

# **OPTEL-C: Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee**

*Christine Kremp, Elisabeth Rudolph und Aïssa Sebili*

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des KFKI-Projektes OPTEL-C wird eine operationelle Wasserstands-, Strömungs- und Salztransportvorhersage für die Tidelbe entwickelt, die auch bei extremen Wind- und/oder Oberwassersituationen Vorhersagen zur Verfügung stellt. Bei der Konzeption des Vorhersagesystems aus Atmosphäre, Nordsee und Tidelbe wird beachtet, dass eine Übertragung des Vorhersagesystems auf die Ästuare von Jade-Weser und Ems möglich ist. Auf der Grundlage des 3-dimensionalen hydrodynamischen numerischen Modells UnTRIM (CASULLI und WALTERS 2000) wird bei der Bundesanstalt für Wasserbau BAW das BAW-Vorhersagemodell Elbe entwickelt. Das mathematische Verfahren UnTRIM eignet sich besonders für Anwendungen in geometrisch komplexen Ästuaren mit regelmäßigem Überfluten und Trockenfallen. Das BAW-Vorhersagemodell für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt in der Tidelbe erhält Informationen über den vorhergesagten Wind über der Elbe aus dem Wettervorhersagemodell COSMO-EU (DWD 2012) des Deutschen Wetterdienstes DWD. Am seeseitigen Rand zur Nordsee werden Wasserstands- und Salztransportvorhersagen aus dem Vorhersagemodell BSHmod (DICK et al. 2001) des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie BSH vorgegeben. Als Abfluss der Elbe für den Vorhersagezeitraum wird die letzte verfügbare Abflussmessung in Neu Darchau (BfG) verwendet. Die vom BAW-Vorhersagemodell Elbe benötigten Schnittstellen zu den genannten Randwerten sind in OPTEL-C in enger Zusammenarbeit mit OPTEL-A (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2012) und OPTEL-B (GANSKE und ROSENHAGEN 2012) entwickelt worden. Seit Januar 2011 läuft das BAW-Vorhersagemodell Elbe ununterbrochen im präoperationellen Betrieb auf dem Rechner des BSH und erzeugt räumlich und zeitlich hochaufgelöste Vorhersagen für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt.

## **Schlagwörter**

operationelles Vorhersagemodell, Elbe Ästuar, hydrodynamisches numerisches Modell, Trockenfallen und Überfluten

## **Summary**

*Within the framework of the KFKI research project OPTEL-C at the Federal Waterways Engineering and Research Institute BAW an operational forecast model for water level, current velocity and salinity of the Elbe estuary is developed. The model also works during extreme wind and discharge events. The forecast system which combines the atmosphere, the North Sea and the Elbe Estuary is conceptually designed to be easily applied to the estuaries of Ems and Jade-Weser. Numerically the BAW-forecast*

*model Elbe is based on the 3-dimensional hydrodynamical numerical model UnTRIM (CASULLI und WALTERS 2000). The mathematical model UnTRIM is an adequate tool for applications in geometrical complex estuaries with large periodically drying and wetting tidal flats. The BAW-forecast model Elbe uses predicted wind fields over the Elbe provided by the weather forecast model COSMO-EU (DWD 2012) of the German weather service DWD. On the seaward boundary predicted water levels and salinities are delivered by the forecast model BSHcmod (DICK et al. 2001) of the Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH). The freshwater discharge of the Elbe measured at Neu Darchau is provided by the German Federal Institute of Hydrology (BjG). The interface connecting the boundary values and the BAW-forecast model Elbe is developed in a close cooperation with OPTEL-A (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2012) und OPTEL-B (GANSKE und ROSENHAGEN 2012). Since January 2011 the BAW-forecast model Elbe is running in pre-operational mode on the computer of BSH.*

## Keywords

*operational forecast model, elbe estuary, hydrodynamical numerical model, wetting and drying*

## Inhalt

1 Einführung OPTEL-C .....	142
2 Das BAW-Vorhersagemodell der Elbe.....	144
2.1 Das Modellgebiet des BAW-Vorhersagemodells der Elbe .....	144
2.2 Das numerische Verfahren UnTRIM.....	145
2.3 Topographie und Gitter.....	146
2.4 Einbinden des BAW-Vorhersagemodells Elbe in die Vorhersageumgebung des BSH .....	147
3 Kalibrierung und Validierung.....	148
3.1 Das Wehr Geesthacht .....	152
3.2 Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell des BSH.....	153
4 Szenarien-Vergleich.....	154
5 Präoperationeller Betrieb.....	157
5.1 Hoher Abfluss im Januar 2011 .....	158
5.2 Mittlere Verhältnisse im März 2011 .....	160
6 Weitere Arbeiten.....	163
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	166
8 Danksagung .....	167
9 Schriftenverzeichnis .....	167

## 1 Einführung OPTEL-C

Die Elbe und besonders die tidebeeinflusste Unterelbe ist ein stark frequentierter Schifffahrtsweg. Aufgrund des Tideeinflusses benötigen Schiffe, die von der Nordsee

kommend die Elbe nach Hamburg befahren, präzise und möglichst langfristige Vorhersagen des Wasserstandes. Für Manöver im Hafen wie z. B. das Eindocken von Schiffen oder das Wenden sehr großer Schiffe sind zusätzlich detaillierte Kenntnisse der tideabhängigen Strömungsverhältnisse wichtig.

Für die Tideelbe wurden bisher vom BSH Tidehochwasser Thw und Tideniedrigwasser Tnw für ausgewählte Orte entlang des Ästuares vorhergesagt und veröffentlicht. Bei extremen Ereignissen wie Sturmfluten, sehr hohen oder auch sehr niedrigen Oberwasserzuflüssen in die Tideelbe sind räumlich und zeitlich detaillierte Vorhersagen von Wasserstands- und Strömungsverhältnissen jedoch besonders wichtig. Diese Informationen ermöglichen zusätzlich zu einer verbesserten Beratung der Schifffahrt, des Küstenschutzes und der Wasserwirtschaft auch die Möglichkeit, bei Havarien im Bereich der Elbe die Öl- bzw. Schadstoffbekämpfung effizienter zu betreiben. Die Sturmfluten im Winter 2006/2007 zeigten ebenfalls deutlich, dass hoher Bedarf für eine verbesserte Wasserstandsvorhersage bei Sturmflut für die Elbe bzw. alle Ästuaire der deutschen Nordseeküste besteht.

Ein Ziel des KFKI-Projektes OPTTEL (Projektlaufzeit April 2008 bis März 2011) ist es, eine operationelle Wasserstands- und Strömungsvorhersage für die Tideelbe zu entwickeln. Das Projekt „OPTTEL – Windstaudstudien und Entwicklung eines operationellen Tideelbe-Modells“ besteht aus vier Teilprojekten, die in einer Kooperation zwischen dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH, siehe BORK und MÜLLER-NAVARRA 2012), dem Deutschen Wetterdienst (DWD, siehe GANSKE und ROSENHAGEN 2012), der Hamburg Port Authority (HPA, siehe STROTMANN et al. 2012) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, siehe KREMP 2011) bearbeitet werden. Das Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Forschungscoordination und die wissenschaftliche Begleitung des Projektes erfolgt durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI).

Durch die Kopplung hydrodynamisch numerischer (HN-) Modelle der Tideelbe mit hydrodynamisch-numerischen Vorhersagemodellen der Nordsee und der Deutschen Bucht wird im Rahmen des Forschungsvorhabens OPTTEL gezeigt, dass mit numerischen Modellen und heutiger Rechnerleistung räumlich (flächendeckende) und zeitlich (gesamter Tideverlauf) hochaufgelöste operationelle Wasserstands-, Strömungs- und Salztransportvorhersagen für die Tideelbe möglich sind. Hierbei werden zwei unterschiedliche numerische Verfahren von OPTTEL-A (BSHcmod, DICK et al. 2001) und OPTTEL-C (UnTRIM, CASULLI und WALTERS 2000) eingesetzt, um die Vor- und Nachteile der Modellverfahren in unterschiedlichen Vorhersagesituationen untersuchen zu können. Das Projekt OPTTEL ist auch als Pilotstudie für Jade-Weser und Ems gedacht.

Ziel des von der BAW bearbeiteten Teilprojektes OPTTEL-C ist die Entwicklung eines operationellen Tideelbemodels. Das BAW-Vorhersagemodell Elbe wird auf der Grundlage des 3-dimensionalen hydrodynamisch numerischen Modellverfahrens UnTRIM, das ein unstrukturiertes orthogonales Gitter verwendet, entwickelt. Die Wahl eines derartigen Gitters ermöglicht eine möglichst tiefen- und volumentreue Wiedergabe der Ästuartopographie bei einer möglichst kleinen Anzahl von Gitterelementen.

In einer engen Zusammenarbeit mit OPTTEL-A und OPTTEL-B werden die für die Randwertübergabe aus der Nordsee (Wasserstand, Strömung und Salzgehalt am Rand der Elbe zur Deutschen Bucht), aus der Atmosphäre (Windgeschwindigkeit über der Elbe) und aus dem Binnenbereich (Oberwasserzufluss in die Tideelbe) benötigten Schnittstellen

entwickelt. Für die von OPTEL-D zusammengestellten 6 Szenarien aus den Jahren 2006, 2007 und 2008 werden von OPTEL-C mit dem BAW-Vorhersagemodell Elbe Simulationen unter Vorhersagebedingungen durchgeführt. Die Modellergebnisse für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt werden analysiert und mit Messungen verglichen. Das BAW-Vorhersagemodell Elbe ist auf dem Rechner des BSH implementiert. Im präoperationellen Betrieb werden seit Januar 2011 täglich Wasserstand, Strömung und Salzgehalt für die Tideelbe vorhergesagt.

## 2 Das BAW-Vorhersagemodell der Elbe

Wasserstand, Strömung und Salzgehalt in der Tideelbe werden durch die Gezeitendynamik in der Nordsee bzw. in der Deutschen Bucht, durch den Wind über der Nordsee und der Elbe und durch den Oberwasserzufluss aus der Oberen und Mittleren Elbe bestimmt. Die künstliche Tidegrenze der Elbe ist das Wehr Geesthacht. Bei hohen Oberwasserzuflüssen oder Sturmflutereignissen wird das Wehr Geesthacht gelegt. Der Einfluss der Nordsee auf die Wasserstände kann bei Sturmflut auch stromauf von Geesthacht beobachtet werden.

Ziel des BAW-Vorhersagemodells Elbe ist es, Wasserstand und Strömung für den Bereich der Tideelbe zwischen Bake A/Bake Z in der Elbmündung (Elbe-km 756) und dem Wehr Geesthacht (Elbe-km 585) bzw. bei gelegtem Wehr Geesthacht bis Bleckede (Elbe-km 550) vorherzusagen. Abb.1 zeigt den vom BAW-Vorhersagemodell modellierten Bereich der Elbe.

### 2.1 Das Modellgebiet des BAW-Vorhersagemodells der Elbe

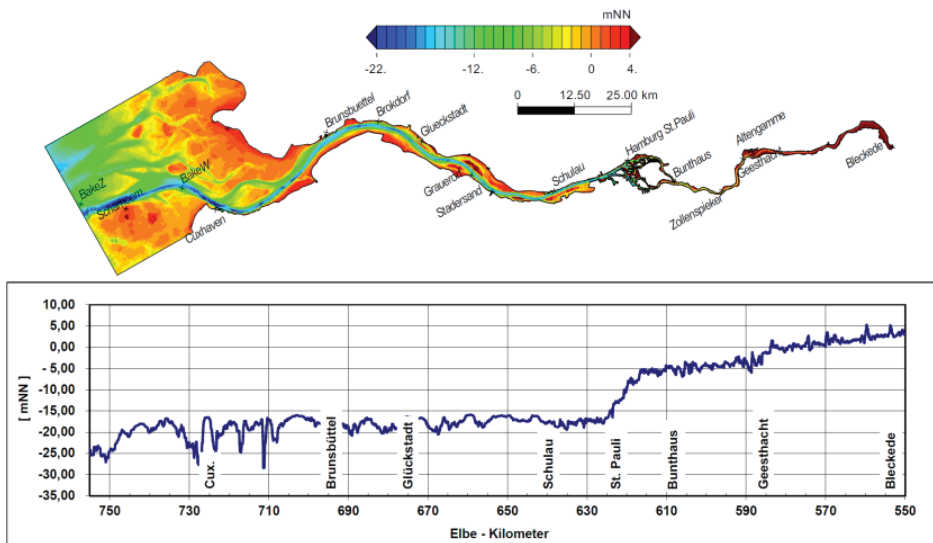


Abbildung 1: Topographie der Elbe im Modellgebiet von der Mündung bei Cuxhaven bis Bleckede (oben) sowie die Tiefe der Elbe in Fahrrinnenmitte (unten). Im Text genannte Orte sind eingezeichnet.

Das Modellgebiet des BAW-Vorhersagemodells umfasst die Außenelbe bis Elbe-km 756, die Unterelbe sowie die Mittelelbe bis Bleckede und reicht bis zur Deichlinie. Die Tideelbe verengt sich von 15 km Breite bei Cuxhaven (Elbe-km 724) auf 3 km Breite bei Brunsbüttel (Elbe-km 695) und auf 300 m Breite bei Geesthacht (Elbe-km 585). Im Mündungsbereich ist die Elbe mehr als 20 m tief (Abb.1). Zwischen der Mündung und Hamburg ist die Tideelbe gleichzeitig die Seeschiffahrtsstraße zum Hafen Hamburg. In diesem Bereich hat die Fahrrinne der Elbe auf Grund der nautischen Anforderungen eine Tiefe von NN-16 m. Im Bereich von Hamburg spaltet sich die Elbe in die Norder- und die Süderelbe. Im Hamburger Hafen sind die Hafenbecken sowie die außerhalb des Hochwasserschutzes liegenden überflutbaren Bereiche zu erkennen. Im Bereich der Außenelbe sind die großen Wattgebiete zu sehen. Zwischen Cuxhaven und Bleckede enthält das Modellgebiet alle überflutbaren Vorlandgebiete bis zur Deichlinie. Die Nebenflüsse der Elbe sind zur Zeit nicht im Modellgebiet enthalten.

## 2.2 Das numerische Verfahren UnTRIM

Das BAW-Vorhersagemodell Elbe verwendet das dreidimensionale hydrodynamische Modellverfahren UnTRIM (CASULLI und WALTERS 2000). Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens befindet sich in Mathematical Model UnTRIM – Validation Document (CASULLI und LANG 2004). UnTRIM ist ein finite Differenzen/finite Volumen Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter löst. Grundlage des Verfahrens UnTRIM sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung sowie der dreidimensionalen Transportgleichung für Salz, Wärme, Schwebstoffe sowie suspendierte Sedimente darstellen.

Mit diesem Berechnungsverfahren werden flächendeckend für jeden aktiven Gitterpunkt und Zeitschritt u. a. folgende physikalische Größen berechnet:

- Wasserspiegelauslenkung bezüglich NN,
- Strömungsgeschwindigkeit und
- Salzgehalt.

Bei der Berechnung der aufgezählten physikalischen Größen berücksichtigt das mathematische Modell des Elbe-Ästuars die Tidedynamik beeinflussende Prozesse wie z. B. den Oberwasserzufluss, das Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen, die Sohlreibung, den Impulseintrag durch den Wind und die Corioliskraft.

Randwerte, Anfangswerte sowie die Parametrisierung einzelner physikalischer Prozesse werden dem UnTRIM-Kern über ein sogenanntes user interface (CASULLI und LANG 2004) vorgegeben. Dieses user interface wird ebenfalls genutzt, um UnTRIM in die Vorhersageumgebung des BSH einzubinden.

Die räumliche und zeitliche Variabilität des lokalen Windfeldes erzeugt einen zusätzlichen räumlich und zeitlich variablen Impulseintrag aus der Atmosphäre, der Strömung und Wasserstand von Flüssen und Ästuaren kleinräumig beeinflusst. Dieser Effekt ist bei Extremereignissen wie Sturmfluten nicht zu vernachlässigen und muss deshalb im HN-Modell berücksichtigt werden.

Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird parametrisiert und durch die Windschubspannung  $\vec{\tau}_{surface}$  beschrieben:

$$\vec{\tau}_{surface} = \rho_{air} \cdot c_{d10} \cdot |\vec{v}_{10, Wind}| \cdot \vec{v}_{10, Wind} \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet  $\rho_{air}$  die Dichte der Luft und  $\vec{v}_{10, Wind}$  die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund bzw. der Wasseroberfläche. Für das vorliegende Modell wird der Impulsaustauschkoeffizient  $c_{d10}$  mit den von SMITH und BANKE (1975) vorgeschlagenen Koeffizienten berechnet:

$$c_{d10} = (0.63 + 0.066 \cdot |\vec{v}_{10, Wind}|) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Die Bodenschubspannung wird im BAW-Vorhersagemodells-Elbe nach dem Chezy-Gesetz parametrisiert.

$$\vec{\tau}_{bottom} = \rho_{water} \cdot c_B \cdot |\vec{v}| \cdot \vec{v} \quad (3)$$

$\rho_{water}$  bezeichnet die Dichte des Wassers und  $\vec{v}$  die horizontale Strömungsgeschwindigkeit. Für  $c_B$  gilt dabei  $c_B = \frac{g}{C_z^2}$  mit g-Erdbeschleunigung und  $C_z$ -Chezy-Wert.

Für die Steuerung des Modells wird am offenen seeseitigen Rand der zeitliche Verlauf des Wasserstandes und des Salzgehaltes für jedes auf dem offenen Rand des Modells liegende Polygon vorgegeben. Am landseitigen offenen Modellrand bei Bleckede werden die am Pegel Neu Darchau gemessenen Abflüsse (Q) vorgegeben. Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über dem gesamten Modellgebiet vorgegeben.

### 2.3 Topographie und Gitter

Die Wahl des Gitters und der Topographie hat ebenfalls Einfluss auf die Modellergebnisse. Zur Erstellung der hoch aufgelösten Modelltopographie liegen Informationen über den morphologischen Zustand 2006 aus einem digitalen Geländemodell (DGM) auf der Grundlage der hydrographischen Vermessung 2006 vor. Da die Topographie der Elbe natürlichen und künstlichen Veränderungen unterworfen ist, ist vorgesehen, die Modelltopographie des BAW-Vorhersagemodells Elbe regelmäßig zu aktualisieren.

Das dem HN-Modell zugrunde liegende unstrukturierte orthogonale Gitternetz ist im vorliegenden Fall aus dreieckigen und viereckigen Gitterelementen (siehe Abb. 2) aufgebaut und überdeckt das Modellgebiet vollständig. Dieses Gitter ermöglicht Gebiete, von Interesse wie die Hafengebiete oder die Fahrrinne, detaillierter aufzulösen als z. B. Wattgebiete. Dadurch wird eine möglichst tiefen- und volumentreue Wiedergabe der Ästuartopographie bei einer möglichst kleinen Anzahl von Gitterelementen erreicht. Gitternetz und räumliche Diskretisierung werden in Tab. 1 näher beschrieben.

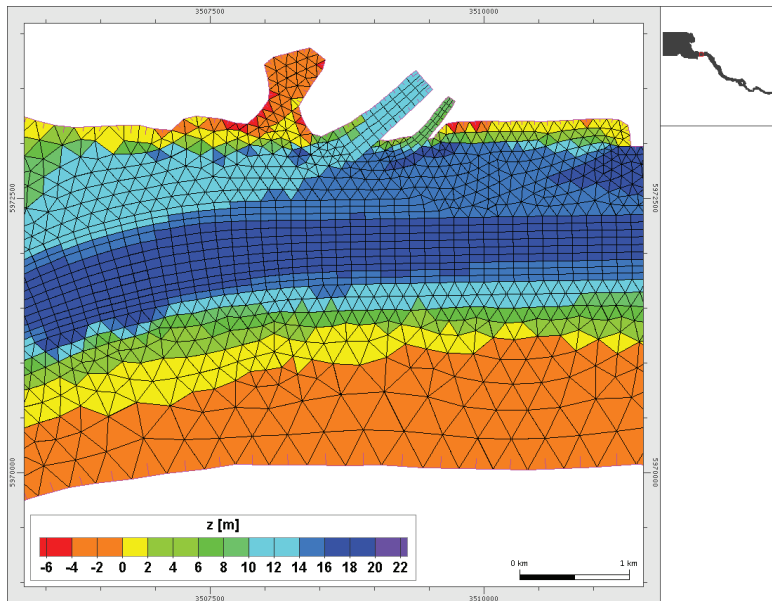


Abbildung 2: Ausschnitt aus dem unstrukturierten orthogonalen Gitter des BAW-Vorhersagemodells Elbe im Bereich von Brunsbüttel. In der Fahrinne der Elbe ist das Gitter hier aus Rechtecken und in den Seitenbereichen aus Dreiecken aufgebaut. Die Farben kennzeichnen die Tiefe der Polygone.

Tabelle 1: Charakteristische Werte des Modellgitters des BAW-Vorhersagemodells Elbe.

	2D	3D
Anzahl der Knoten	75 065	
Anzahl der Kanten	195 942	1 311 335
Anzahl der Polygone	120 852	894 918
davon Dreiecke	99 269	
davon Vierecke	21 583	
Kantenlängen	12 m bis 1 131 m	
Elementflächen	75 m <sup>2</sup> bis 860 000 m <sup>2</sup>	
vertikale Auflösung	-	2 m

## 2.4 Einbinden des BAW-Vorhersagemodells Elbe in die Vorhersageumgebung des BSH

Das BAW-Vorhersagemodell Elbe ist eingebunden in die Vorhersageumgebung des BSH. In dieser Umgebung stehen die Vorhersagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) u. a. für Windgeschwindigkeit und Luftdruck über der Nordsee, die Vorhersagen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) u. a. für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt in der Nordsee und der Deutschen Bucht sowie die aktuell gemessenen Abflüsse (bereitgestellt von der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG) u. a. von Ems, Weser und Elbe bereit.



Für das BAW-Vorhersagemodell Elbe müssen die Daten aus der BSH - Vorhersageumgebung aufbereitet werden. Die Windgeschwindigkeiten aus den vom DWD vorhergesagten Windfeldern werden mit einem vom DWD in OPTEL-B entwickelten Verfahren für den Bereich der Tideelbe skaliert (GANSKE und ROSENHAGEN 2012). Aus den Wasserstands- und Salzgehaltsvorhersagen für die Nordsee werden vom BSH (entwickelt in OPTEL-A) Randwertzeitreihen für den seeseitigen Modellrand des BAW-Vorhersagemodells Elbe erzeugt. Im Rahmen von OPTEL-C werden zwei Präprozessoren entwickelt, die die vom atmosphärischen Modell bzw. vom Nordseemodell bereitgestellten Randwertzeitreihen für das BAW-Vorhersagemodell aufbereiten. Bei der Entwicklung dieser Präprozessoren wird darauf geachtet, dass sie unabhängig von der verwendeten Topographie, dem verwendeten Gitter und auch dem verwendeten Ästuar arbeiten, um eine problemlose Verwendung der Präprozessoren für Jade-Weser und Ems zu gewährleisten.

### 3 Kalibrierung und Validierung

Der Nutzung des BAW-Vorhersagemodells Elbe im präoperationellen Betrieb geht die Kalibrierung und Validierung des Modells mit Szenarien aus der Vergangenheit voraus. Für die Modellkalibrierung werden verschiedene Parameter eines ortsspezifischen numerischen HN-Modells so angepasst, dass ein realitätsnahes Modellverhalten erzielt wird. Die Abweichungen zwischen Beobachtungsdaten und Modellergebnissen sollten möglichst gering sein. Abweichungen können sich aus Messfehlern (Pegelmessungen, hydrographische Vermessungen) und aus Modellapproximationen und -parametrisierungen ergeben.

Mit der Modellvalidierung wird der Nachweis erbracht, dass die Ergebnisse des verwendeten numerischen Modells für das Anwendungsgebiet, hier das Tideelbegebiet, innerhalb des geforderten Genauigkeitsbereiches für die beabsichtigte Modellanwendung (hier Wasserstandsvorhersage für die Tideelbe) liegen. Hierbei werden die bei der Kalibrierung ermittelten Parameter unverändert für andere Simulationszeiträume übernommen.

Zur Modellkalibrierung und -validierung werden Zeiträume aus dem Jahr 2006 betrachtet (KREMP 2011). Diese Zeiträume beinhalten

- Szenario 1 (15. Juli bis 1. August 2006): mittlere Abflussverhältnisse mit  $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- Szenario 2 (24. März bis 13. April 2006): sehr hoher Abfluss, ansteigend von  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $3600 \text{ m}^3/\text{s}$ ,
- Szenario 3 (13. April 2006 bis 27. April 2006): sehr hoher Abfluss, fallend von  $3600 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $1900 \text{ m}^3/\text{s}$  sowie
- Szenario 5 (28. Oktober bis 4. November 2006): Sturmflut vom 1. November 2006 mit  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Zur Einordnung des Abflusses der Szenarien sei auf folgende charakteristischen Abflüsse für Neu Darchau hingewiesen: mittlerer Abfluss (1926/2006)  $MQ = 710 \text{ m}^3/\text{s}$ , höchster beobachteter Abfluss (31. März 1940)  $HQ = 3620 \text{ m}^3/\text{s}$ , häufigster Abfluss  $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$  (DGJ 2010). Für diese Szenarienzeiträume liegen Wasserstandsrandwerte vor, die aus den Messungen an der auf dem Modellrand liegenden Bake Z erzeugt wurden. Als Abflussrandwert wird der in Neu Darchau gemessene Abfluss verwendet.



Es wird eine Zeitreihe von Windfeldern für den Szenarienzeitraum aus den jeweils ersten 12 Stunden der DWD - Vorhersage zusammengesetzt. Der Salzgehalt auf dem seeseitigen Rand wird aus den Vorhersagen des Nordseemodells des BSH genommen. Die Kalibrierung und Validierung des BAW-Vorhersagemodells Elbe ist im Bericht zum KFKI Projekt OPTEL-C ausführlich dargestellt (KREMP 2011).

Der Vergleich zwischen gemessenen Wasserstandszeitreihen und modellierten Wasserstandszeitreihen in Cuxhaven (Elbe-km 724) und Hamburg St. Pauli (Elbe-km 623) ist in Abb. 3 beispielhaft für sechs Tage im Juli 2006 (Szenario 1) dargestellt. Man erkennt, dass sowohl in Cuxhaven als auch in St. Pauli das modellierte mit dem gemessenen Tidehochwasser Thw gut übereinstimmt. Das Tideniedrigwasser Tnw liegt sowohl in Cuxhaven als auch in St. Pauli im Modell um ca. 10 bis 20 cm zu hoch.

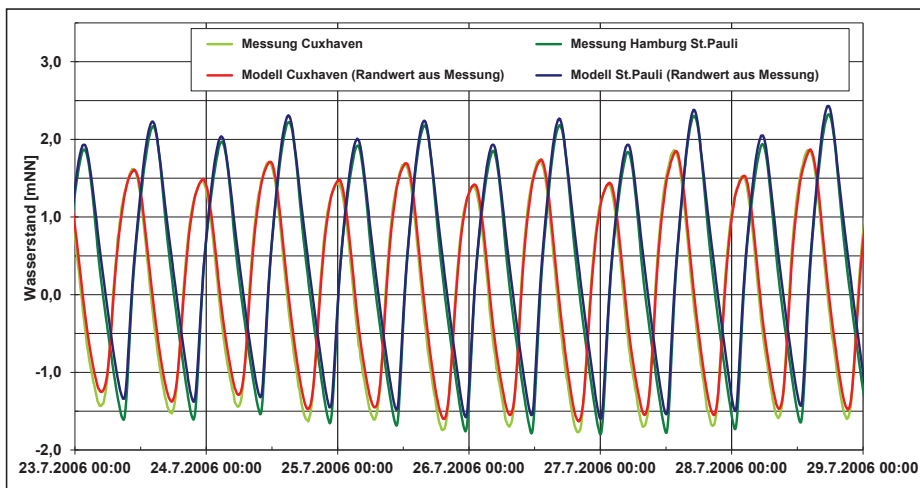


Abbildung 3: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (blau) im Juli 2006 (Szenario 1) berechnet mit dem BAW-Vorhersagemodell der Elbe. Die Wasserstandsrandwerte sind aus der Messung Bake Z generiert. Die Messungen sind grün gekennzeichnet.

Der Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeiten ist in Abb. 4 beispielhaft für sechs Tage im Oktober/November 2006 (Szenario 5) für die Dauermessstelle D2 bei Juellssand (Elbe-km 651) dargestellt. In diesen Zeitraum fällt die Sturmflut vom 1. November 2006. Man erkennt eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den modellierten Strömungsgeschwindigkeiten sowohl im Betrag der Geschwindigkeit, der Dauer von Flut und Ebbe als auch in den Kenterzeitpunkten. Während der nicht durch Wind beeinflussten Tiden beispielsweise am 28. Oktober 2006, beobachtet man deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut als bei Ebbe sowohl in den Modellergebnissen als auch in den Messungen. Auch am Tag der Sturmflut (1. November 2006) erkennt man eine gute Übereinstimmung der gemessenen mit den modellierten Strömungsgeschwindigkeiten, wie bei den niedrigeren Ebbestromgeschwindigkeiten in der Nacht, den leicht erhöhten Flutstromgeschwindigkeiten am Morgen und der deutlich verlängerten Ebbephase mit erhöhten Ebbestromgeschwindigkeiten am Nachmittag.

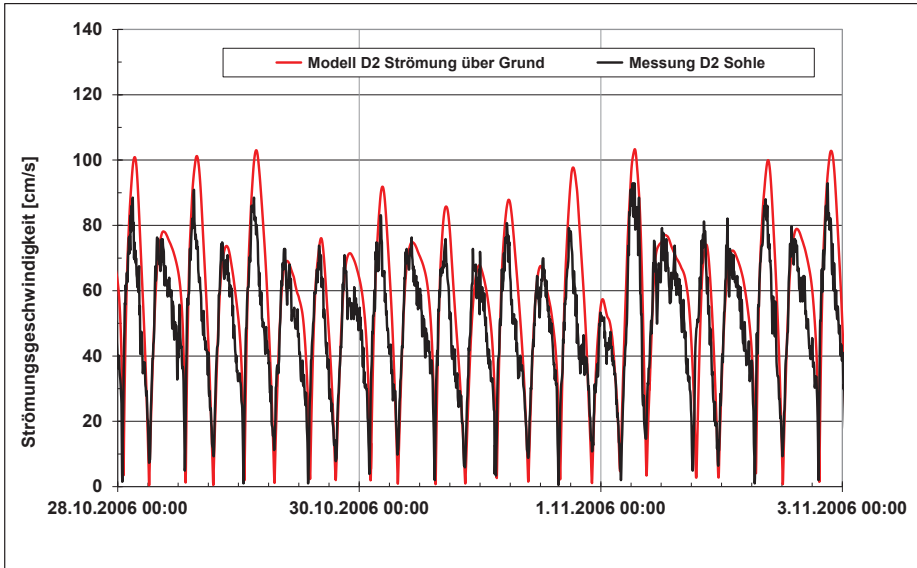


Abbildung 4: In 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (rot) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2 (Juelssand) im Zeitraum Szenario 5.

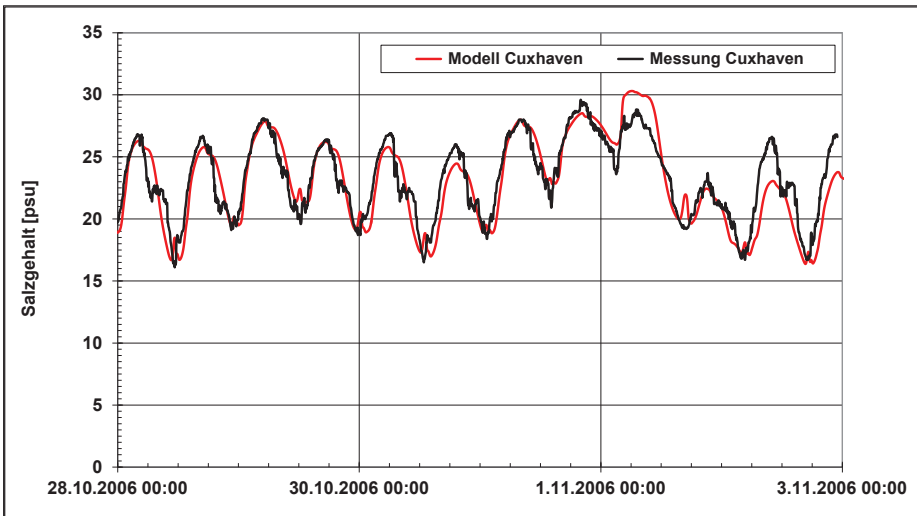


Abbildung 5: Gemessener (schwarz) und modellierter (rot) Salzgehalt an der Station Cuxhaven im Zeitraum Szenario 5.

Beispielhaft ist für den gleichen Zeitraum aus Szenario 5 der Vergleich zwischen gemessenem und modelliertem Salzgehalt bei Cuxhaven in Abb. 5 dargestellt. Sowohl die Höhe des Salzgehaltes als auch die Variation mit der Tide wird vom Modell wiedergegeben. Auch die Zunahme des Salzgehaltes am Tag der Sturmflut sowie das deutliche Absinken des Salzgehaltes während der verlängerten Ebbphase am Nachmittag des 1. Novembers wird im Modell abgebildet.

An 14 Pegeln entlang der Elbe zwischen Bake Z und dem Wehr Geesthacht (siehe auch Abb. 1) werden die modellierten Wasserstandszeitreihen mit den gemessenen Wasserstandszeitreihen sowie die ausgewerteten Tidekennwerte Tidehochwasser Thw, Tideniedrigwasser Tnw, Tidehub Thb, Tidemittelwasser Tmw, Eintrittszeit Thw, Eintrittszeit Tnw verglichen. Es wird eine statistische Auswertung der gemessenen und modellierten Daten durchgeführt, um Mittelwert und Standardabweichung der Differenz der genannten Größen für alle Szenarien zu ermitteln (KREMP 2011). Für das zur Kalibrierung verwendete Szenario 1 ist beispielhaft Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten des Thw, Tnw, Tmw und Thb in Abb. 6 dargestellt. Das BAW-Vorhersagemodell Elbe verwendet am seeseitigen Modellrand Wasserstandsrandwerte, die aus der Messung Bake Z generiert sind. Dadurch entsteht keine Abweichung zwischen Modell und Messung bei Bake Z (siehe Abb. 6). Das Elbmodell überschätzt die Thw im Zeitraum Szenario 1 entlang der Elbe von der Mündung bis Hamburg um weniger als  $10\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$  und im Bereich stromauf von Hamburg um weniger als  $10\text{ cm} \pm 3\text{ cm}$ . Das Tnw wird um ca.  $20\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$  überschätzt. Dies führt zu einer Unterschätzung des Tidehubs Thb um bis zu  $30\text{ cm}$  entlang der Elbe. Das Mittelwasser Tmw liegt im Modell ca.  $10\text{ cm}$  zu hoch.

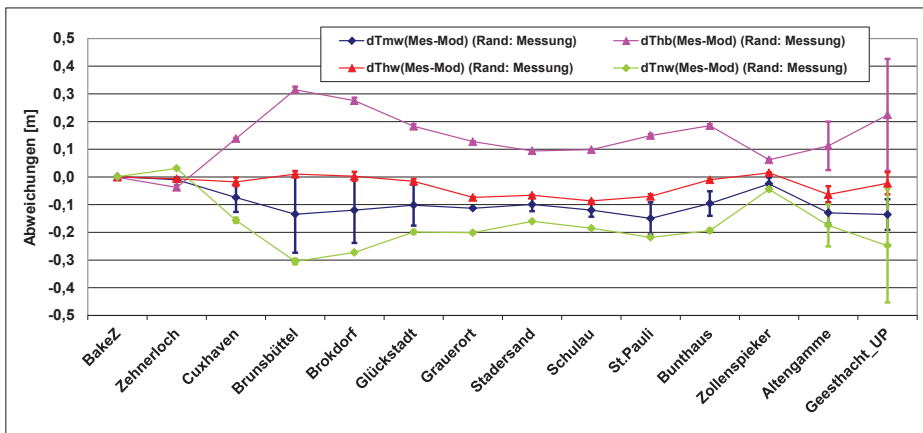


Abbildung 6: Szenario 1: Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten des Thw (rot), Tnw (grün) Tmw (blau) und Thb (lila). Das Elbmodell verwendet aus der Messung Bake Z generierte Wasserstandsrandwerte.

Zur Validierung werden die vier Szenarien aus dem Jahr 2006 (s. o.) mit den im Kalibrierungszeitraum gefundenen Einstellungen für die Modellparameter (z. B. Bodenrauigkeit) modelliert. Abb. 7 und Abb. 8 zeigen Mittelwert und Standardabweichung der Differenz zwischen gemessenem und modellierten Werten des Thw und des Tnw an 14 Orten entlang der Elbe. Abb. 1 zeigt die Lage der Orte. Von Bake Z bis Hamburg ergeben sich für das Thw Abweichungen zwischen Messung und Modell von  $\pm 10\text{ cm}$  mit einer Standardabweichung von  $\pm 3\text{ cm}$ . Bei sehr hohen Abflüssen (Szenario 3 und Szenario 4) steigt die Standardabweichung stromauf von Hamburg an. Für das Tnw (Abb. 8) ergeben sich Abweichungen zwischen Messung und Modell von  $\pm 40\text{ cm}$ . Bei hohen Abflüssen (Szenario 2 und 3) wird das Tnw stromauf von Hamburg vom Elbmodell um bis zu  $40\text{ cm}$  unterschätzt.

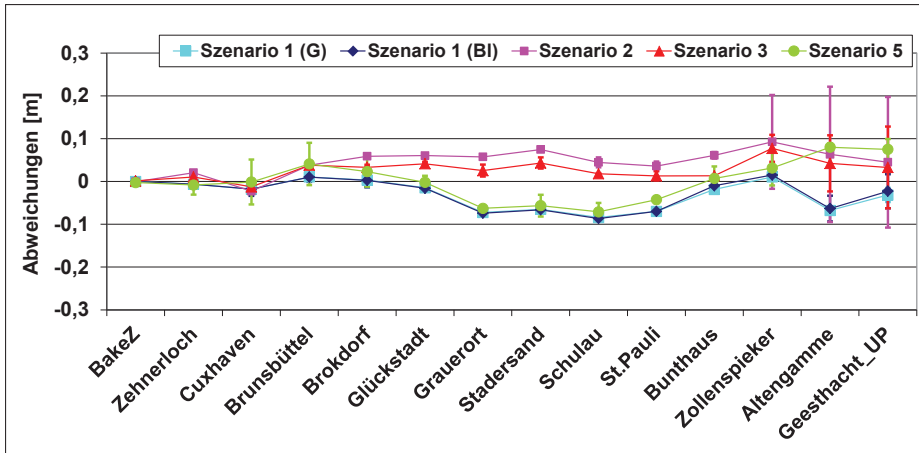


Abbildung 7: Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten des Thw für Szenario 1 (blau), Szenario 2 (lila), Szenario 3 (rot) und Szenario 5 (grün) (Modellgebiet bis Bleckede wie in Abb. 1). Zusätzlich sind die Ergebnisse für Szenario 1 in einem Modellgebiet bis Geesthacht in hellblau dargestellt. Das Elbmodell verwendet aus der Messung Bake Z generierte Wasserstandsrandwerte.

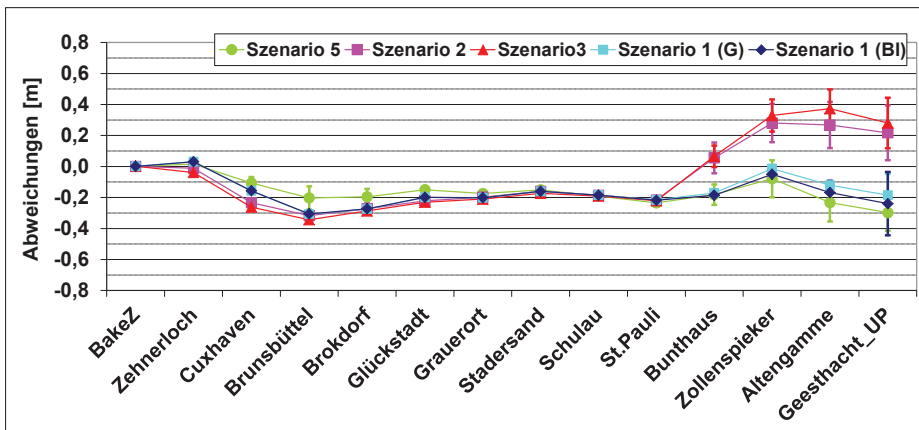


Abbildung 8: Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten des Tnw für Szenario 1 (blau), Szenario 2 (lila), Szenario 3 (rot) und Szenario 5 (grün) (Modellgebiet bis Bleckede wie in Abb. 1). Zusätzlich sind die Ergebnisse für Szenario 1 in einem Modellgebiet bis Geesthacht in hellblau dargestellt. Das Elbmodell verwendet aus der Messung Bake Z generierte Wasserstandsrandwerte.

### 3.1 Das Wehr Geesthacht

Das Wehr Geesthacht (Abb. 1) stellt bei mittleren Abflussverhältnissen die künstliche Tidegrenze der Elbe dar. Das Stauziel beträgt NN + 4,00 m am Pumpspeicherwerk Geesthacht. Bei Abflüssen größer als 1100 m<sup>3</sup>/s sowie bei Sturmfluten wird das Wehr gelegt (WSV 1994). Für das Szenario 1 (Q = 400 m<sup>3</sup>/s) wird der Einfluss des gelegten Wehres Geesthacht auf Thw und Tnw untersucht. Hierfür wird Szenario 1 in einer

Topographie modelliert, die von der Elbmündung bis Geesthacht reicht. Es zeigt sich (siehe Abb. 7 und Abb. 8), dass sich Thw und Tnw erst stromauf von Bunthaus (Elbekm 609) unterscheiden. Im Thw ergeben sich Unterschiede von ca. 1 cm und im Tnw von bis zu 5 cm. Aufgrund dieser geringen Unterschiede wird im BAW-Vorhersagemodell-Elbe das Wehr Geesthacht als gelegt behandelt.

### 3.2 Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell des BSH

Im operationellen Betrieb stehen für die Wasserstandsvorhersage keine Messungen zur Erzeugung der Wasserstandsrandwerte zur Verfügung. Für die Wasserstandsvorhersage werden die Randwerte für das BAW-Vorhersagemodell-Elbe auf dem offenen Rand zur Nordsee aus den Vorhersagen des Nordseemodells des BSH erzeugt. Für die genannten Szenarien hat das BSH im Rahmen von OPTTEL-A Wasserstandsrandwerte aus dem Nordseemodell des BSH zu Verfügung gestellt.

Mit diesen Randwerten werden die Szenarien unter Vorhersagebedingungen modelliert. Dies führt zu Abweichungen zwischen gemessenem Thw und Tnw und modelliertem Thw und Tnw bereits am Pegel Bake Z auf dem Modellrand zur Nordsee (siehe Abb. 9 und Abb. 10). Bei Bake Z erreicht der Mittelwert der Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Thw  $\pm 10$  cm (Abb. 9). Entlang der Elbe liegt der Mittelwert der Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Thw für die betrachteten Szenarien zwischen + 10 cm und - 20 cm.

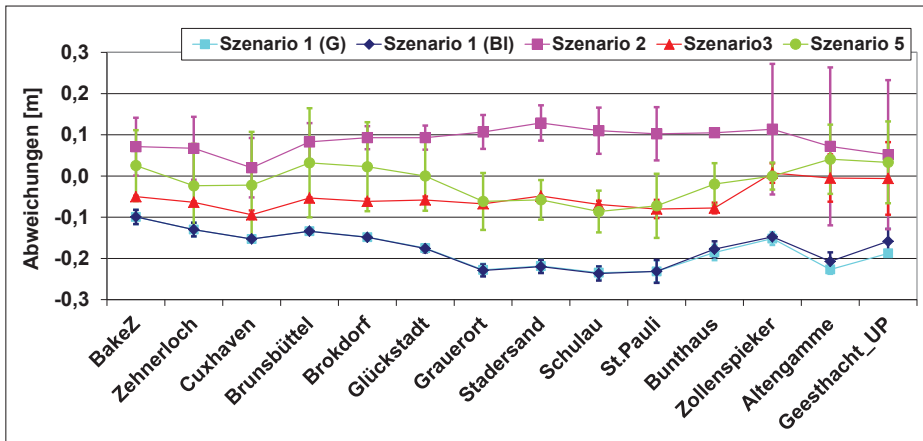


Abbildung 9: Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten des Thw für Szenario 1 (blau), Szenario 2 (lila), Szenario 3 (rot) und Szenario 5 (grün) (Modellgebiet bis Bleckede wie in Abb. 1). Zusätzlich sind die Ergebnisse für Szenario 1 in einem Modellgebiet bis Geesthacht in hellblau dargestellt. Das Elbemodell verwendet aus den Wasserstandsvorhersagen des BSH generierte Wasserstandsrandwerte.

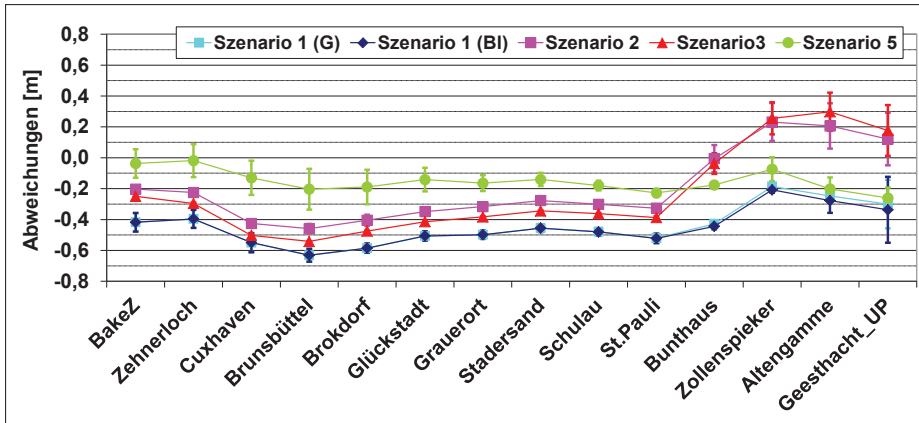


Abbildung 10: Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten des Tnw für Szenario 1 (blau), Szenario 2 (lila), Szenario 3 (rot) und Szenario 5 (grün) (Modellgebiet bis Bleckede wie in Abb. 1). Zusätzlich sind die Ergebnisse für Szenario 1 in einem Modellgebiet bis Geesthacht in hellblau dargestellt. Das Elbemodell verwendet aus den Wasserstandsvorhersagen des BSH generierte Wasserstandsrandwerte.

Das Nordseemodell überschätzt das Tnw bei Bake Z im Mittel um bis zu 40 cm. Der Mittelwert der Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Tnw erreicht bei Bake Z 0 bis - 40 cm (Abb. 10). Von der Mündung bis Hamburg liegt das Tnw in allen Szenarien im Modell zu hoch. Stromauf von Hamburg liegt das Tnw bei hohem Abfluss im Mittel 20 cm bis 30 cm zu niedrig. Entlang der Elbe liegt der Mittelwert der Differenz zwischen gemessenem und modelliertem Tnw für die betrachteten Szenarien zwischen + 30 cm und - 60 cm (Abb. 10).

Die durch die Randwerte auf dem Rand zur Nordsee erzeugten Abweichungen zwischen Messung und modellierten Wasserständen bleiben entlang der Elbe erhalten.

#### 4 Szenarien-Vergleich

Die Qualität der Modellergebnisse des BAW-Vorhersagemodells Elbe soll auf der Grundlage von 6 Szenarien überprüft werden. Diese Szenarien wurden von OPTEL-D ausgewählt und sind im Bericht zu OPTEL-D (STROTSMANN et al. 2011) ausführlich beschrieben. Zusätzlich zu den bereits in Kap. 3 genannten vier Szenarien wird ein Zeitraum mit extremer Ost-/Südostwindlage (Szenario 4: 1. Januar bis 8. Januar 2008) sowie eine Sturmflut mit steiler Windstaukurve (Szenario 6: 14. Januar bis 21. Januar 2007) betrachtet. Im Bericht zu OPTEL-C (KREMP 2011) findet man eine ausführliche Darstellung des Vergleiches der modellierten und gemessenen Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte für die sechs genannten Szenarienzeiträume. Beispielhaft seien hier die Ergebnisse für Szenario 5 (Sturmflut mit fülliger Windstaukurve) dargestellt.

Die standardmäßig vom DWD für die Wasserstandsvorhersage für die Nordsee zu Verfügung gestellten Windfelder aus dem Modell COSMO-EU besitzen eine räumliche Auflösung von 7 km x 7 km. COSMO-EU kennt deshalb nicht die tatsächliche Land-Wasser-Verteilung im Elbeästuar. Kleinräumige Veränderungen im Windfeld,

hervorgerufen durch die unterschiedliche Rauigkeit von Land und Wasser oder auch durch Inseln und Sandbänke verursachte Abschattungen, werden nicht aufgelöst. Stromauf von Brunsbüttel ist die Elbe schmäler als die räumliche Auflösung des Wettervorhersagemodells. Die Unterschiede in der Rauigkeit von Land und Wasser können in diesem Bereich der Elbe nicht mehr aufgelöst werden. Das Wettervorhersagemodell COSMO-EU unterschätzt in diesem Bereich die Windgeschwindigkeiten über der Elbe (GANSKE und ROSENHAGEN 2012).

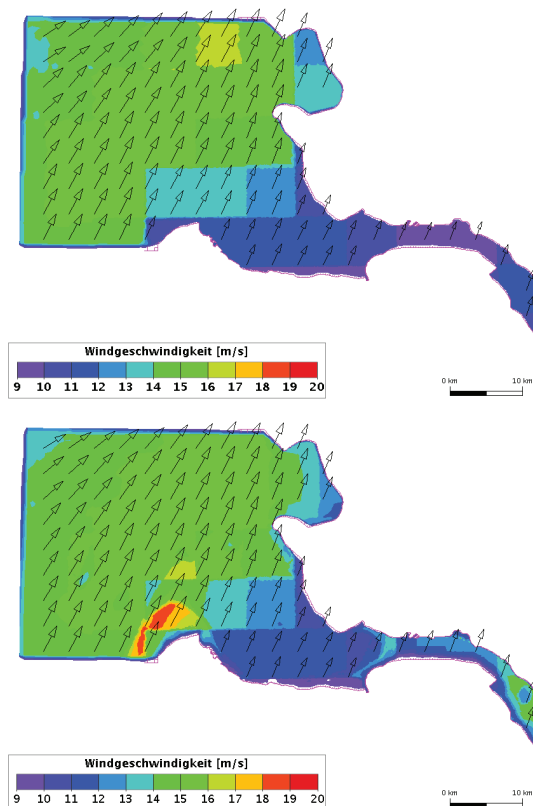


Abbildung 11: Windgeschwindigkeit am 31. Oktober 2006 (Szenario 5) über der Elbmündung aus dem Wettervorhersagemodell COSMO-EU. Oben die Original-Windgeschwindigkeiten und unten die mit WASP-Faktoren korrigierten Windgeschwindigkeiten.

In OPTEL-B wurde deshalb eine Methode entwickelt, die ein downscaling von Windfeldern aus COSMO-EU auf die Tideelbe ermöglicht. Um die Einflüsse der Rauigkeitsunterschiede auf das Windfeld zu korrigieren, werden windrichtungsabhängige (Wind Atlas Analysis and Application Program – WASP -) Korrekturfaktoren auf einem Gitter mit einer Gitterweite von 250 m für die mit COSMO-EU berechneten Windgeschwindigkeiten bestimmt (OPTEL-B, GANSKE und ROSENHAGEN 2012). Die Bedeutung dieser Korrekturfaktoren wird in Abb. 11 deutlich. Im linken Teil der Abb. sind die von COSMO-EU berechneten Windgeschwindigkeiten über der Elbmündung dargestellt. Erst durch den Einsatz der Korrekturfaktoren werden im Bereich zwischen Brunsbüttel und Brokdorf hohe Windgeschwindigkeiten erreicht.



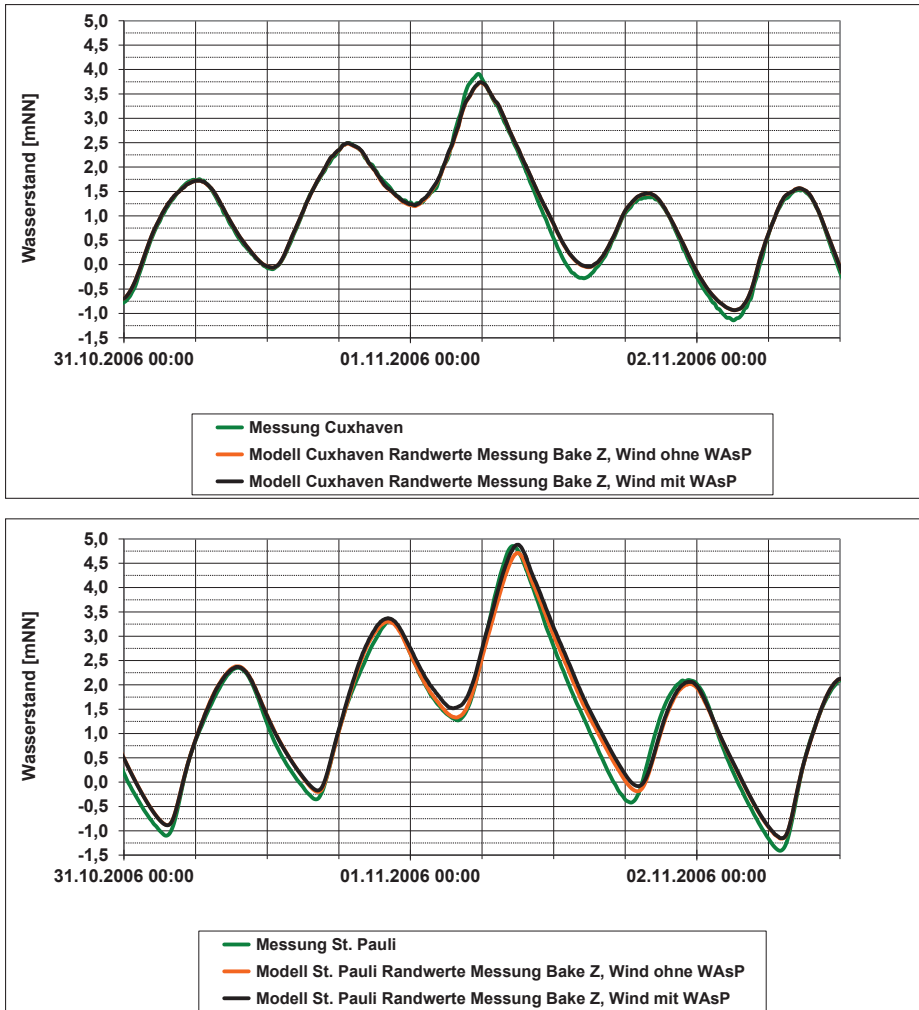


Abbildung 12: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven (oben) und Hamburg St. Pauli (unten) während der Sturmflut vom 1. November 2006 (Szenario 5) berechnet mit dem BAW-Vorhersagemodell der Elbe mit Wasserstandsrandwerten, generiert aus der Messung Bake Z und Windfeldern mit (schwarz) und ohne (rot) WASP-Korrekturfaktoren. Die Messung ist grün gekennzeichnet.

Diese veränderten Windgeschwindigkeiten haben einen Einfluss auf die Höhe der Wasserstände. Abb. 12 zeigt die Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven und Hamburg St. Pauli während der Sturmflut vom 1. November 2006 (Szenario 5) berechnet mit dem BAW-Vorhersagemodell Elbe mit Wasserstandsrandwerten, generiert aus der Messung Bake Z und Windfeldern mit und ohne WASP-Korrekturfaktoren. Die Korrekturfaktoren führen im Sturmflutzeitraum zu deutlich höheren Windgeschwindigkeiten über dem Elbeästuar. Im Bereich der Elbmündung werden die Wasserstände hauptsächlich durch die gewählten Wasserstandsrandwerte bestimmt. Bei Cuxhaven ist kein Unterschied im Wasserstandsverlauf durch den Einsatz der Korrekturfaktoren zu beobachten.

In Hamburg St. Pauli jedoch erkennt man den Einfluss der Korrekturfaktoren auf die Wasserstände, besonders auch auf den Sturmflutscheitelwasserstand (siehe Abb. 12 unten). Durch den Einsatz der Korrekturfaktoren erhöht sich der Sturmflutscheitelwasserstand in St. Pauli um 17 cm. Abb. 13 zeigt die Differenz zwischen gemessenem und modellierten Sturmflutscheitelwasserstand für den 1. November 2011 an 14 Orten entlang der Elbe. Durch die Berücksichtigung der WasP-Korrekturfaktoren verringern sich stromauf von Glückstadt die Abweichungen zwischen Modell und Messung.

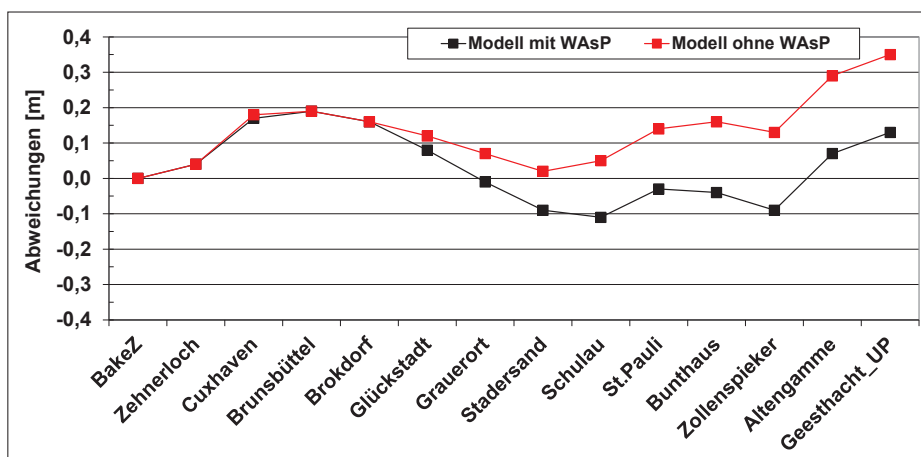


Abbildung 13: Differenz der gemessenen und modellierten Sturmflutscheitelwasserstände (Messung – Modell) für den 1. November 2006 (Szenario 5) mit (schwarz) und ohne (rot) Verwendung der WasP-Korrekturfaktoren.

## 5 Präoperationeller Betrieb

Im Rahmen eines präoperationellen Betriebes soll das Verhalten des BAW-Vorhersagemodells-Elbe in der Vorhersageumgebung des BSH geprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Hierfür wird das BAW-Vorhersagemodell-Elbe auf dem Vorhersagerechner des BSH installiert. Das Modell muss die Windvorhersage des DWD, die Wasserstandsvorhersagen des BSH für die Nordsee sowie die von der BfG zu Verfügung gestellte Abflussmessung Neu Darchau zum geeigneten Zeitpunkt lesen und anschließend eine Vorhersage für die Elbe durchführen.

Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe wurde Ende 2010 auf den Rechner des BSH portiert. Das Programmpaket wurde bei der BAW auf einem SGI - Rechner mit linux - Betriebssystem entwickelt. Beim BSH laufen die operationellen Vorhersagen auf einem IBM-Rechner mit AIX - Betriebssystem. Nach geringfügigen Anpassungsarbeiten aufgrund der unterschiedlichen Fortran 90 - Compiler wurde im November 2010 der präoperationelle Betrieb des BAW-Vorhersagemodell Elbe in der Vorhersageumgebung des BSH aufgenommen.

Jeden Tag am frühen Morgen werden im Anschluss an die operationellen Vorhersagen des DWD und BSH die Randwerte für das BAW-Vorhersagemodell-Elbe vorbereitet. Anschließend wird eine 24-stündige Vorhersage für Wasserstand, Strömung

und Salzgehalt mit dem BAW-Vorhersagemodells-Elbe durchgeführt. Tab. 2 gibt einen Überblick zum Ablauf einer 24 - stündigen Vorhersage sowie zur benötigten Zeit.

Tabelle 2: Ablauf der Vorhersage im präoperationellen Betrieb beim BSH für einen Vorhersagezeitraum von 24 Stunden.

Vorhersage Nordsee und Deutsche Bucht mit BSH-cmodnoku	2 Stunden
Vorbereitung Randwerte BAW-Vorhersagemodell Elbe	1,5 Stunden
Vorhersage mit BAW-Vorhersagemodell Elbe (UnTRIM2007)	1,5 Stunden

Im präoperationellen Betrieb werden sowohl zum Erzeugen der Randwerte für die Wasserstands- und Salzgehaltsentwicklung als auch für die Windentwicklung die Vorhersagen des BSH und des DWD verwendet. Da bereits diese Daten einen Vorhersagefehler enthalten können, sollte dieser auch in den Vorhersageergebnissen für die Elbe zu sehen sein. Im präoperationellen Betrieb wird Wasserstand, Strömung und Salzgehalt für einen 24-stündigen Zeitraum vorhergesagt.

Bereits in den ersten Monaten des präoperationellen Betriebes treten für die Vorhersage interessante Oberwasserzufluss- und Windsituationen auf. Im Januar 2011 steigt der Oberwasserzufluss (Messung Neu Darchau) auf  $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$  an. Am 5. Februar 2011 wird in der Elbe eine Sturmflut beobachtet. Anfang März und Anfang Mai 2011 treten mittlere Verhältnisse bezogen auf  $T_{hw}$  und  $T_{nw}$  auf. Im folgenden Kap. werden die Vorhersageergebnisse für ausgewählte Zeiträume und Orte mit Messungen (siehe Pegelonline) verglichen.

## 5.1 Hoher Abfluss im Januar 2011

Zwischen dem 16. Januar 2011 und dem 24. Januar 2011 steigt der Abfluss der Elbe bei Neu Darchau von  $2330 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $3570 \text{ m}^3/\text{s}$  an. Abb. 14 zeigt den Wasserstandsverlauf für diesen Zeitraum bei Bake Z auf dem Rand des BAW-Vorhersagemodells Elbe zum BSH Nordsee Modell. Die dunkelblau gekennzeichnete Wasserstandszeitreihe ist aus acht 24-stündigen Vorhersagen des BSH-Nordseemodells zusammengesetzt. Der Vergleich Messung (hellblau) mit Modell (dunkelblau) gibt einen Hinweis auf die Vorhersagegüte des Nordseemodells an diesem Ort und somit auf die Güte der Randwerte für das BAW-Vorhersagemodell Elbe. In diesem Zeitraum findet man Abweichungen zwischen Messung und Vorhersage sowohl im Tidehochwasser  $T_{hw}$  als auch im Tideniedrigwasser  $T_{nw}$ . Die acht 24-stündigen Wasserstandsvorhersagen aus dem BAW-Vorhersagemodell Elbe für Cuxhaven, Hamburg St. Pauli und Zollenspieker sind in Abb. 15 bis Abb. 17 dargestellt.

Aufgrund der Untersuchungen zu Szenario 2 (siehe Kap. 3) erwartet man für ansteigenden Oberwasserzufluss, dass die Vorhersage das  $T_{hw}$  (siehe Abb. 7 bzw. Abb. 9 rote Quadrate) zwischen Brunsbüttel und Geesthacht unterschätzt und das  $T_{nw}$  (siehe Abb. 8 bzw. Abb. 10 rote Quadrate) zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli überschätzt. Dieses erwartete Verhalten wird in den hier gezeigten Vorhersagen beobachtet. Im Bereich stromauf von Hamburg, z. B. bei Zollenspieker (Abb. 17, hellblau), werden die Wasserstände deutlich durch den hohen Oberwasserzufluss modifiziert. Das  $T_{nw}$  und das  $T_{hw}$  liegen über dem mittleren  $MT_{nw}$  und  $MT_{hw}$  und der Tidehub  $Thb$  ist deutlich kleiner als bei mittleren Abflussverhältnissen. Dieses beschriebene Verhalten ist

auch in den Wasserstandsvorhersagen des BAW-Vorhersagemodells Elbe (Abb. 17, dunkelblau) abgebildet.

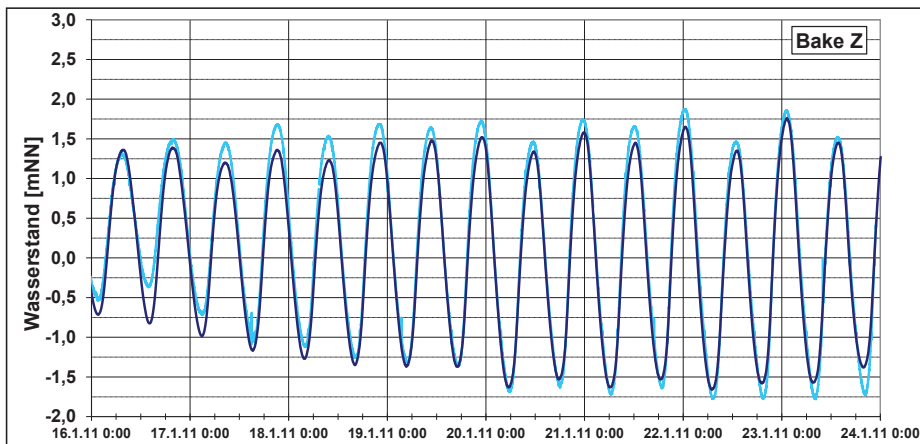


Abbildung 14: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z auf dem Rand des BAW-Vorhersagemodells-Elbe zum BSH Nordsee Modell im Januar 2011. Die Vorhersage des Nordseemodells (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

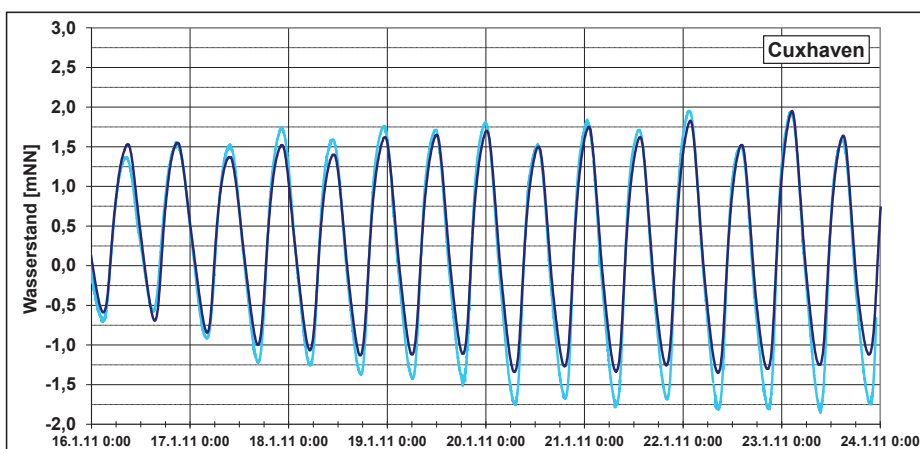


Abbildung 15: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

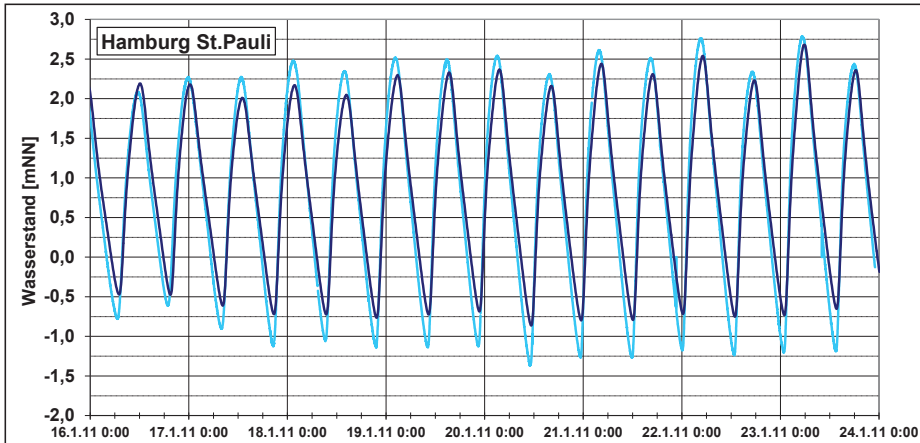


Abbildung 16: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

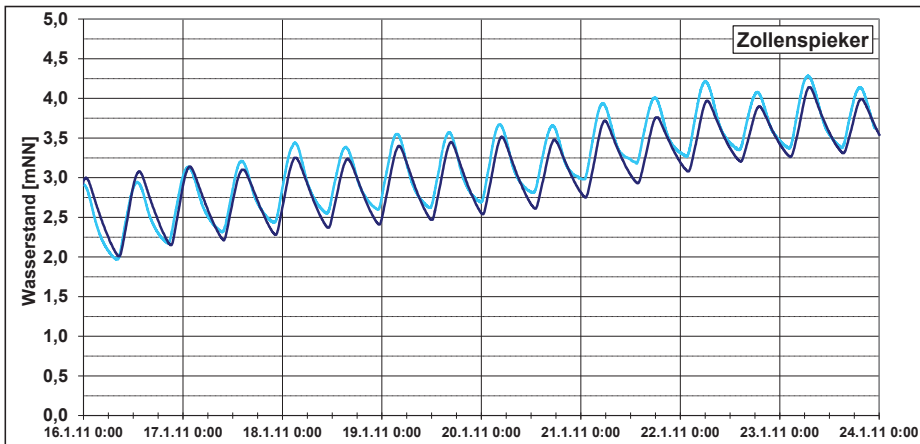


Abbildung 17: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

## 5.2 Mittlere Verhältnisse im März 2011

Zwischen dem 5. und 9. März 2011 sinkt der Abfluss der Elbe bei Neu Darchau von  $1030 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $945 \text{ m}^3/\text{s}$ . Abb. 18 zeigt den Wasserstandsverlauf in diesem Zeitraum bei Bake Z auf dem Rand des BAW-Vorhersagemodells Elbe zum BSH-Nordsee Modell. Diese Wasserstandszeitreihe ist aus vier 24-stündigen Vorhersagen zusammengesetzt. Der Vergleich Messung mit Modell bei Bake Z zeigt, dass für den betrachteten Zeitraum die Thw vom Nordseemodell des BSH sehr gut vorhergesagt werden. Die Thw liegen in diesem Zeitraum im Nordseemodell ca. 25 cm höher als in der Messung.

Die vier 24-stündigen Wasserstandsvorhersagen für Cuxhaven, Hamburg St. Pauli und Zollenspieker sind in Abb. 19 bis Abb. 21 dargestellt. Aufgrund der Untersuchungen zu Szenario 1 (mittlere Verhältnisse, siehe Kap. 3) erwartet man für die Vorhersage des Thw

zwischen Brunsbüttel und Geesthacht Abweichungen von der Messung von  $\pm 10$  cm (Abb. 7 bzw. Abb. 9, blaue Rhomben). Für das Thw erwartet man zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli zu hohe Werte im Vergleich zur Messung (Abb. 8 bzw. Abb. 10, blaue Rhomben). Das erwartete Verhalten wird in den dargestellten Vorhersagen beobachtet.

Zwischen Cuxhaven (Abb. 19) und Hamburg St. Pauli (Abb. 20) weichen die Vorhersagen des BAW-Vorhersagemodells Elbe für das Thw um weniger als  $\pm 10$  cm von der Messung ab. Das Thw wird in der Vorhersage ca. 10 Minuten zu spät erreicht. Diese Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung liegen in der Größenordnung, die bereits in den Randwerten aus dem Nordseemodell bei Bake Z (siehe Abb. 18) zu beobachten sind.

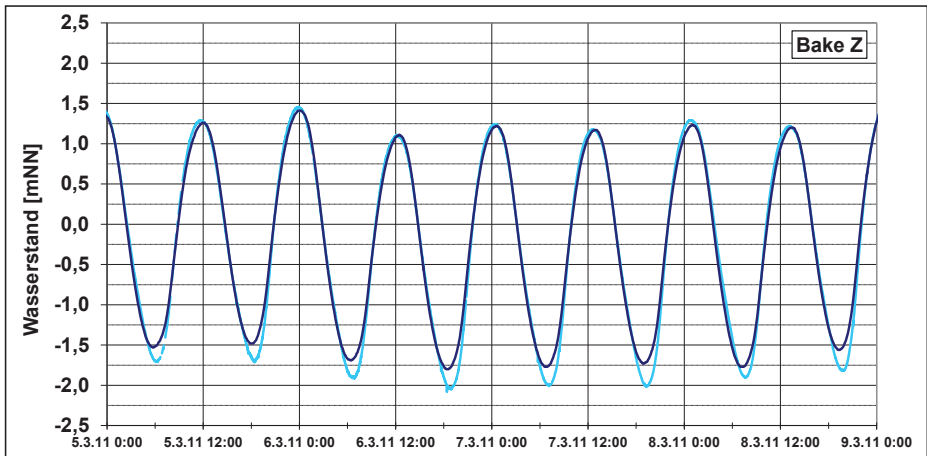


Abbildung 18: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im März 2011. Die Vorhersage des Nordseemodells (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

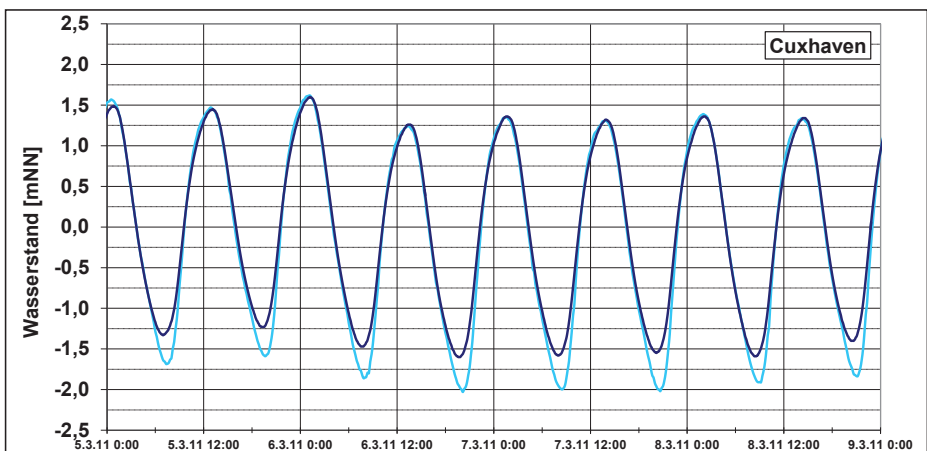


Abbildung 19: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

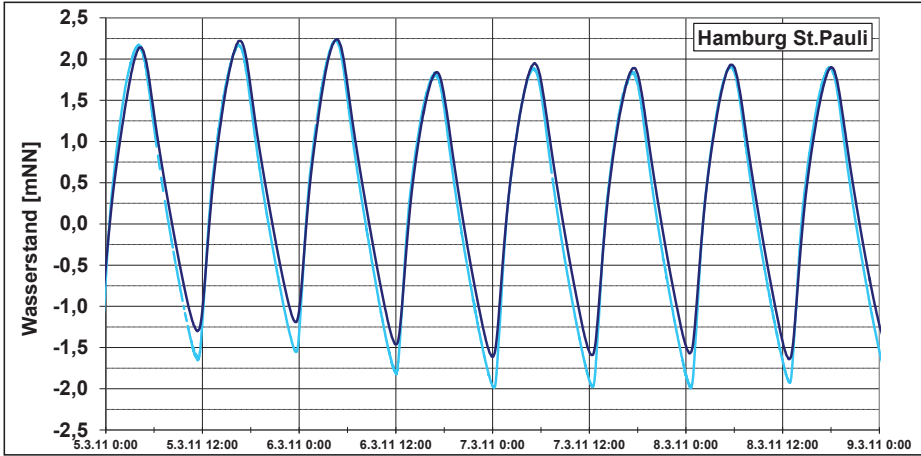


Abbildung 20: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

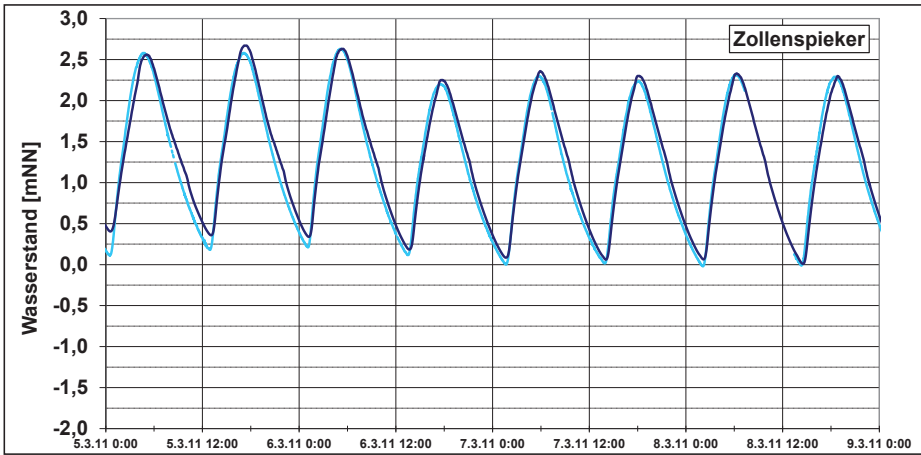


Abbildung 21: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Die Vorhersageergebnisse des BAW-Vorhersagemodells Elbe aus dem präoperationellen Betrieb zeigen entlang der Elbe, wie aus den Ergebnissen für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum zu erwarten, in Abhängigkeit von der Vorhersagegüte des Wasserstandes auf dem Rand zur Nordsee, sehr zufriedenstellende Vorhersagen des Tidehochwassers Thw sowie der Eintrittszeit des Thw und weniger zufriedenstellende Vorhersagen des Tideniedrigwasser Tnw.



## 6 Weitere Arbeiten

Um die Vorhersagegüte von der Tidephase unabhängig zu machen, wird parallel zum prä-operationellen Betrieb an einer Verbesserung der Kalibrierung des BAW-Vorhersagemodells Elbe gearbeitet. Eine Verbesserung der Wasserstandsvorhersage wird durch die Wahl einer anderen Parametrisierung der Bodenreibung erzielt. Statt der Formulierung der Bodenschubspannung nach Chezy wird die wassertiefenabhängige Formulierung nach Nikuradse (CASULLI und LANG 2004b) verwendet. Besonders die Vorhersage des Tideniedrigwassers  $T_{nw}$  wird durch diese Parametrisierung deutlich verbessert.

Zusätzlich wird die Vorhersage der Wassertemperatur ermöglicht. Dafür wird am landseitigen Rand bei Bleckede, die bei Cumlosen (Elbe-km 470) vom LUGV Brandenburg gemessene Wassertemperatur vorgegeben. Am seeseitigen Rand wird die Temperaturvorhersage aus dem Nordseemodell des BSH berücksichtigt.

Mit diesem weiterentwickelten BAW-Vorhersagemodell Elbe (PROPTTEL) wird erneut Szenario 1 modelliert. Hierbei werden ebenfalls die aus der Wasserstandsmessung an Bake Z generierten Wasserstandsrandwerte verwendet. Ein Vergleich der gemessenen mit den modellierten Wasserständen für zwei Tage im Juli 2006 an den Orten Cuxhaven (dunkelrot) und Hamburg St. Pauli (dunkelblau) ist in Abb. 22 dargestellt. Zusätzlich ist die bereits in Abb. 3 gezeigte Wasserstandsentwicklung eingetragen. Die Änderungen im Modell wirken sich besonders auf die Höhe des  $T_{nw}$  aus, die  $T_{hw}$  verändern sich lediglich geringfügig. Die Abweichung zwischen gemessenem und modelliertem  $T_{nw}$  wird deutlich kleiner.

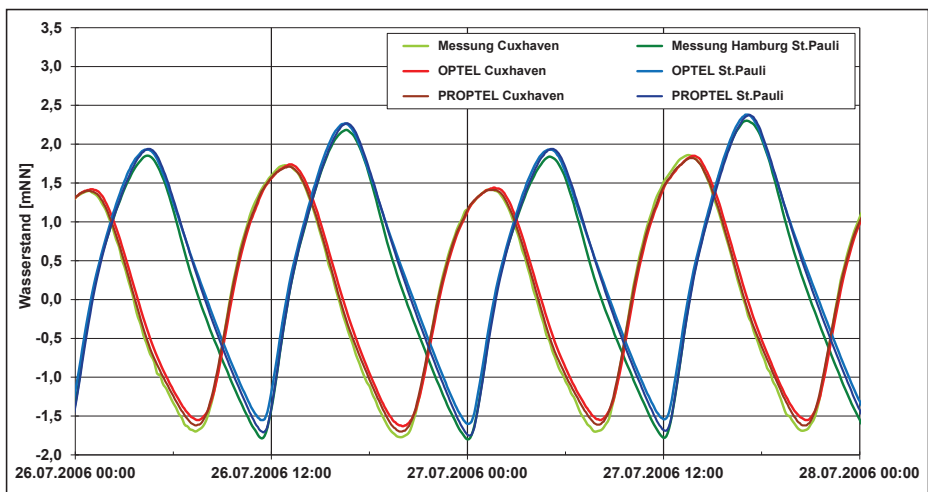


Abbildung 22: Wasserstandsentwicklung im Juli 2006 (Szenario 1) berechnet mit dem BAW-Vorhersagemodell der Elbe (OPTTEL), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (blau) (vgl. Abb. 3), sowie mit dem weiterentwickelten BAW-Vorhersagemodell der Elbe (PROPTTEL), Cuxhaven (dunkelrot) und Hamburg St. Pauli (dunkelblau). Die Wasserstandsrandwerte sind aus der Messung Bake Z generiert. Die Messungen sind grün gekennzeichnet.

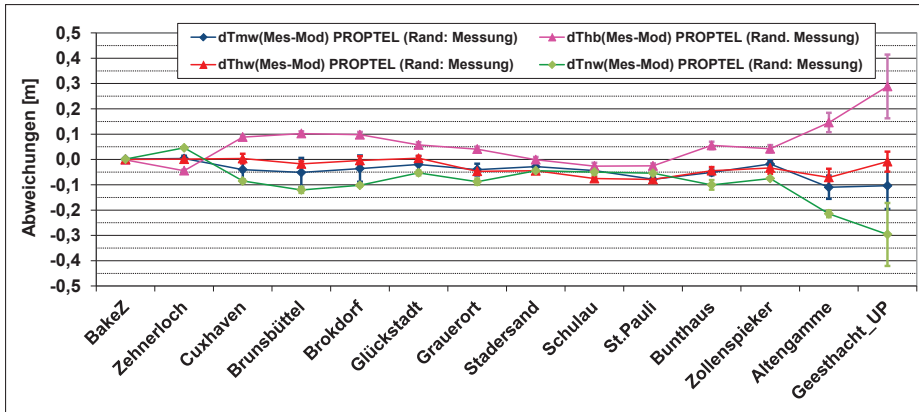


Abbildung 23: (Szenario 1) Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Werten des Thw (rot), Tnw (grün) Tmw (blau) und Thb (lila). Das Elbmodell PROPTTEL verwendet Wasserstandsrandwerte generiert aus der Messung Bake Z.

Für diese Neuberechnung des Szenario 1 wird ebenfalls eine statistische Auswertung der Wasserstandszeitreihen durchgeführt. Abb. 23 zeigt die Differenz zwischen gemessenen und modellierten Thw, Tnw, Thb und Tmw an 14 Pegeln entlang der Elbe. Zusätzlich ist die Standardabweichung eingetragen. Zwischen Bake Z und Zollenspieker überschätzt das Modell das Tidehochwasser Thw um 5 bis 10 cm mit einer Standardabweichung von bis zu  $\pm 2$  cm und das Tideniedrigwasser Tnw um 5 bis 15 cm mit einer Standardabweichung von ebenfalls bis zu  $\pm 2$  cm. Zusätzlich erkennt man eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen gemessenem und modellierten Tidehub Thb und Tidemittelwasser Tmw. Der Vergleich mit den in Abb. 6 dargestellten Werten zeigt, dass die veränderte Kalibrierung zu einer deutliche Verringerung der Differenz zwischen den modellierten und gemessenen Werten geführt hat.

Diese verbesserte Version des BAW-Vorhersagemodells Elbe ersetzt seit Januar 2012 die ursprüngliche Version des BAW-Vorhersagemodell Elbe im präoperationellen Betrieb beim BSH und erzeugt räumlich und zeitlich hochaufgelöste Vorhersagen. Beispielhaft zeigt Abb. 24 die Vorhersage für den 17. Juni 2013 15:05 UTC. Dargestellt sind der Wasserstand, die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit und der tiefengemittelte Salzgehalt im Bereich zwischen Scharhörn und Glückstadt. Zum dargestellten Zeitpunkt herrscht Ebbestromung stromauf von Glückstadt, zwischen Glückstadt und Brunsbüttel kentert die Ebbestromung und in der Elbmündung stromab von Brunsbüttel herrscht bereits Flutstromung. Der Juni 2013 wird durch hohe Abflüsse geprägt. Im Vorhersagezeitraum werden  $Q = 3250 \text{ m}^3/\text{s}$  bei Bleckede vorgegeben. Den Einfluss der langanhaltenden hohen Abflüssen erkennt man deutlich in den niedrigen Salzgehalten bei Cuxhaven.

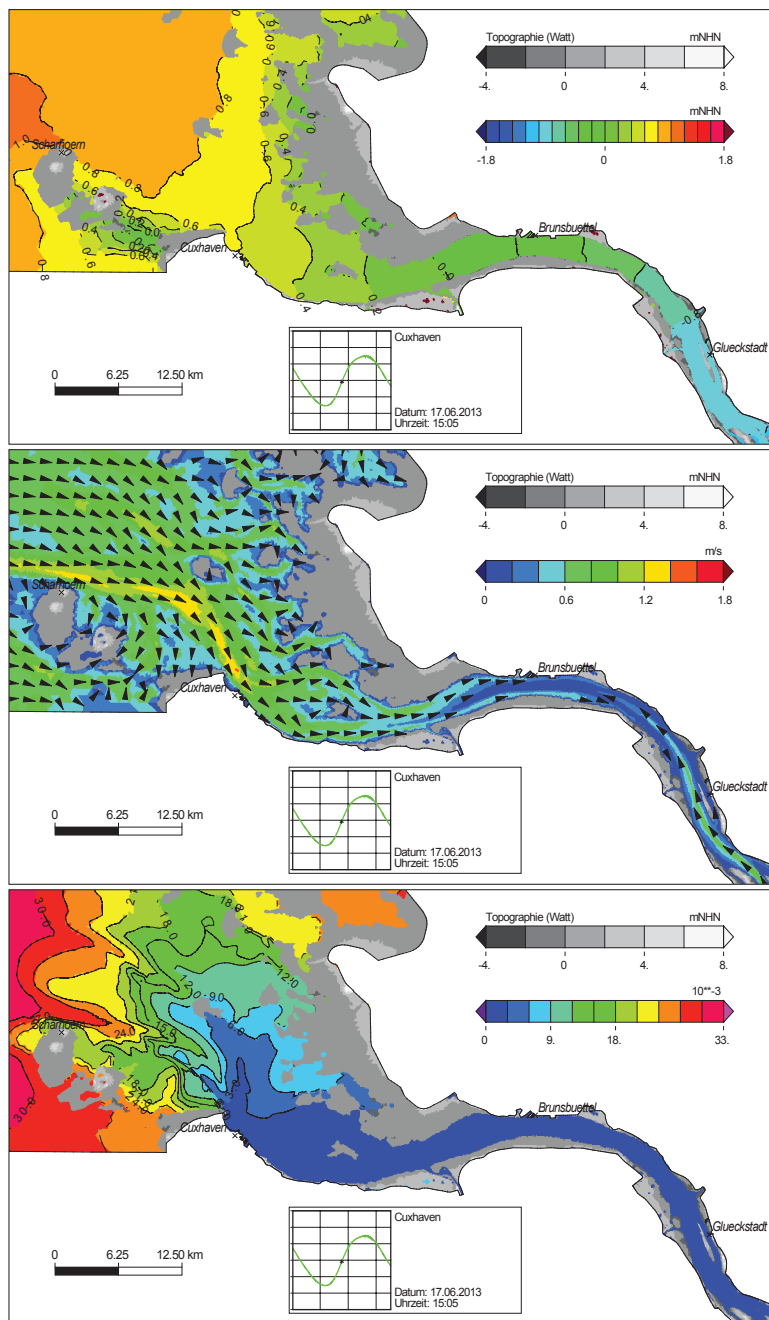


Abbildung 24: Vorhersage aus dem präoperationellen Betrieb für den 17. Juni 2013 15:05 UTC. Dargestellt sind beispielhaft Wasserstand (oben), tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit (Mitte) und tiefengemittelter Salzgehalt (unten) in der Elbmündung zwischen Scharhörn und Glückstadt. Trockengefallene Wattflächen sind in Grau gehalten. Im Vorhersagezeitraum wird bei Bleckede ein Abfluss von  $3250 \text{ m}^3/\text{s}$  vorgegeben.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes OPTTEL-C wird eine operationelle Wasserstands-, Strömungs- und Salztransportvorhersage für die Tideelbe entwickelt, die auch bei extremen Wind- und/oder Oberwassersituationen Vorhersagen zur Verfügung stellt. Bei der Konzeption des Vorhersagesystems aus Atmosphäre, Nordsee und Tideelbe wird beachtet, dass eine Übertragung des Vorhersagesystems auf die Ästuare von Jade-Weser und Ems möglich ist.

Auf der Grundlage des 3-dimensionalen hydrodynamischen numerischen Modells UnTRIM (CASULLI und WALTERS 2000) wird das BAW-Vorhersagemodell Elbe entwickelt. Das mathematische Verfahren UnTRIM eignet sich besonders für Anwendungen in geometrisch komplexen Ästuaren mit regelmäßigem Überfluten und Trockenfallen. Das BAW-Vorhersagemodell für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt in der Tideelbe erhält Informationen über den vorhergesagten Wind über der Elbe aus dem Wettervorhersagemodell COSMO-EU des DWD (2012). Mit Hilfe der in OPTTEL-B entwickelten WASP-Korrekturfaktoren wird ein downscaling der COSMO-EU Windfelder für die Tideelbe durchgeführt. Am seeseitigen Rand zur Nordsee werden Wasserstands- und Salztransportvorhersagen aus dem Vorhersagemodell BSHmod (DICK et al. 2001) des BSH vorgegeben. Als Abfluss für den Vorhersagezeitraum wird die letzte verfügbare Abflussmessung in Neu Darchau (BfG) verwendet. Die vom BAW-Vorhersagemodell Elbe benötigten Schnittstellen zu den genannten Randwerten sind in OPTTEL-C in enger Zusammenarbeit mit OPTTEL-A (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2012) und OPTTEL-B (GANSKE und ROSENHAGEN 2012) entwickelt worden.

Im Projektzeitraum OPTTEL-C konnte gezeigt werden, dass die Schnittstelle zum Wettervorhersagemodell des DWD (GANSKE und ROSENHAGEN 2012) für beliebige Modellgebiete, wie z. B. das Jade-Weser-Ästuar einsetzbar ist. Das BAW-Vorhersagemodell Elbe kann prinzipiell auch für dieses Ästuar Wasserstandsvorhersagen durchführen.

Zur Kalibrierung und Validierung des BAW-Vorhersagemodells Elbe stehen Messungen von Wasserstand, Strömung und Salzgehalt entlang des Ästuars sowie Randwerte für 6 Szenarien aus den Jahren 2006, 2007 und 2008 zur Verfügung. Die Wasserstandsrandwerte stammen zum einen aus dem Vorhersagemodell des BSH und zum anderen aus Messungen. Die von OPTTEL-D (STROTSMANN et al. 2011) ausgewählten Szenarien beinhalten unterschiedliche meteorologische und hydrologische Situationen, wie mittlere Verhältnisse, Sturmfluten, Sturmebbe oder sehr hohe bzw. sehr niedrige Oberwasserzuflüsse.

Der Vergleich von Messung mit Vorhersage für die 6 Szenarien zeigt die Bedeutung der Randwerte für die Güte der Vorhersage entlang des Ästuars. Wird die Vorhersage der Szenarienzeiträume mit Messungen des Wasserstandes angetrieben, so werden die Tidehochwasser  $Thw$  entlang der Elbe auf  $\pm 10$  cm und die Tideniedrigwasser  $Tnw$  entlang der Elbe auf  $\pm 40$  cm vorhergesagt. Durch den Einsatz von Ergebnissen aus dem Vorhersagemodell des BSH (DICK et al. 2001) zur Randwertgenerierung für die Szenarienzeiträume erreicht die Vorhersage  $+ 10$  cm/  $- 25$  cm im Tidehochwasser  $Thw$  und  $+ 30$  cm/  $- 60$  cm im Tideniedrigwasser  $Tnw$ , da die Vorhersagen für die Elbe zusätzlich von der Vorhersagegüte der Randwerte abhängen. Die Wasserstandsvorher-

sage für die Elbe verbessert sich besonders bei Sturmflut durch den Einsatz der von OPTEL-B bereitgestellten WAsP-Korrekturfaktoren im BAW-Vorhersagemodell Elbe.

Das BAW-Vorhersagemodell Elbe läuft seit dem 8. Januar 2011 ununterbrochen im präoperationellen Betrieb auf dem Rechner des BSH und erzeugt jeden Tag auf der Grundlage der Vorhersagen von BSH und DWD eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Vorhersage für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt für die Tideelbe. Zur Randwertaufbereitung und Vorhersage der nächsten 24 Stunden benötigt das BAW-Vorhersagemodell Elbe derzeit auf dem Rechner des BSH 3 Stunden.

Um die Vorhersagegüte von der Tidephase unabhängig zu machen, wurde parallel zur präoperationellen Phase an einer Verbesserung der Kalibrierung des BAW-Vorhersagemodells Elbe gearbeitet. Die veränderte Kalibrierung führt zu einer deutliche Verringerung der Differenz zwischen den modellierten und gemessenen Wasserständen. Seit Januar 2012 wird diese Version des BAW-Vorhersagemodells Elbe im präoperationellen Betrieb beim BSH betrieben.

Die bisherigen Vorhersageergebnisse des BAW-Vorhersagemodells Elbe aus dem präoperationellen Betrieb zeigen entlang der Elbe, wie aus den Ergebnissen für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum zu erwarten, in Abhängigkeit von der Vorhersagegüte des Wasserstandes auf dem Rand zur Nordsee, sehr zufriedenstellende Vorhersagen des Tidehochwassers Thw und des Tideniedrigwasser Tnw.

## 8 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF für die gewährte Finanzierung (Förderkennzeichen 03KIS071 / KFKI 101). Wir danken dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) für die Unterstützung des Projektes in der Antragsphase und die fachliche Begleitung in der Bearbeitungsphase. Besonderer Dank gilt den Mitgliedern der projektbegleitenden Gruppe für fruchtbare Diskussionen und weiterführende Anregungen.

## 9 Schriftenverzeichnis

- BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S.: OPTEL-A - Entwicklung eines operationellen Tideelbemodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHmod für die Nord- und Ostsee. Die Küste, 79, 2012.
- CASULLI, V. und LANG, G.: Mathematical Model UnTRIM - User Interface Description. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. BAWiki unter [www.baw.de](http://www.baw.de), 2004.
- CASULLI, V. und LANG, G.: Mathematical Model UnTRIM - Validation Document. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. BAWiki unter [www.baw.de](http://www.baw.de), 2004b.
- CASULLI, V. und WALTERS, R. A.: An unstructured, three dimensional model based on the shallow water equations, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 32, 331-348, 2000.
- DGJ Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet, Teil III Untere Elbe ab der Havelmündung 2006. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Arbeit - Hamburg Port Authority, 2010.

- DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S.; KLEIN, H. und KOMO, H.: The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod), Model description and validation. Bericht des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, 29, 49 S., 2001.
- DWD: Regionalmodell COSMO-EU. Internet Bericht des DWD. [www.dwd.de](http://www.dwd.de), 2012.
- GANSKE, A. und ROSENHAGEN, G.: OPTEL-B - Hochaufgelöste Windfelder aus Lokalmodellen für die Tideelbe. Die Küste, 79, 2012.
- KREMP, C.: OPTEL-C - Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, 2011.
- PEGELONLINE: Gewässerkundliches Informationssystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. [www.pegelonline.wsv.de](http://www.pegelonline.wsv.de), Stand: 8.9.2011.
- SMITH, S. D. und BANKE, E. G.: Variation of Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed. Quart, Jour. of the Royal Meteorological Society, 101, 665-673, 1975.
- STROTMANN, T.; RADEGAST, C. und FERK, U.: OPTEL-D - Studien zur Stauentwicklung in der Tideelbe. Abschlussbericht. Hamburg Port Authority, 2011.
- STROTMANN, T.; RADEGAST, C. und FERK, U.: OPTEL-D - Untersuchungen zur Stauentwicklung in der Tideelbe. Die Küste, 79, 2012.
- WSV: Staustufe Geesthacht. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost, Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg, 1994.