

Operationelle Ozeanvorhersage für deutsche Küstengewässer

Thorger Brüning, Frank Janssen, Eckhard Kleine, Hartmut Komo, Silvia Maßmann, Inge Menzenhauer-Schumacher, Simon Jandt und Stephan Dick

Zusammenfassung

Am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie ist bereits seit einigen Jahrzehnten ein numerisches Ozeanvorhersagesystem für Nord- und Ostsee mit Fokus auf dem deutschen Küstenbereich in der operationellen Anwendung. Alle Modellkomponenten befinden sich dabei in ständiger Weiterentwicklung. Hier wird die jüngste Modellentwicklung – die Einführung des Zirkulationsmodells BSH-HBM – beschrieben. Das Zirkulationsmodell ist eine wesentliche Informationsquelle für eine Reihe von Diensten an deutschen Küsten (z. B. Wasserstandsvorhersage- und Sturmflutwarndienst, Öldriftprediction und Seenotrettung) und damit von zentraler Bedeutung in der Ozeanvorhersage.

Nach einem Überblick über das Modellsystem liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Darstellung der Modellergebnisse aus Validation und Anwendung des sich derzeit am Ende der Kalibrationsphase befindlichen Modells. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten sowohl in Bezug auf die inhaltliche als auch auf die technische Weiterentwicklung inklusive einiger neuer Modellkomponenten z. B. zur Ökosystemmodellierung und Datenassimilation.

Schlagwörter

HBM, Ozeanvorhersage, operationelles Ozeanzirkulationsmodell, Nordsee, Ostsee

Summary

A numerical ocean forecasting system for the North and Baltic Seas has been applied at the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH) for several decades. The model system is under permanent revision and the latest development – the implementation of the ocean circulation model BSH-HBM – is presented here. The circulation model is of particular importance because it provides the basic information for a couple of services at the German coast, like e.g. the sea level prediction and storm surge warning service, or oil spill forecasting and search-and-rescue applications.

An overview of the basic components of the model system will be given. The main part is the presentation of validation results and some applications of the new system which still is in the final calibration phase. An outlook on future developments, both scientific and more technical, including completely new model components especially for data assimilation of ecosystem modelling completes the presentation.

Keywords

HBM, ocean forecast, operational ocean circulation model, North Sea, Baltic Sea

Inhalt

1	Einleitung	294
2	Modellsystem	295
2.1	Gleichungen	295
2.2	Modellsetup/Bathymetrie	296
2.3	Antrieb	297
2.4	Operationeller Ablaufplan / Computerausstattung	297
2.5	Archiv	298
3	Validierung	298
3.1	Wasserstand	298
3.1.1	Nordsee	298
3.1.2	Ostsee	300
3.2	Strömungen	301
3.3	Wassertemperatur	302
3.4	Salzgehalt	303
3.5	Meereis	304
4	Ergebnisse	304
4.1	Elbehochwasser im Juni 2013	304
4.2	Orkan Xaver am 5. und 6. Dezember 2013	305
5	Ausblick	306
5.1	Operationeller Ablaufplan/Computerausstattung	307
5.2	Datenassimilation	307
5.3	Ästuar-Modelle mit hoher Auflösung	307
5.4	Ökosystem-Modellierung	308
5.5	Gekoppelte Modelle	308
5.6	Ausbau der Rechenkapazität/massive Parallelisierung	308
6	Schriftenverzeichnis	309

1 Einleitung

Beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) besteht ein großer Bedarf an ozeanographischen Vorhersagedaten zur Unterstützung der internen operationellen Dienste wie der Wasserstandsvorhersage, des Sturmflutwarndienstes und des Eisdienstes sowie zur Unterstützung seiner externen Kunden, etwa der nationalen Seenotzentren, des Havariekommandos oder der Deutschen Marine. Um diese operationellen Verpflichtungen erfüllen zu können, betreibt und unterhält das BSH ein umfassendes numerisches Vorhersagesystem, das sich in stetiger Weiterentwicklung befindet.

Die operationelle Modellierung hat am BSH eine lange Tradition, die bereits in den frühen 1980er Jahren bei der Vorgängerinstitution DHI ihren Anfang nahm. Dabei lag der Schwerpunkt zunächst in der Nordsee. Die Sturmflutvorhersage für die deutsche Küste war und ist eine wichtige Aufgabe und gehörte daher zu den ersten Anwendungs-

bereichen. Später wurde der Bereich von Interesse auf das Gebiet der Ostsee erweitert. Im Verlauf der daraus entstehenden erfolgreichen Zusammenarbeit im Ostseeraum fand der am BSH entwickelte Modellcode BSHcmod weite Verbreitung in der Ostseegemeinschaft. Eine Modellvariante (HIROMB) wurde am Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) installiert und weiterentwickelt und ist bis heute die Grundlage des offiziellen Öldriftporhersagesystems der HELCOM für die Ostsee. Eine weitere Modellvariante diente einige Jahre später als Grundlage des am Danish Meteorological Institute (DMI) aufgebauten Sturmflutwarnsystems. Alle drei Modellreihen wurden über mehrere Jahre hinweg aktiv weiterentwickelt und entfalteten sich mit der Zeit in verschiedene Richtungen. In den letzten Jahren wurde mit Unterstützung der MyOcean-Projekte der Versuch unternommen, die drei Entwicklungslinien zusammenzuführen. Das aus diesen Bemühungen hervorgegangene Modell HIROMB-BOOS (HBM) ist heute ein gemeinschaftliches Entwicklungsprojekt der Institute BSH, DMI, FMI (Finish Meteorological Institute) und MSI (Marine Systems Institute der Universität Tallinn). Beim BSH ist der Wechsel vom gegenwärtig operationell betriebenen Modell BSHcmod zum neuen Modell HBM noch nicht endgültig abgeschlossen. Daher werden in diesem Beitrag, in dem zum ersten Mal Ergebnisse aus dem zukünftigen operationellen Modell HBM präsentiert werden, teilweise auch laufende Arbeiten und zum großen Teil Ergebnisse aus der noch andauernden Kalibrierungsphase berücksichtigt.

2 Modellsystem

2.1 Gleichungen

Die Gleichungen des physischen Kerns von HBM sind weitgehend mit den Gleichungen von BSHcmod identisch, die in DICK et al. 2001 und DICK et al. 2008 beschrieben werden. Ein wichtiger Unterschied zu HBM ist jedoch die Möglichkeit, mit Hilfe eines Compiler-Flags zwischen dynamisch vertikalen Koordinaten (KLEINE 2004) und z -Koordinaten mit einer freien Oberfläche zu wählen. Für die operationelle Nutzung beim BSH werden dynamische vertikale Koordinaten ausgewählt.

Die größten Auswirkungen des physischen Kerns (im Vergleich zur aktuellen BSHcmod-Version 4) sind die Implementierung eines neuen Turbulenzschemas (ein in BERG 2012 beschriebenes k -Omega-Modell) und eines verbesserten Gitter-Nestings. In HBM ist ein vollständig dynamisches 2-Wege-Nesting implementiert, bei dem das eingebettete Gitter eine Fortsetzung des umgebenden Gitters ist. Dadurch werden Bereiche, die in einem Modell-setup mehrfach erfasst sind, nur in einem, nämlich dem feinsten Gitter berechnet. In allen gröberen Gittern ist der Bereich des feineren Gitters nicht aktiv. Im BSH NOKU-Setup (siehe Abb. 2) wird dieses Verfahren in der inneren Deutschen Bucht und der westlichen Ostsee umgesetzt. Hier ist nur das sogenannte KU-Gitter (das feinere Gitter) aktiv, die entsprechenden Punkte im sogenannten NO-Gitter (dem gröberen Gitter) sind nicht aktiv (grauer Bereich im NO-Gitter siehe Abb.2). Die Produkte aus dem NO-Gitter decken weiterhin den gesamten Bereich ab. Eine ausführlichere Beschreibung der Nesting-Gleichungen und eine sehr detaillierte Beschreibung der technischen Implementierung von HBM mit Schwerpunkt auf der Parallelisierung finden sich bei BERG und POULSEN (2012).

Im neuen Modell wurden auch einige Parametrisierungen angepasst. Hierbei ist besonders die Parametrisierung der Windschubspannung nennenswert, bei der im Gegensatz

zum linearen Ansatz der BSHcmod-Versionen ein quadratischer Ansatz zur Berechnung des Windschubkoeffizienten gewählt wird.

2.2 Modellsetup/Bathymetrie

Das BSH-Modellsystem umfasst vier Modellgitter, deren Berechnung in drei verschiedenen Modellsetups durchgeführt wird. Das erste Setup der Modellkette ist ein 2D-Modell des Nordostatlantiks (NA, Abb. 1) mit einer horizontalen Auflösung von ca. 10 km. Aus diesem Setup werden die Randwerte für das Gitter der Nord- und Ostsee (NO, Abb.2) extrahiert. Das NO-Gitter hat eine horizontale Auflösung von ca. 5 km und maximal 36 vertikale Schichten. In dieses Gitter wird mit Hilfe des oben genannten vollständig dynamischen 2-Wege-Nestings das feinere Küstengitter der inneren Deutschen Bucht und der westlichen Ostsee (KU, Abb. 3) mit einer horizontalen Auflösung von ca. 900 m und maximal 24 vertikalen Schichten integriert. Beide Gitter zusammen bilden das zweite Setup der Modellkette, das nachfolgend NOKU genannt wird. Das dritte Setup bildet das Elbe-Gitter (EL, Abb. 4), das größtenteils im Rahmen des OPTEL-Projekts entwickelt wurde (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2011; MÜLLER-NAVARRA und BORK 2012). Es hat eine horizontale Auflösung von 90 m und maximal 7 vertikale Schichten. Im Gegensatz zu den Berechnungen im OPTEL-Projekt, bei dem das Elbe-Gitter durch 2-Wege-Nesting in das Küstengitter eingebettet wurde, wird es im operationellen Betrieb als eigenständiges Setup berechnet. Die Randwerte werden vom NOKU-Setup bereitgestellt.

Die Anzahl der vertikalen Schichten in den drei 3D-Gittern NO, KU und EL resultiert aus derselben vertikalen Partition. Die oberen 20 m werden in 10 Schichten von jeweils 2 m Dicke unterteilt. Zwischen 20 m und 100 m Wassertiefe gibt es fünf Schichten mit einer Dicke von 3 m und vierzehn Schichten mit einer Dicke von 5 m. In Wassertiefen unter 100 m ist die Auflösung relativ grob, die Schichten können bis zu 200 m dick sein.

Das BSH entwickelt und verwendet die beschriebenen Setups in der 4. Version. Das gesamte Modellsystem wird daher nachfolgend als V4 bezeichnet.

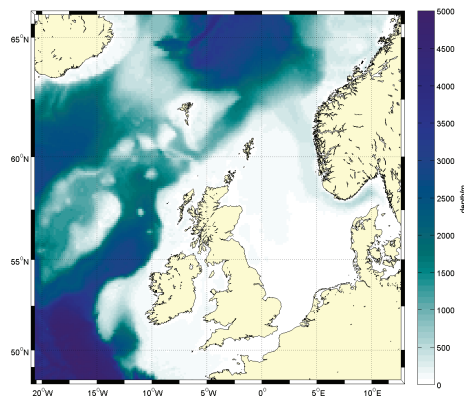


Abbildung 1: Wassertiefe des NA-Gitters.

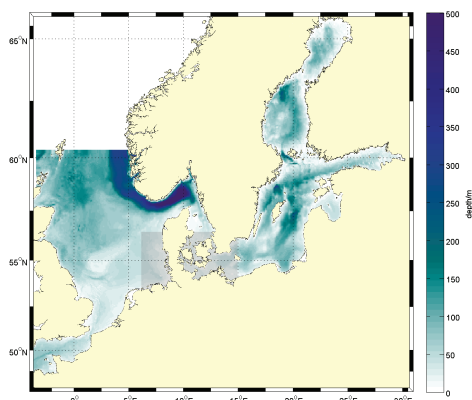


Abbildung 2: Wassertiefe des NO-Gitters. Der grau hinterlegte Bereich ist bei der Berechnung aufgrund des Nestings nicht aktiv.

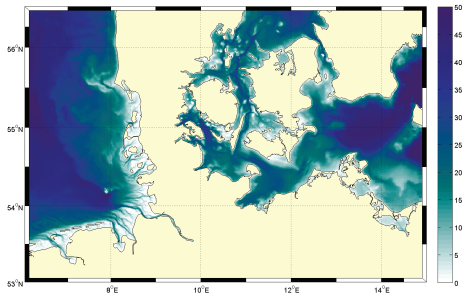


Abbildung 3: Wassertiefe des KU-Gitters.

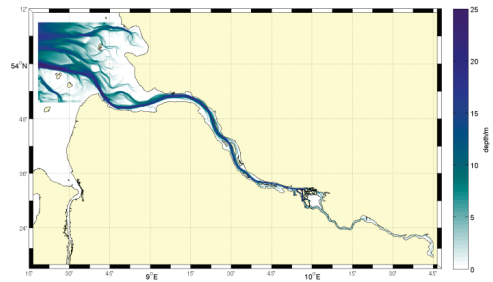


Abbildung 4: Wassertiefe des EL-Gitters.

2.3 Antrieb

Den atmosphärischen Antrieb für alle BSH-Modellsetups liefern die operationellen Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Die meteorologischen Eingabeparameter 10 Meter-Wind, Luftdruck, Feuchtigkeit, Bewölkung und 2 Meter-Lufttemperatur gehen viermal täglich beim BSH ein. Das NA-Setup benötigt Antriebsfelder mit kombinierten Werten, die aus dem Globalmodell GME (MAJEWSKI et al. 2012) mit einer effektiven horizontalen Maschenweite von 20 km und dem Regionalmodell COSMO-EU (SCHULZ und SCHÄTTLER 2011) mit einer horizontalen Maschenweite von aktuell 7 km entnommen werden. Die NOKU- und EL-Setups hingegen werden nur mit Daten aus COSMO-EU angetrieben.

Im NA-Setup wird eine nicht reflektierende Randbedingung (engl. radiation boundary condition) angewendet, sodass für den offenen Rand keine externen Daten benötigt werden. Am offenen Rand des NOKU-Setups werden die addierten Windstaudaten aus dem NA-Setup und Gezeiten auf Basis von 19 Partialtiden vorgegeben. Das EL-Setup schließlich bezieht seine Daten am offenen Rand aus dem NOKU-Setup.

Zusätzlich werden im NOKU-Setup Daten von 80 Flüssen und im EL-Setup Daten von einem Fluss (der Elbe) berücksichtigt. Die Daten zu den deutschen Flüssen werden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) auf operationeller Basis bereitgestellt. Die Daten aller Flüsse im Ostseeraum (mit Ausnahme der Oder) stammen aus dem operationellen HBV-Modell (BERGSTRÖM 1995), das am SMHI betrieben wird. Die Daten aller übrigen Flüsse in der Nordsee (hauptsächlich im Gebiet Großbritanniens) basieren aufgrund des fehlenden Datenbestands auf klimatologischen Daten.

2.4 Operationeller Ablaufplan / Computerausstattung

Das beschriebene Modellsystem wird gegenwärtig einmal pro Tag auf einem IBM P7 755-Server (4 x 8 Core, Power7-Prozessoren mit 3,6 GHz) mit 16 OpenMP-Threads und ohne MPI-Parallelisierung ausgeführt. Der HBM-Code wurde mit dem IBM-xlf-Compiler kompiliert. Die Ergebnisse werden mit MATLAB und GMT dargestellt.

2.5 Archiv

Das BSH unterhält ein umfangreiches Archiv von Modellvorhersagen, das Daten seit 2000 umfasst. Alle archivierten Daten sind kostenlos verfügbar. Der längste konsistente Datensatz ist die Ausgabe des früheren NOKU-Modellsetups V3, die mit der Vorgängerversion des BSHcmod-Modells berechnet wurde. Der Datensatz deckt die 14 Jahre zwischen 2000 und 2013 ab. Die Auflösung dieses Setups war halb so groß wie die Auflösung des aktuell verwendeten NOKU-Setups V4. Die von BSHcmod V4 berechneten Daten aus dem V4 NOKU-Setup werden seit 2008 archiviert.

Da sich sowohl das NA- als auch das NOKU-Setup des beschriebenen BSH-HBM-Modellsystems noch im prä-operationellen Modus befinden, werden gegenwärtig nur die mittels HBM berechneten Ergebnisse aus dem EL-Setup archiviert. Die Daten dieses Setups sind seit April 2013 verfügbar.

3 Validierung

Der häufig als Validierung bezeichnete quantitative Vergleich der Modellergebnisse mit verschiedenen Arten von Beobachtungen ist ein wichtiger Schritt in der Modellentwicklung. Die hier vorgestellte Modellversion befindet sich noch in einer prä-operationellen Phase, einige Kalibrierungsschritte müssen wiederholt werden. Dennoch ermöglichen die unten vorgestellten Ergebnisse bereits eine Einschätzung zur unteren Qualitätsgrenze der kommenden Version des operationellen Modells.

Als Hauptzeitraum der Validierung wurde das Jahr 2008 ausgewählt, da für dieses Jahr bereits ein umfangreicher Bestand an Beobachtungsdaten vorlag. Ein im November 2007 initialisierter Hindcast-Lauf diente als Grundlage für die Validierung. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden einige Ergebnisse der Validierung von Wasserstand, Strömungen, Wassertemperatur, Salzgehalt und Meereis vorgestellt.

3.1 Wasserstand

Bei der Analyse der simulierten Wasserstände erscheint es sinnvoll, diese in zwei Bereiche bzw. Unterkapitel zu unterteilen: Zunächst wird die Nordsee betrachtet, in der Gezeiten die vorherrschende Komponente des lokalen Meeresspiegelanstiegs darstellen, sodass die Qualität der Modellausgabe in erster Linie von der Qualität der simulierten Gezeiten abhängt. Bei der Analyse im Nordseebereich wurden daher sowohl Gezeiten als auch Gesamtwasserstände berücksichtigt. Im nächsten Unterkapitel wird die Ostsee betrachtet, in der praktisch keine Gezeiten vorkommen; es werden daher nur die Gesamtwasserstände berücksichtigt.

3.1.1 Nordsee

Wie in Kapitel 2.3 erläutert, basieren die Gezeitenrandbedingungen im NOKU-Setup auf den 19 dominierenden Partialtiden. Angesichts der großen Zahl der Partialtiden und des nur kurzen Validierungszeitraums von einem Jahr ist eine umfassende Analyse der Gezeitendaten nicht machbar. Die Analyse wird stattdessen auf die zwei dominierenden halbtägigen Partialtiden M2 und S2 beschränkt. In Tab. 1 sind die Ergebnisse einer harmonischen Analyse der Modelldaten im Vergleich zu den harmonischen Konstanten aufgeführt. Die

Analysen basieren auf Beobachtungen des hydrographisch-ozeanographischen Dienstes der französischen Marine (SHOM 1982).

Tabelle 1: Amplitude und Phase aus der BSH-HBM-Ausgabe für M2- und S2-Tiden an ausgewählten Pegeln der deutschen Küste sowie Modellfehler im Vergleich zu den Daten aus SHOM (1982).

Pegel	M2 Amp [cm]	M2 Amp Fehler [cm]	M2 Pha [Grad]	M2 Ph Fehler [Grad]	S2 Amp [cm]	S2 Amp Fehler [cm]	S2 Pha [Grad]	S2 Pha Fehler [Grad]
Borkum	107,6	2,8	278	8	28,1	1,0	338	5
Helgoland	113,2	4,6	312	0	30,8	1,9	13	-5
Cuxhaven	147,9	13,5	340	-4	37,1	2,7	46	-7
Büsum	154,7	-1,5	341	4	41,0	-1,1	47	0

Die Ergebnisse in Tab. 1 zeigen eine relativ gute Modelldarstellung von Amplitude und Phase für M2 und S2 an den betrachteten Pegeln. Nur die Amplitude bei Cuxhaven weist einen signifikanten Fehler gegenüber den SHOM-Daten auf. Hier gilt es jedoch zu bedenken, dass auch für die beobachteten Daten selbst eine Unsicherheit besteht. Eine kürzlich vom BSH durchgeführte Analyse einer Zeitreihe von 19 Jahren am Pegel Cuxhaven (persönliche Mitteilung durch Patrick Goffinet) ergab eine M2-Amplitude von 138 cm. Dies würde den Modellfehler auf ca. 10 cm reduzieren. Dessen ungeachtet erfüllt die modellierte M2-Amplitude bei Cuxhaven derzeit nicht die internen Qualitätskriterien des BSH. An weiteren Verbesserungen der Kalibrierung wird gearbeitet.

Bei der Validierung der Wasserstände in der Nordsee ist die Analyse auf die Scheitelwerte bei Gezeitenhoch- und -niedrigwasser beschränkt, da diese Werte für den Wasserstandsvorhersagedienst des BSH am interessantesten sind. Der exakte Zeitpunkt des Auftretens der Scheitelwerte wird bei dieser Methode nicht berücksichtigt.

Tabelle 2: Systematische Abweichung (Bias) und Bias-korrigierte Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung von den Beobachtungen (RMSD) der Scheitelwerte der Gesamtwasserstände bei Hoch- und Niedrigwasser an ausgewählten Pegeln der deutschen Küste.

Pegel	Gesamtwasserstand			
	Hochwasser		Niedrigwasser	
	Bias [cm]	RMSD [cm]	Bias [cm]	RMSD [cm]
Borkum	-3	11	10	14
Helgoland	3	14	10	11
Cuxhaven	19	18	5	14
Büsum	15	18	6	17

Die in Tab. 2 aufgeführten Bias-Werte für die Pegel Borkum, Helgoland und Cuxhaven sind in erster Linie durch die Gezeitenfehler erklärbar. Der Bias in Büsum geht zum Teil auf die äußerst schwierigen topographischen Bedingungen im Umfeld des Pegels zurück. Die Bias-korrigierte Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung von den Beobachtungen (RMDS) ist an allen Pegeln kleiner als 20 cm und somit bereits ausreichend. Dennoch bleibt immer Spielraum für künftige Verbesserungen. Die RMSD liegt jedoch auf dem gleichen Niveau wie im aktuellen operationellen Modell BSHmod.

In Abb. 5 ist die Häufigkeitsverteilung der Differenzen zwischen Hoch- und Niedrigwasserständen am Pegel Cuxhaven dargestellt. Unter Berücksichtigung des Bias beträgt die Rate der in einem Bereich von ± 10 cm reproduzierten Ereignisse 39 % für Hoch- und 49 % für Niedrigwasser. Im Bereich von ± 20 cm beträgt sie 69 % für Hoch- und 85 % für Niedrigwasser. Mehr als 90 % der Hoch- und Niedrigwasserereignisse werden im Bereich von ± 30 cm reproduziert.

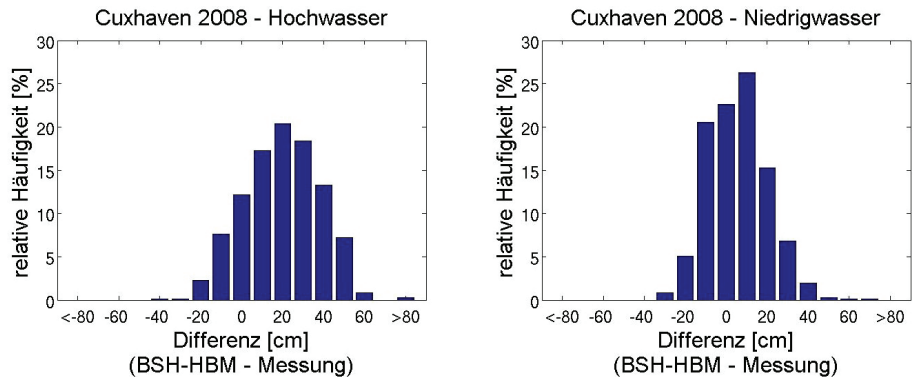


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Differenzen zwischen hohen (links) und niedrigen (rechts) Wasserständen am Pegel Cuxhaven im Jahr 2008.

3.1.2 Ostsee

In der Ostsee sind Schwankungen im Wasserstand in erster Linie auf Windeinflüsse und Seichen zurückzuführen. Das Gezeitsignal hingegen ist relativ gering, sodass die Wasserstandsvorhersagen für die Ostsee beträchtlich von denen für die Nordsee abweichen. Aus diesem Grund wird hier die direkte Ausgabe des Modellwasserstands validiert. Die in Abb. 6 exemplarisch aufgeführten Ergebnisse am Pegel Warnemünde zeigen eine recht gute Beschreibung des absoluten Wasserspiegelanstiegs und seiner Variabilität durch das Modell.

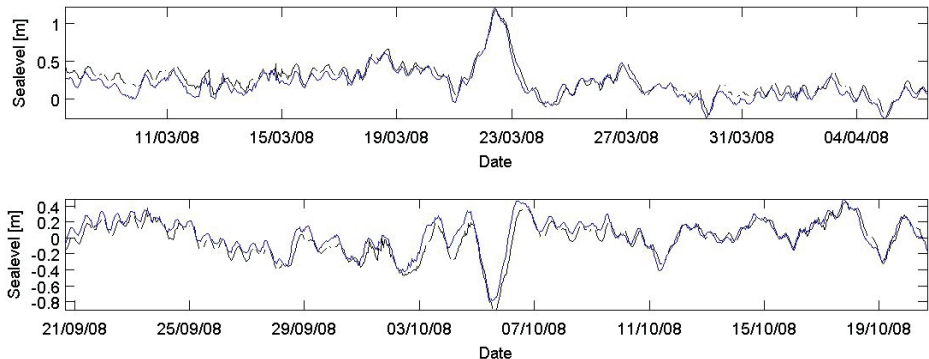


Abbildung 6: Wasserstands-Zeitreihen für zwei Sturmereignisse am Pegel Warnemünde im Jahr 2008. Beobachtungen sind schwarz, BSH-HBM-Daten blau dargestellt.

Wie aus Tab. 3 ersichtlich, sind die Ergebnisse bei Warnemünde mit Korrelationen von ca. 90 % und einer RMSD von ca. 10 cm für alle deutschen Pegel repräsentativ. Auch ist die Standardabweichung an allen Orten in Simulation und Beobachtung nahezu identisch.

Tabelle 3: Statistische Kenngrößen des Wasserspiegelanstiegs an deutschen Pegeln im Überblick. N ist die Gesamtanzahl der Messungen, σ die Standardabweichung vom Mittelwert, RMSD die mittlere quadratische Abweichung von den Messungen nach Bias-Korrektur und r die Korrelation.

Pegel	Wasserspiegelanstieg						
	Beobachtungen			BSH-HBM			
	N	σ [m]	Mittel [m]	Bias [m]	σ [m]	RMSD [m]	r
Kiel-Holtenau	8158	0,25	0,05	0,07	0,28	0,12	0,90
Koserow	8301	0,21	0,10	0,18	0,23	0,10	0,90
Sassnitz	5792	0,21	0,13	0,15	0,22	0,10	0,89
Travemünde	8472	0,24	0,07	0,08	0,28	0,12	0,90
Warnemünde	7477	0,22	0,08	0,11	0,25	0,11	0,89

3.2 Strömungen

Der direkte Vergleich zwischen Modell und Beobachtungen ist aufgrund der sehr großen, durch lokale topographische Einflüsse bedingten natürlichen lokalen Variabilität von Strömungen sowie aufgrund der modellimmanenten räumlichen Mittelung immer eine Herausforderung. Der spärliche Bestand an verfügbaren Messwerten kommt erschwerend hinzu. Für das Jahr 2008 liefern nur wenige Pegel in der Ostsee verwertbare Daten. Ein Vergleich der Strömungsgeschwindigkeitsdaten aus Beobachtungen und der entsprechenden Modellzelle ergibt zum großen Teil eine gute Übereinstimmung. Erkennbar ist dies daran, dass die modellierte Standardabweichung an allen Pegeln in demselben Bereich liegt wie die beobachtete. Der Bias liegt an den meisten Pegeln bei unter 10 cm/s. Abb. 7 zeigt die boden- und oberflächennahe Strömungsgeschwindigkeit am Pegel Arkona in einer Zeitreihe.

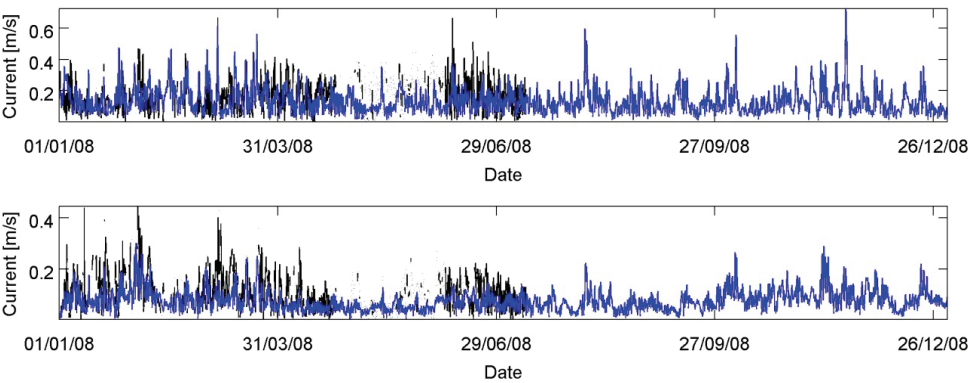


Abbildung 7: Zeitreihen der Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche (oben) und am Boden (unten) am Pegel Arkona. Beobachtungsdaten sind schwarz, BSH-HBM-Daten blau dargestellt.

3.3 Wassertemperatur

Zur Validierung der Wassertemperatur stehen Daten zur Temperatur an der Meeresoberfläche (SST) aus einem L3-Satellitenprodukt, welches durch Zusammenführung mehrerer Datenquellen generiert wurde (engl. super-collated), sowie Profildaten in der Nord- und Ostsee zur Verfügung.

In Bezug auf SST zeigt BSH-HBM eine äußerst genaue Reproduktion der Satellitendaten. Der Bias ist das ganze Jahr 2008 hindurch fast im gesamten NOKU-Bereich kleiner als $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und auch die RMSD zwischen den BSH-HBM- und Satellitendaten liegt meist unter $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abb. 8).

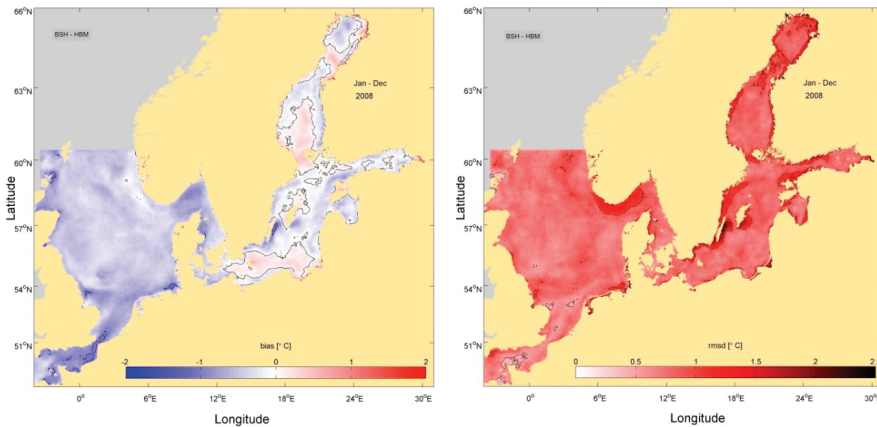


Abbildung 8: Bias (links) und RMSD (rechts) der SST-Daten aus BSH-HBM und L3-Satellitenprodukt im Jahr 2008.

Eine detailliertere Analyse der modellierten Wassertemperatur ist an In-Situ-Stationen mit größeren Wassertiefen möglich, die über Sensoren in unterschiedlichen Tiefen verfügen. An diesen Stationen wurden oberflächen- und bodennahe Daten berücksichtigt.

Die oberflächennahen Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse aus der satellitenbasierten SST-Analyse. An den deutschen Stationen ist der Bias kleiner als $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, die RMSD kleiner als $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Korrelation größer als 97 %.

In größeren Wassertiefen sind die Abweichungen von den Beobachtungen ausgeprägter. In großen Tiefen ab 80 Metern wird die Temperatur in der Simulation vor allem in der Ostsee nicht angemessen erfasst. Da Tiefwassereigenschaften in der Ostsee langen Zeitmaßstäben folgen, lässt sich nur schwer beurteilen, ob das Modell tatsächlich ein schweres Defizit aufweist (weil z. B. die vertikale Auflösung zu grob ist), oder ob die Differenzen mit der kurzen Validierungsperiode von einem Jahr zusammenhängen, da die problemanfälligen Ergebnisse in der Initialisierungs- und Anlaufphase in diesem Zeitraum nicht ausreichend ausgeglichen werden können.

Gleichwohl ist die Korrelation am Boden der deutschen Stationen der Nord- und der Ostsee generell immer noch größer als 90 %, die RMSD liegt zwischen $0,5$ und $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und der Bias zwischen $0,2$ und $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Insgesamt besteht also eine gute Übereinstimmung zwischen den HBM-Daten und den beobachteten Daten wie in Abb.9 an einem Beispiel dargestellt.

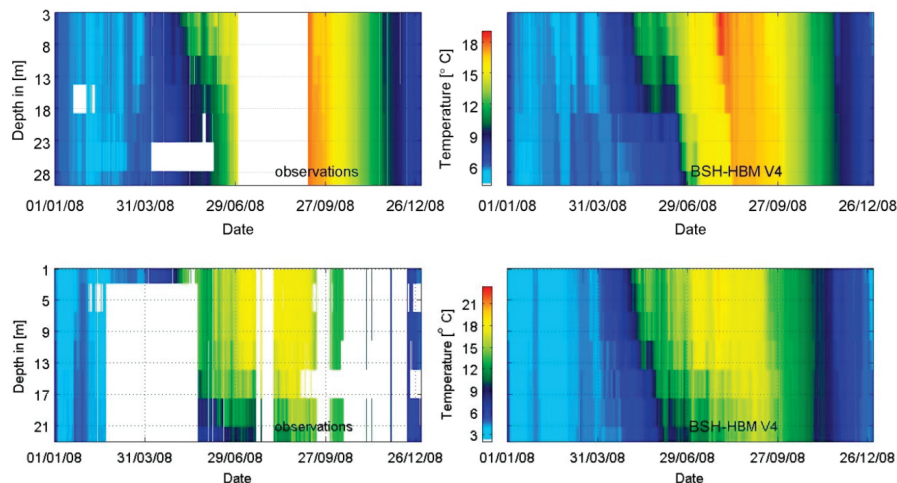


Abbildung 9: Karten zu Temperatur, Zeit, Tiefe am Pegel UFS Deutsche Bucht/Nordsee (oben) und am Pegel Fehmarnbelt/Ostsee (unten). In beiden Fällen sind die Beobachtungsdaten links, die BSH-HBM-Daten rechts abgebildet.

3.4 Salzgehalt

Für den ausgewählten Kalibrierungszeitraum lagen leider nur wenige Beobachtungsdaten vor, sodass eine Messung des Salzgehalts nur an einigen Stationen der Ostsee möglich war. Generell konnte das Modell den Salzgehalt an der Oberfläche recht zufriedenstellend abbilden. Auch die Werte des Salzgehalts unter der Halokline, also in Tiefen von mehr als 60-80 m, zeigen dank der guten Ausgangsbedingungen eine gute Übereinstimmung. Oberhalb der permanenten Halokline und unterhalb der Oberfläche, das heißt in Tiefen wie sie am Boden aller Stationen der deutschen Ostsee gegeben sind, zeigen die Messungen im Allgemeinen stärkere Schwankungen als das Modell und auch Bias und RMSD sind relativ hoch. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür ist die komplexe Bathymetrie der Ostsee und die (wahrscheinlich zu) grobe vertikale Auflösung des Modellsetups. Abb.10 zeigt als Beispiel den Salzgehalt an der Station Fehmarnbelt in einer Zeitreihe.

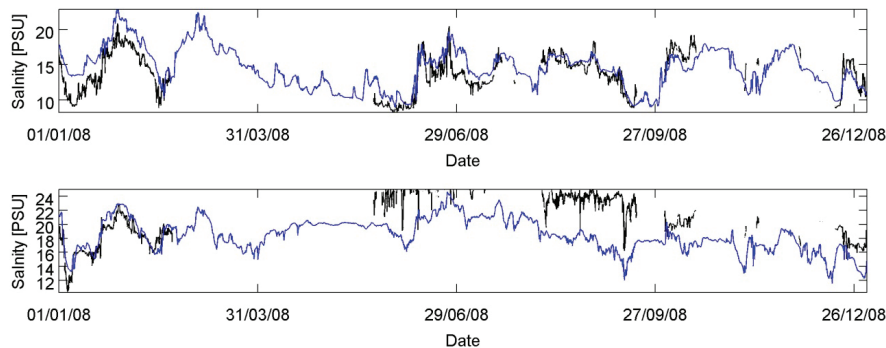


Abbildung 10: Zeitreihen des Salzgehalts an der Oberfläche (oben) und am Boden (unten) an der Station Fehmarnbelt. Beobachtungen sind schwarz, BSH-HBM-Daten blau dargestellt.

In jedem Fall besteht für den Parameter Salzgehalt in zukünftigen Modellversionen mit höheren (vertikalen) Auflösungen und der Möglichkeit der Datenassimilation ein hohes Verbesserungspotenzial.

3.5 Meereis

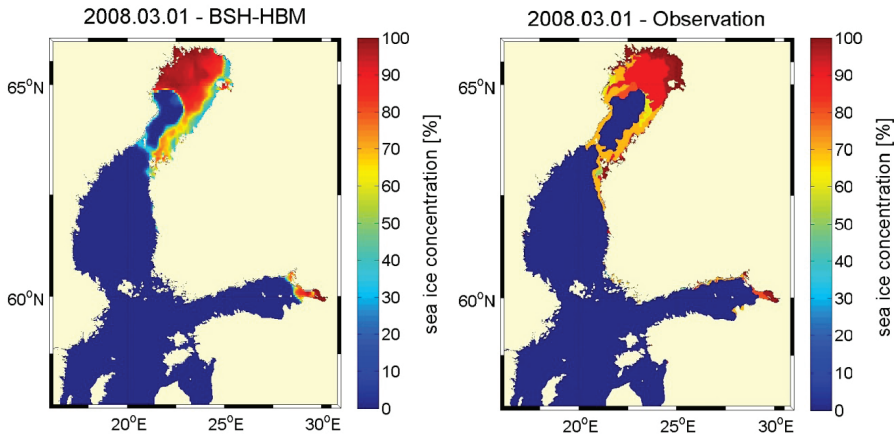


Abbildung 11: Vergleich von vorhergesagten (links) und beobachteten (rechts) Meereiskonzentrationen in der Ostsee am 1. März 2008.

Der Winter des Jahres 2008 war relativ mild, sodass nur wenig Meereis beobachtet wurde. Abb. 11 zeigt einen Vergleich der simulierten und beobachteten Meereiskonzentration am 1.3.2008, dem Tag mit der größten Meereisausdehnung im Jahr 2008. Die Meereisausdehnung und die allgemeine Verteilung sind recht ähnlich. Lokal betrachtet unterscheiden sich die Konzentrationen jedoch erheblich.

4 Ergebnisse

Im vorliegenden Kapitel werden einige Ergebnisse aktueller Berechnungen vorgestellt, die die Kapazität des neuen BSH-HBM-Modellsystems zur Durchführung von Simulationen besonderer Ereignisse von starkem öffentlichem Interesse unter Beweis stellen. Dabei werden zwei Ereignisse aus dem Jahr 2013 herausgestellt: das Elbehochwasser im Juni und der Orkan Xaver im Dezember. Beide Ereignisse führten zu einem starken Anstieg der Wasserstände. Um die Folgen der Ereignisse für die betroffene Bevölkerung möglichst gering zu halten, waren exakte Vorhersagen nötig.

4.1 Elbehochwasser im Juni 2013

Starke Regenfälle führten im Mai und Juni 2013 im Bereich verschiedener Flüsse im süd-östlichen Mitteleuropa zu Überschwemmungen. Entlang der Elbe wurden bislang unerreichte Höchstwasserstände gemessen. Infolge der enormen Wassermassen kam es in den ohnehin in hohem Maße durch den Oberwasserabfluss belasteten tidebeeinflussten Teilen des Elbeästuars zwischen St. Pauli und dem Wehr in Geesthacht zu Extremwasserständen.

Die Vorhersagen des Oberwasserabflusses waren von großen Unsicherheiten und mithin einer hohen Variabilität geprägt. Allerdings basiert die bestmögliche Vorhersage des BSH-HBM-Modells auf Abflussberechnungen aus Wasserstandsmessungen am Pegel Neu Darchau, der außerhalb des EL-Modellgebiets liegt, wobei auch die noch nie zuvor erreichten Werte des Oberwasserabflusses, die mit über 4000 m³/s fast fünfmal höher waren als der Mittelwert, mit Unsicherheit behaftet waren.

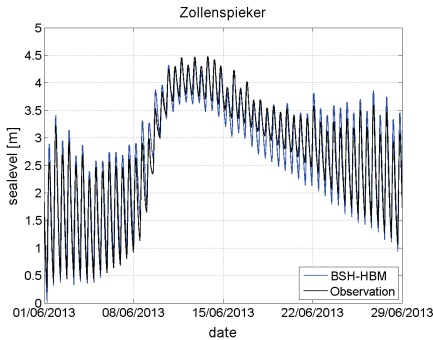


Abbildung 12: Wasserstände während des El-behochwassers am Pegel Zollenspieker.

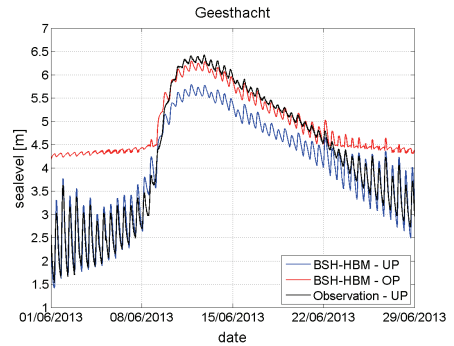


Abbildung 13: Wasserstände während des El-behochwassers am Pegel Geesthacht-UP. Zusätzlich werden Modellergebnisse am Pegel Geesthacht-OP gezeigt.

Trotz der gegebenen Unsicherheiten konnte BSH-HBM das Elbehochwasser an den meisten Pegeln zwischen St. Pauli und Geesthacht (beispielsweise bei Zollenspieker) sehr gut abbilden (Abb. 12). Lediglich direkt unterhalb des Wehrs in Geesthacht („Unterpegel“ – UP) war der absolute Scheitel im Modell etwa 0,5 m zu niedrig. Dieser Fehler lässt sich jedoch auf die schwierige Modellierung des Wehrs selbst zurückführen, das während des Hochwassers vollständig geöffnet war. Die Modellergebnisse direkt oberhalb des Wehrs („Oberpegel“ – OP) zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen (Abb.13).

4.2 Orkan Xaver am 5. und 6. Dezember 2013

Am 5. und 6. Dezember 2013 erreichte der Orkan Xaver die innere Deutsche Bucht mit sehr hohen mittleren Windgeschwindigkeiten zwischen 45 und 55 Knoten (9-10 Beaufort) aus nordwestlichen Richtungen (Abb. 15). Während der fast zwei Tage andauernden hohen mittleren Windgeschwindigkeiten, die zeitweise eine Stärke von bis zu 12 Beaufort erreichten, konnten an fast allen Pegeln der deutschen Nordsee bis zu vier Sturmfluten und bis zu zwei starke Sturmfluten in Folge beobachtet werden. Der höchste Wasserstand während Xaver wurde am Pegel St. Pauli beobachtet. Er lag 3,98 m über dem mittleren Hochwasser, also 6,09 m über dem mittleren Meeresspiegel – eine sehr starke Sturmflut und der zweithöchste Wert, der jemals beobachtet wurde.

Trotz der Überschätzung der Niedrigwasser während Xaver erwies sich das BSH-HBM-Modell für die Wissenschaftler des Sturmflutwarndienstes als äußerst nützliches Tool, da es die Sturmfluten sehr gut abbilden konnte. Am Pegel Cuxhaven lagen die Fehler der Höchstwasserstände bei Hochwasser unter 10 cm und am Pegel St. Pauli unter 25 cm (Abb. 14) – ein sehr gutes Ergebnis in Anbetracht der außergewöhnlich hohen Beobachtungswerte.

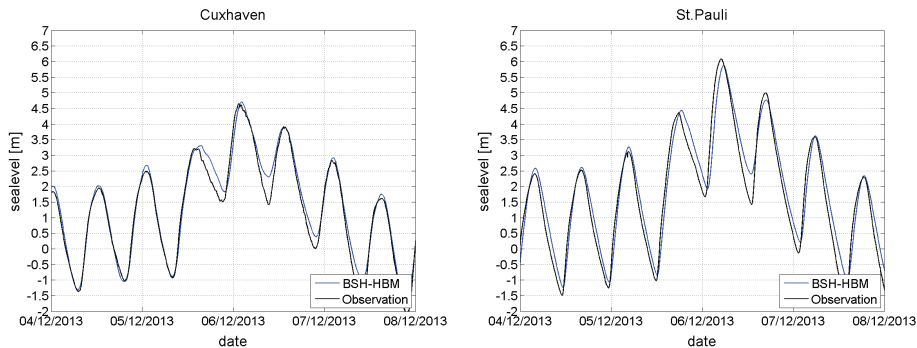


Abbildung 14: Wasserstände an den Pegeln Cuxhaven (links) und St. Pauli (rechts) während des Orkans Xaver.

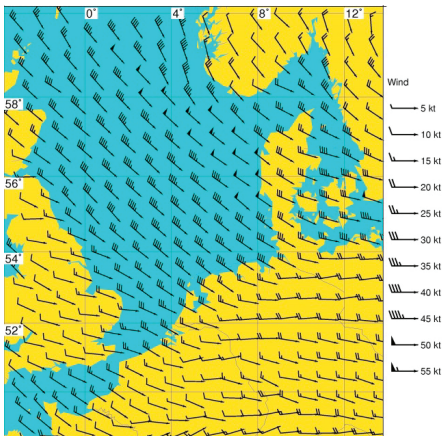


Abbildung 15: Mittlerer Wind in 10 Meter Höhe am 6. Dezember 2013, 00 UTC nach COSMO-EU.

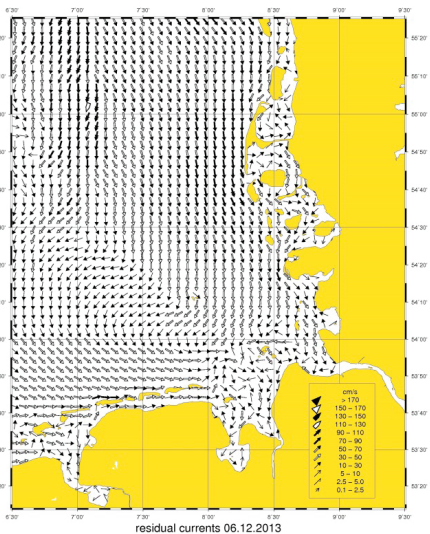


Abbildung 16: Residuale Strömungen an der Oberfläche in der Deutschen Bucht am 6. Dezember 2013 nach BSH-HBM.

Sehr eindrucksvoll waren auch die modellierten residualen Strömungen an der Oberfläche, die in der Deutschen Bucht fast überall zwischen 30 und 90 cm/s lagen (Abb.16) und damit dreimal so hoch waren wie unter vergleichbaren stabilen Windbedingungen mit 4-5 Beaufort aus konstanter Richtung während des gesamten Tages.

5 Ausblick

Das Modellsystem befindet sich in ständiger Weiterentwicklung. Um die sich ändernden und in der Regel steigenden Kundenanforderungen erfüllen zu können, wird es sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf technischer Ebene fortlaufend aktualisiert, angepasst und erweitert. Im Folgenden sind die wichtigsten Punkte der Weiterentwicklung aufgeführt:

5.1 Operationeller Ablaufplan/Computerausstattung

Durch das letzte beim BSH durchgeführte Hardware-Upgrade auf drei IBM P7 755-Server (4 x 8 Core, Power7-Prozessoren mit 3,6 GHz) und den starken Ausbau der Rechenleistung durch den HBM-Code sind die Modellläufe im Vergleich zu den vorherigen Systemen wesentlich schneller. Die frei gewordenen Ressourcen sollen hauptsächlich für die Verbesserung des operationell Ablaufplans eingesetzt werden. Aktuell wird nur das 2D-Sturmflutmodell viermal täglich mit den neuesten meteorologischen Daten gerechnet. Für das 3D-Zirkulationsmodell erfolgt nur ein Modelllauf pro Tag. In der letzten Phase der geplanten Aktualisierung des operationellen Ablaufplans sollen das 3D-NOKU-Setup und das 3D-EL-Setup viermal täglich gerechnet werden und Vorhersagedaten für mindestens 78 Stunden im Voraus liefern. In der Zwischenphase werden zwei Läufe pro Tag angestrebt. Weiterhin ist eine Optimierung der Datenbereitstellung für interne und externe Kunden vorgesehen. Die Zeit zwischen Modelllauf und Datenbereitstellung soll verkürzt und das System weiter stabilisiert werden.

5.2 Datenassimilation

Alle heute beim BSH durchgeführten Modellläufe sind komplett unabhängig, das heißt, außer der indirekten Verbindung, die über die Nutzung von Beobachtungsdaten in den Randbedingungen gegeben ist, besteht keine direkte Verbindung zwischen Modellgebiet und Beobachtungsgebiet. Am stärksten wirkt sich dies auf die Modellierung physikalischer Prozesse im Ozean aus, die keinen direkten Bezug zum atmosphärischen Antrieb haben, zum Beispiel die haline Schichtung. Zur Überwindung dieser Einschränkung wurden in den letzten Jahrzehnten Datenassimilationsverfahren entwickelt – zunächst in der Meteorologie und später auch in der Ozeanmodellierung. Das BSH arbeitet zusammen mit dem Alfred-Wegener-Institut (AWI) an der Entwicklung einer Datenassimilationskomponente. Schon nach dem ersten Schritt der Implementierung eines Datenassimilationsschemas für die Temperatur an der Meeresoberfläche (SST) wurde ein erheblicher Fehlerrückgang erreicht (LOZA et al. 2012; LOZA et al. 2014). Die Assimilation von SST-Daten aus Satellitenbeobachtungen wurde auf Temperatur- und Salzgehaltprofile erweitert (LOZA et al. 2013). Die Einbindung weiterer Datenquellen zu Temperatur und Salzgehalt (z. B. FerryBox-Systeme) ist geplant. Darüber hinaus sollen die Methoden auf Ozeanströmungen, Meereis und Wasserstände erweitert werden. Um das im Moment noch prä-operationelle Datenassimilationsschema voll funktionsfähig zu machen, wird ein weiterer Ausbau der Rechenkapazitäten am BSH nötig sein.

5.3 Ästuar-Modelle mit hoher Auflösung

Präzise Vorhersagen von Strömungen, Wasserstand und anderen Parametern in komplexen Küstengebieten wie den deutschen Nordseeästuaren setzen eine extrem hohe räumliche Auflösung voraus. Ein erster Schritt in Richtung hochauflösende Vorhersagen wurde im OPTEL-Projekt mit der Entwicklung eines Setups für das Elbeästuar mit einem horizontalen Rasterabstand von 90 m vollzogen. Die Weiterentwicklung des Elbe-Modells wird seit Anfang 2013 operationell betrieben. Es ist geplant, ein hochauflösendes Modell-

setup mit einer räumlichen Auflösung von mindestens 100 m auch für die Jade-/Weser- und Ems-Ästuar einzurichten.

5.4 Ökosystem-Modellierung

Immer häufiger werden Meeresdaten angefragt, die nicht auf die physische Umwelt beschränkt sind, so etwa von den zuständigen Ämtern für die Umsetzung der europäischen Meeresrichtlinien, z. B. der Wasserrahmenrichtlinie oder der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. Aus diesem Grund wird an der Entwicklung einer Ökosystemkomponente gearbeitet, die einer breiten Palette an Kunden biogeochemische Informationen bereitstellen kann. Das operationelle Setup für die Nord- und die Ostsee, das auf einer Kopplung von HBM und dem bereits etablierten Ökosystemmodell ERGOM (NEUMANN 2000; MAAR et al. 2011) basiert, befindet sich gegenwärtig in der Kalibrierungsphase.

5.5 Gekoppelte Modelle

Ein weiteres Feld intensiver Entwicklungsbemühungen ist die verbesserte Integration verschiedener Modellkomponenten in ein gekoppeltes System.

Die Integration von Ozean und Eis liegt zwar schon einige Jahre zurück und wird beim BSH bereits operationell betrieben, doch es bleibt noch Raum für Verbesserungen. Insbesondere die Simulation der Eis-Rheologie und der zugehörigen dynamischen Entwicklung von Meereis ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Auch in anderen Bereichen der Modellkopplung sind bereits große Fortschritte erzielt worden. Die Kopplung von Ozeanströmungen und Seegang befindet sich bereits seit einigen Jahren in der prä-operationellen Phase (MURAWSKI 2007) und wird nun auf Grundlage der neuesten Entwicklungen der Einzelkomponenten (HBM für Ozeanzirkulation, WAM (KOMEN et al. 1994; KIESER et al. 2012) für den Seegang) neu erforscht. Ein weiterer, vom BSH bis jetzt noch nicht angegangener Bereich ist die Kopplung von Ozean und Atmosphäre. Hier ist ein gekoppeltes System auf Basis von COSMO (2013) und HBM geplant.

5.6 Ausbau der Rechenkapazität/massive Parallelisierung

Der Betrieb eines operationellen Ozeanvorhersagesystems ist extrem rechenintensiv. Die ständig steigenden Nutzeranforderungen erfordern die fortlaufende Erweiterung der Rechenleistungen. Zur Unterstützung einer massiven Parallelisierung wie sie für zukünftige hochauflösende Setups und insbesondere für die Datenassimilation benötigt wird, wird die nächste Computergeneration beim BSH ein Linux-Cluster sein, das höhere Skalierbarkeit und geringere Computing-Kosten verspricht.

6 Schriftenverzeichnis

- BERG, P.: Mixing in HBM. Scientific Report. Copenhagen, Danisch Meteorological Institute, 12-03, 2012.
- BERG, P. and POULSEN, J. W.: Implementation details for HBM. Technical Report Copenhagen, Danish Meteorological Institute, 12-11, 2012.
- BERGSTROM, S.: The HBV model. In: Singh, V. P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO., 443-476, 1995.
- BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHcmod für die Nord- und Ostsee (OPTEL-A). Hamburg, Germany, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2011.
- CONSORTIUM FOR SMALL SCALE MODELING (COSMO): Core documentation of the COSMO-model.
Stand: 11.10.2013: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>
- DICK, S.; KLEINE, E. and JANSSEN, F.: A new operational circulation model for the North Sea and Baltic Sea using a novel vertical co-ordinate setup and first results. In: DALHIN, H.; BELL, M. J.; FLEMMING, N. C. and PETERSSON, S. E.: Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges. Proceedings of the Fifth International Conference on EuroGOOS, 20-22 May 2008, Exeter, UK, 225-231, 2008.
- DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; KLEIN, H. and KOMO, H.: The operational circulation model of BSH (BSH cmod). Model description and validation, Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 29/2001, Hamburg, Germany, Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2001.
- KIESER, J.; BRUNS, T.; LINDENTHAL, A.; BRÜNING, T.; JANSSEN, F.; BEHRENS, A.; LI, X. M.; LEHNER, S. and PLESKACHEVSKY, A.: First studies with the high-resolution coupled wave current model CWAM and other aspects of the project Sea State Monitor, presentation, 2012.
<http://www.waveworkshop.org/13thWaves/index.htm>, Banff
- KLEINE, E.: A class of hybrid vertical coordinates for ocean circulation modelling, Proceedings 6th HIROMB Scientific Workshop, St.Petersburg: 7-15, 2004.
- 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, Brest, 532 p., ISBN-13: 978-2-521-57781-6, 1994.
- LOZA, S.; SCHRÖTER, J.; DANIVLOV, S.; NERGER, L.; MABMANN, S. and JANSSEN, F.: Assimilating NOAA SST data into the BSH operational circulation model for the North and Baltic Seas: Inference about the data. Journal of Marine Systems, 105-08, 152-162, doi: 10.1016/j.jmarsys.2012.07.008 , hdl:10013/epic.39926, 2012.
- LOZA, S.; DANIVLOV, S.; SCHRÖTER, J.; NERGER, L.; MABMANN, S. and JANSSEN, F.: Assimilating NOAA's SST data and in situ T, S profiles into the BSH operational circulation model for the North and Baltic Seas. Poster, The Future of Operational Oceanography, Congress Center Hamburg, Hamburg, Germany, 8 October 2013 - 10 October 2013. hdl:10013/epic.42579, 2013.

- LOZA, S.; DANIVLOV, S.; SCHRÖTER, J.; JANJIC PFANDER, T.; NERGER, L. and JANSSEN, F.: Assimilating NOAA SST data into BSH operational circulation model for the North and Baltic Seas: Part 2. Sensitivity of the forecast's skill to the prior model error statistics, *Journal of Marine Systems*, 129, 259-270, doi: 10.1016/j.jmarsys.2013.06.011 , hdl:10013/epic.41927, 2014.
- MAAR, M.; MØLLER, E. F.; LARSEN, J.; MADSEN, K. S., WAN, Z.; SHE, J.; JONASSON, L. and NEUMANN, T.: Ecosystem modelling across a salinity gradient from the North Sea to the Baltic Sea. *Ecological Modelling*, 222, 1696-1711, 2011.
- MAJEWSKI, D.; FRANK, H.; LIERMANN, D. und RITTER, B.: Kurze Beschreibung des Globalmodells GME (20 km / L60) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD, 2012. Stand: 01.11.2018: https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/gme/gme_dbbeschr_201202.pdf
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. und BORK, I.: Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHmod für die Nord- und Ostsee (OPTEL-A), *Die Küste* (not published), 2012.
- MURAWSKI, J.: Die Wechselwirkung von Seegang und Strömung: Eine theoretische Grundlegung mit Modellanwendungen. dissertation. Universität Hamburg, GKSS 2007/12, 2007.
- NEUMANN, T.: Towards a 3D-ecosystem model of the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 25, 405-419, 2000.
- SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE (SHOM) (Ed.): *Table des marées des grands ports du monde*, Le Service, Brest, 186 p., ISBN-13: 978-2-110-80386-3, 1982.
- SCHULZ, J. P. und SCHÄTTLER, U.: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Europa COSMO-EU (LME) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD, 2009. Stand: 01.11.2018: https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/modelldokumentationen/nwv/cosmo_eu/lme_dbbeschr_200901.pdf