

# **Anwendung eines gekoppelten Modellsystems im Oderhaff**

*Th. Wolf, J. Lou, W. Rosenthal*  
GKSS-Forschungszentrum, Institut für Gewässerphysik,  
21 502 Geesthacht

# **Inhalt**

Einführung

Das Modellsystem

Modellierung des lokalen Windfeldes

Modellierung des Seegangsfeldes

Hydrodynamische Modellierung mit TRIM3D

Modellierung des Schwebstofftransportes

Ergebnisse - Zusammenfassung

Literatur

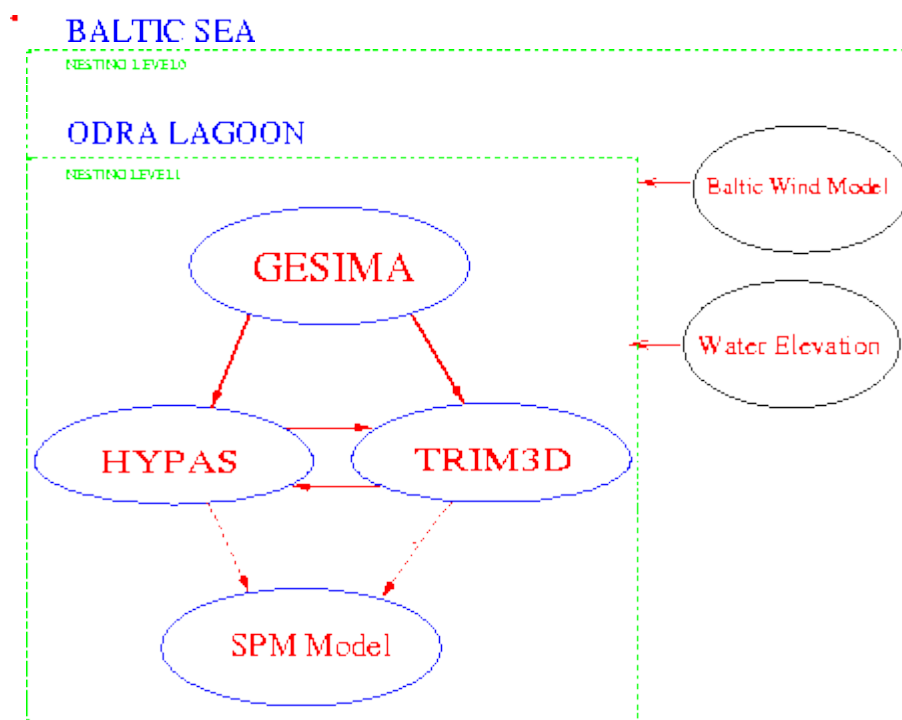
## Einführung

Im Rahmen des GOAP-Projektes wurde in der GKSS ein System gekoppelter Modelle entwickelt, implementiert und auf mehrere reale Szenarien innerhalb des GOAP-Berichtszeitraumes angewandt. Ziel dieser Aktivitäten war es, die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des atmosphärisch-maritimen Systems zu untersuchen und Schlüsse für die weitere Anwendung gekoppelter Modellsysteme zu ziehen.

### Spezielle Aspekte des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet (s.Abb. 2 und 3) zeichnet sich durch eine Reihe topographischer Besonderheiten aus, die Auswirkungen auf die Ausbildung von Wind-, Strömungs- und Seegangsfeldern haben. Diese speziellen Generationsbedingungen müssen bei der Erstellung von Modellen berücksichtigt werden.

Figure 1: Gekoppeltes Modellsystem mit den 4 Modellkomponenten : mesoskaliges Atmosphärenmodell GESIMA, Flachwasserseegangmodell HYPAS, hydrodynamisches Modell TRIM3D, SPM-Modell Q3DSSD



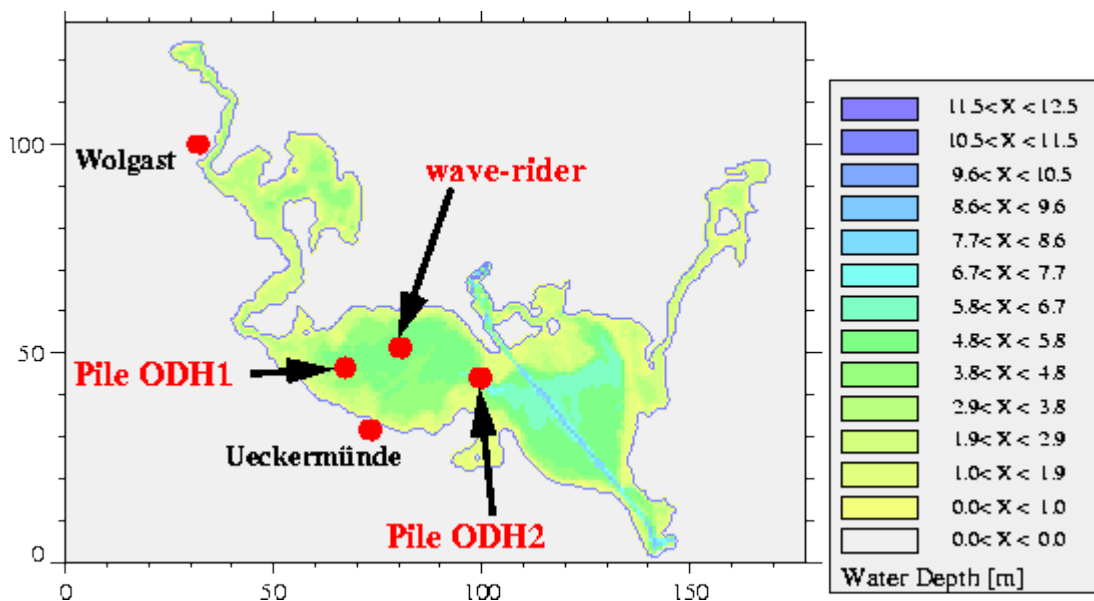
Das Oderhaff ist großenteils von Land umgeben und weist ein lokales Windfeld auf, daß durch scharfe Übergänge zwischen Land- und Seewind, die Ausbildung interner Grenzschichten und spezielle küstenspezifische meteorologische Phänomene (s.Abb. 4) geprägt wird. Infolge des Auftretens dieser regionalen Effekte und deren Überlagerung mit dem großräumigen Windfeld kommt es in der Region zu einer Strukturierung des Windfeldes, die bei der Modellierung von Seegang und Strömung berücksichtigt werden muß. Insbesondere die Entwicklung des lokalen Seegangsfeldes hängt dabei sowohl von der zeitlichen Variabilität des Windfeldes im Bereich von Stunden als auch von dessen räumlicher Struktur ab.

In tidearmen Gewässern wie dem Oderhaff tritt an die Stelle eines dominanten Steuersignals in Form der Gezeiten ein komplexes Gefüge unterschiedlicher Parameter, die das Strömungssystem bestimmen. Neben dem Einfluß den windstau- und luftdruckgenerierte Außenpegel der Ostsee auf das Haff ausüben, gewinnt dabei das lokale Windfeld an Bedeutung. Entsprechende Wettersituationen vorausgesetzt, können Kopplungseffekte

zwischen Seegang und Strömungssystem und die Ausbildung barokliner Druckgradienten prägend für die hydrodynamische Entwicklung im Gewässer sein und diese zumindest lokal beeinflussen. Wesentlich stärker als im Falle der Strömung und Wasserstände beeinflusst die komplexe Struktur des Windfeldes die Ausbildung des lokal generierten Seegangs, der aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des Gewässers fast augenblicklich auf Veränderungen im Windfeld reagiert. Die Entwicklung des Seegangsfeldes kann dabei über das gesamte Haff hinweg von den in den Randbereichen anzutreffenden Geschwindigkeitsgradienten beeinflusst bleiben, die verglichen mit der Situation für ein homogenes Windfeld zu einer Retardierung der Seegangsentwicklung führen.

Die topographischen Besonderheiten und Eigenheiten des Areals wirken sich auch auf die Wechselwirkung zwischen Seegang und Strömung aus. Aufgrund der geringen Wassertiefe und der großen Bereiche des Gewässers die Wassertiefen D2 m haben, ist der aktuelle Wasserstand ebenfalls von Interesse bei der Berechnung des Seegangs, dessen Generationsbedingungen sich mit variierenden Wasserstand ändern. Die Rückwirkung des Seegangs auf Strömung und Wasserstand wiederum wird durch die Einführung neuer Quellterme in die Navier-Stokes-Gleichung behandelt. Dabei werden in der vorliegenden Modellvariante die Radiation Stress Terme sowie die Stokes Drift in die Modellierungen einbezogen. Nicht berücksichtigt wird u.a. der Einfluß der veränderten Wechselwirkung der Strömung mit der kombinierten Wellen-Strömungsgrenzschicht am Boden.

Figure 2: Bathymetrie des numerischen Gitters von HYPAS im Oderhaff (horizontale Auflösung  $\Delta x=500$  m) mit den Standorten einzelner Meßpfähle und Stationen.



## Motivation

Das gekoppelte Modellsystem wurde in diesem Gebiet angewendet, um eine Quantifizierung der Kopplungseffekte zwischen Strömung und Seegang vorzunehmen und den Einfluß der hochvariablen Windfelder auf Seegang und Strömung zu untersuchen. Eine Fragestellung war dabei, ob mit den heute vorhandenen Modellphilosophien und den darauf aufbauenden Modellen eine Wiedergabe bzw. adäquate Modellierung der Komponenten des marinen Systems und deren natürlicher Variabilität in einem mesoskaligen Terrain geringer lateraler Ausdehnung möglich ist.

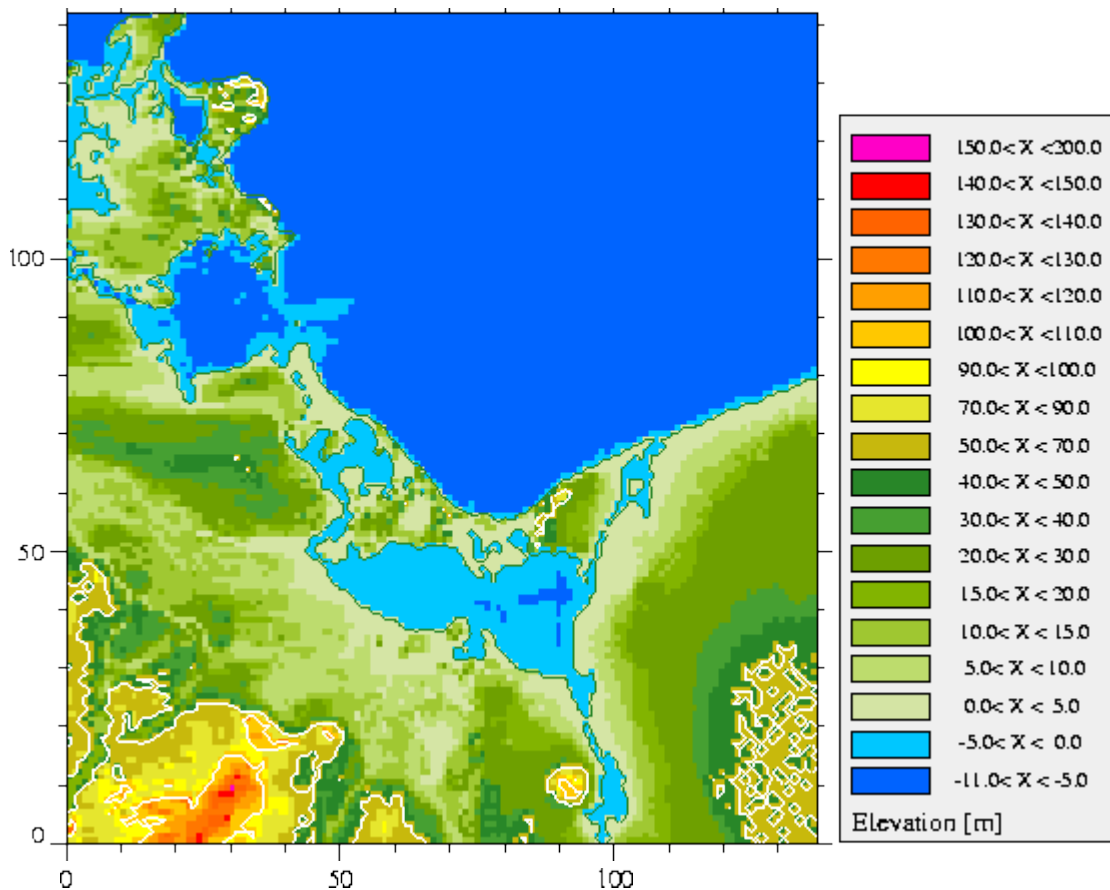
## Das Modellsystem

Um die wechselseitige Beeinflussung der Komponenten des maritimen Systems und die Auswirkungen der komplexen Struktur des Windfeldes erfassen zu können, wurde ein Modellsystem (s.Abb. 1) implementiert, daß die im vorigen Abschnitt aufgeführten Phänomene in adäquater Weise simuliert.

Das Modellsystem gestattet die detaillierte Untersuchung des hydrodynamischen Verhaltens des Gewässers und realistische Abschätzungen des Transportes von SPM innerhalb des Oderhaffs. Es umfaßt 4 Modellkomponenten : - das mesoskalige, nichthydrostatische Atmosphärenmodell GESIMA - das hybride, 2-dimensionale Flachwasserseegangmodell HYPAS und das 3-dimensionale hydrodynamische Modell TRIM3D. Darüberhinaus wurden Sedimenttransportprozesse mit dem 2.5-dimensionalen SPM-Modell Q3DSSD untersucht.

### Implementation von GESIMA

Figure 3: GESIMA-Implementationsgitter im Gebiet des Greifswalder Boddens und des Oderhaffs. horizontale Auflösung  $\Delta x=1$  km.



Das mesoskalige, nichthydrostatische Atmosphärenmodell GESIMA (KAPITZA & EPPEL, 1992) wurde innerhalb des Oderhaffs mit einer horizontalen Auflösung von  $\Delta x=2$  km auf einem numerischen Gitter mit  $32 \times 47 \times 13$  Zellen und insgesamt 18648 aktiven Punkten implementiert. Das Modellgebiet wurde dabei so gewählt, daß die wesentlichen topographischen Strukturen des umliegenden Geländes bei gleichzeitiger Beschränkung auf ein möglichst kleines Modellgebiet in die Simulation einbezogen wurden. Das 3-dimensionale Modellgebiet wurde in der Vertikalen mit folgenden Schichtgrenzen diskretisiert  $H_{zw} = 0., 6., 14., 26., 50., 80., 120., 180., 270., 400., 600., 900., 1300., 1700.$  m. Die Wahl der Schichtgrenzen ermöglicht eine hohe Auflösung in dem unmittelbar interessierenden bodennahen Bereich, wobei die Ausgabe der Windgeschwindigkeiten für die Mittelpunkte der

Zellen  $H_m = (H_{zw,i+1} + H_{zw,i})/2$  erfolgt, so daß der Modelloutput ohne weitere Skalierungen direkt im Seegangs- wie auch Strömungsmodell verwendet werden kann. Bei den Berechnungen der Windfelder wurde ein Zeitschritt  $\Delta t = (6..10s)$  in Abhängigkeit von der zur Ansteuerung des Modells verwendeten geostrophischen Windgeschwindigkeit verwendet, wobei für stationäre Rechnungen das Verhältnis von CPU/Real-Zeit bei etwa 0.5 auf einer CRAY-C90 mit Vektoreinheit liegt.

### **Implementation von HYPAS**

Das Flachwasserseegangmodell HYPAS (GÜNTHER & ROSENTHAL, 1983) wurde für die vorliegenden Arbeiten auf einem numerischen Gitter mit einer horizontalen Auflösung von  $\Delta x = 500$  m bei einem Zeitschritt von  $\Delta t = 60$  s betrieben. Insgesamt hatte das Modell innerhalb des Gebietes 4449 aktive Wasserpunkte. Das CPU/Real-Zeit-Verhältnis bewegt sich auch für diese Modellierungen im Bereich von etwa 0.5. Die Grenzen des Modellgebietes sind mit denen des Strömungsmodells TRIM3D identisch. Die Richtungsauflösung des Modells beträgt  $\Delta\theta = 15$  Grad bei einer nichtäquidistanten Auflösung im Frequenzraum mit folgenden Frequenzstützstellen  $f_i = 1250, .1350, .16250, .18750, .21250, .23750, .26250, .31250, .40750, .4400, .4800, .5200, .5600, .6000, .6400, .6800, .7200 s^{-1}$ .

### **Implementation von TRIM3D**

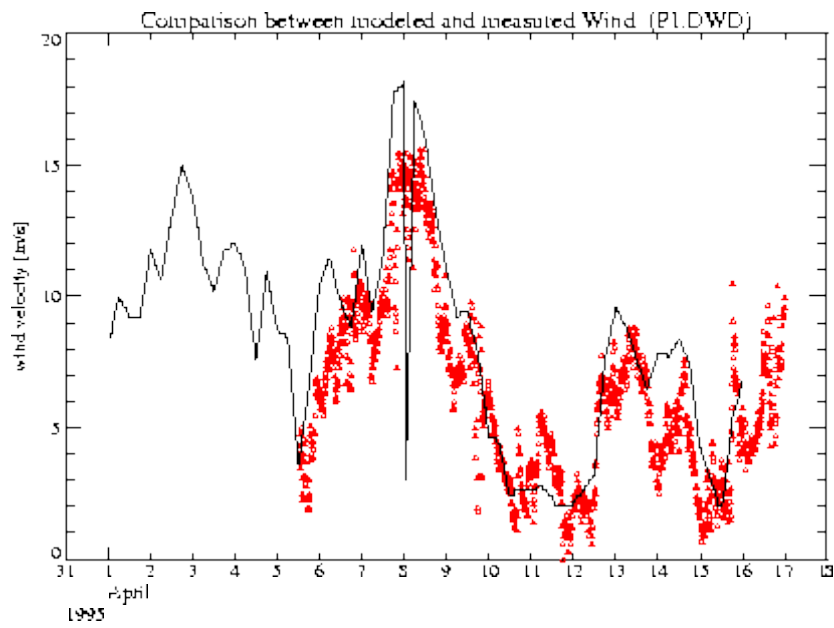
TRIM3D (CASULLI & CATTANI, 1994) ist ein 3-dimensionales hydrodynamisches Modell, daß die NS-Gleichungen mittels eines semiimpliziten Verfahrens löst. Für die vorliegenden Arbeiten wurde die hydrostatische Modellversion im barotropen Mode betrieben. Die Implementierung erfolgte auf einem Modellgitter mit einer Auflösung von  $\Delta x = 250$  m wobei ein Zeitschritt von  $\Delta t = 60..300$  s verwendet wurde. Die Modelltopographie besitzt 4 offene Ränder, die zur Steuerung des Modells verwendet werden. Das ist zum einen der Einfluß der Oder in das Große Haff unterhalb Trzebiesz (Ziegenort) und zum anderen die Einmündungen der drei Ströme Peenestrom, Swina und Dziwna in die Ostsee, wobei die Pegel dieser Einmündungen mit den offiziellen Pegeln von Peenemünde, Swinoujcie (Swinemünde) und einem zwischen den Pegeln von Swinoujcie und Kolobrzg (Kohlberg) interpolierten Wert belegt werden. Für den Einfluß der Oder wird der Pegelwert von Trzebiesz verwendet. Neben der Steuerung über die Pegel wurden auch die Zuflüsse der Flüsse Peene und Uecker bei einzelnen Testrechnungen berücksichtigt, wobei die mittleren Zuströme für die Peene mit  $V = 20$  m<sup>3</sup>/s und die Uecker mit  $V = 8$  m<sup>3</sup>/s in das Modell gingen. Während die Uecker mit diesen Zuflußraten keine großen Veränderungen im allgemeinen Strömungsregime bewirkt, kann der über die Peene in den Peenestrom einfließende Volumenstrom zumindest die Verhältnisse lokal beeinflussen.

### **Implementation von Q3DSSD**

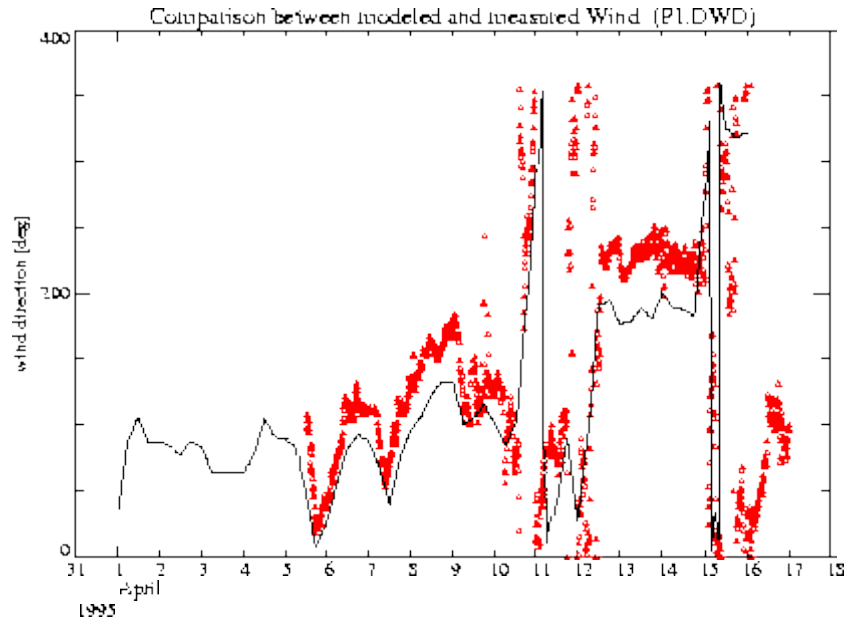
Zur Beschreibung der ablaufenden SSC-Transportprozesse (suspended sediment concentration) wurde das auf der Lösung der Konvektions-Diffusions-Gleichung basierende 2.5-dimensionale gekoppelte SSC-Modell Q3DSSD (LOU, 1995; LOU & RIDD, 1997) implementiert. Es gestattet die Modellierung des SSC-Transportes unter Berücksichtigung der kombinierten nichtlinearen Wellen-Strömungswechselwirkung, wobei zwei für den SSC-Transport wesentliche Effekte betrachtet werden: 1.) Änderungen der turbulenten Austauschkoefizienten und 2.) die Erhöhung der Turbulenz und des Bodenstresses in der Grenzschicht zwischen Wasserkörper und Sediment. Das SSC-Modell wurde auf dem numerischen Gitter des Strömungsmodells mit einer lateralen Auflösung von  $\Delta x = 250$  m implementiert.



Figure 5: Vergleich der Windgeschwindigkeiten  $U_{10}$  an der Pfahlstation ODH2. Durchgezogene schwarze Linie: Modellergebnisse des DWD-EM-Modellwinds. Dreiecke: Meßergebnisse.



(a) Windgeschwindigkeit  $U_{10}$



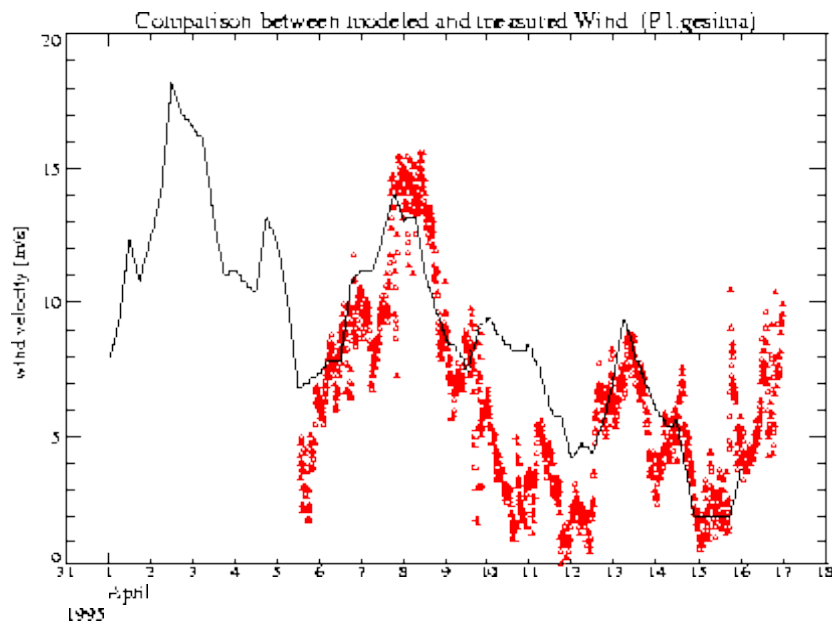
(b) Windrichtung  $\Theta_w$



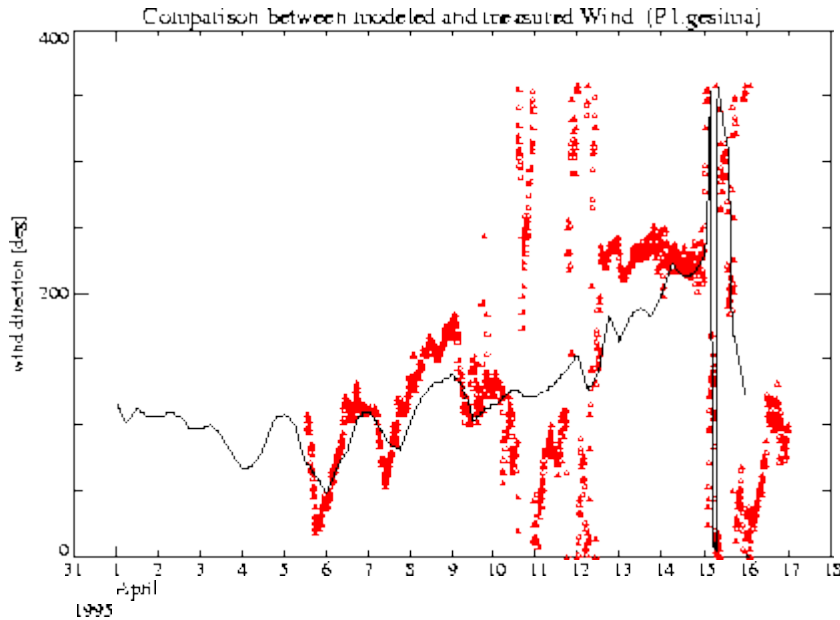
## **GESIMA - ``nested-grid''-Modellierung**

Für die Ansteuerung des stationär betriebenen Modells (kein Strahlungsmodul, keine Wolkenbildung, konstante Randwerte an der Modelloberkante) wurden die Windgeschwindigkeitswerte der 750 mbar-Schicht des DWD-Europamodells verwendet und als Randwerte in der obersten Schicht von GESIMA eingesteuert.

Figure 6: Vergleich der Windgeschwindigkeiten  $U_{10}$  an der Pfahlstation ODH2. Durchgezogene schwarze Linie: Modellergebnisse des GESIMA "nested-grid"-Modellaufes. Dreiecke: Messergebnisse.



(c) Windgeschwindigkeit  $U_{10}$



(d) Windrichtung  $\Theta_w$

In Abbildung 6 a.) ist ein Vergleich zwischen der an der Pfahlstation ODH2 gemessenen Windgeschwindigkeit und der mit der "nesting-grid"-Technik modellierten Windgeschwindigkeit für diesen Punkt dargestellt. Die modellierten Werte reproduzieren die zeitliche Variabilität der Meßreihe nur soweit es sich um langfristige Änderungen der Windgeschwindigkeit handelt, während die kurzzeitigen Variationen im Bereich weniger Stunden aufgrund des groben zeitlichen Rasters der Randwerte (Archivierungsintervalle  $\Delta t_{\text{sampling}}=6$  h) nicht aufgelöst werden können. Auffällig ist, daß die Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Meßwerten speziell bei hohen Windgeschwindigkeiten besser ist, während die Schwachwindsituationen vor und nach dem 8.4.1995 nicht so gut durch die Simulationsergebnisse repräsentiert werden. Zurückzuführen ist das wahrscheinlich neben der schlechten zeitlichen Auflösung der Randwerte in der oberen Atmosphäre auf den zunehmenden Einfluß tagesgangbedingter konvektiver Prozesse, die für diese niedrigen Windgeschwindigkeiten an Bedeutung gewinnen, in den stationären Läufen aber nicht berücksichtigt werden. Ein instationärer Lauf des genesteten Modells unter Einbeziehung des Strahlungsmoduls sollte zu diesen Zeiten zu einer verbesserten Wiedergabe der Meßwerte führen. In Abbildung 6 b.) sind die an der Pfahlstation ODH2 gemessenen und modellierten Windrichtungen während des Sturmereignisses dargestellt. Der Vergleich zeigt die Wiedergabe wesentlicher Trends durch die Modellierung, wobei gleichzeitig die schnellen Richtungsänderungen des Windfeldes nicht wiedergegeben werden. Auch während des Sturmhöhepunktes sind Unterschiede zwischen  $\theta_{\text{model}}$  und  $\theta_{\text{gemessen}}$  vorhanden.

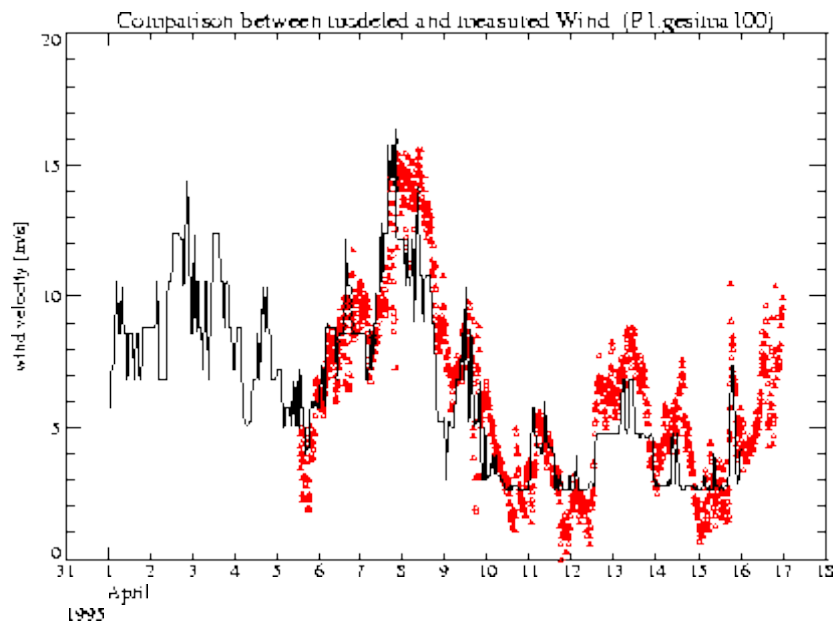
Obgleich sowohl die zeitliche Dichte der Randwerte als auch die Definition der GESIMA-Steuerparameter nicht optimal sind und in einem erweiterten Nestingschema verbessert werden können (Übernahme der vollständigen Informationen zu Temperatur- und Luftfeuchtigkeit aus dem DWD-Modell, instationärer Lauf) bleiben bei dieser Technik zwei Nachteile erhalten:

1.) Die Güte der Windfeldrekonstruktion in der bodennahen Schicht hängt bei der "nesting-grid"-Technik von den am Oberrand vorgegebenen Randwerten ab. Diese sind im allgemeinen nicht in beliebig hoher zeitlicher Auflösung verfügbar (DWD-Europamodell  $\Delta t_{\text{sampling}}=6$  h) und können nur schwer anhand von Messungen überprüft werden.

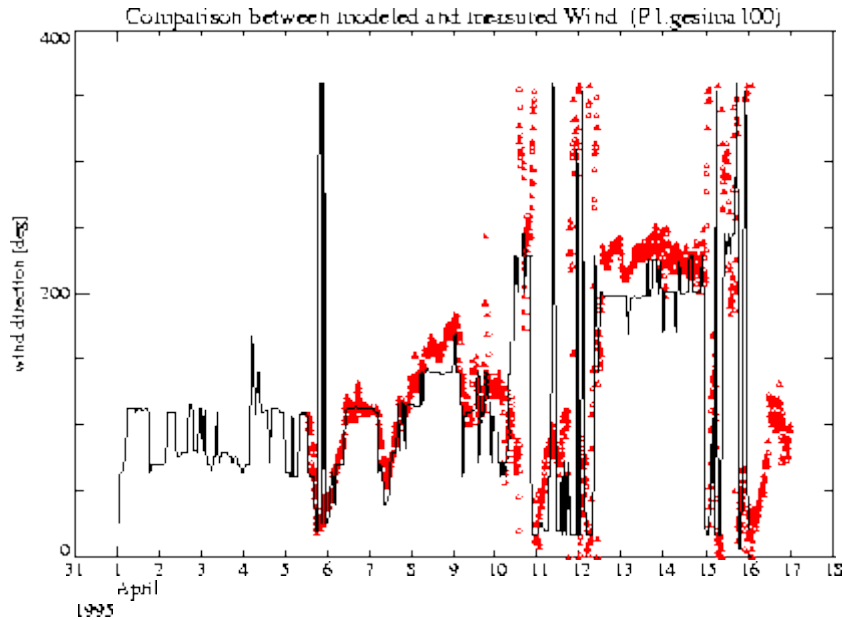
2.) "Nesting-grid"-Modellläufe erfordern einen hohen numerischen Aufwand, so daß bei der in dieser Region erforderlichen Auflösung ( $\Delta x=1..2$  km) selbst für die Nachrechnung kleinerer Perioden (14 Tage) Rechenzeiten im Bereich von Wochen (turn around) auf der C90 des DKRZ erforderlich sind. Für Langzeitszenarien erscheinen sie deshalb zur Zeit noch nicht praktikabel.

Darüberhinaus reagiert das GESIMA-Modell auch auf die Vorgabe bestimmter Modellsteuerparameter (Stabilität der Schichtung, Wassertemperatur) die einen zusätzlichen Datenbedarf anzeigen.

Figure 7: Vergleich der Windgeschwindigkeiten  $U_{10}$  an der Pfahlstation ODH2. Durchgezogene schwarze Linie: Modellergebnisse der Dateninterpolationstechnik GESIMA-Atlas-I. Dreiecke: Meßergebnisse.



(e) Windgeschwindigkeit  $U_{10}$

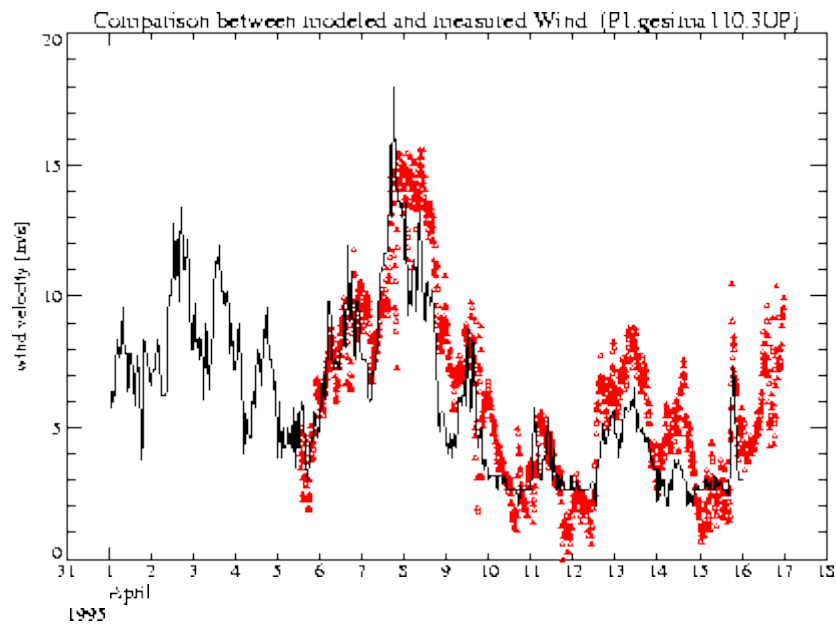


(f) Windrichtung  $\Theta_w$

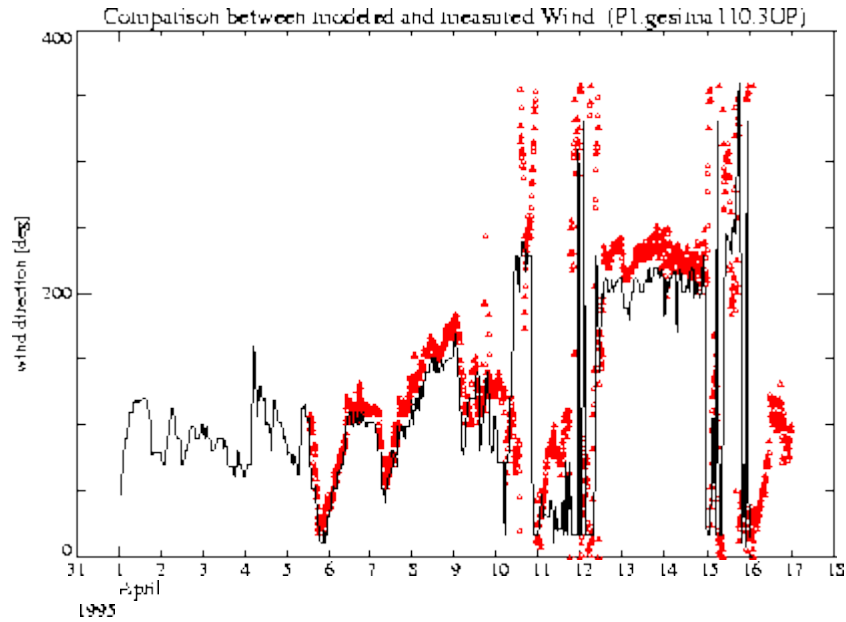
## **GESIMA - Dateninterpolation**

Um die im vorigen Kapitel für die "nesting-grid"-Technik auftretenden Probleme lösen und die Variabilität des lokalen Windfeldes möglichst adäquat wiedergeben zu können, wurde eine zweite Herangehensweise gewählt. In einem einfachen Dateninterpolationsverfahren wurde zuerst ein Windatlas für das Modellgebiet erstellt. Dabei wurde mittels GESIMA ein Satz von Windfeldern unter Annahme neutraler Schichtungsverhältnisse für unterschiedliche geostrophische Windgeschwindigkeiten berechnet ( $U_{geo}=[4, 8, \dots, 48 \text{ m/s}]$ ,  $\Delta\theta=30 \text{ Grad}$ ). Dieser Windatlas wurde genutzt, um anhand der einstündig vorliegenden Windmessungen an der DWD-Wetterstation Ueckermünde eine Zeitreihe von Windfeldern zu konstruieren. Dabei kamen zwei unterschiedliche Techniken zur Anwendung :

Figure 8: Vergleich der Windgeschwindigkeiten  $U_{10}$  an der Pfahlstation ODH2. Durchgezogene schwarze Linie: Modellergebnisse der Dateninterpolationstechnik GESIMA-Atlas-II (Synthese zweier Atlas-Felder). Dreiecke: Meßergebnisse.



(g) Windgeschwindigkeit  $U_{10}$



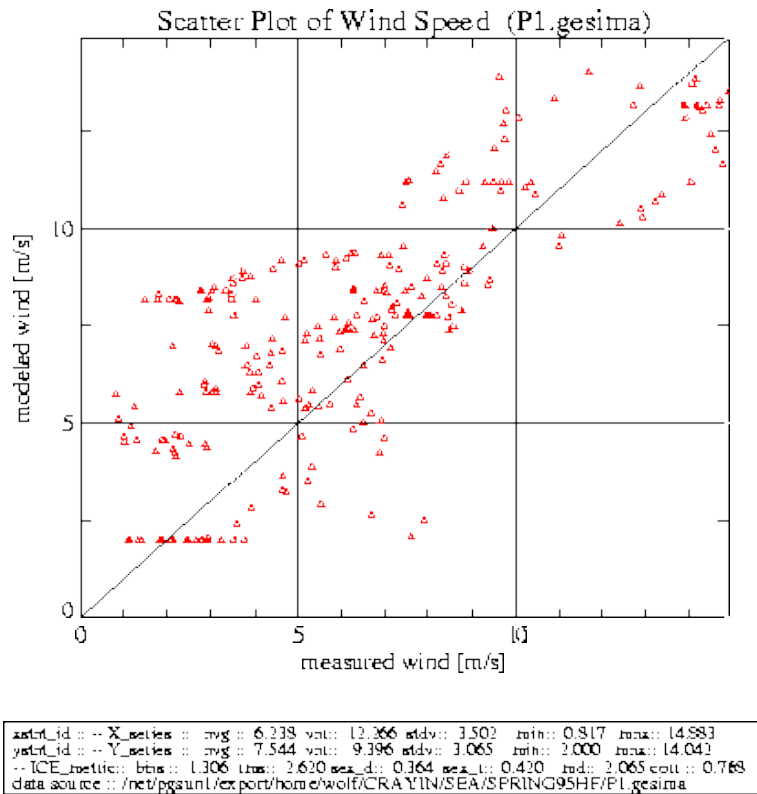
(h) Windrichtung  $\Theta_w$

1.) Ein einfaches Konstruktionsschema bei dem dasjenige Windfeld aus dem vorberechneten Windfeldatlas gewählt wurde, das im Gitterpunkt der DWD-Station Ueckermünde die beste Übereinstimmung mit den dort aufgenommenen Meßwerten aufwies. Dieses Windfeld wurde dann als für diesen Zeitpunkt repräsentativ im Gebiet angenommen (Methode : GESIMA-Atlas-I).

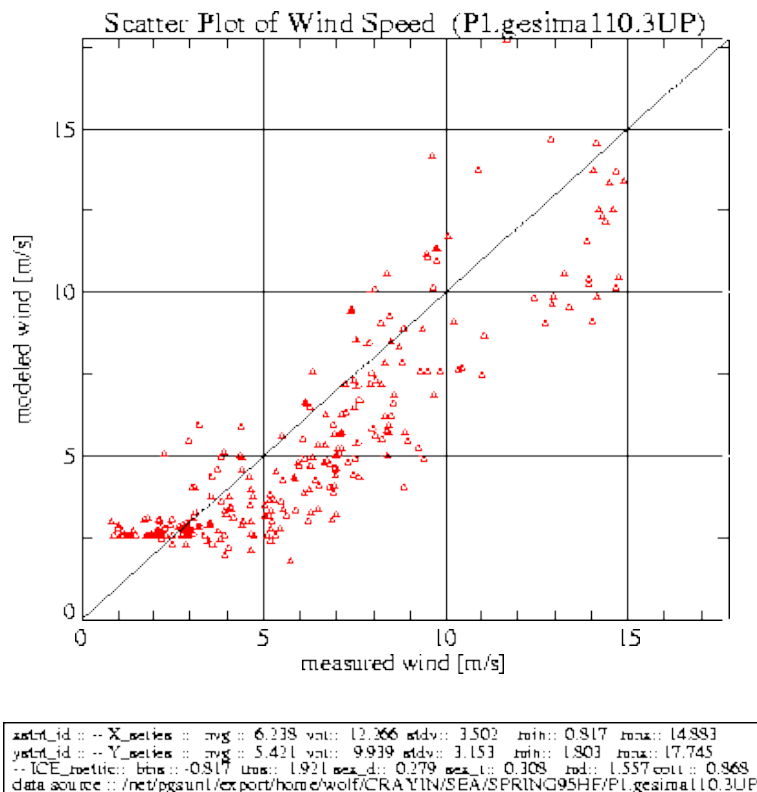
2.) Ein Interpolationsschema bei dem aus zwei Windfeldern des Atlas' mittels Interpolation ein Feld konstruiert wird, das dem im Stationsgitterpunkt Ueckermünde gemessenen Wert exakt entspricht (Methode : GESIMA-Atlas-II). Eine implizite Annahme dieses Verfahrens ist, daß sich alle möglichen im Gebiet anzutreffenden Windfelder durch Interpolation aus jeweils zwei stationär berechneten Feldern des Windatlas konstruieren lassen und das die Interpolationscharakteristik im gesamten Gebiet gleichbleibt.

Es gibt Fälle für die diese Annahme nicht mehr haltbar ist, da aufgrund der Spezifikation der Modellparameter bei der Erstellung des Atlas' bestimmte meteorologische Phänomene nicht adäquat berücksichtigt werden können (stark ausgeprägte Land-See-Windzirkulation mit in diesem Gebiet eher radialsymmetrischen Strukturen). Da diese Phänomene aber für Schwachwindsituationen zu erwarten sind, die für die Hydro- und Morphodynamik des Gewässers ohne größere Bedeutung sind, wird diese Einschränkung hingenommen. Für spätere Anwendungen kann durch Erweiterung des Windatlas um solche speziellen Wettersituationen und die Ausdehnung des Konstruktionsschemas auf Einbeziehung mehrerer Referenzpunkte die Anwendbarkeit der Methode beliebig erweitert werden.

Figure 9: Scatterplot der U10-Windgeschwindigkeiten an der Pfahlstation ODH2.



(i) Windfelder des "nested-grid" Modelllaufes von GESIMA



(j) Windfelder der Dateninterpolationstechnik GESIMA-Atlas-II



In Abb.7 sind die Vergleiche für Windgeschwindigkeit und -richtung am Pfahl ODH2 dargestellt. Die Zeitserie der modellierten Windgeschwindigkeiten gibt für die einfache Dateninterpolationstechnik (GESIMA-Atlas-I) kurzfristige natürliche Schwankungen wieder und zeigt eine gute Übereinstimmung in der Schwachwind- wie auch Sturmperiode des Nachhersagezeitraumes (s.a. Abb.9). Die größten Unterschiede zu den "nested-grid"-Ergebnissen treten jedoch bei dem Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Windrichtungen auf. Diese zeigen für die vorgestellte Interpolationstechnik speziell während des Sturmes eine sehr gute Übereinstimmung mit den Meßwerten. Das ist insofern von Bedeutung, als insbesondere Unterschiede in der Wiedergabe der lokalen Windrichtung Auswirkungen auf nachgeschaltete Simulationen des Seegangs haben, da sie die Fetchlängen mit denen sich die Wellen im Haffgebiet entwickeln beeinflussen. Bereits kleine Fehler in der Windrichtung können bei der komplexen Topographie des Haffs zu großen Abweichungen gegenüber den tatsächlich auftretenden Fetchlängen führen und somit die Nachhersage von Seegangseignissen verfälschen.

Für die zweite Dateninterpolationstechnik - GESIMA-Atlas-II (Interpolation zwischen zwei Windfeldern des Atlas) - führt der Vergleich mit den Meßwerten zu ähnlichen Ergebnissen (s.Abb.8). Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Werten der Windgeschwindigkeit und -richtung sehr gut. Somit können mittels der beiden Dateninterpolationsmethoden sowohl kurzfristige zeitliche Schwankungen des lokalen Windfeldes als auch dessen Richtungscharakteristik berücksichtigt und reproduziert werden.

Wesentliche Vorteile der vorgestellten Dateninterpolationstechniken sind :

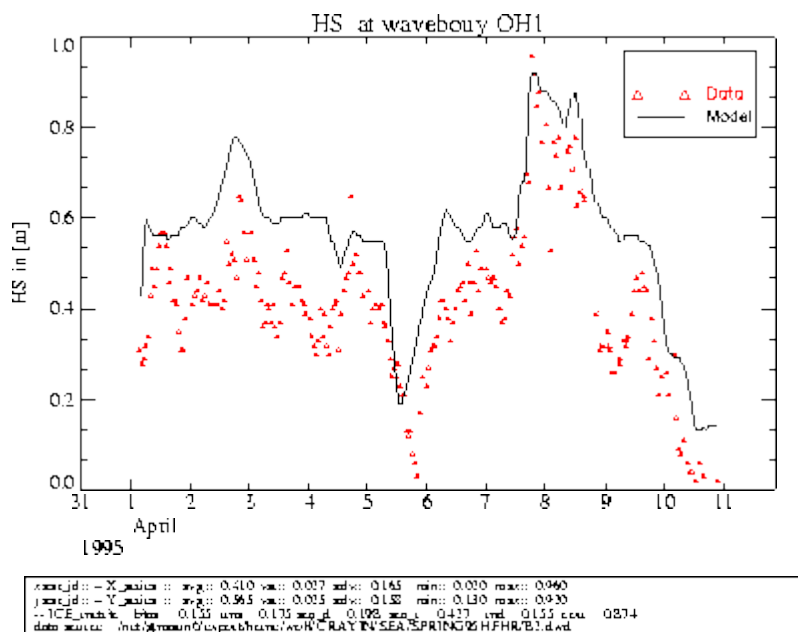
- 1.) Erweiterbarkeit des Verfahrens durch Einbeziehung entsprechender Wettersituationen in den Satz bestehender Windfelder und Erhöhung der räumlichen Auflösung bei geringen numerischen Aufwand.
- 2.) Durch die Anbindung der Windatlasfelder an die Messungen der Referenzstation bleibt eine Referenzierung der Windfelder erhalten, so daß der Bezug zu den aktuell gemessenen Daten gegeben ist.
- 3.) Auch für längere Perioden in der Größenordnung von Jahren können bei vertretbarem numerischen Aufwand Windfelder zur Verfügung gestellt werden, die sowohl die zeitliche als auch räumliche Variabilität des natürlichen Windfeldes in diesem Bereich adäquat wiedergeben.

## **Modellierung des Seegangsfeldes**

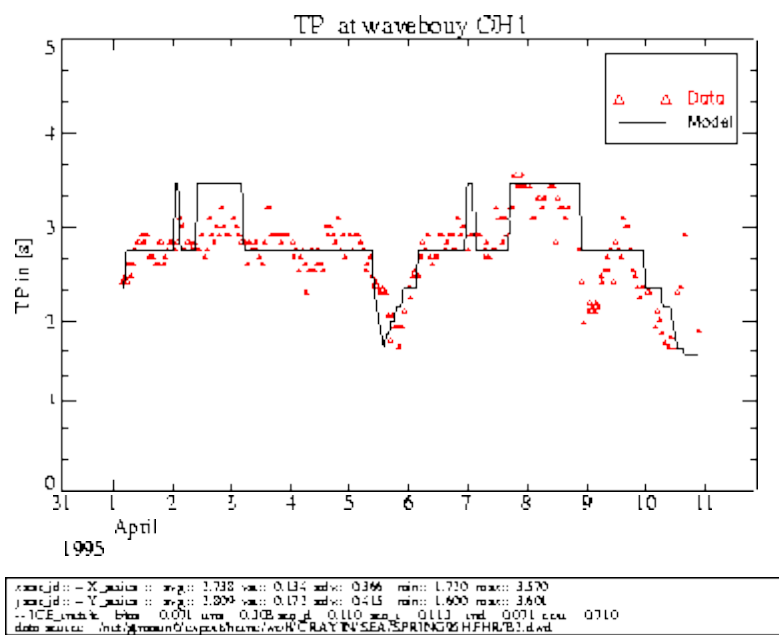
### **Nachhersage des Seeganges unter Verwendung hochaufgelöster lokaler Windfelder**

In diesem Abschnitt werden die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Windfelder genutzt, um mit dem Flachwasserseegangmodell HYPAS Simulationen des lokalen Seegangsfeldes im Oderhaff vorzunehmen. Vergleiche zwischen modellierten und gemessenen Seegangsparemtern werden dabei anhand von wave-rider-Messungen im Kleinen Haff (s.Abb.2) vorgenommen. Untersucht wurde, ob auf der Grundlage der mittels verschiedener Techniken generierten Windfelder das lokale Seegangsfeld in befriedigender Weise simuliert werden kann. Betrachtet wird eine Sturmperiode im April 1995 für die HYPAS mit dem Windfeldern des DWD-Europamodells, des GESIMA ``nested-grid" Modellaufes und den Windfeldern der zwei Dateninterpolationstechniken (GESIMA-Atlas-I/II) getrieben wurde.

Figure 10: Vergleich integrierter Wellenparameter (signifikante Wellenhöhe  $H_s$ , Peakperiode  $T_p$ ) mit wave-rider Messungen im Kleinen Haff. Durchgezogene schwarze Linie: HYPAS-Modellergebnisse (Antrieb DWD-EM-Windfeld). Dreiecke: Meßwerte.

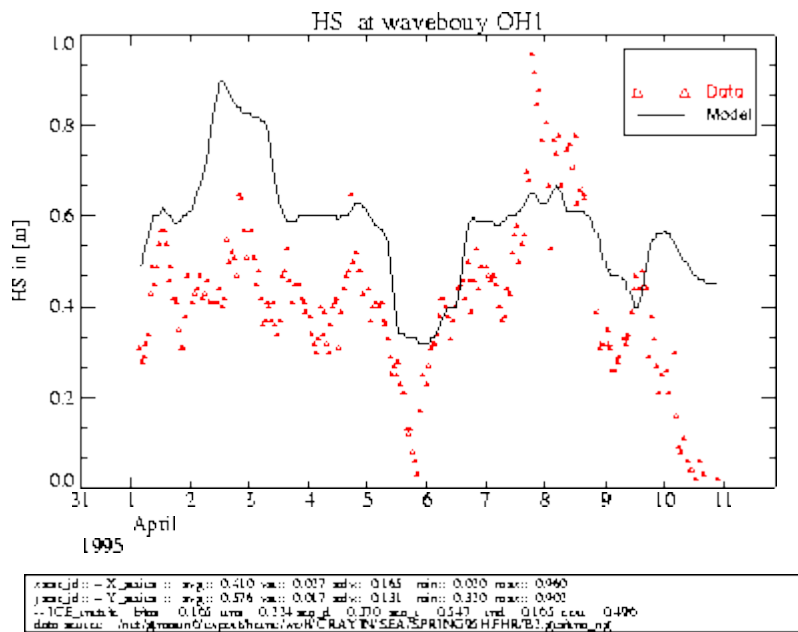


(k) Signifikante Wellenhöhe  $H_s$

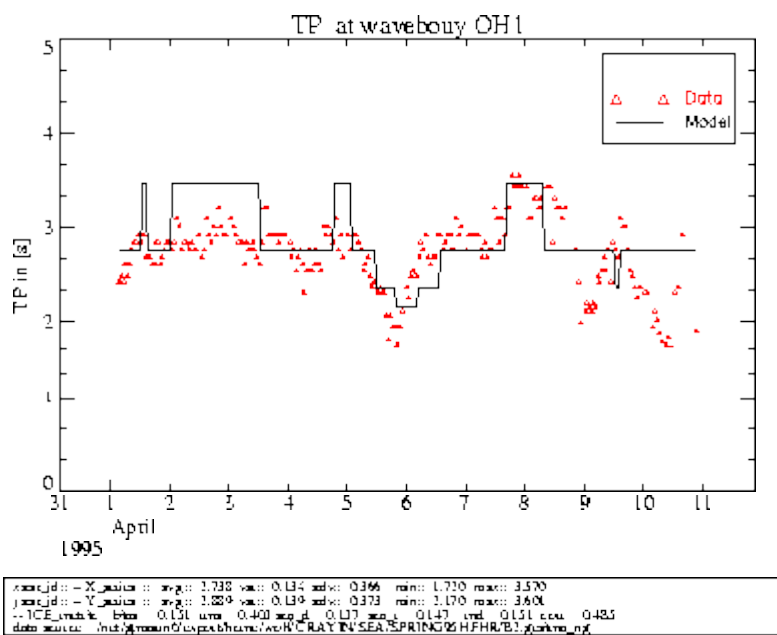


(l) Peakperiode  $T_p$

Figure 11: Vergleich integrierter Wellenparameter (signifikante Wellenhöhe  $H_s$ , Peakperiode  $T_p$ ) mit wave-rider Messungen im Kleinen Haff. Durchgezogene schwarze Linie: HYPAS-Modellergebnisse (AntriebGESIMA-Windfeld - "nested-grid"-Technik). Dreiecke: Meßwerte.



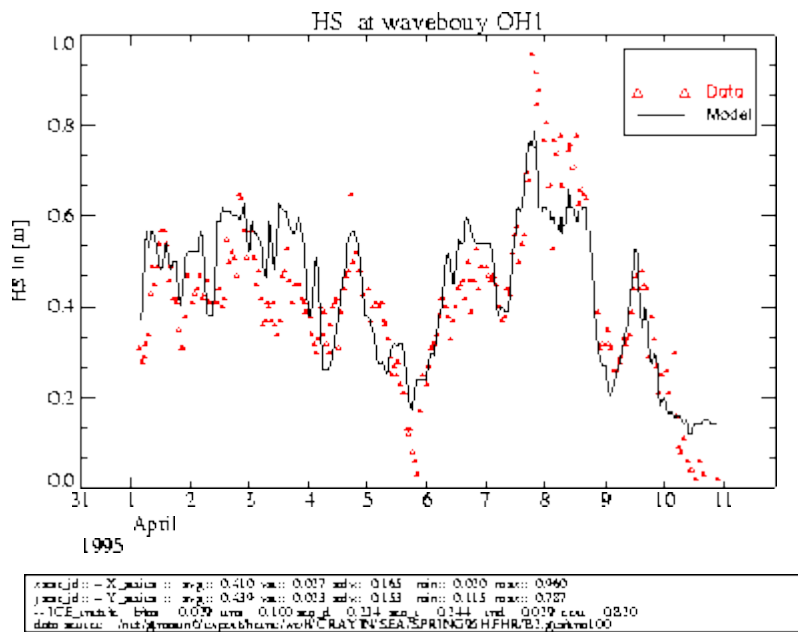
(m) Signifikante Wellenhöhe  $H_s$



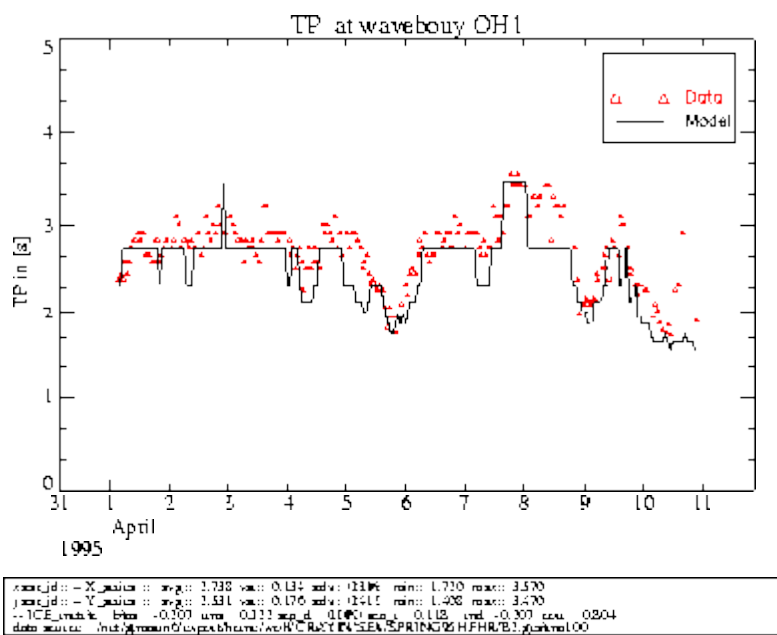
(n) Peakperiode  $T_p$

In Abb. 10 ist ein Vergleich zwischen modellierter und gemessener signifikanter Wellenhöhe  $H_s$  an der Position der wave-rider Boje OH1 im Kleinen Haff dargestellt. HYPAS wurde bei diesem Lauf mit Windfeldinformationen des DWD-Europamodells getrieben. Erwartungsgemäß - aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung und der in der Windfeldvalidierung gefundenen Abweichungen von gemessener Windgeschwindigkeit und -richtung - werden auch die Seegangparameter nur schlecht angenähert. Die signifikante Wellenhöhe  $H_s$  wird außer zum Höhepunkt des Sturmes überschätzt und die zeitlichen Variationen von  $H_s$  im Vorfeld des eigentlichen Sturmereignisses werden nicht wiedergegeben. Ein ähnliches Ergebnis wird für die "nested-grid"- Windfelder (Abb. 11) erhalten, die im wesentlichen zu gleichen Ergebnissen bei der Berechnung der integrierten Parameter des Seegangfeldes führen. Die Betrachtung der Peakperiode  $T_p$  führt für diese beiden Läufe zu ähnlichen Resultaten (Abb. 10, 11), wobei  $T_p$  relativ zu den Messungen zu hohe Werte erreicht. Das ist in Übereinstimmung mit den zu hohen Werten der signifikanten Wellenhöhe  $H_s$  die speziell für die Schwachwindperioden erhalten werden.

Figure 12: Vergleich integrierter Wellenparameter (signifikante Wellenhöhe  $H_s$ , Peakperiode  $T_p$ ) mit wave-rider Messungen im Kleinen Haff. Durchgezogene schwarze Linie: HYPAS-Modellergebnisse (Antrieb GESIMA-Windfeld - GESIMA-Atlas-I). Dreiecke: Meßwerte.

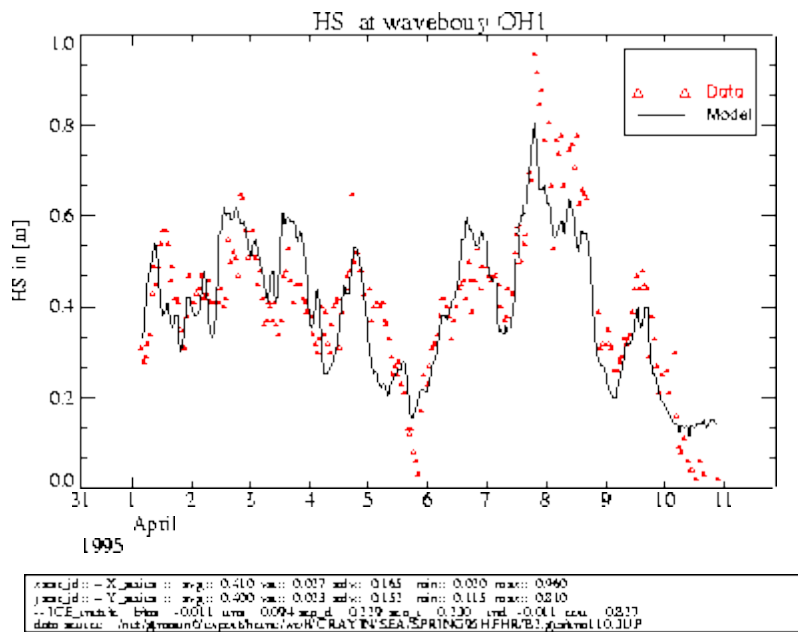


(o) Signifikante Wellenhöhe  $H_s$

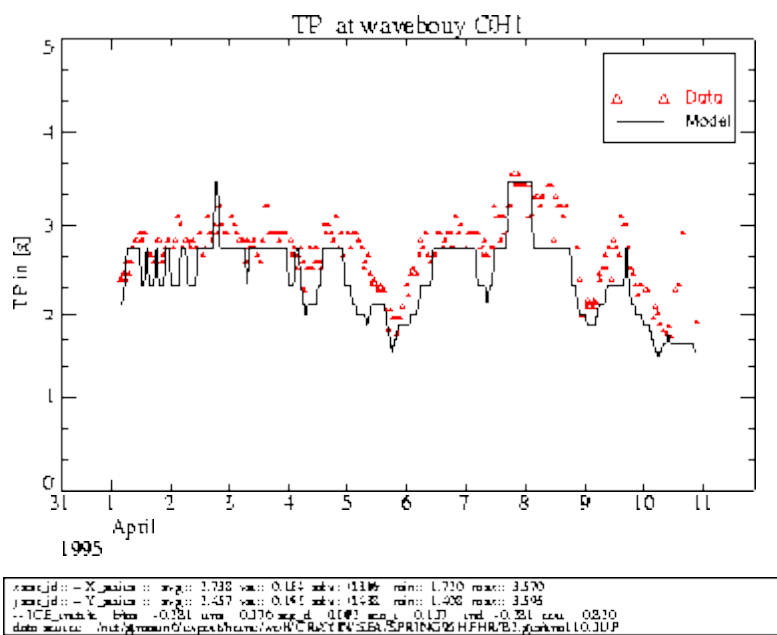


(p) Peakperiode  $T_p$

Figure 13: Vergleich integrierter Wellenparameter (signifikante Wellenhöhe  $H_s$ , Peakperiode  $T_p$ ) mit wave-rider Messungen im Kleinen Haff. Durchgezogene schwarze Linie: HYPAS-Modellergebnisse (Antrieb GESIMA-Windfeld - GESIMA-Atlas-II). Dreiecke: Meßwerte.



(q) Signifikante Wellenhöhe  $H_s$



(r) Peakperiode  $T_p$

Werden die Windfelder der Dateninterpolationstechniken (GESIMA-Atlas-I, GESIMA-Atlas-II) zur Modellierung des Seeganges benutzt, verbessert sich die Güte der Seegangmodellierung entscheidend. In Abb. 12 sind die modellierten Hs-Werte für die Windfelder des GESIMA-Atlas-I dargestellt. Die Hs-Werte werden in dieser Simulation wesentlich besser wiedergegeben und auch die zeitliche Variabilität der Wellenhöhenzeitserie für Zeitskalen im Stundenbereich wird gut reproduziert. Insbesondere wird auch während der Schwachwindsituation im Vorfeld des eigentlichen Sturmereignisses die Nachhersagegüte verbessert.

Trotzdem bleibt zu bemerken, daß auch bei diesen Rechnungen eine leichte Überschätzung der Messwerte durch die Modellwerte stattfindet (s.Abb.15-b. für GESIMA-Atlas-II). Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, daß für den betrachteten Zeitraum bedingt durch die niedrigen Windgeschwindigkeiten und die kurzen Fetchlängen ein relativ hochfrequentes Seegangsspektrum vorliegt. Dieses kann in seinem hochfrequenten Anteil von der Boje aufgrund ihrer konstruktionsspezifischen Parameter nicht vollständig erfaßt werden, was eine Unterschätzung der signifikanten Wellenhöhe Hs zur Folge hat. Ein weiteres Indiz für die Schlüssigkeit dieser Argumentation sind die von der Seegangsboje für diesen Zeitraum ausgegebenen Parameter  $T_p$  und  $T_{m2}$  (Abb. 14). Beide stehen zueinander in bestimmten Beziehungen die von Seegangszustand und Spektralform des Seegangsfeldes abhängen. Als grobe Annäherung kann davon ausgegangen werden, daß gilt. Die von der Boje gemessenen Werte zeigen für den Schwachwindbereich kein solches Verhältnis, was darauf hindeutet, daß  $T_P \approx 1.3T_{m2}$  der hochfrequente Anteil des Seegangsspektrums unterschätzt wird.

Figure 14: Integrale Perioden des Seegangsspektrums  $T_p$ ,  $T_{1/10}$ ,  $T_{m2}$  und deren Verhältnisse gemessen an der wave-rider- Boje im Kleinen Haff.

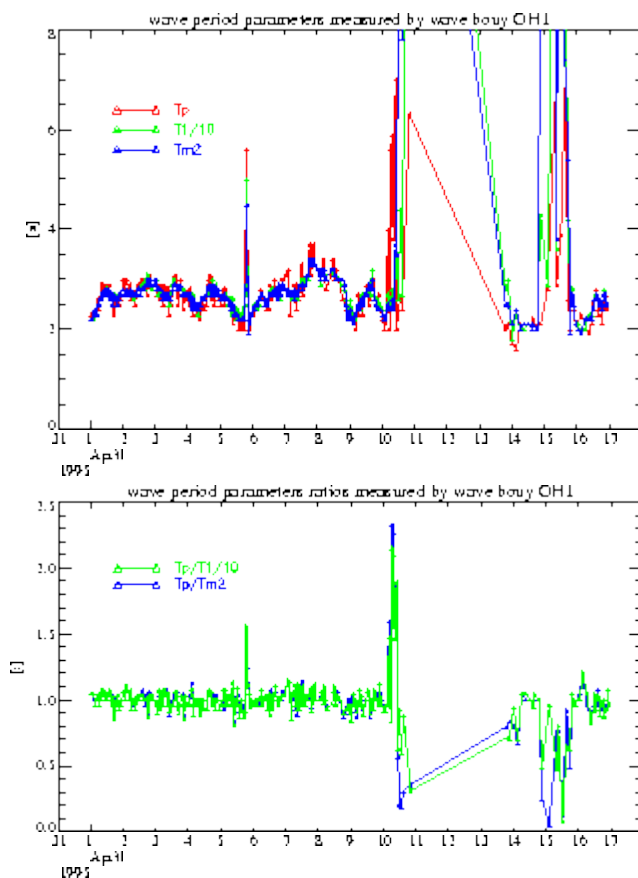
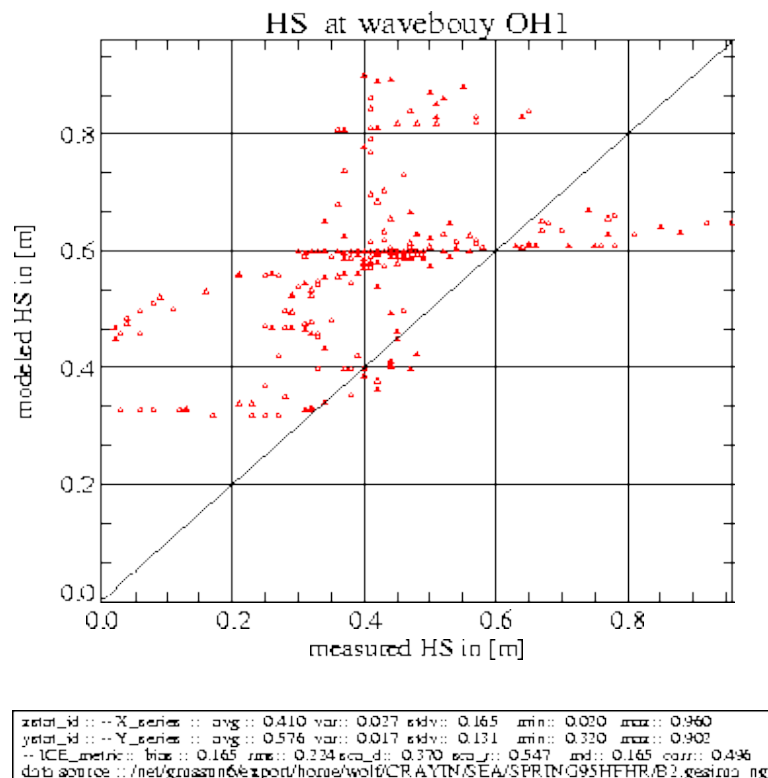
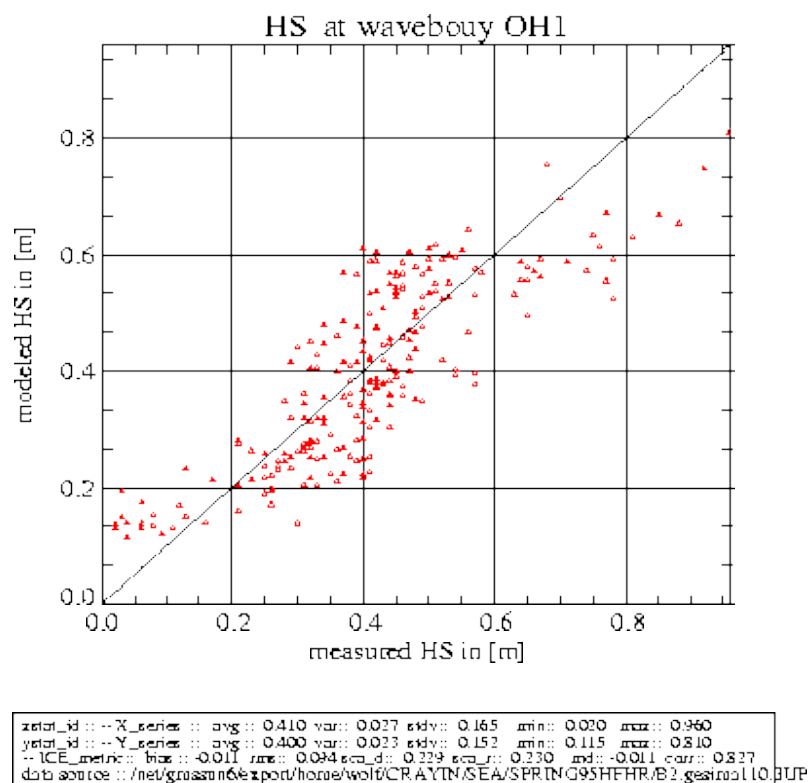




Figure 15: Scatterplot der signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  an der wave-rider-Boje im Kleinen Haff.



(s) Scatterplot "nested-grid" Modellauf



(t) Scatterplot GESIMA-Atlas-II

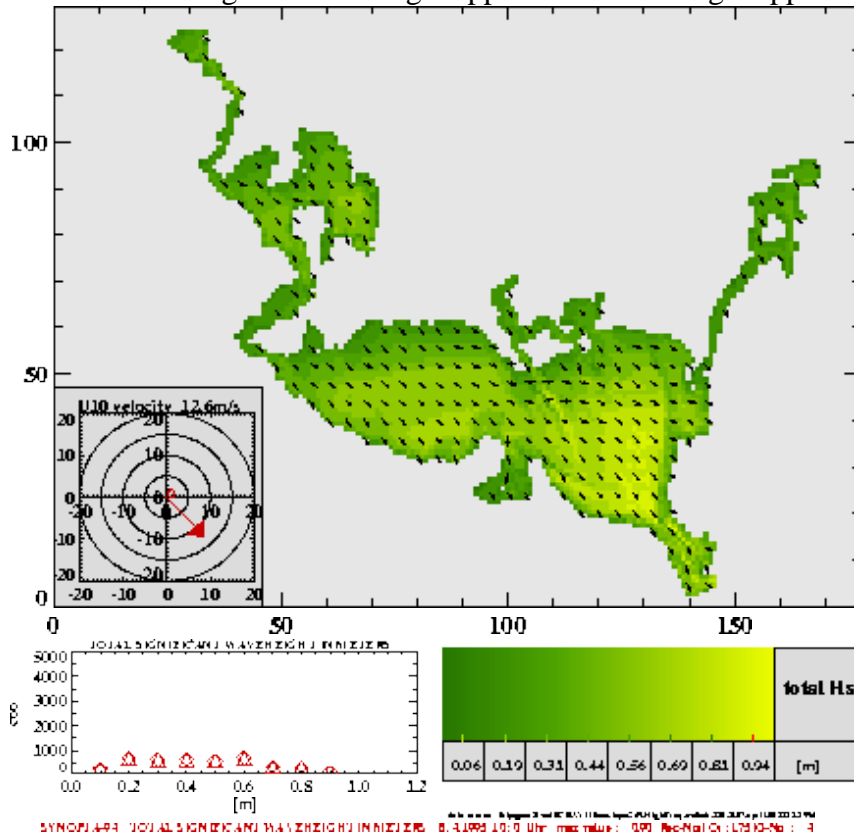
In Abbildung 13 sind die Modellergebnisse von HYPAS bei Verwendung der GESIMA-Atlas-II-Windfelder (mit Interpolation zwischen Windatlasfeldern im Referenzpunkt) dargestellt. Ähnliche Aussagen wie zur Modellierung des Seegangs mit den GESIMA-Atlas-I-Feldern können auch hier getroffen werden. Sowohl die während des Sturmes gemessenen Werte als auch die zeitliche Variabilität im Vorfeld des eigentlichen Sturmereignisses werden gut wiedergegeben. Parallel zu den Vergleichen von  $H_s$  zeigt auch der  $T_p$ -Parameter eine Verbesserung der Nachhersage für diese Windfelder.

### **Einfluß variierender Wasserstandsfelder auf die Entwicklung des Seegangsfeldes**

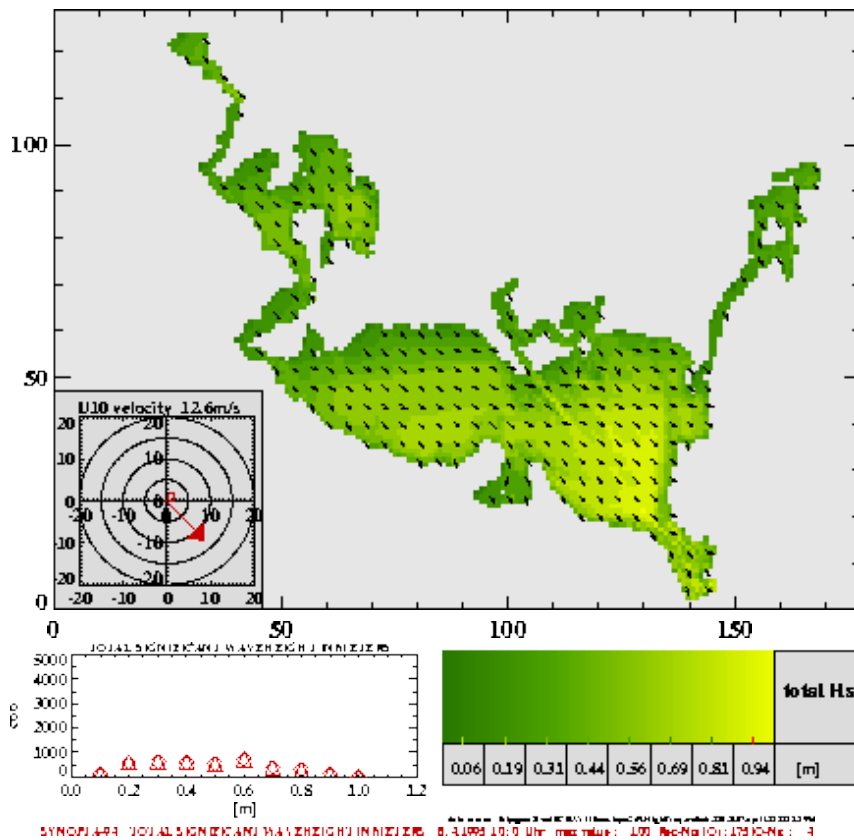
Das Seegangsfeld tritt in vielfacher Weise mit den unterliegenden Strömungssystem in Wechselwirkung. Im Kapitel Hydrodynamische Modellierung mit TRIM3D wird die Beeinflussung des Strömungsfeldes und der Wasserstände durch Oberflächenwellen betrachtet, während in diesem Kapitel der umgekehrte Weg besprochen werden soll. Eine klare Trennung ist dabei nicht immer möglich, da es sich um einen Prozeß handelt, bei dem es zu einer wechselseitigen Einflußnahme zwischen Seegangs-, Strömungs- und Wasserstandsfeld kommt. Unter den hydrodynamischen Bedingungen des Oderhaffs können dabei jedoch Iterationen höherer Ordnung innerhalb des Modellsystems, die diese gegenseitige Beeinflussung numerisch approximieren, weitestgehend vernachlässigt werden.

Die Auswirkungen von Strömungen auf Windsee und Dünungswellen können unterschiedlicher Natur sein. Zum einen ändern sich Propagationsverhalten und Generationsbedingungen der Wellen, was zu veränderten Spektralformen und Ausbreitungswegen führen kann. Die so bewirkten Effekte sind im Oderhaff aufgrund der geringen auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten sehr gering und werden im Seegangmodell vernachlässigt (Spielen aber in anderen Gewässern mit entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten z.B.: Priele der nordfriesischen Inseln usw. durchaus eine Rolle).

Figure 16: Signifikante Wellenhöhe  $H_s$  im Oderhaff am 08.04.1995 - 10:00 Uhr. Vergleich zwischen den Ergebnissen des gekoppelten und des ungekoppelten Modelllaufes.



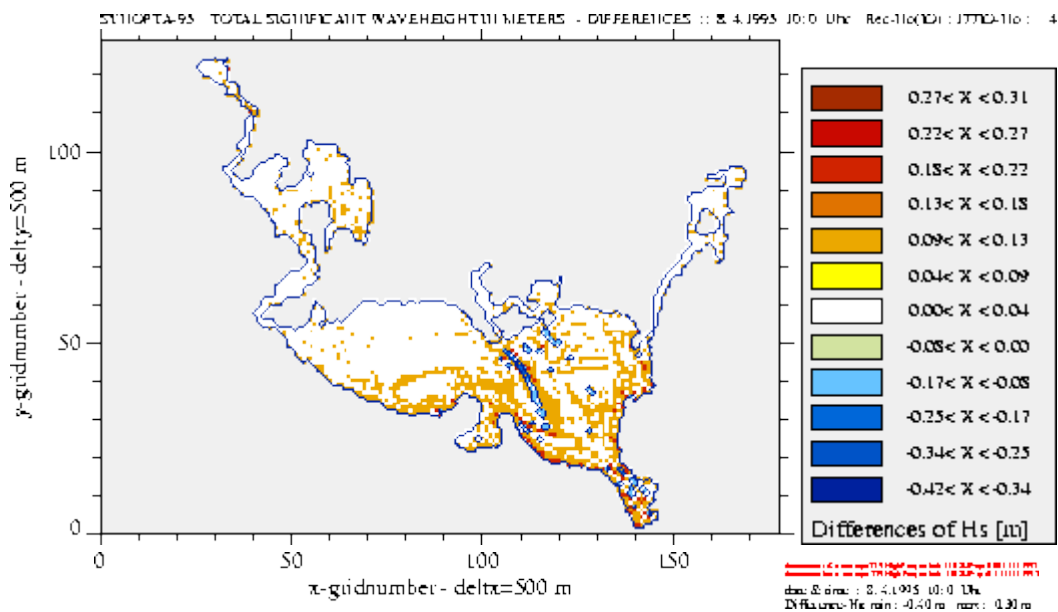
(u) ungekoppelter Modelllauf



(v) gekoppelter Modelllauf

Zum anderen werden sowohl das Propagations- als auch das Dissipationsverhalten des Seegangsfeldes durch die Wassertiefe  $D$  beeinflusst. Sind die im Gewässer auftretenden Wasserstandsschwankungen in der Größenordnung der Wassertiefe selber, müssen sie bei der Modellierung des Seegangsfeldes berücksichtigt werden. Im Oderhaff existieren große ufernahe Bereiche mit Wassertiefen  $D \approx 2$  m, in denen auch kleine Pegelschwankungen zu einer Veränderung der Wellenparameter führen können.

Figure 17: Differenzen zwischen den signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  des gekoppelten und ungekoppelten Modellaufes von HYPAS am 8.04.1995 10:00 Uhr (s.a. Abb. 16).



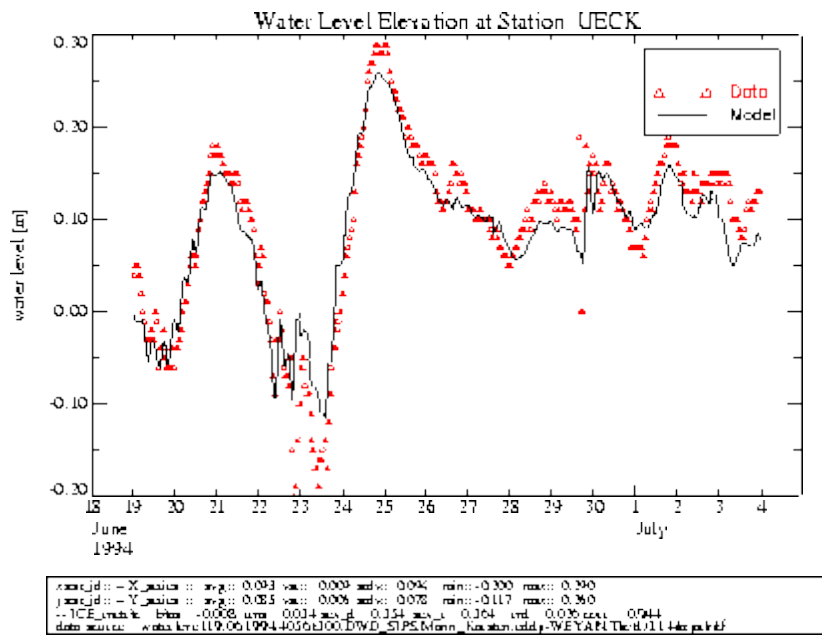
Innerhalb des Modellsystems wird ein erster ungekoppelter Modellauf des Strömungsmodells TRIM3D durchgeführt, der die Wasserstandsinformationen flächenhaft für den Bereich des Oderhaffs an das Seegangmodell HYPAS liefert. HYPAS nutzt diese Information, um die aktuelle Wassertiefe an jedem Punkt zu berechnen und die entsprechenden Änderungen der Sourcesterme in der parametrisierten Energiebilanzgleichung zu berechnen. Die Auswirkungen auf das Seegangsfeld zeigen sich dabei speziell im Bereich der Schorre, d.h. in Bereichen geringer Wassertiefe wo Wasserstandsvariationen Einfluß auf die Entwicklung des Seegangsfeldes nehmen. In Abbildung 17 sind die Differenzen der signifikanten Wellenhöhen zwischen gekoppelten und ungekoppelten Modellauf von HYPAS dargestellt. Deutlich werden die erhöhten Wellenhöhen im Bereich des östlichen Randes des Großen Haffes und der Gebiete mit geringer Wassertiefe im Übergangsbereich zwischen Großem und Kleinem Haff. Die Veränderung der Seegangparameter zeigen selbst bei relativ geringen Wasserstandsschwankungen im Bereich weniger dm eine Sensitivität gegenüber der aktuellen Wassertiefe. Bei Zunahme des Wasserstandes und damit der aktuellen Wassertiefe laufen die Wellen mit größerer Wellenhöhe bis in den Uferbereich ein (Abb.16). Der Punkt des Wellenbrechens wird zur Küste hin verlagert.



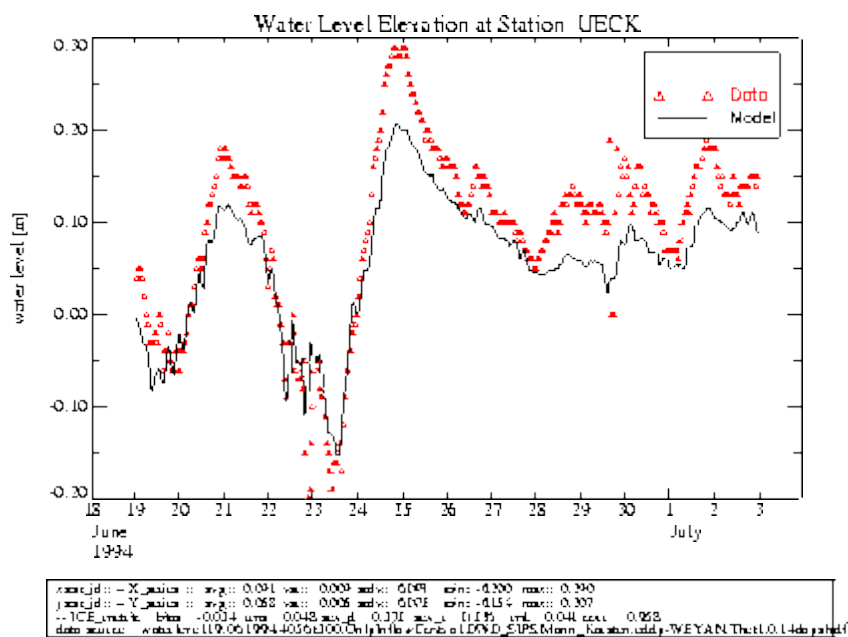
Im Rahmen der Implementierung des hydrodynamischen Modells wurde der Einfluß unterschiedlicher Steuerungen des Odereinflusses am Südrand des Modells untersucht. Wahlweise wurde bei einer ersten Steuerungsvariante ein offener Rand unterhalb von Trzebiesz vorgegeben für den die Wasserstände spezifiziert (implizite Steuerungsvariante) wurden. Bei einer zweiten Steuerungsvariante wurde der Volumenstrom am Einfluß der Oder in den Jezioro Dabie (Dammscher See) explizit vorgegeben (explizite Steuerungsvariante).

Vergleiche beider Modellmodifikationen mit Feldmessungen zeigen ein differenziertes Bild. Während sich die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten beider Läufe im Haff nur geringfügig unterscheiden und hinsichtlich der Messungen ähnliche Fehler aufweisen (Abb. 18), sind für die Wasserstände bessere Ergebnisse zu erzielen, wenn an der Odereinmündung die Wasserstände spezifiziert werden (implizite Steuerung, Abb.19). Im Fall der Einsteuerung des Volumenstromes (explizite Steuerung) der Oder werden im Innern des Haffs (Pegelstation Karnin bzw. Ueckermünde) die Wasserstände speziell in den Scheitelpunkten der Pegelganglinie nicht so gut reproduziert (Abb.19-b), wohingegen die im Peenestrom liegenden "Strompegel" stärker von den Wasserständen der Ostsee beeinflußt werden und für beide Steuerungsvarianten keine großen Unterschiede aufweisen (Abb.20).

Figure 19: Vergleich der modellierten und gemessenen Wasserstände am Pegel Ueckermünde („Haffpegel“) mit Pegel- und Oberwassersteuerung des Odereinstromes. Durchgezogene schwarze Linie: TRIM3D-Modellergebnisse. Dreiecke: Meßwerte.

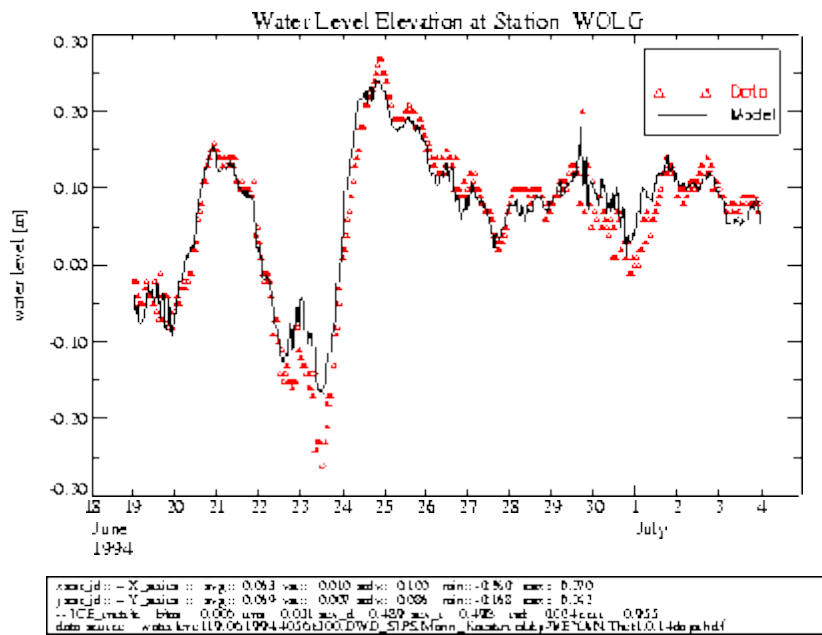


(y) Pegelsteuerung des Odereinstromes

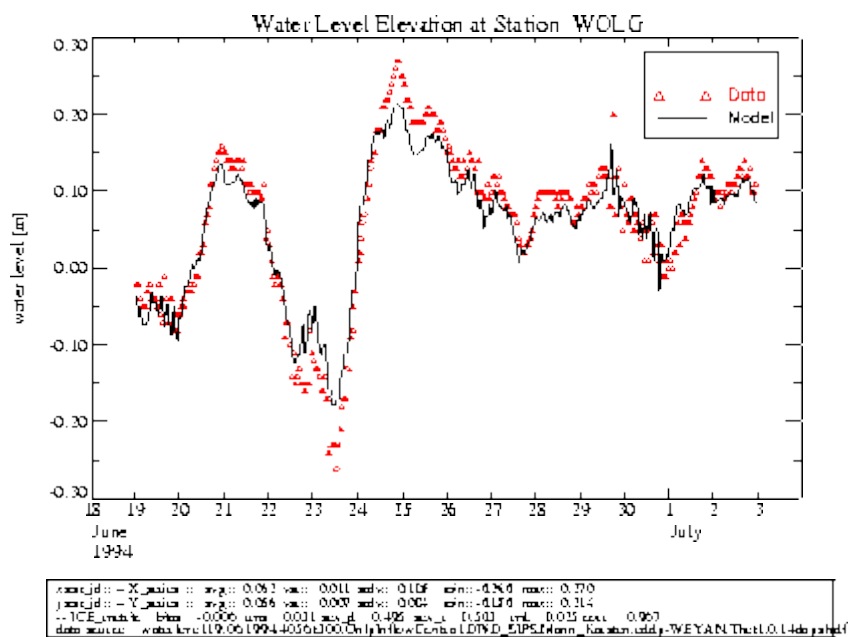


(z) Oberwassersteuerung des Odereinstromes

Figure 20: Vergleich der modellierten und gemessenen Wasserstände am Pegel Wolgast ("Strompegel") mit Pegel- und Oberwassersteuerung des Odereinstromes. Durchgezogene schwarze Linie: TRIM3D-Modellergebnisse. Dreiecke: Meßwerte.



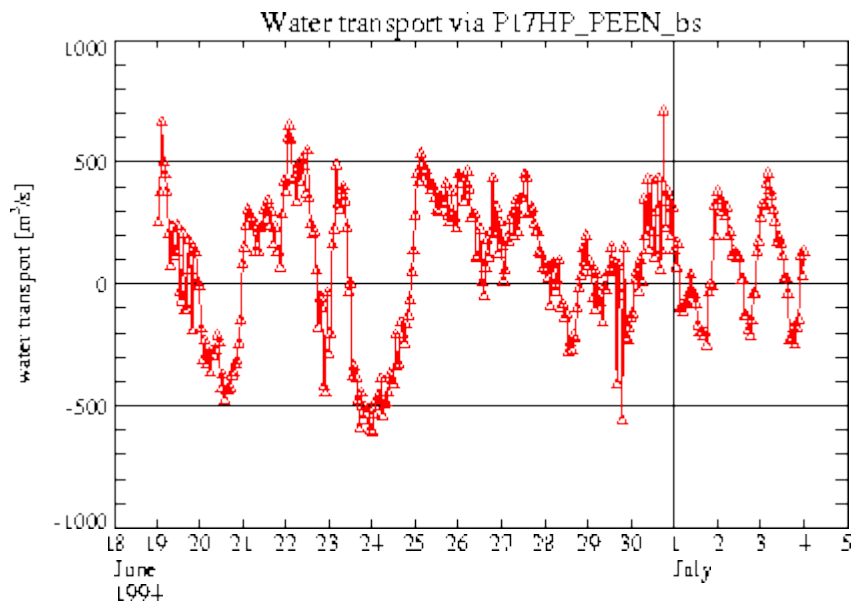
() Pegelsteuerung des Odereinstromes



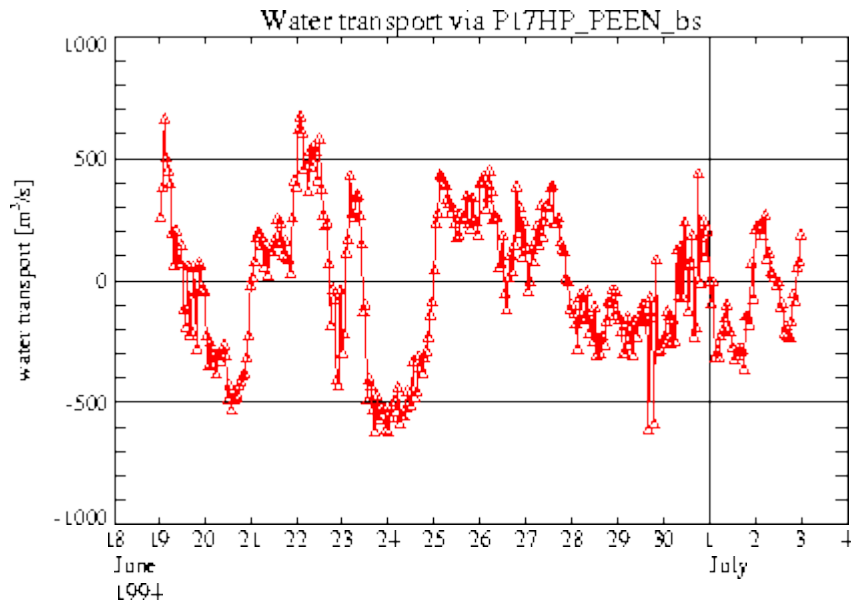
() Oberwassersteuerung des Odereinstromes



Figure 21: Wasseraustausch zwischen Oderhaff und Ostsee über den Peenestrom während der SYNOPTA-94. Positive Werte zeigen Ausströmsituationen an, negative Werte Einströme salzhaltigen Wassers der Ostsee in den Peenestrom hinein.



(i) Pegelsteuerung des Odereinstromes



(j) Oberwassersteuerung des Odereinstromes

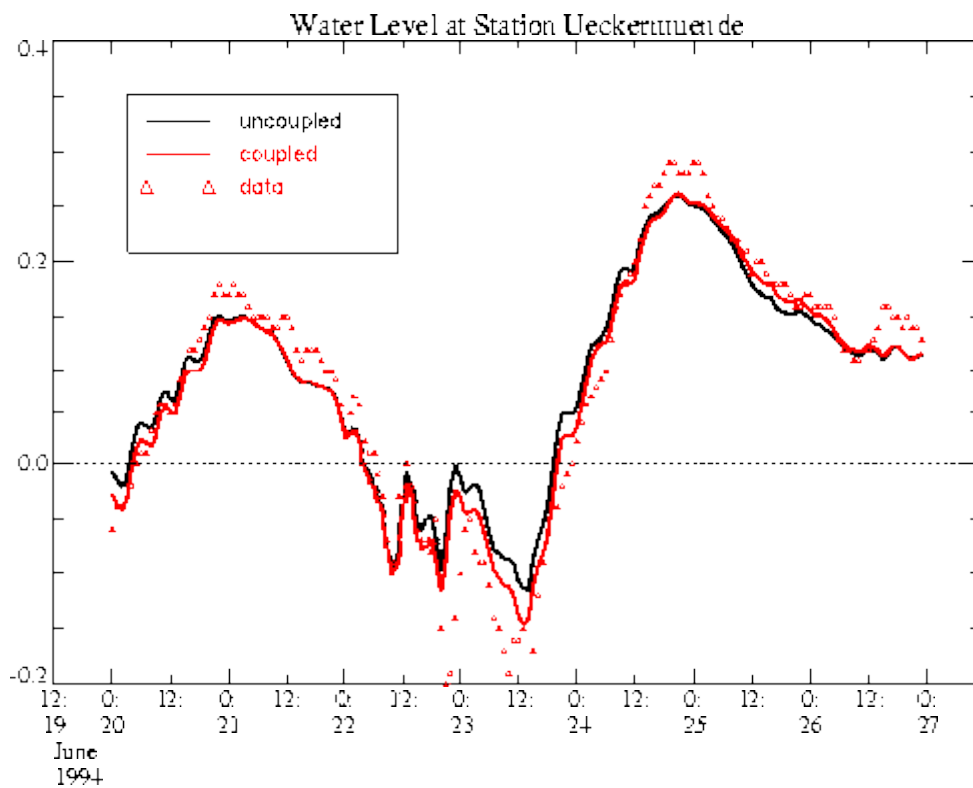
Die Austauschbilanzen des Modells mit der Ostsee über die Ströme Peenestrom, Swina und Dziwna bleiben bei beiden Modellkonfigurationen ähnlich und unterscheiden sich für den betrachteten Zeitraum nur geringfügig (Abb. 21). Die auftretenden Unterschiede korrespondieren mit den Differenzen der inneren Haffpegel (Abb.19), die den Wasseraustausch mit der Ostsee kontrollieren. Für längere Modellperioden im Bereich von Jahren kann keine Einschätzung gegeben werden (s.d. Buckmann in diesem Band), jedoch können sich dabei systematische Abweichungen aufgrund der Meßgenauigkeit der Pegel ergeben, die sich allerdings in der Größenordnung der Meßgenauigkeit der Volumenströme bewegen dürften. Beide Steuerungsvarianten sollten für längere Zeiträume ähnliche Austauschbilanzen ergeben. Aktuelle Ereignisse und Austauschprozesse mit der Ostsee werden allerdings aufgrund der Vorgabe der Pegelinformation eher von der impliziten Steuerungsvariante (Pegelsteuerung bei Trzebiesz) wiedergegeben.



## Einfluß des Seegangs auf Strömung und Wasserstand

Innerhalb des Strömungsmodells TRIM3D wurden neue Kopplungsterme eingeführt, um den Einfluß des Seeganges auf die Strömung erfassen zu können. In die Bewegungsgleichungen wurden dabei die radiation-stress-Terme eingeführt, die die Einkopplung von Seegangenergie in das Strömungsfeld beschreiben, während der mit dem Seegangsfeld einhergehende Massentransport (Stokes Drift) in der Massenerhaltungsgleichung berücksichtigt wurde (DOLATA & ROSENTHAL, 1984). Im weiteren sollen auftretende Kopplungseffekte anhand von Modellsimulationen für einen Sturm der SYNOPTA-94-Phase diskutiert werden.

Figure 23: Zeitserie des Wasserstandes während einer Sturmperiode im Juni 1994. Dargestellt sind die gemessenen Wasserstände am Pegel Ueckermünde sowie die mittels TRIM3D berechneten Wasserstände für diesen Zeitraum (Dreiecke: Pegelregistrierung im Pegel Ueckermünde; schwarze durchgezogene Linie: TRIM3D ungekoppelter Modellauf, rote durchgezogene Linie: TRIM3D gekoppelter Modellauf).



Während des betrachteten Sturmes im Juni 1994 traten vorwiegend westliche Winde auf (Abb. 22). Für diesen Zeitraum wurden mit TRIM3D Simulationen durchgeführt, um den Einfluß der Kopplungsterme auf Strömungsregime und Wasserstandsfeld zu untersuchen. Durch die Berücksichtigung des seegangsinduzierten Massentransportes konnten die im Innern des Haffs gemessenen Pegelvariationen besser approximiert werden (s. Abb. 23). Zum Zeitpunkt des Sturmhöhepunktes, am 23.06.1994 14:00 Uhr, kommt es zu größeren Unterschieden zwischen gemessenen und modellierten Pegel des ungekoppelten Modells, wohingegen der gekoppelte Modellauf die Meßwerte besser nachbildet. Die Reproduktion der Wasserstände wird dabei natürlich auch durch weitere Einflußfaktoren bestimmt und speziell durch die numerische Dämpfung langer Wellen im Modell begrenzt (CASULLI & CATTANI, 1994). Die zum betrachteten Zeitpunkt generierte Windsee setzt einen zusätzlichen Massentransport in Gang, der zu kleinen Variationen des Wasserstandsfeldes im Haff führt (s. Abb. 24). Dieser Massentransport führt zu Pegelerhöhungen im Großen Haff bei gleichzeitiger Wasserstandserniedrigung im Kleinen Haff. Speziell auch in der östlichen Uferzone des Großen Haffs, die die Ausbreitung des Seegangsfeld begrenzt, treten dabei

leicht erhöhte Wasserstände auf. Dieser Effekt kann auch im Bereich des Achterwassers beobachtet werden, wo trotz der geringen Fetchlängen bereits welleninduzierte Pegelstandsvariationen auftreten, die im östlichen Bereich des Achterwassers in Ufernähe ebenfalls zu einer Wasserstandserhöhung führen.

Figure 24: Plot der Wasserstandsdifferenzen zwischen gekoppelten und ungekoppelten Modellauf von TRIM3D am 23.06.1994 14:00 Uhr. Durch die vorherrschend westlichen Winde in dieser Zeit wird ein Seegangsfeld generiert daß einen zusätzliche Massentransport im Haff bewirkt, der zu einer Pegelabsenkung im Kleinen Haff bei gleichzeitiger Wasserstandserhöhung im Großem Haff führt. Die auftretenden Pegeldifferenzen zwischen beiden Modellläufen bewegen sich im Bereich weniger Zentimeter.

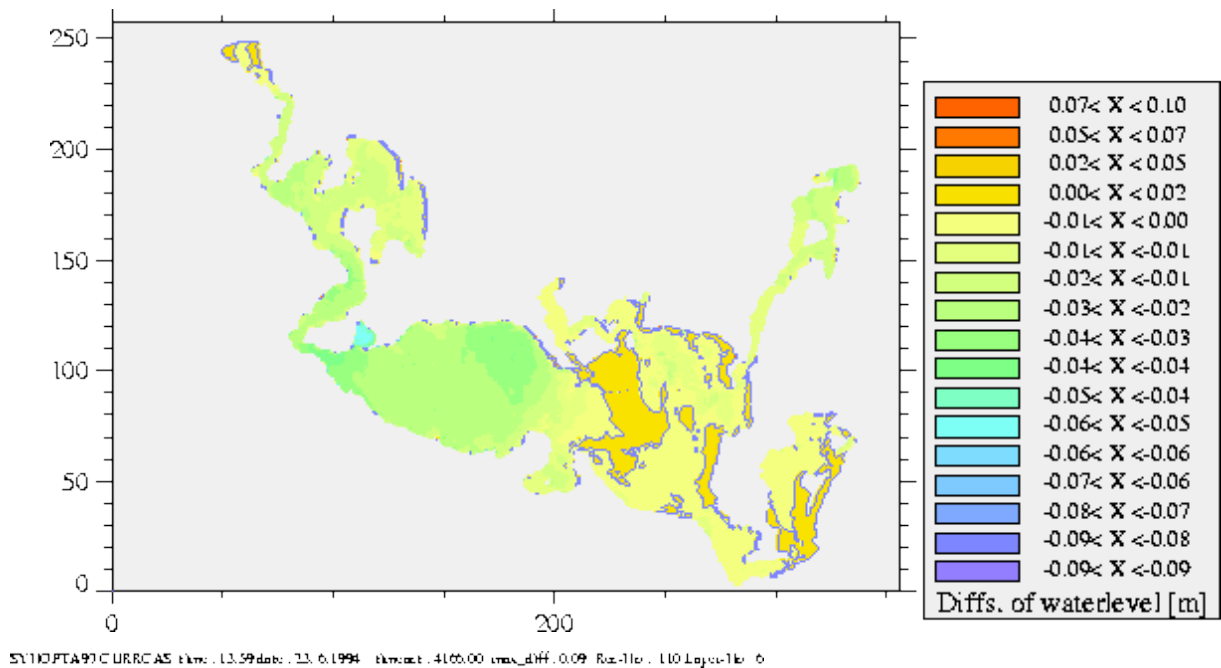
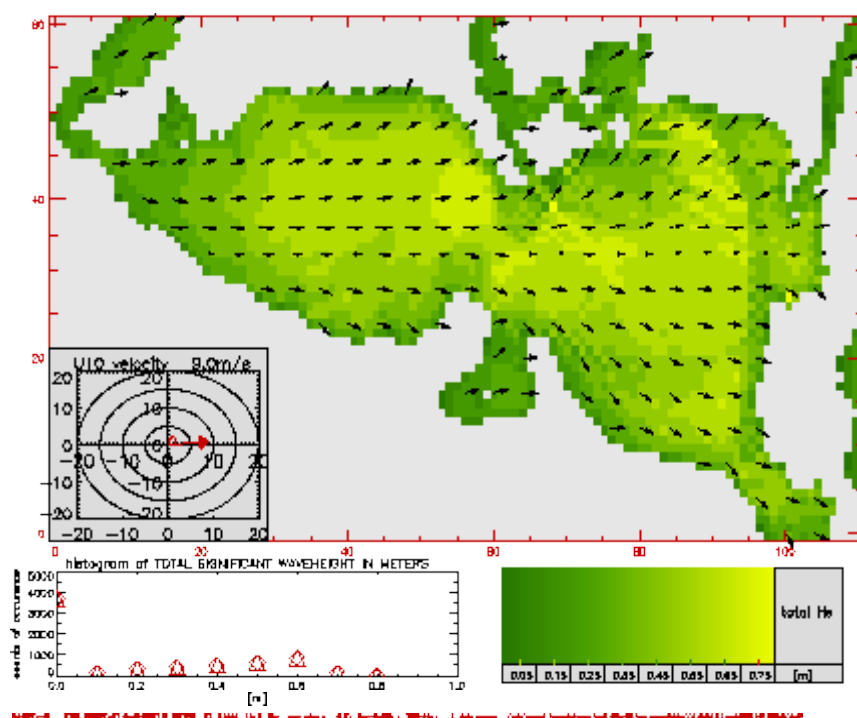


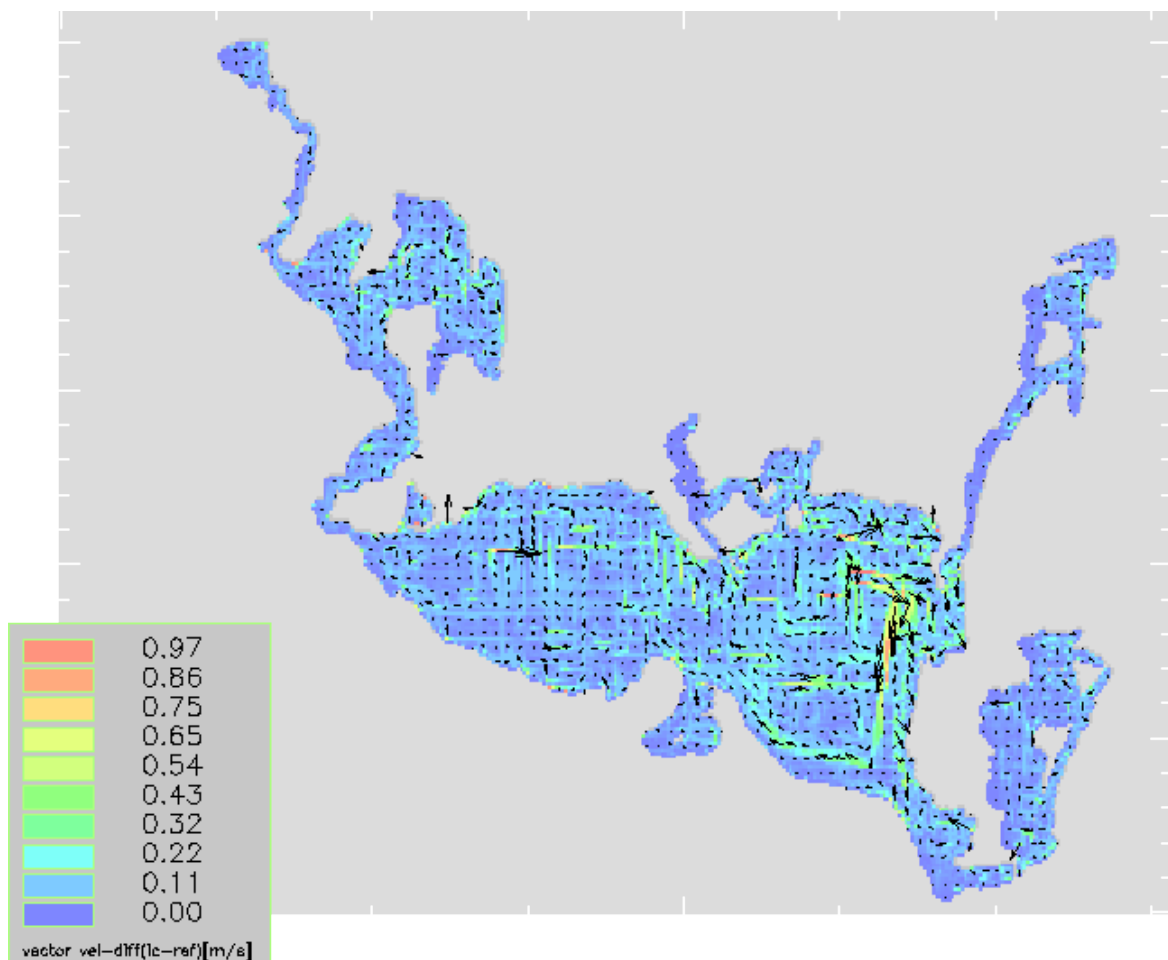
Figure 25: Signifikante Wellenhöhe  $H_s$  im Oderhaff am 23.06.1994 - 14:00 Uhr - gekoppelter Modellauf mit Berücksichtigung des aktuell simulierten Wasserstandes.



Die gefundene bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Modellergebnissen für den Fall des gekoppelten Modellaufes zeigt an, daß die gekoppelte Modellierung zu einem besseren Verständnis der im Haff ablaufenden hydrodynamischen Prozesse beitragen kann und kleinskalige Variationen der Messreihen teilweise auf Kopplungseffekte zurückgeführt werden können.

Während die Auswirkungen der Kopplungseffekte auf die Wasserstandsauslenkungen relativ gering trotzdem aber noch meßtechnisch erfaßbar sind, zeigen sich im Strömungsbild deutlichere Auswirkungen der Kopplungseffekte. Zum einen treten dabei durch Stokes Drift bedingte Rezirkulationen auf, zum anderen kommt es zu einer Veränderung des Strömungsfeldes in Bereichen in denen das Seegangsfeld stärkerer Dissipation unterliegt und Divergenzen im Impulsflußdichtevektor des Seegangsfeldes auftreten - d.h. in der ufernahen Zone - wo auf relativ kleinen Raum die Energie des Seegangsfeldes dissipiert wird. In Abbildung 26 ist ein Plot der Differenzen der Geschwindigkeitvektoren zwischen gekoppelten und ungekoppelten Modellauf von TRIM3D für den 23.06.1994 14:00 Uhr dargestellt, der diese Effekte erkennbar macht.

Figure 26: Plot der Vektordifferenzen zwischen gekoppelten und ungekoppelten Modellauf von TRIM3D am 23.06.1994 14:00 Uhr. Die Berücksichtigung der Kopplungsterme (radiation-stress Terme, Stokes Drift) in der Simulation des Strömungsfeldes führt zur Ausbildung einer südwärts gerichteten Strömungskomponente im Bereich des Überganges des Seegangsfeldes von den tieferen Bereichen des Großen Haffs in den Flachwasserbereich (Mündungsbereich der Dziwna, s.d.a. Abb.25). Darüberhinaus bilden sich im Südteil des Großen Haffes Ausgleichsströmungen aus, die zu einem lokal veränderten Zirkulationsmuster führen.



Im Bereich der Zatoka Skoszewska (Paulsdorfer Bucht) und der Mielizna Pomorska (Pommersche Schar - Einmündung der Dziwna ins Große Haff) bewirken die Kopplungseffekte zwischen Seegang und Strömung eine Veränderung des Strömungsregimes. Es kommt zur Ausbildung einer zusätzlichen südwärts gerichteten Strömungskomponente die einmal entlang des Überganges vom tiefen Wasser in flachere Gebiete aber auch direkt im Flachwasserbereich auftritt. Dies sind auch die Bereiche in denen aufgrund starker Dissipationsverluste des Wellenfeldes die größten Gradienten der signifikanten Wellenhöhe auftreten (s. Abb. 25).

## Modellierung des Schwebstofftransportes

Die Sedimentverteilung im Oderhaff ist inhomogen mit Sedimentcharakteristika (Korngrößenensemble, chemische Zusammensetzung) die über weite Bereiche variieren. Schlicke and sandige Schlicke mit einem hohen Gehalt an organischen Bestandteilen (14%-35%) bedecken etwa 60 % des Bodens. Die Sedimente im westlichen Teil des Haffs - dem Kleinen Haff sind etwas gröber als die des östlichen Teils. Die feinen Sedimente (Schlicke, sandige Schlicke) sind hauptsächlich in den zentralen Teilen des Haffs zu finden, während die Sände meistens nahe der Uferlinie auftreten. Die Sedimentverteilung ist in Abbildung 27 zu sehen. Eine detaillierte Beschreibung kann bei (OSADCZUK et.al., 1996) und (LAMPE & MEYER, 1995) gefunden werden. Aus Feldexperimenten und Labormessungen wurde die Sinkgeschwindigkeit des Sediments im Gebiet mit  $U_d=0.001..0.05$  cm/s bestimmt. Im SPM-Modell Q3DSSD wurde ein Wert von  $U_d=0.025$  cm/s verwendet. Die kritischen Schubspannungen des Sediments  $\tau_{crit}$  wurden in Labormessungen bestimmt und variieren zwischen  $0.1..0.15$  N/m<sup>2</sup> (BURKHARDT & WITTE, 1998).

Figure 27: Sedimentverteilung im Oderhaff nach (OSADCZUK et.al., 1996), (LAMPE & MEYER, 1995)

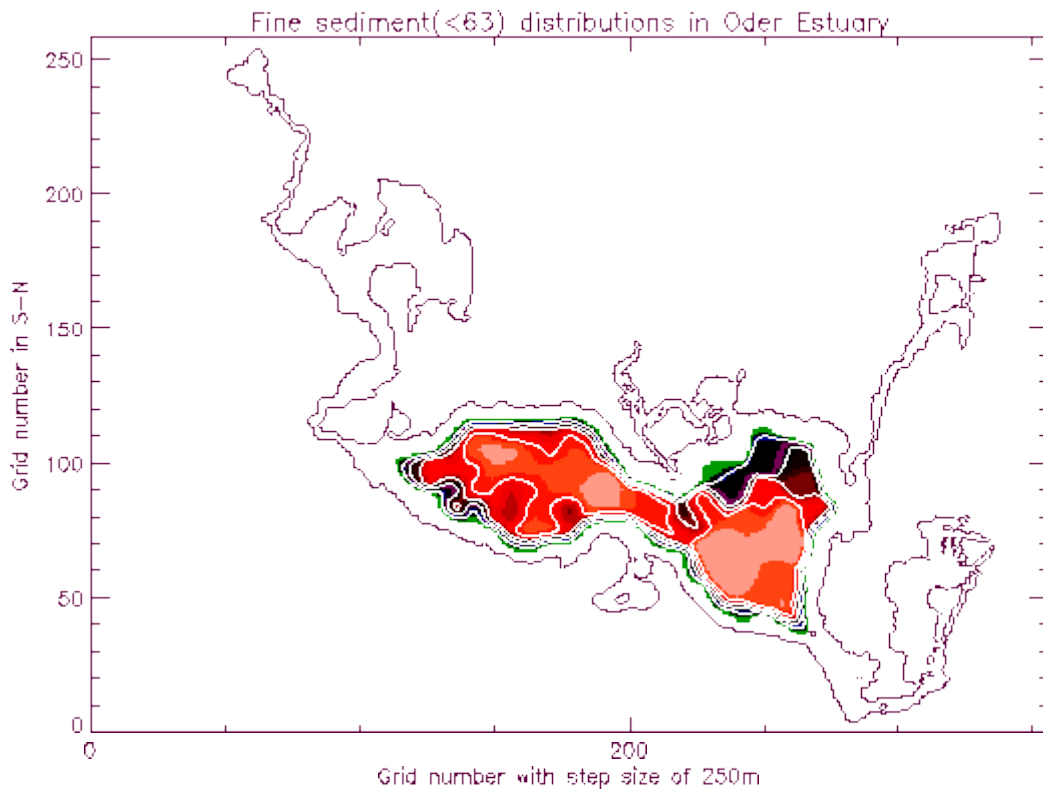
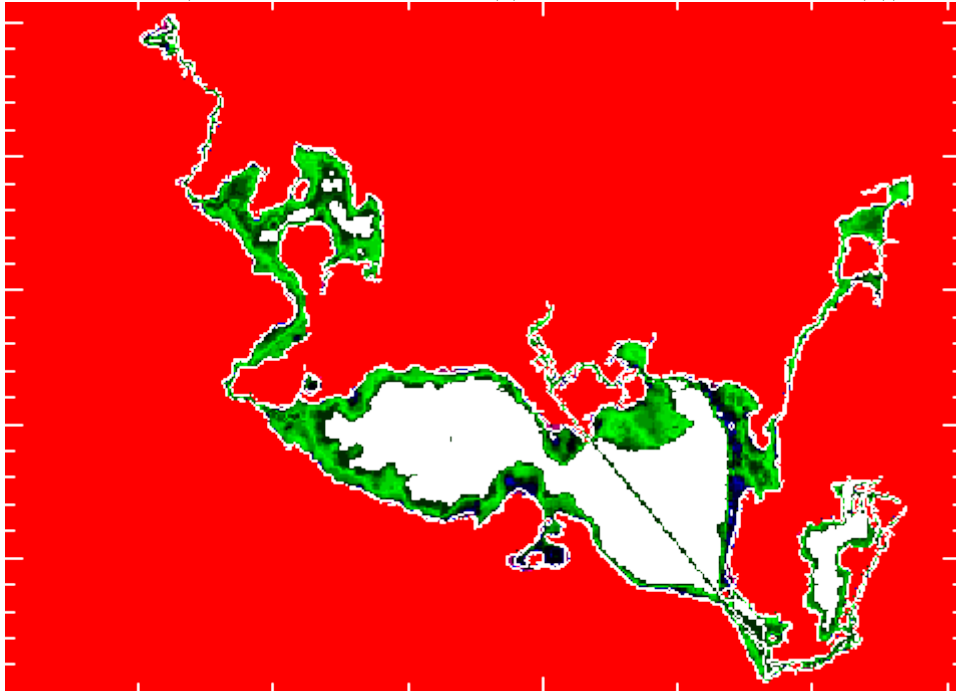
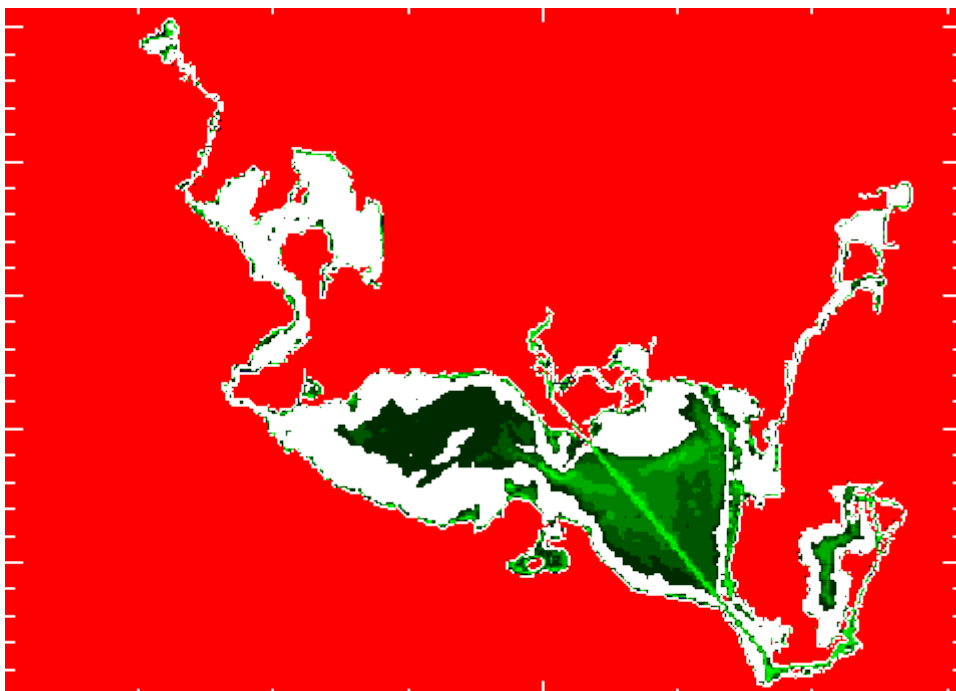




Figure 28: Konzentration des mobilisierten Sediments im Wasserkörper (suspended sediment concentration - SSC). Responcesimulationen ohne Strömungseinfluß für homogene Wellenfelder (Schwachwindsituation (a), moderate Windsituation (b)).



(a)  $H_s=0.2$  m,  $T_p=3.0$  s

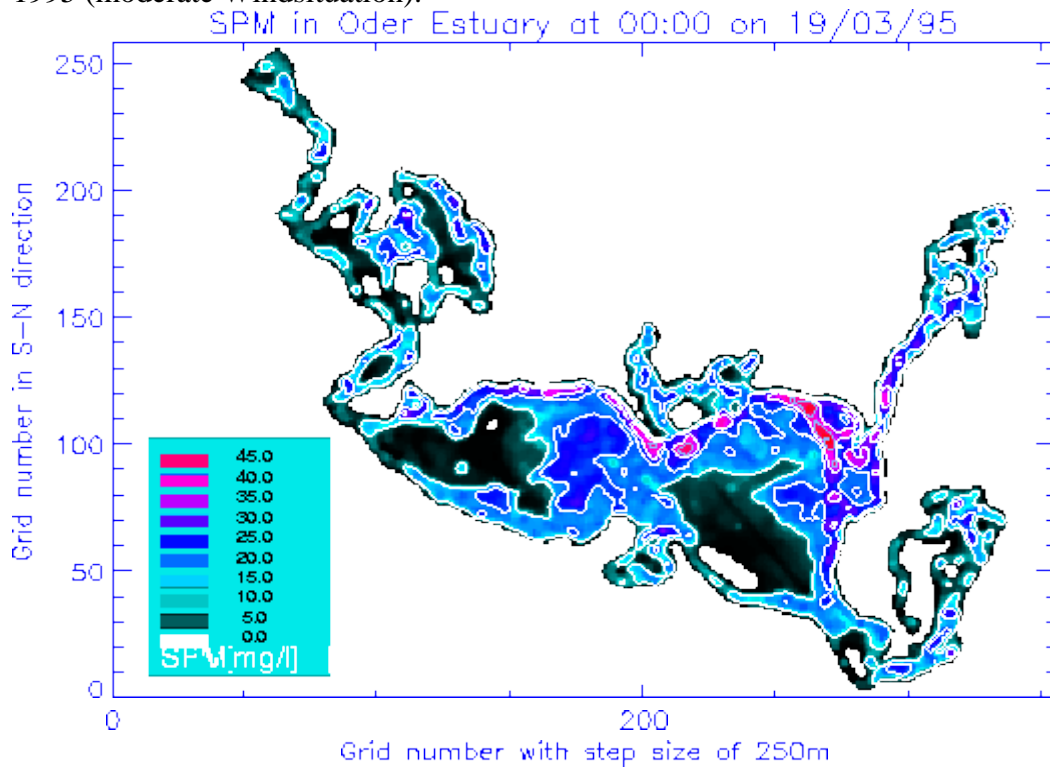


(b)  $H_s=0.6$  m,  $T_p=4.0$  s

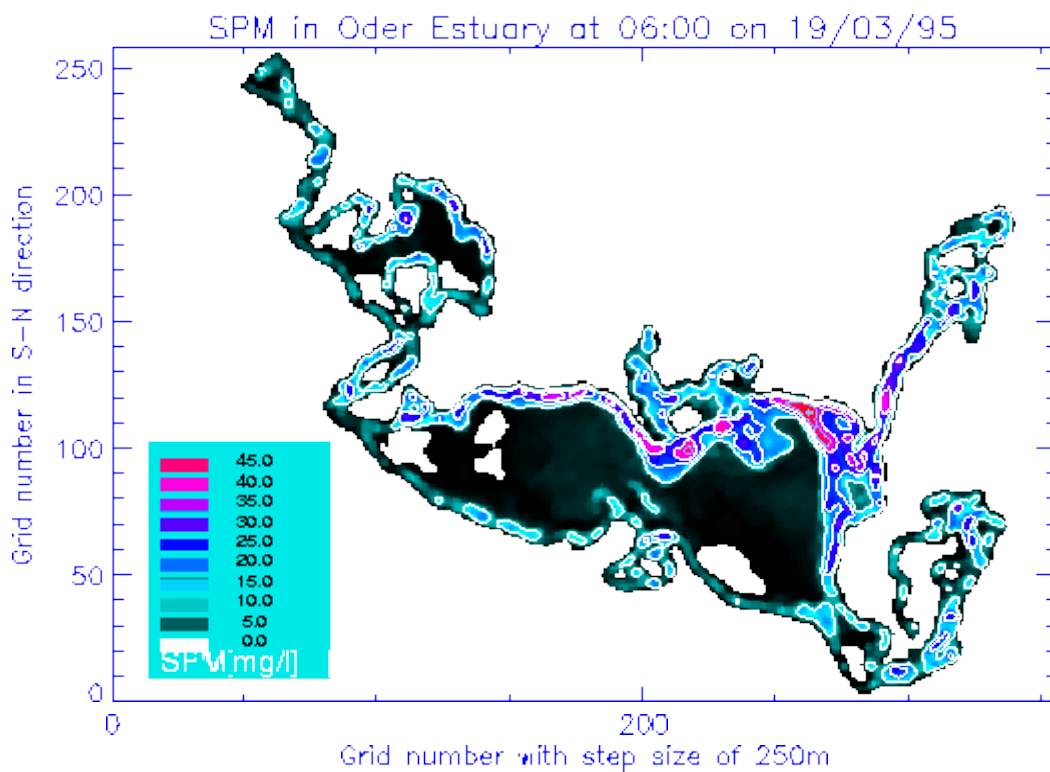
## Sensitivitätsstudie - SSC-Verteilung für homogene Wellenfelder

In einer ersten Anwendung des Modells wurde die Konzentration des mobilisierten Sediments im Wasserkörper (suspended sediment concentration - SSC) für den Idealfall eines homogenen Wellenfeldes ohne Berücksichtigung von Strömungen simuliert. Eine tiefengemittelte Konzentration von  $SSC_{bg}=40$  mg/l wurde für das gesamte Gebiet als Anfangsbedingung gewählt. Abbildung 28-a zeigt die Sedimentkonzentration für eine Schwachwindsituation bei Annahme einer signifikanten Wellenhöhe  $H_s=0.2$  m und einer Peakperiode  $T_p=3.0$  s. Das Resultat zeigt, daß für dieses idealisierte Wellenfeld (entsprechend eine Schwachwindsituation) die welleninduzierten Bodenschubspannungen nicht die kritischen Schubspannungen übersteigen und die Sedimentpartikel aus dem Wasserkörper ausfallen. Das führt zu geringeren SSC-Werten und einem optisch klareren Wasserkörper. Die Simulation zeigt auch, daß dieser Ausfallprozess hauptsächlich im Ostteil des Haffs stattfindet. Im Gegensatz dazu zeigt das Modell bei Annahme einer uniform im gesamten Gebiet gegebenen signifikanten Wellenhöhe  $H_s=0.6$  m und einer Peakperiode  $T_p=4.0$  s (moderate Windbedingungen, Abb.28-b) die Mobilisierung von Sediment aus der Bodenschicht in den Wasserkörper hinein. Im östlichen Teil sind dabei die SSC-Werte etwas höher als die Initialisierungs-Background-Werte ( $SSC_{bg}=40$  mg/l) mit denen das Modell gestartet wurde. Substantiell höhere Mobilisierung von Sediment wird im westlichen Teil der Lagune - im Kleinen Haff - gefunden.

Figure 29: Nachhersage der SSC-Verteilung für reale Szenarien. Konzentration des mobilisierten Sediments im Wasserkörper (suspended sediment concentration - SSC) im März 1995 (moderate Windsituation).

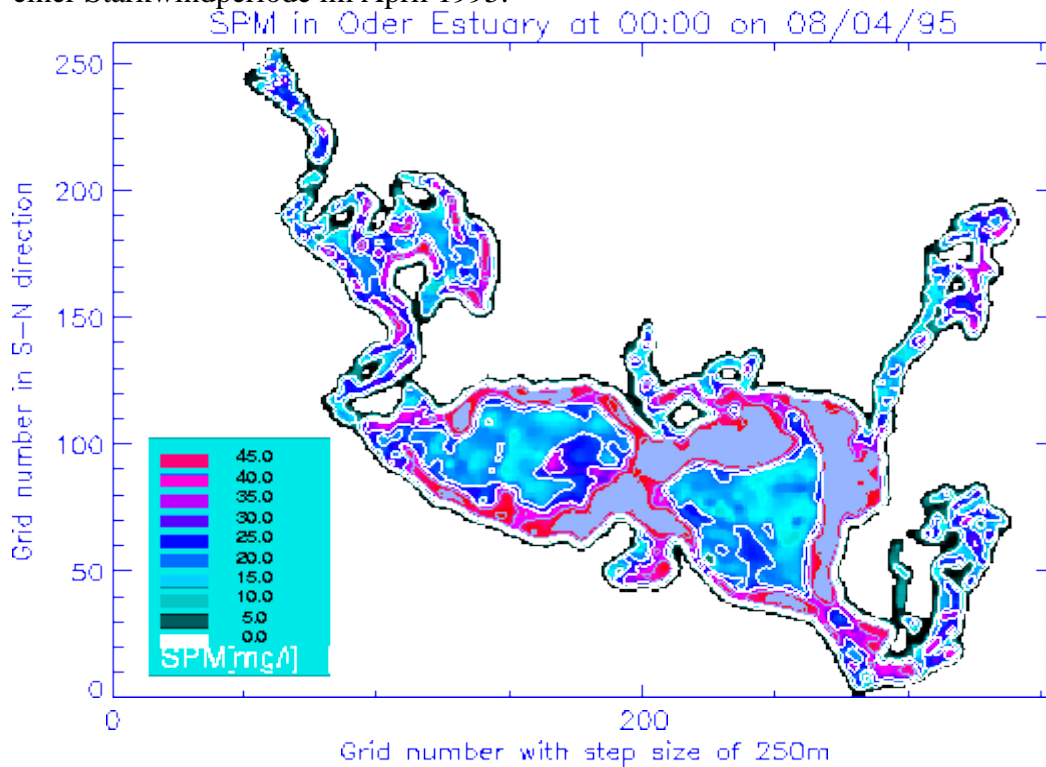


(i) SSC-Verteilung am 19.3.1995 (0:00 Uhr (SSW-Wind,  $U_{10} \approx 5$  m/s)

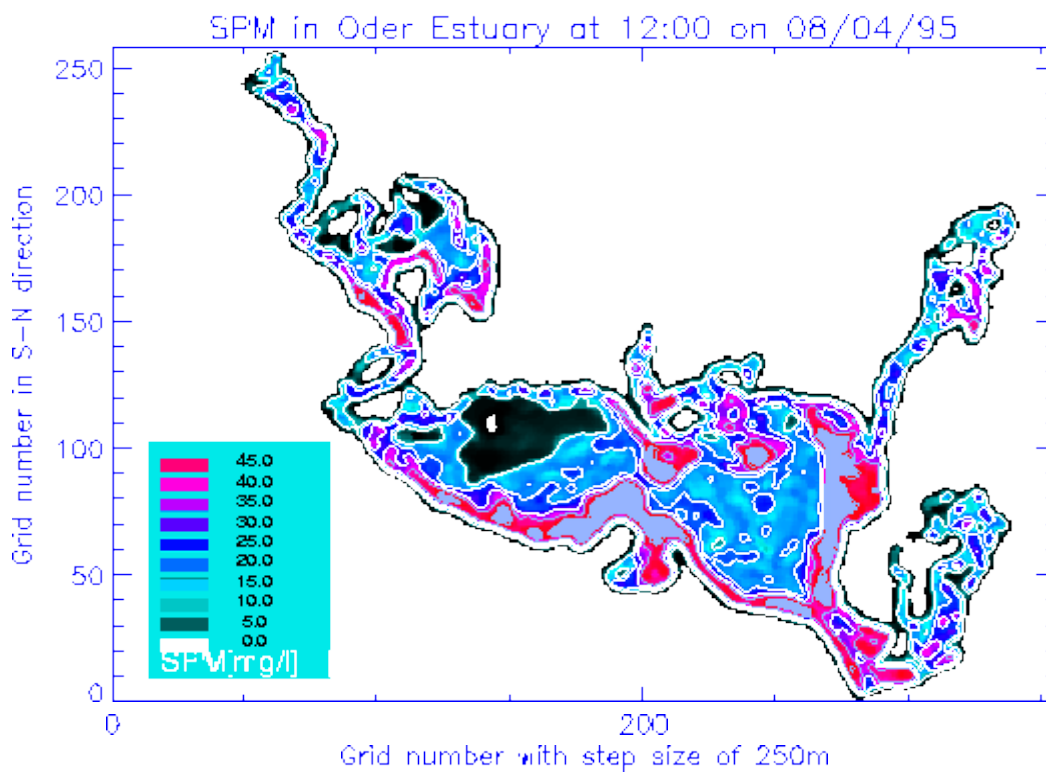


(j) SSC-Verteilung am 19.3.1995 6:00 Uhr (SW-Wind,  $U_{10} \approx 5$  m/s)

Figure 30: Nachhersage der SSC-Verteilung für ein Starkwindereignis. Konzentration des mobilisierten Sediments im Wasserkörper (suspended sediment concentration - SSC) während einer Starkwindperiode im April 1995.



(j) SSC-Verteilung am 8.4.1995 0:00 Uhr (WNW-Wind,  $U_{10} \approx 10$  m/s)



(k) SSC-Verteilung am 8.4.1995 12:00 Uhr (NW-Wind,  $U_{10} \approx 14$  m/s)

## **Nachhersage von SSC Ereignissen für reale Stürme**

Das gekoppelte Modellsystem wurde betrieben, um die SSC-Verteilung im Oderhaff für drei reale Testfälle zu simulieren. Es wurden drei Sturmperioden in den Jahren 1994, 1995 und 1996 gerechnet und die Simulationsergebnisse mit Meßdaten verglichen. In den Simulationen des SSC-Modells wurden die Strömungsfelder von TRIM3D und die flächenhafte Seegangsinformation von HYPAS als Basisinformationen für die SSC-Modellierung verwendet.

Zwei Abbildungen zeigen die tiefengemittelte SSC-Verteilung im Haff während einer moderaten Windsituation im März 1995 (Abb.29) bzw. während eines Starkwindereignisses im April 1995 (Abb.30). In Abb.29 ist eine Verringerung der SPM-Konzentrationen in der Wassersäule zu beobachten, die auf das Ausfallen und Ablagern von suspendiertem Material zurückzuführen ist. Deutlich sichtbar ist für beide Wettersituationen die Differenzierung der SPM-Gehalte innerhalb des Oderhaffs, die stark mit den Tiefenstufen des Gewässers gekoppelt ist.

## Ergebnisse - Zusammenfassung

1.) Das lokale Windfeld des Oderhaffs zeigt aufgrund der Wechselwirkung des synoptischen Windfeldes mit den im Gebiet auftretenden meteorologischen Effekten einen hohen Grad an räumlicher Variabilität. Diese räumliche Variabilität und auch die in kurzen Zeitskalen stattfindenden Veränderungen des lokalen Windfeldes üben Einfluß auf die Hydrodynamik des Gewässers aus. Speziell die Entwicklung des lokalen Seegangsfeldes wird dabei durch diese Variabilität stark beeinflusst. Da die genaue Kenntnis des Seegangsfeldes Voraussetzung für nachgeschaltete Modellierungen von SPM-Transportprozessen ist, stellt die adäquate Bestimmung des Windfeldes einen Schwerpunkt der Arbeiten dar.

Da die auf relativ grobskaligen numerischen Gitter arbeitenden Standard-Modelle (DWD-Europamodell  $\Delta x=50$  km, DWD-Deutschlandmodell  $\Delta x=15$  km) das lokale Windfeld nicht in ausreichender Auflösung zur Verfügung stellen können (Archivierungsintervalle  $\Delta t_{\text{sampling}}=6$  h) wurde das mesoskalige Atmosphärenmodell GESIMA im Gebiet implementiert. Ein einfaches "nested-grid"-Schema bei dem GESIMA mit Randwerten des DWD-Europamodells getrieben wurde, konnte die gemessenen Windwerte in Phasen hoher Windgeschwindigkeit wiedergeben, ergab aber für Schwachwindperioden eine nur ungenügende Übereinstimmung mit den Meßwerten und zeigte speziell für die Windrichtung Abweichungen. Ein verbessertes "nesting-grid"-Schema unter Berücksichtigung weiterer Informationen des DWD-Europamodells (Luftfeuchtigkeit, Temperaturprofile) und Einbeziehung von zusätzlichen GESIMA-Modulen (instationärer Lauf) kann hier zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen.

Mittels zweier Dateninterpolationsmethoden (GESIMA-Atlas-I/GESIMA-Atlas-II), bei denen anhand eines mit GESIMA berechneten Satzes von Windfeldern die zeitliche Entwicklung des lokalen Windfeldes rekonstruiert wird, konnte die im Gebiet anzutreffende hohe raumzeitliche Variabilität des Windfeldes aufgelöst und simuliert werden. Sowohl Windrichtung als auch -geschwindigkeit zeigen in der Validation mit Meßwerten gute Übereinstimmung für Perioden hoher Windgeschwindigkeiten als auch in Schwachwindsituationen. Die Dateninterpolationsmethode gestattet die Rekonstruktion des lokalen Windfeldes mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung über längere Zeiträume hinweg.

2.) Mit HYPAS - einem hybriden 2-dimensionalen Seegangmodell - wurden Simulationen des lokalen Seegangsfeldes vorgenommen, wobei mit unterschiedlichen Techniken simulierte Windfelder als Antrieb verwendet wurden. Die von HYPAS berechneten integrierten Wellenparameter wurden anhand von Bojenmessungen im Kleinen Haff validiert.

Die zum Antrieb von HYPAS verwendeten Windfelder (DWD-Europamodell, "nested-grid"-Lauf von GESIMA, Dateninterpolationstechniken: GESIMA-Atlas-I/GESIMA-Atlas-II) haben sehr unterschiedliche Validierungsergebnisse des Seegangmodells zur Folge. Während Simulationen bei denen die Windfelder des "nested-grid"-Läufe verwendet wurden nur zum Sturmhöhepunkt einer Nachhersageperiode die gemessenen integrierten Wellenparameter reproduzieren konnten, zeigen die Validierungsergebnisse des Seegangmodells bei Verwendung der Dateninterpolationswindfelder ein qualitativ anderes Verhalten. Für diese Windfelder (GESIMA-Atlas-I/GESIMA-Atlas-II) wird die zeitliche Variabilität der integrierten Parameter des Wellenfeldes in der Schwachwind- wie auch während der eigentlichen Sturmperiode reproduziert.

Durch die Berücksichtigung der vom hydrodynamischen Modell TRIM3D ausgegebenen flächenhaften Wasserstandsinformation kann in HYPAS die aktuelle Wassertiefe bei der Simulation des Seegangsfeldes berücksichtigt werden. Selbst die im Oderhaff relativ kleinen Wasserstandsänderungen im Dezimeterbereich können dabei in Flachwasserbereichen, speziell vor den die Ausbreitung des Wellenfeldes begrenzenden Lee-Küsten, zu Änderungen

der signifikanten Wellenhöhe führen, die sich im Bereich von wenigen dm bewegen. Die auf die Küste zulaufenden Wellen erreichen bei aktuell höheren Wasserstand mit größeren Wellenhöhen den Uferbereich.

3.) Das hydrodynamische Modell TRIM3D wurde extensiv getestet und eine Parameteranpassung vorgenommen. Vergleiche zweier Einsteuerungsvarianten des Oderzustromes - i.) unter Vorgabe der Wasserstandsinformationen (implizite Steuerung) und ii.) der Vorgabe des Oberwassers der Oder (explizite Steuerung) - erbrachten ähnliche Ergebnisse bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten die im Haff erreicht werden. Die inneren Haffpegel werden dabei mit der impliziten Steuerungsvariante besser approximiert. Die mit der Ostsee realisierten Austauschprozesse über die drei Ströme - Peenestrom, Swina und Dziwna - sind bei beiden Modellvarianten ähnlich. Unterschiede können sich in kleinen zeitlichen Skalen aufgrund der voneinander abweichenden Pegelstände im Haff selber ergeben. Diese können instantan auftretende Unterschiede im Ausstromverhalten bedingen.

4.) In TRIM3D wird der Einfluß der Seeganges auf das Strömungsregime durch die Berechnung der radiation-stress-Terme und einen zusätzlichen Term in der Massenbilanzgleichung berücksichtigt. Gekoppelte Modellierungen zeigen welleninduzierte Wasserstandsvariationen und den Einfluß der welleninduzierten Terme auf das Strömungsregime. In Gebieten hoher Dissipationsraten der Seegangenergie kommt es zu einem zusätzlichen Impulseintrag durch das Seegangsfeld der zu lokal veränderten Zirkulationsbedingungen führt. Der Einfluß der Kopplungsterme auf die Modellierung des Wasseraustausches mit der Ostsee ist gering, da sich die betrachteten Pegelvariationen während eines Sturmereignisses im Bereich weniger Zentimeter bewegen und die veränderten Zirkulationsmuster vorwiegend lokal zur Ausbildung kommen ("coastal jet").

5.) Die Modellläufe mit dem SSC-Modell stimmen gut mit den bekannten Daten und Ergebnissen aus Feldkampagnen überein. Weitere Modellkalibrationen anhand von gesicherten Felddaten erscheinen jedoch auch weiterhin notwendig, um quantitative Aussagen zu ermöglichen. Ein dabei auftretendes Problem ist die Qualität der Felddaten, die durch Umgebungseinflüsse häufig gestört sind ("biofouling").

Mit den vorliegenden Modellsystem ist es möglich, die raum-zeitliche Variabilität der interessierenden Größen - Windfeld, Seegang, Strömung, Wasserstand - in einem mesoskaligen Gewässer adäquat zu simulieren. Wesentliche Kopplungseffekte zwischen Seegangs- und Strömungsfeld werden berücksichtigt. Es können Szenarien für nachgeschaltene Transport- und Wassergüteberechnungen bereitgestellt werden.

## Literatur

- BURKHARD, K. & G. WITTE (1998): Erosions- und Sedimentationsverhalten der Sedimente im Oderästuar. 5. Wissenschaftlicher Workshop "Ökosystem Boddengeässer - Partikel und Aggregate", Hiddensee September 1997, Bodden 1998 in review
- CASULLI, V. & E. CATTANI (1994): Stability, Accuracy and Efficiency of a Semi-Implicit Method for Three-Dimensional Shallow Water Flow, *Computers Math. Applic.*, Vol. 27, No. 4, pp. 99-112, 1994.
- DOLATA, L., F. & W. ROSENTHAL (1983): Wave Setup and Wave-Induced Currents in the Coastal Zone, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 89, NO. C2, 1973-1982, 1983.
- GÜNTHER, H. & W. ROSENTHAL (1983): A Shallow Water Surface Wave Model Bases on the Texel-Marsen-Arsole (TMA) wave spectrum, *Proc. of the 20th Congress of International Association of Hydraulic Research (IAHR)*, Moscow, 1983.
- KAPITZA, H. & D.P. EPPEL (1992):, The Non-Hydrostatic Mesoscale Model GESIMA. Part I: Dynamical Equations and Tests, *Beitr. Phys. Atmosph.*, Vol. 65, No. 2, pp. 126-146, May 1992.
- LOU, J. (1995): Modelling of hydrodynamics and suspended sediment transport in coastal areas (Ph.D thesis), James Cook University, Australia, 243pp.
- LOU, J. & P. RIDD (1997): Modeling of suspended sediment transport in coastal areas under waves and current. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45, 1-16.
- OSADCZUK, A., LAMPE, R., MEYER, H., & SOBIERAJ, D. (1996): Characteristics of recent sediments from Szczecin Bay, *Hydrotechnical transactions, Polish academy of sciences, Institute of hydro-engineering, Gdansk*, pp.119-128,