffbogen im Bereich der Nordwestgründe vor dem Inselvorstrand von Norderney eine im Maximum 39,4-fach höhere Energiedissipation als im Berechnungsfall 5 statt. Im westlichen Teil des Riffbogens vor dem Seegat sind die Unterschiede der Energiedissipation insgesamt geringer. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß sich der Bereich der Energieumwandlung – entsprechend der örtlichen Platengeometrie – räumlich weiter erstreckt als im Gebiet der Nordwestgründe, was ebenfalls in Einklang mit den aus Naturmessungen abgeleiteten Erkenntnissen (NIEMEYER, 1987a) steht.

Die hier diskutierten Modellergebnisse (Abb. 18 u. 19) zeigen, daß bei in etwa gleich hohen Wasserständen Zunahmen der Wellenhöhen im Küstenvorfeld zu einem exponentiellen Anstieg der Energiedissipation auf dem Riffbogen führt, wodurch die Wellenhöhen so stark reduziert werden, daß im Bereich des Seegats zwischen Juist und Norderney das Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnis in beiden Fällen – unabhängig von den Höhen der Ausgangswellen – gleich bleibt.

Auch ein Vergleich der Berechnungsbeispiele 5 und 7 bestätigt die Ergebnisse der anderen Fallvergleiche wie der Erkenntnisse aus Naturmessungen (Abb. 20). Beim Berechnungsbeispiel 7 zeigt sich im Vergleich zum Fall 5, daß das Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnis für die Energieumwandlung des Seegangs beim Einschwingen über den Riffbogen auf den Inselvorstrand und in das Seegat ein sehr relevanter Faktor ist. Dessen Werte nehmen beim Einlaufen in den Bereich des Ebbdeltas auf den Platen im Fall 7 schneller zu als beim Berechnungsbeispiel 5. Nach dem Passieren des Riffbogens fallen die Verhältniswerte aber wesentlich schneller ab als im Fall 5. Ursache hierfür ist – bei etwa gleich hoher signifikanter Wellenhöhe – der beim Fall 5 um 1,39 m höhere Wasserstand. Tendenziell ergibt sich ein gleichartiges Bild ebenso für das Seegat wie auch für sein wattseitig gelegenes Flutdelta (Abb. 20).

Abb. 19: Verhältnis (Fall 1/Fall 5) der relativen Energiedissipation ($\Delta E/h$)Abb. 20: Verhältnis (Fall 7/Fall 5) relativer Wellenhöhen (H/h)

Insgesamt wird an diesen Ergebnissen im Vergleich mit vorhandenen Erkenntnissen aus Naturuntersuchungen (NIEMEYER, 1983, 1984, 1986, 1987a, 1991; NIEMEYER, GÄRTNER u. GRÜNE, 1992) deutlich, daß die Modellergebnisse nicht nur an einzelnen Punkten, an denen Kontrolldaten zur Verfügung stehen, quantitativ naturähnlich sind, sondern daß auch die Physik der Prozesse realistisch reproduziert wird.

6.3.2 Wellensteilheiten

Eine weitere entsprechende Übereinstimmung mit bisherigen Erkenntnissen zur ursächlichen Deutung (NIEMEYER, 1987a) ergibt sich auch hinsichtlich der Bedeutung der Ausgangsteilheit des Seegangs für die Riffbrandung: Im Gebiet der Nordwestgründe passiert der Seegang beim Einschwingen den relativ steilsten Anstieg der Sohle im Modellgebiet mit entsprechend zunehmender Steilheit infolge Shoaling. Dementsprechend erfolgt hier in beiden Fällen – gemessen an der Variation des Wellenhöhen-Wassertiefen-Verhältnisses – eine räum-

lich wesentlich konzentriertere Energieumwandlung, für die in den übrigen Bereichen des Riffbogens eine längere Laufstrecke erforderlich ist (Abb. 21).

Die Unterschiedlichkeit der hier modellierten Seegangsverhältnisse zeigt sich auch bei einem Vergleich der Wellensteilheiten. Im Fall 1 (Abb. 21) liegt die Ausgangsteilheit am äußeren Rand des Modells im Mittel bei 0,042, die Aufsteilung im Bereich des Riffbogens führt zu einem Wert von über 0,05. Im Berechnungsbeispiel 5 sind die Steilheiten am seeseitigen Rand des Modellgebietes noch deutlich niedriger als im Fall 1 (Abb. 22); sie steigen aber im Bereich des Riffbogens vor dem Inselvorstrand und dem Seegat zu fast gleich hohen Werten wie beim Berechnungsbeispiel 1 an (Abb. 23). Im Berechnungsfall 1 steigen die Steilheiten aber nach dem Passieren des Ebbdeltas stärker an als im Fall 5. Besonders prägt sich dieser Effekt in der tiefen Rinne des Seegats aus, wo teilweise wieder fast das Verhältnis der Steilheiten im Küstenvorfeld erreicht wird. Wie ein Vergleich mit den anderen Rinnenbereichen des Modellgebiets zeigt, in denen ein derartiger Effekt nicht mit vergleichbarer Deutlichkeit erkennbar ist, kann dieser Vorgang nicht allein durch die Tiefe der Ebbrinne des Seegats bewirkt worden sein.

6.3.3 Zusammenhänge von mittlerer Wellenlänge und Wind

Um die Auswirkungen des örtlichen Windfeldes auf die Wellenlängen im Wattgebiet untersuchen zu können, wurde das Berechnungsbeispiel 1 für das innere Modell sowohl mit als auch ohne Windeinwirkung berechnet, und die Ergebnisse durch Gegenüberstellung von Isolinen dargestellt (Abb. 24). Hieran wird zum einen die im Wattengebiet dominierende Wechselwirkung von Seegang und Morphologie deutlich. Zum anderen macht die Abnahme der mittleren Wellenlänge im Berechnungsfall mit Wind deutlich, daß der örtliche Wind den von See einschwingenden Seegang um hochfrequente Anteile anreichert. Auch in dieser Hinsicht stehen die Modellergebnisse mit den Ergebnissen von Naturuntersuchungen (NIEMEYER, 1983; NIEMEYER, GÄRTNER u. GRÜNE, 1992) in Einklang.

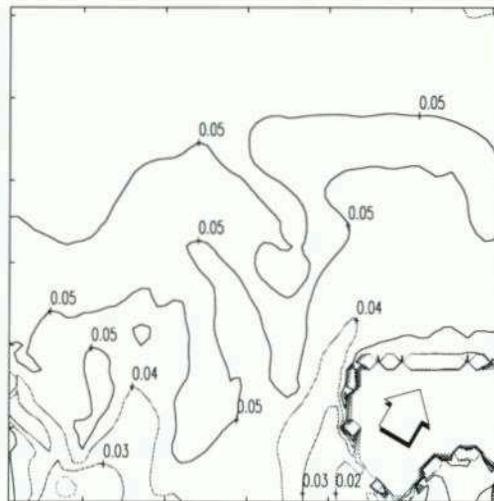


Abb. 21: Isolinen der Wellensteilheit für den Fall 1

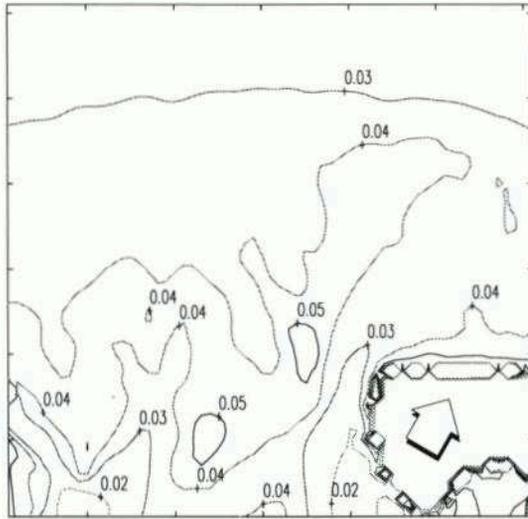


Abb. 22: Isolinien der Wellensteilheit für den Fall 5

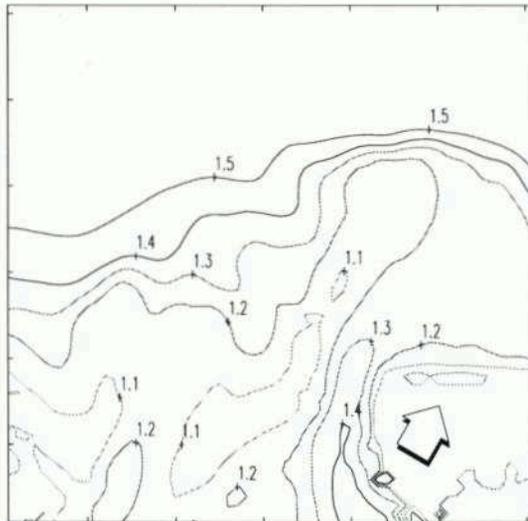


Abb. 23: Verhältnis (Fall 1/Fall 5) der Wellensteilheiten

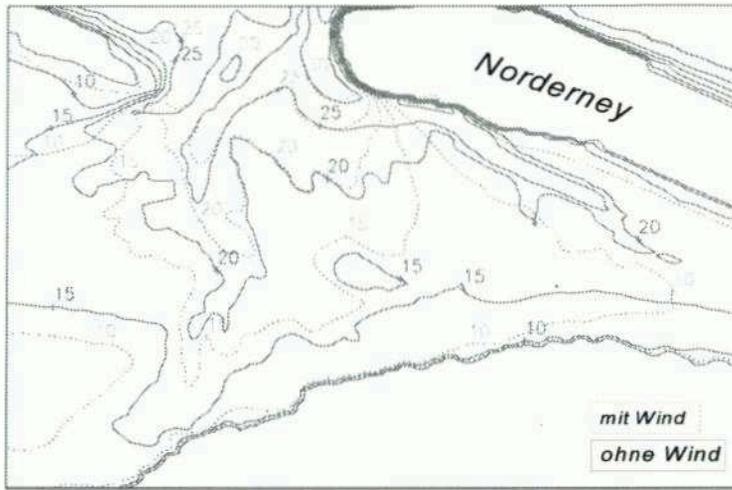


Abb. 24: Mittlere Wellenlängen (m) mit und ohne Windeinwirkung für das innere Modellgebiet

6.4 Modellierung der Seegangsausbreitung

6.4.1 Wellenhöhenentwicklung bei Sturmfluten

Anhand der räumlichen Verteilung der signifikanten Wellenhöhen in den beiden Teilmodellen soll versucht werden, ein räumliches Bild der Seegangsausbreitung bei Sturmfluten exemplarisch für die zwei Fallbeispiele 5 und 10 (Tab. 1) darzustellen. Im ersten Berechnungsbeispiel 10 wird eine Sturmflut mit einem Stau von

$$\Delta h = 2,2 \text{ m}$$

und folgenden Seegangskennwerten am äußeren Rand des Modellgebiets im Küstenvorfeld untersucht:

$$H_s = 4,04 \text{ m}, T_{m01} = 8,1 \text{ s}, \theta = 310^\circ.$$

In Tab. 2 sind die signifikanten Wellenhöhen und die mittleren Wellenperioden an der seewärtigen Modellgrenze (SEE) sowie an Referenzpunkten im Modellgebiet angegeben. Die Referenzpunkte liegen dabei im äußeren Modellgebiet (VST) am Vorstrand von Norderney und im inneren Modellgebiet an der Festlandsküste (NDD) und (RP-O). Die Tabelle erlaubt einen Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Parametern, der überwiegend gut ausfällt.

Die in Form von Isolinien mit einer Abstufung von $H_s = 0,25 \text{ m}$ graphisch dargestellte räumliche Verteilung der signifikanten Wellenhöhen (Abb. 25) zeigt deutlich die enorme seegangsdämpfende Wirkung des Riffbogens und die unterschiedliche Intensität der Riffbrandung in Abhängigkeit von der Geometrie der Platen und Rinnen des Ebbdeltas sowie des Sohlgradienten vom Vorstrand zum Riffbogen. In dessen westlichem Bereich vor dem Seegat mit großflächigen, hochgelegenen Platen und relativ tiefen, breiten Ebbdeltarinnen erfolgt die – hier als Abnahme der Wellenhöhen erkennbare – Energieumwandlung auf breite-

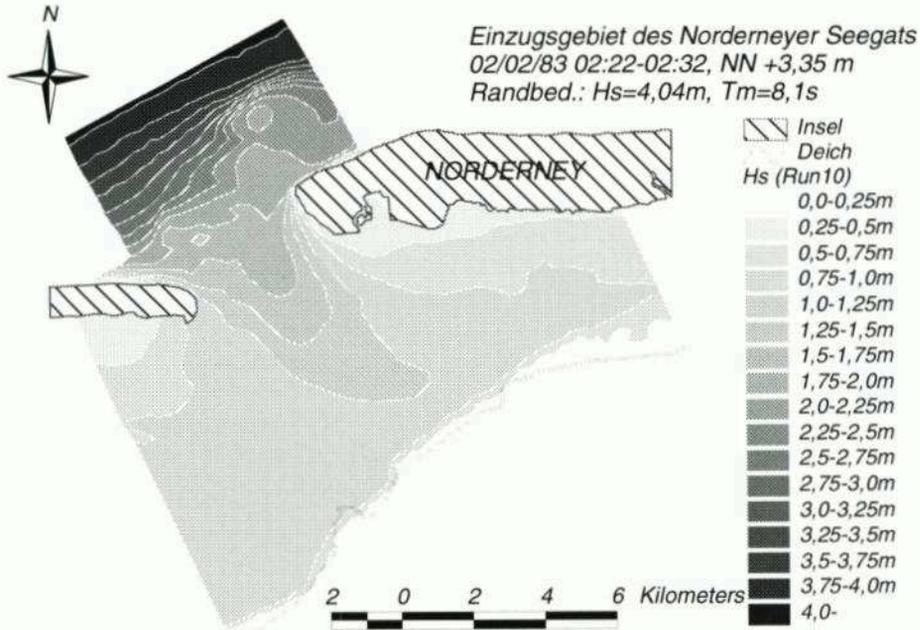


Abb. 25: Isolinien der sign. Wellenhöhen bei Sturmflut (Fall 10) für das äußere und innere Modellgebiet

Tabelle 2: Prüfung der HISWA-Berechnung am Sturmereignis Nr. 10 an verschiedenen Orten

Sturmereignis			Wellenhöhe H_s			Wellenperiode T_m		
Nr.	Datum und Zeit	Meßlokation	gemessen	HISWA	prozentualer Fehler	gemessen	HISWA	prozentualer Fehler
10	02.02.83 02.22-02.32	SEE	4,04 m	--	--	8,08 s	--	--
"	"	VST	1,84 m	1,98 m	7,6%	7,98 s	5,52 s	-30,8%
"	"	NDD	1,10 m	0,80 m	-27,3%	3,69 s	3,52 s	-4,6%
"	"	RP-O	0,92 m	0,88 m	-4,3%	3,41 s	3,59 s	5,3%
Thw _{Küffgat} 02.02.83 2.06 Uhr 844 cm PN			02.22-02.32 Uhr 835 cm PN _{Küffgat} = 840 cm PN _{NDD}					
Geländehöhe NDD NN + 0,48 cm			Höhe Sensor über Grund 15 cm				h = 2,92 m	
Geländehöhe RP-O NN + 0,44 cm			Höhe Sensor über Grund 15 cm				h = 2,96 m	

rem Raum. Im östlichen Teil des Riffbogens mit den relativ kleinflächigeren und niedriggelegeneren Platen ist hingegen die Energieumwandlung konzentrierter. Ursache hierfür ist, daß die Platengeometrie einen steileren Übergang zum Vorstrand erfordert. Hierdurch wird der Shoaling-Effekt auf den einlaufenden Seegang verstärkt, wodurch wiederum die kritische Grenzsteilheit (MICHE, 1944) eher erreicht und überschritten wird. Phänomenologische Analysen von Naturdaten (NIEMEYER, 1983, 1987a) hatten bereits gezeigt, daß die hydrodynamische Wirksamkeit des Riffbogens hinsichtlich der Seegangsdämpfung in stärkerem Maß auf diesen Effekt als auf das Überschreiten der kritischen Wellen-Wassertiefen-Relation zurückzuführen ist. Entgegen den seinerzeit geäußerten Auffassungen, die von Seegangsmessungen am wattseitigen Ausgang des Seegats abgeleitet wurden (NIEMEYER, 1983), haben nach den Modellergebnissen die stärker ausgebildeten Platen vor dem Seegat keine stärkere Dämpfungswirkung auf die Wellenhöhen als die geringer dimensionierten vor dem Inselvorstrand. Die weitergehende Dämpfung erfolgt erst im Seegatbereich; auf der Höhe des Übergangs vom Inselvorstrand zum Norderneyer Nordweststrand ist der einschwingende Seegang nicht stärker als im benachbarten Seegatbereich. Bemerkenswert ist weiterhin, daß die Rinnen des Ebbdeltas dem einschwingenden Seegang nicht als „Einfallstore“ zum Inselvorstrand und Seegat dienen. Auch hier bestätigt das Modell frühere Auffassungen, nach denen „sich die Brandungsvorgänge nicht auf die Platen beschränken, sondern auch auf den Seegang in den dazwischenliegenden Rinnen wirken“ und „die Brandung auf dem Riffbogen vor Norderney als geschlossener weißer Ring zu erkennen“ ist, „ohne daß Unterschiede zwischen Platen- und Rinnenbereichen zu erkennen sind“ (NIEMEYER, 1983). In diesem Lichte besehen, erscheint auch das überraschende Ergebnis glaubwürdig, daß der sich in den tiefen Rinnen des Seegats, Kalfamergats und Busetiefs fortpflanzende Seegang zum Teil niedrigere Wellenhöhen aufweist als in den benachbarten amphibischen Bereichen im zentralen Bereich des Seegats. In Einklang mit den aus Naturuntersuchungen abgeleiteten Erkenntnissen (NIEMEYER, 1986, 1987a) steht hingegen die geringe Seegangsbelastung im Bereich der Strände am Seegat.

Wie bereits aus Naturuntersuchungen bekannt (NIEMEYER, 1983, 1990; NIEMEYER, GÄRTNER u. GRÜNE, 1992) erfährt die dem Seegat unmittelbar gegenüberliegende Festlandsküste durch den bei Sturm aus der Nordsee einschwingenden Seegang stärkere Belastungen als die benachbarten im Inselfschatten liegenden Abschnitte. Diese Gegebenheit wird auch am Beispiel der Modellrechnung evident. Ebenso stehen die Modellrechnungen hinsichtlich der Seegangsausbreitung in Lee der Inseln in guter Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von früheren Naturuntersuchungen (NIEMEYER, 1983). Die Distanz der Isolinie für die signifikante Wellenhöhe $H_s = 0,75$ m von der Küstenlinie nimmt in dem Bereich der Festlandsküste stetig zu, wo die Ausbildung von Salzwiesen beginnt. Von daher läßt sich auch aus diesen Modelluntersuchungen die aus Naturmessungen abgeleitete Folgerung belegen, daß sich Heller nur dort ausbilden können, wo im wattseitigen Vorfeld eine hinreichende Dämpfung des Seegangs stattgefunden hat (NIEMEYER, 1983, 1984, 1990). Ebenso kann legitimerweise aus der Modellrechnung – in Analogie zu früheren Untersuchungen (NIEMEYER, 1983) – abgeleitet werden, daß die geringere Seegangsbelastung der Vorlandeiche nicht auf die Wirkung der Salzwiesen, sondern primär auf die Seegangsdämpfung im wattseitigen Vorfeld zurückzuführen ist.

Einschränkungen hinsichtlich der quantitativen Zuverlässigkeit des Modells müssen für die unmittelbar wattseitig an die Inseln grenzenden Bereiche gemacht werden, da hierfür das gewählte Berechnungsgitter nicht mehr optimal ist. Wie bereits grundsätzlich erläutert, können bei ungünstigem Berechnungsgitter Energielecks auftreten. Im Bereich südlich von Norderney ist das hier genutzte Rechengitter nicht optimal. Es ist vorgesehen, hier für die Zu-

kunft Möglichkeiten einer Flexibilisierung in Anpassung an die Ausbreitungsrichtungen des Seegangs zu finden. Die aus dem Modell entnehmbare starke Dämpfung der Wellenhöhen auf den Inselwatten steht aber tendenziell in vollem Einklang mit Erkenntnissen aus Naturmessungen (NIEMEYER, GÄRTNER u. GRÜNE, 1992), nach deren Ergebnissen die bisherigen Annahmen zur Seegangsbelastung der wattseitigen Inseldeiche als zu hoch eingestuft wurden.

Zum Vergleich wird hier die Höhenverteilung des Seegangs bei einer Windflut mit einem Stau

$$\Delta h = 0,95 \text{ m}$$

und folgenden Seegangskennwerten am äußeren Modellrand im Küstenvorfeld reproduziert (Abb. 26):

$$H_s = 1,65 \text{ m}, T_m = 5,1 \text{ s}, \theta = 320^\circ.$$

Die Ergebnisse der Modellrechnung für die Windflut zeigen trotz der wesentlichen Unterschiede in den Randbedingungen (Tab. 1) hinsichtlich der hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen ein in qualitativer Hinsicht weitgehend ähnliches Bild wie die Reproduktion des Seegangs für die Sturmflut, wenngleich bei insgesamt geringeren Wellenhöhen. Wesentliche Unterschiede hinsichtlich der Struktur der Isolinen und damit auch hinsichtlich der Änderungen der Wellenhöhen treten im Bereich des Ebbdeltas auf.

Augenfällig ist bei dem Vergleich beider Berechnungsbeispiele, daß sich die Höhenunterschiede für beide Berechnungsbeispiele mit dem Passieren des Riffbogens und dem Einschwingen in das Tidebecken des Norderneyer Seegats tendenziell verringern. Die grundsätzlichen Aussagen zu den Ergebnissen der Modellrechnung und ihrer Interpretation

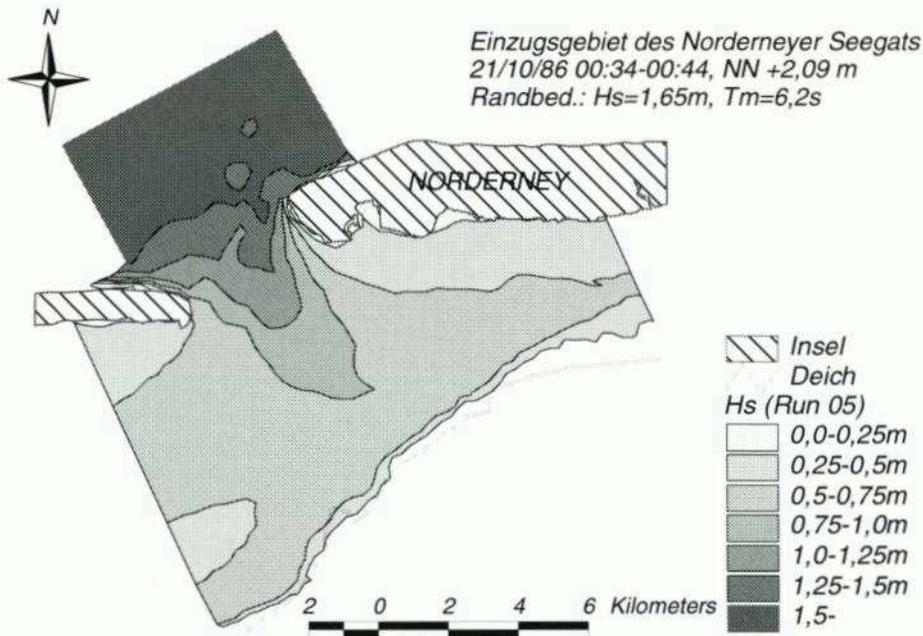


Abb. 26: Isolinen der sign. Wellenhöhen bei einer Windflut (Fall 5) für das äußere und innere Modellgebiet

für die Sturmflut des Berechnungsbeispiels 10 haben ebenso Gültigkeit für die Ergebnisse der Windflut des Berechnungsbeispiels 5. Diese Gegebenheit steht somit in gutem Einklang mit bisher entwickelten Vorstellungen zum Seegangsklima und damit zusammenhängenden hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen im Bereich der Ostfriesischen Inseln und Küste (NIEMEYER, 1983, 1984, 1986, 1987a, 1987b, 1987c, 1990, 1991; NIEMEYER, GÄRTNER u. GRÜNE, 1992).

6.4.2 Wellenlängenentwicklung unter Sturmflutbedingungen

Für die Sturmflut des Berechnungsbeispiels 10 (Tab. 1) ist die Verteilung der mittleren Wellenlängen im Modellgebiet in Form von Isolinien mit variablen Äquidistanzen von

$$2,5 \text{ m} \leq \Delta L_m \leq 10 \text{ m}$$

mit den Ergebnissen von Refraktionsuntersuchungen (NIEMEYER, 1983) vorgenommen. Im Refraktionsdiagramm ist die Seegangsausbreitung gemäß der linearen Wellentheorie für einen Wasserstand von MTHw +3,0 m und einer Wellenrichtung von $\theta = 315^\circ$ mit einer mittleren Periode von $T_m = 7 \text{ s}$ für jeden fünften Wellenkamm konstruiert worden. Trotz der unterschiedlichen Randbedingungen erschien es reizvoll, die Daten beider Informationsquellen zu vergleichen, zumal das Refraktionsdiagramm durch Beobachtungen verschiedener Art abgesichert worden ist.

Die Überlagerung der beiden räumlichen Darstellungen von Wellenkämmen aus dem Refraktionsdiagramm und von Isolinien der mittleren Wellenlängen nach den Berechnungen des HISWA-Modells (Abb. 27) spiegelt denn auch den grundsätzlichen physikalischen Zusammenhang wider. Darüber hinaus erlaubt der Vergleich die wechselseitige Bestätigung beider Verfahren. Besonders evident wird dies am Beispiel der tiefen Rinnen des Kalfamergats, des Busetiefs und des Norderneyer Seegats, wo der schnellere Fortschritt der Wellenkämme einer adäquaten Wellenlänge gegenübersteht.

Die Wirkung der Platen des Riffbogens auf die Verteilung der Wellenlängen ist hingegen deutlicher als die Beugung der Wellenkämme im Refraktionsdiagramm. Ursache für diesen Unterschied kann aber möglicherweise die Differenz von etwa 0,8 m in den Wasserständen sein, die den jeweiligen Verfahren als Randbedingung zugrunde gelegt worden sind. Allerdings treten diese Unterschiede im Bereich der im Untersuchungsgebiet weiter binnen gelegenen Platen, wie beispielsweise bei der Steinplate, nicht auf. Allein in den im Schatten der Inseln liegenden tiefen Rinnen, wie in Teilen des Kalfamergats und im Riffgat, treten markante Differenzen auf. Für diese Bereiche ist aber ein solches Ergebnis nicht überraschend, da – wie bereits an anderer Stelle erwähnt – dort aufgrund der Modellkonfiguration erhebliche Abweichungen zwischen der x-Achse des Rechengitters und der Fortpflanzungsrichtung des Seegangs auftreten können, die wiederum wegen des Rechensektors von 120° zu Energielecks führen können. Insofern liefert der Vergleich aber auch einen Hinweis darauf, in welchen Teilen des Modellgebiets die Modellergebnisse durch diesen Effekt nachhaltig beeinträchtigt sind. Gleichzeitig ist damit ein Anhalt für das Erfordernis gegeben, in welchen Bereichen durch Einrichtung von Teilmodellen mit variierenden Rechengittern eine Optimierung erfolgen sollte.

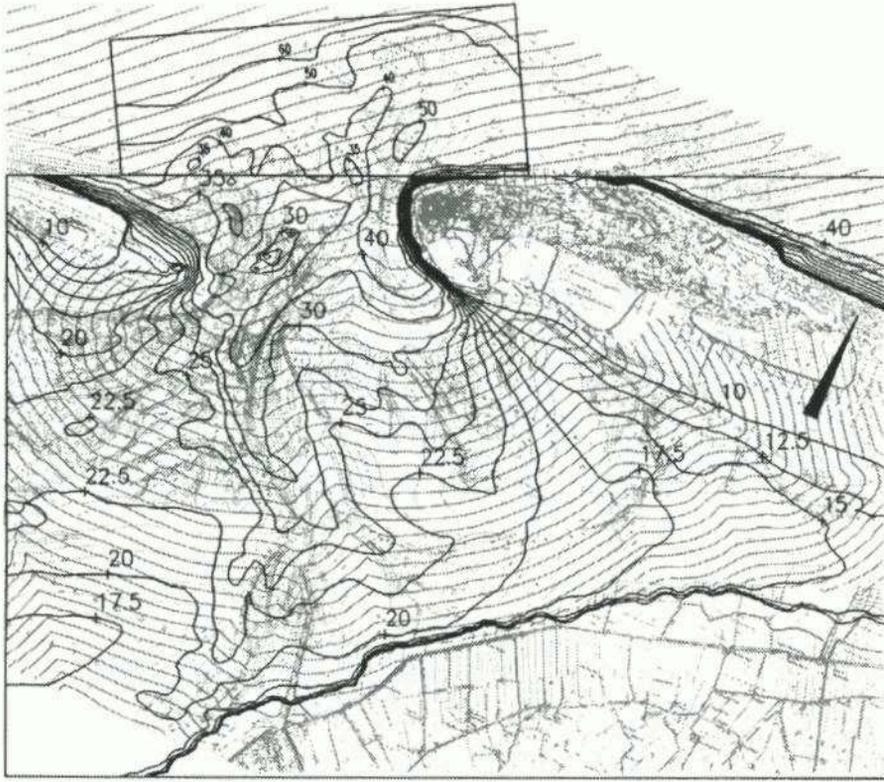


Abb. 27: Überlagerung von Refraktionsdiagramm (NIEMEYER, 1983) und Isolinien der mittl. Wellenlängen des Falls 10

7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Das in den Niederlanden entwickelte Modell HISWA ist auf das Einzugsgebiet des Nordeener Seegats im ostfriesischen Wattenmeer und auf dessen seewärtiges Küstenvorfeld angewandt worden. Dabei wurden auch Besonderheiten der operationellen Handhabung mit Relevanz für das Untersuchungsgebiet dargestellt. Die Reproduktion physikalischer Prozesse wurde anhand ausgewählter Berechnungsbeispiele diskutiert, deren Randbedingungen zum Teil von gleicher Größenordnung sind und somit eine partielle Entkopplung von Wechselwirkungsprozessen ermöglichten. Auf der Grundlage von Berechnungen der räumlichen Verteilung der signifikanten Wellenhöhen für zwei Sturmfluten wurde eine Darstellung der Seegangsbelastung im Untersuchungsgebiet in räumlicher Differenzierung hinsichtlich seiner Naturähnlichkeit und Aussagefähigkeit erörtert sowie Überlegungen zu einem optimierten operationellen Konzept diskutiert.

Ein Vergleich der Modellergebnisse mit den Naturuntersuchungen zeigt, daß mit dem mathematischen Seegangsmodell HISWA auch in Flachwassergebieten mit stark gegliederter Morphologie eine naturähnliche Reproduktion des Seegangs möglich ist, wobei die Genauigkeit offensichtlich mit der Intensität des Seegangs wächst. Ausnahmen der Übereinstimmung lassen sich nicht nur vor dem Hintergrund der Arbeitsweise des Modells erklären, son-

dern auf dieser Grundlage lassen sich auch Ansätze für Optimierungen entwickeln. Mit Hilfe des Modells HISWA konnten nicht nur aus bisher ausgeführten Naturuntersuchungen abgeleitete Vorstellungen zum Seegangsklima im Bereich inselgeschützter Watten abgesichert werden, sondern auch die aus punktuellen Naturmessungen abgeleiteten Vorstellungen räumlich absichern und erweitern.

Darüber hinaus ermöglicht die Anwendung der Modelltechnik – mit einem begrenztem Aufwand – vertiefte Einblicke in die Physik der Vorgänge.

Von daher ist das mathematische Seegangmodell HISWA nicht nur als ein hervorragend geeignetes operationelles Werkzeug für Anwendungsfragen im Küsteningenieurwesen zu sehen, sondern auch als „mathematisches Labor“, das mit Hilfe leistungsfähiger Rechenanlagen der Seegangsforschung im Küsteningenieurwesen zu tiefergehenden Einsichten in die Physik der Prozesse bei seegangsbedingten hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen verhelfen kann. Aus diesem Grund ist es überaus sinnvoll, auch zukünftig im Wechselspiel von Modellrechnungen und Naturmessungen an weiteren Verbesserungen der Modelltechnik mitzuwirken.

8. Danksagung

Die hier beschriebenen Untersuchungen sind im Teilprojekt Wattseegang des Forschungsvorhabens Seegang und Bemessung auf Seegang im Küstenvorfeld der und in den Ästuarien der Deutschen Bucht des KURATORIUMS FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN vorgenommen wurde, das vom BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE gefördert wurde (MTK 0464 B) und bei der Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie angesiedelt war. Der Dank der Autoren gilt ihren Kollegen Günther Brandt und Detlef Glaser aus dem Dezernat Hydrographie des Küstengebietes der Forschungsstelle Küste für ihre eingehende Unterstützung, sowie Ir. Adranus Franken, der in der ersten Phase des Projektes an der Modellanwendung gearbeitet hat.

Die Arbeiten wären nicht möglich gewesen ohne die kostenfreie Bereitstellung des Modells HISWA durch die niederländischen Verwaltung Rijkswaterstaat und den vielfältigen Rat niederländischer Kollegen. Stellvertretend für alle seien hier Drs. J. A. Vogel (Rijkswaterstaat), Dr. ir. N. Booij (TU Delft-Werkgroep Vloeistofmechanica) und Prof. Dr. ir. M. Stive (Waterloopkundig Laboratorium) genannt.

9. Schriftenverzeichnis

- ADEL, J. D. DEN, NIEMEYER, H. D., FRANKEN, A. F., BOOIJ, N., DEKKER, J. u. VOGEL, J. A.: Wave model application in a Wadden Sea area. Proc. 22nd Int. Conf. o. Coast. Eng. Delft, ASCE, New York, 1991.
- BOOIJ, N. u. HOLTHUIJZEN, L.: HISWA user manual. Prediction of stationary, short-crested waves with ambient currents. TU Delft, Faculteit d. Civ. Tech., 1992.
- HOLTHUIJZEN L. H., BOOIJ, N. u. HERBERS, T. H. C.: A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. Coast. Eng., Vol. 13, 1989.
- MICHE, R.: Mouvement ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Ann. Ponts Chaussées, 114, 1944.
- NIEMEYER, H. D.: Über den Seegang an einer inselgeschützten Wattküste. BMFT-Forschungsbericht MF 0203, 1983.
- NIEMEYER, H. D.: Hydrographische Untersuchungen in der Leybucht zum Bauvorhaben Leyhörn. Jber. 1983 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Bd. 35, 1984.

- NIEMEYER, H. D.: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattengebiet von Norderey. Jber. 1985 Forsch.-Stelle Küste, Bd. 37, 1986.
- NIEMEYER, H. D.: Changing of wave climate due to breaking on a tidal inlet bar. Proc. 20th Intern. Conf. o. Coastal Eng. Taipei, ASCE, New York, 1987a.
- NIEMEYER, H. D.: Seegang und Biotopzonierung in Wattgebieten. in: Niedersächsischer Umweltminister: Umweltvorsorge Nordsee – Belastungen – Gütesituation – Maßnahmen –. Hildesheim, 1987b.
- NIEMEYER, H. D.: Seegang und Strömungen als ökologische Randbedingungen in Wattgebieten. in: Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Grundlagen zur Reinhaltung der Küstengewässer. Aus- und Fortbildung in der niedersächsischen Wasserwirtschaft. Hildesheim, 1987c.
- NIEMEYER, H. D.: Morphodynamics of tidal inlets. CEEC (Civil Eng. Europ. Cours. – Progr. o. Contin. Educat.1990), Delft Univ. o. Techn. Intern. – Intern. Civ. Eng, 1990.
- NIEMEYER, H. D.: Case study Ley Bay: an alternative to traditional enclosure. Proc. 3rd Conf. o. Coast. & Port Eng. i. Develop. Countr., Mombasa/Kenya, 1991.
- NIEMEYER, H. D., GÄRTNER, J. u. GRÜNE, J.: Naturuntersuchungen von Wattseegang an der deutschen Nordseeküste. Schlußber. Forsch.-Vorh. MTK 464 B – Teil I – Bundesmin. f. Forsch. u. Technol. – Meerestech. –, 1992.
- PUTNAM, J. A. u. JOHNSON, J. W.: The dissipation of wave energy by bottom friction. Trans. AGU, Vol 30, No. 1, 1949.
- SIEFERT, W.: Über den Seegang in Flachwassergebieten. Mitt. d. Leichtweiß-Inst., H. 40, 1974.
- STIVE, M. J. F. u. EYSINK, W. D.: Dynamisch model van het Nederlandse kustsystem. Waterloopkundig Laboratorium, Rapport M 825-IV, 1989.
- VOGEL, J. A., RADDER, A. C. u. REUS, J. H. DE: Verification of numerical wave propagation projects in tidal inlets. Proc. 21st Intern. Conf. o. Coastal Eng. Malaga, ASCE, New York, 1989.