

# Vergleichende Betrachtungen der im Projekt MUSTOK verwendeten hydrodynamischen Modelle

Von GERD BRUSS und INGRID BORK

## Zusammenfassung

Zur Simulation extremer Sturmhochwasser wurden im Rahmen von MUSTOK zwei unterschiedliche hydrodynamische Modelle angewendet. Zum einen wurde am FTZ Büsum ein Modell der Ostsee auf Basis des am DHI entwickelten Modellsystems eingesetzt. Zum anderen wurde das am BSH operationell betriebene Modellsystem der Nord- und Ostsee benutzt. Inhalt dieses Artikels ist der Vergleich der beiden Modelle. Die Unterschiede in den simulierten Wasserständen waren gering und wesentlich kleiner als Unterschiede zwischen Simulationen angetrieben mit Wind- und Luftdruckfeldern aus verschiedenen meteorologischen Modellen.

## Schlagerörter

HN-Modelle, Vergleich, Sturmflut, Ostsee

## Summary

*Within the framework of MUSTOK, two different hydrodynamic models were used to simulate extreme storm surge events. One of the models is the Baltic Sea model used at FTZ Büsum, which is based on a model system developed at DHI. The other model is the BSH's operational model system of the North Sea and Baltic Sea. This contribution deals with a comparison of the two models. The differences between the simulated water levels were small; they were considerably smaller than the differences found when forcing the hydrodynamic models with wind and pressure fields from different meteorological models.*

## Keywords

HN models, comparison, storm surge, Baltic Sea

## Inhalt

1. Einleitung . . . . .	232
2. Gegenüberstellung der Modellsysteme . . . . .	232
2.1 Auflösung . . . . .	232
2.2 Physikalische Parametrisierung . . . . .	234
2.3 Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	236
2.4 Bezugsniveau . . . . .	237
3. Verifizierung und Vergleich der modellierten Wasserstände . . . . .	237
3.1 Sturm Februar 2002 . . . . .	239
3.2 Sturm November 2006 . . . . .	242
4. Einfluss der unterschiedlichen Berücksichtigung des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee. . . . .	244
4.1 Füllungsgrad und Massentransporte . . . . .	246
4.1.1 Hindcast Stürme 2002 und 2006 . . . . .	246
4.1.2 Vorlaufrechnungen zu den EPS-Stürmen . . . . .	250
4.2 Wasserstände in der südwestlichen Ostsee . . . . .	251
5. Zusammenfassung . . . . .	253
6. Danksagung . . . . .	253
7. Schriftenverzeichnis . . . . .	253

## 1. Einleitung

Im Projekt MUSTOK sind ursprünglich eigenständige Projektanträge zusammengefasst worden. Davon haben insbesondere die beiden Teilvorhaben MUSE-Ostsee und SEBOK-A profitiert. In SEBOK-A konnte zur Bestimmung von Bemessungsgrößen für Küstenschutzanlagen auf Szenarien aus der meteorologischen Datenbasis sowie auf hydrodynamische Anfangs- und Randwerte aus dem Teilprojekt MUSE-Ostsee zurückgegriffen werden. MUSE-Ostsee konnte ozeanographische Modellergebnisse aus SEBOK-A zur Vorauswahl für eigene Modelluntersuchungen extremer Sturmhochwasser und ihrer statistischen Bewertung nutzen. Beide Teilprojekte wollten jedoch nicht auf die Verwendung gewohnter hydrodynamischer Modellsysteme verzichten. In MUSE-Ostsee wurde das operationelle Modellsystem des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (DICK et al., 2001 und DICK et al., 2008) verwendet. In SEBOK-A wurde am Forschungs- und Technologiezentrum Westküste (FTZ) ein Modell der Ostsee auf Basis der am Danish Hydraulic Institute (DHI) entwickelte Modellfamilie MIKE eingesetzt. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit und die Chance beide Modellsysteme zu vergleichen.

Zunächst werden die Modelle anhand ihrer wesentlichen Merkmale beschrieben und gegenübergestellt und anschließend die Ergebnisse von Wasserstandssimulationen und Transporten verglichen. Dazu wurden mit beiden Modellsystemen die jüngeren Sturmhochwasser vom Februar 2002 und November 2006 simuliert.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Modellsystemen ist die unterschiedliche Berücksichtigung des Einflusses der Nordsee auf die Wasserstände der Ostsee. Im letzten Teil wird daher der Einfluss der unterschiedlichen Modellgebiete auf die im Rahmen von MUSTOK untersuchten extremen Sturmhochwasser untersucht.

## 2. Gegenüberstellung der Modellsysteme

Das Modellsystem des BSH hat sich in der operationellen Wasserstandsvorhersage für die Ostsee bewährt (GÄSTGIFVARS et al., 2008). Das am FTZ verwendete Strömungsmodell ist ein die Ostsee inklusive Kattegat abdeckender Ausschnitt eines am DHI operationell betriebenen Nord-Ostseemodellsystems ([www.waterforecast.com](http://www.waterforecast.com)). Der Hauptunterschied beider Modelle liegt in der Ausdehnung des Modellgebietes (Abb. 1). Das BSH-Modellsystem umfasst ein zweidimensionales barotropes Modell des Nordostatlantiks, ein dreidimensionales baroklines Modell der Nord- und Ostsee und beidseitig gekoppelt ein dreidimensionales baroklines Modell der Deutschen Bucht und der westlichen Ostsee. In SEBOK-A sind dreidimensionale barokline Modelle der Ostsee einschließlich Kattegat, der südwestlichen Ostsee und der Kieler und Mecklenburger Bucht in unterschiedlichen Auflösungen dynamisch miteinander gekoppelt.

### 2.1 Auflösung

Die horizontale Auflösung der die gesamte Ostsee überdeckenden Modelle ist mit 5 km im BSH-Modell und 5,5 km im FTZ-Modell etwa gleich. In der westlichen Ostsee unterscheiden sich die Gebiete mit höherer Auflösung durch Ausdehnung und Gitterabstand mit einheitlich 0,9 km im BSH-Modell sowie 1,8 km und 0,6 km im FTZ-Modell (Abb. 2). In den groben Modellen weist die Topographie, besonders im Bereich von Schwellen und in Küsten-

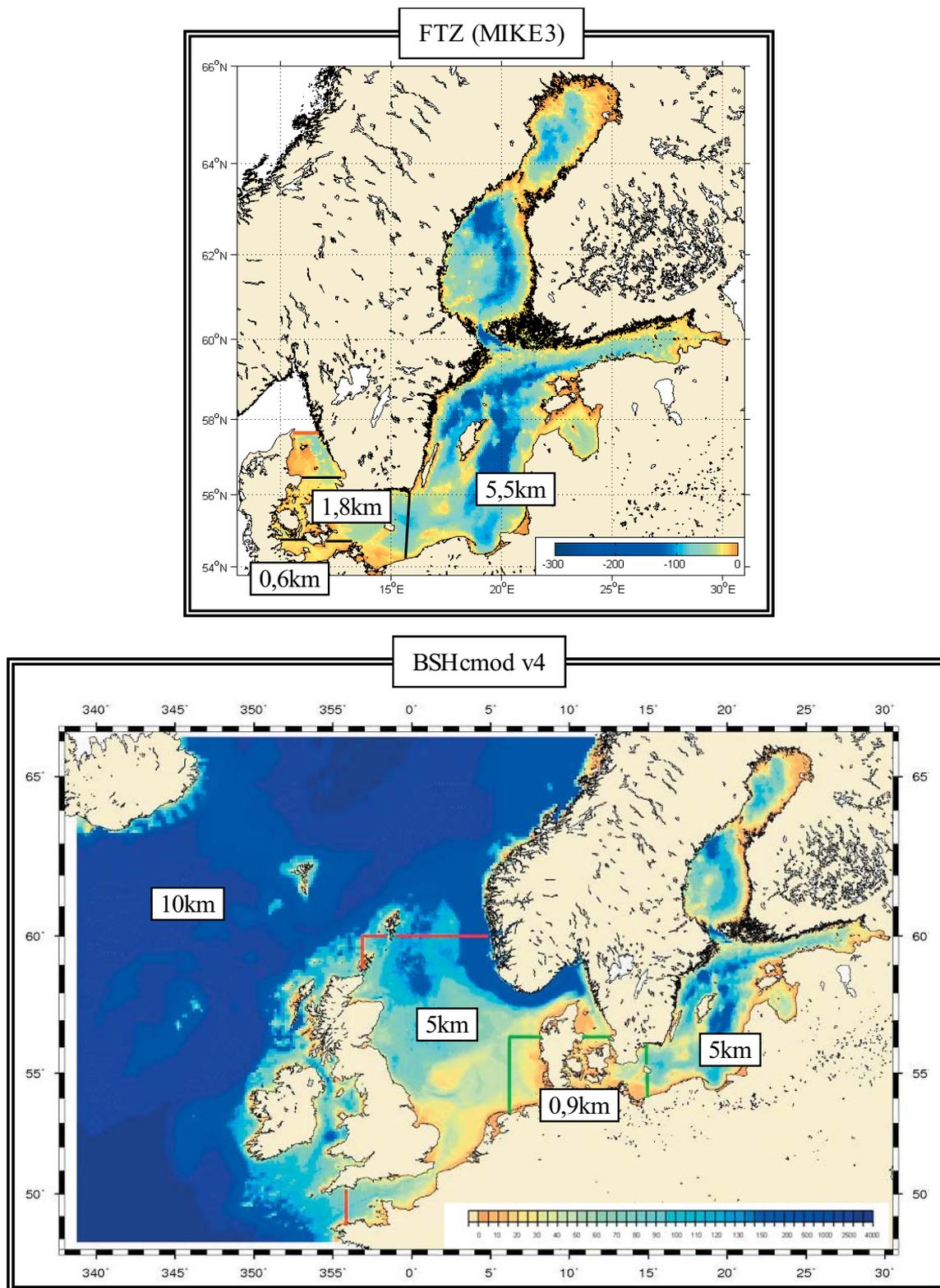


Abb. 1: Modellgebiete, Topographien und horizontale Auflösung der beiden Modelle bei ähnlicher Farbskala. Oben: das am FTZ eingesetzte Modell auf Basis der MIKE3 Software des DHI; unten: das am BSH entwickelte und operationell betriebene Modell BSHcmod v4

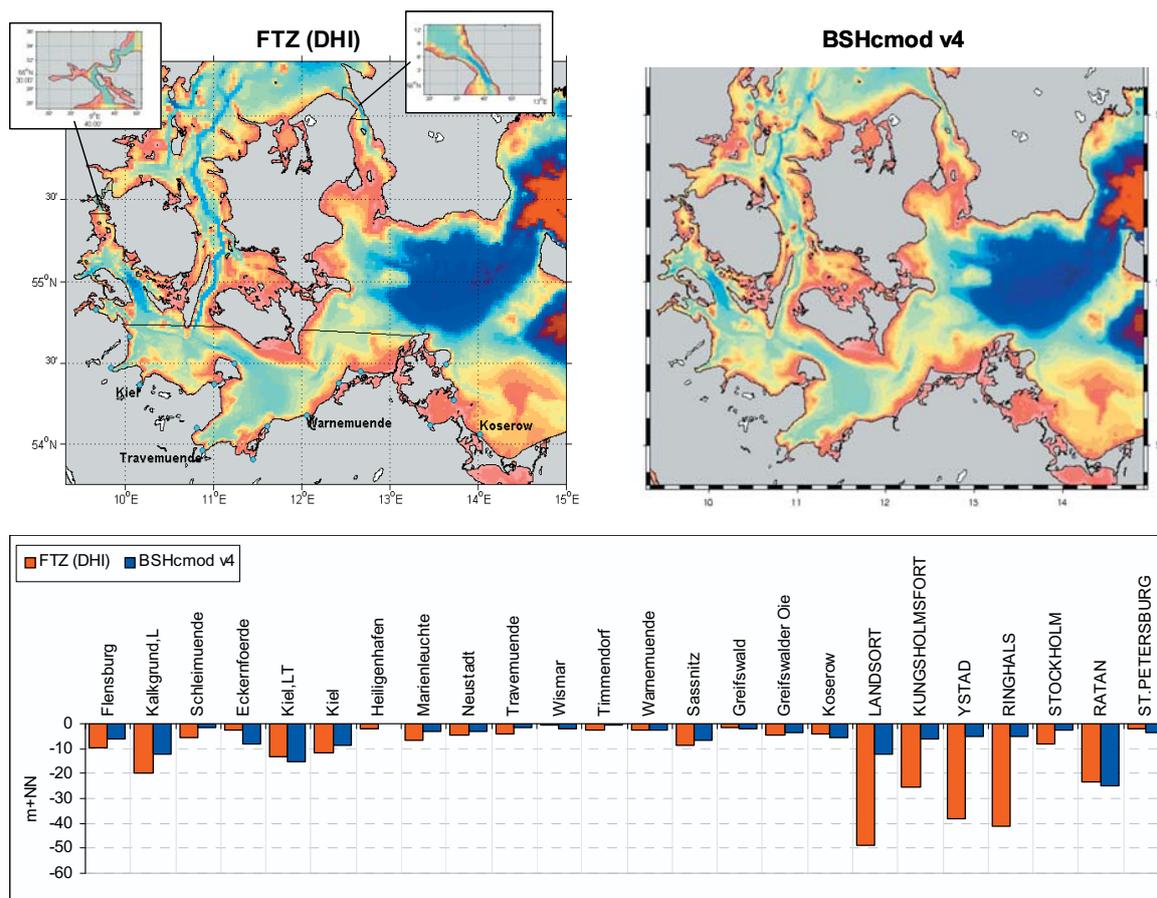


Abb. 2: Topographie der beiden Modelle in der westlichen Ostsee bei gleicher Farbskala und Modell-tiefen an 17 deutschen, sechs schwedischen und einem russischen Pegelort

nähe, Unterschiede auf. Auch die Topographien der feineren Modelle sind nicht identisch. Unterschiede treten hier vor allem im Bereich der Belte und im Sund auf (Abb. 2).

Das Balkendiagramm in Abb. 2 unten vergleicht die Tiefen der beiden Modelle an den Pegelorten. Die großen Unterschiede bei einigen der schwedischen Pegel sind unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Position von Pegelorten im groben Gitter des BSH-Modells zum Teil in repräsentativere Gitterzellen verlegt wurde. An den meisten anderen Pegeln haben die Modelle ähnliche Tiefen, wobei keines der Modelle im Trend höher oder tiefer liegt.

Bei der vertikalen Auflösung gibt es ebenfalls Unterschiede zwischen den Modellen. Das BSH-Modell benutzt verallgemeinerte vertikale Koordinaten (DICK et al., 2008). Die Koordinaten des DHI-Modells folgen der Topographie. Praktisch haben beide in den benutzten Versionen in den oberen 20 m eine Auflösung von etwa 2 m. In tieferen Schichten nimmt die Schichtdicke im BSH-Modell zu, schließt aber mit einer dünnen Bodenschicht ab.

## 2.2 Physikalische Parametrisierung

In Tab. 1 sind die wichtigsten Merkmale der Modellsysteme sowie ihre numerische Realisation zusammengestellt. Physikalisch interessante Unterschiede betreffen die Turbulenz- und die Eismodellierung. Die Beschreibung der Turbulenz erfolgt in MIKE3 anhand eines gemischten Smagorinsky/k-ε Modells, im Modell des BSH anhand eines Mischungs-

wegsansatzes. Eisbildung wird im BSH-Modell mit einem gesonderten Eismodell prognostiziert, für die Simulationen mit MIKE3 wurde der Impulseintrag aus der Atmosphäre in Bereichen mit Eisabdeckung modifiziert.

Über eisfreien Flächen wurde die Parametrisierung des Impulseintrages aus der Atmosphäre für den Modellvergleich in beiden Modellen gleich definiert. In Abb. 3 sind verschiedene empirische Windschubansätze sowie neuere Messdaten von Sturmtiefs aufgetragen. Zum einen wurde der gebräuchliche Ansatz von SMITH und BANKE (1975) gewählt, wobei der Windschubkoeffizient für Windgeschwindigkeiten ab 30 m/s konstant gehalten wurde (cd1). Um den Einfluss unterschiedlicher Windschubkoeffizienten zu betrachten, wurde ein zweiter Ansatz benutzt, der sich eher an den Sturmtiefmessdaten orientiert und zu etwas geringeren Windschubkoeffizienten führt (cd2) (BRUSS et al., 2009).

In SEBOK-A wurde zusätzlich der Impulseintrag aus der Atmosphäre als Rückkopplung aus dem am FTZ verwendeten spektralen Seegangmodell anhand der dort iterativ bestimmten Windschubspannungen untersucht (BRUSS u. MAYERLE, 2009). Ein Vergleich dieses Ansatzes konnte im Rahmen des Modellvergleiches nicht stattfinden. Gekoppelte Strömungs-Seegangs-Simulationen wurden am BSH nur zur Rekonstruktion des Sturmes von 1872 ausgeführt.

Tab. 1: Gegenüberstellung der wesentlichen Merkmale der beiden Modelle

	FTZ (MIKE3)	BSHcmod v4
Modellgleichungen	3D reynoldgem. Navier-Stokes (artificial compressibility), Massenerhaltung	primitive, nichtlineare Flachwassergleichungen
Turbulenz	Turbulenzmodell	Mischungswegansatz
Gitter	Arakawa – C – Gitter	
hor. Koordinaten	x, y	$\lambda, \varphi$
vert. Koordinaten	z, „bottom fitted“	Spezifikation genereller Vertikalkoordinaten
Schichtdicke	2m, unterste variabel	Ostsee: bis 20m Tiefe etwa 2m
prognostische Variablen	u, v, z, T, S, Turbulenzparameter	u, v, $\Delta z$ , T, S, Eisparameter
Anfangswerte T, S	Klimatologie - Monatsmittel	
Anfangswert Wasserstand	$z(x,y,Tag)=BSH_{cmod}(x,y,\overline{2002})-BSH_{cmod}(L,\overline{2002})+Pegel(L,Jahr)+\alpha(x,y)*(Pegel(L,Jahr,\overline{Tag})-Pegel(L,\overline{Jahr}))$	$\zeta(\lambda,\varphi,Tag)=BSH_{cmod}(\lambda,\varphi,\overline{2002})+\alpha(\lambda,\varphi)*Pegel(L,Jahr,Tag)$
Randbedingung Ostsee/Nordsee	Pegeldaten Ringhals oder aus BSHcmod	berechnet, innerhalb des Modellgebietes
Windschubbeiwert Cd	$Cd=0.63*10^{-3}+0.066 W $ , konstant ab $W=30m/s$	
Cd unter Eis	Null	modifiziert durch Eis
Korrektur Modellnull/NN	keine Korrektur (im Kattegat ist Modellnull=NN)	$-(BSH_{cmod}(\lambda,\varphi,\overline{2002})+\alpha(\lambda,\varphi)*BSH_{cmod}(L,\overline{2002}))$

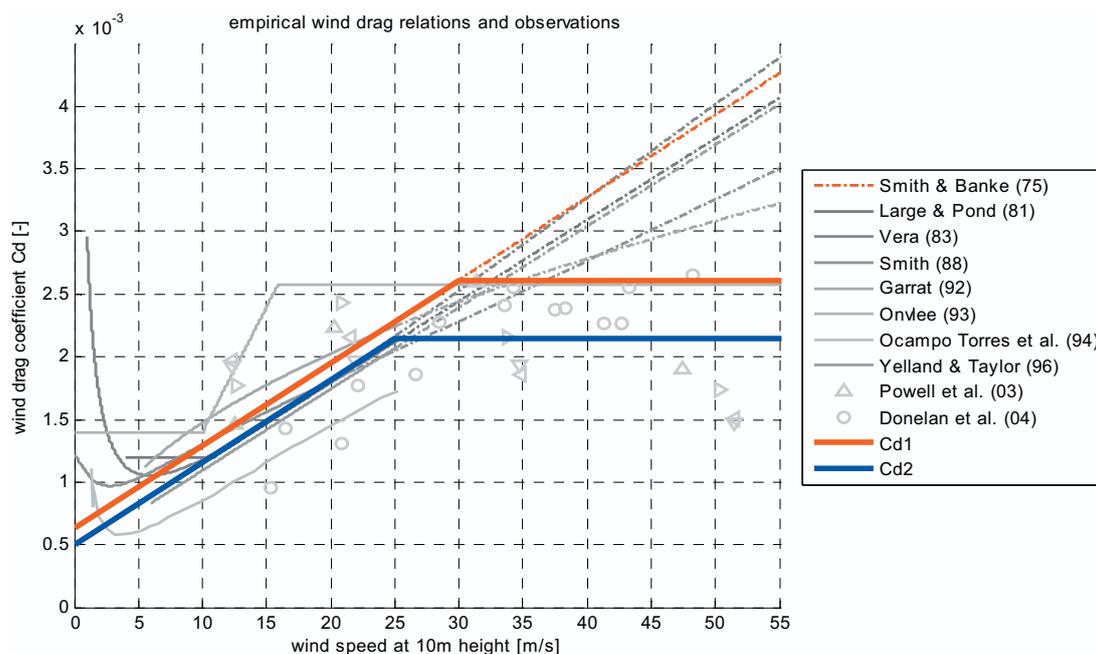


Abb. 3: Empirisch bestimmte Windschubkoeffizienten und neuere Sturmtiefmessdaten

### 2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Die Anfangsbedingungen für Temperatur und Salzgehalt sind, wie bei allen Simulationen in MUSTOK, in beiden Modellen klimatologische Monatsmittel (JANSSEN et al., 1999). Eisparameter werden im BSH-Modell als Anfangswerte für die Eismodellierung und im FTZ-Modell direkt und zeitlich konstant für die Modifikation des Impulseintrags aus der Atmosphäre genutzt. Sie wurden für den Starttermin der Modellrechnungen am BSH nach Eiskarten digitalisiert. Die Verteilung des Anfangswasserstandes wurde über Archivdaten (Jahr 2002, Modellversion v3) aus der Wasserstandsvorhersage des BSH an das in Landsort gemessene Tagesmittel des Wasserstands gekoppelt. Experimente mit unterschiedlichen Startbedingungen zeigen in BSH-Simulationen eine schnelle Abnahme der Differenzen in den Wasserständen mit zunehmender Simulationsdauer (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009a).

Der offene Rand liegt für das BSH-Modell der Nord- und Ostsee im Norden auf Höhe der Shetlandinseln, im Westen bei Plymouth. Dort erhält es Wasserstandsinformationen aus dem barotropen Nordostatlantikmodell des BSH-Systems und aus Gezeitenvorausberechnungen für 14 Partiaitiden. In SEBOK-A wird am offenen Rand auf Höhe der Pegelstation Ringhals im Kattegat der Wasserstand vorgeschrieben. Für die beiden Hindcastrechnungen der Stürme Februar 2002 und November 2006, die zum Modellvergleich dienen, wurden im FTZ-Modell gemessene Wasserstände des Pegels Ringhals (Daten SMHI) am offenen Rand angesetzt. Der Einfluss der unterschiedlichen Modellgebiete auf die Austauschprozesse zwischen Nord- und Ostsee wird in Kap. 4 ausführlich beschrieben. Zuflüsse aus dem Binnenland wurden im Projekt MUSTOK in beiden Modellen einheitlich durch mittlere Werte berücksichtigt.

## 2.4 Bezugsniveau

Aufgrund des physikalischen Unterschieds zwischen Nullflächen im Modell und NN-Flächen besteht in hydrodynamisch-numerischen Modellen eine modellimmanente, räumlich variable Abweichung des Modellniveaus von NN. Zum Vergleich mit Wasserstandsbeobachtungen wurden deshalb die mit dem BSH-Modell simulierten Wasserstände auf NN korrigiert (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009a). Die Korrekturwerte entsprechen etwa dem mittleren Modellwasserstand des Jahres 2002 und variieren zwischen 0,16 m in Ringhals und 0,26 m in Koserow. In Landsort beträgt der Korrekturwert 0,33 m.

Bei Vorgabe des Wasserstandes am offenen Rand von hydrodynamischen Modellen wird das Modellnullniveau von den Randwerten bestimmt. Eine Korrektur für die Ergebnisse der Simulationen mit dem Modell am FTZ wird nicht durchgeführt, da hier das Modellniveau im Kattegat durch die Vorgabe von Pegeldata mit NN übereinstimmt und damit in der südwestlichen Ostsee nur geringe Unterschiede zwischen Modellnullniveau und NN bestehen.

Der Vergleich mittlerer oder absoluter Wasserstände zwischen den beiden Modellen wird von den unterschiedlichen Modellnullflächen bzw. deren Korrektur erschwert. Da die korrekte Reproduktion von Wasserstandsauslenkungen für die Untersuchung von Sturmverläufen jedoch entscheidender ist, wurden neben den graphischen Vergleichen hauptsächlich die Standardabweichungen der Differenzen zu den Messdaten betrachtet.

## 3. Verifizierung und Vergleich der modellierten Wasserstände

Zum Vergleich der simulierten Wasserstände beider Modelle untereinander sowie zur Verifizierung der Modellergebnisse mit Hilfe von Beobachtungen wurden vier deutsche Pegel (Kiel-Holtenau, Travemünde, Warnemünde und Koserow [Abb. 2], Daten WSA Kiel und Lübeck) verwendet. Ein Vergleich der Wasserstände an der Schwedischen Station Landsort (Daten SMHI) erfolgt in Kap. 4.

Erstes Kriterium für die Güte einer Wasserstandssimulation ist die Güte der Reproduktion des meteorologischen Antriebs. Für den Modellvergleich wurden die jüngeren Sturmhochwasser vom Februar 2002 und November 2006 simuliert. Als Antrieb wurden jeweils die ersten 12 Stunden der zeitnächsten Vorhersage mit Modellen des DWD (2002 GM/LM bzw. 2006 GME/COSMO-EU) genutzt. Abb. 5 gibt einen Eindruck der Wind- und Luftdruckverteilungen der Stürme jeweils zum Zeitpunkt der höchsten Windgeschwindigkeiten.

Die stündlichen meteorologischen Vorhersagen wurden auf die jeweiligen Modellgitter interpoliert. Zum einen unterscheiden sich, wie oben beschrieben die Modellgitter, d.h. die Gitterpunkte liegen in beiden Modellen an unterschiedlichen Orten, zum anderen wurden unterschiedliche Interpolationsverfahren verwendet. Beides kann bei der kleinräumigen und komplexen Land-Wasser-Verteilung in der westlichen Ostsee zu unterschiedlicher Gewichtung der Werte an den Gitterpunkten der meteorologischen Modelle (Gitterabstand LM und COSMO-EU etwa 7 km) führen. Daher wurden zunächst die beiden auf die jeweiligen Modellgitter interpolierten Windfelder miteinander und mit Messdaten verglichen. Für den Vergleich mit Messungen wurde die küstennahe Messstation Fehmarn (Daten DWD) sowie Daten der Messboje Darss (BSH) ausgewählt (Abb. 4). An der Station Messboje Darss ist dabei ein geringerer Landeinfluss zu erwarten.

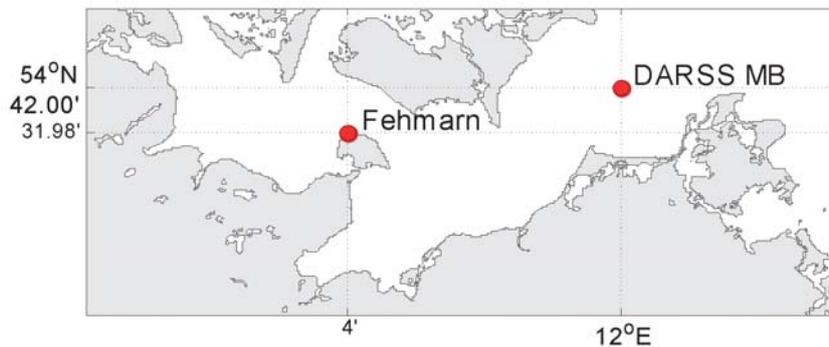


Abb. 4: Stationen für den Vergleich der Winddaten

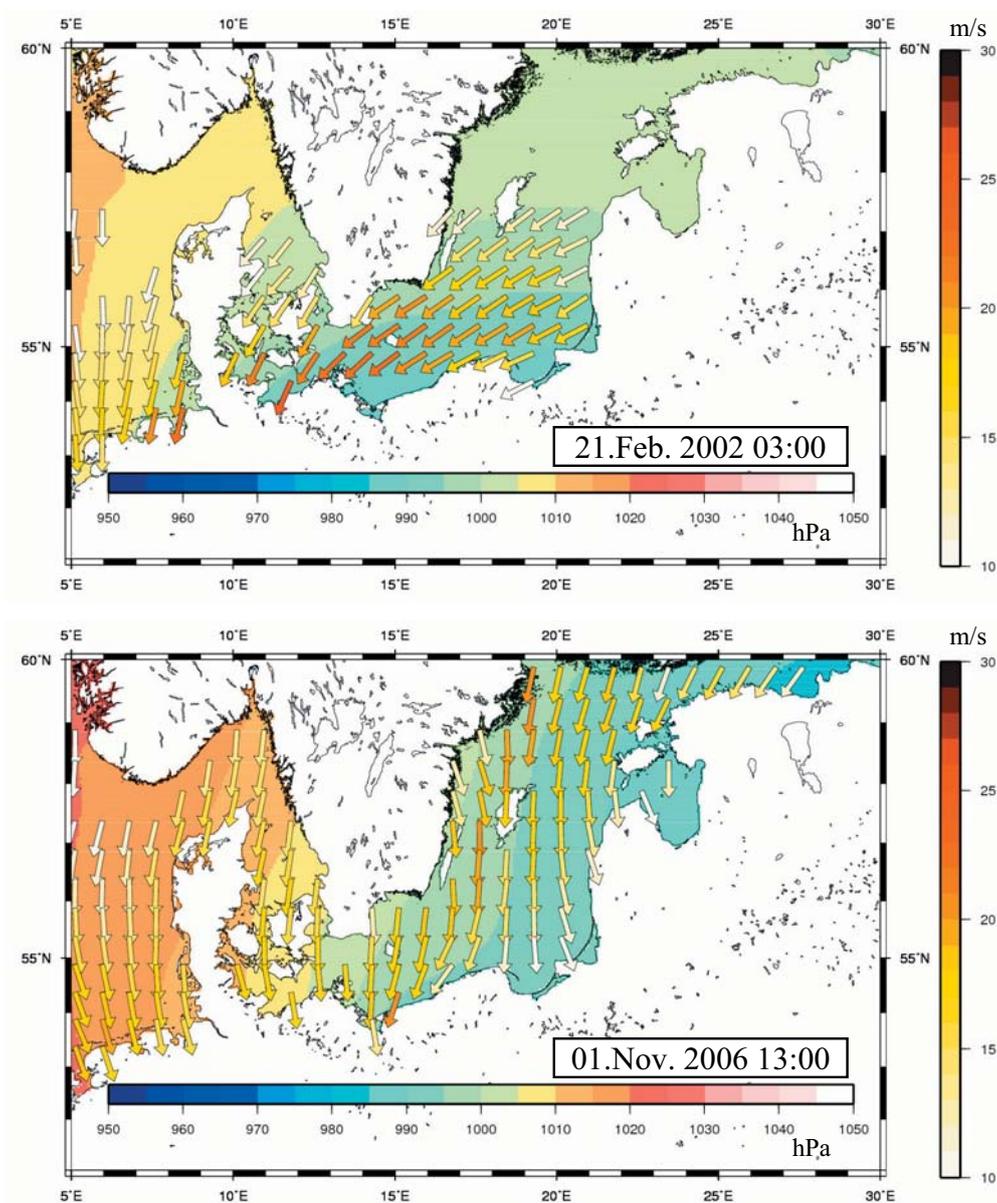


Abb. 5: Windverteilung über der südlichen Ostsee am 21. 2. 2002 um 3 Uhr UTC und am 1. 11. 2006 um 13 Uhr UTC (Windgeschwindigkeiten >10 m/s in jedem 10 Wasserpunkt, im Hintergrund der Bodendruck in hPa)

## 3.1 Sturm Februar 2002

Das Sturmhochwasser am 21. 2. 2002 wurde durch Nordoststürme über der Ostsee verursacht (Abb. 5). Es war neben dem Ereignis vom 1. 11. 2006 und dem vom 3./4. 1995 das schwerste Sturmhochwasser der letzten 50 Jahre. Die Windgeschwindigkeit in der Zeit vom 18. 2. 2002 bis zum 23. 2. 2002 wurde an der Messboje Darss (Abb. 6) gut durch die Modelldaten wiedergegeben. An der Station Fehmarn wird die Windgeschwindigkeit vor allem auch während des eigentlichen Sturms am 21. Februar tendenziell überschätzt. Die Darstellungen auf den beiden Modellgittern unterscheiden sich kaum. Beim Vergleich der Windrichtungen an der Messboje Darss in Abb. 6 unten ist die Übereinstimmung beider Modelle mit den Messdaten, abgesehen von den Schwankungen während der Phase niedriger Windgeschwindigkeiten zwischen dem 17. und 18. sehr gut.

In Abb. 7 sind gemessene sowie unter Verwendung des Windschubansatzes nach SMITH und BANKE (1975) modellierte Wasserstandsverläufe des Sturmes vom Februar 2002 für vier deutsche Pegel dargestellt. Im Falle des BSH-Modells wurden die Wasserstände anhand der oben beschriebenen Korrekturwerte, die an den betrachteten Pegeln zwischen  $-0,17$  cm und  $-0,26$  cm variieren, korrigiert.

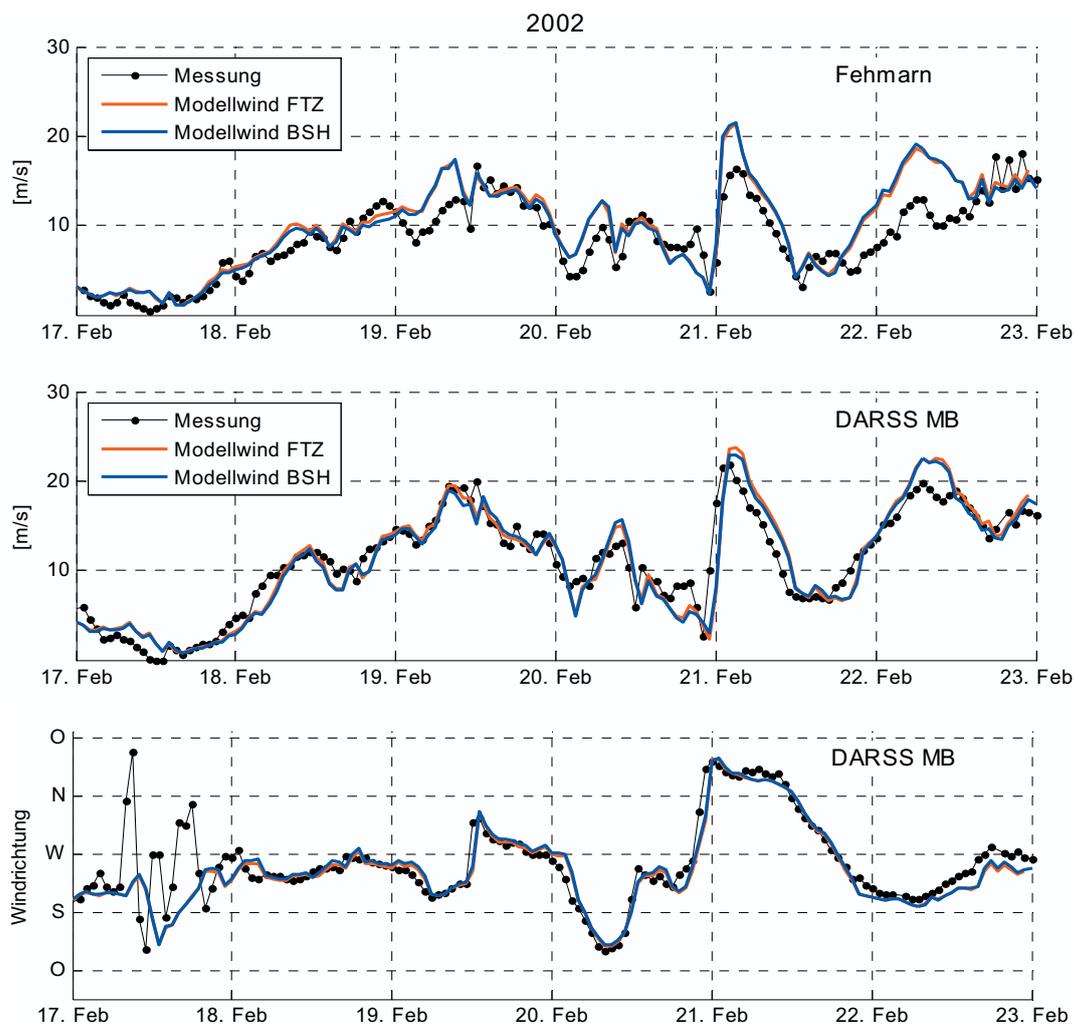


Abb. 6: Vergleich der Windgeschwindigkeiten und Richtungen interpoliert auf beide Modellgitter mit Messdaten für den Sturm Februar 2002

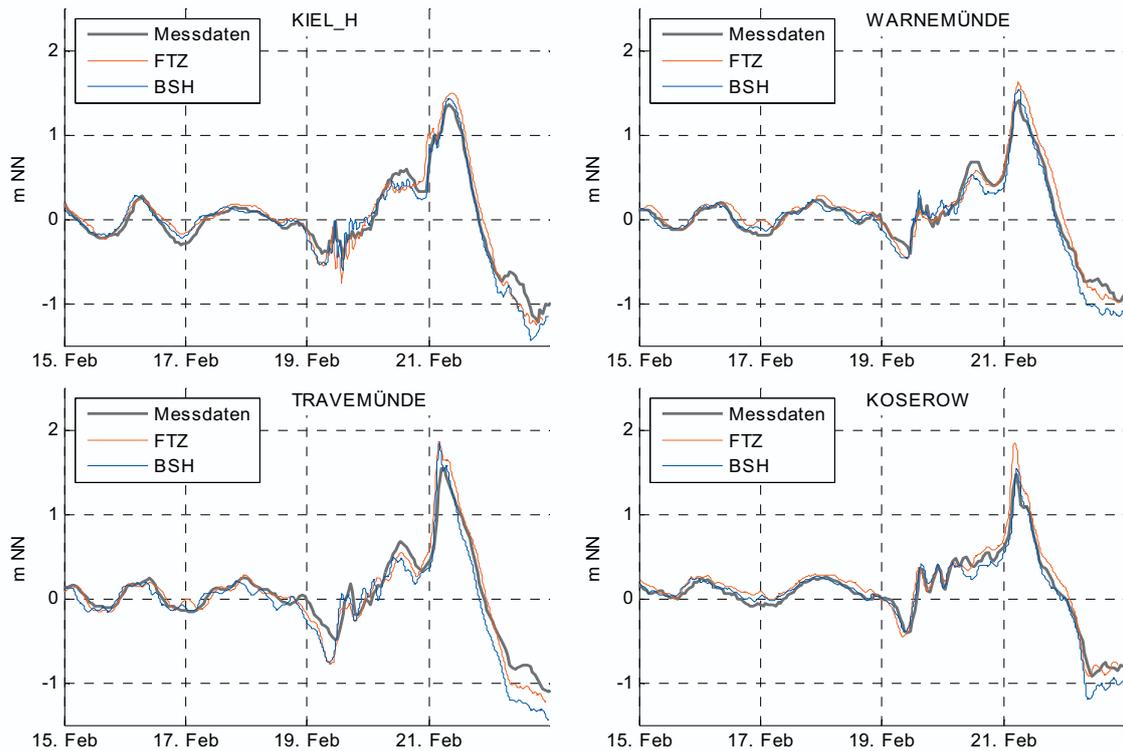


Abb. 7: Wasserstand an vier deutschen Pegeln für beide Modelle unter Verwendung des modifizierten Windschubansatzes nach SMITH und BANKE 1975 im Vergleich mit Messungen für den Sturm 2002

Der generelle Verlauf des Wasserstandes wird in beiden Modellen ähnlich gut wiedergegeben. Sowohl die Schwankungen vor, als auch die Variation des Wasserstandes während des Sturmes am 21. Februar werden zufriedenstellend erfasst. Die Amplitude des maximalen Wasserstandsanstieges wird durch beide Modelle überschätzt.

Abb. 8 stellt graphisch die statistische Verifikation der Modelle gegen die Messdaten für den Zeitraum vom 13. bis zum 23. Februar dar. Die Balken im oberen Diagramm entsprechen der Abweichung der Scheitelwasserstände (oberer Balkenrand) vom Mittelwert über den betrachteten Zeitraum (unterer Balkenrand). Dargestellt sind grau die Messdaten, blau und rot die Modellergebnisse unter Verwendung des modifizierten Windschubansatzes nach SMITH und BANKE (1975) (cd1), wie sie in Abb. 7 zu sehen sind, und cyan und magenta die Modellergebnisse unter Verwendung des in Kapitel 2.2 beschriebenen zweiten, etwas niedrigeren Windschubansatzes (cd2).

Bei der Betrachtung der mittleren gemessenen Wasserstände (unterer grauer Balkenrand) fällt auf, dass dieser von West nach Ost um ca. 10 cm ansteigt. Dies lässt sich durch die, außer während des Sturmes, vornehmlich westlichen Windrichtungen über der westlichen Ostsee im Zeitraum zwischen dem 13. 2. und 23. 2. erklären (vgl. Abb. 6 unten). Beide Modelle folgen diesem Trend. Die mittleren Wasserstände im FTZ-Modell liegen mit Abweichungen zwischen  $-2,8$  cm und  $+7$  cm tendenziell über, im BSH-Modell mit Abweichungen zwischen  $-1,6$  cm und  $-8,9$  cm unter den Messwerten.

Die Wasserstandsamplitude, also die maximale Auslenkung über dem Mittelwert, ist bei beiden Modellen, unter Verwendung des Windschubansatzes nach SMITH und BANKE (cd1), etwas zu groß. Eine Ursache hierfür sind vermutlich die Abweichungen des Modellwinds von der Beobachtung (Abb. 6). Um die andere mögliche Ursache, den Einfluss des Windschubkoeffizienten, zu untersuchen, wurden mit beiden Modellen Rechnungen mit einem

zweiten Ansatz (cd2) durchgeführt. In Abb. 8 ist die resultierende Reduktion der Amplituden deutlich erkennbar. Die Variationen des Wasserstandes bei unterschiedlichem Ansatz für den Windschubkoeffizienten sind in beiden Modellen von etwa gleicher Größenordnung. Die Wasserstandsauslenkungen der Messdaten werden durch die Modelle, besonders durch das des FTZ mit (cd2) tendenziell besser als mit dem ersten Ansatz wiedergegeben. Die Kompensation der teilweise zu hohen Windgeschwindigkeiten durch die Reduktion des Windschubkoeffizienten führte, vor allem während des Sturmes, zu einer Verbesserung der Modellergebnisse.

Die größten Unterschiede zwischen den beiden Modellen treten unter den ausgewählten Stationen während des Sturmes in Koserow auf. Durch die kleinen Wassertiefen in weiten Bereichen der Pommerschen Bucht ist der Einfluss von Topographiedifferenzen zwischen den Modellen hier vergleichsweise groß. Aus Abb. 2 ist zu entnehmen, dass die Topographie des FTZ-Modells um Koserow etwas flacher ist, was lokale Topographieunterschiede als Ursache für die höhere Wasserstandsauslenkung im Süden der Pommerschen Bucht plausibel erscheinen lässt.

Im unteren Diagramm von Abb. 8 sind die Standardabweichungen der Differenzen zwischen Modell und Messdaten dargestellt. Im Mittel liegen die Werte um 11 cm und immer unter 16 cm. Damit sind alle Modellergebnisse für die Simulation eines Sturmereignisses als gut zu bewerten. Im Vergleich zwischen den einzelnen Stationen liegen die Fehler vor allem in Travemünde vergleichsweise hoch. Ursache hierfür kann die Lage des Pegels im Bereich der komplexen Geometrie der Travemündung sein, die mit beiden Modellauflösungen nicht hinreichend abgebildet wird. Im Vergleich zwischen den beiden Windschubkoeffizienten ergeben sich für den niedrigeren Ansatz (cd2) aus oben genannten Gründen besonders im

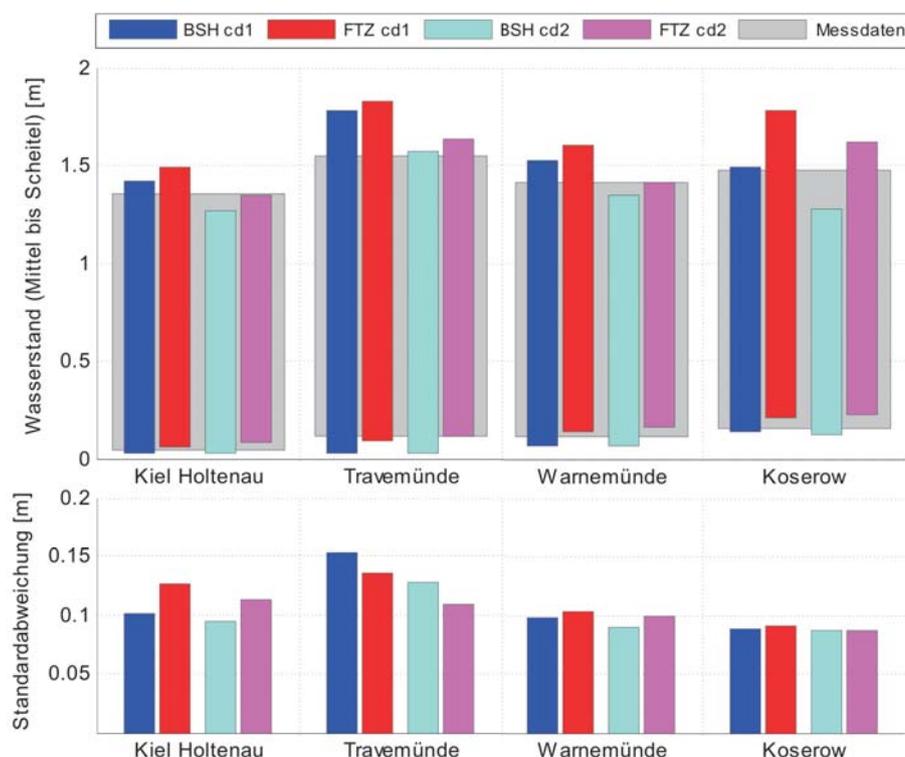


Abb. 8: Statistische Verifikation der Modelle für den Zeitraum 13.–23. Februar 2002, unter Verwendung zweier unterschiedlicher Windschubansätze

Modell des FTZ die etwas besseren Werte. Im Mittel haben die Modelle des FTZ und des BSH an allen vier Stationen für die beiden Windschubansätze für den Sturm im Februar 2002 vergleichbare Ergebnisse erzeugt.

### 3.2 Sturm November 2006

Dem eigentlichen Sturm am 1. November 2006 gingen einige Tage mit wechselhaften und teilweise stürmischen Winden und entsprechend deutlichen Schwankungen im Wasserstand voraus. Die gemessenen Windgeschwindigkeiten am 1. November sind zwar in der Größenordnung den Windverhältnissen des Sturmes vom Februar 2002 vergleichbar, jedoch ist das Windfeld hier während des Sturmes deutlich nördlicher ausgerichtet (vgl. Abb. 5 und Abb. 9).

In Abb. 9 sind an den Stationen Fehmarn und Messboje Darss die beiden Modellwinde den gemessenen Daten gegenübergestellt. Die Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Windgeschwindigkeiten ist generell gut. Zwischen den Modellwinden gibt es ebenfalls nur geringe Unterschiede. Abweichungen gibt es während des Sturmes am 1. November. Zum einen wird die gemessene Windspitze von 24 m/s an der Messboje Darss bei beiden

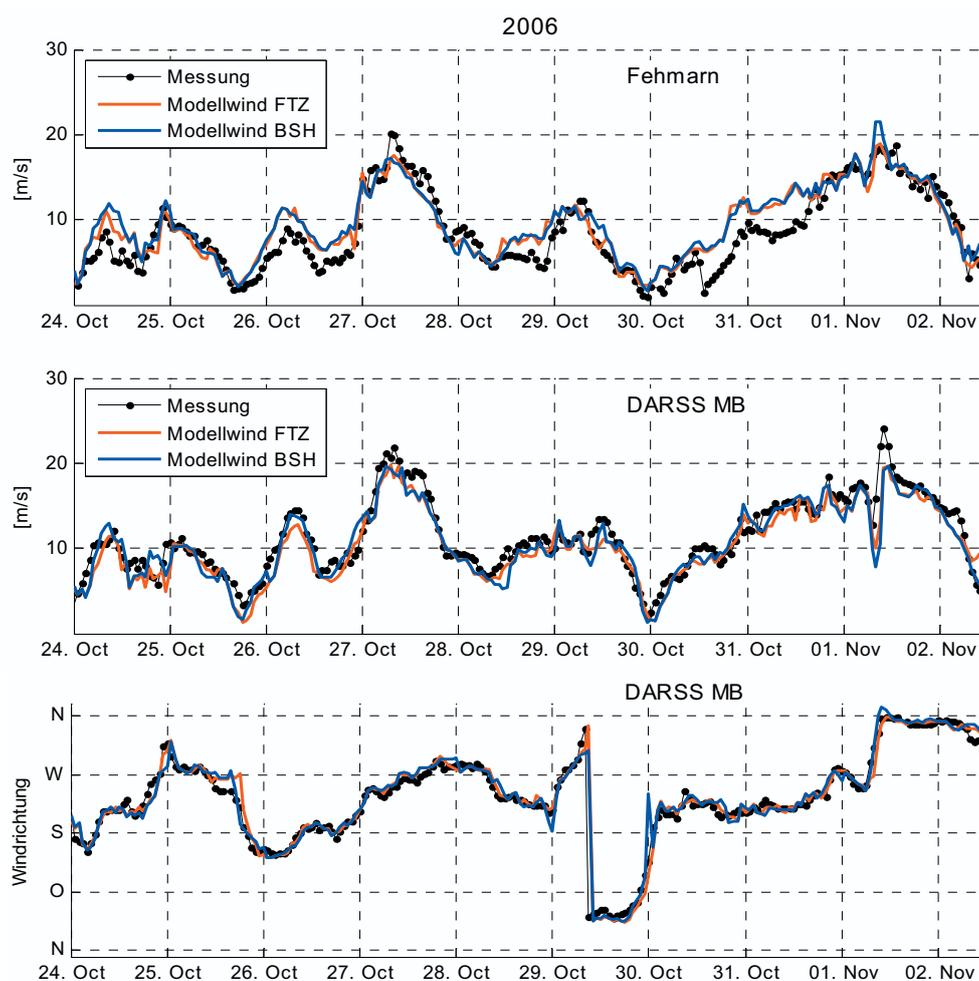


Abb. 9: Vergleich der Windgeschwindigkeiten und Richtungen interpoliert auf beide Modellgitter mit Messdaten für den Sturm November 2006

Modellwinden um ca. 5 m/s unterschätzt. Zum anderen liegen die Windgeschwindigkeiten des Modellwindes des BSH-Modells am 1. November kurzfristig in Fehmarn ca. 3 m/s über dem FTZ-Modellwind und den Messdaten.

Die Übereinstimmung der Windrichtung beider Modelle mit den Messdaten an der Messboje Darss (Abb. 9 unten) ist über den gesamten Zeitraum sehr gut.

In Abb. 10 sind die Wasserstandszeitreihen der beiden Modelle den Pegeldata an den vier Stationen im Zeitraum 20. Oktober bis 2. November 2006 gegenübergestellt. Die Simulationen wurden unter Verwendung des modifizierten Windschubansatzes nach SMITH und BANKE (cd1, 1975) durchgeführt. Zunächst fallen die großen Schwankungen vor dem eigentlichen Sturm zwischen 25. und 1. November als Folge der oben beschriebenen variablen Windbedingungen auf. Die Schwankungen des aufgezeichneten Wasserstandes mit sowohl negativen als auch positiven Auslenkungen, die eine komplexe Reaktion auf unterschiedliche treibende Kräfte darstellen, werden von beiden Modellen gut reproduziert. Die negativen Auslenkungen am 29. in Warnemünde und Koserow werden im BSH-Modell etwas besser erfasst. Das Hochwasser vom 1./2. November, das durch starken Nordwind verursacht wurde, wird im Verlauf ebenfalls gut getroffen, wobei die Scheitelwerte unterschätzt werden.

In Abb. 11 ist die statistische Verifikation der Modelle gegen die Messdaten für den Zeitraum vom 19. Oktober bis zum 4. November graphisch dargestellt. Im oberen Diagramm ist wie in Abb. 8 die Differenz zwischen Scheitelwasserstand und Mittelwert des betrachteten Zeitraumes als Balken aufgetragen. Bei der Betrachtung der mittleren Wasserstände (unterer Balkenrand) zeigen beide Modelle nur geringe Abweichungen. Die Wasserstände des FTZ-Modells liegen wieder tendenziell und vor allem im Osten etwas höher als die durch die oben beschriebenen ortsabhängigen Korrekturwerte angepassten BSH-Modelldaten. Die Amplituden der Wasserstände der Pegeldata werden an allen 4 Stationen durch beide Modelle und etwas stärker durch das FTZ-Modell unterschätzt.

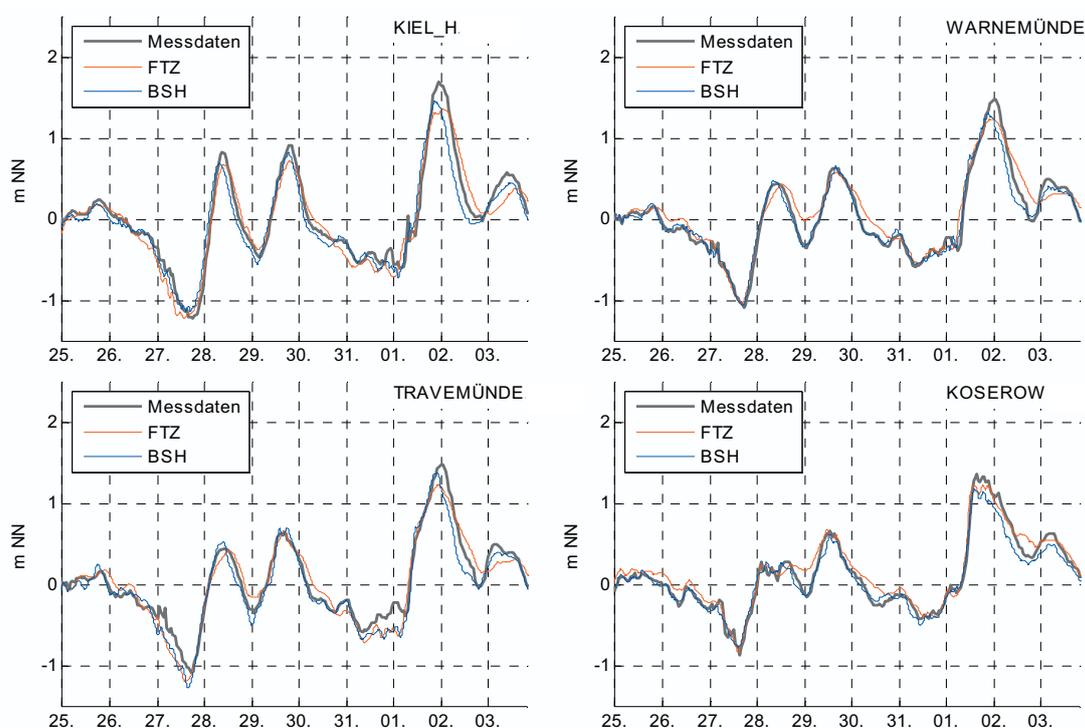


Abb. 10: Wasserstand an vier deutschen Pegeln für beide Modelle unter Verwendung des Windschubansatzes nach SMITH und BANKE 1975 im Vergleich mit Messungen für den Sturm 2006

Ursache für die Unterschätzung der Amplituden kann das Fehlen der kurzen Windspitze am 1. November in den Modellwindfeldern sein (vgl. Abb. 9 Windvergleich Messboje Darss). Die im Vergleich zum BSH-Modell kleinere Amplitude für Kiel und Travemünde im FTZ-Modell kann zudem eine Folge der lokal (um Fehmarn) kleineren Windspitze im FTZ-Modell sein. Die Standardabweichungen der Fehler beider Modelle im unteren Diagramm liegen mit 10 cm im Mittel und maximal 13 cm sogar unter den Werten der bereits guten Simulation des Sturmes vom Februar 2002. Vor allem in der Mecklenburger und Pommerschen Bucht zeigt das BSH-Modell etwas kleinere Fehler.

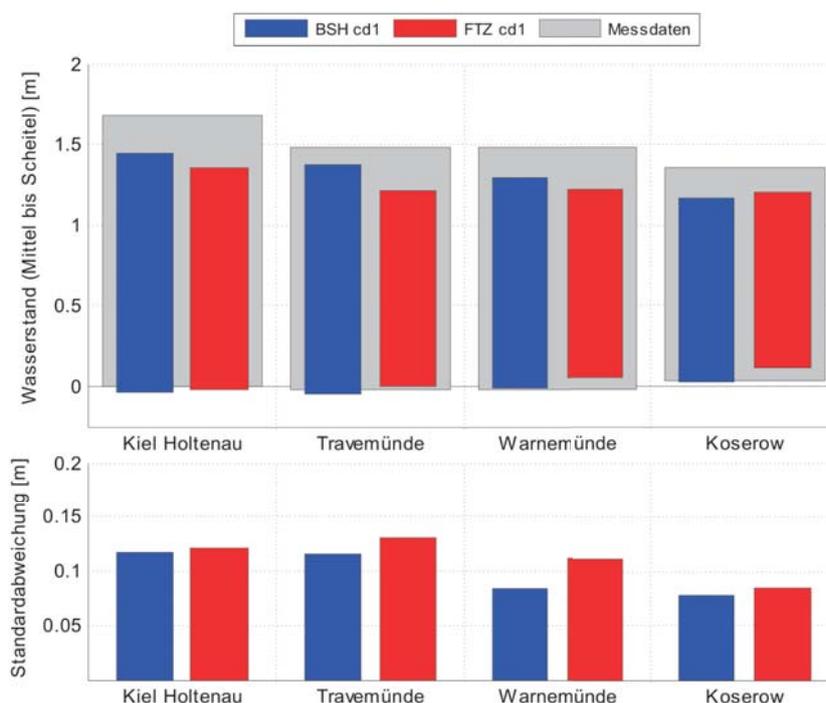


Abb. 11: Statistische Verifikation der Modelle für den Zeitraum 19. Oktober bis 4. November 2006

#### 4. Einfluss der unterschiedlichen Berücksichtigung des Wasseraustausches zwischen Nord- und Ostsee

Das am FTZ eingesetzte Strömungsmodell deckt die Ostsee inklusive Kattegat ab und hat die offene Grenze auf Höhe der schwedischen Station Ringhals im Kattegat. Das Modell des BSH umfasst Nord- und Ostsee. Ein wesentlicher Unterschied der hier vorgestellten Modellsysteme ist somit die Ausdehnung des Modellgebietes. Konkret bedeutet dieser Unterschied, dass im ersten Fall Randbedingungen am offenen Rand zur Nordsee definiert werden müssen, während im zweiten Fall der Austausch zwischen Nord- und Ostsee innerhalb des Modells berechnet wird. In diesem Kapitel wird untersucht, inwieweit die Ausdehnung des Modellgebiets einen Einfluss auf die berechneten Wasserstände der Ostsee während Sturmereignissen hat. Hierzu werden im Wesentlichen zwei Aspekte betrachtet: Volumentransporte zwischen Nord- und Ostsee, welche den Füllungsgrad der Ostsee beeinflussen und Wasserstände bei extremen Sturmhochwassern an einzelnen Stationen der südwestlichen Ostsee.

Der Wasserhaushalt der Ostsee wird bestimmt durch Flusswasserzufuhr, Niederschlag, Verdunstung und Wassertransport durch Belte und Sund. In beiden Modellen ist der Einfluss von Niederschlag und Verdunstung auf die Volumenbilanz vernachlässigt. Die Flusswasserzufuhr wurde in beiden Modellen für die Simulation 2002 (8. 2.–23. 2.) durch mittlere Werte beschrieben. In der Simulation 2006 (17. 10.–4. 11.) wurden im Modell des BSH abweichend aktuelle Werte aus einem hydrologischen Modell des SMHI für die Flusszufuhr in die Ostsee einschließlich Skagerrak und Kattegat gewählt. Daher werden in Kap. 4.1 Transporte nur für die Simulation 2002 verglichen.

Der Transport am offenen Rand im FTZ-Modell wird durch den Gradienten zwischen der Randbedingung und dem Wasserstand innerhalb des Modellgebietes bestimmt. Im Projekt MUSTOK wurde dazu der in Ringhals beobachtete Wasserstand räumlich konstant über den offenen Rand vorgegeben. Zum Vergleich oder bei fehlenden Beobachtungen wurden Wasserstände aus dem Modell des BSH als Randwerte genutzt. Abb. 12 zeigt für den Zeitraum im Februar 2002 beobachtete Wasserstände für Ringhals (SMHI), wie sie im FTZ-Modell als Randwerte vorgegeben werden, im BSH-Modell simulierte Wasserstände an der Station Ringhals und Wasserstände des BSH-Modells entlang der offenen Grenze des FTZ-Modells, die für eine Vergleichsrechnung ebenfalls zum Antrieb des FTZ-Modells verwendet wurden. Nach den ersten beiden Tagen liegt der im BSH-Modell simulierte Wasserstand an der Pegelposition Ringhals vorwiegend 0,1–0,2 m unter dem gemessenen. In anderen Bereichen des FTZ-Modellrandes treten jedoch größere Unterschiede zu den Pegeldaten auf. Während der Wasserstand am östlichen Rand die meiste Zeit gut durch den simulierten Wasserstand in Ringhals repräsentiert wird, liegt der westliche Randwert deutlich darunter, d.h. im BSH-Modell wird eine Neigung für den Wasserstand im Kattegat berechnet.

Ein Vergleich beider Modelle untereinander und mit gemessenen Werten umfasst Aussagen zur Güte der angenommenen Flusswasserzufuhr, der Güte der mit dem Modell des BSH simulierten Wasserstände in Ringhals und am offenen Rand des vom FTZ benutzten Modells und Aussagen zum Einfluss von über den Rand variierenden Wasserständen im Vergleich mit räumlich konstant angenommenen Wasserständen. In Kap. 4.2 werden zusätz-

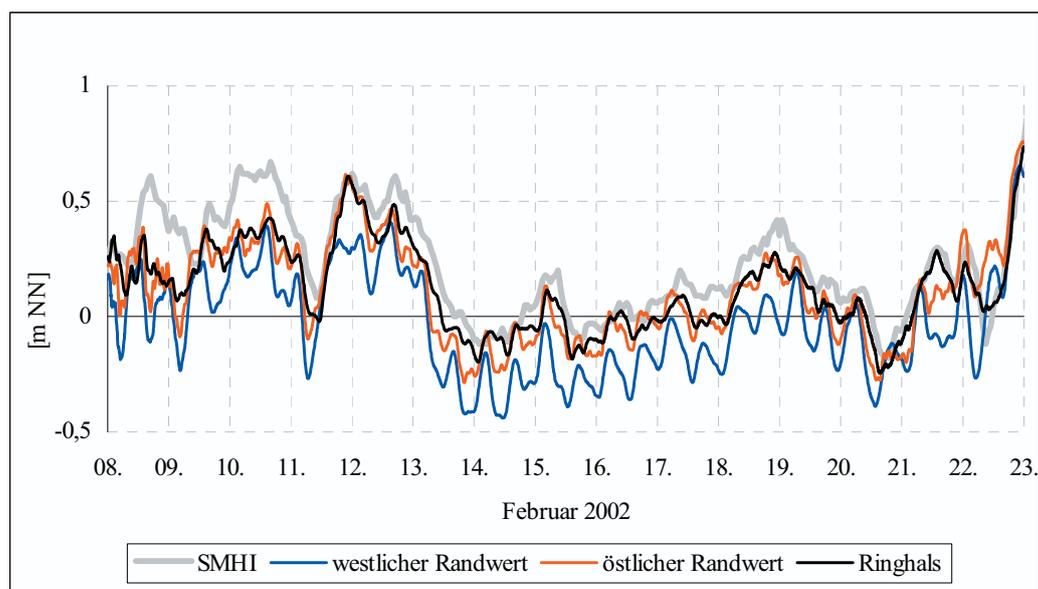


Abb. 12: Pegeldaten Ringhals (SMHI, grau) und Modellergebnisse des BSHcmod in Ringhals (schwarz), sowie Modellergebnisse des BSHcmod am offenen Rand des FTZ-Modells (blau und rot)

lich zeitliche Variationen des Wasserstands in Ringhals während der Modifikation einer ausgewählten Wetterlage betrachtet. Alle aufgeführten Aspekte des Vergleichs können hier in keiner Weise umfassend behandelt werden.

#### 4.1 Füllungsgrad und Massentransporte

Im Projekt MUSTOK wurde der Einfluss des mittleren Wasserstandes der Ostsee auf Sturmhochwasser intensiv diskutiert. Der Trend des am Pegel Landsort gemessenen Wasserstands kann als repräsentativ für die Schwankungen des mittleren Wasserstands der Ostsee angesehen werden (JANSSEN, 2002; BRUSS et al., 2009). Daher wurden die Wasserstände in Landsort und die Transporte durch Belte und Sund sowie durch verschiedene Schnitte innerhalb der westlichen Ostsee verglichen.

##### 4.1.1 Hindcast Stürme 2002 und 2006

Abb. 13 und Abb. 14 stellen die modellierten Wasserstandsverläufe am Pegel Landsort gemessenen Daten für die Zeiträume der beiden oben beschriebenen Hindcast Stürme gegenüber. Bei Berücksichtigung aller Zu- und Abflüsse in die Ostsee verlaufen in der operationellen Version des BSH die simulierten kumulativen Transporte und der Wasserstand in Landsort zeitlich parallel (MÜLLER-NAVARRA et al., 2003).

Im Oktober/November 2006 (Abb. 13) sind die beiden Modellwasserstände in Landsort ähnlich im Verlauf und Mittelwert und folgen den Pegeldaten des SMHI gut. Der Anstieg des Wasserstandes ab dem 30. Oktober wird in beiden Modellen wiedergegeben. Am Pegel Ringhals, dessen Pegeldaten als Randwerte des FTZ-Modells verwendet wurden, zeigte der Vergleich mit den Wasserständen des BSH-Modells eine gute Übereinstimmung.

Im Zeitraum des Februar 2002 sind am Pegel Landsort (Abb. 14) größere Unterschiede erkennbar. Der Anfangswasserstand der Ostsee wird für beide Modelle mit der in (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009a) beschriebenen Methode aus einer räumlichen Korrelation von Jahresmittelwerten zum Pegel Landsort berechnet, so dass das FTZ-Modell zu Beginn der Simulation in Landsort mit den gemessenen Daten übereinstimmt. Im BSH-Modell wird nur ein Teil der Unterschiede in den Anfangswerten berücksichtigt. Ein zeitlich konstanter Teil wird als Korrektur der Modellergebnisse verwendet (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009). Beim Start der Modellrechnungen am 8. Februar ist der gemessene Wasserstand in Landsort mit 42 cm bereits deutlich erhöht. Vom 8. bis zum 13. steigt er weiter bis auf ca. 0,6 m an. Dieser Anstieg wird in beiden Modellen und speziell im BSH-Modell etwas zu gering wiedergegeben. Danach fällt der gemessene Wasserstand bis zum 17. wieder bis auf ca. 0,4 m ab. In dieser Phase reagieren die Modelle unterschiedlich. Der am 13. noch zu geringe Wasserstand im FTZ-Modell passt sich bis zum 17. dem gemessenen Wert in Landsort durch geringes Abfallen an. Im BSH-Modell fällt der am 13. ebenfalls noch zu geringe Wasserstand bis zum 17. stärker, in der Tendenz ähnlich den Messwerten ab, wodurch die Differenz vom 13. noch etwas verstärkt wird. Vom 17. bis zum 22. folgen wieder beide Modelle den Schwankungen der gemessenen Daten, wobei der Mittelwert im BSH-Modell um etwa 15 cm konstant zu niedrig bleibt. Die hauptsächlich windbedingte starke Auslenkung des Wasserstandes in Landsort im Verlauf des 22. wird vom FTZ-Modell etwas besser erfasst.

Unter Verwendung der Randbedingungen aus dem Modell des BSH ergeben sich auch für die FTZ-Simulation niedrigere Wasserstände in Landsort als beobachtet. Ab dem 15. ist

der weitere Wasserstandsverlauf jedoch der ursprünglichen FTZ-Simulation näher als der des BSH. Ein Teil der Abweichungen könnte unabhängig von Modell und Randbedingungen dadurch erklärt werden, dass die Flusswasserzufuhr in dem betrachteten Zeitraum wahrscheinlich deutlich über mittleren Verhältnissen lag. Daten liegen nur für die Oder vor. Dort variierte der Zufluss zwischen 1158 und 1233 m<sup>3</sup>/s. Der Modellwert für den Oderzufluss betrug dagegen nur 522 m<sup>3</sup>/s.

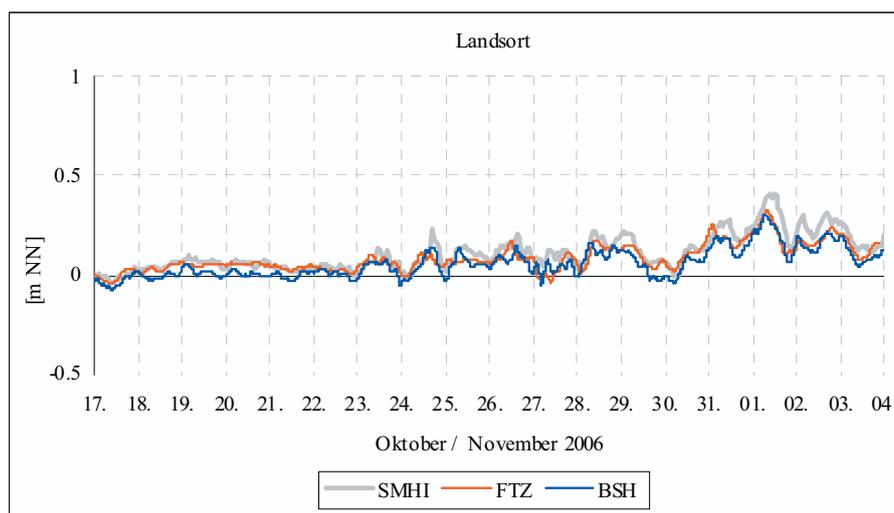


Abb. 13: Modellwasserstände und Pegeldaten in Landsort Oktober/November 2006

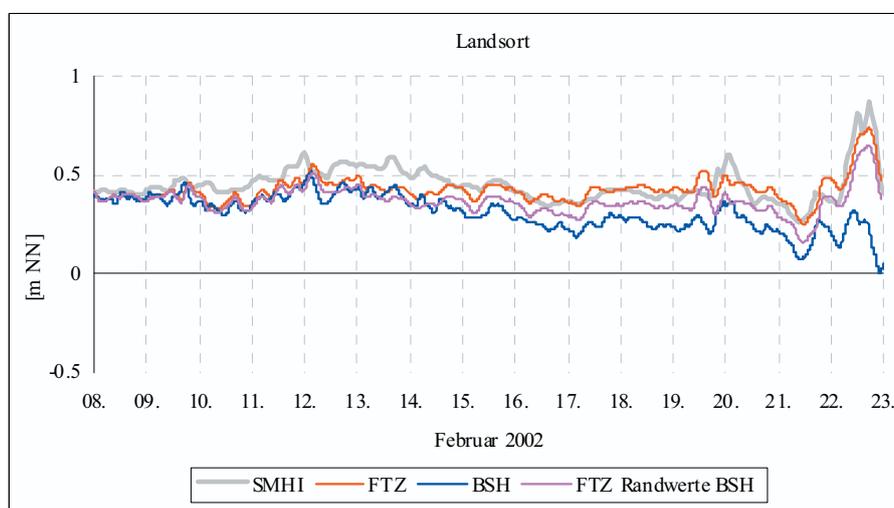


Abb. 14: Modellwasserstände und Pegeldaten in Landsort Februar 2002

Der Unterschied zwischen den Modellergebnissen liegt wahrscheinlich im Umgang mit der Abweichung der Nullfläche des jeweiligen Modells von NN. Ähnlich wie das BSH-Modell (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009) strebt auch das FTZ-Modell bei einem auf NN bezogenen Anfangszustand der Nullfläche des Modells zu. Allerdings ist im FTZ-Modell der Unterschied zwischen Modellnull und NN geringer, da das Modellniveau aufgrund der Randsteuerung im Kattegat mit Pegeldaten, dort mit dem NN-Niveau übereinstimmt.

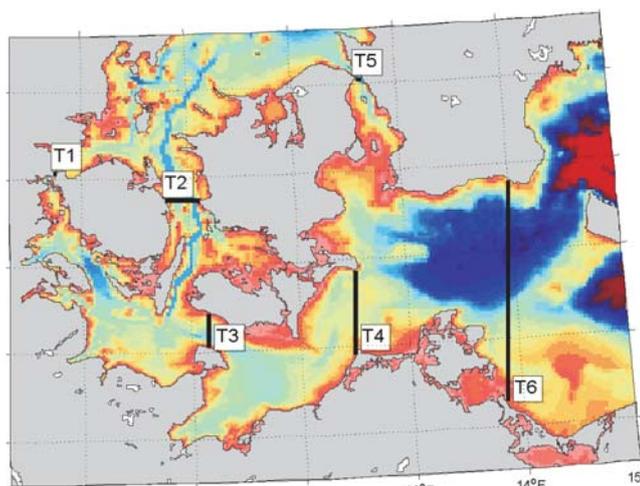


Abb. 15: Lage der Schnitte zur Berechnung der Transporte

Abb. 15 zeigt die ungefähre Lage der Schnitte, über welche die Transporte berechnet wurden. Entsprechend der unterschiedlichen Modellgitter sind die Schnitte im BSH-Modell entlang von geographischen Längen- bzw. Breitengraden, im FTZ-Modell entlang UTM-32-Projektionskoordinatenlinien orientiert. Der Schnitt über den Sund liegt im FTZ-Modell im Norden etwa bei Helsingborg und im BSH-Modell abweichend im Süden (Drogden-Schwelle). In Abb. 16 und Abb. 17 sind die kumulativen Volumentransporte beider Modelle in  $\text{m}^3$  durch die Schnitte T1–T6 für den simulierten Zeitraum im Februar 2002 dargestellt. Abb. 16 zeigt die Ergebnisse des FTZ-Modells angetrieben durch gemessene Pegeldata, für die in Abb. 17 dargestellte Simulation wurden auf NN korrigierte Randwerte aus dem BSH-Modell verwendet. Die Transporte sind jeweils positiv nach Osten und Süden, also als Einstrom in die Ostsee, definiert.

Der Wasserstand in Landsort spiegelt näherungsweise den Füllungsgrad der Ostsee und damit Austauschprozesse zwischen Nord und Ostsee wider. Dem entsprechend sind die oben am Beispiel des Wasserstandes in Landsort diskutierten Unterschiede der Modelle für den Februar 2002 in den kumulativen Transporten noch deutlicher zu sehen. Zwischen 8. und 13. findet über alle Schnitte Einstrom nach Süden bzw. Osten statt. Der Einstrom ist in beiden Modellen deutlich ausgeprägt, jedoch im FTZ-Modell in der Summe am 13. ca. doppelt so groß wie im BSH-Modell. Unter Verwendung der Randbedingungen aus dem BSH-Modell ist er etwas niedriger (Abb. 17), aber immer noch deutlich höher als in der BSH-Simulation. Zwischen 13. und 18. ist der Unterschied in der Tendenz noch deutlicher ausgeprägt. Der eher geringe Ausstrom in die Nordsee im FTZ-Modell steht den vergleichsweise hohen negativen Transporten des BSH-Modells gegenüber. Bei Randbedingungen aus dem Modell des BSH nimmt der kumulative Transport in der FTZ-Simulation nach dem 13. zwar ebenfalls deutlich ab, jedoch langsamer als in der BSH-Simulation. Nach dem 18. verhalten sich die aktuellen Transporte der Modelle ähnlich was auch in den kumulativen Transporten in Abb. 16 und Abb. 17 zu erkennen ist.

Ursachen für die Unterschiede in den Transporten können unter anderem die Anfangsphase der Modelleinschwingung nach dem Simulationsstart sowie Unterschiede im Modellniveau sein. Der Einfluss der Randbedingungen zeigt sich ebenfalls deutlich in den kumulativen Transporten der beiden FTZ-Simulationen (Abb. 16 u. 17). Grund für die Annäherung des FTZ-Modells an die BSH-Transporte sind die im Vergleich zu den Pegeldata in Ringhals niedrigen Wasserstandsrandwerte aus dem BSH-Modell, die zu einem größeren Gefälle zwi-

schen Ostsee und Kattegat und damit zu erhöhtem Ausstrom führen. Vor allem im Westen des Kattegats, nahe dem dänischen Festland, sind die Wasserstände des BSH-Modells durch eine verstärkte Ost-West-Neigung niedrig. Als eine Ursache für die verbleibenden Unterschiede werden die in Kap. 2.1 beschriebenen Unterschiede in der Topographie vermutet. Für

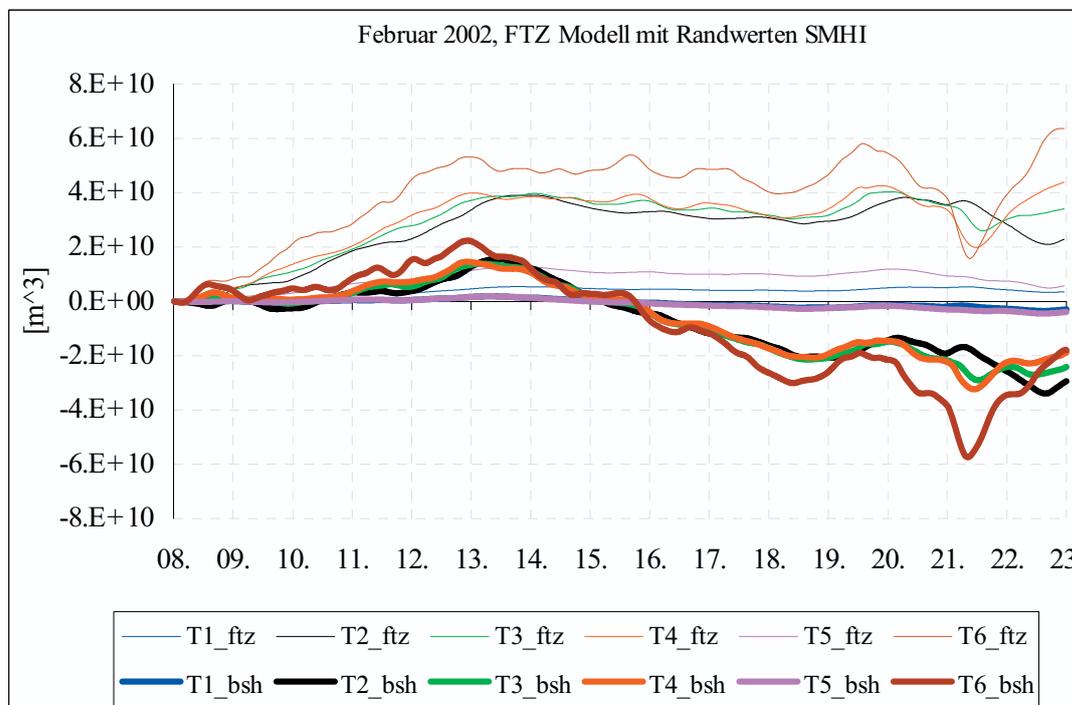


Abb. 16: Kumulative Transporte durch die Schnitte aus Abb. 15.

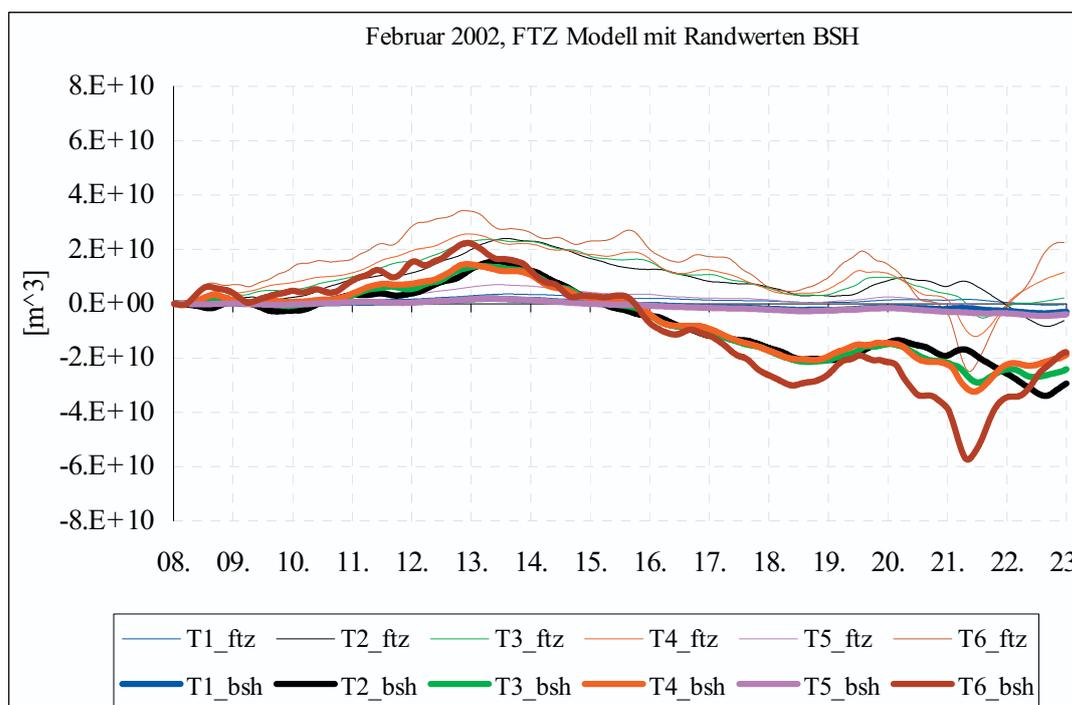


Abb. 17: Kumulative Transporte durch die Schnitte aus Abb. 15

die Transporte selber bestanden jedoch keine Vergleichsmessungen. Aus der Tatsache, dass die Wasserstände in Landsort mit beobachteten Ringhals-Wasserständen als Randsteuerung des FTZ-Modells besser reproduziert wurden, kann nicht abschließend auf die Güte der Transporte geschlossen werden.

#### 4.1.2 Vorlaufrechnungen zu den EPS-Stürmen

Die Windfelder der in MUSTOK untersuchten EPS-Szenarien umfassen meist nur wenige Tage. Daher wurden, um die Unabhängigkeit von den Ungenauigkeiten der Anfangszustände zu gewährleisten, Vorläufe jeweils über die 3 bis 4 vorangehenden Wochen mit Windfeldern aus dem Era40-Datensatz (ECMWF, 2004) gerechnet. Der Era40-Datensatz beinhaltet meteorologische Reanalysen der letzten 40 Jahre mit einer zeitlichen Auflösung von 6 Stunden auf dem Gitter des IFS-Modells. Trends werden damit erfasst, kurzfristige Spitzen z.B. der Windgeschwindigkeit können jedoch fehlen. Als Randwerte für die offene Grenze des FTZ-Modells wurden Pegelraten der Station Ringhals, sowie für die Zeiträume in 1964, 1968 und 1971, für die keine Messdaten vorliegen, am BSH berechnete Wasserstände verwendet. Anfangsverteilungen von Salzgehalt und Temperatur wurden anhand klimatologischer Monatsmittelwerte (JANSSEN et al., 1999) bestimmt. Anfangswasserstände wurden mit der in (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009a) beschriebenen Methode erzeugt. Mit diesen Vorlaufrechnungen wurde die Ausgangssituation zu Beginn jedes Szenarios, d.h. die Anfangswerte für den Start der Szenariorechnungen erzeugt.

Als ein Beispiel, in dem in beiden Modellen Era40-Winde und mittlere Flusswassereinträge benutzt wurden, ist der Wasserstand in Landsort für die Zeit vom 25. 10.–21. 11. 1970 in Abb. 18 dargestellt. In diese Zeit fallen drei extreme Sturmhochwasser (vergleiche Kapitel 4.2.). In Anbetracht der oben beschriebenen groben zeitlichen Auflösung der Antriebsdaten und unbekannter aktueller Flusswassereinträge ist die Übereinstimmung mit den Messdaten in beiden Modellen als gut zu bewerten. Volumenänderungen der Ostsee, verursacht durch

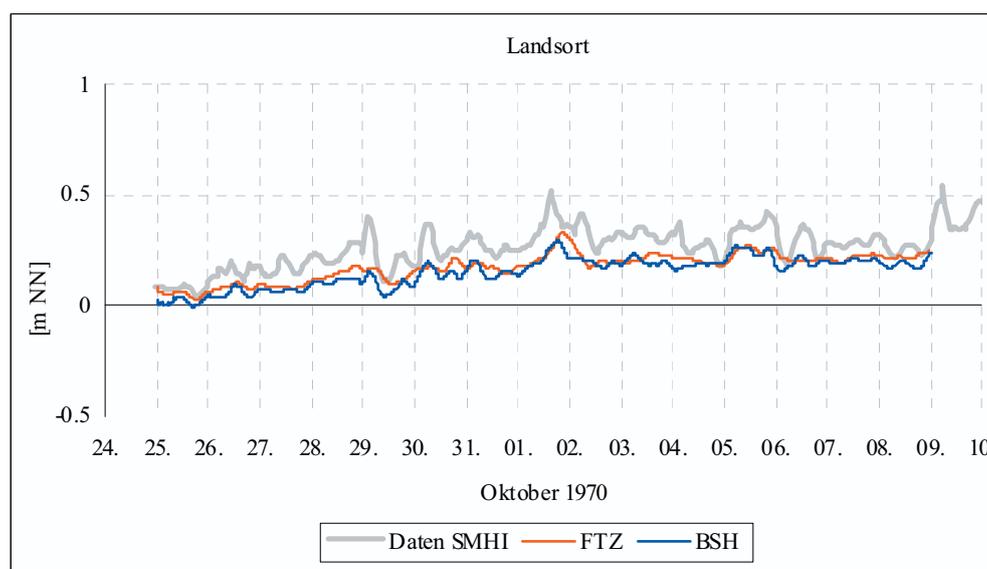


Abb. 18: Modellwasserstände und Pegelraten der Vorlaufsimulation Oktober/November 1970, angetrieben durch Era40-Windfelder, mit mittleren Flusseinträgen

meteorologische Einflüsse, können demnach mit dem Strömungsmodell des FTZ und der Randsteuerung im Kattegat angemessen reproduziert werden. Wieder führt die Vorgabe gemessener Wasserstände in Ringhals als Randwerte für das FTZ-Modell zu einer etwas besseren Reproduktion der Wasserstände in Landsort.

#### 4.2 Wasserstände in der südwestlichen Ostsee

Bei den im Rahmen von MUSTOK vom DWD für die HN-Simulation ausgewählten EPS-Sturmszenarien (SCHMITZ, 2007) handelt es sich zwar um physikalisch konsistente, also mögliche Wetterlagen, die anhand ihrer Startzeitpunkte in die reale Zeit eingeordnet werden, die Stürme weichen jedoch von der ursprünglichen Wettersituation ab. Damit kann auch der Wasseraustausch mit der Nordsee vom realen Verlauf abweichen. Da aufgrund der kürzeren Berechnungszeiten des reinen Ostseemodells die Vorauswahl der EPS-Szenarien für MUSE-Ostsee vom FTZ durchgeführt wurde, wurden zunächst auch für die EPS-Szenarien reale Pegelraten der Station Ringhals als Randwerte verwendet. Um die Unsicherheiten in den am FTZ berechneten Wasserständen, bedingt durch eine mögliche Abweichung zwischen dem realen, durch den Pegel Ringhals repräsentierten, und einem mit der EPS-Wettersituation im Gleichgewicht stehenden Austausch zwischen Nord und Ostsee zu untersuchen, wurden am FTZ Simulationen mit Wasserständen aus dem BSH-Modell als Randwerte im Kattegat, für die am BSH nachgerechneten Szenarien durchgeführt. Anhand der Ergebnisse dieser Simulationen konnte der Einfluss der Randwerte auf die berechneten Wasserstände verifiziert werden.

In Abb. 19 sind die Wasserstände des BSH-Modells in Ringhals für drei der EPS-Simulationen im November 1970 den Pegelraten des gleichen Zeitraumes gegenübergestellt. In diesen EPS-Simulationen treten die größten Unterschiede zu den Pegelraten, mit bis zu 30 cm um den 19. November im EPS-member 7011-200-47 auf. Diese Realisation führte auch zu den größten Unterschieden bei den Wasserständen des FTZ-Modells zwischen Rechnungen mit Pegelraten als Randsteuerung und Rechnungen mit Randwerten aus dem BSH-Modell.

Abb. 20 zeigt die beiden Zeitreihen der Wasserstände in Flensburg, bei denen die Differenzen am größten waren. Die beiden Kurven haben im Wesentlichen den gleichen Verlauf und unterscheiden sich nur in kleinen Schwankungen. Der Scheitelwert unter Verwendung

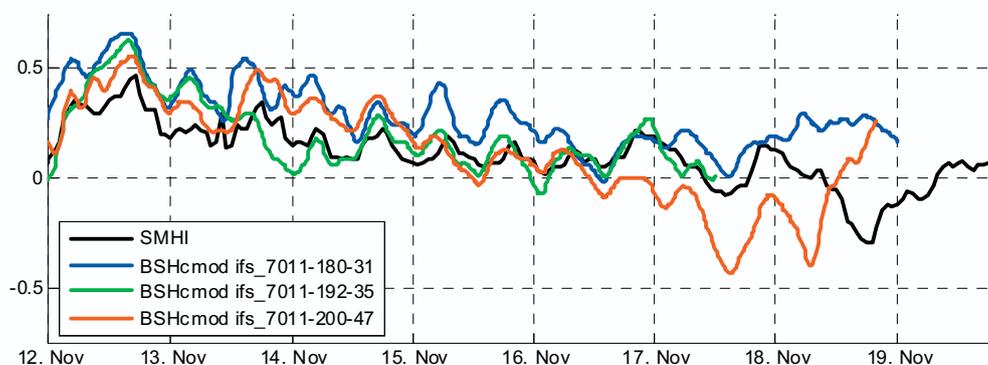


Abb. 19: Pegelraten und Modellwasserstände des BSH für 3 EPS-Stürme in Ringhals (Bezeichnungen in BORK u. MÜLLER-NAVARRA [2009]: 1970\_31b0c2, 1970\_35b0cw und 1970\_47b0d1)

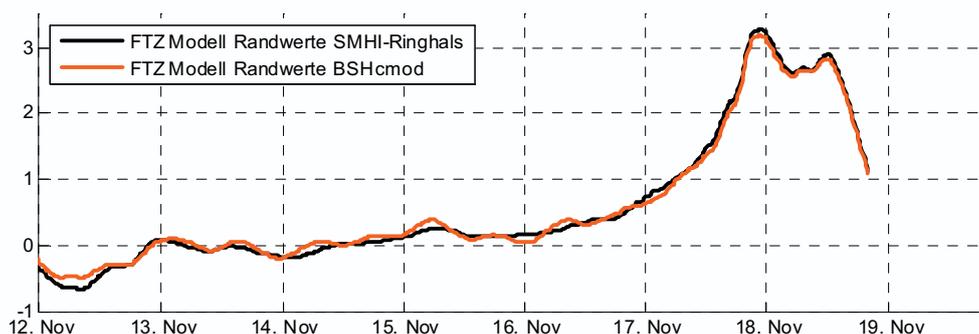


Abb. 20: Wasserstände des FTZ-Modells in Flensburg

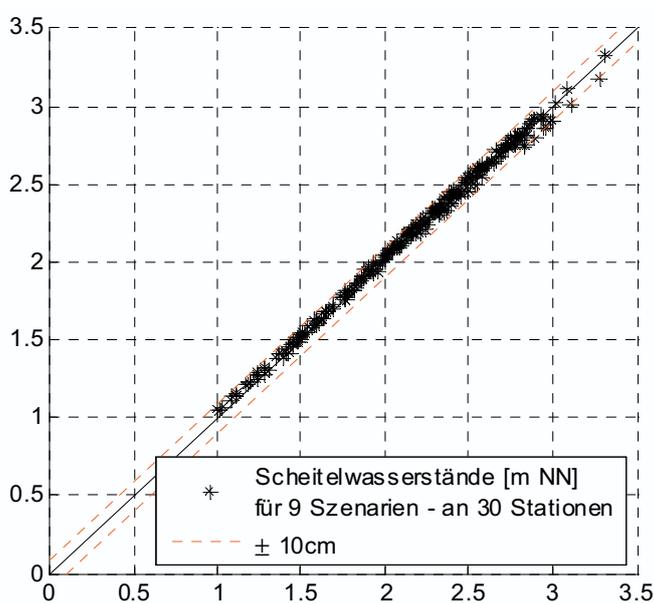


Abb. 21: Vergleich von Scheitelwasserständen an der deutschen Ostseeküste berechnet mit dem FTZ-Modell unter Verwendung unterschiedlicher Randwerte

von BSH-Randwerten liegt ca. 9 cm tiefer. Weiterhin nimmt die Differenz der Scheitelwerte nach Osten hin bis auf unter 1 cm in der Pommerschen Bucht ab.

In Abb. 21 sind die Scheitelwasserstände für 9 EPS-Stürme an 30 Stationen entlang der deutschen Ostseeküste dargestellt. Modellergebnisse aus Rechnungen mit Ringhals-Pegeldaten sind über Modellergebnissen aus Rechnungen mit Randwerten aus dem BSH-Modell aufgetragen. Die Abweichungen zwischen den Scheitelwasserständen liegen stets unter 10 cm. Damit kann die Unsicherheit in den EPS-Ergebnissen, bedingt durch Unsicherheiten der Wasserstände im Kattegat, als untergeordnet angesehen werden. Hauptgründe für den geringen Einfluss der Randwerte sind zum einen die meist kurze Dauer der untersuchten Ereignisse sowie die teilweise geringen Unterschiede zwischen den Randwerten aus dem BSH-Modell und den Pegeldaten. Zum anderen wird der Einfluss von Wasserstandsgradienten im Kattegat auf extreme Wasserstandsschwankungen bei Sturmhochwasser an der deutschen Ostseeküste durch die Belte gedämpft.

## 5. Zusammenfassung

In Hinblick auf die Simulationen extremer Sturmhochwasser im Projekt MUSTOK sind die hier beschriebenen Unterschiede zwischen den hydrodynamischen Modellen des BSH und des FTZ eher gering. Ein wesentlicher Aspekt des Vergleichs war der Einfluss der Randbedingungen zwischen Nord- und Ostsee. Der Modellvergleich anhand der beiden Stürme von 2002 und 2006 hat für Hindcastrechnungen gezeigt, dass reine Wasserstandssimulationen auch ohne gekoppeltes Modell der Nord- und Ostsee möglich sind. Bei den in MUSTOK untersuchten extremen Stürmen war der Einfluss der Randsteuerung auf die Wasserstände der deutschen Ostseeküste gering.

Bei diesem Modellvergleich wurde ein einheitlicher meteorologischer Antrieb verwendet. Im Projekt MUSTOK wurden auch verschiedene meteorologische Modelle benutzt, um den gleichen Sturm zu simulieren (SCHMITZ, 2007). Die Unterschiede bei den Wasserständen waren beträchtlich (BORK u. MÜLLER-NAVARRA, 2009) und deutlich höher als die Modellunterschiede der beiden hydrodynamischen Modelle.

## 6. Danksagung

Wir danken Herrn Warnecke (BSH) für die Erstellung digitaler Eisanfangsverteilungen, Herrn Janssen für die statistische Bearbeitung der Modelldaten von 2002, Frau Schmelzer (BSH) für die Bereitstellung von Eisdaten, Frau Perlet (BSH), Herrn Nöthel (WSA Lübeck) und Herrn Hammarklint (SMHI) für die Bereitstellung von Wasserstandsdaten und Frau von Gyldenfeldt (BSH) für die Zusammenstellung von maximalen Wasserständen und Winddaten.

## 7. Schriftenverzeichnis

- BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Modellierung von extremen Sturmhochwassern an der Deutschen Ostseeküste. Die Küste, Heft 75, 2009.
- BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Simulation und Analyse extremer Sturmhochwasser an der Deutschen Ostseeküste. Abschlussbericht 1.3 zum KFKI-Verbundprojekt MUSTOK, Hamburg, 2009a.
- BRUSS, G.; JIMENEZ, N. und MAYERLE, R.: Bestimmung von Bemessungsparametern für Küstenschutzanlagen an der Deutschen Ostseeküste aufbauend auf Szenariosimulationen. Abschlussbericht 2.2 zum KFKI-Verbundprojekt MUSTOK, Kiel, 2009.
- BRUSS, G. and MAYERLE, R.: Investigations on the influence of the wind drag coefficient in storm surge models. In Proceedings of the 3. International Conference in Ocean Engineering, pages 325–332. IIT Madras, 2009.
- DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; KLEIN, H. und KOMO, H.: The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 29, 2001.
- DICK, S.; KLEINE, E. und JANSSEN, F.: First Results of a New Operational Circulation Model for the North Sea and the Baltic Using General Vertical Co-ordinates. Proceedings of EuroGOOS Conference, (Exeter), 2008 (in Druck)
- ECMWF: Era-40: Ecmwf 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957-2002. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Newsletter No. 101, 2004.
- GÄSTGIFVARS, M.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; FUNKQUIST, L. und HUESS, V.: Performance of Operational Systems with Respect to Water Level Forecasts in the Gulf of Finland. Ocean Dynamics, 58, 139–153, 2008.

- JANSSEN, F.; SCHRUM, C. und BACKHAUS, J. O.: A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Supplement 9, 1999.
- JANSSEN, F.: Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee. Dissertation, Universität Hamburg, 2002.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; DICK, S. und KLEINE, E.: Vorhersage mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer Modelle. In: HUPFER, P.; HARFE, J.; STERR, H. UND STIGGE, H.-J. (eds.): Die Wasserstände an der Ostseeküste. Die Küste, Heft 66, 67–78, 2003.
- SCHMITZ, R.: Vorhersage von historisch aufgetretenen Stürmen über der Ostsee mithilfe des Ensemble Prediction System und COSMO. Abschlussbericht 1.1 zum KFKI-Verbundprojekt MUSTOK, Offenbach, 2007.
- SMITH, S. D. und BANKE, E. G.: Variation of the Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 101, 665–673, 1975.