Modellierungen des mittelfristigen Seegangsklimas im deutschen Nordseeküstengebiet

NLWKN-Forschungsstelle Küste

Anmerkung

Das Projekt <u>Mo</u>dellierungen des mittelfristigen <u>Se</u>egangsklimas im deutschen Nord<u>s</u>eeküstengebiet (MOSES-A) wurde 2003 bis 2007 von Agnieska Herman, Ralf Kaiser und Hanz Dieter Niemeyer[†] bearbeitet. Nachfolgender Bericht stellt eine Zusammenfassung des Abschlussberichts (HERMAN et al. 2007a) dar, welche nach dem Weggang der Autoren von Mitarbeitern der Forschungsstelle Küste im NLWKN erstellt wurde.

Zusammenfassung

Ziel des Projekts <u>Mo</u>dellierungen des mittelfristigen <u>Se</u>egangsklimas im deutschen Nord-<u>s</u>eeküstengebiet (MOSES) war die Erstellung von Datensätzen über mehrere Jahrzehnte durch die teilweise Substitution von prozessbasierten mathematischen Modellierungen durch statische Modellierungen, die weit weniger Rechnerkapazitäten benötigten. Bei Antragstellung im Jahr 2002, bei Bewilligung im Jahr 2003 und auch bei Projektende 2007 bestand hier ein dringliches Kapazitätsproblem.

Auf der Grundlage von Ergebnissen zeitlich begrenzter Modellierungsperioden wird für deren kennzeichnende Parameter eine Hauptkomponenten-Analyse vorgenommen. Für eine enge Zahl von Hauptkomponenten, die weitgehend die Varianz der Seegangsparameter repräsentieren, erfolgen anschließend Modellierungen mit künstlichen neuronalen Netzen. Nach deren Optimierung können verfahrensmäßig – bei Einsatz wesentlich geringerer Rechnerkapazitäten – wesentlich umfassendere Datensätze für längere Zeiträume erstellt werden.

Wenngleich mittlerweile durch Fortschritte in den Rechner- und Modellarchitekturen erheblich größere Kapazitäten zur Verfügung stehen, bleibt der Wert, der in MOSES entwickelten Verfahren, ungeschmälert.

Schlagwörter

Seegangsklima, mathematische Modellierung, Wasserstand, Strömung, Hauptkomponentenanalyse, künstliche neuronale Netze (KNN)

Summary

Aim of the project Modeling of mid-term wave climate in the North Sea coastal waters of Germany (MOSES) was the production of time series of wave data for a couple of decades by substitution of process-based models by statistical methods as main component analysis and as artificial neural networks in order to reduce needed computer capacity. At the time of project planning in 2003 and also at its end in 2007 there were enormous limitations for mathematical modeling due to available computing capacities. Whereas this problems have lost and still loose continuously their weight in research and application the results of the MOSES projects are still very valuable. This has been highlighted by the acceptance for scientific discussion on the platforms of scientific discussion in the international community.

Based on runs of the process-based models Delft-3D and SWAN for time series of a few years main component analysis was carried out for significant parameters of waves, water levels and currents. In the following step a limited number of main components representing to the greatest extent the variability of the substituted hydrodynamic parameters were modeled by artificial neural networks. After their optimization they allow successfully the reproduction of hydrodynamic parameters for long-term investigation with enormous smaller computing capacities than needed for mathematical modeling by process-based models.

Keywords

wave climate, mathematical modeling, water levels, currents, main component analysis, artificial neural networks (ANN)

Inhalt

1		Einleitung	112
2		Untersuchungsgebiet	113
3		Modellkonfiguration	114
4		Verifizierung der Modellierungsergebnisse	115
	4.1	Wasserstandsmodellierung	115
	4.2	Seegangsmodellierung	116
5		Verfahren zur beschleunigten Erstellung eines 40-jährigen Datensatzes	120
6		Hauptkomponentenanalyse der Modellierungsergebnisse	122
7		Anwendung der künstlichen neuronalen Netze (KNN) zur Erstellung der	
		Daten	126
8		Rekonstruktion der Wasserstände, der Strömungen und des Seegangs	
		früherer Sturmfluten	130
9		Schlussfolgerungen	130
10		Schriftenverzeichnis	131

1 Einleitung

Für verschiedene Fragestellungen im Küsteningenieurwesen wie beispielsweise für mittelbis langfristige morphodynamische Modellierungen oder zur Bemessung auf wahrscheinlichkeitstheoretischer Basis ist eine umfassende Datengrundlage von kennzeichnenden Seegangsparametern in küstennahen Bereichen erforderlich. Diese ist kaum irgendwo verfügbar und könnte -wenn überhaupt- nur in zeit- und kostenaufwändigen Messkampagnen erlangt werden. Eines der zentralen Ziele des Projekts MOSES war deshalb die Erstellung eines 40-jährigen Datensatzes für Wasserstände, Strömungen und Seegangsparameter für ausgewählte Gebiete der Deutschen Nordseeküste. Die Daten bilden die Grundlage für die Analyse der mittelfristigen Variabilität von relevanten Seegangsparametern und bei der Entwicklung eines Konzepts zum morphologisch wirksamen Seegang.

Im ersten Teil des Projekts MOSES wurden für das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats regionale Tide- und Seegangsmodelle erstellt und die Modelle an Hand geeigneter Datensätze verifiziert. Dabei konnte die Numerik des Seegangsmodells so weiterentwickelt werden, dass für die Parallel-Version des Seegangsmodells eine deutliche Verbesserung der Rechengeschwindigkeit erreicht werden konnte, die für das Gelingen des Projekts in zeitlicher Hinsicht von hoher Bedeutung war (HERMAN et al. 2007a). Daneben konnte über die Anwendung der Modelle auf die von HIPOCAS gelieferten Randbedingungen und dem Vergleich der daraus gewonnenen Modellierungsergebnisse der Nachweis der Eignung des HIPOCAS-Datensatzes für die Fragestellung des Projekts erbracht werden.

Im zweiten Teil des Projekts konzentrierten sich die Arbeiten hauptsächlich auf die Erstellung des oben erwähnten Datensatzes. Infolge einer sehr hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung, die zur Tide- und Seegangsmodellierung im Untersuchungsgebiet Norderneyer Seegat erforderlich ist, war es klar, dass die Erstellung der vollständigen Datensätze mit mathematischer Modellierung durch Delft3D/SWAN wegen des sehr hohen Rechenaufwands in der verfügbaren Projektlaufzeit unmöglich war. Mit den Ergebnissen ausgewählter Perioden von Modellierungen wurde die Komplettierung mit einem auf der Hauptkomponentenanalyse und auf künstlichen neuronalen Netzen (KNN) entwickelten Verfahren erfolgreich vorgenommen. Die Entwicklung und das Konzept dieses Verfahrens werden im Folgenden ausführlich beschrieben. Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse und der KNN-Modellierungen zeigen, dass mit dem Verfahren ein zuverlässiges Mittel zur Rekonstruktion von langen Zeitreihen flächenhafter Tide- und Seegangsdaten zur Verfügung steht, das auch über den Rahmen des Forschungsvorhabens hinaus für ähnlich gelagerte Fragestellungen sehr gut geeignet ist.

2 Untersuchungsgebiet

Das von der Forschungsstelle Küste (FSK) im Rahmen des Projekts MOSES untersuchte Gebiet ist das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats, wobei für die mathematischen Modellierungen dessen Umfeld einbezogen worden ist (Abb. 1). Das Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats ist -wie die gesamte Region der Ostfriesischen Inseln und Küstedurch eine sehr hohe zeitliche und räumliche Variabilität von Wasserständen, Strömung und Seegang gekennzeichnet. Die überlagerte Wirkung von Gezeiten und meteorologischen Einwirkungen führt in Zusammenhang mit einer unregelmäßig strukturierten und stark gegliederten Topographie dazu, dass die Ausführung sowohl von Naturmessungen als auch von mathematischen Modellierungen in diesem Gebiet sehr anspruchsvoll sind und auch an moderne Mess- und Modellierungsverfahren wegen der großen Bandbreite der untersuchten Parameter erhebliche Anforderungen gestellt werden.

Der mittlere Tidenhub im Bereich von Norderney beträgt etwa 2,4 m. Dadurch fällt bei Niedrigwasser ein Großteil des Untersuchungsgebiets trocken; das Tidevolumen des Einzugsgebiets des Norderneyer Seegats ist größer als sein bei Tideniedrigwasser im Gebiet verbleibendes Beckenvolumen. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Seegat und in den Rinnen des Tide-beckens überschreiten bei Ebbe und Flut typischerweise die Schwelle von 1 m/s und haben außerhalb der Stauphasen bei den Tidescheiteln einen ausgeprägten Einfluss auf die Ausbreitung und Umwandlung der Wellenenergie. Alle oben erwähnten Erscheinungen werden in den Messungen und in den Modellierungsergebnissen deutlich erkennbar.

Die Modellierungen von Wasserständen, Strömung und Seegang in dem Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats werden im Rahmen des Projekts MOSES mittels des Tidemodells Delft3D (DELFT HYDRAULICS 2003) und des vollspektralen Seegangsmodells SWAN ausgeführt. Eine generelle Beschreibung der Modelle sowie die Einzelheiten zu deren Modifikation und Optimierung sind im Abschlussbericht erläutert (HERMAN et al. 2007a).



Abbildung 1: Lage des Norderneyer Seegats und seines Tidebeckens mit den Grenzen der im MOSES-Projekt angewandten Modellgitter sowie des Gebiets, für das die Ergebnisse analysiert und mit neuronalen Netzen modelliert worden sind. Das Kreuz nördlich vom Norderneyer Seegat markiert die Lage des HIPOCAS-Punktes, dessen Daten als Input für den Windatlas und für die neuronalen Netze genutzt werden. Blau und gelb sind die See- bzw. Landpunkte des HIPOCAS-Gitters markiert. Der rote Kreis gibt die Position der Messstation SEE an.

3 Modellkonfiguration

Die Grenzen der Modellgitter, die in dem Projekt MOSES genutzt werden, sind in der Abb. 1 dargestellt. Das Gitter für das hydrodynamische Modell Delft3D hat eine Auflösung von ungefähr 50 Meter im Norderneyer Seegat bis 300 Meter am nordwestlichen Rand des Modells. Im Rahmen des Projekts wird eine zweidimensionale Version von Delft3D genutzt.

Das Gitter für das SWAN-Modell hat eine höhere Auflösung von 30 bis 200 Meter. Zur Verifizierung des SWAN-Modells sind mit dem Modell zusätzliche Rechnungen über eine dreimonatige Periode (September–November 2002) mit einem kleinerem durch die Station SEE (roter Punkt in Abb. 1) begrenztem Gitter ausgeführt worden (Absatz 4.2). Dabei wurde das vorhandene Gitter so beschnitten, dass dessen nördliche Grenze durch die Position der Messstation SEE verläuft. Am nördlichen Rand des beschnittenen Gitters werden die an der Position See gemessenen Wellenenergiespektren als räumlich gleichförmige Randbedingungen eingegeben.

Die Hauptquelle der Input-Daten für die Modellierung ist der im EU-Projekt HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe; WEISSE et al. 2003) erstellte Datensatz mit einer homogenen Zeitreihe von 40 Jahren gewesen. Als Input-Daten für das Tidemodell Delft3D werden am offenen Modellrand die interpolierten HIPOCAS-Wasserstände genutzt, die auf einem regelmäßigen Gitter mit der Auflösung von etwa 5,5 km verfügbar sind (Abb. 1). Das Gebiet des Delft3D-Gitters ist größer als das Gebiet des SWAN-Gitters gewählt worden, um einen eventuellen Einfluss von Störungen aus den Randbedingungen des hydrodynamischen Modells auf das Seegangsmodell möglichst zu vermeiden.

In der Ems wird bei Emden ein Abfluss mit einem konstanten Wert von 80 m³/s angenommen. Für die Steuerung des Modells werden außerdem Windfelder benötigt. Sie wurden mit dem -ebenfalls im Rahmen des MOSES-Projekts entwickelten- Windatlas des Deutschen Wetterdienstes berechnet. Als Eingangswerte für den Windatlas wurden die Zeitreihen von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Wasserstand in dem dafür genutzten HIPOCAS-Punkt (Abb. 1) genutzt.

Als Randbedingungen für die SWAN-Modellierungen werden die HIPOCAS-Wellenenergiespektren am nördlichen Rand, und flächig die mit Delft3D erhaltenen Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten sowie die Winddaten aus dem Windatlas genutzt. Zwischen dem hydrodynamischen und dem Seegangs-Modell besteht eine Einwegkopplung. Die Ergebnisse der Seegangsmodellierungen haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse der hydrodynamischen Modellierung.

4 Verifizierung der Modellierungsergebnisse

4.1 Wasserstandsmodellierung

Die mit Delft3D berechneten Wasserstände wurden, zur Verifizierung des Modells und der HIPOCAS-Randbedingungen, mit am Pegel Norderney-Riffgat im Zeitraum vom September bis November 2002 gemessenen Werten verglichen. Die Übereinstimmung zwischen den Zeitreihen ist gut: Der Korrelationskoeffizient beträgt 92 %, die Standardabweichung der Differenzen – 35 cm. Diese Differenz zwischen gemessener und modellierter Zeitreihe wird im Wesentlichen durch eine Phasenverschiebung von ungefähr 40 Minuten verursacht. Nach Korrektur dieser Phasenverschiebung steigt der Korrelationskoeffizient auf 98 % und die Standardabweichung der Differenzen wird auf 16 cm reduziert.

In dem analysierten Zeitraum werden in der Regel die Tideniedrigwasserwerte durch das Modell überschätzt - was sowohl in der Abbildung mit den Zeitreihen als auch im Streudiagramm (Abb. 2) deutlich wird; es ist für Wattenmeergebiete mit großen trockenfallenden Gebieten und relativ dazu schmalen Rinnen typisch. Die modellierten Tidehochwasserwerte werden hingegen ein wenig unterschätzt.



Abbildung 2: Streudiagramm der gemessenen und mit Delft3D modellierten Tidehoch- und niedrigwasserwerte am Pegel Norderney-Riffgat (18. Sep. bis 17. Nov. 2002).

4.2 Seegangsmodellierung

Die Rechnungen mit dem Seegangsmodell SWAN wurden zweimal auf zwei Gittern mit unterschiedlichen Randbedingungen ausgeführt (Abb. 3). Das Ziel der Rechnungen war es, zum einen das SWAN-Modell mit gemessenen Seegangsdaten zu verifizieren, die an der Position SEE zur Verfügung standen, und zum anderen die Anwendbarkeit der HIPOCAS-Daten, die ungefähr an der 20 m-Tiefenlinie vorlagen, für den Zweck des Projekts, d. h. für eine mittelfristige statistische Seegangsanalyse, zu bestimmen.



Abbildung 3: Lage der Messstationen der FSK in der Umgebung der Insel Norderney. Die Daten aus den Stationen (SEE, VST1, SGT-NEY und RIFFGAT) wurden für die Verifizierung des SWAN-Modells genutzt. Die Grenzen der SWAN-Gitter sind in blau und in rot markiert.

Um das erste Ziel zu erreichen, wurde ein Vergleich zwischen den modellierten und gemessenen Seegangsparametern (signifikante Wellenhöhe H_s und Energieperiode $T_e = T_{m-1,0}$ und Energiespektren) an den vier Messstationen ausgeführt.

Zeitreihen von gemessenen und auf dem kleineren Gitter (mit SEE-Randbedingungen) modellierten signifikanten Wellenhöhen und Energieperioden an der Messstation VST1 (Abb. 4) weisen sehr gute Übereinstimmungen aus, selbst die für mathematische Seegansmodelle eher kritische Dünung (Tage 29–32 in Abb. 4) wird korrekt nachgebildet. Allerdings wird die Amplitude von Wellenhöhenschwankungen von dem Modell unterschätzt - die modellierten Wellenhöhen sind zu klein zum Zeitpunkt des Tidehochwassers und zu hoch beim Tideniedrigwasser. Die berechneten Werte der Energieperioden sind dagegen während der gesamten Untersuchungsperiode zu niedrig. Dies ist die Folge der Überschätzung von Energie im Bereich der höheren Frequenzen in den Energiespektren und typisch für Seegangsmodellierung mit dem Modell SWAN im untersuchten Bereich. Wie allerdings eindimensionale Energiespektren zeigen (Abb. 5) ist die Stärke dieses Effektes von der Wellenhöhe abhängig: Je kleiner die Wellen, desto größer ist der Einfluss der Energie im Bereich der höheren Frequenzen auf den Wert der mittleren Periode.



Abbildung 4: Oben: an der Station SEE gemessene mittlere Wellenrichtungen (blau) und auf Norderney gemessene Windrichtungen (rot). Mitte: gemessene (schwarz) und modellierte (rot) H_s an der Station VST1. Unten: gemessene (schwarz) und modellierte (rot) T_e an der Station VST1. Für die mit Pfeilen gekennzeichneten Zeitpunkte sind die Energiespektren in der Abb. 5 dargestellt.



Abbildung 5: Gemessene (schwarz) und modellierte (rot) Wellenenergiespektren an der Station VST1, zu den vier in der Abb. 4 markierten Zeitpunkten.

Insgesamt werden aber sowohl die mittleren Seegangsparameter als auch die Energiespektren von dem SWAN-Modell gut reproduziert.

Um die Anwendbarkeit des HIPOCAS-Datensatzes für die Bereitstellung von Randbedingungen für eine kleinräumige Seegangsmodellierung in der Umgebung von Norderney zu prüfen wurden die Ergebnisse der Rechnungen auf den zwei Gittern miteinander verglichen.

Einen ersten Hinweis auf die Qualität der HIPOCAS-Daten und auf deren Anwendbarkeit als Randbedingungen für kleinräumige Seegangsmodellierung gibt eine Analyse von Modellierungsergebnissen mit HIPOCAS-Randbedingungen an der Station SEE. Ein Vergleich zwischen den modellierten H_s- und T_e-Werten an der Position SEE und den entsprechenden Werten am Rand des Modells (Abb. 6) zeigt deutlich, dass das Modell auf verschiedene Weise -abhängig von der Wetterlage- auf die Randbedingungen an der nördlichen Modellgrenze reagiert. Für den Seegang, der aus Richtungen Nord oder Nordwest auf die Küste zuläuft, gibt es in den modellierten Daten fast keinen Energieverlust zwischen der Modellgrenze und der Position SEE. Die leichte Abnahme von mittleren Perioden muss also eine Folge des Energietransfers von niedrigen zu höheren Frequenzen sein. Ein gutes Beispiel dafür ist ein Zeitraum mit relativ hohen Wellen Ende Oktober 2002 (Tage 53–57; Abb. 6). Bei einer Ostwetterlage (Tage 39–43) werden dagegen sowohl die modellierten signifikanten Wellenhöhen, als auch die Energieperioden unterschätzt. Eine klare Abhängigkeit dieser Ergebnisse von den Randbedingungen ist jedoch nicht festzustellen.



Abbildung 6: Oben: an der Station SEE gemessene mittlere Wellenrichtungen (blau) und auf Norderney gemessene Windrichtungen (rot). Mitte: gemessene (schwarz) und mit HIPOCAS-Randbedingungen (rosarot) modellierte (blau) H_s an der Station SEE. Unten: gemessene (schwarz) und mit HIPOCAS-Randbedingungen (rosarot) modellierte (blau) T_e an der Station SEE.

Von Bedeutung für die Seegangsmodellierung im Rahmen des Projekts MOSES ist dabei: Insgesamt nehmen die absoluten Differenzen der Seegangsparameter bei den unterschiedlichen Randbedingungen von der Position SEE zum Seegat und zu den Gebieten südlich der Insel deutlich ab. Der Einfluss von Wind und lokaler Wassertiefe dominiert in diesem Gebiet über den Einfluss des durch das Seegat einschwingenden Seegangs. Die durchschnittlichen Werte von signifikanten Wellenhöhen und mittleren Perioden sind deshalb -besonders beim Tideniedrigwasser- sehr klein, was unter diesen Randbedingungen die Seegangsmessung und -auswertung mit den verwendeten Wellenrichtungsmessbojen an der Station RIFFGAT, insbesondere bei den zeitweise starken Strömungen der Tiderinne, sehr schwierig macht. Eine -hier nicht präsentierte- Analyse von entsprechenden Rohdaten hat gezeigt, dass dieser Effekt in den meisten Fällen von Messstörungen verursacht wird.

In der statistischen Analyse der Ergebnisse auf der Station RIFFGAT (Tab. 1 und 2) wurden daher nur solche Zeitabschnitte berücksichtigt, für welche die gemessene Wellenhöhen größer als 10 cm waren. Die modellierten Wellenhöhen auf der Station SEE, SGT-NEY und RIFFGAT sind durchschnittlich nur 1–2 cm zu hoch bzw. zu niedrig. Nur bei Station VST1 beträgt die mittlere Differenz zwischen modellierten und gemessenen H_s 21 cm. Dies ist auch die Station, an der die modellierten Perioden mit ungefähr 2 s am stärksten unterschätzt werden, und die einzige Station, für die die Ergebnisse der Modellierung mit SEE-Randbedingungen deutlich besser als die der Modellierung mit HIPOCAS-Randbedingungen sind: die mittlere Differenz der Perioden verringert sich beispielsweise um mehr als 70 %. Insgesamt ist die Übereinstimmung zwischen den modellierten und gemessenen kennzeichnenden Seegangsparametern und Energiespektren auf allen vier Stationen unter den gegebenen Umständen zufriedenstellend.

Tabelle 1: Standardabweichungen der Differenzen und mittlere Differenz von gemessenen und mit HIPOCAS-Randbedingungen berechneten H_s und T_e an den vier analysierten Stationen (großes Gitter).

	SEE	VST1	SGT-NEY	RIFFGAT
Anzahl der Daten	1405	504	875	600
Standardabweichung $H_{s,mes} - H_{s,mod}[m]$	0.63	0.31	0.15	0.16
mittlere Differenz $H_{s,mes} - H_{s,mod}[m]$	0.01	0.21	-0.02	-0.01
Standardabweichung $T_{e,mes} - T_{e,mod}[s]$	1.21	1.06	0.83	0.26
mittlere Differenz $T_{e,mes} - T_{e,mod}[s]$	1.15	1.89	0.58	0.13

Tabelle 2: Standardabweichung der Differenzen und mittlere Differenz von gemessenen und mit SEE-Randbedingungen berechneten H_s und T_e an den vier analysierten Stationen (kleines Gitter).

	SEE	VST1	SGT-NEY	RIFFGAT
Anzahl der Daten	1405	504	875	600
Standardabweichung $H_{s,mes} - H_{s,mod}[m]$	-	0.21	0.16	0.14
mittlere Differenz $H_{s,mes} - H_{s,mod}[m]$	-	-0.02	-0.04	-0.02
Standardabweichung $T_{e,mes} - T_{e,mod}[s]$	-	0.58	0.82	0.34
mittlere Differenz $T_{e,mes} - T_{e,mod}[s]$	-	0.56	0.36	0.15

5 Verfahren zur beschleunigten Erstellung eines 40-jährigen Datensatzes

Die starke räumliche und zeitliche Variabilität von hydrodynamischen Prozessen im Untersuchungsgebiet kann nur mittels mathematischer Modelle mit hoher Auflösung naturähnlich reproduziert werden. Die Delft3D- und SWAN-Simulationen, die im Rahmen des Projekts MOSES ausgeführt werden, sind deshalb extrem zeitaufwendig. Dies führt zu der Frage, ob eine Berechnung einer 40-jährigen Zeitreihe für jeden diskreten Zeitschritt erfolgen muss, um das mittelfristige Wasserstands-, Strömungs- und Seegangsklima im Untersuchungsgebiet charakterisieren zu können. Deshalb wurde ein Verfahren entwickelt, das auf der Hauptkomponentenanalyse und künstlichen neuronalen Netzen (KNN) basiert (Abb. 7): Die grüne Linie im oberen Teil des Diagramms symbolisiert die HIPO-CAS-Input-Daten, die über die ganze Zeitspanne 1962 - 2002 zur Verfügung stehen. Die darunter, in rot gezeichneten Abschnitte markieren die mit Delft3D und SWAN modellierten Wellenperioden. Insgesamt sind mit Delft3D die Wasserstände und Strömungen für die Jahre 1962 - 1965, 1976, 1985, 1993 und 2002 modelliert worden und mit SWAN der Seegang für die Jahre 1962–1964, 1985 und 2002. Für die Hauptkomponentenanalyse und künstlichen neuronalen Netze spielt die Größe der physikalisch modellierten Datensätze keine bedeutsame Rolle.



Abbildung 7: Schema des im Projekt MOSES angewandten Verfahrens zur Erstellung von 40-Jahre-Datensätzen für Wasserstände, Strömungen, signifikante Wellenhöhen und Energieperioden.

Die Ergebnisse der Delft3D- und SWAN-Modellierungen für 1962-1963 als die ersten zwei Jahre der gesamten Untersuchungsperiode dienen als grundlegende Datensätze für die Anwendung des neuen, gekoppelten Verfahrens. In dem ersten Schritt ist die Hauptkomponentenanalyse dieser Daten ausgeführt worden (blau, Abb. 7). Die Hauptkomponentenanalyse und ihre Ergebnisse für die fünf hier untersuchten Parameter Wasserstand, Strömung, signifikante Wellenhöhe, Energieperiode und mittlere Wellenrichtung werden nachfolgend lediglich exemplarisch erläutert. Die ausführliche Beschreibung der Methodik ist im MOSES-Abschlussbericht (HERMAN et al. 2007a) bzw. den zugehörigen Veröffentlichungen enthalten (HERMAN et al. 2006, 2007b und 2009, HERMAN 2007). Dort wird vor allem gezeigt werden, dass die Hauptkomponentenanalyse eine deutliche Reduzierung der Dimensionalität der Daten ohne Verlust von wesentlichen Inhalten und Information ermöglicht. Eine der wichtigsten hierbei getroffenen Annahmen von entscheidender Bedeutung für die weiteren Schritte des Verfahrens beinhaltet, dass die sich aus der Hauptkomponentenanalyse ergebenden Muster einen "universellen" Charakter haben. Mit anderen Worten, es wird angenommen, dass nicht nur die Daten aus den Jahren 1962–1963, sondern auch die aus der gesamten Periode 1962–2002, als lineare Kombination dieser Muster reproduziert werden können.

Im nächste Arbeitsschritt des Verfahrens wird für jeden der fünf Parameter, für den 40-jährige Datensätze erstellt werden sollen, ein neuronales Netz aufgebaut, mit dem aus den Input-Daten in einem ausgewählten HIPOCAS-Punkt die jeweiligen Hauptkomponenten rekonstruiert werden (Abb. 7). Dabei werden die Daten aus der Zeit Januar 1962– Juni 1963 für das Trainieren der Netze und die Daten aus den restlichen sechs Monaten für die Verifikation angewandt. Die Daten aus einer beliebig ausgewählten Periode können dann als eine lineare Kombination von den Mustern und den mit dem trainierten neuronalen Netz erzeugten Hauptkomponenten rekonstruiert werden, wie hier beispielhaft für das Jahr 1985 dargestellt (Abb. 7: dunkelblau). Die einzige Voraussetzung ist, dass die entsprechenden Eingangsdaten für diese Periode zur Verfügung stehen. In den Jahren, in denen die Delft3D- und SWAN-Ergebnisse vorhanden sind, ist die Verifikation der KNN-Modellierungsergebnisse möglich, wozu nachfolgend eine eingehende Analyse der Qualität der mit dem hier präsentierten Verfahren erzeugten Daten vorgenommen wird. Es wird unter anderem gezeigt, dass die mit Delft3D und SWAN einerseits und mit den KNN andererseits modellierten Daten aus statistischer Sicht sehr ähnliche Eigenschaften haben. Beide Datensätze sind also für das Ziel des Projekts MOSES – die statistische Untersuchung der mittelfristigen Variabilität des Wasserstands-, Strömungs- und Seegangsklimas im Norderneyer Seegat und dessen Tidebecken – eine belastbare Grundlage.

Einer der wichtigsten Vorteile des oben beschriebenen Verfahrens ist seine Effizienz. Dank der Hauptkomponentenanalyse kann die KNN-Modellierung ausgeführt werden ohne dass die sehr komplexe räumliche Struktur der Daten beachtet werden muss. Die KNN können daher mit einer einfachen Struktur aufgebaut und schnell und effizient trainiert werden. Mit einem trainierten Netz besteht dann die Möglichkeit, die Daten für die fehlenden Jahre in wenigen Sekunden zu produzieren; unvergleichbar schneller als mit Delft3D- und SWAN-Modellierungen, mit denen für die gleiche Aufgabe zum Zeitpunkt des Projekts mehrere Monate gebraucht worden wären.

6 Hauptkomponentenanalyse der Modellierungsergebnisse

Die mit Delft3D und SWAN modellierten Parameter für Tide und Seegang wurden für das Untersuchungsgebiet stündlich gespeichert. Für die Hauptkomponentenanalyse sind die Daten aus den Jahren 1962 und 1963 ausgewählt worden. Jeder 5te Delft3D-Gitterpunkt und jeder 7te SWAN-Gitterpunkt je Gitterrichtung sind für die Hauptkomponentenanalyse und für die KNN-Modellierung ausgewählt worden, um eine vergleichbare Anzahl von Stützpunkten für die Wasserstands-, Strömungs- und Seegangsdaten zu erreichen: Die Dimensionen der Datenmatrizen betragen Np x Nt, mit N = 3454 für die Delft3D-Ergebnisse und Np = 3463 für die SWAN-Ergebnisse. Dabei sind nur diejenigen Punkte berücksichtigt worden, die mindestens während 10 % der Zeit mit Wasser bedeckt waren. Nt = 17521 bezeichnet die Zahl der Zeitpunkte, stündlich vom 01.01.1962, 00:00 bis 01.01.1964, 00:00. Die Strömungen sind bei der Hauptkomponentenanalyse als komplexe Zahlen betrachtet worden, wobei die kartesischen x- und y-Komponenten den realen bzw. imaginären Teil der Datenmatrix bildeten. Die mittleren Wellenrichtungen θ_m sind als Einheitsvektoren zeigend in Richtung θ_m betrachtet worden.

Die Grundlagen der Hauptkomponentenanalyse sind in zahlreichen Textbüchern beschrieben worden, wie beispielsweise bei PREISENDORFER (1988). Prinzipiell geht es darum die Komplexität eines Datensatzes auf wesentliche Faktoren zu reduzieren und mit diesen Faktoren (Hauptkomponenten) den Datensatz hinreichend genau zu beschreiben.

Exemplarisch für die 5 untersuchten Paramater Wasserstand, Strömung, Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung werden nachfolgend die Ergebnisse für den Wasserstand dargestellt (Abb. 8). Die Analysen der übrigen Parameter können im Abschlussbericht (HERMAN et al. 2007) nachgeschlagen werden.

Schon die erste Hauptkomponente der Wasserstände kann über 97 % der gesamten Varianz, dem Informationsgehalt des analysierten Datensatzes beschreiben (Tab. 3). Mit den ersten drei Hauptkomponenten können über 99,6 % der Varianz rekonstruiert

werden. Die räumlichen Muster, die zu diesen Hauptkomponenten gehören, sind in den linken Höhenlinienkarten der Abb. 8 dargestellt. (Die Farbskala in jedem Bild wurde an die Werte des jeweiligen Musters angepasst; die Muster wurden so skaliert, dass jede Hauptkomponente eine Standardabweichung von 1 hat).

Tabelle 3: Prozentualer Anteil der ersten 10 Hauptkomponenten der Wasserstände an der gesamten Varianz des jeweiligen Datensatzes.

Muster	einzeln	kummulativ
1.	97,177	97,177
2.	1,803	98,980
3.	0,638	99,618
4.	0,144	99,762
5.	0,052	99,814
6.	0,034	99,848
7.	0,029	99,877
8.	0,023	99,900
9.	0,017	99,917
10.	0,012	99,929

Das erste Muster und die zu ihm gehörende Hauptkomponente bilden in hohem Maße die Variationen des mittleren Wasserstandes in dem Untersuchungsgebiet ab. Dieses Muster hat positive Werte in jedem Gitterpunkt. Seewärts von den Inseln und in den Rinnen sind die Variationen von diesen Werten gering. Nur über den Wattflächen unterscheiden sich die Werte deutlich von denen in den umgebenden Gebieten. Dies sind die Punkte, bei denen in der ersten Komponente weniger als 90 % der Varianz beinhaltet ist (Abb. 8b).

Das zweite und dritte Muster (Abb. 8c und e) spiegeln u.a. den Wasserstandsgradienten entlang der Küste wider, der durch die Ausbreitung des Tidesignals erzeugt wird. Auch die Neigung der Wasseroberfläche in den Prielen und Rinnen während Ebbe/Flut ist in der Struktur des zweiten und dritten Musters deutlich sichtbar. Diese Muster (genauso wie die weiteren, nicht abgebildeten) sind durch eine höhere räumliche Variabilität über den Wattflächen und an der Küste gekennzeichnet und nur von lokaler Bedeutung, wie die Abb. 8d und f deutlich zeigt. Die ersten fünf Muster zusammen beschreiben über 99 % der Varianz in 93 % der Punkte und über 97 % der Varianz in 97 % der Punkte (Abb. 8a).



Abbildung 8: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Wasserstände in den Jahren 1962– 1963: die ersten drei Muster (a, c, e) und die räumliche Verteilung des Varianzanteils (in %) in diesen Mustern (b, d, f). Achsenbeschriftung in km.



Abbildung 9: Prozentualer Anteil der mit den fünf ersten Hauptkomponenten rekonstruierten Varianz (a) und die Standardabweichung der Differenzen (in cm) zwischen den ursprünglichen und den mit fünf Hauptkomponenten rekonstruierten Daten (b). (Achsenbeschriftung in km).

Die Standardabweichung der Differenzen zwischen den ursprünglichen und den mit fünf Hauptkomponenten rekonstruierten Daten variiert von 3–4 cm seewärts von den Inseln bis zu 5–8 cm über den Wattflächen (Abb. 9b). Nur in einigen vereinzelten Punkten ist dieser Parameter etwas höher. Die höchsten Werte erreicht er in der Leybucht, in der ein sehr großer Flächenanteil über dem mittleren Wasserstand liegt und damit selten mit Wasser überdeckt ist. Folgendermaßen enthalten die Zeitreihen von Wasserständen in den in der Leybucht liegenden Punkten längere Perioden mit konstanten Werten (Trockenfallperioden), die nur mit einer sehr großen Zahl der Hauptkomponenten genau rekonstruiert werden könnten. Es ist ein vergleichbares Phänomen analog zu dem bei der Fourier-Analyse von stückweise konstanten Funktionen.

Die oben skizzierte Interpretation der Rolle des ersten Musters wird durch eine einfache Abhängigkeit zwischen der ersten Hauptkomponente und den HIPOCAS-Wasserständen in dem Input-Punkt bestätigt (Abb. 10). Der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Zeitreihen beträgt 99,7 %. Zudem ist dieses Verhältnis für Wasserstände höher als ~0 mNN nahezu linear. Wie erwartet, offenbart sich das nichtlineare Verhalten des Systems stärker bei niedrigen Wasserständen, wenn Topographie, Bodenreibung und andere damit verbundene Effekte eine dominante Rolle spielen.



Abbildung 10: Verhältnis zwischen der ersten Hauptkomponente der Wasserstände und den HIPOCAS-Wasserständen in dem Input-Punkt.

Es existiert auch eine deutliche Abhängigkeit zwischen der ersten und den weiteren Hauptkomponenten (Abb. 11) und daraus folgend, zwischen den HIPOCAS-Wasserständen und den weiteren Hauptkomponenten. In den Streudiagrammen ist der Verlauf der Tiden klar erkennbar: im durch die ersten fünf Hauptkomponenten gespannten Raum wird während eines typischen Tidezyklus eine fünfdimensionale "Schleife" gezeichnet, die durch die Bereiche der höchsten Konzentration der Punkte verläuft. All das ist für die KNN-Modellierung, insbesondere für die erreichbare Qualität der mit einem künstlichen neuronalen Netz rekonstruierten Hauptkomponenten, von entscheidender Bedeutung.



Abbildung 11: Streudiagramme für die ersten vier Hauptkomponenten der Wasserstände.

7 Anwendung der künstlichen neuronalen Netze (KNN) zur Erstellung der Daten

Es wurden die Strömungs- und Seegangsdaten für die Zeiträume, in denen keine Delft3D/SWAN-Simulationen ausgeführt worden sind, mit künstlichen neuronalen Netzen erstellt. Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass die räumlichen Muster, die sich als Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse der Daten aus den Jahren 1962-1963 ergeben, einen "universellen" Charakter haben. Die Aufgabe besteht also darin, die Hauptkomponenten mit einem neuronalen Netz zu simulieren, um dann die fehlenden Daten als eine lineare Kombination von diesen Hauptkomponenten und von den jeweiligen Mustern zu erzeugen. Nachfolgend wird die Struktur der neuronalen Netze, die zur Modellierung von Wasserständen, Strömungen, signifikanten Wellenhöhen, Energieperioden und mittleren Wellenrichtungen angewandt worden sind, exemplarisch für den Wasserstand beschrieben und die Eignung der neuronalen Netze für die Rekonstruktion der Hauptkomponenten und die Qualität der rekonstruierten Daten ausführlich diskutiert. Die KNN-Untersuchungen für Strömung, Wellenhöhe, Wellenperiode und Wellenrichtung können im Abschlussbericht (HERMAN et al. 2007) nachgelesen werden. Dort ist auch die Untersuchung verschiedener Netzwerktypen ausführlich erläutert aus denen für die weiteren Untersuchungen die zweistufigen feed-forward-Netze ohne direkte Verbindungen von der Eingabeschicht zur Ausgabeschicht ausgewählt wurden (Abb. 12). Als Lernverfahren wurde die sogenannte Backpropagation angewandt, bei der Gerfehler (Differenz zwischen Zielwert und Ausgabewert) dazu genutzt wird, die Gewichte der einzelnen Neuronen mit Hilfe eines Gradientenabstiegsverfahrens zu optimieren.

Der optimale Satz von Eingabeparametern und die optimale Zahl der Neuronen in der verdeckten Schicht ist für jedes Netz durch zahlreiche Tests und eine Reihe von InputParametern der HIPOCAS Daten bestimmt worden: Wasserstand ξ , Windgeschwindigkeitskomponenten u_w , v_w , Windgeschwindigkeitskomponenten (4-Stunden Mittel) $u_{w,mean}$, $v_{w,mean}$, signifikante Wellenhöhe H_s , Energieperiode T_e , mittlere Wellenrichtung θ_m und Wasserstandsgradient $\Delta \xi / \Delta t$. Außerdem wurde die geschätzte Fläche der trockengefallenen Gebiete F_t (berechnet als eine Funktion von ξ und der hypsographischen Kurve des Untersuchungsgebiets) berücksichtigt.



Abbildung 12: Struktur eines künstlichen neuronalen Netzes für die Modellierung am Beispiel des Wasserstandes.

Für das Training wurde der Datensatz von Januar 1962 bis Juni 1963 verwendet. Mit den Daten von Juli bis Dezember 1963 wurde das KNN geprüft. Die Qualität des trainierten KNN wird durch Streudiagramme der ursprünglichen und der mit dem KNN modellierten Hauptkomponenten nachgewiesen.

Die fünf Hauptkomponenten der Wasserstände sind mit einer sehr hohen Genauigkeit rekonstruiert worden (Abb. 13). Wichtig ist, dass die Hauptkomponenten in dem gesamten Wertebereich möglichst genau simuliert werden können; Abb. 13 zeigt, dass das KNN sowohl die "typischen" als auch die "extremen" (bis zu ±4 Standardabweichungen) Ereignisse sehr gut rekonstruiert - und das obwohl die Anzahl der letzteren in den Training-Daten sehr begrenzt ist.

Die Übertragbarkeit der trainierten KNN auf andere Zeitabschnitte wurde geprüft indem die über die künstlichen neuronalen Netze rekonstruierten Daten mit den Ergebnissen der Delft3D- und SWAN-Modellierung aus dem Jahr 1985 verglichen wurden. Dabei wird die räumliche Verteilung des rekonstruierten Varianzanteils und der Standardabweichung der Differenzen zwischen den ursprünglichen und rekonstruierten Daten analysiert. Außerdem wird an ausgewählten Stellen im Untersuchungsgebiet die diskrete Wahrscheinlichkeitsdichte der analysierten Parameter untersucht, um darüber die Eignung des entwickelten Verfahrens zur Erreichung der Ziele des Forschungsvorhabens auch anhand üblicher statistischer Qualitätsparameter nachzuweisen.



Abbildung 13: Streudiagramme für die ersten fünf ursprünglichen (horizontale Achse) und mit dem KNN rekonstruierten (senkrechte Achse) Hauptkomponenten (a–e) der Wasserstände in der Testperiode Juli-Dezember 1963.

Die räumliche Verteilung des rekonstruierten Varianzanteils der Wasserstände im Jahr 1985 und die Standardabweichung der Differenzen zwischen den Delft3D-Ergebnissen und den rekonstruierten Daten sind in der Abb. 14 dargestellt. Die rekonstruierten Daten repräsentieren mindestens 99 % der Varianz in 95 % der Punkte. Die Standardabweichung der Differenzen variiert von 5 bis 7 cm fast im ganzen Untersuchungsgebiet, nur an einzelnen Stellen ist sie höher.



Abbildung 14: Der Anteil (in %) der mit dem künstlichen neuronalen Netz rekonstruierten Varianz (a) und die Standardabweichung der Differenzen (in cm) zwischen den mit Delft3D- mit dem KNN modellierten Wasserständen (b) im Jahr 1985. Achsenbeschriftung in km.

Für ausgewählte Punkte im Untersuchungsgebiet wurde die diskrete Wahrscheinlichkeitsdichte der Wasserstände analysiert (Abb. 15a). Dabei wurden die aus den Delft3D- und aus den KNN-Ergebnissen berechneten diskreten Wahrscheinlichkeitsdichten der Wasserstände in diesen Punkten verglichen (Abb. 15b–f). In den Punkten 1–3 und 5 ist die Form der Wahrscheinlichkeitskurven der Wasserstände sehr ähnlich. Sie sind, wie erwartet, in den im Wattenmeer gelegenen Punkten, wo die Tideamplitude größer ist, ,breiter^e als seewärts der Inseln. Nur im trockenfallenden Punkt 4 haben sie einen abweichenden Verlauf und weisen ein sehr starkes Maximum bei dem Wasserstand auf, welcher der Geländehöhe in diesem Punkt entspricht.



Abbildung 15: Die Lage der Analysepunkte (a) und die diskrete Wahrscheinlichkeitsdichte der Wasserstände in den Punkten 1–5 (b–f) im Jahr 1985. Klassenbreite 0,1 m.

Die Übereinstimmung zwischen den aus den Delft3D- und aus den KNN-Ergebnissen berechneten Kurven ist sehr gut, obwohl das KNN nicht in der Lage ist, die relativ starke Variation der Wahrscheinlichkeitsdichte im Bereich ± 1 m NN genau zu reproduzieren: Die mit dem KNN simulierten Kurven sind in diesem Bereich glatter und liegen generell leicht unter den aus den Delft3D-Daten berechneten Wahrscheinlichkeitsdichten. Die höheren Wasserstände (etwa im Bereich NN+ 1,0–2,5 m) werden hingegen durch das neuronale Netz leicht überschätzt. Das alles macht sich aber in den kumulativen Wahrscheinlichkeitsdichten kaum bemerkbar – die Kurven in den rechten Teilen der Abb. 15b–f liegen sehr eng beieinander.

8 Rekonstruktion der Wasserstände, der Strömungen und des Seegangs früherer Sturmfluten

Da in dem Forschungsvorhaben eine 40-jährige Zeitreihe des Seegangs im Bereich des Norderney Seegats rekonstruiert werden sollte, bot es sich an, die Aufgabenstellung um einen Punkt zu erweitern: die Rekonstruktion der Sturmfluten mit den Randbedingungen aus HIPOCAS für die Ereignisse, bei denen erhebliche Schäden an den Bauwerken des Insel- und Küstenschutzes entstanden sind. Über den Seegang der meisten von diesen Sturmfluten liegen bisher keine oder nur unzureichend abgesicherte quantitative Erkenntnisse vor.

Dabei stellt sich die wesentliche Frage, ob die im Rahmen des Projekts rekonstruierten Daten dazu benutzt werden können, präzise Aussagen über den Verlauf der Wasserstände, der Strömungen und des Seegangs bei diesen Extremereignissen zu erhalten. Es ist im Laufe des Projekts mehrfach festgestellt worden, dass der HIPOCAS-Datensatz, der als Quelle von Randbedingungen für die Delft3D- und SWAN-Simulationen im Untersuchungsgebiet gebraucht wurde, eine belastbare Grundlage für die mittelfristige Modellierung bildet. Der Vergleich der Modellierungsergebnisse mit den Messdaten zeigt, dass der HIPOCAS-Datensatz zuverlässige Daten bezüglich der statistischen Verteilung der analysierten Parameter und des Verlaufs "typischer" Ereignisse liefert (Kap. 4). Es wurde aber auch mehrfach betont, dass diese Daten nur mit großer Vorsicht bei singulären Ereignissen wie Sturmfluten angewandt werden können. Um die Anwendbarkeit der HIPOCAS-Daten bei Extremereignissen belastbar zu überprüfen, wurden für ausgewählte Sturmfluten aus der Periode 1962–2002 Delft3D-Rechnungen mit unterschiedlichen Eingangsdaten ausgeführt. Die Einzelheiten der Untersuchung sind im Abschlussbericht dargestellt (HERMAN et al. 2007a).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Input-Daten aus HIPOCAS, die im Projekt MOSES zur Verfügung stehen, für die Rekonstruktion der Wasserstände, der Strömungen und des Seegangs früherer Sturmfluten ungeeignet sind. Diese Aussage gilt allein für die Rekonstruktion singulärer Ereignisse aber keinesfalls für ihre Nutzung bei der Realisierung des Hauptzieles des Projekts, der beispielhaften und übertragbaren Ermittlung repräsentativer mittelfristiger Zeitreihen von Tide- und Seegangsparametern im Untersuchungsgebiet.

9 Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen der hier dargestellten und erläuterten Modelluntersuchungen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Der HIPOCAS-Datensatz ist für mittelfristige statistische Seegangsuntersuchungen im Küstenvorfeld von Norderney eine belastbare Grundlage. Er liefert geeignete Randbedingungen für kleinräumige Seegangsmodellierungen in den Küstengewässern.
- 2. Das Seegangsmodell SWAN kann die zeitliche und räumliche Variabilität des Seegangs in dem durch Tide, stark strukturierter Topographie und Wind geprägten Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats zuverlässig reproduzieren. Mit dem hydrodynamischen Modell Delft-3D lassen sich die für das Einzugsgebiet

des Norderneyer Seegats typischen Phänomene des Wasseraustausches naturähnlich nachbilden.

- 4. Das im Rahmen des Projekts MOSES entwickelte Verfahren zur Erstellung der 40-Jahre-Datensätze für die Wasserstände, Strömungen und Seegangsparameter ist in der Lage sehr effizient und mit hoher Genauigkeit die Ergebnisse der Delft-3D- und SWAN-Modellierung zu reproduzieren. Wie ausführlich beschrieben wurde ist damit das Verfahren in der Lage, für die Zeitabschnitte, für die aus Zeitgründen keine numerischen Modellierungen vorgenommen werden konnten, die für die Ziele des Forschungsvorhabens benötigten Daten hinreichend genau zu bestimmen.
- 5. Es konnte gezeigt werden, dass die mit dem KNN-Verfahren erzeugten Daten für das Ziel des Projekts zur Ermittlung von Zeitreihen zur Repräsentanz des mittelfristigen Wasserstands-, Strömungs- und Seegangsklimas im Norderneyer Seegat und seinem Einzugsgebiet mit Umfeld beispielhaft und übertragbar auf andere Gebiete eine belastbare Grundlage bilden.
- 6. Es wurde festgestellt, dass die im MOSES-Projekt verwendeten Randbedingungen keine belastbare Grundlage für die Rekonstruktion von Wasserständen, Strömungen und Seegang früherer Sturmfluten bilden, insbesondere hinsichtlich der Windfelder. Für Extremereignisse wie die hier untersuchten historischen Sturmfluten ist die Generierung von Randbedingungen für die lokalen Modelle mit wesentlich aufwändigeren Methoden erforderlich, insbesondere mit meteorologischen Modellen, die zeitlich und räumlich höher auflösende Windfelder erzeugen als die hier verwandten Datensätze.

10 Schriftenverzeichnis

- DELFT HYDRAULICS: User manual of Delft3D-FLOW simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. 2003.
- HERMAN, A.; KAISER, R. and NIEMEYER, H. D.: Medium-term wave and current modelling for a mesotidal Wadden Sea coast. In: Proc. 30th Int. Conf. Coastal Eng. World Scientific, San Diego, 2006.
- HERMAN, A.: Nonlinear principal component analysis of the tidal dynamics in a shallow sea. Geophysical Research Letters 34, 2007.
- HERMAN, A.; KAISER, R. und NIEMEYER, H. D.: MOSES A (03KIS040) Schlussbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben MOSES, NLWKN - Forschungsstelle Küste, Norderney, 2007a.

http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/559767226.pdf.

HERMAN, A.; KAISER, R. and NIEMEYER, H. D.: Modelling of a medium-term dynamics in a shallow tidal sea, based on combined physical and neural network methods. Ocean Modelling 17, 277–299, 2007b. HERMAN, A.; KAISER, R. and NIEMEYER, H. D.: Wind-wave variability in a shallow tidal sea-Spectral modelling combined with neural network methods. Coastal Engineering 56, 759–772, 2009.

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383909000374

- PREISENDORFER, R. W.: Principal component analysis in meteorology and oceanography. Elsevier Science, New York, 1988.
- WEISSE, R.; FESER, F. und GÜNTHER, H.: Wind- und Seegangsklimatologie 1958–2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. GKSS Institut für Küstenforschung, Report 2003/10, 2003.