

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

## **Pleskachevsky, Andrey; Eppel, Dieter; Kapitza, Hartmut; Vaessen, Bernd BELAWATT I: Modellierung der seegangsinduzierten Energieeinträge in der Hörnummer Bucht**

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/20.500.11970/101556>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pleskachevsky, Andrey; Eppel, Dieter; Kapitza, Hartmut; Vaessen, Bernd (2006):  
BELAWATT I: Modellierung der seegangsinduzierten Energieeinträge in der Hörnummer  
Bucht. In: Die Küste 71. Heide, Holstein: Boyens. S. 61-76.

### **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.



# BELAWATT I: Modellierung der seegangsinduzierten Energieeinträge in der Hörnumener Bucht

Von ANDREY PLESKACHEVSKY, DIETER EPEL, HARTMUT KAPITZA und BERND VAESSEN

## Z u s a m m e n f a s s u n g

Im KFKI-Vorhaben BELAWATT wurde ein gekoppeltes Modellsystem dazu verwendet, eine zweijährige Zeitreihe von Strömung und Seegang im Hörnumener Tidebecken zu berechnen. In diesem Bericht geht es um die vom Modellsystem berechnete Wirkung des Seegangs auf Strömung und Wasserstände sowie um den Eintrag der Seegangenergie in die Küstenlinie. Der vom Seegang erzeugte ‚radiation stress‘ bewirkt bei Starkwind (13 m/s Wind aus NW) eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit um rund 1 m/s über Teilen des Ebbdeltas sowie einen zusätzlichen Anstieg des Wasserstandes um mehr als 20 cm in Teilen des Tidebeckens. Für maximalen Energieeintrag in die Küstenlinie während des Sturms „Anatol“ (3./4.12.1999) werden im Tidebecken nur rund 3 % der Energieeinträge erreicht, die an der Sylter Westküste auftreten. Eine Szenarien-Rechnung für den Dezember 1999 mit einem um 50 cm erhöhten Wasserstand und einer Windgeschwindigkeits-Zunahme um 10 % zeigt, dass der Energieeintrag in die Sylter Westküste, verglichen mit dem Ist-Zustand, um bis zu 30 % zunimmt. In Verbindung mit den prognostizierten erhöhten Sturmfluten der nahen Zukunft (WOTH, WEISSE and v. STORCH, 2006) weisen diese Szenario-Ergebnisse auf eine steigende Gefahr der Küstenerosion der Insel Sylt durch die Brandung hin.

## S u m m a r y

*The KFKI project BELAWATT used a coupled model system for simulating a 2-year time-series of currents and waves in the Hörnum tidal basin (German Bight, North Sea). This article deals with the model results concerning the effects of waves on currents and water levels and the input of wave energy into the coastline. During a storm event (wind 13 m/s from NW) the wave-generated radiation stress produces an increase of the current velocity of 1 m/s above parts of the tidal ebb delta and it produces a water level increase of more than 20 cm in parts of the tidal basin. The model system also calculates the maximum energy input into the coastline during the storm event „Anatol“ (3./4.12.1999). Only 3 % of the maximum energy input into the west coast of Sylt island reaches the coastline of the tidal basin. A scenario-run for December 1999 with a water level increase of 50 cm and a wind velocity increased by 10 % shows that the input of wave energy into the west coast of Sylt island increases by 30 % compared to present conditions. With regard to the forecasted near-future (WOTH, WEISSE and v. STORCH, 2006) increase of strong storm surges, the scenario results indicate an increased risk of coastal erosion in the surf zone of Sylt island.*

## K e y w o r d s

Numerische Modellierung, Modellkopplung, Seegangsmo­dul, Strömungs­mo­dul, radiation stress, hydrodynamische Belastung, Seegang­energie, Anatol, Klima-Szenario, Hörnumener Tidebecken, Sylt, Wattenmeer

numerical modelling, coupled models, wave module, current module, radiation stress, hydraulic impact, wave energy, Anatol, climate scenario, Hörnum tidal basin, Sylt island, Wadden Sea.

## I n h a l t

1. Einleitung . . . . .	62
2. Modellsystem . . . . .	63
2.1 Konzept . . . . .	63
2.2 Systemkomponenten: Strömungsmodul TRIM . . . . .	64
2.3 Systemkomponenten: Seegangsmo- dul K . . . . .	66
3. Auswirkung des Seegangs auf Strömungen und Wasserstände . . . . .	66
4. Mit dem Modellsystem erzeugte Zeitreihe . . . . .	68
5. Seegangsinduzierte Energieeinträge in die Küstenlinie . . . . .	69
5.1 Seegangsenergiefluss . . . . .	69
5.2 Energieeinträge in die Küstenlinie . . . . .	70
5.3 Szenarien . . . . .	73
6. Danksagung . . . . .	76
7. Schriftenverzeichnis . . . . .	76

## 1. Einleitung

Die Vorgeschichte des BELAWATT-Projektes begann mit dem im November 2000 (unter der Federführung des AWI) skizzierten Verbundprojekts DYNAWATT: „Einfluss der Hydrodynamik auf die sedimentäre, biogeochemische und biologische Dynamik im Wattenmeer“. Geplante Untersuchungsgebiete waren das Lister und das Hörnum-Tidebecken. Ein Modell sollte es ermöglichen, Prognosen anzustellen „über künftige Änderungen in der Morphologie und in den Lebensgemeinschaften des Wattenmeeres infolge von Klimaänderungen“.

Das Verbundprojekt DYNAWATT wurde von den Geldgebern aus finanziellen Gründen nicht weiter verfolgt. Stattdessen wurde vom damaligen Forschungsleiter Küste das Pro-

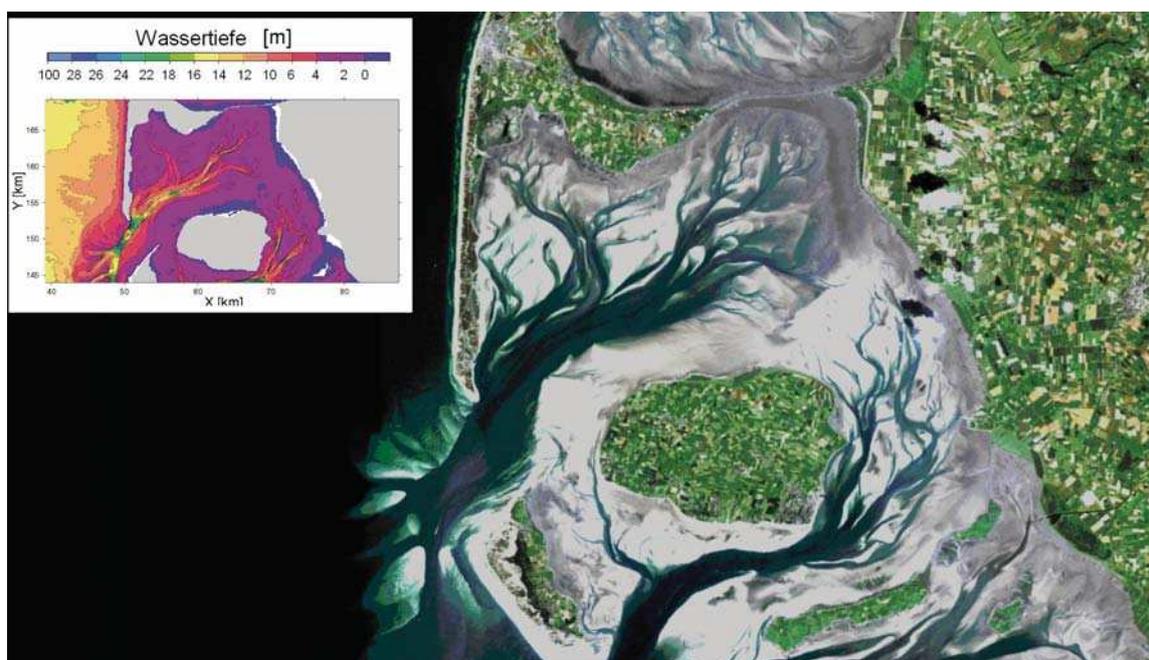


Abb. 1: Die Luftaufnahme und Topographie des Untersuchungsgebiets. Die Topographie basiert weitgehend auf Peildaten des BSH und auf Vermessungsdaten des ALR Husum.

jekt BELAWATT initiiert. Damit sollte ein Haupt-Element von DYNAWATT unter vorwiegend physikalisch-ozeanographischen Aspekten in die Tat umgesetzt werden: die Modellierung der Hydrodynamik und die Frage nach einem Zusammenhang zwischen Sediment und Benthos auf der einen Seite und der Hydrodynamik auf der anderen Seite. Die Beantwortung dieser Frage war das Hauptziel von BELAWATT (PULS et al., dieses Heft; EPPEL et al., 2006). Das Untersuchungsgebiet war das Hörnum Tidebecken. Neben der Arbeit mit numerischen Modellen wurden Langzeit-Naturmessungen der Hydrodynamik im Hörnum Tidebecken begonnen. Konzept, Umfang und Ergebnisse der Messungen sind in EPPEL et al. (2006) beschrieben.

In diesem Artikel wird das in BELAWATT verwendete Modellsystem MOPS (Morphodynamic Prediction System) vorgestellt – insbesondere geht es um die Wirkung des Seegangs auf Wasserstand und Strömung (durch den sog. radiation stress) am Beispiel des Sturmtiefs ANATOL. Weiterhin beschreibt der Artikel die Erstellung einer zweijährigen Zeitreihe (November 1999–Oktober 2001) der Hydrodynamik im Hörnum Tidebecken. Die Zeitreihe ist die Grundlage für den in PULS et al. (dieses Heft) angestellten Abgleich zwischen hydrodynamischer Belastung und dem Sediment-Regime bzw. der Benthos-Lebensgemeinschaft im Hörnum Tidebecken.

Als Anwendung wird die Hydrodynamik-Zeitreihe dazu verwendet, den Energieeintrag des Seegangs in die Küstenlinie für den Dezember 1999 zu quantifizieren. Dieser Energieeintrag des Ist-Zustandes wird verglichen mit dem Energieeintrag, der sich ergibt aus den Ergebnissen einer MOPS-Szenarienrechnung für den Dezember 1999: einer Rechnung mit einer Wasserspiegel-Erhöhung um 50 cm plus einer Zunahme der Windgeschwindigkeit um 10 %. Der Dezember 1999 war ein Monat mit mehreren Starkwind-Ereignissen, z.B. dem Sturm „Anatol“.

## 2. Modellsystem

### 2.1 Konzept

Im Rahmen des Projekts wurde ein Modellsystem angewendet, das Seegang und Strömung zusammenkoppelt. Das wichtigste bei diesem Konzept ist: Seegangs- und Strömungsmodell laufen nicht nacheinander, sondern gleichzeitig auf unterschiedlichen Prozessoren, die Modelle tauschen ihre Ergebnisse untereinander aus.

Das System besteht aus drei Modulen: dem Strömungsmodell *TRIM*, dem Seegangsmodell *K* und dem Hauptprogramm *MOPS* (*MO*rphodynamic *P*rediction *S*ystem), das die Läufe der beiden Modelle und den Datentransfer steuert. Das TRIM-Modell rechnet mit vier ineinander genesteten Gittern mit den horizontalen Auflösungen 800, 400, 200 und 100 m. Das Seegangsmodell *K* rechnet mit einer horizontalen Auflösung von 400 m.

Sowohl das TRIM- als auch das K-Modell wurden entwickelt für Küstengebiete mit Flachwasser, starken Bodengradienten und trockenfallenden Flächen. Im Rahmen von BELAWATT wurden die Modelle validiert anhand der Strömungsdaten diverser Schiffseinsätze sowie der Wasserstands-, Strömungs- und Seegangsdaten von Dauermesseinrichtungen (Pegel, Messpfahl, Boden-ADCP, Seegangsboje) im Hörnum Tidebecken (siehe z.B. EPPEL et al., 2003).

Das Modellsystem stützt sich auf Daten des BSH. Die Wasserstände für den Betrieb der Strömungs- und Seegangsmodelle wurden vom BSH als Ergebnisse des operationellen BSH-Zirkulationsmodells für die Nordsee zur Verfügung gestellt. Der Wind wurde ebenfalls vom

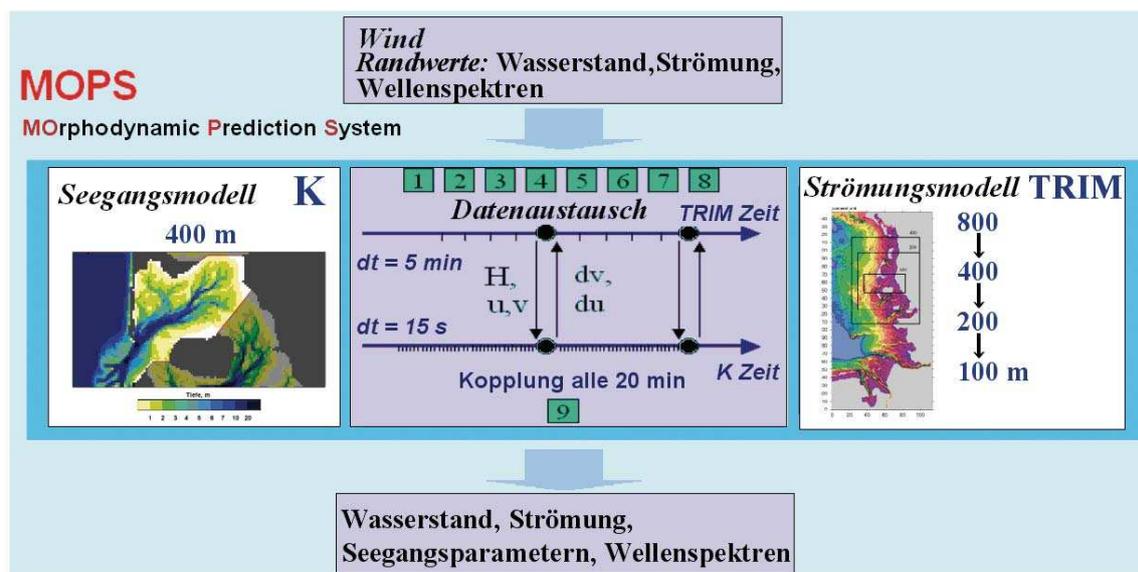


Abb. 2: Das Modellsystem MOPS. Rechts: Strömungsmodell „TRIM“ (vier ineinander genestete Gitternetze: 800, 400, 200 und 100 m horizontale Auflösung). Links das Seegangmodell „K“ (Horizontale Auflösung 400 m). In der Mitte: Kopplung und Datenaustausch (obere Zeitachse zeigt die Zeit des TRIM-Modells (acht Prozessoren), die untere die Zeit des K-Modells (ein Prozessor). Alle 20 Minuten findet die Kopplung statt. Die in TRIM berechneten Wasserstände und Strömungen werden zum K-Modell geschickt. Gleichzeitig werden die vom K-Modell durch den ‚radiation stress‘ errechneten Strömungs-Beschleunigungsterme dem TRIM-Modell zur Verfügung gestellt. Nachdem diese beiden Austauschprozeduren ausgeführt wurden, laufen die Modelle unabhängig und parallel weiter bis zum nächsten Austauschzeitpunkt. Das System ist so angepasst, dass beide Modelle etwa gleiche Realzeit für die Berechnung der Kopplungszeit (20 min) brauchen. Das bedeutet: Ein Modell muss nicht unnötig lange auf das andere Modell warten.

BSH zur Verfügung gestellt; es handelt sich dabei um einen Vorhersagewind des DWD. Eine Ausnahme bildet der Anatol-Sturm am 3./4. Dezember 1999: hier wurde der gemessene Stundenwind des DWD anstelle des Vorhersagewindes verwendet, da letzterer zu geringe Windgeschwindigkeiten enthielt. Die Randwerte für das Seegangmodell stammen aus dem Projekt HIPOCAS (WEISSE et al., 2003).

## 2.2 Systemkomponenten: Strömungsmodul TRIM

Im Modell TRIM 3D werden die 3-dimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen auf der Basis von finiten Differenzen gelöst, d.h. auch nicht-hydrostatische Effekte können berücksichtigt werden. Wegen der hier benutzten minimalen horizontalen Auflösung von 100 m, die im Vergleich zur Wassertiefe immer noch groß ist, ist ein Verzicht auf diese Effekte zulässig, und das Modell kann im hydrostatischen Mode betrieben werden. Dadurch wird eine Rechenzeiterparnis von ca. 50 % erreicht. Details des Modells sowie einige Validierungsrechnungen finden sich in CASULLI u. STELLING (1995).

TRIM 3D benötigt als wichtigste Antriebsdaten den Wasserstand auf dem offenen Rand. Hier werden die Ergebnisse des routinemäßig betriebenen 3-dimensionalen Strömungsmodells des BSH aus der Deutschen Bucht genutzt, die eine Auflösung von einer Seemeile haben. Der Windschub  $\tau^w$  für das TRIM-Modell wird berechnet mit:

$$\tau^w = c_D \frac{\rho_a}{\rho} (U_{10}^w - u) |U_{10}^w|,$$

dabei bedeutet  $U_{10}^w$  die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe,  $u$  ist Strömungsgeschwindigkeit der Wasseroberfläche, das Verhältnis zwischen den Dichten der Atmosphäre und des Wassers  $\rho_a/\rho$  ist  $1,25 \cdot 10^{-3}$  und der Reibungskoeffizient  $c_D = 1,4 \cdot 10^{-3}$ .

Um die Skalendiskrepanz zwischen der größten Auflösung der Antriebsdaten (1800 m) und der feinsten Auflösung des numerischen Gitters (100 m) abzumildern, wurde für diese Anwendung eine Gitterhierarchie von vier jeweils ineinander genesteten Gittern entworfen, deren Auflösung von Stufe zu Stufe um den Faktor 2 zunimmt (800/400/200/100 m, s. Abb. 3). Das größte Gitter wird dann direkt mit BSH-Daten betrieben, und alle feineren Gitter erhalten ihre Randwerte vom nächst größeren geliefert.

Die Vertikalauflösung beträgt 0,5 m mit Zeitschritten von 300 s, 150 s, 60 s und 30 s, je nach Gitter. Die Simulation wurde auf einem Linux-Cluster mit acht Prozessoren (Pentium 4, 2,6 GHz) durchgeführt. Die ‚turnaround‘-Zeit war 3 h CPU für 24 h Realzeit. Dabei

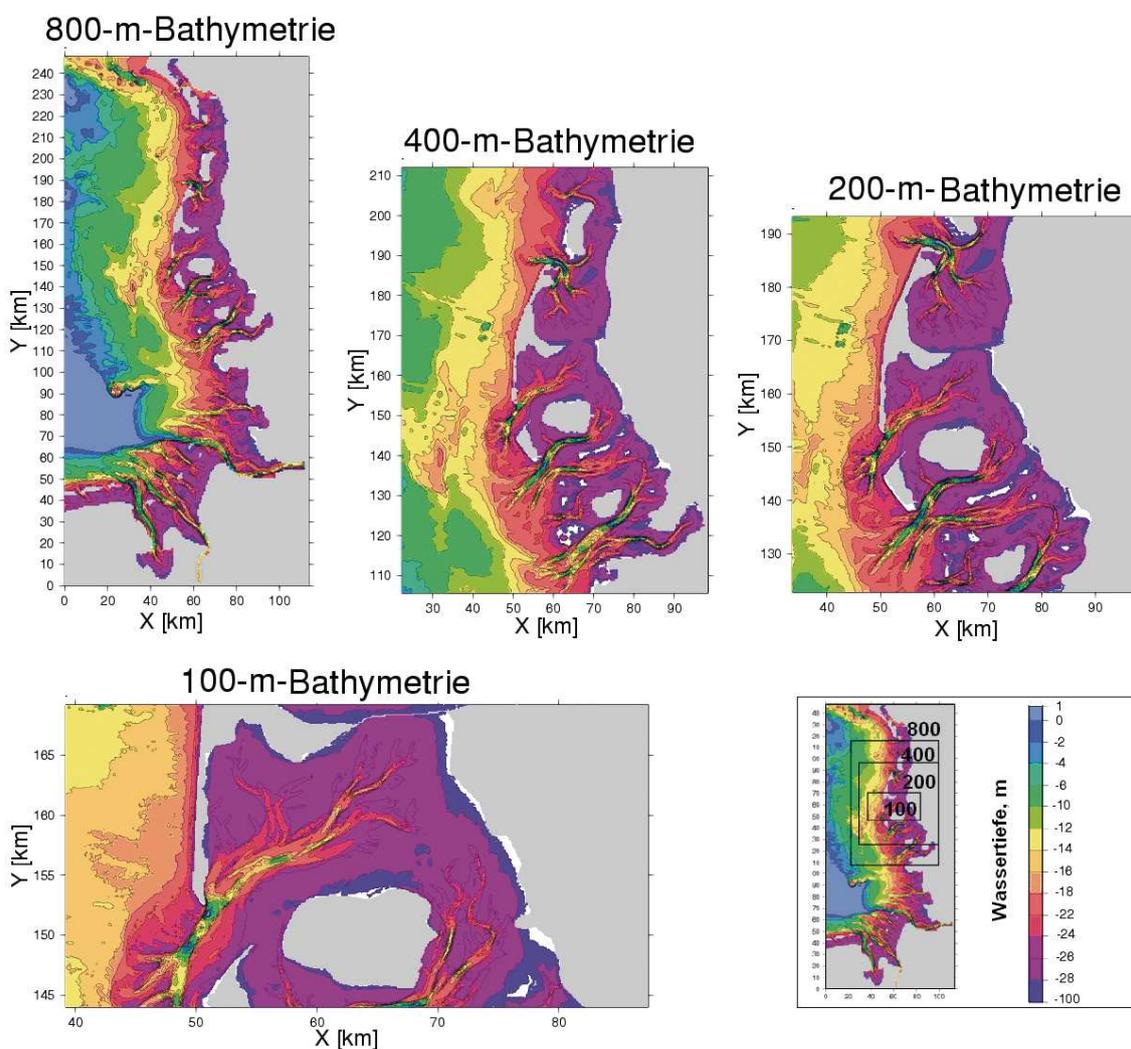


Abb. 3: Topographien des TRIM-Modells, Modellgebiete mit horizontalen Auflösungen von 800, 400, 200 und 100 m. Die Topographie basiert weitgehend auf Peildaten des BSH und auf Vermessungsdaten des ALR Husum. Ein Überblick über die ineinander genesteten Modellgebiete ist rechts unten zu sehen.

ist der Anteil an Kommunikationszeit, die über eine Standard-100-MBit/s-Leitung erfolgt, mit ca. 40 % zu veranschlagen. Ein TRIM3D-Testlauf mit reduzierter Vertikalauflösung im feinsten Gitter ( $\Delta z = 2$  m für  $z > -10$  m,  $\Delta z = 5$  m für  $-10$  m  $> z > -20$  m, alles Tiefere zu einer Schicht zusammengefasst) benötigte mit den gleichen Zeitschritten etwa die gleiche Rechenzeit auf einem Doppelprozessor-LINUX-PC.

### 2.3 Systemkomponenten: Seegangsmo d u l K

Für die Berechnung des Seegangs wird im *MOPS*-System das Seegangsmo d e l l *K* verwendet. Das *K*-Modell ist ein diskretes spektrales Modell, das bei GKSS aus dem *WAM*-Modell entwickelt wurde, um den Seegang in topographisch stark strukturierten Küstengewässern zu berechnen. Der Seegang wird als Seegangsenergiedichte *E* im Wellenzahl/Richtungsraum ( $k, \theta$ ) berechnet. Beim Windantrieb wird unterschieden zwischen dem Snyder-Windinput und dem Philips-Windinput. Der Effekt des Wellenbrechens wird im *K*-Modell indirekt berücksichtigt. In der Küstenzone, wo in der Realität Wellenbrechen stattfindet, wird der entsprechende Energieverlust durch die nicht-lineare Dissipation (Kitaigorodski-scaling) simuliert. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in SCHNEGGENBURGER et al. (2000). In BELAWATT wurde *E* mit einer Richtungsauflösung von 30 Grad (12 Sektoren), einer Wellenzahla u f l ö s u n g von 25 Stützstellen (Output des Modells in Frequenzraum entspricht 0-1 Hz) und einer zeitlichen Auflösung von  $dt = 15$  sec berechnet.

Die Topographie für das *K*-Modell basiert auf der 100-m-Topographie des TRIM-Modells, siehe Abb. 2, links. Unter Benutzung einer LINUX-WORKSTATION brauchte das Modell für das gesamte 100-m-Modellgebiet (etwa 70 000 Punkte) drei Tage CPU für einen Tag Realzeit – ein für die Zwecke von BELAWATT inakzeptabler Wert. Um die Zahl der aktiven Punkte zu reduzieren, wurden (1) südliche Wattgebiete, die praktisch nicht zum Seegang in Hörnummer Tidebecken beitragen, ausgeblendet, die südliche Modellgrenze für das *K*-Modell wurde gezogen zwischen Amrum Odde und Föhr (W $\leftrightarrow$ O-Linie) sowie zwischen Föhr und dem Festland (SW $\leftrightarrow$ NO-Linie), (2) anstelle des 100-m-Gitters ein 400-m-Gitter verwendet. Dadurch reduziert sich die CPU-Zeit um den Faktor  $dx \cdot dy \cdot dt = 4 \cdot 4 \cdot 3 = 48$ : Die Rechenzeit sank auf rund eine Stunde CPU für einen Tag Realzeit. Jeweils 16 Gitterzellen der 100-m-Topographie wurden für die 400-m-Topographie des *K*-Modells zusammengefasst.

Als Ergebnisse der Modellrechnungen wurden alle 20 Minuten abgespeichert: (1) Signifikante Wellenhöhe  $H_s$ , (2) Seegangsperioden ( $T_{m-1}$ ,  $T_{m-2}$ , Mittlere Periode  $T_m$ , Peak Periode  $T_p$ ) und (3) die mittlere Richtung des Seegangs. Felder der Seegangs-Spektren werden alle Stunde abgespeichert. Für die spätere Berechnung der Boden-Schubspannungen wurden die Seegangs-Ergebnisse des 400-m-Gitters auf das 100-m-Gitter inter- und extrapoliert (siehe EPPEL et al., 2006).

### 3. Auswirkung des Seegangs auf Strömungen und Wasserstände

Der Einfluss von Strömung und Wasserstand auf den Seegang besteht darin, dass (a) die Seegangsperiode durch die Strömung modifiziert wird, und (b) der Seegang in Abhängigkeit von der Wassertiefe mehr oder weniger stark gedämpft wird. Dieses wird im Kopplungsteil Strömungsmodell  $\rightarrow$  Seegangsmo d e l l durchgeführt.

Andererseits kann ein Teil der Seegangenergie mittels des ‚radiation stress‘ an die Strömung übergeben werden. Dieser Effekt kann beispielsweise beim Einlaufen des Seegangs ins Flachwasser, wo durch verstärkte Bodenreibung den Wellen Energie entzogen wird, zur Entstehung zusätzlicher Strömung führen (longshore current). Diese Wirkung des Seegangs kann die Strömungs- und Wasserstandsfelder verändern und dadurch den Seegang selbst, weil im Flachwasser der Seegang sehr empfindlich auf Änderungen dieser Parameter reagiert. Details und Formeln finden sich in YAMAGUCHI et al. (1988) und in EPEL et al. (2006).

In den Modellrechnungen übergibt das Seegangsmodul an das Strömungsmodul die Stärke und die Richtung der durch den ‚radiation stress‘ verursachten Strömungsbeschleunigung  $a_{rs}$ . Abb. 4 zeigt eine Momentaufnahme dieses Beschleunigungs-Feldes für ein Starkwind-Ereignis am 27.–28. Oktober 2002. Im Abb. 4. enthalten ist die Formel für die Berechnung von  $a_{rs}$ . Im Fall einer 2D-Version des Strömungsmodells ist  $H$  die gesamte Wassertiefe. In der Version TRIM 3D wird  $a_{rs}$  komplett an die oberste Wasserschicht des Modells übergeben, dort ist  $H$  also die Dicke dieser obersten Schicht.

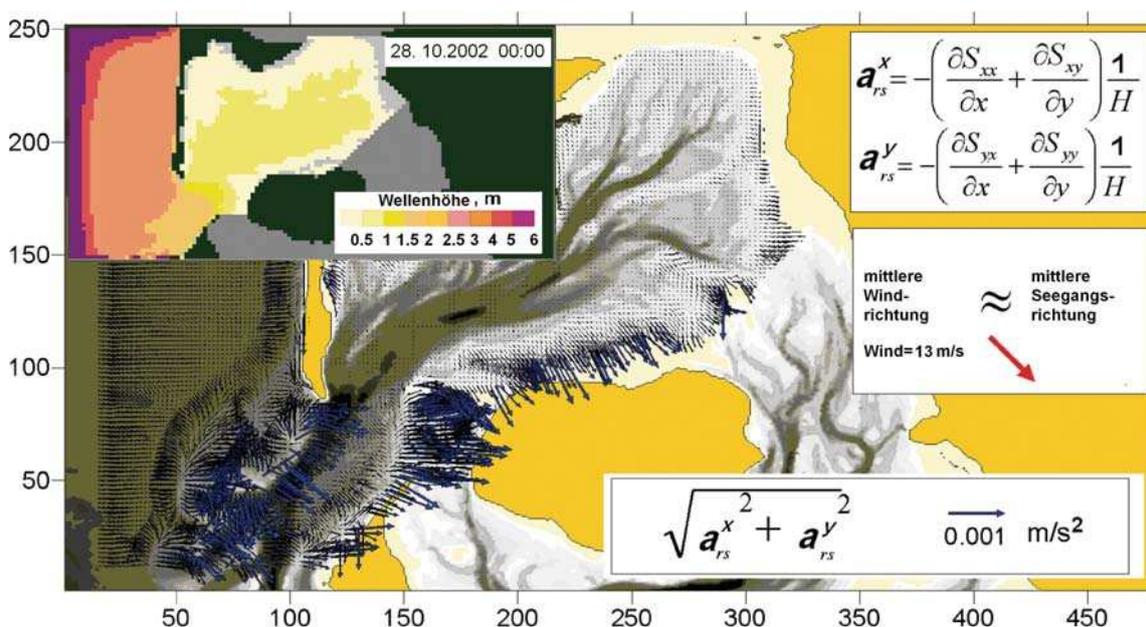


Abb. 4: Durch radiation stress erzeugte Beschleunigungsvektoren  $a_{rs}$ , berechnet von *MOPS* für den 28.10.2002, 00:00 UTC. Der Wind am 27.10.2002 kam aus nord-westlichen Richtungen mit etwa 15 m/s. Die  $x$ - und  $y$ -Komponenten der Beschleunigung werden aus Komponenten des Stresstensors  $S$  berechnet.  $H$  ist die Höhe der Wassersäule, in der der radiation stress an die Strömung übergeben wird. Die Topographie ist grau unterlegt. Oben links: der aktuelle Seegang (signifikante Wellenhöhe). Die Strömungsbeschleunigung ist dort am größten, wo viel Seegangenergie durch Bodenreibung dissipiert wird.

Abb. 5 (oben) zeigt für den gleichen Termin die Änderungen im Strömungsfeld, die durch Berücksichtigung des radiation stresses entstehen. Man sieht deutlich den südlich gerichteten „longshore current“ – Küstenstrom (20–30 cm/s) vor der Sylter Westküste, sowie eine Strömungs-Änderung über den Sandbänken des Ebbdeltas von mehr als 1 m/s in das Tidebecken hinein. Das untere Bild vom Abb. 5. zeigt die durch den radiation stress erzeugte Wasserstands-Differenzen im Hörnum Tidebecken. Es werden Wasserstands-Erhöhungen von mehr als 20 cm berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass der radiation stress eine substantielle Auswirkung auf die Strömungsdynamik haben kann. In den Wattgebieten kann der radiation stress bei Sturm erhöhte Wasserstände erzeugen.

#### 4. Mit dem Modellsystem erzeugte Zeitreihe

Die verfügbare CPU-Zeit erlaubte es, den Zeitraum von November 1999 bis Oktober 2001 mit ‚realen‘ Antriebsdaten mit dem gekoppelten Modellsystem MOPS zu simulieren. Dabei wurden im 20-Minuten-Takt alle dynamischen Felder gespeichert (archiviert). Diese Daten sind die Basis für die weiteren Untersuchungen. Alle Ergebnisdaten sind gemeinsam mit den Inputdaten archiviert (etwa 1,2 TB).

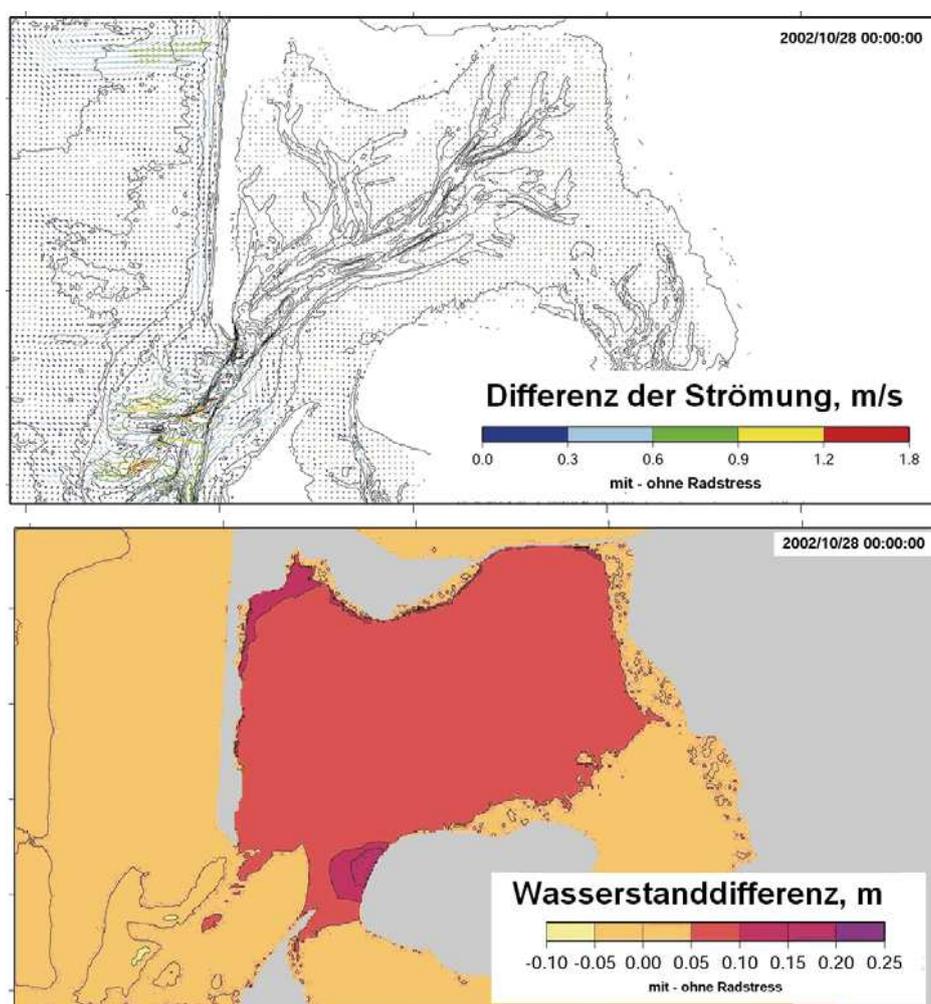


Abb. 5: Durch den radiation stress erzeugte Änderungen im Strömungs- (oben) und im Wasserstands-Feld (unten) für den 28.10.2002, 00:00 UTC. Die stärksten Änderungen der Strömungen sind über den Bänken des Ebbdeltas zu sehen, wo die Wassertiefe sich auf kleinem Raum stark ändert. Im nord-westlichen Modellbereich sieht man eine Struktur am Rand, die damit verbunden ist, dass das Strömungsmodell im nächst-größeren Gitter (womit die Randwerte [Wasserstände] für unser Gitter erzeugt werden) keinen radiation stress berücksichtigt. Damit haben die Punkte südlich des Randes eine Beschleunigung durch den radiation stress, die Punkte nördlich des Randes aber nicht. Dieser Effekt zeigt sich nur kurzfristig bei starkem Seegang.

Start- und End-Termin der Hydrodynamik-Zeitreihe November 1999 bis Oktober 2001 kamen so zustande: (1) Die Seegangs-Randwerte wurden vom Projekt HIPOCAS (WEISSE et al., 2003) übernommen. Diese Randwerte lagen vor bis einschließlich November 2002.

Da ursprünglich eine dreijährige Zeitreihe gerechnet werden sollte, wurde als Start-Termin festgelegt: November 1999. (2) Bis zum Projekt-Ende konnten die drei Jahre Simulationszeit nicht fertig gestellt werden; aus den geplanten drei Jahren wurden zwei Jahre mit dem End-Termin Oktober 2001.

## 5. Seegangsinduzierte Energieeinträge in die Küstenlinie

### 5.1 Seegangsenergiefluss

Daten über seegangsinduzierte Belastungen des Küstenvorlandes und des Strandes sind von grundlegender Bedeutung für die Planung von Baumaßnahmen und zur Abschätzung von Risiken, insbesondere im Hinblick auf sich ändernde Umweltbedingungen. Diese Informationen sind schwierig zu beschaffen. Ein Verfahren der Wahl ist, von Seegangsbojen gemessene Zeitreihen relevanter Parameter dazu zu verwenden, den Energiefluss und die Energiedissipation des Wellenfeldes am Ort der Boje abzuleiten und diese Werte mit Hilfe empirischer Formeln auf den (nicht gemessenen) Energiefluss und die Energiedissipation unmittelbar an der Küste zu extrapolieren (siehe WITTE et al., 2000). Geeignete Strömungs-Seegangmodelle können diese Interpolationen/Extrapolationen auf ganze Küstenregionen ausdehnen.

Die in BELAWATT in 20-minütigem Abstand vorliegenden berechneten Zeitreihen flächenhafter Seegangsinformation erlauben es, den Energietransport des Seegangs und den Energieeintrag in die Küstenlinie direkt abzuschätzen. Hierzu wird die zweijährige Zeitreihe des Dezember 1999 gewählt, da dieser Monat durch starke auflandige Winde (der Sturm „Anatol“ fällt in diesen Zeitraum) gekennzeichnet ist.

Ausgangspunkt ist die berechnete Seegangs-Energiedichte  $E_w$  (= Wellenenergie pro Einheitsfläche mit der Dimension  $[\text{kg}/\text{s}^2] = [\text{J}/\text{m}^2] = [\text{Ws}/\text{m}^2]$ ). Der Energiefluss (d.h. die

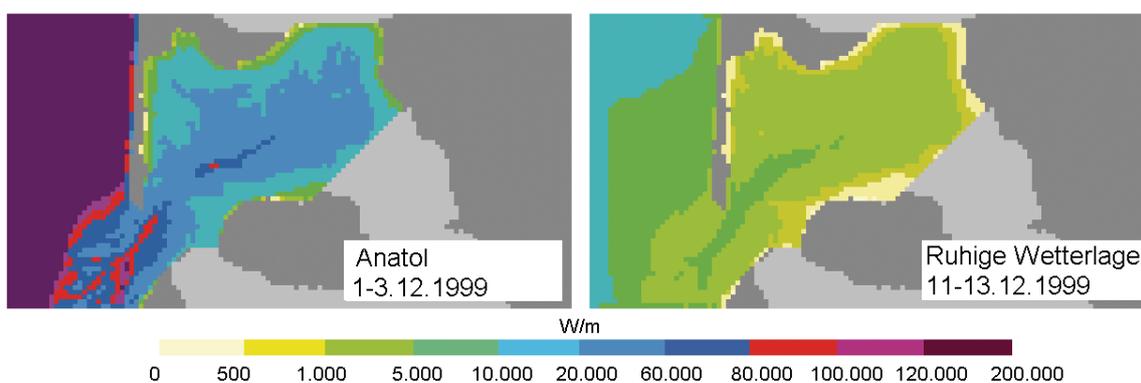


Abb. 6: Räumliche Verteilung des Seegangs-Energieflusses (Absolutbetrag). Links: Maximalwert für jeden Gitterpunkt während einer Sturmperiode vom 1. bis 3. Dezember 1999 (Sturm „Anatol“ am 3. Dezember). Rechts: Mittelwert über drei Tage während einer Schönwetterlage.

Leistung, welche über einen Meter quer zur Ausbreitungsrichtung vom Wellenfeld transportiert wird) ist dann gegeben durch:

$$F = E_w C_g [\text{Ws s}^{-1} \text{ m}^{-1}],$$

wobei  $C_g$ , [m/s] die Gruppengeschwindigkeit der Wellen bedeutet. Abb. 6 zeigt rechts die räumliche Verteilung des über drei Tage gemittelten Absolutbetrages des Energieflusses für eine Schönwetterlage, links die Maximalwerte während einer Sturmperiode. Die Energieflüsse unterscheiden sich um bis zu drei Größenordnungen.

Um die Energieflüsse in Strandnähe zu berechnen (siehe Abb. 7), werden zwei Komponenten dieser Energie betrachtet: parallel und senkrecht zur Küstenlinie. Die senkrechte Komponente  $F_s$  bewirkt eine Erosion der Küste und eine Mobilisierung des Sediments, die parallele Komponente  $F_p$  sorgt für den Transport der mobilisierten Sedimente entlang der Küste.

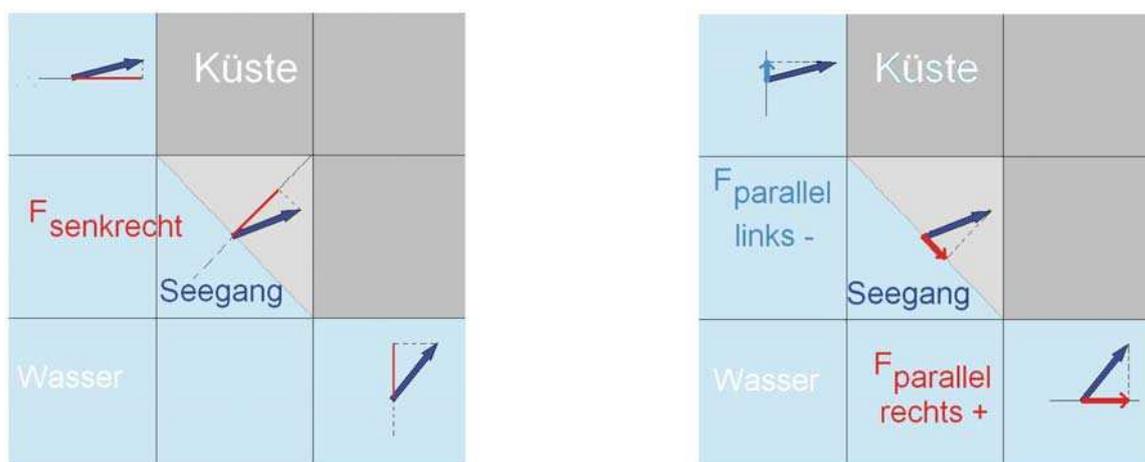


Abb. 7: Schema zur Berechnung der küstennormalen ( $F_s$ ) und der küstenparallelen ( $F_p$ ) Komponente des Seegangsenergieflusses.

Abb. 8 zeigt die über den Dezember 1999 gemittelten Komponenten des Seegangsenergieflusses  $F_s$  und  $F_p$ , sowie für den Betrag des Seegangsenergieflusses den Maximalwert  $F_{max}$  und den zeitlichen Mittelwert für einen Schnitt senkrecht zur Küste Sylts.

## 5.2 Energieeinträge in die Küstenlinie

Abb. 8 zeigt, dass Seegangsenergie nur in den letzten drei Gitterpunkten auf eine Strecke von etwa 1 km dissipiert wird. Als Küstenlinie (Strand) bezeichnen wir den ersten trocken gefallenen Gitterpunkt (Seegang = 0). Es wird angenommen, dass keine Wellenreflexion stattfindet, d.h. zwischen dem strandnächsten nassen Gitterpunkt und dem ersten Strandpunkt wird der normal gerichtete Energiefluss vollständig dissipiert.

Abb. 9 zeigt die Energieeinträge in die Küstenlinie in Form der küstennormalen Komponente  $F_s$ . Die beiden oberen Bilder zeigen die maximalen Werte während des Sturmes „Anatol“ und während einer ruhigen Wetterlage. Die Sylter Westküste wird bei stürmischer

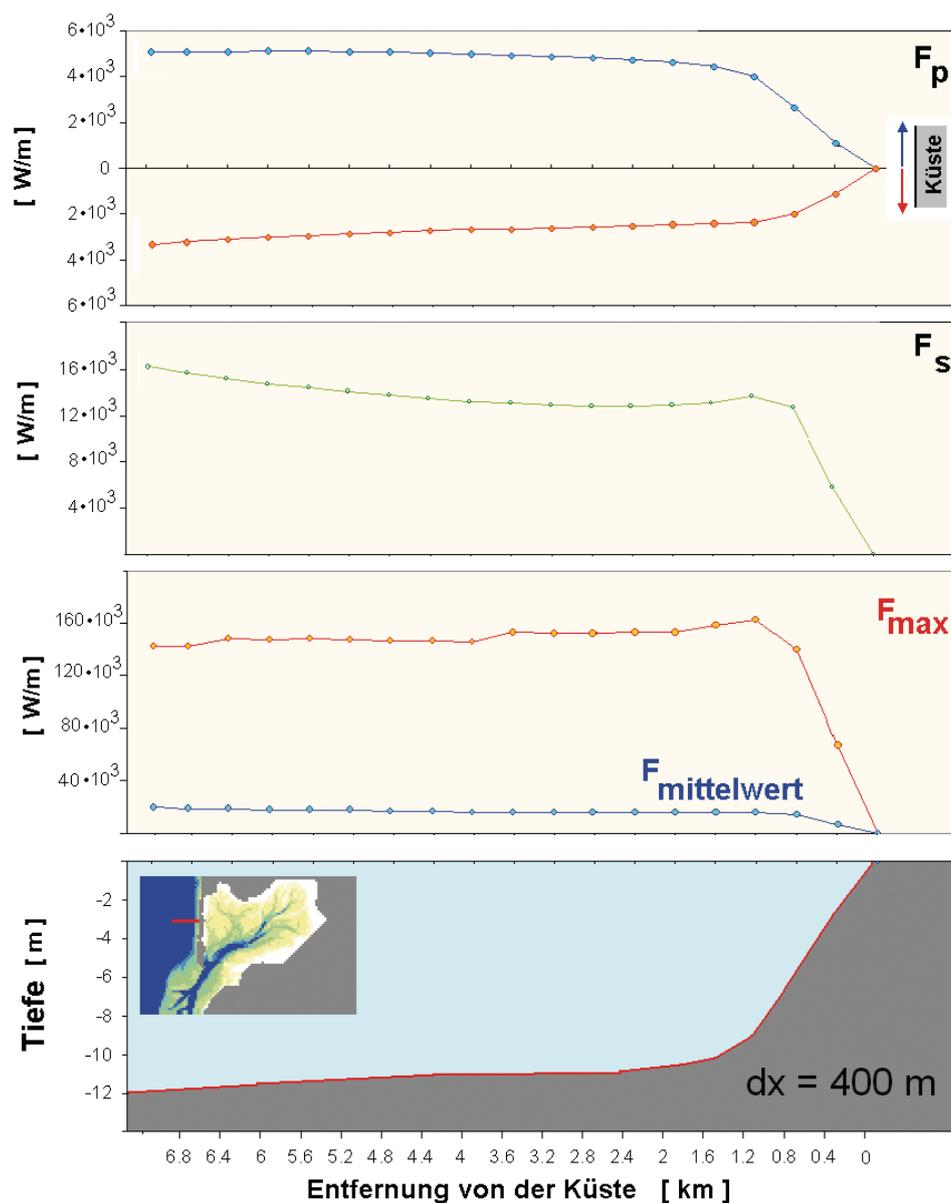


Abb. 8: Profile des Seegangs-Energieflusses  $F$  in einem 7 km langen Schnitt querab der Sylter Westküste. Die Lage des Schnittes ist im Inlay des unteren Diagramms eingezeichnet. Das untere Diagramm zeigt, dass die Wassertiefe (unter NN) im Sylter Küstenvorfeld von der offenen See zur Küste hin nur langsam abnimmt – erst auf den letzten 1500 Metern vor dem Strand geht die Wassertiefe von 10 m auf 0 zurück. Die beiden oberen Diagramme zeigen die über den Dezember 1999 gemittelten Komponenten  $F_p$  und  $F_s$  des Seegangs-Energieflusses. Die „Knoten“ auf den Linien markieren die Gitterzellen des Seegangsmodells (Abstand 400 m).  $F_s$  ist mehr als doppelt so stark wie  $F_p$ . Bei der zeitlichen Mittelung wurden die Energieflüsse nach Norden und Süden separat behandelt. Wie das  $F_p$ -Diagramm zeigt, war  $F_p$  innerhalb des Dezember 1999 im Mittel mehr nach Norden gerichtet als nach Süden. Das dritte Diagramm von oben zeigt Profile der Absolutwerte des Seegangs-Energieflusses  $F$ : rot eingezeichnet ist das Profil der  $F$ -Maximalwerte innerhalb des Dezember 1999, blau das Profil der zeitlichen Mittelwerte. Die  $F$ -Maximalwerte sind um eine Größenordnung höher als die  $F$ -Mittelwerte, was vor allem dem Sturmereignis Anatol geschuldet ist. Allen  $F$ -Profilen der drei oberen Diagramme ist gemeinsam: im Bereich der Wassertiefe  $< 10$  m geht der Seegang und damit auch der Seegangs-Energiefluss deutlich in die Knie.

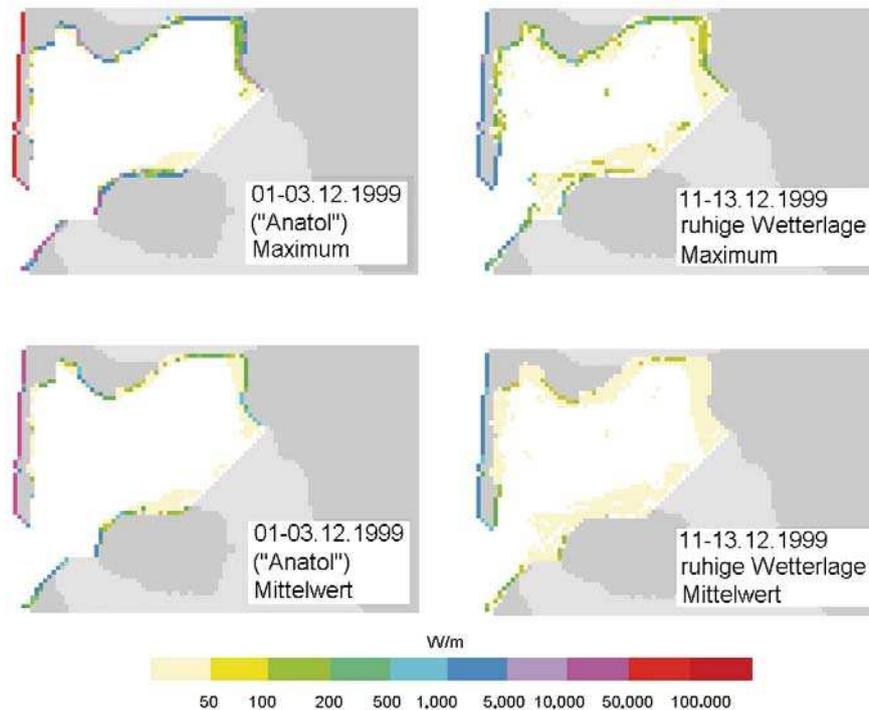


Abb. 9: Die küstennormale Komponente  $F_s$  des Energieeintrags für zwei dreitägige Episoden im Dezember 1999. Obere Reihe: Maximalwerte. Untere Reihe: Über die Dauer der Episode gemittelte Werte. Die küstennormale Komponente trägt zur Erosion der Küste und zur Mobilisierung des Sediments bei. Wegen der Tide ist die Küstenlinie zeitlich und damit auch räumlich veränderlich.

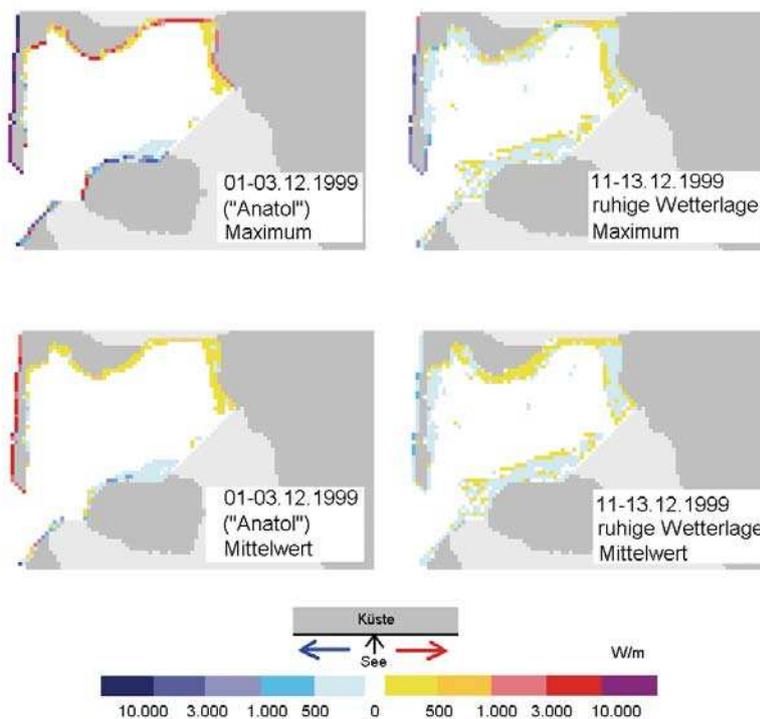


Abb. 10: Die küstenparallele Komponente  $F_p$  des Energieeintrags für zwei dreitägige Episoden im Dezember 1999. Obere Reihe: Maximalwerte. Untere Reihe: Über die Dauer der Episode gemittelte Werte. Die Flussrichtung ist farbcodiert: blickt man von See auf den Strand, dann ist der nach links gerichtete Fluss in Blautönen und der nach rechts gerichtete in Rottönen gefärbt.

Wetterlage etwa 100 mal mehr belastet als bei ruhigem Wetter. Maximalwerte (von über 50 KW/m) werden erwartungsgemäß entlang den Außenstränden von Sylt und Amrum erreicht. Vergleichbare Energie-Einträge wurden von WITTE et al. (2000) auf der Grundlage von Seegangs-Messdaten berechnet. Die in Abb. 9 dargestellten Energieeinträge sind Mittelwerte über eine Gitterweite von 400 m. Während „Anatol“ beträgt der maximale Energieeintrag in die Küstenlinie des Tidebeckens nur rund 3 % des maximalen Energieeintrages in die Sylter Westküste. Falls detaillierte Information über die Bodenstruktur im unmittelbaren Strandvorland verfügbar ist, kann man abschätzen, wo innerhalb des 400 m breiten Streifens der Hauptanteil der Seegangsenergie dissipiert wird.

Die beiden unteren Bilder von Abb. 9 zeigen über drei Tage gemittelte Energieeinträge in die Küstenlinie. Man sieht, an welchen Stellen eine besonders hohe Dauerbelastung durch Seegang entsteht.

Abb. 10 zeigt die küstenparallelen Energieflüsse. Die parallele Komponente  $F_p$  ist von Bedeutung für die küstenparallele Verfrachtung der Sedimente. Die küstenparallelen Energieflüsse sind deutlich geringer als die Normalflüsse in Abb. 9, können jedoch bei Sturm über 10 KW/m erreichen.

### 5.3 Szenarien

In Rahmen des BELAWATT-Projekts wurden drei Szenarien gerechnet: (1) Wasserstand um 25 cm erhöht, (2) Wasserstand um 50 cm erhöht, (3) Wasserstand um 50 cm erhöht *plus* Zunahme der Windstärke um 10 %. Die Szenarien wurden gerechnet für den Dezember 1999 sowie für die zweite Hälfte des Septembers 2000. Die Ergebnisse für Szenario (3) werden in den Abb. 11 und Abb. 12 als Zeitreihen für zwei Stationen gezeigt: Westlich Sylt (Abb. 11) und nordwestlich Föhr (Abb. 12).

Der Zeitraum für die Zeitreihen ist der Dezember 1999. Eine herausragende Rolle in den Zeitreihen beider Stationen spielt das Anatol-Sturmereignis in den Nachmittags- und Abendstunden des 3. Dezember 1999. Die schnelle Winddrehung von SW auf NW zeigt sich in Abb. 11 im küstenparallelen Energieeintrag FP: während des Sturms aus SW ist FP nach Norden gerichtet (negative Werte im FP-Diagramm), nach der Winddrehung auf NW zeigt FP nach Süden. Zur Definition der FP-Richtungen siehe Abb. 10.

Der Seegang an der Sylt-Station (Abb. 11) reagiert bei einer Wassertiefe um 5 m nur wenig auf Szenario 3. Die berechnete Zunahme der signifikanten Wellenhöhe von rund 10 % geht an der Sylt-Station zu etwa  $\frac{2}{3}$  auf Kosten der Windgeschwindigkeits-Zunahme und zu  $\frac{1}{3}$  auf Kosten der Wasserstands-Erhöhung. Da die Seegangsenergie quadratisch von der Wellenhöhe abhängt, steigt der Seegangsenergieeintrag infolge von Szenario 3 um rund 25 % (80 KW/m) gegenüber dem Ist-Zustand (60 KW/m). Dieses gilt gleichermaßen für  $F_S$  und  $F_p$ .

An der Föhr-Station mit einer geringen Wassertiefe (die Station fällt zeitweise trocken, Abb.12) ist die Auswirkung von Szenario 3 stärker als an der Sylt-Station. Eine Zunahme der Wassertiefe um 0,5 m wirkt sich relativ stark aus. Im Vergleich zum Ist-Zustand verdoppelt sich FS an der Föhr-Station bei Wellenhöhen um 0,5 m und Wassertiefen (im Ist-Zustand) von 0 bis 2 m. Auch für das Anatol-Ereignis fällt die Erhöhung von FS an der Föhr-Station deutlicher aus als an der Sylt-Station.

Die neuesten Vorhersagen weisen darauf hin, dass Sturmfluten in den nächsten 50 Jahren immer höher werden (WOTH, WEISSE und v. STORCH, 2006). Das bedeutet immer stärkeren Seegang und mehr Belastung durch Dissipation von Seegangsenergie an der Küstenlinie.

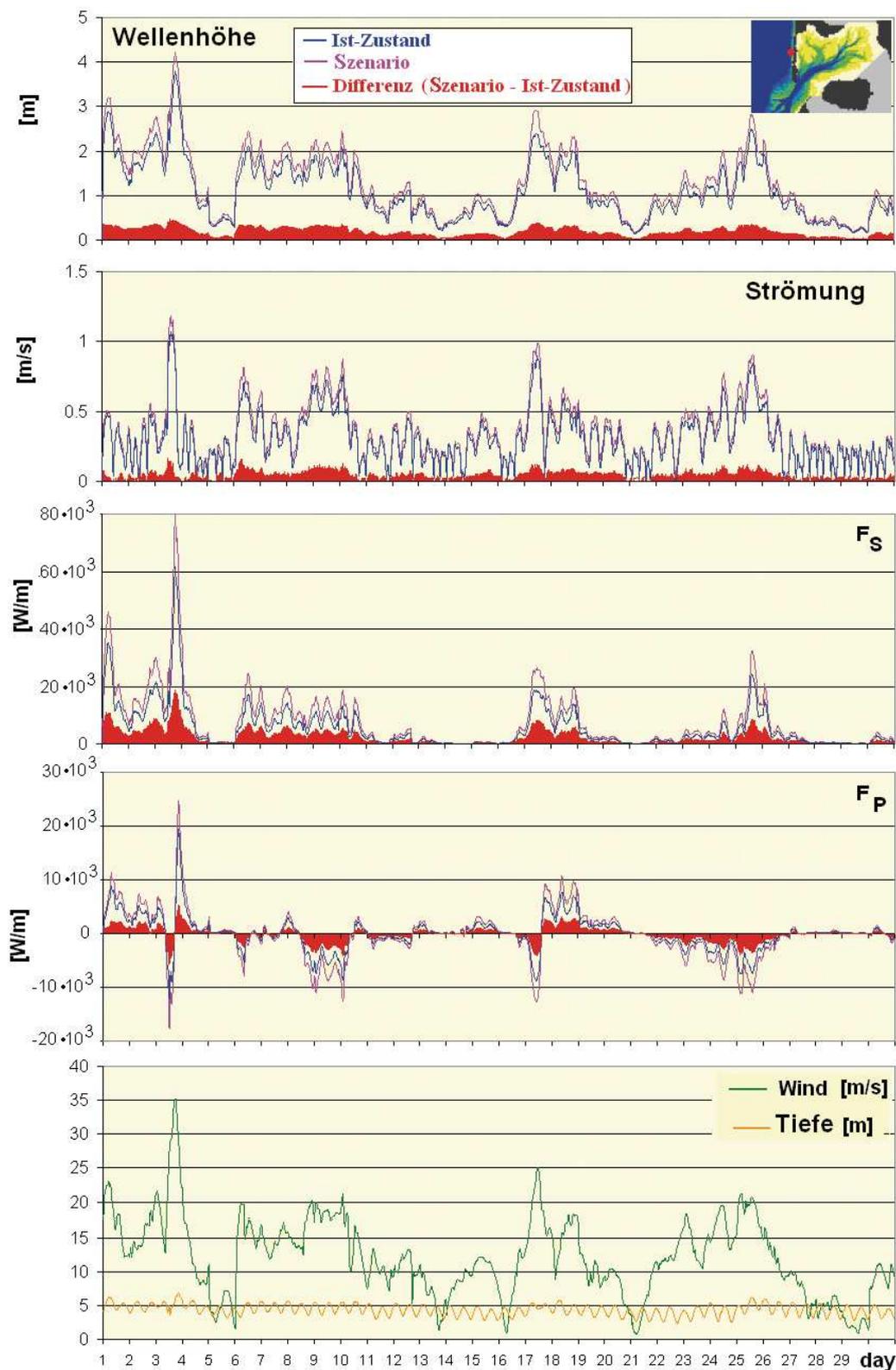


Abb. 11: Zeitreihen des Dezember 1999 für eine Station an der Sylter Westküste (siehe Inlay rechts oben). Von oben nach unten: Signifikante Wellenhöhe, küstenparallele Strömung, die küstennormale Komponente des Energieeintrags  $F_S$ , die küstenparallele Komponente des Energieeintrags  $F_P$ , Betrag der Windgeschwindigkeit in Bodennähe, tidenabhängige Wassertiefe für den Ist-Zustand. Die Farbcodierung: Blau = Ist-Zustand, Violett = Klimasimulation (Szenario 3), Rot = Differenz Klimasimulation minus Ist-Zustand.

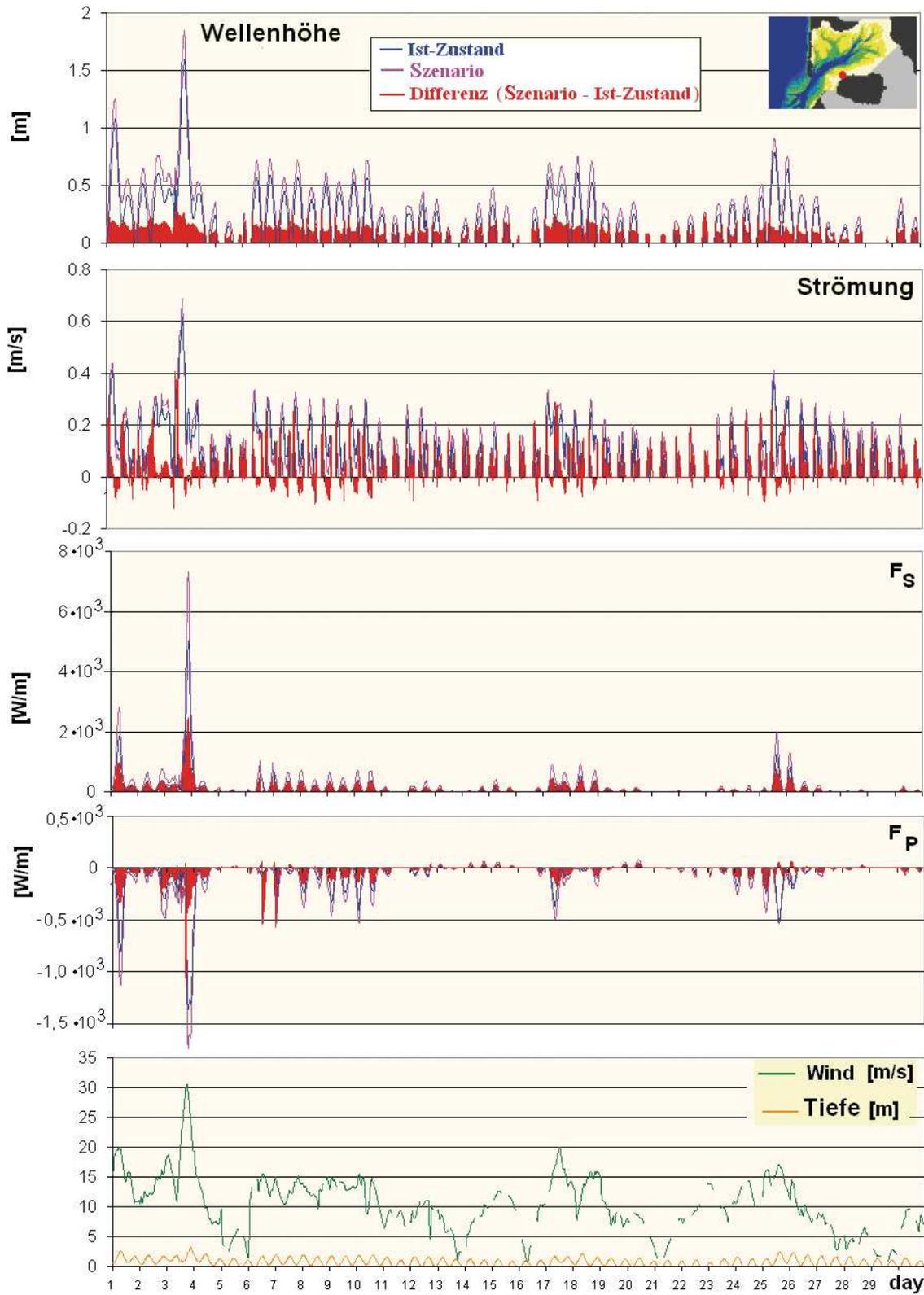


Abb. 12: Zeitreihen des Dezember 1999 für eine Küstenstation nordwestlich Föhr (siehe Inlay rechts oben). Weitere Information siehe Abb. 11. Unterbrechung der Linien bedeutet, dass der Punkt trocken-gefallen ist.

## 6. D a n k s a g u n g

Das Forschungsvorhaben „Watthydrodynamik: Die hydrodynamische Belastung von Wattgebieten“ wurde unter dem Förderkennzeichen 03KIS038 als KFKI-Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

## 7. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- CASULLI, V. u. STELLING, G.: Simulation of Three-dimensional, Non-hydrostatic Free-surface Flow for Estuaries and Coastal Seas. Pages 1–12 of: Proc. Of the 4th Int. Conf. On Estuaries and Coastal Modelling, 1995.
- EPPEL, D. P.; KAPITZA, H.; ONKEN, R.; PLESKACHEVSKY, A.; PULS, W.; RIETHMÜLLER, R. u. VAESSEN, B.: Watthydrodynamik: Die hydrodynamische Belastung von Wattgebieten. GKSS-Report 2006/8, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 2006.
- EPPEL, D. P.; KAPITZA, H.; ONKEN, R.; PLESKACHEVSKY, A.; PULS, W.; RIETHMÜLLER, R. u. VAESSEN, B.: Watthydrodynamik: Die hydrodynamische Belastung von Wattgebieten, 1. Zwischenbericht 2002–2003, BELAWATI, 2003.
- SCHNEGGENBURGER, C.; GÜNTHER, H. u. ROSENTHAL, W.: Spectral Wave Modelling With Non-linear Dissipation: Validation and Application in a Costal Tidal Environment. Coastal Engineering, 41 201–235, 2000.
- WEISSE, R.; FESER, F. u. GÜNTHER, H.: Wind- und Seegangsklimatologie 1958–2001 für die südliche Nordsee basierend auf Modellrechnungen. GKSS-Report 2003/12, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 2003.
- WITTE, J.; KOHLHASE, S.; RADOMSKI, J. u. FRÖHLE, P.: Fallstudie Sylt, Teilprojekt „Strategien und Optionen der Küstenschutzplanung für die Insel Sylt, Abschlußbericht, Tech. rep. Institut für Wasserbau der Universität Rostock, Wismar, 2000.
- WOTH, K.; WEISSE, R. and STORCH, H. VON: Climate change and North Sea storm surge extremes: An ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different Regional Climate Models, vol. 56: 3–15, Ocean Dyn. 2006.
- YAMAGUCHI, M.: A Numerical Model of Nearshore Currents Due to Irregular Waves. Pages 1113–1126 of: Proc. Of the 21st Int. Conf on Coastal Engeneering Meeting, Malaga, 1998.