

# Jüngste Fortschritte bei der Seegangmodellierung für die Nordsee und die Deutsche Bucht

*Joanna Staneva, Arno Bebreus und Nikolaus Groll*

## Zusammenfassung

Die Modellierung der Wellen an der Meeresoberfläche ist durch beeindruckende Entwicklungen gekennzeichnet, sowohl vom theoretischen Aspekt her als auch in der Qualität der Resultate, die für die Nutzer zur Verfügung stehen. Der neueste Stand der Technik in der Entwicklung des spektralen Wellenmodells dritter Generation WAM, für Anwendungen in der Vorhersage der operationellen Dienste, für Hindcasts und für Bewertungen des Wellenklimas für die Nordsee und die Deutsche Bucht, wird hier vorgestellt. Die Wellen an der Meeresoberfläche kontrollieren den Austausch von Energie, Impuls, Wärme, Feuchte, Gas usw. zwischen dem Ozean und der Atmosphäre des Erdsystems. Der Einfluss der Wellen auf Strömungen und Wasserstand ist nachgewiesen. Daher sind erste Schritte in Richtung auf ein vollständig gekoppeltes Atmosphären-Wellen-Ozean-Modell unternommen worden. Die Synergie zwischen Wellen-Beobachtungen und Ergebnissen numerischer Modelle für die Nordsee und die Deutsche Bucht ist angestiegen im Zuge der Verbesserungen in der Abschätzung des Zustandes des Ozeans, der Vorhersagen in Küstengewässern und in der Gewinnung von aktuellen Informationen, Produkten und Kenntnissen. Berechnungen zu Rekonstruktionen des Meereszustandes und von Klimaszenarien mit dem WAM Modell haben zu einem großen Interesse geführt, die erzeugten Daten in industriellen Anwendungen zu nutzen.

## Schlagwörter

Wellenmodellierung, Vorhersagen im Küstenbereich, Wellenklima-Rekonstruktionen, Wellenklima-Szenarien, Wellen-Zirkulation-Wechselwirkung, Nordsee, Deutsche Bucht

## Summary

*The ocean wave modelling has shown impressive developments, both on the theoretical aspects as in the quality of the results available to users. The state-of-the-art development of the WAM wave model for forecasts applications at operational services and for hindcasts and climate assessments for the North Sea and the German Bight is presented here. The ocean waves control the exchange of energy, momentum, heat, moisture, gas, etc. between the ocean and the atmosphere in the earth system. The impact of waves on currents and water levels in coastal areas is demonstrated. Therefore first steps towards a fully coupled atmosphere-wave-ocean model have been carried out. The synergy between wave observations and models for the North Sea and German Bight is increased on the road to improving the ocean state estimate and predictions in the coastal areas and generating up-to-date information, products and knowledge. Sea state reconstructions and climate scenarios computations with the WAM model have created a huge interest to use the data in industrial applications.*

## Keywords

*wave modelling, coastal ocean forecasting, wave climate reconstructions, wave climate scenarios, wave-circulation interaction, North Sea, German Bight*

## Inhalt

1	Einleitung .....	252
2	WAM-Modellbeschreibung .....	253
3	Kurzfristiges präoperationelles Seegangmodell für die Nordsee und die Deutsche Bucht .....	254
4	Multidekadische regionale Seegangssimulationen .....	264
5	Wechselwirkungen zwischen Seegang und Strömung .....	269
6	Schlussfolgerungen .....	270
7	Schriftenverzeichnis .....	271

## 1 Einleitung

Die Seegangsmodellierung ist in den letzten Jahrzehnten durch beeindruckende Entwicklungen gekennzeichnet, sowohl hinsichtlich der Theorie als auch in der Qualität der Resultate, die für die Nutzer zur Verfügung stehen. Der neueste Stand der Technik in der Entwicklung des spektralen Seegangmodells WAM für Anwendungen in der Vorhersage der operationellen Dienste, für Hindcasts und für Bewertungen des Wellenklimas wird hier unter besonderer Berücksichtigung jüngst erreichter Fortschritte in Entwicklung und Anwendung von Seegangsmo­dellen am Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) für die Nordsee und die Deutsche Bucht vorgestellt.

Im vergangenen Jahrzehnt waren die nordeuropäischen Küsten von schweren Stürmen betroffen, die in den Küstengebieten der Nordsee schwere Schäden anrichteten. Eine dringende Nachfrage nach Seegangsinformationen in küstennahen Gebieten mit hoher räumlicher Auflösung besteht zusätzlich aufgrund menschlicher Aktivitäten, wie etwa Offshore-Windparks (BERGENHAGEN et al 2010; BSH 2010), Offshore-Ölförderung und küstennahe Freizeitaktivitäten. Die Vorhersage von Extremereignissen wie Sturmfluten und durch Unwetter verursachte Überschwemmungen sind von großer Bedeutung für die Sicherung menschlichen Lebens und von Sachwerten auf See, um Verluste und Schäden zu verhindern oder zumindest zu begrenzen. Es werden deshalb zuverlässige Seegangsvorhersagen und langfristige Statistiken zu Seegangs-Extremereignissen für die Küstengebiete benötigt, wo verschiedene menschliche Aktivitäten betrieben werden, beispielsweise Küstenschutz und Gefahrenabwehr, Hafenbetrieb, Offshore-Windenergieerzeugung, Such- und Rettungsaktivitäten etc.

Für die Regionen Nordsee und Deutsche Bucht können Seegangsbedingungen der Vergangenheit und Zukunft nicht vollständig durch die alleinige Analyse von Beobachtungsdaten bewertet werden, da solche Daten, wie hinlänglich bekannt, sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Ausprägung nur sehr begrenzt verfügbar sind. Hinzu kommt, dass Statistiken zu langfristigen Veränderungen der Seegangs-Extrembedingungen lange

und homogene Datenzeitreihen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erfordern, die auf Grundlage der verfügbaren Beobachtungsaufzeichnungen nicht vorhanden sind (WEISSE und GÜNTHER 2007). Numerische Seegangssysteme sind zu dem am meisten angewendeten Tool für die Generierung qualitativ hochwertiger Vorhersagen und langfristiger Hindcast-Seegangsdaten geworden, mit denen Trends und Leistungsfähigkeit im Hinblick auf Extremereignisse analysiert werden können (WEISSE und GÜNTHER 2007; GÜNTHER et al. 1998; WASA-Group 1998; GROLL et al. 2014). Der Klimawandel kann die multidekadischen Seegangsbedingungen in der Nordsee beeinflussen und könnte so zu einer Intensivierung von Seegangsextremen in der Zukunft führen und damit verbunden zu einem erhöhten Risiko in den Küstengebieten. Untersuchungen zu potentiellen Veränderungen des Wellenklimas in der Nordsee in unterschiedlichen Klimaszenarien finden sich bei GROLL et al. 2014, GRABEMANN und WEISSE (2008), DOBERNARD und ROED (2008). Hoch aufgelöste kleinmaßstäbliche Versionen des WAM wurden von LUO und SCLAVO (2007) und MONBALIU et al. (2007) vorgelegt. MOGHIMI et al (2005) wendeten das WAM und das K-Modell auf die Nordsee und die Deutsche Bucht an, um die Eignung der Modelle zur genauen Vorhersage küstennaher Seegangsbedingungen zu untersuchen. BEHRENS und GÜNTHER (2009) bewerteten die Fähigkeit des Wellenmodells, Extremereignisse wie schwere Winterstürme für die Nord- und Ostsee vorherzusagen.

Der Seegang steuert den Austausch von Energie, Impuls, Wärme, Feuchte, Gas usw. zwischen dem Ozean und der Atmosphäre des Erdsystems. Das Verständnis dieser Prozesse ist von größter Bedeutung für vollständig integrierte Atmosphären-Wellen-Ozean-Modelle und ihre weitere Kopplung mit biologischen, morphologischen und hydrographischen Systemen. In diesem Thema zeigt sich das wachsende Interesse an der operativen Ozeanographie zum Zwecke der Reduzierung von Vorhersagefehlern bei Zustandsschätzungen in Küstenmaßstäben. Die Unsicherheiten in den meisten gegenwärtig eingesetzten Modellen resultieren aus der nichtlinearen Rückkopplung zwischen ausgeprägten Tideströmungen und Windsee, die nicht länger vernachlässigt werden kann, insbesondere im Küstengebiet, wo sie eine vorherrschende Rolle einzunehmen scheint. Beim HZG kommt ein eingebettetes Modellsystem zum Einsatz, das zuverlässige Nowcast- und Kurzfristvorhersagen für Ozeanzustandsvariablen produziert, einschließlich Windsee und Hydrodynamik. Analysen von Beobachtungen und Ergebnisse numerischer Simulationen finden sich in STANEV et al. (2011).

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 liefert eine Beschreibung des WAM. Kapitel 3 beschreibt das kurzfristige prä-operationelle Seegangmodell für die Nordsee und die Deutsche Bucht. Ergebnisse aus den multidekadischen regionalen Seegangssimulationen werden in Kapitel 4 vorgestellt. Kapitel 5 behandelt Wechselwirkungen zwischen Seegang und Strömung, anschließend werden Schlussfolgerungen aufgezeigt.

## 2 WAM-Modellbeschreibung

Das Modell WAM ist ein Wellenmodell der dritten Generation, das die Wellenenergiebilanzgleichung explizit ohne Vorgabe einer Annahme über die Form des Wellenspektrums löst. Es repräsentiert die Physik der Wellenentstehung entsprechend unserem gegenwärtigen Wissensstand für die gesamte Menge an Freiheitsgraden eines zweidimensionalen

Wellenspektrums. Das WAM-Modell berechnet das zweidimensionale Wellenspektrum durch Integration der Energiebilanzgleichung in Kugelkoordinaten:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\cos \phi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \cos \phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} F) + \sigma \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \dot{\sigma} \frac{F}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} F) = S \quad (1)$$

mit

$F(\lambda, \phi, \sigma, \theta, t)$  spektrale Energiedichte

$(\lambda, \phi)$  Längen, Breiten

$(\sigma, \theta)$  intrinsische Frequenz, Wellenrichtung

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= (c_g \cos \theta + u_{North}) / R \\ \dot{\lambda} &= (c_g \sin \theta + u_{East}) / (R \cos \phi) \\ \dot{\theta} &= c_g \sin \theta \tan \phi / R + \dot{\theta}_D + \dot{\theta}_C \\ \dot{\sigma} &= \dot{\sigma}_C \end{aligned} \quad (2)$$

Die Quellfunktionen auf der rechten Seite der Energiebilanzgleichung umfassen Beiträge aus Windinput ( $S_{in}$ ), nichtlinearer Wechselwirkung ( $S_{nl}$ ), Dissipation ( $S_{dis}$ ), Bodenreibung ( $S_{bf}$ ) und Wellenbrechen ( $S_{br}$ )

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{dis} + S_{bf} + S_{br} \quad (3)$$

Die neueste Version des WAM-Wellenmodells der dritten Generation, WAM Cycle 4.5.4, ist eine Aktualisierung des Wellenmodells WAM Cycle 4, beschrieben in KOMEN et al. (1995) und GÜNTHER et al. (1992). Die grundlegende Physik und Numerik ist in der neuen Version unverändert geblieben. Das von HERSBACH und JANSSEN (1999) eingeführte Integrationsschema für die Quellfunktion und das Aktualisierungsmodell (BIDLOT et al. 2005) sind implementiert. Weitere bedeutende Verbesserungen in WAM Cycle 4.5.4 sind technischer Art sie berücksichtigen die neuen Möglichkeiten des Fortran 95 Standards und des Datenaustauschs über MPI (Message Passing Interface) für Parallelisierungszwecke. Auf Anregung aus den Reihen der Nutzer wurde das Modell um eine Reihe zusätzlicher Optionen erweitert. Ein erheblicher Vorteil des neuesten Stands der Version WAM Cycle 4.5.4 ist der hochgradig modulare Aufbau, dank dem Teile des Codes einfach ersetzt werden können.

### 3 Kurzfristiges präoperationelles Seegangsmodell für die Nordsee und die Deutsche Bucht

Im Rahmen von COSYNA wurde am HZG erfolgreich ein prä-operationelles Seegangsvorhersagesystem implementiert, welches dort ohne Unterbrechung seit Dezember 2009 in Betrieb ist. Das System liefert zweimal täglich 72-Stunden-Seegangsvorhersagen und stellt die Ergebnisse im Internet unter <http://www.coastlab.org> bereit. Das System umfasst ein regionales WAM-Modell für die Nordsee (räumliche Auflösung:  $\Delta\phi * \Delta\lambda = 0,05^\circ * 0,08333^\circ \sim 5$  km) und ein lokales Modell mit feinerem Gitter für die Deutsche Bucht ( $\Delta\phi * \Delta\lambda = 0,00928^\circ * 0,015534^\circ \sim 900$  m). Die antreibenden Windfelder für beide Modelle werden als U10-Winde vom Deutschen Wetterdienst (DWD) aus

dem atmosphärischen Modell COSMO\_EU zur Verfügung gestellt. Das Modellgebiet des COSMO\_EU-Modells ist in Abb. 1 (oben links) dargestellt. Es liefert Vorhersageergebnisse für 78 Stunden mit einer räumlichen Auflösung von etwa 7 km.

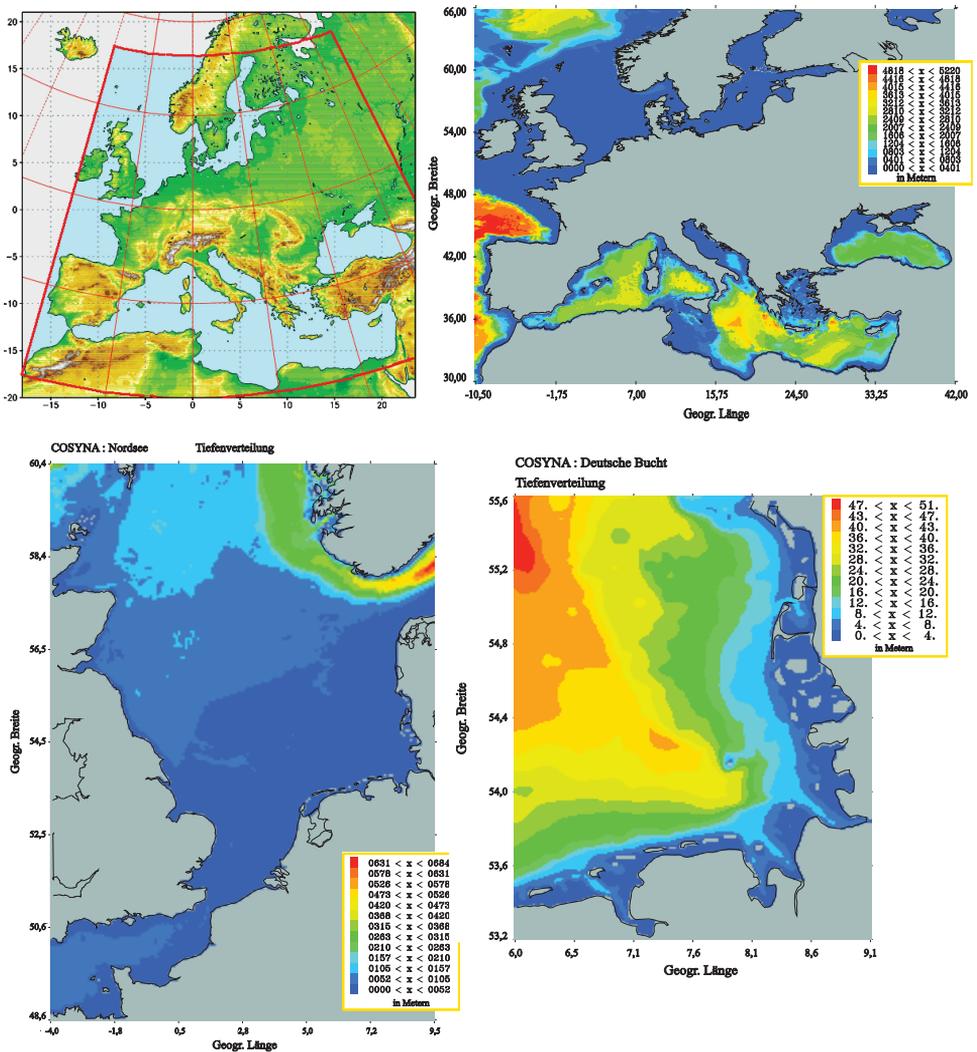


Abbildung 1: Aufbau des prä-operationellen Seegangsvorhersagesystems COSYNA für die Nordsee und die Deutsche Bucht. Der Windantrieb wird durch das COSMO\_EU-Modell (oben links, die rote Linie markiert die Lage des EWAM in COSMO\_EU) zur Verfügung gestellt, die Randwerte stammen aus dem regionalen europäischen Seegangmodell EWAM (oben rechts: EWAM-Tiefenverteilung). Tiefenverteilung des Modells für die Nordsee (unten links) und für die Deutsche Bucht (unten rechts).

Die erforderlichen Randwerte zur Verwendung am offenen Modellrand des Nordseemodells werden aus dem regionalen Wellenmodell EWAM für Europa abgeleitet, welches täglich zweimal im Rahmen der operationellen Seegangsvorhersageroutine des DWD

aktualisiert wird. Die Tiefenverteilung im Berechnungsgitter für das EWAM ist in Abb. 1 dargestellt (oben rechts). Das lokale Modell für die Deutsche Bucht erhält seine Randwerte aus dem Seegangmodell für die Nordsee. Die Modellgitter und Tiefenverteilungen (Abb. 1, Nordsee unten links und Deutsche Bucht unten rechts) für die beiden Seegangmodelle entsprechen denjenigen, die im Aufbau des GETM-Zirkulationsmodells verwendet werden, um die Kopplung beider Modelle für die Deutsche Bucht zu erleichtern. Der Aufbau des prä-operationellen COSYNA-Vorhersagesystems ist in Abb. 1 zusammenfassend dargestellt.

Die Seegangmodelle laufen im Flachwassermodus einschließlich Tiefenrefraktion und Wellenbrechen und berechnen das zweidimensionale Energiedichtespektrum an den aktiven Modellgitterpunkten im Frequenz-Richtungsraum. Die Lösung der WAM-Energiebilanzgleichung erfolgt für 24 Bänder, deren Richtungsauflösung bei  $7,5^\circ$  beginnt und konstant  $15^\circ$  beträgt, gemessen im Uhrzeigersinn bezogen auf Geographisch-Nord, sowie 30 Frequenzen die sich in Schritten von  $\Delta f/f = 0,1$  im logarithmischen Abstand von 0,042 Hz bis 0,66 Hz erstrecken.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel einer horizontalen Verteilung der signifikanten Wellenhöhe in der Nordsee und in der Einbettung für die Deutsche Bucht am 15. Februar 2012 um 06:00 UTC mit signifikanten Wellenhöhen von bis zu 6,8 m.

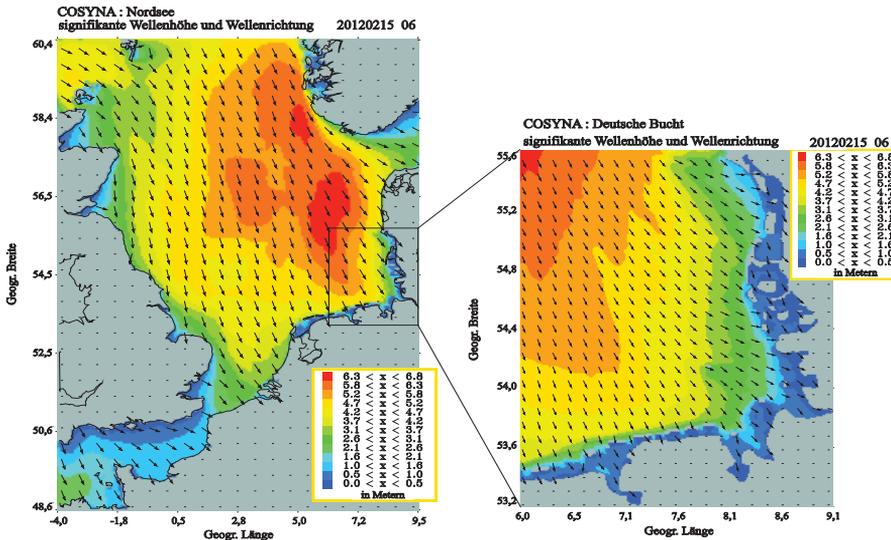


Abbildung 2: COSYNA Seegangsvorhersagesystem für die Nordsee (links) und Deutsche Bucht (rechts).

Die Ergebnisse beider Wellenmodelle enthalten die volle zweidimensionale spektrale Information und 29 integrierte Parameter, die in Tab. 1 aufgeführt sind. Letztere werden an jedem aktiven Rechengitterpunkt 3-stündlich gespeichert, die spektrale Information wird alle 12 Stunden gespeichert (Datei für den Start der nächsten Vorhersage).

Tabelle 1: Integrierte Parameter der Wellenmodellausgabe.

Parameter Nr	Parameter	Einheit
1	Windgeschwindigkeit U10	m/s
2	Windrichtung	Grad von Nord (in Richtung)
3	Oberflächenreibungsgeschwindigkeit	m/s
4	Windschubspannungskoeffizient	
5	Wassertiefe	m
6	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
7	Strömungsrichtung	Grad von Nord (in Richtung)
8	unbesetzt	
9	Signifikante Wellenhöhe	m
10	Peakperiode des Seegangs	s
11	Mittlere Periode des Seegangs	s
12	Tm1-Periode des Seegangs	s
13	Tm2-Periode des Seegangs	s
14	Wellenrichtung	Grad von Nord (in Richtung)
15	Richtungsbandbreite	Grad
16	Normalisierte Wellenschubspannung	%
17	Signifikante Wellenhöhe der Windsee	m
18	Peakperiode der Windsee	s
19	Mittlere Periode der Windsee	s
20	Tm1-Periode der Windsee	s
21	Tm2-Periode der Windsee	s

Parameter Nr	Parameter	Einheit
22	Richtung der Windsee	Grad von Nord (in Richtung)
23	Richtungsbandbreite der Windsee	Grad
24	unbesetzt	
25	Signifikante Wellenhöhe der Dünung	M
26	Peakperiode der Dünung	s
27	Mittlere Periode der Dünung	s
28	T <sub>m1</sub> -Periode der Dünung	s
29	T <sub>m2</sub> -Periode der Dünung	s
30	Richtung der Dünung	Grad von Nord (in Richtung)
31	Richtungsbandbreite der Dünung	Grad
32	unbesetzt	

Die Ausgaben der Seegangmodelle (integrierte Parameter) werden mit Bojenmessdaten aus den Modellgebieten validiert. Als repräsentatives Beispiel ist die Zeitreihe der gemessenen und berechneten signifikanten Wellenhöhen  $H_s$  an zwei Bojen im Modellgitter für die Nordsee für Dezember 2010 in Abb. 3 dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Werten ist recht gut. Zu berücksichtigen ist hier, dass die Messungen mit Seegangsvorhersagen verglichen werden: es wurden jeweils die ersten 12 Stunden jeder Vorhersage verwendet. Die Messdaten für die Validierung der Ergebnisse des Nordseemodells stammen aus dem GTS (Global Telecommunications System)-Netz, das kontinuierlich weltweite Wind- und Wetterdaten liefert. Die Seegangmodellsimulationen des räumlich hoch aufgelösten Modells der Deutschen Bucht wurden mit Messungen validiert, die von Bojen des BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg) und des HZG aufgezeichnet wurden. Der Hauptbetrachtungsfokus des CO-SYNA-Projekts liegt auf den Bedingungen in der Deutschen Bucht, daher fallen die Diskussionen der Vergleiche zwischen den Seegangmodell-Ergebnissen und den Messungen für diesen Bereich detaillierter aus. In Abb. 4 sind die Bojenstationen in der Deutschen Bucht verzeichnet, von denen Seegangsdaten verfügbar sind.

Als repräsentative Beispiele für die Validierung der Seegangmodellergebnisse für die Deutsche Bucht werden einige Vergleiche zwischen Modell und Messung für Oktober 2013 diskutiert. Ende Oktober 2013 wurden die deutschen Küsten von einem schweren Sturm (Christian) mit Windgeschwindigkeiten von über 30 m/s und signifikanten Wellenhöhen von rund 8 m heimgesucht. Die Zeitreihe für Wind und Wellenhöhen an der Station FINO ergibt sich aus Abb. 5. Während des Sturms Christian stieg die Wind-

geschwindigkeit am 28. Oktober schnell auf 30 m/s, weswegen mehrere Bojen ausfielen und keine Messungen dieses Extremereignisses mehr liefern konnten.

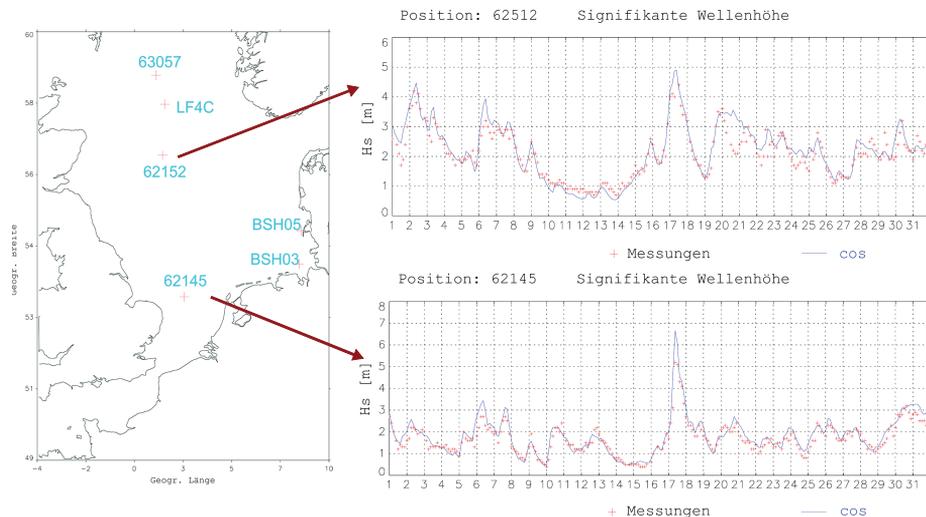


Abbildung 3: Zeitreihe  $H_s$  für zwei Stationen im Modellgitter der Nordsee.

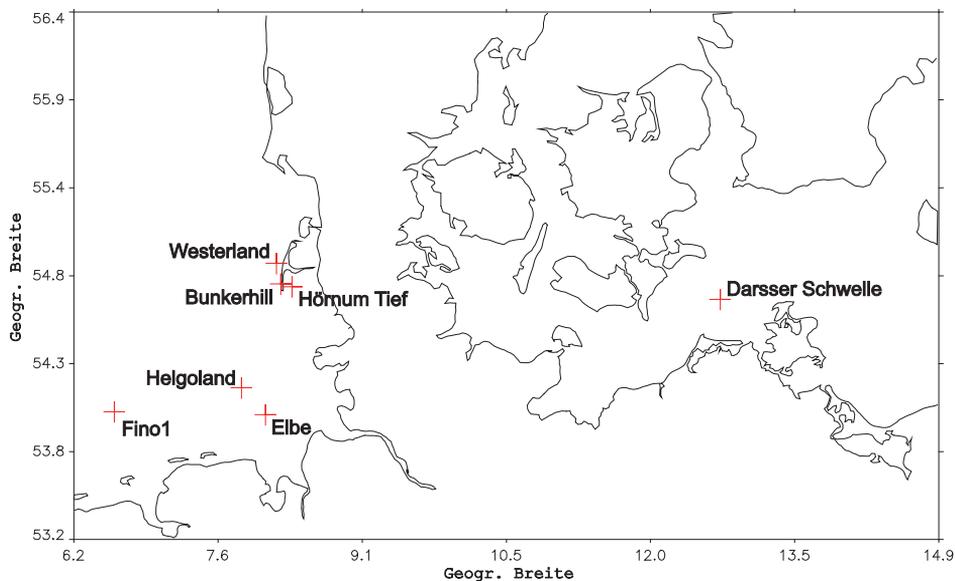


Abbildung 4: Bojenstationen mit Messungen.

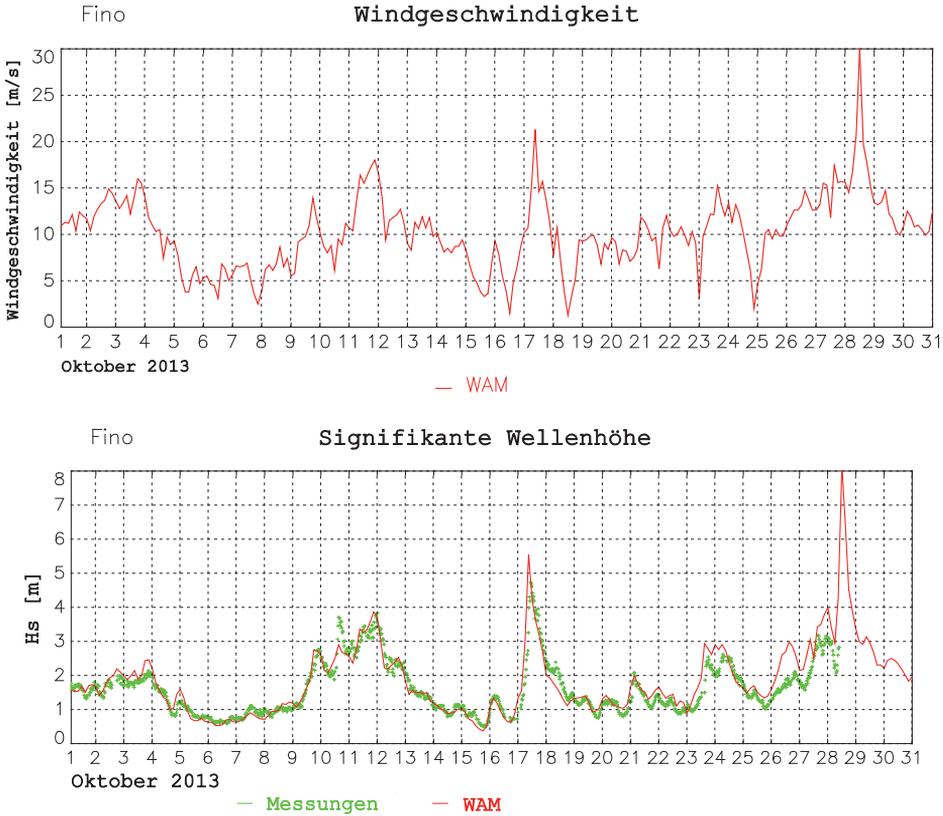


Abbildung 5: Die Zeitreihe für Wind und Wellenhöhen an der Station FINO (Sturm Christian).

An den Stationen Elbe und Helgoland (Koordinaten siehe Abb. 4) waren die Wellenhöhen während des Sturms „Christian“ niedriger als an der Station FINO und es bestehen durchgängige Aufzeichnungen der Seegangparameter von diesem Sturmereignis. Abb. 6 zeigt die entsprechenden Vergleiche für die signifikanten Wellenhöhen, die  $T_{m2}/T_z$ -Perioden und Gesamt-Wellenrichtungen an der Station Elbe. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Modell ist sehr gut. Der Scheitelwert am 28. Oktober (15:00 UTC) in  $H_s$  von circa 6 m und in  $T_{m2}$  von circa 8 s wird vom Seegangmodell gut vorhergesagt.

Gleiches gilt für die Vergleiche an der Station Helgoland, auch wenn das Modell den Scheitelwert leicht unterschätzt. Der gemessene Scheitelwert ist hier höher (7,7 m) im Vergleich zum Scheitelwert an der Station Elbe. Die statistische Analyse der Vergleiche (siehe Tab. 2) bestätigt die gute Qualität der prä-operationellen Seegangsvorhersage für das Gebiet Deutsche Bucht.

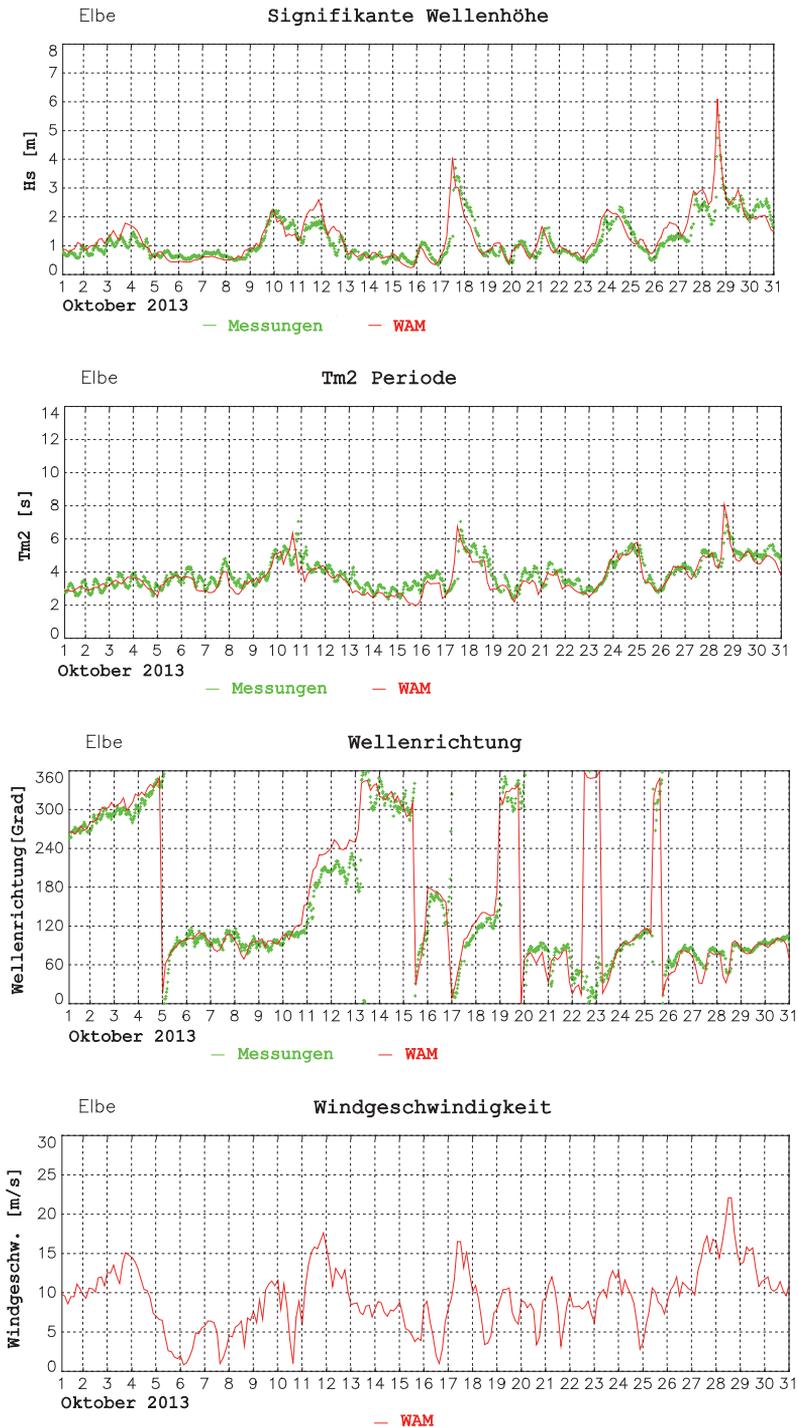


Abbildung 6: Zeitreihe der gemessenen und berechneten Seegangparameter an der Station Elbe.

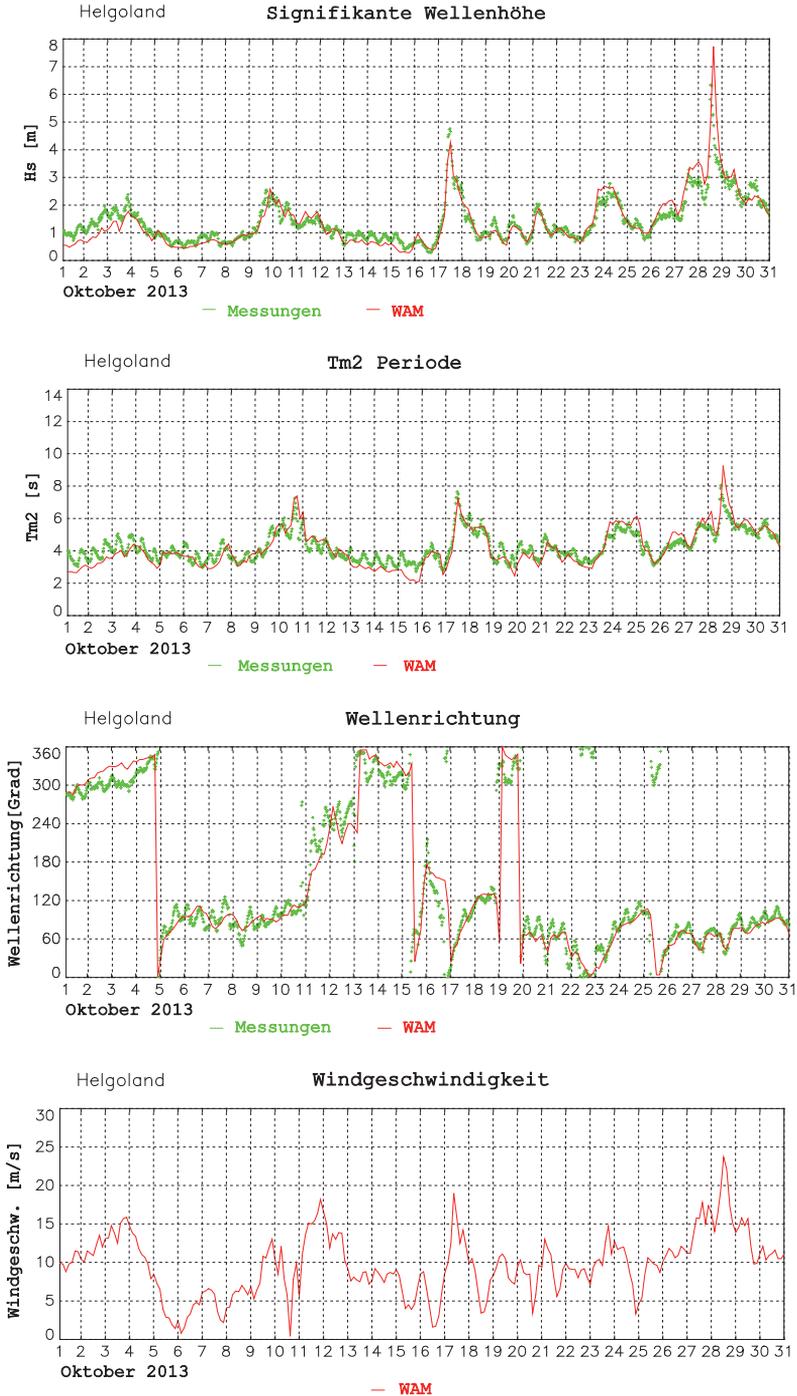


Abbildung 7: Zeitreihe der gemessenen und berechneten Seegangparameter an der Station Helgoland.

Tabelle 2:  $H_s$  -Statistik für Oktober 2013 an den Bojen in der Deutschen Bucht.

Boje	Anzahl der Vergleiche	Mittel der Messungen	Bias	Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler	Skill	Scatter-Index
$H_s$	-	(m)	(m)	(m)	-	(%)
Fino	218	1,59	0,11	0,33	0,86	19
Elbe	247	1,23	0,08	0,31	0,84	25
Westerland	247	1,17	0,14	0,28	0,88	21
Helgoland	247	1,45	-0,03	0,30	0,90	20
$T_{m_2}/T_z$		(s)	(s)	(s)		
Fino	218	4,53	-0,15	0,50	0,74	11
Elbe	247	3,92	-0,23	0,52	0,71	12
Westerland	247	4,07	-0,12	0,74	0,74	18
Helgoland	247	4,27	-0,11	0,52	0,80	12

Skill : Varianzreduzierung, Scatter-Index : Standardabweichung\*100/Mittel der Messungen

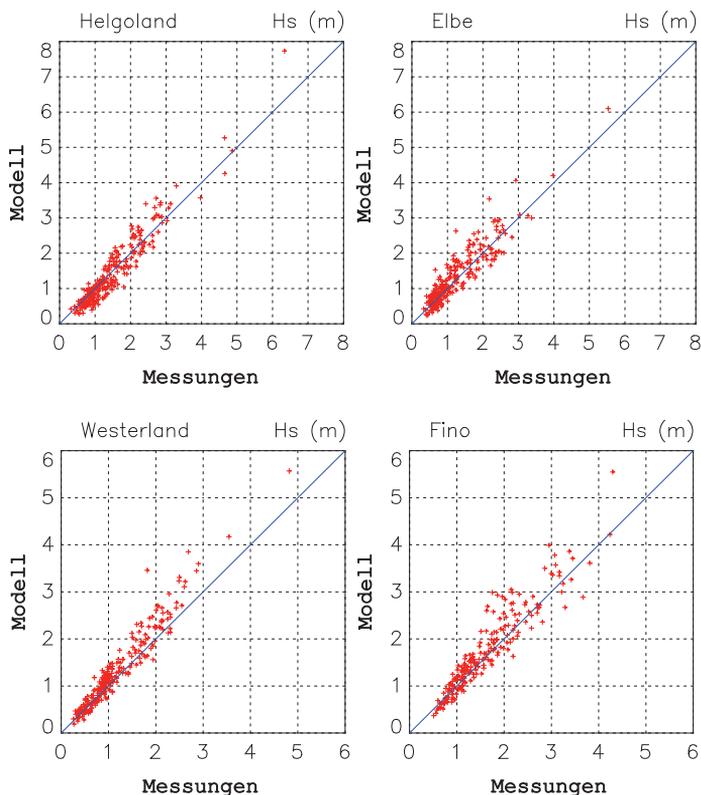


Abbildung 8: Scatterdiagramme für gemessene und berechnete Wellenhöhen für Oktober 2013.

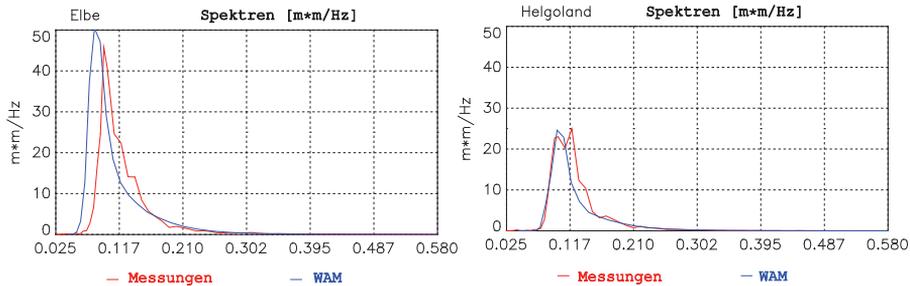


Abbildung 9: Vergleich der gemessenen und berechneten eindimensionalen Seegangsspektren an der Station Elbe (links) beim Scheitelwasserstand des Sturms Christian, 20131028 15:27 UTC (Modellergebnis: 15:00 UTC) und an der Station Helgoland (rechts) bei einem Zwischen-Scheitelwasserstand, 20131017 11:46 UTC (Modellergebnis: 12:00 UTC).

#### 4 Multidekadische regionale Seegangssimulationen

Im Rahmen von coastDat (<http://www.coastdat.de/>) werden zusammenhängende multidekadische meteo-mariner Reanalysen und Klimaszenarien, auch für den Seegang zur Verfügung gestellt. Dadurch soll eine Bewertung aktueller und künftiger Veränderungen im Seegangsklima ermöglicht und die Entwicklung von Anpassungsoptionen unterstützt werden. Daten aus dem Seegangs-Hindcasts sind integraler Bestandteil der coastDat-Datenbank (WEISSE et al. 2009), die von über 60 externen Partnern in Industrie, Behörden und Forschung genutzt wird. Die in coastDat vorhandenen Seegangsdaten ergeben sich Tab. 3 zu entnehmen und die verfügbaren Seegangsparameter sind in Tab. 1 dargestellt.

Tabelle 3: CoastDat Seegangs-Datensätze.

Datensatz	Zeitraum	Antrieb	Referenz
Hindcast run-coastDat1	1958-2007	NCEP/NCAR-Reanalyse	WEISSE und GÜNTHER (2007)
Hindcast run-coastDat2	1948-heute	NCEP/NCAR Reanalyse	GROLL und WEISSE (2016)
Scenario run-coastDat1	1961-1990/ 2071-2100	2x A2; 2x B2	GRABEMANN und WEISSE (2007)
Scenario run-coastDat2	1961-2100	4xA1B; 2x B1	GROLL et al. (2014); GRABEMANN et al. (2014)

Das WAM-Modell wird mit eingebetteten Modellgittern für die Nordsee sowohl für den Hindcasts als auch für Szenariosimulationen verwendet. Die Simulation des Nordostatlantiks berücksichtigt die in die Nordsee einlaufende Dünung mit einer räumlichen Auflösung von 50 km x 50 km. Die hoch aufgelösten Simulationen für the Nordsee verwenden spektrale Seegangsinformationen aus dem grob aufgelösten Modell und haben eine Auflösung von etwa 5,5 km x 5,5 km. Die Hindcast-Simulation von WEISSE und GÜNTHER (2007) sind durch Windfelder in 10 m Höhe aus den durch eine regionale Klimasimulation (FESER et al. 2005) regionalisierten globalen NCEP/NCAR-Reanalysen angetrieben. Die Zukunftsszenarien werden mit unterschiedliche Kombinationen von

GCMs (globale Zirkulationsmodelle), RCMs (regionale Klimamodelle) und Emissions-szenarien berechnet (GRABEMANN und WEISSE 2008; GROLL et al. 2014 und GRABEMANN et al. 2014).

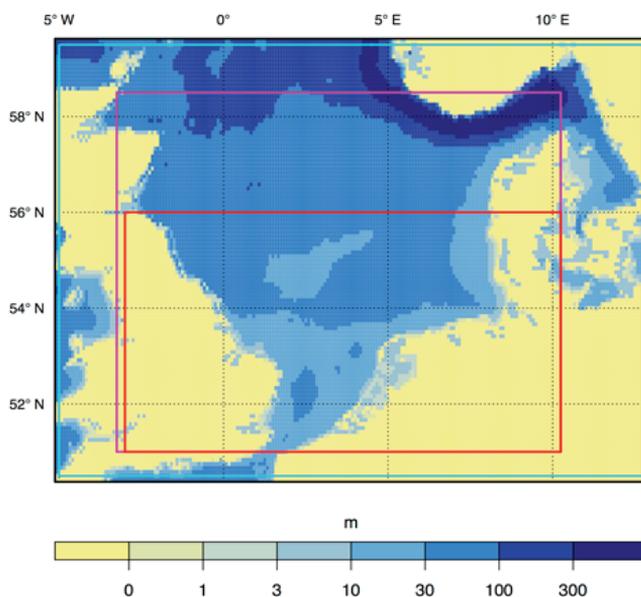


Abbildung 10: Simulierte Gebiete für die Nordsee. Der rote Rahmen markiert das in WEISSE und GÜNTHER (2007) betrachtete Gebiet, der Rahmen in Magenta markiert das Gebiet für die Simulationen der Klimaänderungsszenarien (GRABEMANN und WEISSE 2007; GROLL et al. 2014; GRABEMANN et al. 2014). Der Rahmen in Cyan zeigt das Gebiet des neue aktualisierte Hindcasts (GROLL und WEISSE 2016), welcher verfügbar aber noch nicht veröffentlicht ist.

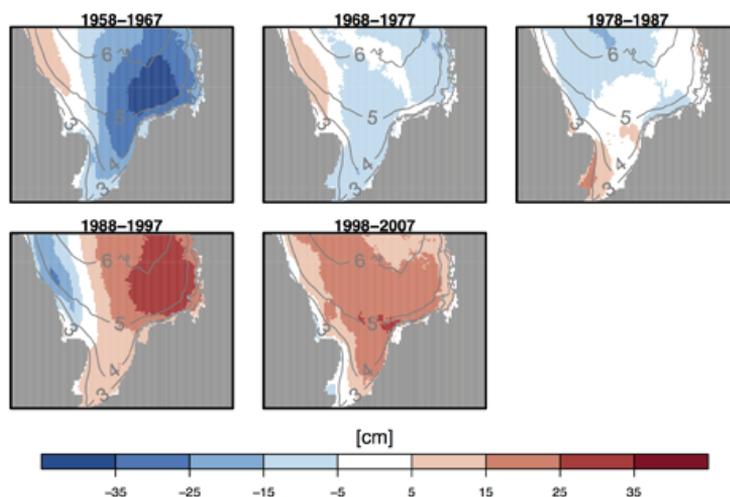


Abbildung 11: Differenz des über 10 Jahre gemittelten jährlichen 99-Perzentils der signifikanten Wellenhöhe relativ zum langfristigen Mittel 1958-2007 (Isolinien) in den Hindcast-Simulationen (siehe WEISSE und GÜNTHER 2007).

Für die Untersuchung langfristiger Veränderungen der Seegangparameter ist es wichtig, eine möglichst konsistente Datenbasis zu liefern. Dies ist jedoch bei Informationen, die ausschließlich auf Beobachtungsdaten basieren, schwierig. Durch die Verwendung von Seegangmodellsimulationen lassen sich Inhomogenitätseffekte durch Veränderungen der Instrumentierungs- und Messtechnik minimieren.

WEISSE und GÜNTHER (2007) untersuchten unter Verwendung von WAM-Simulationen die dekadische Variabilität von Seegangparametern für die Nordsee während der letzten Jahrzehnte. Die Differenzen des über 10 Jahre gemittelten jährlichen 99-Perzentils der signifikanten Wellenhöhen über fünf Perioden relativ zum langfristigen Mittel 1958-2007 sind in Abb. 11 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen einen Anstieg der signifikanten Wellenhöhe zum Ende des 20. Jahrhunderts, allerdings schwächt sich die positive Tendenz in den letzten zehn Jahren in die Deutsche Bucht ab. Ein neuer verfügbarer Seegangs-Hindcast (GROLL und WEISSE 2016), der sich über einen längeren Zeitraum und auf die gesamte Nordsee erstreckt, wird weitere Untersuchungen zur Variabilität des Seegangsklimas der Nordsee ermöglichen.

Abb. 12 zeigt die Validierung der Hindcast-Simulation mit Seegangsbeobachtungen an der Plattform K13 für einen Dreimonatszeitraum des Jahres 1993. Abgesehen von wenigen Differenzen zeigen die Hindcast-Simulationen eine relativ gute Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten.

Abb. 13 zeigt einen Vergleich der dreistündlichen Beobachtungen der signifikanten Wellenhöhen an der Plattform K13 mit den Ergebnissen der Hindcast-Simulation des Zeitraums 1980-2000. Für mittlere Bedingungen zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung, wohingegen sich bei höheren Wellen eine geringe Überschätzung durch die numerische Simulation ergibt.

Im Rahmen von coastDat wurden mehrere Seegangsstudien mit Klimaänderungsszenarien durchgeführt. GRABEMANN und WEISSE (2007) berechneten Zeitscheibenexperimente für den Zeitraum 2071 bis 2100 und den Referenzzeitraum 1961-1990 mit zwei Emissionsszenarien (A2 und B2) und zwei unterschiedlichen GCMs und einem RCM. GROLL et al. (2014) berechneten transiente Simulationen (1961-2100) mit einem GCM, aber mit unterschiedlichen Ausgangsbedingungen und zwei Emissionsszenarien (A1B und B1) und mit einem RCM (CCLM). GRABEMANN et al. (2014) verglichen und diskutierten diese acht Seegangsexperimente zusammen mit zwei weiteren Seegangssimulationen unter Verwendung von einem GCM, einem Emissionsszenario (A1B), aber unterschiedlichen RCMs. Weitere Details sind Tab. 4 zu entnehmen.

Der Unterschied des über 30 Jahre gemittelten jährlichen 99,9-Perzentils der signifikanten Wellenhöhe zwischen dem Zeitraum 2071-2100 und dem entsprechenden Referenzklima 1961-1990 für diese zehn Klimaänderungssimulationen ist in Abb. 14 dargestellt. Betrachtet man vorwiegend die Deutsche Bucht, so zeigen alle zehn Simulationen einen Anstieg zum Ende des 21. Jahrhunderts. Die Größenordnung des Anstiegs erweist sich als sehr viel unsicherer und variiert zwischen nahe null und bis zu einem Meter. Auch in anderen Teilen der Nordsee zeigt sich die räumliche Schwankungsbreite zwischen den Simulationen. Im Allgemeinen ist ein Anstieg im östlichen Teil der Nordsee zu erkennen, wohingegen in den westlichen Gebieten der Nordsee die Veränderungen weniger ausgeprägt sind beziehungsweise sich in manchen Simulationen sogar ein Abnahme der Wellenhöhe ergibt. Eine Analyse der sechs transienten Simulationen zeigt eine starke multi-dekadische Variabilität über den gesamten Simulationszeitraum hinweg und deutet so auf die interne Klimavariabilität des Klimasystems hin (GROLL et al. 2014; GRABEMANN et al. 2014).

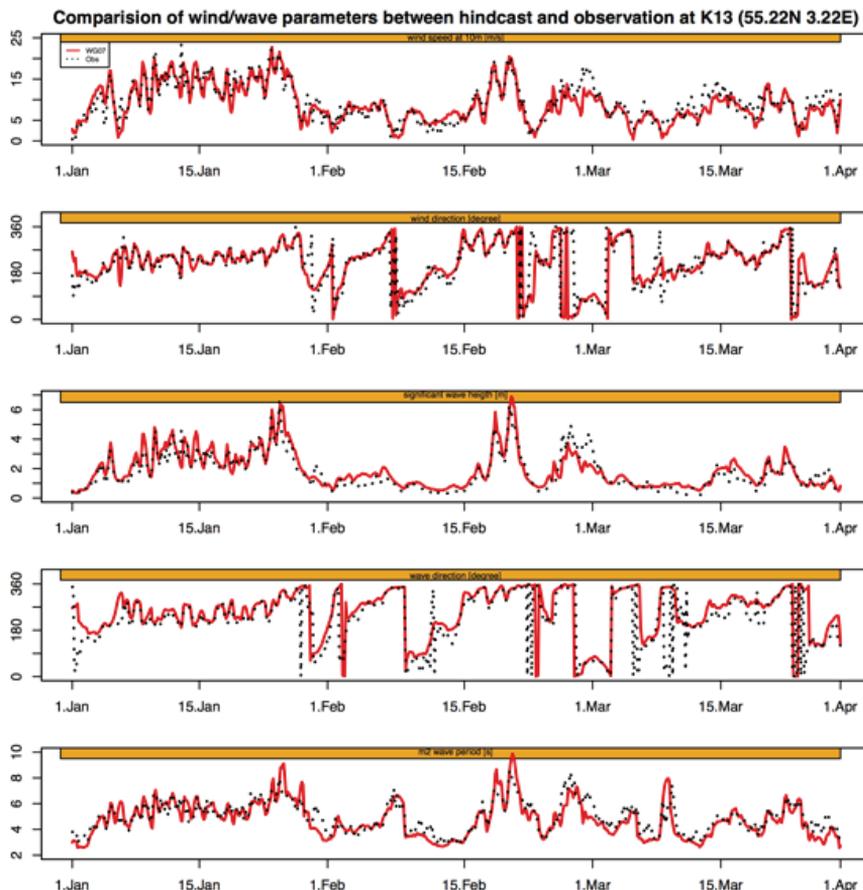


Abbildung 12: Zeitreihen der Windgeschwindigkeit (m/s), Windrichtungen (Grad, in Richtung), signifikanten Wellenhöhe (m), Wellenrichtung (Grad, in Richtung) und m2-Wellenperiode (s) an K13 für den Zeitraum vom 1. Januar 1993 bis 31. März 1993. Beobachtungen (schwarze gepunktet) und Modellergebnisse (rot) (siehe WEISSE und GÜNTHER 2007).

Die im Rahmen von coastDat generierten Daten liefern eine langfristige, konsistente und möglichst homogene Beschreibung des Seegangsklimas der Nordsee, welche für die Untersuchung und dem Verständnis der Klimavariabilität in Gebieten mit räumlich beschränkter Datenlage wie der Nordsee wichtig ist. Die innerhalb dieser Klimaänderungs- und Hindcast-Simulationen generierten Seegangsdaten stehen externen Kunden zur Verfügung und werden für unterschiedliche Anwendungszwecke im Offshore- und Küstenbereich verwendet. Beispielsweise dienen Hindcast-Seegangsdaten bei der Planung und Bemessung von Offshore-Windparks, zur Berechnung von Wiederkehrwerten für Extremereignisse und zur Schätzung von Zeitfenstern bestimmter Seegangsbedingungen, die für Bau- und Wartungsarbeiten erforderlich sind. Die Seegangsdaten werden auch von Werften zur Optimierung von Schiffsprofilen verwendet. Ausführlichere Erörterungen finden sich bei WEISSE et al. (2009). Abgesehen von einer regelmäßigen Aktualisierung der Hindcast-Simulation sind für die Zukunft Simulationen mit höheren Auflösungen geplant, was für küstennahe Anwendungen von Bedeutung ist.

Tabelle 4: Datensatz aus zehn Klimaänderungsszenarien für den Seegang modelliert im Rahmen von coastDat (siehe GRABEMANN et al. 2014).

Akronym	Zeitraum	Antrieb durch RCM	Antrieb durch GCM	Referenzen
C20_1C A1B_1C B1_1C C20_2C A1B_2C B1_2C	1961-2000 2001-2100 2001-2100 1961-2000 2001-2100 2001-2100	COSMO-CLM ROCKEL et al. (2008)	ECAHM5/MPI-OM RÖCKNER et al. (2003) MARSLAND et al. (2003) mit zwei Ausgangsbedingungen	GROLL et al. (2014) GRABEMANN et al. (2014)
C20_3R A1B_3R C20_3H A1B_3H	1961-2000 2001-2100 1961-2000 2001-2099	REMO JACOB at al. (2007) HIRHAM CHRISTENSEN et al. (2007)	ECAHM5/MPI-OM RÖCKNER et al. (2003) MARSLAND et al. (2003) mit der dritten Ausgangsbedingung	GRABEMANN et al. (2014)
C_E A2_E B2_E C_H A2_H B2_H	1961-1990 2071-2100 2071-2100 1961-1990 2071-2100 2071-2100	RCAO RUMMUKAINEN et al. (2001) RÄISÄNEN et al. (2004)	ECHAM4/OPYC3 RÖCKNER et al. (1999)  HadAM3H GORDON et al. (2000)	GRABMANN und WEISSE (2007) GRABEMANN et al. (2014)

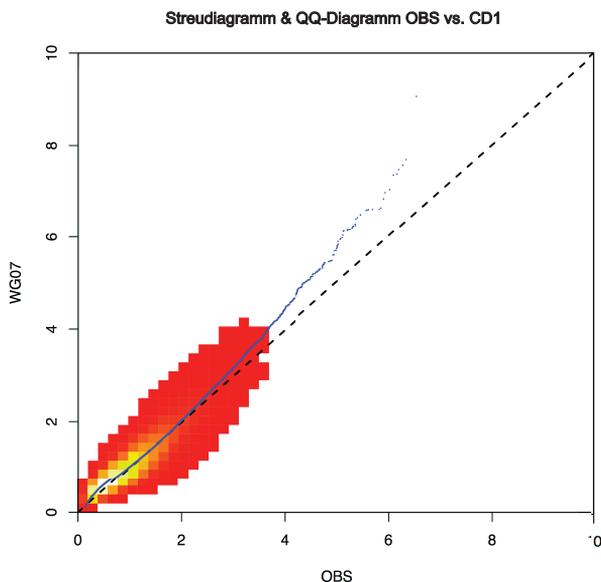


Abbildung 13: Streudiagramm der dreistündlichen signifikanten Wellenhöhe für den Zeitraum 1980-2000 zwischen Beobachtungen an der Plattform K13 und simulierten Daten aus dem Hindcast (WEISSE und GÜNTHER 2007). Blau gepunktet: Quantil-Quantil-Diagramm für zehntel Perzentile der Wellenhöhe (0;0,1;0,2;.....99,8;99,9;100).

Im Rahmen von coastDat werden nicht nur Seegangsdaten mit Hilfe von Klimasimulationen erstellt und von externen Anwendern verwendet, sondern auch andere wichtige maritime Klimavariablen finden Berücksichtigung, z.B. Wind über der Meeresoberfläche oder Wasserstand (siehe [www.coastdat.de](http://www.coastdat.de)).

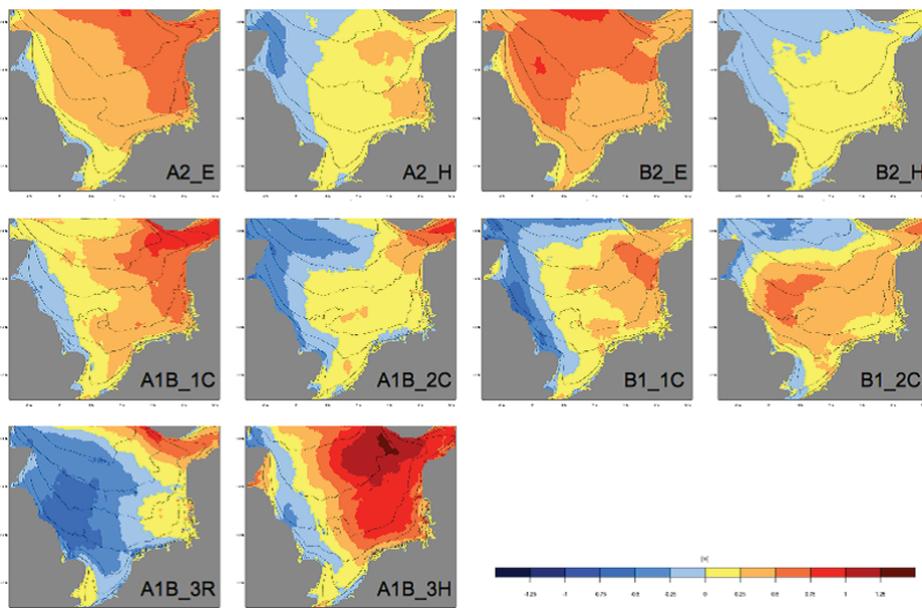


Abbildung 14: Unterschiede zwischen dem über 30 Jahre gemittelten jährlichen 99,9-Perzentil der signifikanten Wellenhöhe in Meter für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990 für alle 10 Projektionen. Die schwarze Isolinie markiert das über 30 Jahre gemittelte jährliche 99,9-Perzentil der signifikanten Wellenhöhe in Meter für den entsprechenden Referenzzeitraum (siehe GRABEMANN et al. 2014).

## 5 Wechselwirkungen zwischen Seegang und Strömung

Anhand des Gebiets der Deutschen Bucht wird die Bedeutung der Kopplung von Seegangs- und Zirkulationsmodellen für die Verbesserung der Vorhersagen für den Ozean aufgezeigt. Die Deutsche Bucht (südliche Nordsee) zeichnet sich durch Windwellen und starke Tideströmungen aus. Daher spielen Vorgänge wie nichtlineare Rückkopplungen zwischen Strömung und Wellen eine wichtige Rolle in diesem Gebiet. Die Kopplung eines Seegangsmodells (WAM) mit einem hydrodynamischen Modell (GETM, BURCHARD und BOLDING 2002) verbessert die Schätzungen von Variablen des Meereszustandes, insbesondere in Küstengebieten wie dem Wattenmeer und in Ästuaren (Einzelheiten zu Modellkonfigurationen bei STANEVA et al. 2009). Bei der Kopplung findet beides Berücksichtigung: sowohl die Auswirkungen von Strömungen auf den Seegang als auch die Auswirkungen von Wellen auf die Dynamik der Ozeanoberfläche, besonders auf Vermischung und Driftströmungen. In WAM können die Tiefen- bzw. Strömungsfelder instationär sein, Gitterpunkte können trocken fallen und Refraktion auf Grund von räumlich variierenden Strömungen und Tiefen wird in einem quasi-stationären Ansatz

berücksichtigt. Das GETM-Modell wurde zur Erfassung von Welleneffekten modifiziert, indem die tiefenabhängigen welleninduzierten Strömungen (Radiation Stresses) und Stokes-Drifts eingebracht wurden. Die Terme wurden aus den integrierten Wellenparametern nach MELLOR (2008) berechnet. Der Gradient der Radiation Stresses dient als ein zusätzlicher expliziter Wellenantriebsterm in den Impulsgleichungen für die horizontalen Geschwindigkeitskomponenten. Die Impulsübertragung durch Wellen gewinnt Bedeutung für den Mittelwasseraufbau und für durch Wellen in der Brandungszone verursachte küstenparallele Strömungen.

Die Bedeutung für die Kopplung wird durch die Darstellung der Auswirkungen von Wellen auf Extremereignisse illustriert (Sturm am 6.12.2013, siehe Abb. 15). Die Radiation Stresses erhöhen die durchschnittlichen Wasserstände, und dies in höherem Maße in Küstennähe. Unter normalen Bedingungen betragen die Differenzen der Wasserstände auf Grund der Kopplung mit dem Seegangmodell maximal 10-15 cm im Gebiet der Elbe. Während des Sturms Xaver am 6.12.2013 (links) betragen die Differenzen der simulierten Wasserstände mit Berücksichtigung von Wellen jedoch etwa 30-40 cm entlang der deutschen Küste. Die Unsicherheiten in den meisten gegenwärtig eingesetzten Modellen resultieren demnach aus der nicht-linearen Rückkopplung zwischen ausgeprägten Tidenströmungen und Windsee, die in der operationellen Ozeanographie nicht länger vernachlässigt werden kann, insbesondere im Küstengebiet, wo sie eine vorherrschende Rolle zu spielen scheint.

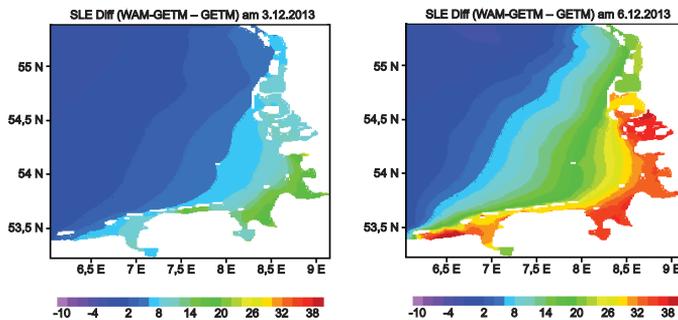


Abbildung 15: Differenzen in der Lage der Wasseroberfläche (SLE) zwischen dem gekoppelten Wellen-Zirkulationsmodell (WAM-GETM) und dem reinen Zirkulationsmodell (GETM) für die Deutsche Bucht am 03.12.2013 (links) und während des Sturms Xaver am 06.12.2013.

## 6 Schlussfolgerungen

Seegangs-Hindcasts und -vorhersagen für die Nordsee und die Deutsche Bucht sind von großer Bedeutung für die Bewirtschaftung der Küstengebiete, Befahrbarkeit durch Schiffe, Offshore-Windenergieerzeugung, den Schiffbau etc. Stürme und die durch sie erzeugten Windwellen haben unmittelbare Auswirkungen auf den Küstenbereich, sei es land- oder seeseitig. Die in Küstengebieten lebende Bevölkerung ist zunehmend mit den Auswirkungen von Erosion und Überschwemmung befasst sowie mit möglichen Handlungsoptionen, durch die solche Vorgänge und Ereignisse vorhergesagt und deren Auswirkungen minimiert werden können. Die schwerwiegenden Schäden in Küstengebieten sind in hohem Maße auf Seegangsbedingungen zurückzuführen. Diese lassen sich durch

Werkzeuge wie numerische Seegangssysteme für Küstengebiete erfassen. In diesem Beitrag wurden die jüngsten Fortschritte im Bereich Seegangmodellierung für die Gebiete der Nordsee und der Deutschen Bucht zusammengefasst. Der neueste Stand der Technik in der Entwicklung des spektralen Seegangmodells WAM für Anwendungen in der Vorhersage der operationellen Dienste sowie für Hindcasts und für Bewertungen des Wellenklimas für die Nordsee und die Deutsche Bucht beim HZG wird hier dargestellt. Im Zuge von Verbesserungen in der Abschätzung des Zustands des Ozeans, der Vorhersagen für Küstengewässer und in der Gewinnung von aktuellen Informationen, Produkten und Kenntnissen steigert sich die Synergie zwischen Beobachtungen und Ergebnissen numerischer Modelle für die Nordsee und die Deutsche Bucht. Sowohl für die langfristigen Seegang-Hindcasts als auch für die kurzfristigen Seegangsvorhersagen für die Nordsee und die Deutsche Bucht wird die sehr gute Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen und den Modellsimulationen gezeigt. Somit werden zuverlässige Vorhersagen und Analysen nicht nur von langfristigen Veränderungen der Seegangbedingungen sondern auch von Extremereignissen ermöglicht. Die Leistungsfähigkeit des Vorhersagesystems wird anhand von mehreren Fällen von Extremereignissen demonstriert. Auch Auswirkungen des Seegangs auf die Küstenzirkulation werden während der Extremereignisse untersucht. Die aus den jüngsten Entwicklungen des Seegangmodells WAM resultierenden verbesserten Fähigkeiten, insbesondere in der Anwendung während Sturmereignissen, rechtfertigt weitere Verbesserungen sowohl der Vorhersageanwendungen bei den operationellen Diensten als auch der Langzeit-Hindcasts und Bewertungen des Klimas für die Nordsee und die Deutsche Bucht.

Kurzfristige Seegangsvorhersagen, Rekonstruktionen des Meereszustandes und von Klimaszenarien mit dem WAM-Modell haben zu einem großen Interesse geführt, die erzeugten Daten in industriellen Anwendungen zu nutzen. Im Rahmen von CoastDat werden multidekadische Seegang-Hindcasts und -Szenarien als Teil durchgängiger meteorologischer Reanalysen und Szenarien verfügbar gemacht, die der Bewertung aktueller und potenzieller künftiger Veränderungen im Seegangsklima und der Unterstützung der Entwicklung von Anpassungsoptionen dienen sollen. Das prä-operationelle Seegangsvorhersagesystem COSYNA für die Nordsee und die Deutsche Bucht liefert zweimal am Tag Seegangsvorhersagen mit einer Anzahl von Wellenparametern wie Wellenhöhe, -periode und -richtung und ist ein sehr gutes Beispiel für Seegangmodellierungsprodukte, die die Küstenbewirtschaftung im Kontext von Klimawandel und menschlichen Aktivitäten unterstützen können. Daten aus Seegangsvorhersagen und -Hindcasts sind integraler Bestandteil der COSYNA- und coastDat-Datenbank, die von Partnern in Industrie, Behörden und Forschung genutzt wird.

## 7 Schriftenverzeichnis

- BEHRENS, A. and GÜNTHER, H.: Operational wave prediction of extreme storms in Northern Europe, *Natural Hazards*, Volume 49, Issue 2 (2009), 387-399, doi: 10.1007/s11069-008-9298-3, 2009.
- BIDLOT, J.; JANSSEN, P. and ABDALLA, S.: A revised formulation for ocean wave dissipation in CY29R1. Memorandum Research Department of ECMWF, April 7, 2005 File: R60.9/JB/0516, 2005.

- BURCHARD, H. and BOLDING, K.: GETM – a General Estuarine Transport Model, No EUR 20253 EN, printed in Italy, European Commission, 2002.
- CHRISTENSEN, O. B.; DREWS, M.; CHRISTENSEN, J. H.; DETHLOFF, K.; KETELSEN, K.M.; HEBESTADT, I. and RINKE, A.: The HIRHAM Regional Climate Model Version 5 (beta). Technical Report 06-17, 22pp, Danish Meteorological Institute, 2007.
- GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C. A.; BANKS, H.; GREGORY, J. M.; JONES, T. C.; MITCHELL, J. F. B. and WOOD, R. A.: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim Dyn* 16, 147-166, 2000.
- GRABEMANN, I. and WEISSE, R.: Climate change impact on extreme wave conditions in the north sea: an ensemble study. *Ocean Dynamics* 58:199-212, doi: 10.1007/s10236-008-0141-x, 2008.
- GRABEMANN, I.; GROLL, N.; MÖLLER, J. and WEISSE, R.: Climate change impact on North Sea wave conditions: a consistent analysis of ten projections. Submitted to *Ocean Dynamics*, 2014.
- GROLL, N.; GRABEMANN, I. and GASLIKOVA, L.: North Sea wave conditions: an analysis of four transient future climate realizations. *Ocean Dynamics* 64, 1-12, doi: 10.1007/s10236-013-0666-5, 2014.
- GROLL, N.; Weisse, R.: coastDat-2 North Sea wave hindcast for the period 1949-2014 performed with the wave model WAM, doi: 10.1594/WDCC/coastDat-2\_WAM-North\_Sea, 2016.
- GÜNTHER, H.; HASSELMANN, S. and JANSSEN, P. A. E. M.: The WAM Model Cycle 4.0. User Manual. Technical Report No. 4, Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg, Germany, 1992.
- HERSBACH, H. and JANSSEN, P. A. E. M.: Improvements of the short fetch behavior in the WAM model. *J. Atmos. Oceanic Techn.*, 16, 884-892, 1999.
- JACOB, D.; BÄHRING, L.; CHRISTENSEN, O. B.; CHRISTENSEN J. H.; CASTRO DE, M.; DÉQUÉ, M. N.; GIORGI, F.; HAGEMANN, S.; HIRSCHI, M.; JONES, R.; KJELLSTRÖM, R.; LENDERINK, G.; ROCKEL, B.; SÁNCHEZ, E.; SCHÄR, C.; SENEVIRATE, S.; SORNOT, S.; ULDEN VAN, A. and HURK VAN DEN, B.: An intercomparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change* 81, Supplement 1, 31-52, 2007.
- KOMEN, G. J.; CAVALERI, L.; DONELAN, M.; HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S. and JANSSEN, P.A.E.M.: Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995.
- MARSLAND, S.; HAAK, H.; JUNGCLAUS J.; LATIF, M. and RÖSKE, F.: The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modeling* 5, 91-127, 2003.
- MOGHIMI, S.; GAYER, G.; GÜNTHER, H. and SHAFIEEFAR, M.: Application of 3rd Generation shallow Water Wave Models in a Tidal Environment. *Ocean Dynamics*, 55, 10-27, 2005.
- MONBALIU, J.; PADILLA-HÉRNANDEZ, R.; HARGREAVES, J. C.; CARRETERO ALBIACH, J. C.; LUO, W.; SCLAVO, M. and GÜNTHER, H.: The spectral wave model WAM adapted for applications with high spatial resolution. *Elsevier Coastal Engineering*, 41, 41-62, 2000.

- RÄISÄNEN, J.; HANSSON, U.; ULLERSTIG, A.; DÖSCHER, R.; GRAHAM, L.P.; JONES, C.; MEIER, H. E. M; SAMUELSSON, P. and WILLÉN, U.: European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim Dyn* 22:13-31, doi: 10.1007/s00382-003-0365-x, 2004.
- ROCKEL, B.; WILL, A. and HENSE, A. (eds): Special issue Regional climate modeling with COSMO-CLM (CCLM), vol 17. *Met.*, 2008.
- RÖCKNER, E.; BENGTTSSON, L.; FEICHTER, J.; LELIEVELD, J. and RODHE, H.: Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the trophospheric sulfur cycle. *J Climate*, 12, 3004-3032, 1999.
- RÖCKNER, E.; BÄUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U. and TOMPKINS, A.: The atmospheric general circulation model ecam5. part i: model description. *Mpi - rep 349*, Max Planck Institute for Meteorology, 2003.
- RUMMUKAINEN, M.; RÄISÄNEN, J.; BRINGFELT, B.; ULLERSTIG, A.; OMSTEDT, A.; WILLÉN, U.; HANSSON, U. and JONES, C.: A regional climate model for Northern Europe: model description and results from the downscaling of two GCM control simulations. *Clim Dyn* 17, 339-359, 2004.
- STANEV, E. V.; SCHULZ-STELLENFLETH, J.; STANEVA, J.; GRAYEK, S.; SEEMANN, J. and PETERSEN, W.: Coastal observing and forecasting system for the German Bight – estimates of hydrophysical states, *Ocean Sci.*, 7, 569-583, 2011.
- STANEVA, J.; STANEV, E.; WOLFF, J.-O.; BADEWIEN, T. H.; REUTER, R.; FLEMMING, B.; BARTHOLOMAE, A. and BOLDING, K.: Hydrodynamics and sediment dynamics in the German Bight. A focus on observations and numerical modeling in the East Frisian Wadden Sea, *Cont. Shelf Res.*, 29, 302-319, 2009.
- WAMDI Group: The WAM Model – A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810, 1988.
- WEISSE, R. and GÜNTHER, H.: Wave climate and long-term changes for the southern north sea obtained from a high-resolution hindcast 1958-2002. *Ocean Dynamics*, 57, 161-172, doi: 10.1007/s10236-006-0094-x, 2007.
- WEISSE, R.; VON STORCH, H.; CALLIES, U.; CHRASTANSKY, A.; FESER, F.; GRABEMANN, I.; GÜNTHER, H. A.; PLÜSS, T. S.; TELLKAMP, J.; WINTERFELDT, J. and WOTH, K.: Regional meteorological-marine reanalysis and climate change projections. Results for northern Europe and potential for coastal and offshore applications. *Bulletin of the Amer Met Soc*, 90(6), 849-860, doi: 10.1175/2008BAMS2713.1, 2009.