

Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHcmod für die Nord- und Ostsee (OPTEL-A)

Sylvia H. Müller-Navarra und Ingrid Bork

Zusammenfassung

Seeschiffe, die von der Nordsee zum mehr als 100 km stromauf der Elbe liegenden Hamburger Hafen fahren, benötigen wegen des Einflusses der Gezeiten kontinuierlich aktualisierte hydrologische und ozeanographische Vorhersagen. Das grundsätzliche Anliegen des Forschungsprojekts OPTEL (Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells) ist es, hydrologische und ozeanographische Vorhersagen zu Wasserstand, Wassertiefe, Strömung, Salzgehalt, Temperatur und Eisgang für jeden von der Gezeit beeinflussten Ort der Elbe bereitzustellen. Durch den Gebrauch von numerischen Modellen wird sichergestellt, dass Wasserstand und Strömung dynamisch gekoppelt sind und dadurch Hochwasserzeiten und Zeiten des Stromkernens sowie Strömungsprofile in physikalisch konsistenter Weise modelliert werden. Das Modellkonzept schließt anwendungsbezogene, nachträgliche Modellkorrekturen ein (Modellausgabestatistik, MOS). Das in das am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) vorhandene großskalige Modellsystem eingebettete Elbmodell wird zusammen mit ausgewählten Ergebnissen aus den ersten drei Jahren des Dauerbetriebs vorgestellt.

Schlagwörter

Unterelbe, hydrodynamisch-numerisches Modell

Summary

Due to local tidal conditions, vessels coming in from the North Sea and bound for the port of Hamburg – more than 100 km upstream – require continually updated hydrological and oceanographic forecasts. The principal objective of the research project OPTEL (Operational Elbe Tidal Estuary Model) is to provide hydrological and oceanographic forecasts about water levels, depths, currents, salinity, temperature and ice conditions for any tidally influenced place on the river Elbe. By using a numerical model, it is ensured that water levels and currents are coupled dynamically, which allows peak water levels, slack water times, and – in 3D modelling – flow profile to be modeled in a physically consistent way. The model concept includes subsequent corrections of the direct model output (model output statistics, MOS). Here, the tidal estuary model of the river Elbe is specified, that is embedded in a system of large scale models already implemented at Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH). Additionally, selected model output of three years of permanent operation is presented.

Keywords

Elbe estuary, hydrodynamic numerical model

Inhalt

Das Verbundprojekt OPTEL.....	84
1 Einleitung.....	86
2 Zur Unterelbe.....	86
3 Beschreibung des Ausgangsmodells BSHcmod.....	90
4 Elbmodell.....	96
4.1 Bathymetrie.....	96
4.2 Wehr.....	97
4.3 Modellstruktur.....	102
4.4 Modellgleichungen.....	102
5 Dauerbetrieb.....	104
5.1 Anfangszustand.....	104
5.2 Vorhersagen.....	104
6 Zusammenfassung, Bewertung und Empfehlung.....	115
6.1 Modellbetrieb.....	115
6.2 Modellausgabestatistik (MOS).....	116
6.3 Potentielle Einsatzmöglichkeiten des Unterelbmodells.....	117
6.3.1 Schifffahrt.....	117
6.3.2 Katastrophenschutz.....	117
6.3.3 Wasserwirtschaft.....	118
6.3.4 Industrie, Kraftwerke.....	119
6.3.5 Umweltschutz.....	119
6.3.6 Unterhaltungsbaggerung.....	119
7 Danksagung.....	120
8 Schriftenverzeichnis.....	120

Das Verbundprojekt OPTEL

Hydrodynamisch-numerische Modelle haben sich in vielen Anwendungsbereichen auf geophysikalischer Skala bewährt. Auch für den gezeitenbeeinflussten Teil der Elbe – Tideelbe oder Unterelbe genannt – wurden am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bei Beginn des Projekts „Entwicklung eines Operationellen Tideelbmodells“ (OPTEL 2008–2011) bereits Modellverfahren (DUWE 1988; BAW 2004) eingesetzt. In OPTEL-A wurde die Unterelbe beidseitig gekoppelt in das am BSH für die tägliche Vorhersage genutzte Zirkulationsmodell der Nord- und Ostsee, BSHcmod (KLEINE 1994; DICK et al. 2001), eingebunden, um

auch für die Elbe Vorhersagen des Wasserstandes, der Strömung, der Wassertemperatur, des Salzgehaltes und der Eisbedeckung bereitzustellen.

Bei der Konzeption dieses Vorhabens wurde klar, dass es sich bei der Integration eines Unterelbmodells nicht nur um ein technisches Problem handelt, sondern dass spezielle Probleme zu lösen waren, die letztlich zu 4 Teilprojekten mit eigenen Forschungs- und Entwicklungsanteilen führten (s. u.). In OPTEL-B wurden beim Deutschen Wetterdienst (DWD) Arbeiten zum Downscaling von Windfeldern aus den Vorhersageverfahren COSMO-EU und -DE geleistet (GANSKE und ROSENHAGEN 2010). Es ging dort vornehmlich um die Frage, ob die Wettervorhersagemodelle die für die Elbe relevanten Feinstrukturen des Windes abbilden können. In OPTEL-C wurde das Verfahren UNTRIM (CASULLI und WALTERS 2000), welches an der BAW vornehmlich für Gutachten zu Fahrrinnenanpassungen der Elbe verwendet wird, in einen Vorhersagemodus gebracht und einseitig an das Nord- und Ostseemodell des BSH gekoppelt (KREMP et al. 2012). So war sichergestellt, dass die bei den Gutachten erzielten Erkenntnisse dem Teilprojekt A zugute kamen, andererseits ergaben sich Erkenntnisse zum Konzept einseitiger Kopplung. In OPTEL-D wurden bei der Hamburg Port Authority (HPA) Studien zur Stauentwicklung in der Elbe durchgeführt und Datensätze – Wasserstand, Strömung und Salzgehalt – für 6 Verifikationszeiträume zusammengestellt (STROTMANN et al. 2011). Die Studien im Teilprojekt D befassten sich überwiegend mit dem Wasserstand, im Besonderen mit der Veränderung der Gezeitenwelle in der Elbe bei großem Windstau in der inneren Deutschen Bucht.

Teilprojekte A bis D des Verbundprojektes OPTEL und Ausführende:

OPTEL-A (BSH)

BMBF-Förderkennzeichen F03KIS069, Projekt- und Verbundleiter: Dr. Sylvin Müller-Navarra. Entwicklung eines operationellen Tide-Elbmodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHcmod für die Nord- und Ostsee. 01.04.2008–31.03.2011, Ingrid Bork.

OPTEL-B (DWD)

BMBF-Förderkennzeichen F03KIS070, Projektleiterin: Dipl.-Met. Gudrun Rosenhagen. Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tide-Elbe. 01.04.2008–31.10.2009, Dr. Anette Ganske.

OPTEL-C (BAW)

BMBF-Förderkennzeichen F03KIS071, Projektleiter: Dr.-Ing. Harro Heyer, Dr. Elisabeth Rudolph. Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. 01.04.2008–31.03.2011, Dr. Christine Kremp.

OPTEL-D (HPA)

BMBF-Förderkennzeichen F03KIS072, Projektleiter: Dipl.-Ing. Thomas Strotmann. Studien zur Stauentwicklung in der Tide-Elbe 01.04.2008–30.09.2010, Caroline Radegast, Ulrich Ferk.

1 Einleitung

Seit mehr als 30 Jahren betreibt das BSH operationelle Vorhersagemodelle für Wasserstand und Strömung (SOETJE und BROCKMANN 1983). Das am BSH entwickelte Zirkulationsmodell BSHmod (KLEINE 1994) umfasst Thermodynamik, Eisbildung und -drift und hat besonders bei der numerischen Realisation von vertikaler Schichtung und Dichteadvektion soweit Fortschritte gemacht (KLEINE 1993, 1994, 2004; DICK et al. 2001, 2010), dass eine Erweiterung auf die Unterelbe sinnvoll und realisierbar ist. Die Informationen zu BSHmod sind an unterschiedlichen Orten veröffentlicht. Mittlerweile gibt es Weiter- und Parallelentwicklungen des Modells (KLEINE 2004, 2010; FUNKQUIST und KLEINE, 2007; BERG und POULSON 2012). In Kap. 3 wird das hier verwendete Ausgangsmodell beschrieben. Kap. 4 diskutiert Besonderheiten des Elbmodells und Kap. 5 Ergebnisse aus dem Dauerbetrieb.

Das Ziel von OPTEL-A und ganz allgemein von einem Unterelbmodell ist, ein Verfahren bereitzustellen, mit dem raumzeitlich im Rahmen der Diskretisierung lückenlose Informationen eines umfassenden Satzes physikalischer Größen erzeugt werden können. Seit 2011 wird ein Teil der Modellergebnisse im Internet dargestellt (<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Projekte/OPTEL/index.jsp>).

Probleme bereitete bei Projektende noch die Reproduktion der Niedrigwasserhöhen, die im Mittel deutlich zu hoch sind, während die Hochwasserhöhen auch bei Sturmfluten gut vorhergesagt werden. An der Verbesserung der Impulsbilanz wird deshalb am BSH weiter gearbeitet.

Parallel wurden für die Vorhersage von Wasserstandsscheitelwerten an repräsentativen Orten der Unterelbe einfachere, statistische Verfahren (Modellausgabestatistik, MOS) entwickelt (MÜLLER-NAVARRA und KNÜPFER 2010). Auch eine sehr gute Darstellung der Ganglinien ist mittlerweile möglich (MÜLLER-NAVARRA 2013). Eingangsdaten für solche Verfahren sind neben Messdaten Ergebnisse aus numerischen Modellen, die im Allgemeinen mit systematischen Fehlern behaftet sind. In Abwägung beider Verfahren werden die Anwendungsmöglichkeiten des nachfolgend vorgestellten Modells in Kap. 6 diskutiert.

2 Zur Unterelbe

Jede Modellentwicklung basiert auf allgemeingültigen physikalischen Gleichungen und besonderen numerischen Verfahren. Die verfahrensspezifische Umsetzung für ein bestimmtes Modellgebiet – hier für die Elbe – wird von Vorstellungen darüber geprägt, was in einer bestimmten Region als „physikalisch sinnvoll“ erwartet wird. Diese Erwartungshaltung soll zunächst durch einige Eckdaten konkretisiert werden.

Die Elbe ist mit einer Länge von 1094 km einer der großen Ströme Europas. Die Unterelbe fließt in weiten Teilen von Ost nach West oder von Südost nach Nordwest. Die Stromkilometrierung beginnt an der deutsch-tschechischen Grenze und endet mit dem Kilometer 769,4 in der Deutschen Bucht. Das hier untersuchte Modellgebiet beginnt in der Elbe bei Blekede (Stromkilometer 550) und reicht im gekoppelten Modellmodus über die Deutsche Bucht hinaus bis in den Nordostatlantik. D. h., um die Unterelbe (Abb. 1) hydrodynamisch-numerisch sachgerecht abzubilden, müssen Einflüsse weit aus dem offenen Ozean, wie z. B. Fernwellen, berücksichtigt werden.

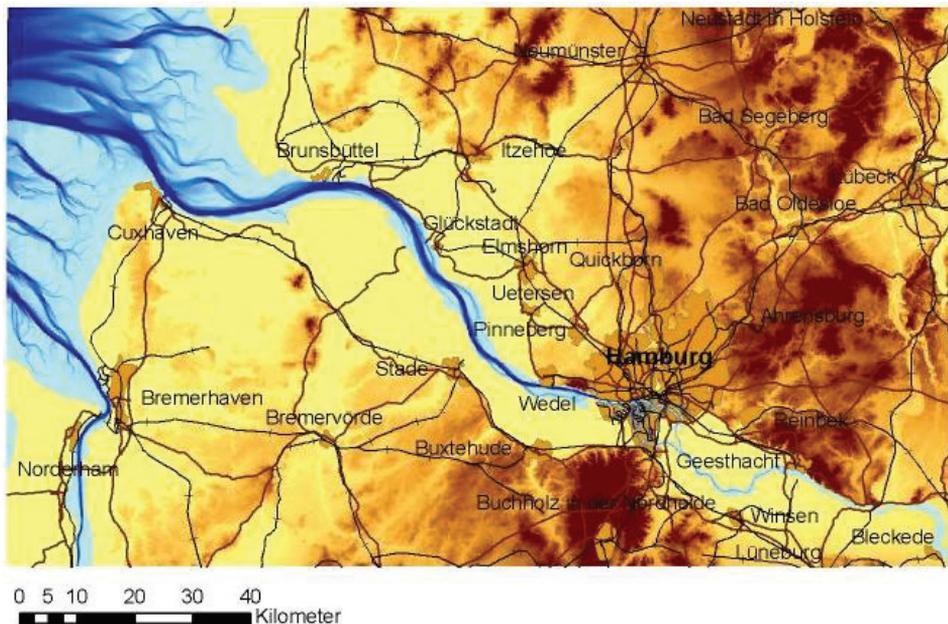


Abbildung 1: Die Elbe von Bleckede bis zur Mündung.

Bei Bleckede ist das stark schwankende Oberwasser aus dem Einzugsgebiet entscheidend. Das hydrologische Einzugsgebiet der gesamten Elbe umfasst etwa 148.000 km². Bei Neu Darchau (Stromkilometer 536,4) beträgt der mittlere Abfluss 709 m³/s (MQ 1926-2007), lange war etwa 3620 m³/s der Maximalwert, der im März 1940 auftrat (DT. GEWÄSSER-KDL. JAHRB. 2011). Dieser Wert wurde mit etwa 4000 m³/s beim Elbehochwassers im Juni 2013 überschritten (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, DWD 2013). Bei großem Oberwasser wird die Salzgehaltsverteilung im Mündungsgebiet bis weit in die Deutsche Bucht hinein verändert und ebenso die Konzentrationen anderer Beimengungen (NIES et al. 2003). Besonderes Augenmerk ist auf die Lage der Brackwasserzone im Strom zu richten (LUCHT 1953). Sehr wichtig ist dabei, wie lange extrem hohe oder niedrige Abflüsse dauern. Im Januar 2011 stieg z. B. der Abfluss innerhalb von 12 Tagen von 1500 m³/s auf 3602 m³/s und fiel in etwa 30 Tagen wieder auf 1500 m³/s ab (STAATLICHES AMT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT WESTMECKLENBURG 2011).

Das Tiefenprofil entlang des Talweges (Abb. 2) zeigt eine Dreiteilung der Elbe im Modellgebiet. Vom Mündungsgebiet bis zum Hamburger Hafen ist die Elbe durch mehrere Fahrrinnenanpassungen seit den 1820er Jahren deutlich vertieft und zu einem leistungsfähigen Schifffahrtsweg ausgebaut worden (HÜBBE 1854; HENSEN 1955; ROHDE 1971; OELLERICH et al. 2006). Dabei ist dort der Tidenhub in den letzten einhundert Jahren z. B. in Hamburg von 2,04 m (REICHS-MARINEAMT 1912) auf 3,67 m (Abb. 3) angestiegen. Auch die Hochwasserscheitel schreiten in der Elbe schneller voran als früher und benötigen nun (2010) z. B. von Cuxhaven nach Hamburg etwa 3,5 h (Abb. 4). Bei Sturmfluten kann sich diese Zeit weiter verkürzen (Abb. 5).

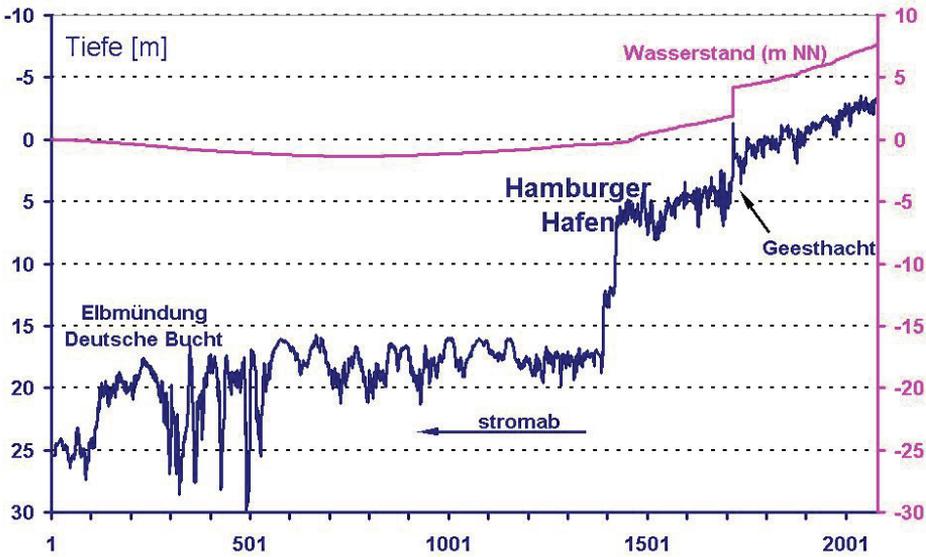


Abbildung 2: Tiefenprofil entlang des Talwegs der Elbe, Anzahl der Gitterpunkte entlang des Talwegs.

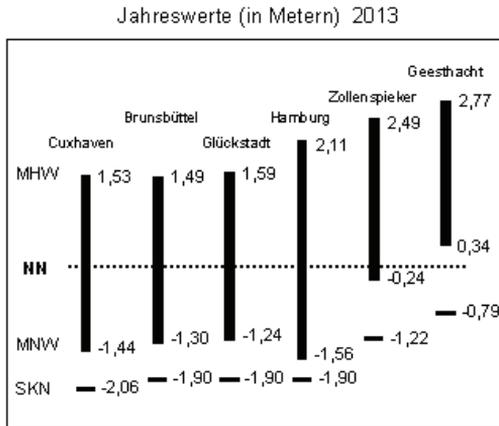


Abbildung 3: Mittlere Hoch- und Niedrigwasser (MHW, MNW) für 2013 an einigen Orten entlang der Elbe.

Zwischen dem Hafen und der Staustufe Geesthacht (Stromkilometer 585,9) sind die Gezeiten (Strömung und Wasserstände) deutlich durch das Oberwasser beeinflusst (RUDOLPH 2005). In den Flussabschnitt oberhalb der Staustufe, die für ein Stauziel von 4 mNN ausgelegt ist und auf 1,3 mNN herabgelassen werden kann, dringen die Gezeiten nur noch bei Sturmfluten vor, und/oder wenn die Segmente zur Entlastung gesenkt werden (WSD-OST 1996). Die Sturmflutscheitel zeichnen sich dann z. B. in Hohnstorf deutlich in den Wasserstandsganglinien ab (Abb. 13 u. 31).

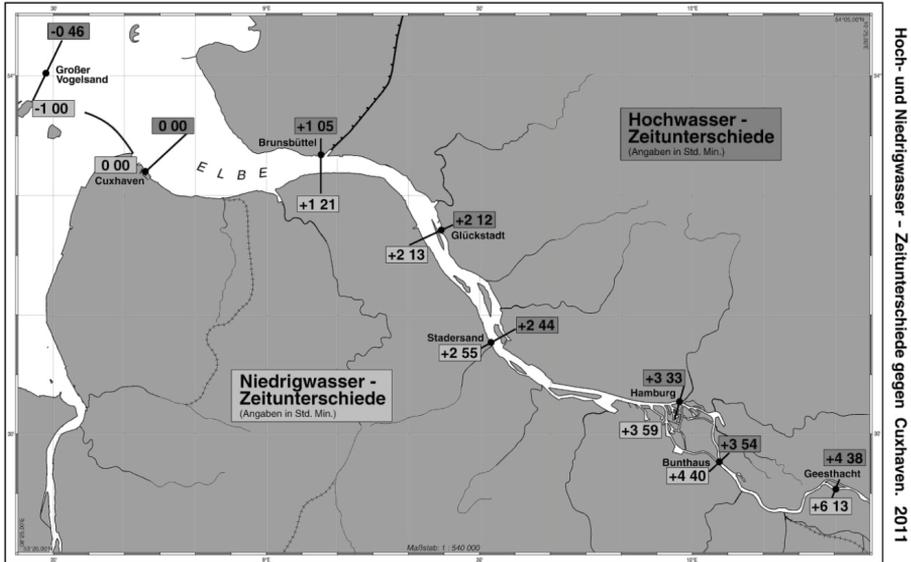


Abbildung 4: Eintrittszeiten der Hoch- und Niedrigwasser entlang der Elbe relativ zu Cuxhaven (BSH 2010).

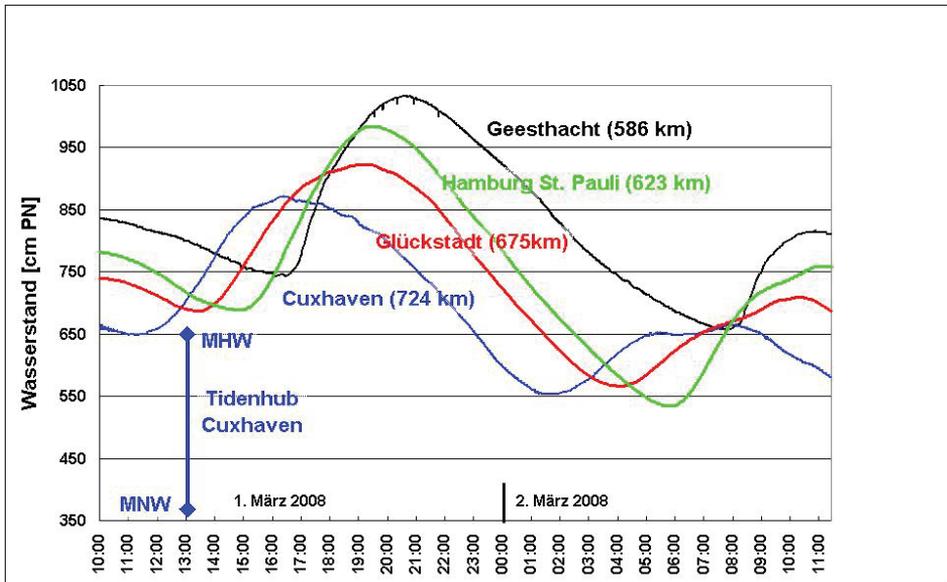


Abbildung 5: Wasserstandsganglinien während einer Sturmflut (01./02.03.2008, Zeitangaben in MEZ).

Die Temperatur des Elbwassers unterliegt einem deutlichen Jahresgang von meist mehr als 20°C, dem am festen Ort ein Gezeitengang überlagert ist. Dazu kommen noch unregelmäßige Schwankungen, die den Wechsel der Wetterlagen und besonders die dabei sich ändernden wechselnden Strahlungsverhältnisse widerspiegeln. Letztere führen in Zonen

geringer Wassertiefe und in Tidetümpeln zu erheblich größeren Tagesgängen als im Hauptstrom. In den ausgedehnten Flachwasserzonen der Elbe wirkt sich auch die Rückstrahlung vom Boden deutlich aus. Abb. 6 zeigt den Jahresgang der Wassertemperatur bei Cumlosen (Flusskilometer 470). Die Messstation Cumlosen liefert auch die Temperaturrandwerte für die Elbe bei Bleckede. Im salzarmen Bereich der Elbe kann es in harten Wintern zu starken Vereisungen kommen (Abb. 17 a, b).



Abbildung 6: Jahresgang 2012 der Wassertemperatur an der Messstation Cumlosen (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg {LUGV}) zur Verwendung als Modellrandwerte.

3 Beschreibung des Ausgangsmodells BSHcmod

Das operationelle Vorhersagemodell des BSH ist ein Modellsystem aus einem zweidimensionalen barotropen Modell des Nordostatlantiks, einem dreidimensionalen baroklinen Modell der Nord- und Ostsee (im Folgenden gekennzeichnet durch „no“) und einem ebenfalls dreidimensionalen Modell für die Deutsche Bucht und die westliche Ostsee („ku“). Die beiden letzten bilden ein Modellsystem, beidseitig und simultan gekoppelter Modellkompartimente (BSHcmod). Im Projekt OPTEL-A wurde dieses System um ein zusätzliches, beidseitig und simultan an das ku-Modell gekoppeltes Modell der Elbe („el“) ergänzt (Abb. 10). Dadurch entstand ein erweitertes Modellsystem BSHcmod-el.

Im erweiterten System ist das ku-Modell gleichzeitig inneres Modellkompartiment gegenüber dem no-Modell und äußeres Modellkompartiment gegenüber dem el-Modell. In Tab. 1 sind Kenngrößen der Modellkompartimente zusammengestellt. Auf die gleiche Art könnten zusätzlich Modellkompartimente für die Weser und Ems eingebunden werden.

Dem in OPTEL-A entwickelten Modellsystem liegt die operationelle Version vom Modell BSHcmod (Stand November 2010) zugrunde. Die dort verwendeten Gleichungen und Verfahren sind an mehreren Orten dargestellt (KLEINE 1993; KLEINE 1994; DICK et al. 2001; KLEINE 2004; FUNKQUIST und KLEINE 2007; DICK et al. 2010). In BÖRK und MÜLLER-NAVARRA (2011) wurden die Modellgleichungen in den seit 2007 benutzten verallgemeinerten Koordinaten (PICHLER 1984; KLEINE 2004) zusammengestellt und die verwendeten numerischen Verfahren skizziert.

Tabelle 1: Einige gebietsspezifische Charakteristika der Modellgebiete und des numerischen Verfahrens (λ, φ geographische Koordinaten, $\vec{v}_h = (u, v)$ horizontale Strömungsgeschwindigkeit, Δh Schichtdicke, θ potentielle Temperatur, S Salzgehalt, \vec{v}_{Eis} Driftgeschwindigkeit des Eises, Δh_{Eis} Dicke der Eisbedeckung, c_{Eis} Kompaktheit des Eises, Δh_{Schnee} Schneedicke über dem Eis, $\vec{W}_{10m} = (W_\lambda, W_\varphi)$ Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, p_L Luftdruck, T_L Lufttemperatur, q_L Luftfeuchte, C_L Bewölkung).

Modellgebiet	Untere Elbe	Deutsche Bucht	Nordsee, Ostsee	Nordostatlantik
Horizontale Koordinaten	φ, λ			
Gitterabstand	~90 m	~900 m	~5 000 m	~10 000 m
Vertikale Koordinaten	allgemein			
Anzahl Schichten	7	25	36	1
Anzahl Volumelemente	397 157	1 117 390	643 922	26 424
Kopplung an äußeres Gebiet	beidseitig	beidseitig	einseitig	offener Rand
Prognostische Variablen	$\vec{v}_h, \Delta h, \theta, S, v_{Eis}, \Delta h_{Eis}, c_{Eis}, \Delta h_{Schnee}$			$\vec{v}_h, \Delta h$
Anfangswerte	Kaltstart 2010	Kaltstart 1992		Kaltstart 2008
Gezeitendarstellung	direkte und Mitschwingungszeiten			keine
Gitternetz	Arakawa-C			
Zeitintegration	explizit			
- Ausnahme (implicit)	vertikaler Austausch			-
Oberwasser	stündlich für deutsche Flüsse, täglich für andere			
Meteorologische Eingabegrößen	$\vec{W}_{10m}, p_L, T_L, q_L, C_L$			\vec{W}_{10m}, p_L
Schubspannungskoeffizient	$10^{-3} (0,63+0,066 \vec{W}_{10m})$			
Schubspannungskoeffizient unter dem Eis	eisabhängig			-
Programmiersprache	FORTRAN 90			
Betriebssystem	UNIX			

Am BSH laufen intensive Testrechnungen zur numerischen Neugestaltung der Einschichtung von Wasser unterschiedlicher Dichte, zur Simulation des turbulenten vertikalen Austauschs durch ein Turbulenzmodell und zu einer weitgehenden Modifikation der Eismodellierung.

Abweichend vom operationellen Modell BSHcmod wurde im hier vorgestellten Modellsystem bereits eine Version des neuen Eismodells integriert (KLEINE 2010). Die Übernahme der Einschichtungsbehandlung und des Turbulenzmodells steht noch aus.

Nicht überarbeitet wurde bisher die analytische und numerische Darstellung der Impulsbilanz in BSHcmod. Die bisherige Realisierung verfälscht die implizite Drehimpulsbilanz, was in Ästuaren von stärkerer Bedeutung ist als in den ursprünglichen Untersuchungsgebieten. Insbesondere ist die Vernachlässigung des Impulstransports durch die in verallgemeinerten Koordinaten auftretende Pseudoverticalgeschwindigkeit (KLEINE 2004) in der Elbe problematischer als z. B. in der Ostsee. Inkonsistent ist auch die Behandlung der metrischen Terme in den Bewegungsgleichungen (MARSHALL et al. 1997). Die allgemein übliche Vernachlässigung der horizontalen Komponente der Erdrotation wird in ihrer Wirkung auf lange Wellen in NEEDLER und LEBLOND (1973) untersucht.

In anderer Hinsicht ist BSHcmod weniger eingeschränkt. Abweichend von entsprechenden Modellen (z. B. UNTRIM, BAW 2004) wird in BSHcmod in Bezug auf die

mittlere horizontale Geschwindigkeit auf die Boussinesq-Approximation verzichtet, um die Erhaltung der Zirkulation entlang der Kontur eines Flächenelements zu gewährleisten. Eine weitere Besonderheit von BSHcmod ist die Berücksichtigung des Potentials der direkten Gezeiten ϕ_G (MÜLLER-NAVARRA 2002) zusätzlich zum Einfluss der Mitschwingungszeiten, die als Randbedingung am offenen Rand der Nordsee realisiert werden.

Konkret werden in BSHcmod die Bewegungsgleichungen in der folgenden Form benutzt (ρ Dichte, ϕ Schwerkraftpotential, f Coriolisparameter, (F_h, F_v) turbulenter Austausch):

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_s = -\frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{\partial \phi_G}{\partial \lambda} \right]_s - \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial s}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \lambda} \Big|_s \frac{\partial \phi}{\partial s} - \bar{v}_h \cdot \nabla_s u + f v + F_{hu} \Big|_s + F_{vu} \Big|_s \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_s &= -\frac{1}{R} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial \phi_G}{\partial \varphi} \right]_s - \frac{1}{R} \frac{\partial s}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \varphi} \Big|_s \frac{\partial \phi}{\partial s} - \bar{v}_h \cdot \nabla_s v - f u + F_{hv} \Big|_s + F_{vv} \Big|_s \\ 0 &= -\left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial \phi}{\partial s} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Der hydrostatische Druck p wird durch Integration der dritten Bewegungsgleichung mit $p_{\text{Oberfläche}} = p_{\text{Luft}}$ bestimmt.

Die Pseudovertikalgeschwindigkeit $\frac{ds}{dt} \frac{\partial z}{\partial s}$ wird mit

$$\frac{ds}{dt} \frac{\partial z}{\partial s} (s_{\text{Boden}}) = 0 \quad (3)$$

als

$$\frac{ds}{dt} \frac{\partial z}{\partial s} (s) = \frac{ds}{dt} \frac{\partial z}{\partial s} (s_{\text{Boden}}) - \int_{s_{\text{Boden}}}^s \left[\nabla_s \cdot \left(\bar{v}_h \frac{\partial z}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial z}{\partial s} \right) \right] ds \quad (4)$$

berechnet.

Die Schubspannung (τ_u, τ_v) an der Wasseroberfläche wird als quadratische Funktion der Windgeschwindigkeit \bar{W} in 10 m Höhe formuliert.

$$\tau_u = \frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho} C_D W_\lambda \sqrt{W_\lambda^2 + W_\varphi^2} \quad \text{und} \quad \tau_v = \frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho} C_D W_\varphi \sqrt{W_\lambda^2 + W_\varphi^2} \quad (5)$$

Der Windschubspannungskoeffizient C_D ist als Maß für die Rauigkeit der Wasseroberfläche ebenfalls als Funktion des Windes in 10 m Höhe (W_λ, W_φ) parametrisiert. In BSHcmod ist er nach SMITH und BANKE (1975) gegeben als $C_D = 10^{-3} (0,63 + 0,06 |\bar{W}_{10m}|)$. Bei Testrechnungen wurde C_D für Windgeschwindigkeiten >25 m/s begrenzt auf $C_D (25 \text{ m/s})$ (MÜLLER-NAVARRA et al. 2006). Bei den bisher in 2011 aufgetretenen Sturmfluten war der Effekt jedoch unbedeutend, da die Windgeschwindigkeit nur kurzfristig Werte >25 m/s erreichte. Zusätzlich zu allen bekannten Einschränkungen der Gültigkeit des verwendeten und anderer empirischer Ansätze für C_D gelten alle bekannten Ansätze streng nur für die offene See.

Ein weiteres Problem ergibt sich, wenn die Wasserflächen von Flüssen im meteorologischen Modell nicht erkannt und als Land mit entsprechender Bodenrauigkeit

interpretiert werden. Dieses Problem wurde in OPTEL-B (GANSKE und ROSENHAGEN 2010) ansatzweise gelöst, indem die Modellwinde auf einem feineren Raster entsprechend der tatsächlichen Land- Wasserverteilung und in Abhängigkeit von der Windrichtung korrigiert wurden. Nur im Einzelfall wird durch die Korrekturen eine deutliche Annäherung der Windgeschwindigkeit an den beobachteten Wert erreicht (Abb. 7).

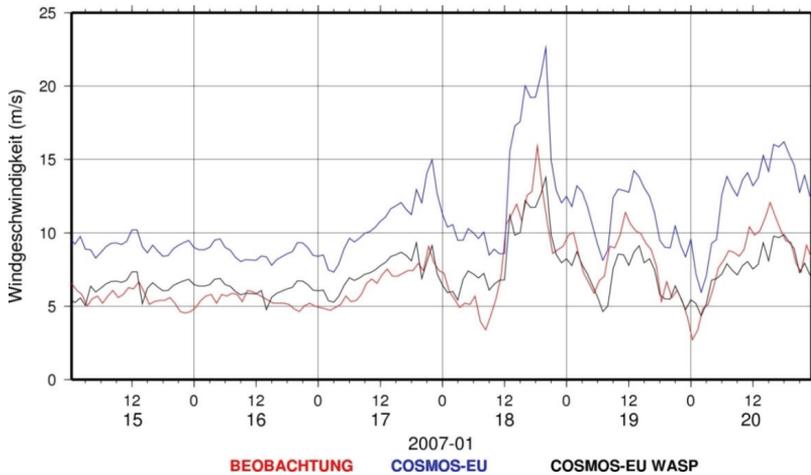


Abbildung 7: Betrag der Windgeschwindigkeit am 18.01.2007 in Cuxhaven COSMO-EU (blau), Messung (rot), COSMO-EU mit WASP-Faktoren (schwarz).

Der Einfluss der WASP-Korrekturen auf den Wasserstand erwies sich selbst bei Sturmfluten als gering (KREMP et al. 2013).

Korrekturfaktoren wurden in OPTEL-B auch für das höher aufgelöste COSMO-DE abgeleitet. Da am BSH die COSMO-DE-Ergebnisse bisher nicht in die operationelle Modellierung eingehen, kann hier keine Aussage zum Verbesserungspotential gemacht werden. Mit einer horizontalen Auflösung von etwa 2 km verspricht schon die Verwendung von Ergebnissen aus COSMO-DE ohne Modifikation eine Verbesserung.

Am Boden ist die Schubspannung als Funktion der horizontalen Strömung in der Mitte der Bodenschicht formuliert:

$$\tau_u = ru\sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{und} \quad \tau_v = rv\sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

Vom physikalischen Verständnis her ist der dimensionslose Bodenreibungskoeffizient r eine Funktion der lokalen Bodenrauigkeit und der halben Dicke der Bodenschicht. In BSHmod ist er für jedes Modellkompartiment des Systems eine globale Konstante. Da in allen Modellkompartimenten unabhängig von der vertikalen Auflösung eine dünne Bodenschicht definiert ist, variiert r wenig.

$r_{no} = 0,0026$ für das Modell der Nord- und Ostsee und $r_{ku} = 0,0023$ für das Modell der Deutschen Bucht und der westlichen Ostsee sind als klassische Kalibrierungsgrößen durch Testrechnungen für die dominante Partialtide M_2 festgelegt worden.

Für die Elbe scheint ein globaler Wert für r problematisch. Die horizontale Verteilung effektiver Sohlrauigkeit zeigt eine deutliche Variabilität von $>0,1$ m in der Fahrwinne bis zu $>0,0001$ m auf den Watten und im Uferbereich (BAW 2006). In Anlehnung an erste Modellrechnungen in OPTEL-C wurde in OPTEL-A $r_{el} = 0,0017$ gewählt.

Relevant für das hier vorgestellte Elbmodell ist die Formulierung der Randbedingungen an einem inneren Rand zwischen zwei Modellkompartimenten unterschiedlicher räumlicher Diskretisierung. Eine solche künstliche Aufteilung des Modellgebiets soll möglichst keine Störung induzieren. Das ist bestenfalls bei einer beidseitigen Kopplung zwischen den Kompartimenten eines Modellsystems möglich (CAILLEAU et al. 2008).

In BSHmod wird keine analytische Formulierung der Übergangsbedingungen versucht. Die Kopplungstechnik wurde direkt mit Bezug auf die Differenzgleichungen entwickelt.

Für die potentielle Temperatur und den Salzgehalt geschieht die Kopplung einfach durch gewichtete Mittelung bzw. Interpolation. Schwieriger ist die Darstellung der Wellenausbreitung. Im Einzelnen (KLEINE 1994) werden Volumenströme am Rand des feinen Gitters aus dem groben Gitter als Randwerte für die Kontinuitätsgleichung übergeben und der Wasserstand im feinen Modell berechnet. Die Rückkopplung erfolgt dagegen über den Druckterm in der Bewegungsgleichung für die Normalgeschwindigkeit auf dem inneren Rand.

Bei ebenem Boden ist durch diesen Kopplungsmechanismus ein glatter Übergang in Impuls und Wasserstand gegeben. Um eine ungenügende Passlichkeit der Bathymetrie im groben und feinen Gitter auszugleichen, kann die Festigkeit der dynamischen Ankopplung reguliert werden. Für die im Projekt verwendete Version beruhen zwar die Bathymetrien der Modellkompartimente n_0 und k_u auf den gleichen Daten, ein nahtloser Übergang ist trotzdem nicht gegeben. Daher ist die Rückkopplung an das n_0 -Modell etwas vermindert (Faktor 0,8). Ein Faktor 0 entspräche einer einseitigen Kopplung an das n_0 -Modell.

Für die Elbe wurde die Bathymetrie im Überlappungsgebiet gleich der Bathymetrie des k_u -Modells gewählt.

In den Darstellungen von Ergebnissen aus dem Elbmodell ist auch ein Randstreifen aus dem k_u -Modell abgebildet. Während der Übergang bei der potentiellen Temperatur (Abb. 18, 19) und Salzgehalt (Abb. 22, 23) glatt ist, zeigt der Wasserstand (Abb. 29, 30) wegen der schwächeren Rückkopplung zeitweilig kleine Diskontinuitäten.

Die Kopplung an externe Ästuarmodelle wird dadurch realisiert, dass das k_u -Modell regelmäßig Randwerte für solche Gitterzellen herauschreibt, in denen Randpunkte des externen Modells liegen. Die Indices dieser Gitterzellen werden einmalig aus den Randkoordinaten des externen Modells ermittelt. Dabei ist die einzige Beschränkung für die Randkoordinaten, dass sie im Modellgebiet liegen. Exemplarisch wurde die Randkopplung für das Elbmodell der BAW (OPTEL-C) verwirklicht. Da dieses Modell auf einem unstrukturierten Gitter arbeitet, wurden seine Randzellen so gewählt, dass ihre Lage und Größe mit der von Zellen aus dem BSH- k_u -Modell übereinstimmt. Das erleichtert auf Seiten des externen Modells die Interpolation (konkret entfällt sie in der horizontalen Ebene), ist aber nicht zwingend notwendig.

In der Vertikalen arbeitet BSHmod mit einer verallgemeinerten Koordinate s . An Endnutzer werden gewöhnlich auf feste z -Werte interpolierte Modelldaten weitergegeben. Um unnötige Ungenauigkeit durch doppelte Interpolation zu vermeiden, werden als Randwerte Variablen bezüglich s zusammen mit der jeweiligen Schichtdicke an das BAW-Modell übergeben. Die Interpolation auf die vertikale Struktur des externen Modells erfolgt auf Seiten des externen Modells. Grundsätzlich können alle prognostischen und diagnostischen Variablen aus BSHmod übergeben werden. Die Auswahl liegt beim

externen Modell. Für OPTEL-C wurden der Wasserstand, die Schichtdicken und der Salzgehalt alle 5 Minuten ausgegeben. Im Vorhersagebetrieb fragt das BAW-Modell zur Zeit alle 3 Stunden, ob neue Randwerte bereitstehen.

Sz5_wdh (Sturmflut) LZ1

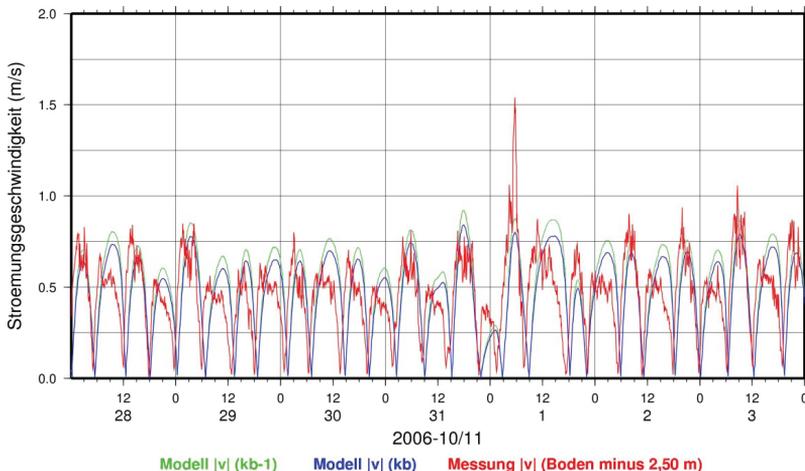


Abbildung 8: Betrag der Bodenströmung an der Langzeitstation LZ1 auf Position 53° 52,4103' N, 9° 10,5055' E (rot: Messung, dunkelblau: ku-Modell, hellblau: nächst höhere Modellschicht) vor und während der Allerheiligen-Sturmflut 2006.

Sz6 (Sturmflut) LZ2

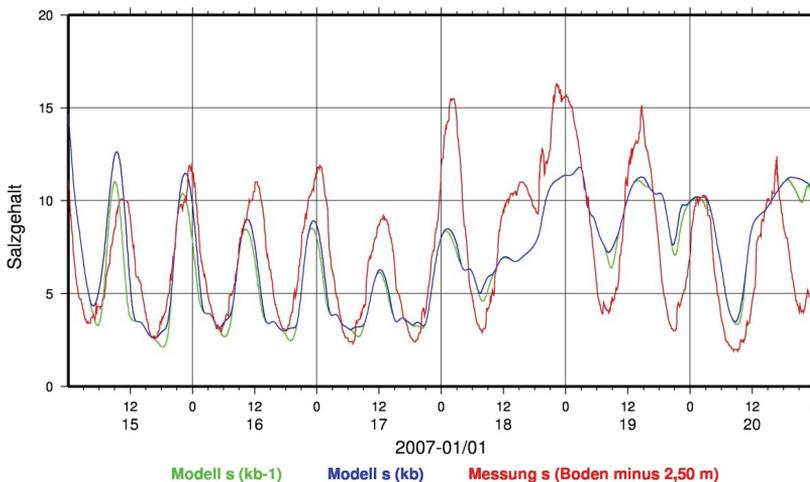


Abbildung 9: Salzgehalt an der Langzeitstation LZ2 auf Position 53° 52,1362' N, 9° 1,2770' E (rot: Messung, dunkelblau: ku-Modell, hellblau: nächst höhere Modellschicht).

Es ist klar, dass auf diese Weise nur eine einseitige Kopplung an das ku-Modell erfolgt. Eine Übergabe von Information aus dem externen, andersartigen Modell an das ku-Modell würde neue konzeptionelle Überlegungen erfordern.

Das beschriebene Verfahren zur Randwertübergabe arbeitet auch im Hindcast-Modus. So wurden für die von OPTTEL-D zusammengestellten Verifikationszeiträume (inklusive mehrwöchiger Vorlaufzeiten) Randwerte für OPTTEL-C berechnet.

Für diese Szenarien wurden die Modellgrößen Temperatur, Salzgehalt, Strömungen und Wasserstand (ku) mit Langzeitmessungen im Mündungsbereich der Elbe verglichen (Positionsangaben etc. bei STROTMANN et al. 2011). Abb. 8 und 9 zeigen, dass dort schon die Ergebnisse von BSHcmod-ku qualitativ so gut sind, dass es sinnvoll erscheint, das vorhandene Modellsystem um eine hochaufgelöste Elbe zu erweitern.

4 Elbemodell

Da das Elbemodell ein neues Modellkompartiment im Modellsystem BSHcmod ist, gilt die Beschreibung aus Kap. 3 im Wesentlichen auch für das Elbemodell. Auf die modifizierten Randbedingungen an der Oberfläche (WAsP) und am Boden wurde bereits hingewiesen. Erstere wurden nach Testrechnungen nicht in den Dauerbetrieb übernommen. Auch die Randbedingung zum ku-Modell ist dort beschrieben. An dieser Stelle wird auf die für die Elbe spezifischen Elemente eingegangen.

4.1 Bathymetrie

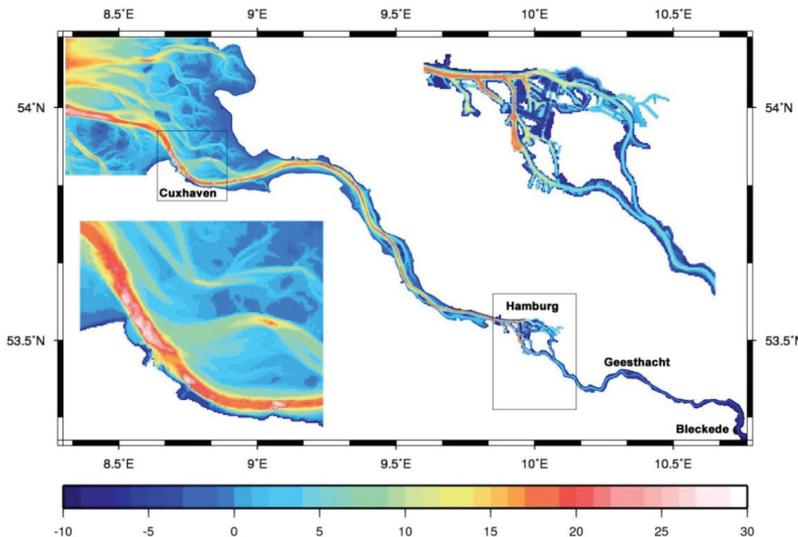


Abbildung 10: Bathymetrie [m] der Elbe (Stand: 2006).

In der Elbe verändert sich die Bathymetrie durch Sedimentumlagerungen und Prielverlagerungen so schnell, dass die Modellbathymetrie in kürzeren Zeiträumen (etwa alle 5 Jahre) mit Messungen abgeglichen werden muss. Selbst während des Projektzeitraums 2008–2011 wurde die Bathymetrie von 2003 durch eine neuere aus dem Jahr 2006 ersetzt. Vorhandene bathymetrische Daten werden von der BAW in einem digitalen Geländemodell (DGM) mit einer Rasterweite von 12,5 m x 12,5 m zusammengefasst. Auf Grundlage eines solchen DGM wurden durch die BAW den Gitterkoordinaten des el-Modells

Tiefenwerte zugeordnet. Konkret wurden der Netzwerkgenerator Janet der Firma smile consult GmbH genutzt, um die im Umfeld des gegebenen Orts liegenden DGM-Werte auf diesen zu mitteln (SMILE CONSULT 2008).

Im Ausgangsmodell wird angenommen, dass die Bathymetrie $H = H(\lambda, \varphi)$ für einen Wasserstand $\zeta(\lambda, \varphi, t) = 0$ zugleich die Wassertiefe ist, und dass Gebiete mit $H \geq 0$ mNN in Abhängigkeit von Gezeiten und Windstau überflutet werden. Gleichzeitig wird angenommen, dass an den Gitterpunkten, wo Zuflüsse in das Modellgebiet stattfinden, $H \geq 0$ mNN gilt (KLEINE 1994). Beide Annahmen gelten für die Elbe streng nur im Mündungsbereich (vergl. z. B. Abb. 11). Daher wurden entsprechende Formulierungen im Modell verallgemeinert, und wo nötig, zwischen der mit wechselndem Vorzeichen behafteten Bathymetrie H und der als Summe der Schichtdicken immer positiven Wassertiefe unterschieden.

Insbesondere wurden die Referenzschichtdicken in Bezug zu einem mittleren Wasserstand (näherungsweise Mittelwasser) statt relativ zu $\zeta(\lambda, \varphi, t) = 0$ mNN festgelegt. Dadurch wird nicht nur eine sinnvolle Anfangsverteilung der Schichtdicken erreicht, sondern auch gewährleistet, dass Parametrisierungen als Funktion der Referenzschichtdicken sinnvoll bleiben.

	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	
848	-5.63	-6.86	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
849	-6.47	-6.54	-6.92	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
850	-8.08	-6.66	-8.77	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
851	-8.29	-6.55	-7.02	-6.45	-8.15	-7.35	-7.36	-7.62	-7.86	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
852	-5.54	-6.14	-6.41	-6.44	-6.25	-7.42	*****	-7.15	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
853	-4.39	-4.04	-4.65	-4.49	-4.56	-6.11	-7.67	*****	-8.72	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
854	-5.37	-5.21	-5.82	*****	-5.29	-6.53	*****	-8.12	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
855	-4.97	-5.32	-6.48	-6.90	-6.30	-6.37	-5.71	-7.87	*****	-8.85	-7.78	-7.82	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	-8.36
856	1.30	-5.57	-6.06	-5.79	-6.42	-6.98	-6.92	-8.45	-7.15	*****	-8.25	-8.00	-8.36	-8.93	-9.08	-8.06	-8.94	-8.28	-7.99	*****
857	3.07	3.20	3.22	1.25	-7.15	-7.42	-7.64	-7.71	-7.96	*****	-8.28	-8.26	-8.42	-8.39	-8.63	-7.79	-7.46	-7.38	-9.61	*****
858	3.20	3.29	3.29	3.45	3.65	3.74	-4.58	-6.33	-7.08	*****	-8.44	-8.22	-8.20	-8.26	-8.11	-7.35	-7.51	-7.77	*****	*****
859	-4.81	-4.04	2.24	2.07	2.97	3.26	3.11	2.87	-1.26	-2.81	*****	-7.79	-7.78	-7.80	-8.12	-7.65	-6.60	-7.08	-7.28	*****
860	-4.99	-4.94	-4.86	-4.88	-5.14	1.20	-3.21	-1.11	-2.34	*****	-7.40	-5.65	-4.65	-7.24	-7.30	-7.14	-6.42	-7.16	*****	*****
861	-4.65	-4.64	-5.01	-4.76	-4.69	-4.89	-4.53	-5.68	*****	-7.24	-7.25	-2.61	-1.15	-3.38	-1.39	-3.75	-6.81	-7.32	*****	*****
862	-5.24	-4.47	-4.27	-4.83	-4.85	-4.84	-5.13	-7.13	*****	-6.30	-6.63	-6.55	-5.49	-6.02	-4.86	-3.08	-5.55	0.03	0.04	*****
863	-5.20	-5.32	-5.30	-4.40	-4.77	-4.88	-4.80	-5.42	*****	-6.23	-6.24	-6.18	-4.60	-4.62	-5.17	-4.40	-5.85	-6.07	-4.38	*****
864	3.4	-3.85	-5.40	-5.32	-5.21	-5.25	-5.04	-5.27	*****	-6.24	-6.43	-5.46	-4.42	-3.84	-4.93	-3.68	-3.77	-4.21	-5.02	*****
865	1.06	0.65	-3.10	-4.45	-5.55	-5.78	-5.58	-5.43	*****	-6.27	-6.40	-4.78	-4.06	-4.69	-3.73	-3.69	-3.77	-3.99	-5.21	*****
866	2.51	1.21	3.0	-2.65	-3.55	-4.30	-4.98	-5.82	*****	-7.17	-8.78	-5.66	-5.51	-4.96	-5.11	-5.61	-1.33	-3.99	-1.62	*****
867	5.11	2.70	1.58	1.72	1.53	0.95	-3.10	-3.01	-1.99	-4.30	-3.54	-3.45	-2.66	-2.12	4.7	7.0	1.49	1.45	1.11	*****
868	2.98	4.88	3.18	2.01	1.98	2.28	1.38	5.9	1.75	-1.30	4.2	8.2	1.22	1.27	1.29	1.29	1.27	1.22	1.15	*****
869	-2.39	2.34	3.52	3.97	3.35	3.31	3.16	2.97	2.00	-1.30	1.03	1.09	1.50	1.54	1.40	1.21	2.7	-7.6	0.03	*****
870	-4.74	-1.29	-1.71	2.08	4.26	4.04	1.36	1.29	1.46	-7.50	-1.22	-3.3	7.2	-1.1	-9.7	-1.14	-2.11	-2.78	-2.28	*****
871	*****	-2.32	-1.75	-2.75	-3.49	-3.37	-3.18	-3.56	*****	-5.22	-4.76	-3.76	-3.60	-3.96	-3.27	-3.87	-4.45	-4.68	*****	*****
872	*****	-4.60	-2.85	-1.99	-3.27	-3.39	-3.48	*****	-3.20	-3.13	-3.45	-4.27	-4.76	-4.56	-4.44	-4.75	-4.37	*****	*****	*****
873	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	-4.42	-4.33	-4.16	-4.15	-4.18	-3.95	-3.71	-4.04	-3.98	*****	*****	*****
874	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	-5.90	-3.90	-4.38	-4.62	-3.85	-3.94	-3.94	-3.92	-4.07	*****	*****	*****
875	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
876	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

Abbildung 11: Modellbathymetrie im Staustufenbereich, oben und links die zugehörigen Indices (West-Ost, Nord-Süd). Bei (1464, 868–869) befindet sich das Wehr. Tiefen [m] bezogen auf z=0 mNN, positiv nach unten. * Landpunkte.

4.2 Wehr

Die Ausdehnung des Modellgebiets über Geesthacht hinaus bis Bleckede erforderte eine numerische Realisierung des Wehrs in Geesthacht (Abb. 12). Dort wird das Wasser gestaut und fällt oder schießt über 4 einstellbare Wehrsektoren in den unterhalb des Wehrs gelegenen Flussabschnitt. Die Modellgleichungen sind durch Annahmen so eingeschränkt, dass sie weder Fallen noch Schießen simulieren können. Auch die durch diese Prozesse unterhalb des Wehrs erzeugte turbulente Bewegung ist von anderer Art als die im Modell parametrisierte.

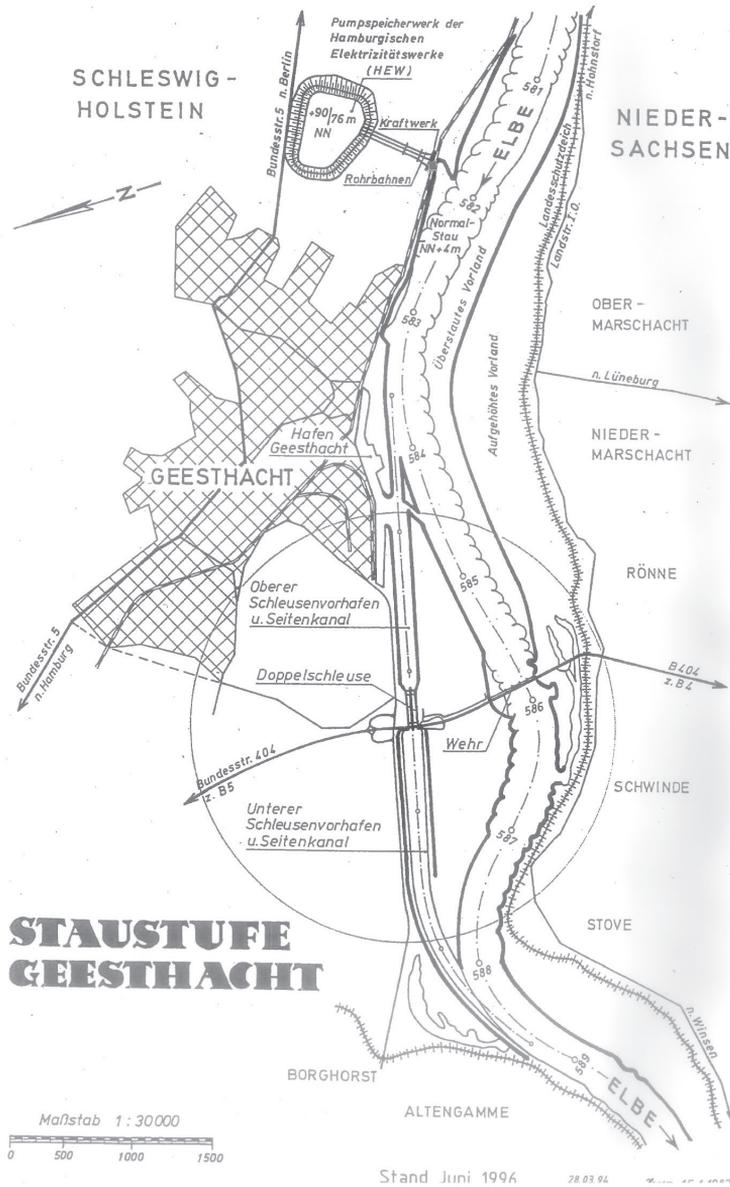


Abbildung 12: Wehr Geesthacht, Übersichtskarte (WSD Ost 1996).

Tabelle 2: Indices, Tiefen und Bezeichnung der Modellpunkte im Wehrbereich (s. nachfolgende Abb. 13 und 14). Die rote Linie kennzeichnet die Lage des Wehres im Modell.

Indices (s. Abb. 11)		Tiefe [mNN]		Bezeichnung	
1463,867	1464,867	1,99	4,30	u867_L	o867_B
1463,868	1464,868	-1,75	1,30	u868_N	o868_N
1463,869	1464,869	-2,00	1,30	u869_S	o869_S
1463,870	1464,869	-1,46	7,50	u870_S	o870_L

Durch einen von KLEINE (BSH) vorgeschlagenen Ansatz werden Fallen oder Schießen vermieden, indem der durch die Fallhöhe erzeugte Druckgradient in der Gleichung für die horizontale Strömung in einem Zwischenschritt in seiner Wirkung auf die horizontale Geschwindigkeit kompensiert wird. Die modifizierte Strömung ist jeweils zwischen einer Gitterzelle oberhalb und der in Strömungsrichtung unterhalb liegenden Gitterzelle definiert. Das Wehr in Geesthacht besteht in diesem Sinne aus zwei Teilen (Wehrsegmenten) von jeweils 90 m Breite. Bei zukünftiger höherer Auflösung lassen sich auch im Modell die 4 Sektoren einzeln darstellen.

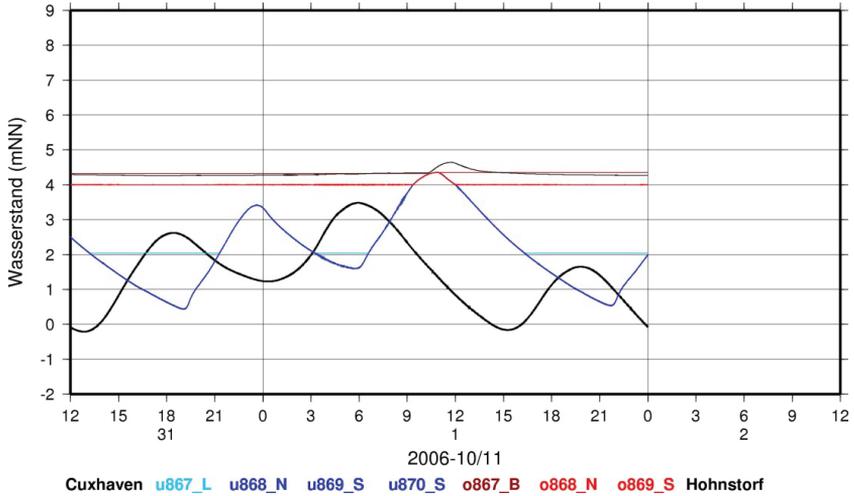


Abbildung 13: Wasserstandsganglinien während der Sturmflut vom 01.01.2006, Oberwasser 300 m³/s.

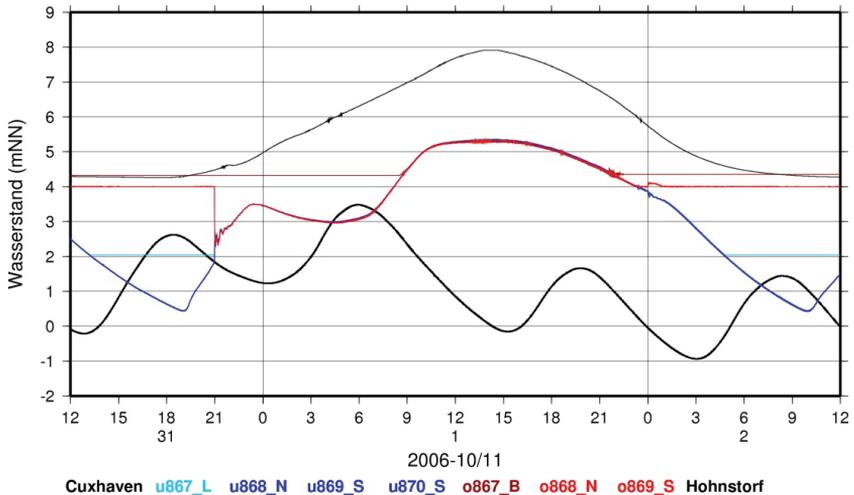


Abbildung 14: Wasserstand während der Sturmflut vom 01.01.2006 bei künstlichem, kurzfristig stark erhöhtem Oberwasser (bis 3600 m³/s).

Die Abb. 13 und 14 zeigen Wasserstandsverläufe unterhalb des Wehres (Gitterzelle u868_N), oberhalb des Wehres (Gitterzelle o868_N) und im Bereich der Überlaufschwelle (4,3 mNN, Gitterzelle o867_B) (siehe Abb. 11, Tab. 2). Zum Vergleich sind die Wasserstandsverläufe in Cuxhaven und Hohnstorf dargestellt. In Abb. 13 sind beide Modellwehre während des betrachteten Zeitraums geschlossen. Trotzdem konnte sich während der simulierten Sturmflut (Allerheiligenflut 2006) das Wasser flussaufwärts ausbreiten. Die Überlaufschwelle wird dagegen nur kurz überspült. Die Gitterzelle u867_L, ein unter mittleren Verhältnissen trockenes Gebiet, wird für längere Zeit überflutet.

Bei der Sturmflut vom 6. Dezember 2013 breitete sich das Hochwasser ebenfalls über das Wehr flussaufwärts aus (Kap. 5.2, Abb. 31).

Um das Öffnen und Schließen des Wehrs zu testen, wurde über einen Tag, zusammenfallend mit der Sturmflut 2006, oberhalb des Wehres ein künstlich erhöhtes Oberwasser mit maximal 3600 m³/s vorgegeben. Nach dem Öffnen der Sektoren (bei einem Oberwasser über oder gleich 1200 m³/s) erhöht der zusätzliche Transport den Wasserstand unterhalb der Wehre und erniedrigt ihn oberhalb (Abb. 14). Gleichzeitig wird der Landpunkt (u867_L) überflutet. All das geschieht im Modell augenblicklich, während die entsprechende Anpassung beim Hochfahren der Wehrsektoren mit einer leichten Verzögerung geschieht.

Bei geöffnetem Wehr fließt bei weiterer Zunahme (vergleiche Wasserstandsverlauf in Hohnstorf) dann für längere Zeit auch Wasser über die Überlaufschwelle. Bei abnehmendem Oberwasser entfällt zuerst der Transport über die Überlaufschwelle, dann schließt das Wehr (Oberwasser < 1200 m³/s) und schließlich fällt der Landpunkt trocken.

Der Oberwasserzufluss wurde so gewählt, dass der Scheitel der Oberwasserwelle etwa zeitgleich mit dem Sturmflutscheitel das Wehr erreicht. Tatsächlich trifft er etwas früher als die Oberwasserwelle ein (vergl. Hohnstorf) und verlängert so die Hochwasserphase.

Durch das sehr hohe Oberwasser sind, wie auch bei realistischem hohem Oberwasser, die stromab gerichteten Strömungsgeschwindigkeiten (Abb. 15) gegenüber denen bei mittlerem bis geringem Oberwasser (Abb. 16) deutlich größer. In den Abb. 15 und 16 sind die Vertikalgeschwindigkeiten zu Hervorhebung mit einem Faktor 50 multipliziert. Die gezeigten Längsschnitte verlaufen entlang des Talwegs von Bleckede bis zum seeseitigen Modellrand (vergleiche Abb. 2). In Hamburg verläuft der hier definierte Talweg durch den Köhlbrand und die Süderelbe. Bei Flutstrom (o. Abb.) treten gezeitenbedingte Richtungswechsel der Strömungen bei sehr hohem Oberwasser stromauf von Hamburg praktisch nicht mehr auf.

Wasserstandsverläufe und Strömungen erscheinen realistisch und der Wehrmechanismus arbeitet in allen Situationen erwartungsgemäß. Das hohe Oberwasser im Januar 2011 hat gezeigt, dass die Einstellung der Sektoren nach momentanen Erfordernissen statt nach starren Regeln erfolgt. Vom Dezernat Regionales Management der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Ost und dem Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Lauenburg wurde eine operationelle Bereitstellung der aktuellen Stellungen der vier Sektoren der Staustufe Geesthacht eingerichtet. Diese Information wird zukünftig am BSH auf Informationen für die zwei Modellwerte umgerechnet und in den Vorhersageablauf integriert.

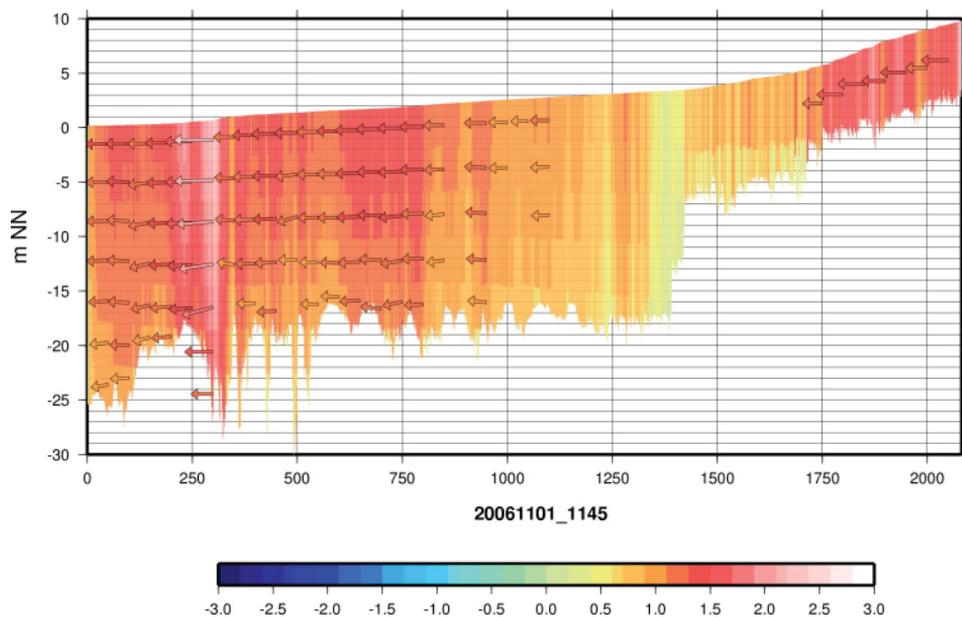


Abbildung 15: Strömungen bei ablaufendem Wasser unter dem Einfluss extrem erhöhten Oberwassers ($3500 \text{ m}^3/\text{s}$) und einer Sturmflut (Allerheiligenflut 01.11.2006), Wehrsektoren geöffnet (farblich Betrag der Geschwindigkeit [m/s], Pfeile für Geschwindigkeiten $> 1 \text{ m/s}$).

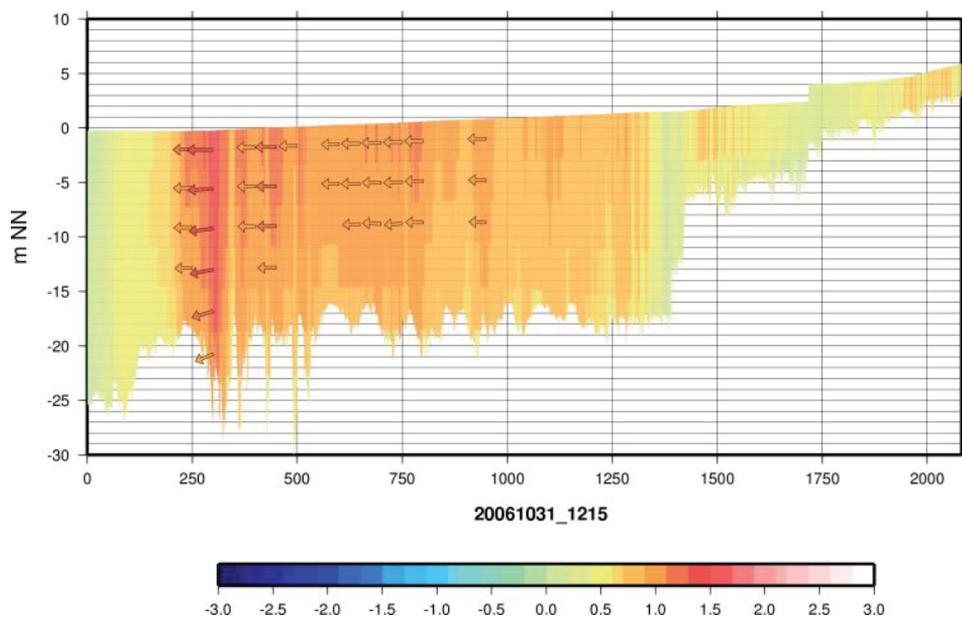


Abbildung 16: Strömungen bei ablaufendem Wasser vor der Sturmflut (Allerheiligenflut 01.11.2006), Wehrsektoren geschlossen (farblich Betrag der Geschwindigkeit [m/s], Pfeile für Geschwindigkeiten $> 1 \text{ m/s}$).

4.3 Modellstruktur

Die zeitliche Diskretisierung in BSHcmod ist größtenteils eine explizite. Nach bekannten Stabilitätsbedingungen darf ein Wasserteilchen oder eine Information während eines Zeitschnittes höchstens in die benachbarte Gitterzelle transportiert werden, d. h. der Zeitschritt ist durch den Gitterabstand und charakteristische Geschwindigkeiten beschränkt. Dabei werden Dynamik und Transport von Wärme und Salz von unterschiedlichen charakteristischen Geschwindigkeiten bestimmt und können daher mit unterschiedlichen Zeitschritten gerechnet werden. In BSHcmod war bei Projektbeginn der Zeitschritt für den Transport von Wärme und Salz durch die Programmstruktur für alle Modelle gleich und durch den Gitterabstand im feinsten Modell festgelegt. Diese unnötige Limitierung wurde durch eine Umstrukturierung des Programms aufgehoben (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2011).

4.4 Modellgleichungen

Wesentliche Elemente des Wasserstandsverlaufs entlang der Elbe wurden ohne weitere Annahmen mit den gewählten Ansätzen simuliert, insbesondere die zunehmende Asymmetrie von Flut- und Ebbeast in Richtung Oberelbe (GÖNNERT et al. 2004). Auch die Höhe und Eintrittszeit von Sturmfluten in Hamburg und Geesthacht wurden sowohl bei hohem Oberwasser als auch bei niedrigem Oberwasser gut vorhergesagt. Im Detail ergeben sich aber signifikante Abweichungen von der Beobachtung.

Im Prinzip ist die Entwicklung einer Schwerewelle in Tideflüssen gut verstanden. Analytische Betrachtungen finden sich z. B. bei PRANDLE (2009) und SAVENIJE et al. (2008). Die Asymmetrie der Gezeitenkurve beschreiben schon bekannte einfache Gleichungen (LAMB 1932). Ist ζ nicht mehr gegenüber der Tiefe zu vernachlässigen, gewinnen die nichtlinearen Terme in der kinematischen Randbedingung an Bedeutung und die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schwerewellen wird näherungsweise durch $\sqrt{g(H+\zeta)}$ statt durch \sqrt{gH} beschrieben, d. h. unterschiedlich für Flut- und Ebbstrom. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn zusätzlich die Tiefe und/oder die Breite abnimmt und dadurch ζ anwächst.

Die Modellgleichungen sind in dieser Hinsicht nicht eingeschränkt, und die zeitliche Änderung des Wasserstandes zeigt flussaufwärts eine zunehmende Asymmetrie und wachsende Amplitude. Trotzdem sind die simulierten Wasserstandskurven nicht befriedigend. Probleme wie zu hohe Niedrigwasser, die sich schon im operationellen Modell der Deutschen Bucht andeuten, verstärken sich in der Elbe. Die starke Abweichung im Wasserstand gegen Ende der Ebbzeit ist ein systematischer Fehler, der nicht durch einfache Kalibrierung beseitigt werden kann. Während der Flutast im Allgemeinen gut simuliert wird, ist der Abfall zum NW anders als in der Natur nahezu linear.

Als Erklärung für die Probleme bieten sich für die Elbe unangemessene Approximationen in den Bewegungsgleichungen, unzureichende numerische Verfahren, nicht adäquate Auflösung in der Darstellung der Bathymetrie und schlecht gewählte Parameter an.

Betrachtet man gemessene Wasserstandsganglinien entlang der Elbe (Abb. 5), erscheint es nicht nötig, die hydrostatische Annahme fallen zu lassen. Als problematisch wird jedoch die Vernachlässigung der vertikalen Impulsadvektion und der horizontalen

Komponente der Erdrotation $\tilde{f} = \cos \varphi$ angesehen. Die folgenden Gleichungen sind eine Umformung der Gleichungen aus Kap. 3 unter Berücksichtigung dieser Terme.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_s + \left(\tilde{f} + \frac{\partial u}{\partial s} \right) \frac{ds}{dt} - \left[f + \left(\frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \right]_s v \\ &= - \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + \frac{\partial \phi_G}{\partial \lambda} + \frac{1}{2} \frac{\partial (u^2 + v^2)}{\partial \lambda} \right]_s - \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial s}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \lambda} \Big|_s \frac{\partial \phi}{\partial s} + F_{hu} \Big|_s + F_{vu} \Big|_s \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} \Big|_s + \left[f + \left(\frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \right]_s u - \left(- \frac{\partial v}{\partial s} \right) \frac{ds}{dt} \\ &= - \frac{1}{R} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial \phi_G}{\partial \varphi} + \frac{1}{2} \frac{\partial (u^2 + v^2)}{\partial \varphi} \right]_s - \frac{1}{R} \frac{\partial s}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \varphi} \Big|_s \frac{\partial \phi}{\partial s} + F_{hv} \Big|_s + F_{vv} \Big|_s \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left(- \frac{\partial v}{\partial s} \right) v - \left(\frac{1}{\partial s / \partial z} \tilde{f} + \frac{\partial u}{\partial s} \right) u = - \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{\partial \phi}{\partial s} + \frac{1}{2} \frac{\partial (u^2 + v^2)}{\partial s} \right] \quad (9)$$

Eine Hinzunahme der unterstrichenen Terme könnte eventuell das Problem mit den systematisch zu hohen Niedrigwassern lösen, indem der auffällige fast lineare Abfall im Eb-
bast modifiziert wird (s. Abb. 32, 33). Während der Projektlaufzeit konnten jedoch numerische Versuche hierzu nicht ausgeführt werden.

Das BSHcmod enthält wenig „freie Modellparameter“: den Bodenreibungskoeffizienten und in der verwendeten Version die maximale Mischungsweglänge im Ansatz für den turbulenten vertikalen Impulsaustausch. Ferner kann die Art der s -Koordinate gesteuert werden.

Kalibrierungsmöglichkeiten über „freie Modellparameter“ sind daher in BSHcmod eingeschränkt. Insbesondere da der Bodenreibungskoeffizient eine globale Konstante für jedes Modellkompartiment ist. In OPTEL-C (KREMP et al. 2012) sind umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss der Bodenreibung gemacht worden. Auf dieser Grundlage wurde mit BSHcmod ein Sensitivitätstest gemacht.

Das Fazit ist, dass sich über eine Modifikation des globalen Bodenreibungskoeffizienten oder des Koeffizienten für den vertikalen Impulsaustausches Hochwasserhöhen, Niedrigwasserhöhen und Tidenhub nicht gleichzeitig und überall optimieren lassen. Eine räumlich und zeitlich variable Wahl des Bodenreibungskoeffizienten als Funktion der lokalen, momentanen Dicke der Bodenschicht oder der aktuellen Wassertiefe und natürlich der lokalen Bodenrauhigkeit bietet mehr Kalibrierungsmöglichkeiten (KREMP et al. 2013) und verbessert die Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und Beobachtung. Sie birgt allerdings auch die Gefahr, Unzulänglichkeiten in der Modellierung zu kompensieren. Turbulenzmodelle für den vertikalen Impulsaustausch, integriert in das BAW-Modell, in das HBM (BERG et al. 2012), eine Parallelentwicklung zu BSHcmod, und in eine weiterentwickelte BSHcmod-Version verbessern die Reproduktion, können das Problem aber nicht grundsätzlich lösen. Bei bestimmten Windrichtungen treten auch in diesen Varianten größere Abweichungen zu gemessenen Wasserständen zur Niedrigwasserzeit auf (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2011).

Bei der operationellen Nutzung numerischer Modelle für Zwecke der Wasserstandsvorhersage wird das Problem dadurch umgangen, dass nur der Stau als Differenz zu einer gesondert gerechneten Modellzeit in der Vorhersage berücksichtigt wird. Die für die offene Nordsee getroffene Annahme, dass auf diese Weise eine in beiden Rechnungen gleichartige Abweichung von der Natur eliminiert wird, stimmt für die Elbe wegen der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der einlaufenden Welle vom Wasserstand nur bedingt.

5 Dauerbetrieb

5.1 Anfangszustand

Der Dauerbetrieb wurde im November 2010 von einem konstruierten Anfangszustand für die prognostischen Variablen gestartet:

$$\Delta h(t_A) = \Delta h_{ref} \quad (10)$$

$$\vec{v}_h(t_A) = 0 \text{ m/s} \quad (11)$$

$$\theta(t_A) = \bar{\theta}_{Randku}(t_A) \quad (12)$$

$$S(t_A) = (\lambda_{Randku} - \lambda_{el}) \frac{\bar{S}_{Randku}(t_A)}{\lambda_{Randku} - \lambda_{StPauli}}, \quad S(t_A) = 0 \text{ für } \lambda_{el} > \lambda_{StPauli} \quad (13)$$

$$Eisparameter(t_A) = eisfrei \quad (14)$$

Aus diesen Werten wurde bei einseitiger simultaner Kopplung an BSHcmod (ku) der eigentliche Anfangszustand berechnet. Es ist derjenige Zustand, der sich nach einem Tag der Anpassung einstellt. Die „einseitige Kopplung“ bedeutet hier, dass in der beidseitigen Kopplung die Rückkopplung ignoriert wurde. Dieses Vorgehen ist für längere Vorhersagen ungeeignet (CAILLEAU et al. 2008). Es diente lediglich der Glättung des Übergangs zwischen ku- und el-Modell. Entsprechend wurde für t_A eine Zeit mit auflaufendem Wasser gewählt. Danach wurde die Vorhersage wie beschrieben in beidseitiger simultaner Kopplung begonnen. Nach einigen Wochen hatte sich auch eine sinnvolle Salzgehaltsverteilung eingestellt. Spätere Vorhersagen, Testrechnungen oder Wiederholungen nach Änderungen werden von alten Vorhersagen zur Zeit t_0 gestartet. Dabei ist t_0 der Beginn einer konkreten Vorhersage, jeweils 00:00 Uhr UTC.

5.2 Vorhersagen

In die Zeit seit Beginn des Dauerbetriebs fielen markante Ereignisse, wie Eisgang, extremes Oberwasser, Sturmflut bei hohem Oberwasser, erhöhtes Hochwasser bei niedrigem Oberwasser und erniedrigtes Niedrigwasser (BORK und MÜLLER-NAVARRA 2011).

Die Eisbedeckung und deren Dauer während der Eiswinter 2011/12 und 2012/13 konnten erfolgreich vorhergesagt werden (bis auf weiteres einsehbar hier:

www.bsh.de/de/Meeresdaten/Projekte/OPTEL/index.jsp). Im Bereich Brunsbüttel bis Harburg wurden z. B. Ende Januar 2013 fünf bis acht Tage mit Eis von 5–15 cm Dicke gemeldet. An diesen Tagen sagte auch das Modell Eis mit entsprechender Dicke voraus. Insbesondere wird im Eisbericht des BSH vom 28.01.2013 (BSH Eisbericht Nr. 9, BSH Beschreibung des Eiswinters 2012/13) von Brunsbüttel bis Hamburg sehr lockeres bis lockeres dünnes Eis und Neueis gemeldet. Abb. 17 a-d zeigt exemplarisch die vorhergesagten Eisparameter (Eiskompaktheit, Eisdicke und Eisdrift) zusammen mit der Oberflächenströmung für den 28.01.2013.

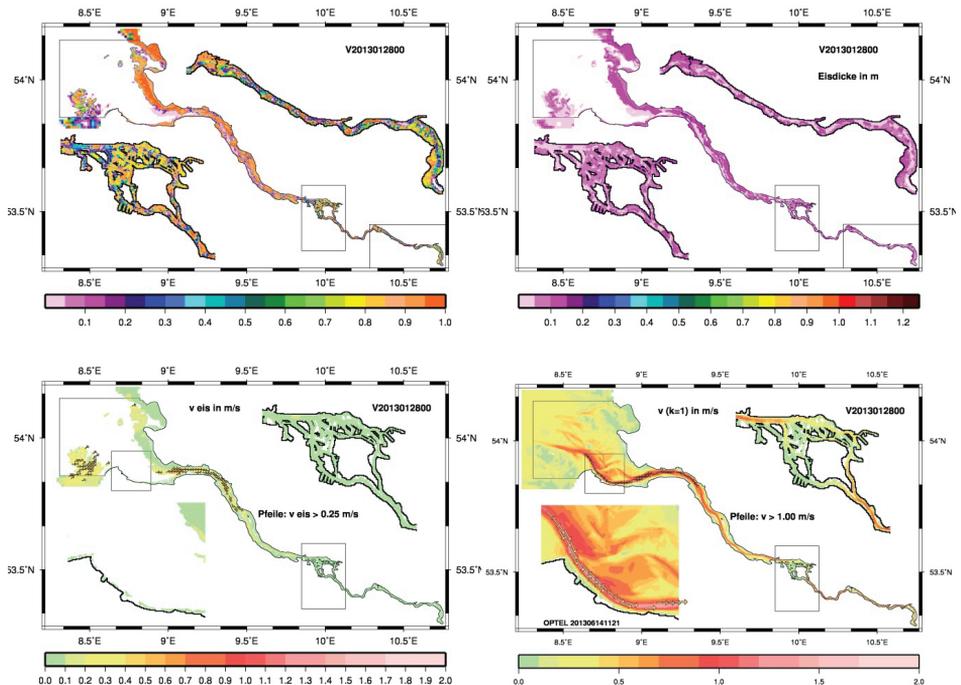


Abbildung 17: Eiskompaktheit, Eisdicke und Eisdrift, sowie Wassertemperatur und Strömung in der Oberflächenschicht des Modells am 28.01.2013. Abb. 17a (oben links): Eiskompaktheit. Abb. 17b (oben rechts): Eisdicke. Abb. 17c (unten links): Eisdrift. Abb. 17d (unten rechts): Strömung.

Seit dem 28.05.2011 wird die morgendliche Wassertemperatur stromauf von Bleckede automatisch vom LUGV Brandenburg an das Elbmodell als Randwert übergeben. Schon ab Ende Februar 2011 wurden die entsprechenden Werte bei Cumlosen (LUGV) und/oder bei Schnackenburg (betrieben vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz {NLWKN}) manuell aus dem Internet übernommen.

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft Verteilungen der Oberflächentemperatur für Sommer und Herbst. Die herbstliche Oberflächentemperatur (Abb. 19) zeigt deutlich das schnellere Abkühlen auf den Wattflächen. Abb. 18 veranschaulicht die dort stärkere Erwärmung im Sommer.

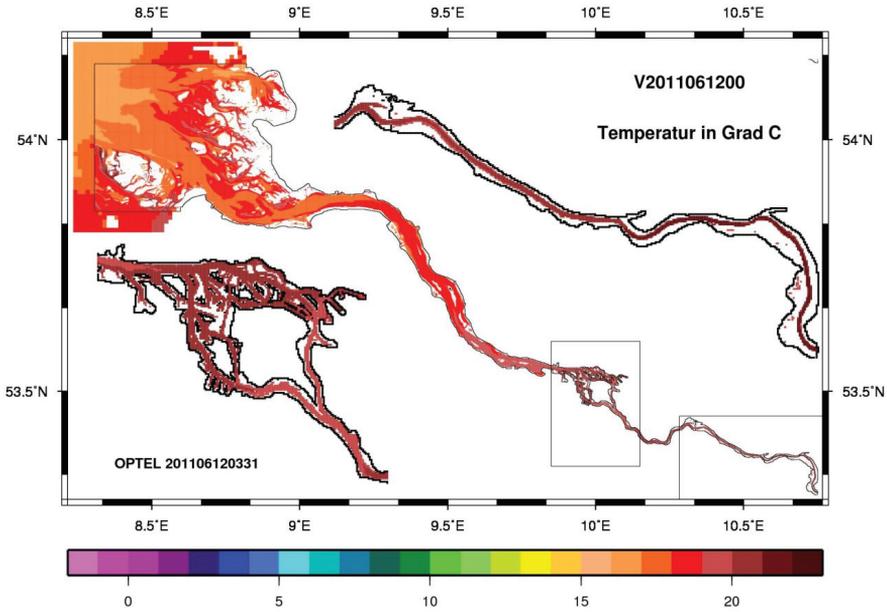


Abbildung 18: Oberflächentemperatur im Sommer (12.06.2011, 12:00 UTC).

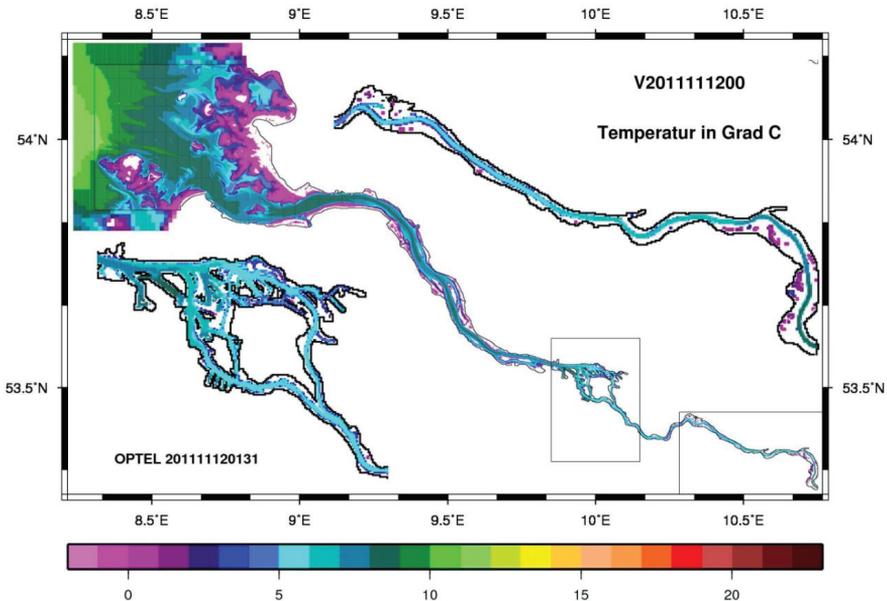


Abbildung 19: Oberflächentemperatur im Herbst (11.11.2011, 12:00 UTC).

Niederschlag und Eisbildung bleiben in der Salzgehaltsbilanz des Modells unberücksichtigt, ebenso die sehr kleinen Salzgehaltsschwankungen bei Bleckede. Der Salzgehalt wird im Modell und auch in der Natur ganz überwiegend durch die seeseitige Randbedingung und bei Bleckede durch die Menge des Oberwassers bestimmt. Dadurch sind die

seeseitige Grenze der Süßwasserfahne der Elbe sowie die Lage der Brackwasserzone festgelegt. Beide wandern unter dem Einfluss der Gezeiten. Abb. 20 und 21 zeigen die Lage der Salzgehaltsfront bei mittleren Oberwasserverhältnissen und ruhiger Wetterlage zur Hochwasser- bzw. Niedrigwasserzeit in Cuxhaven.

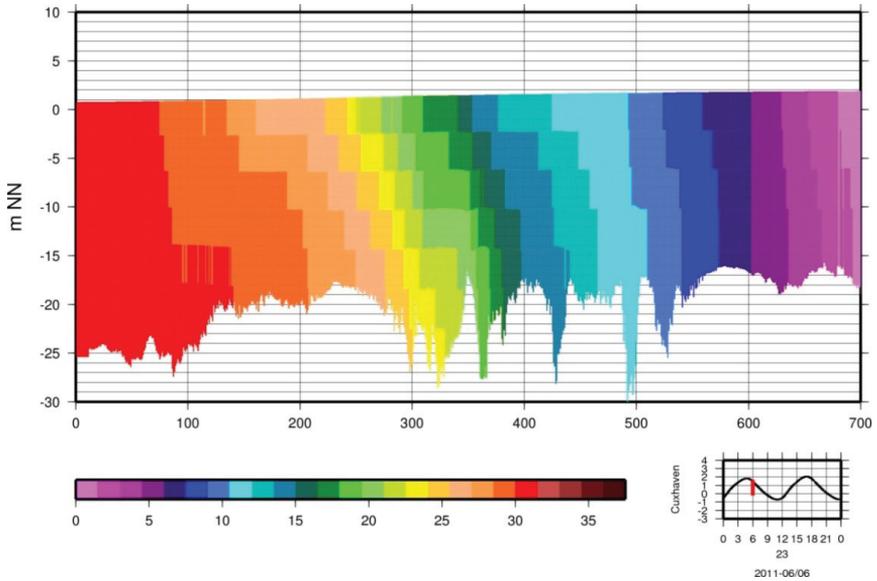


Abbildung 20: Talwegsschnitt des Salzgehalts [g/kg] im Mündungsbereich der Elbe, etwa 1 Stunde nach Morgen-HW in Cuxhaven am 23.06.2011. Vertikalkoordinate etwa 800fach überhöht.

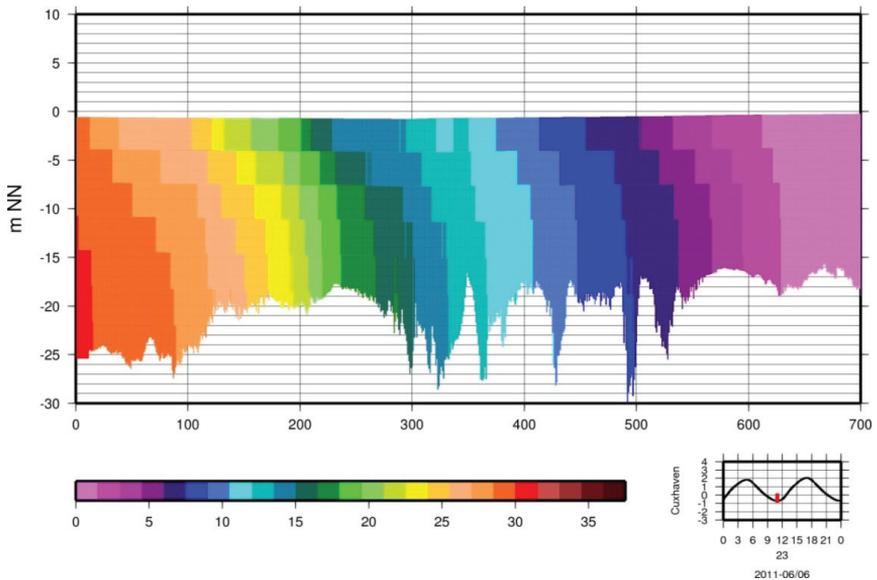


Abbildung 21: Talwegsschnitt des Salzgehalts [g/kg] im Mündungsbereich der Elbe, etwa z. Zt. des Mittag-NW in Cuxhaven am 23.06.2011. Überhöhung wie in Abb. 20.

Abb. 22 zeigt eine horizontale Verteilung des Oberflächensalzgehalts bei niedrigem Oberwasser mit einer schmalen Salzfahne im Brackwasserbereich am südlichen Elbufer, Abb. 23 die Auswirkung hohen Oberwassers auf den Oberflächensalzgehalt.

Abb. 24 und Abb. 25 zeigen den zeitlichen Verlauf von Betrag und Richtung der Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe im Vergleich mit Punktmessungen an der Langzeitmessstation LZ2a. Die Strömung wird bis auf eine abweichende Asymmetrie in der Geschwindigkeit bei auflaufendem Wasser gut simuliert. Die Änderung der Strömung unter extremen Bedingungen wurde in Kap. 4.2 gezeigt. Hier wird die Strömung für mittlere Verhältnisse betrachtet. Die unterschiedliche Güte in der Reproduktion der Ebb- und Flutphase scheinen symptomatisch für BSHcmod zu sein (vergl. Diskussion in Kap. 4).

In LZ1T ist die Übereinstimmung ähnlich gut wie in der gezeigten Station LZ2a. Beim Vergleich des Modellergebnisses mit Daten der Station LZ1a ergab sich ein etwas größerer Phasenfehler. Für LZ03 gibt es keine Daten, bei Station LZ4a passt eher die Strömung in der über der Bodenschicht gelegenen Modellschicht zur Messung.

Abb. 26 und 27 zeigen Beispiele der Oberflächenströmung bei auflaufendem bzw. ablaufendem Wasser, korrespondierend zu den Abb. 22 und 23. Abb. 28 zeigt die primär windbedingte Oberflächenströmung zur Kenterzeit bei Cuxhaven während der Sturmflut vom 6. Dezember 2013.

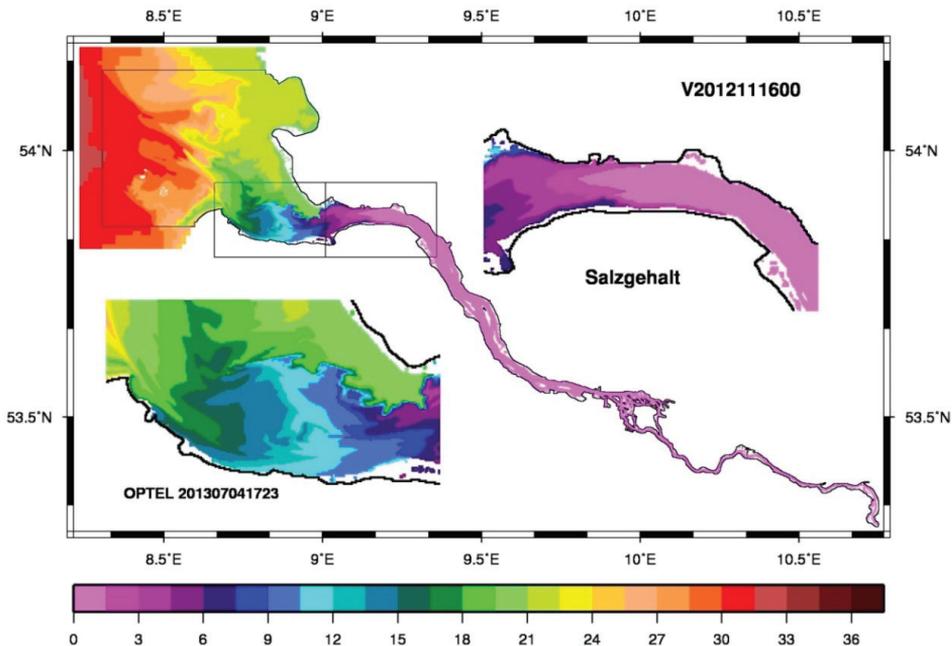


Abbildung 22: Oberflächensalzgehalt [g/kg] bei niedrigem Oberwasser (16.11.2012, 00:00 UTC, 452 m³/s).

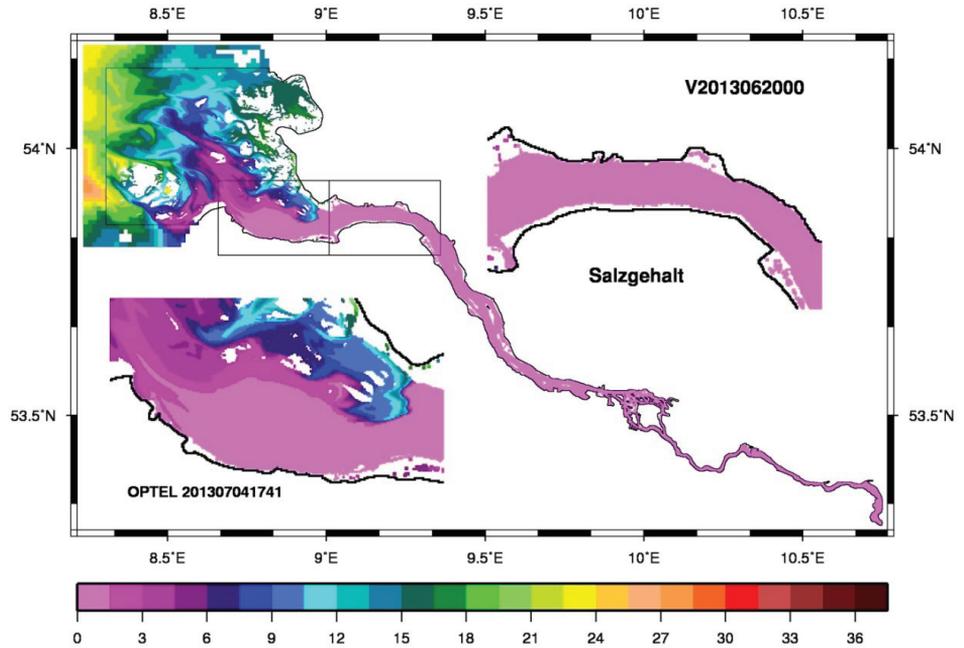


Abbildung 23: Oberflächensalzgehalt [g/kg] bei hohem Oberwasser (20.06.2013, 10:00 UTC, $2870 \text{ m}^3/\text{s}$).

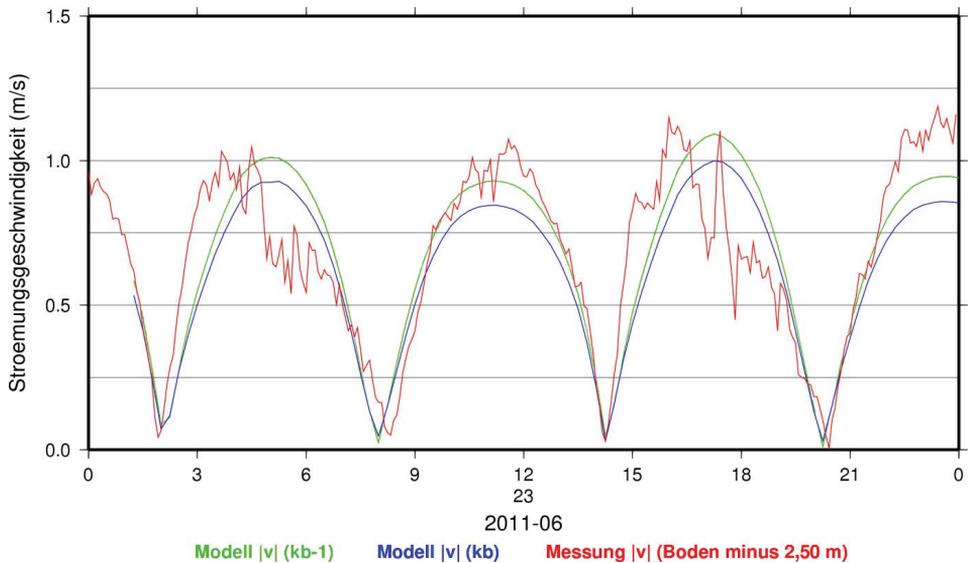


Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf des Betrages der Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe (rot: Messung, dunkelblau: Modell, hellblau: nächst höhere Modellschicht) am 23.06.2011 für LZ2a.

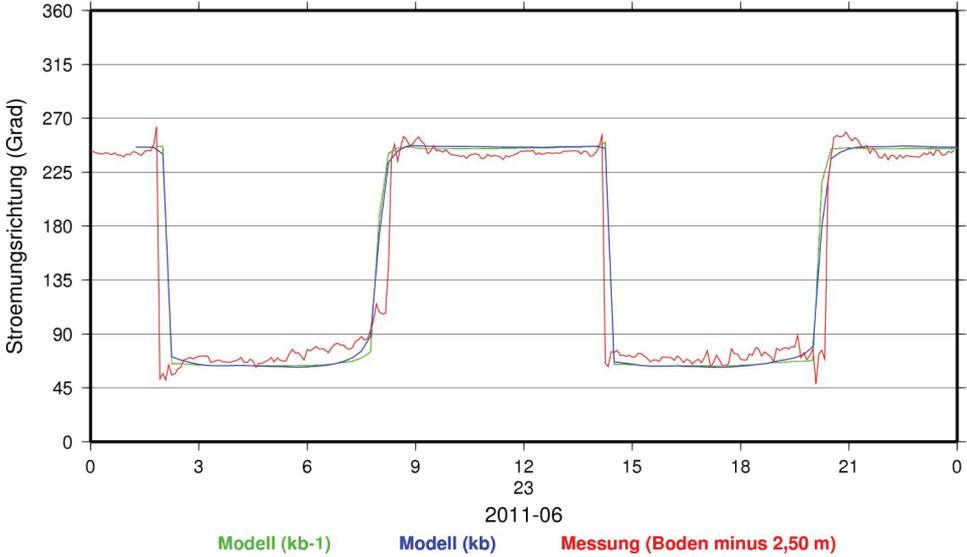


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der Richtung der Strömung in Bodennähe (rot: Messung, dunkelblau: Modell, hellblau: nächst höhere Modellschicht) am 23.06.2011 für L.Z.2a (53°52,1236 N 9°1,27270 E).

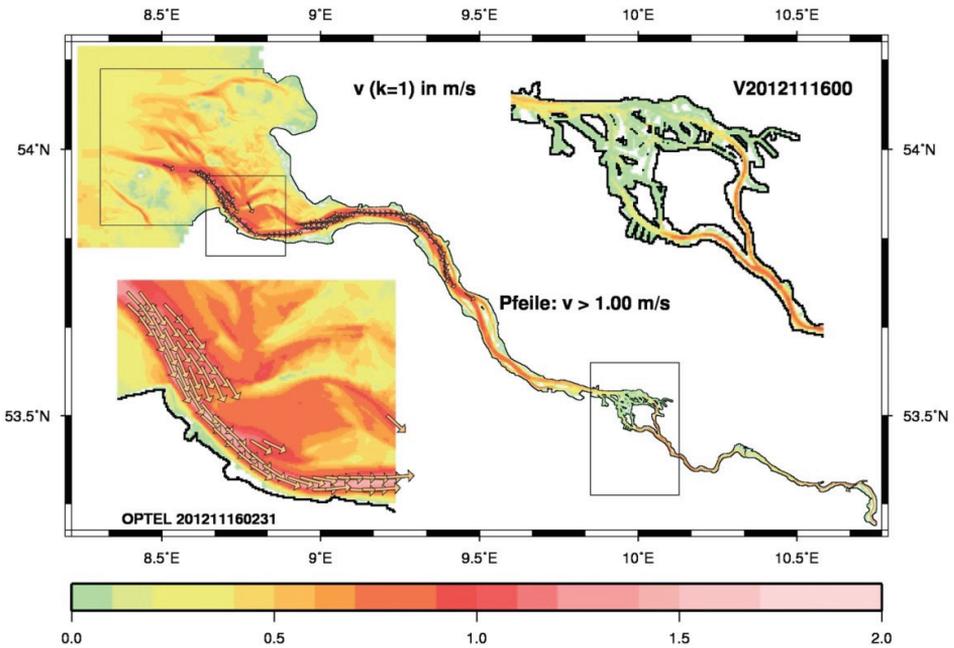


Abbildung 26: Oberflächenströmung [m/s] bei auflaufendem Wasser (16.11.2012, 00:00 UTC, 452 m³/s).

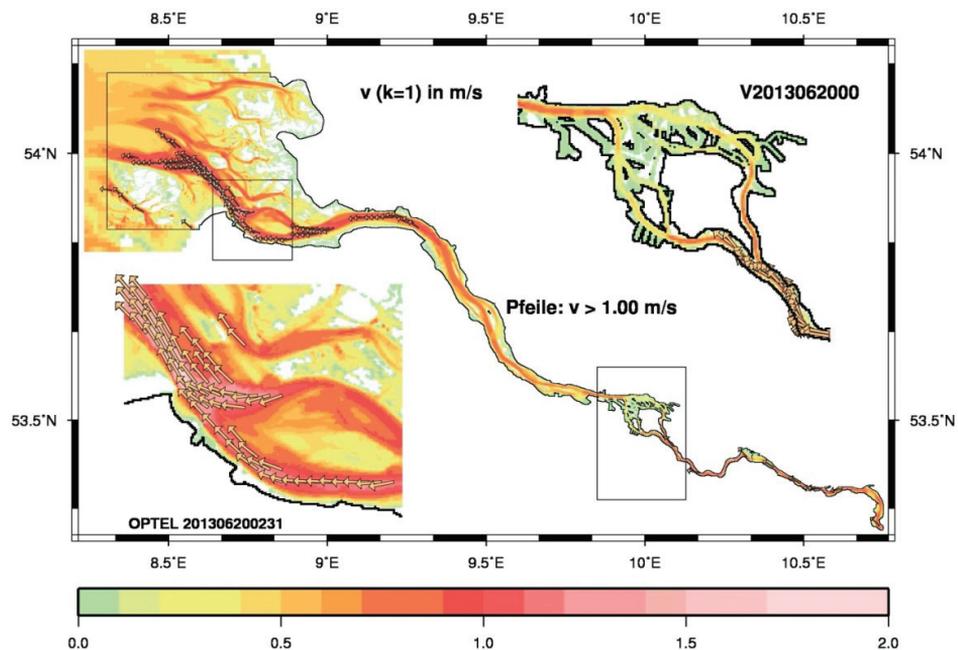


Abbildung 27: Oberflächenströmung [m/s] bei ablaufendem Wasser (20.06.2013, 10:00 UTC, $2870 \text{ m}^3/\text{s}$).

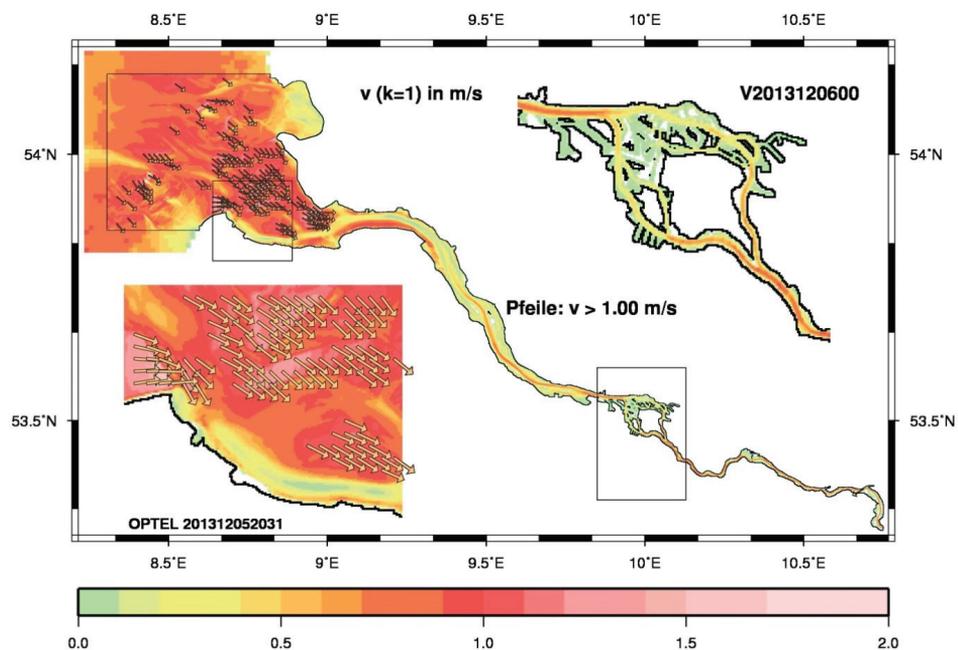


Abbildung 28: Oberflächenströmung [m/s] bei Sturmflut (06.12.2013, 00:00 UTC).

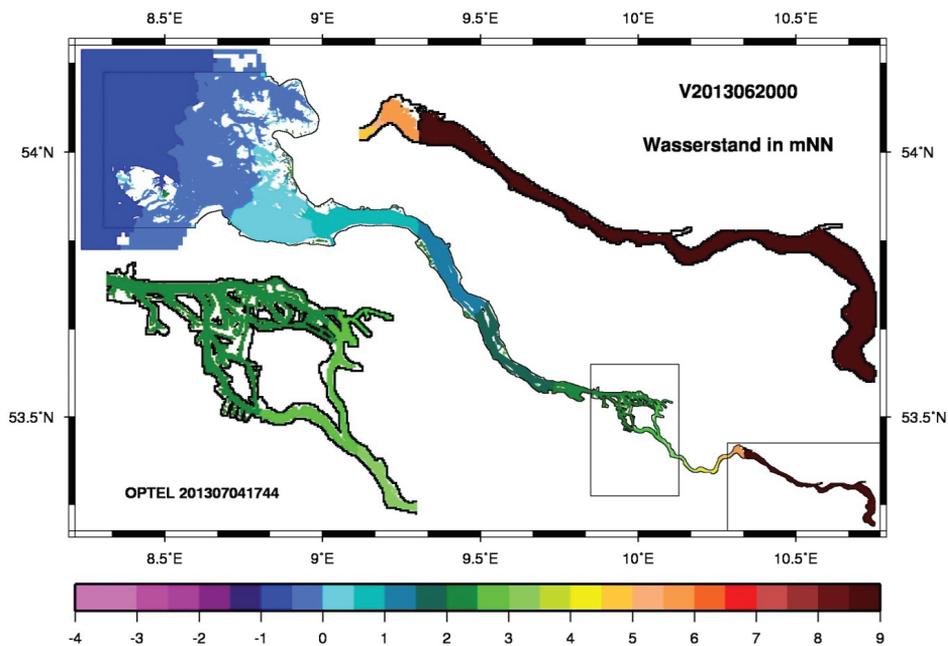


Abbildung 29: Horizontale Verteilung des Wasserstands am 20.06.2013, 00:00 UTC (hohes Oberwasser).

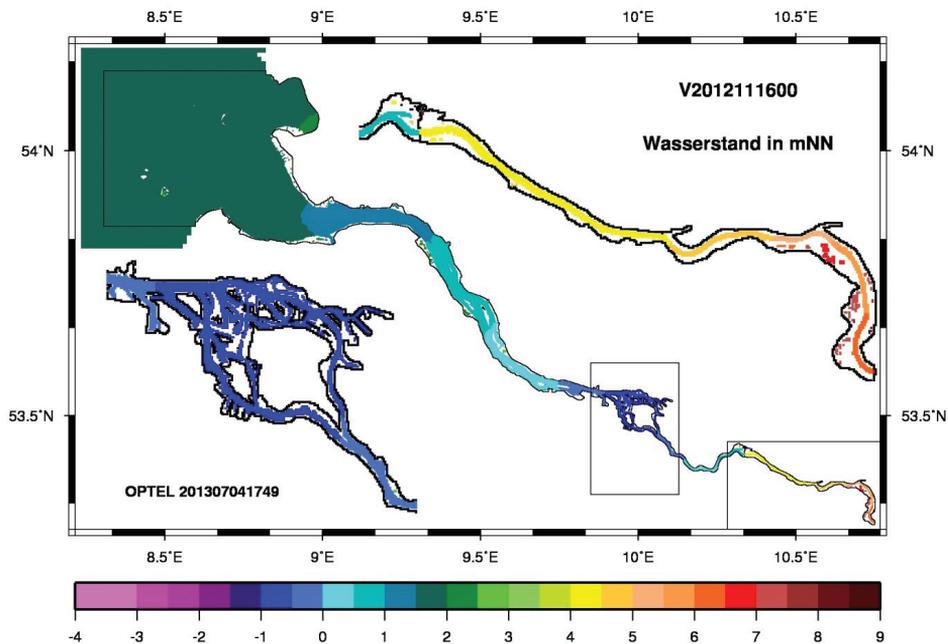


Abbildung 30: Horizontale Verteilung des Wasserstands am 16.11.2012, 00:00 UTC (niedriges Oberwasser).

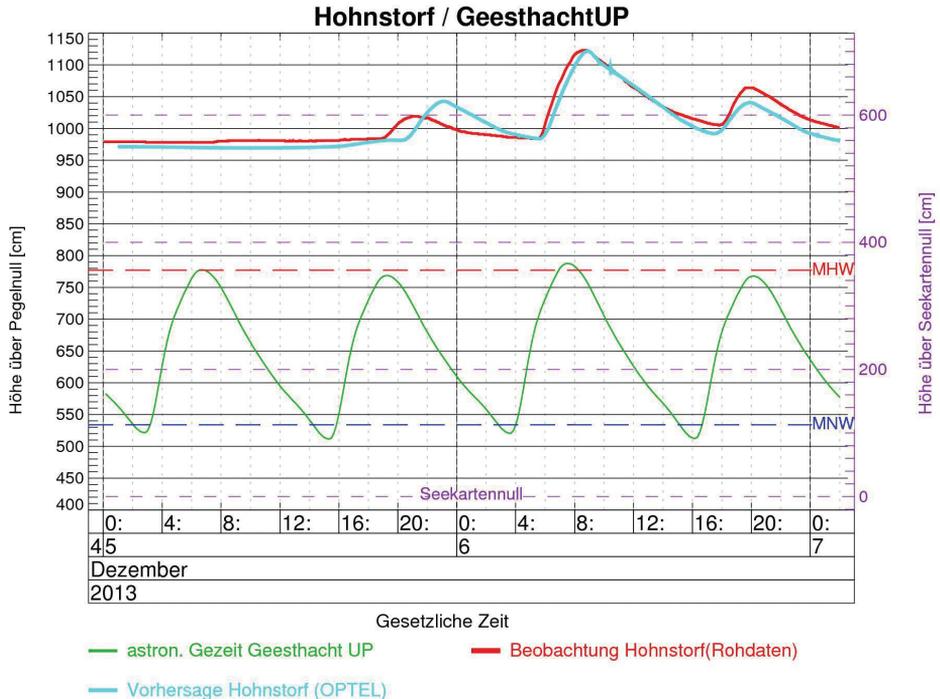


Abbildung 31: Wasserstandsverlauf am Pegel Hohnstorf vom 05.12.2013 bis 07.12.2013.

Aus dem Unterelbmodell abgespeicherte Strömungen wurden punktuell ausgewertet und praxisnah in Form von Gezeitenstromtabellen in die amtlichen Karten für die Sport-schiffahrt „Die Elbe bis Hamburg“ eingearbeitet (ANONYMUS 2011).

Wie in Kap. 4 erläutert, wird im BSH noch intensiv an der Optimierung der Wasserstandsganglinien gearbeitet. Strukturen der horizontalen Verteilung des Wasserstands (Abb. 29 und 30) werden jedoch sinnvoll simuliert.

Auch oberhalb der Staustufe Geesthacht wird der Wasserstand reproduziert; als Beispiel zeigt Abb. 31 die Wasserstandsganglinien für Hohnstorf während der Sturmflut vom 05.12.2013 bis 07.12.2013.

Zur Korrektur der Wasserstandsganglinien im Tidebereich wurde parallel zum Projekt OPTEL das Verfahren Modellausgabestatistik MOS (MÜLLER-NAVARRA und KNÜPFER 2010) in die Wasserstandsvorhersage des BSH integriert (s. auch Kap. 6.2). Die folgenden Abbildungen (32, 33) zeigen exemplarisch Wasserstandsvorhersagen des Modells und von MOS zum gleichen Vorhersagezeitpunkt im Vergleich zu beobachteten Pegelständen.

MOS sagt die Niedrigwasser am Pegel St. Pauli im Gegensatz zur in OPTEL benutzten Variante von BSHmod deutlich besser voraus, während das Modell durch die Berücksichtigung vorhergesagten Oberwassers den Anstieg in Geesthacht besser vorhersagt. Beim nächsten Update der MOS-Verfahren Ende 2013 werden Pegel stromauf einbezogen und damit veränderte Abflussverhältnisse parametrisiert.

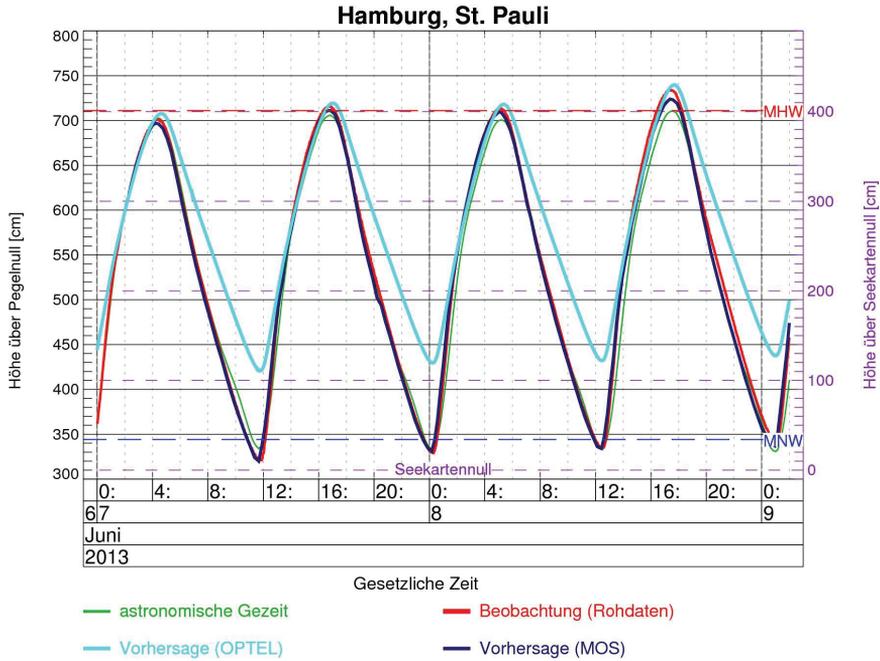


Abbildung 32: Wasserstandsverlauf in St. Pauli am 07.06.2013 und 08.06.2013.

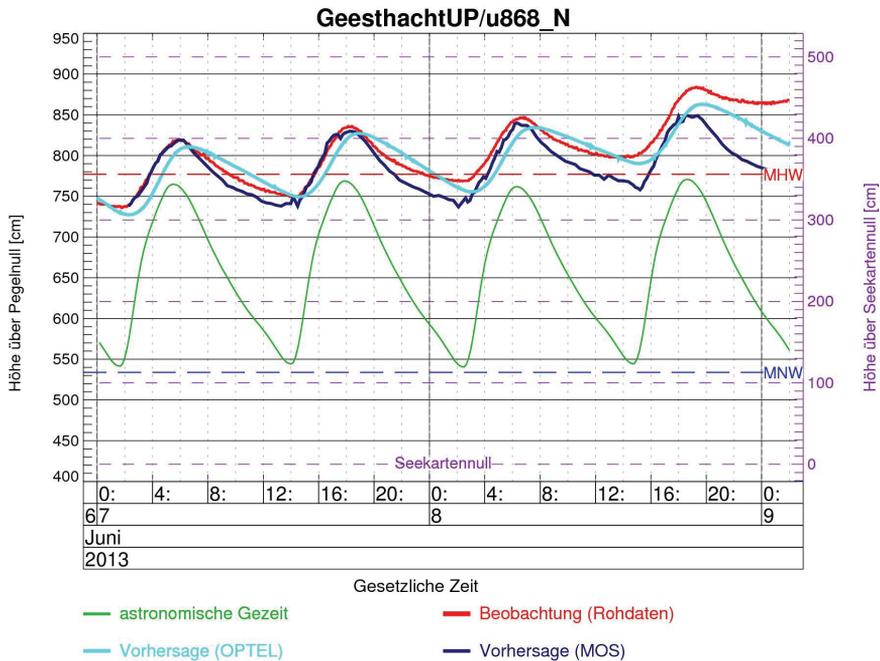


Abbildung 33: Wasserstandsverlauf in Geesthacht am 07.06.2013 und 08.06.2013.

6 Zusammenfassung, Bewertung und Empfehlung

6.1 Modellbetrieb

Das operationelle Modellsystem für Nord- und Ostsee BSHcmod wurde erfolgreich um ein in das Modell der Deutschen Bucht eingebettetes Modellkompartiment der Elbe erweitert (MÜLLER-NAVARRA und BORK 2010; BORK und MÜLLER-NAVARRA 2011). Berücksichtigt werden alle Größen, die auch von BSHcmod vorhergesagt werden. Das sind Strömung, Temperatur, Salzgehalt, Wasserstand und Eisparameter.

Der Dauerbetrieb läuft seit November 2010. Allerdings wurden bis März 2011 noch wesentliche Änderungen vorgenommen. Durch Änderungen im Programmablauf und Programmierung wurde die Rechenzeit für eine Vorhersage deutlich reduziert. Nach Verfahrensänderungen kann auch die Eismodellierung im Dauerbetrieb realisiert werden. Sie verlängert die Vorhersagerechendauer je nach Eisbedeckung aber bis auf das Vierfache.

Am flussseitigen Rand werden die vom LUGV Brandenburg laufend täglich bereitgestellten Wassertemperaturen vorgegeben.

Seeseitig hat sich für alle Größen der Kopplungsalgorithmus aus dem operationellen Betrieb bewährt, nachdem in korrekter Weise berücksichtigt wurde, dass das Modellkompartiment der Deutschen Bucht jetzt sowohl äußeres Kompartiment für die Elbe als auch inneres gegenüber der Nordsee ist. Der Kopplungsmechanismus verwirklicht wie schon zwischen Nordsee und deutscher Bucht eine beidseitige Kopplung. Dadurch werden Artefakte wie Re-Zirkulationen oder Reflexionen am inneren Rand, die bei einseitigen Kopplungsverfahren auftreten und Zirkulation und Salzgehaltsverteilung im gesamten Mündungsgebiet verfälschen, vermieden. Im Hinblick auf die nautischen Anwendungen des Modellsystems ist eine beidseitige Kopplung unverzichtbar.

Qualitativ geben horizontale und vertikale Temperatur-, Salzgehalts- und Strömungsverteilungen ein detailliertes Bild, das bekannten physikalischen Vorstellungen entspricht. Der quantitative Vergleich mit Langzeitmessungen des WSA Cuxhaven hat erst begonnen.

Die in OPTEL-B entwickelten Korrekturen der Windgeschwindigkeit wurden in die Interpolationsroutinen für die Meteorologie integriert, aber nur beispielhaft eingesetzt. Durch diese Korrekturen werden kleinräumige Unterschiede in der Bodenrauigkeit des meteorologischen Modells berücksichtigt, nicht jedoch der Einfluss von baroklinen Effekten, die zu einer Konzentration des Windes parallel zum Fluss führen können. Es wird empfohlen, die Information aus COSMO-DE im operationellen Betrieb zu nutzen und gegebenenfalls dort die ebenfalls die in OPTEL-B entwickelten Korrekturen für COSMO-DE zu verwenden.

Neu werden im Modell jetzt Wehre zugelassen. Das real aus vier Sektoren bestehende Wehr in Geesthacht wird im Modell durch zwei Einzelwehre approximiert. Der Algorithmus wurde an einem künstlichen, kurzzeitig extrem hohen Oberwasser im Zusammenspiel mit einer Sturmflut getestet und arbeitet korrekt. Die vom Modell benötigte Information über die Stellungen der Sektoren wird vom WSA Lauenburg operationell zur Verfügung gestellt, muss aber noch eingefügt werden. Im Modell wird bis zur Realisierung angenommen, dass sich beide Wehre bei einem vorgegebenen Oberwasserdurchfluss vollständig öffnen bzw. schließen.

Zur Verifikation der Wasserstandsvorhersagen stehen ausreichend Pegelmessungen zur Verfügung. Leider sind gerade diese Vorhersagen besonders im Niedrigwasser noch

unbefriedigend (s. Kap. 4.4). Die Modellexperimente während der Projektlaufzeit haben gezeigt, dass dieses Problem grundsätzlicher Art ist und über eine Umformulierung der Impulsgleichung nachgedacht werden muss. Eine kurzfristige Lösung durch Kalibrierung oder dergleichen ist nicht möglich.

Das in OPTEL-A entwickelte Vorhersagemodell läuft auf einem BSH-Server mit einer horizontalen Auflösung von 90 m bei 7 vertikalen Schichten mit einem Zeitschritt von 1,5 s (bzw. 30 s für den baroklinen Teil). An eisfreien Tagen benötigt das Modellsystem (no+ku+el) auf einem Rechner des BSH zur Zeit (2013) 2,5 h für einen Tag Vorhersage. Da die Eissimulation erheblich länger dauert, werden bei gleichbleibenden Ressourcen vorerst nur Vorhersagezeiten von 24 h empfohlen. Nicht alle Optimierungsmöglichkeiten konnten während der Projektlaufzeit ausgeschöpft werden. Es gilt, diese Möglichkeiten zeitnah zu erschließen. Entsprechende Aktivitäten erfolgen am BSH im Rahmen des EU-Projektes MyOcean (DICK 2010). Dann wird auch die prinzipiell unproblematische Berücksichtigung mehrerer Ästuare realisierbar. Im Hinblick auf die möglichen Anwendungen ist ein Vorhersagezeitraum von 48 h anzustreben.

Auf der Internetseite des Projektes (RAPPAARD 2008) werden am Morgen eines jeden Tages Vorhersagen von Wasserstand, Strömung, Salzgehalt, Temperatur und Eisparameter – beispielhaft jeweils für den nachfolgenden Mitternachtstermin – dargestellt. Bis auf weiteres finden sich die Darstellungen auf:

<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Projekte/OPTEL/index.jsp>

6.2 Modellausgabestatistik (MOS)

Wegen bei numerischen Modellsimulationen auftretenden systematischen Fehlern können Modellergebnisse nicht immer direkt verwendet werden. Je nach Anwendung und Vorhersagezeitraum ergeben sich mathematisch-statistische Verbesserungsmöglichkeiten der direkten Modellausgabe (DMO). Eine solche Vorgehensweise wird in der Wetervorhersage schon längere Zeit erfolgreich verwendet und heißt im Englischen „Model Output Statistics“ oder kurz MOS. Für Zwecke der Wasserstandsvorhersage an ausgewählten Orten der Nordseeküste ist das Verfahren bereits erfolgreich adaptiert worden (MÜLLER-NAVARRA und KNÜPFER 2010); als deutscher Begriff wurde Modellausgabestatistik eingeführt.

Zeitgleich mit dem Projekt OPTEL hat das BSH zusammen mit dem Auftragnehmer METEO SERVICE weather research (MSWR) u. a. für die Elbepegel Cuxhaven, Brunsbüttel, Brokdorf, Glückstadt, Schulau, St. Pauli, Zollenspieker und Geesthacht (Unterpegel) ein MOS-Verfahren implementiert, welches 6-Tage-Vorhersagen des Wasserstandes als Ganglinie und seines Fehlererwartungswertes alle 15 Minuten ermöglicht. Ein Parameter des Verfahrens ist der Windstau in Cuxhaven. Als eine der Quellen dafür dient die Stauvorhersage des 2D-Wasserstandsmodellsystems des BSH (BSHsmod), das 4mal täglich auf der Basis von COSMO-EU rechnet. Es gibt nun also eine Kurvenvorhersage zusätzlich zur Scheitelwertvorhersage, was einen deutlichen Fortschritt gegenüber den bisherigen Möglichkeiten darstellt.

Nach ausreichender Laufzeit vom Unterelbmodell – erfahrungsgemäß reichen zunächst 2 Jahre – kann es zusätzlich zum 2D-Modell einen weiteren DMO liefern. Da kurzfristig – wegen der langen Rechenzeiten bzw. unzureichenden Rechnerkapazitäten – das Modellsystem für Nordsee, Ostsee, Küste und Unterelbe nur ausnahmsweise 6-Tage-

Vorhersagen wird liefern können, werden 2D-Nordseemodelle auf lange Zeit unverzichtbar bleiben. Bisher wurde MOS nur für den Wasserstand angewendet, denkbar ist aber auch die Nachbearbeitung anderer Parameter z. B. des Salzgehalts an relevanten Orten.

6.3 Potentielle Einsatzmöglichkeiten des Unterelbmodells

Mögliche Anwendungen des vorgestellten Modellsystems für z. B. Schifffahrt, Katastrophenschutz, Wasserwirtschaft, Industrie, Umweltschutz und Fahrrinnenunterhaltung erfordern jeweils recht unterschiedliche Vorgehensweisen. Hier sollen nun einige Vorschläge gemacht werden, mit welchen Verfahren die Modellergebnisse für die Praxis nutzbar gemacht werden können. Es liegt aber letztlich in der Hand der Nutzer, die Modellergebnisse bestmöglich zu verwerten.

6.3.1 Schifffahrt

Heute werden bereits von Agenten der Reedereien mehrere Tage voraus Hochwasserhöhen beim BSH abgefragt und die Fahrten tiefegehender Seeschiffe entsprechend geplant. Im Revier selbst müssen entlang der Fahrrinne und im Hafen die variablen Wassertiefen berücksichtigt werden. An- und Abfahrtszeiten sowie die Fahrtgeschwindigkeiten werden durch das so genannte Tidefenster eingengt.

Ein operationelles Unterelbmodell wird auch eine Rolle bei den Schiffsmanövern im Hafen spielen. Die Kenterzeiten und Strömungsgeschwindigkeiten sind in der Elbe raumzeitlich sehr variabel, weshalb auch hier ein spezielles Verfahren zur laufenden Korrektur der reinen Modellausgabe empfehlenswert erscheint.

Da in die Elbe einlaufende Schiffe auf dem Weg von der Nordsee nach Hamburg dem Salzgehalt entsprechend tiefer eintauchen, muss dieser bei der Bestimmung der Tidefenster ebenfalls berücksichtigt werden. Die mit dem Modell erzielte Genauigkeit der Salzgebhaltsberechnung entlang der Fahrrinne stromab von Brunsbüttel sollte hierfür genügen. Insgesamt empfehlen die Autoren, das Tidefensterproblem nun mit den beteiligten Einrichtungen und Betroffenen in der Schifffahrt anzugehen. Die nötigen Elemente liegen mit OPTEL nun vor.

6.3.2 Katastrophenschutz

Sturmfluten:

Bislang werden bei Sturmflutwarnungen die zu erwartenden Scheitelwasserstände angegeben (MÜLLER-NAVARRA 2009). Gefordert ist aber zunehmend eine Angabe, wann und an welchen Orten bestimmte Grenzwerte erreicht werden. Diese Angaben lassen sich nun sehr gut generieren. Einerseits kann die MOS-Kurvenvorhersage für Cuxhaven, Brunsbüttel, Brokdorf, Glückstadt, Schulau, St. Pauli, Zollenspieker und Geesthacht (Unterpegel) verwendet werden, andererseits kann mit dem 3D-Unterelbmodell eine dynamische Interpolation vorgenommen werden, um im 90-m-Raster flächendeckend den Ablauf der Sturmflut darzustellen. Für jeden Abschnitt der Küstenschutzanlagen kann dann angegeben werden, wann die Grenzwerte erreicht werden. Eine solche Interpolation ist auch bei meteorologisch wenig beeinflussten Wasserständen möglich.

Der nur bei schweren Sturmfluten wahrnehmbare Einfluss der Nordsee auf die Wasserstände oberhalb der Staustufe Geesthacht wird vom Modell erfasst. Z. B. wurden die drei am 6.12.2013 am Pegel Hohnstorf festgestellten Sturmflutscheitel vom Modell quantitativ und zeitlich gut vorhergesagt.

Elbehochwasser:

Der Bereich der Elbe von der tschechischen Grenze bis Zollenspieker wird vom Wasserstandsvorhersageverfahren WAVOS überdeckt (RADEMACHER 2004). Auch dieses Verfahren benötigt als untere Randbedingung einen vorhergesagten Wasserstand, der nun aus OPTEL und aus der MOS-Kurvenvorhersage für Zollenspieker generiert werden kann.

Während der Projektlaufzeit ist am 5. Februar 2011 ein interessanter Fall aufgetreten, bei dem durch eine kleinere Sturmflut mit 2,2 m ü. MHW am Pegel Zollenspieker auch oberhalb der Staustufe Geesthacht eine Wasserstandserhöhung festzustellen war. Die Segmente der Staustufe Geesthacht waren wegen deutlich erhöhten Oberwassers ($> 2000 \text{ m}^3/\text{s}$) heruntergefahren, und die Sturmflutwelle konnte darüber hinweggehen. Dieser Prozess wurde im Untereilbmodell korrekt abgebildet, was zeigt, dass dieses Modell geeignet ist, für WAVOS eine gute untere Randbedingung zu generieren. Es steht aber noch aus, die Stellungen der Staustufenelemente in das Verfahren operationell einzubinden. Entsprechende Daten werden bereits ins BSH übertragen. Der Fall aus dem Februar 2011 zeigt weiterhin, dass die Kombination Sturmflut und Hochwasserwelle sehr wohl möglich ist und im OPTEL-Modell dynamisch richtig wiedergegeben wird. Da eine derartige Hochwasserwelle die Wasserstände im Tidebereich oberhalb Hamburgs sehr stark beeinflusst, ist hier ein deutlicher Mehrwert für die Wasserstandsvorhersage festzustellen. Empfehlenswert ist, den Überlappungsbereich WAVOS/OPTEL sehr genau zu überprüfen und eine gegenseitige Modellkopplung herbeizuführen. Das Elbehochwasser 2013 (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2013) hat zudem gezeigt, dass das für das OPTEL-Modell erforderliche Oberwasser als Vorhersage benötigt wird. Auch für die beiden mit dem MOS-Verfahren vorhergesagten Orte Zollenspieker und Geesthacht-Unterpegel sind bei extremen Abflüssen aktuelle Wasserstandsdaten von Pegeln stromauf wichtig und werden seit Ende 2013 auch berücksichtigt.

6.3.3 Wasserwirtschaft

Entwässerung:

Wie bereits ausgeführt, ist nach einer längeren Modellaufzeit vorgesehen, durch MOS in Kombination mit OPTEL Wasserstandsvorhersagen in der Fläche zu ermöglichen. Damit können für die örtliche Entwässerung auch die Sielzugzeiten abgeschätzt werden. Im Grunde ist es ein ähnliches Problem wie die Tidenfensterproblematik der Schifffahrt, die Entwässerungsleistung bestimmt sich jedoch auch über das Gefälle zwischen Entwässerungskanal und Elbe (ZILLICH 1977).

Bewässerung:

Das aus dem Brackwasserbereich für landwirtschaftliche Zwecke entnommene Elbwasser kann ungünstige Salzgehalte aufweisen. Deshalb ist eine genaue Kenntnis und Vorhersage der Lage dieser Brackwasserzone von großer Bedeutung. Die Modellergebnisse aus dem Betrieb haben gezeigt, dass horizontale Gradienten und vertikale Schichtung realistisch abgebildet sind, so dass mit einer Salzgehaltsmessstation in der Brackwasserzone in

Verbindung mit dem Modell eine zuverlässige Vorhersage zum örtlichen Salzgehalt ermöglicht werden könnte. Da die Lage der Brackwasserzone ein wissenschaftlich umstrittenes Thema ist, kommt der Verifikation der Salzgehaltswerte durch Langzeitmessungen eine besondere Bedeutung zu.

6.3.4 Industrie, Kraftwerke

Industrie und Kraftwerke entnehmen Kühlwasser zur Aufnahme überschüssiger Prozesswärme und leiten das erwärmte Wasser wieder ein (KUHNS 1972). Dieser Vorgang ist wegen gewässerökologischer Belange stark reglementiert (WÄRMELASTPLAN TIDEELBE 2008). So darf nach Einleitung das Wasser durch Großemittenten nicht wärmer als 28°C sein und die Aufwärmspanne darf 3°C nicht überschreiten. Wegen der grundsätzlich komplexen Gezeitenstromverhältnisse in der Unterelbe und zusätzlicher Bedingungen für die örtliche Sauerstoffkonzentration kommt es im Hochsommer gelegentlich zu Situationen, bei denen eine weitere Einleitung von Kühlwasser nicht mehr statthaft ist. Die Entwicklung der Wassertemperatur an der Entnahmestelle kann vom Unterelbmodell recht gut vorhergesagt werden, aber auch hier müssen aktuelle Messdaten mit den vorhergesagten Modelltemperaturen verknüpft werden, um zuverlässige Aussagen zu gewährleisten.

6.3.5 Umweltschutz

In der Vergangenheit hat es bereits Fälle gegeben, bei denen nach Störfällen in Industrieanlagen Schadstoffe in Flüsse geraten sind und sich danach mit dem Flusswasser ausbreiten haben (Rhein, Sandoz-Unfall 1986). Die zeitliche Entwicklung der Schadstoffkonzentration konnte nicht zuverlässig vorhergesagt werden. Letztlich geht das auch nur mit einem numerischen Modellsystem. Das beim BSH bestehende Drift- und Ausbreitungsmodell (DICK und SOETJE 1990) muss dazu um das interaktiv gekoppelte Elbmodellgebiet ergänzt werden. Das Verfahren hat sich bereits vielfach bewährt, und grundsätzliche Probleme sind bei der Erweiterung nicht zu erwarten.

6.3.6 Unterhaltungsbaggerung

Kernproblem bei der Unterhaltungsbaggerung ist die Abschätzung, wo sich entnommenes Material nach der Verklappung wieder absetzen wird. Schon der natürliche Sedimenttransport ist in seinen Langzeittendenzen nur schwer vorherzusehen (DÜCKER et al. 2006). Mit den beiden Unterelbmodellen der BAW und des BSH ergibt sich nun die Möglichkeit, diese Materialverlagerungen anhand der berechneten Strömungen besser abzuschätzen. Ein Sedimenttransportmodell auf der Basis der im operationellen Betrieb laufend abgespeicherten Strömungen könnte hier Abhilfe schaffen. Allerdings sind auch hier die Modellergebnisse unkorrigiert noch nicht zuverlässig genug, da es auf die Geschwindigkeitsspitzen ankommt, die in der Elbe meist mit dem Beginn der Flutphase auftreten. Erst wenn dieses grundlegende Problem beseitigt ist, kann OPTTEL für Sedimentmanagementfragen zurate gezogen werden.

7 Danksagung

Das Verbundprojekt OPTEL wurde auf Vorschlag des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMBF) gefördert. Der Projektkoordinator dankt Dr. N. Blum vom Projektträger Jülich des BMBF für die Unterstützung bei der Projektbeantragung und -organisation. Ein weiterer Dank geht an die Projektbegleitende Gruppe des KFKI unter Leitung von F. Thorenz (NLWKN), der wir – die Teilprojektleiter und die Projektmitarbeiter – sehr viele substantielle Diskussionen zu verdanken haben.

Ohne Herrn Dr. Kleine (BSH) wäre das Projekt gar nicht möglich gewesen, denn er schuf in den vergangenen zwei Jahrzehnten die wesentlichen wissenschaftlichen Grundlagen der BSH-Modellverfahren und hat auch deren numerische Umsetzung bewerkstelligt. Herrn H. Komo danken wir für Hilfestellungen auf der Betriebssystemebene. Für wertvolle hydrologische Hinweise zur Elbe oberhalb der Staustufe Geesthacht danken wir besonders Fr. S. Rademacher (BFG) und Fr. U. Behnken (LLUR). Dem LUGV sei gedankt für die laufende Übertragung der Wassertemperatur von der Messstation Cumlosen, die als obere Randbedingung benötigt wird. Dem WSA Cuxhaven danken wir für die Bereitstellung der Daten der Langzeitmessstationen für Strömungen, Salzgehalt und Temperatur für Zwecke der Verifikation. Dem Dezernat Regionales Management der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Ost und dem WSA Lauenburg danken wir für die operationelle Bereitstellung der aktuellen Stellungen der vier Sektoren der Staustufe Geesthacht.

8 Schriftenverzeichnis

- ANONYMUS: Klein- und Sportschifffahrtskarte 3010. Die Elbe bis Hamburg. 13 Kartenblätter. 2011.
- BERG, P. and POULSEN, J. W.: Implementation details for HBM. Danish Meteorological Institute, Technical Report 12-11, 147 pp, 2012.
- BORK, I. und MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHmod für die Nord- und Ostsee (OPTEL-A). BSH, Hamburg und Rostock ,75 S., 2011.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE: Gezeitentafeln – Europäische Gewässer 2011. Hamburg, 2010.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE: Eisbericht Nr. 9 vom 28.01.2013.
- BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE: Beschreibung des Eiswinters 2012/13, Eisdienst 28.06.2013.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, DEUTSCHER WETTERDIENST: Das Juni-Hochwasser des Jahres 2013 in Deutschland. BfG-1793, 59 S., 2013.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Mathematical model UnTRIM - validation document. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg 78 S., 2004.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport. BAW-Nr. A3955 03 10062 Umweltverträglichkeitsuntersuchung, Teilgutachten H.1 Hydrologie und Morphologie. 106 S., 2006.

- CASULLI, V. and WALTERS, R. A.: An unstructured, three – dimensional model based on the shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 32, 331-348, 2000.
- CAILLEAU, S.; FEDORENKO, V.; BARNIER, B.; BLAYO, E. and DEBREU, L.: Comparison of different numerical methods used to handle the open boundary of a regional ocean circulation model of the Bay of Biscay. *Ocean Modelling* 25, 1-16, 2008.
- DEUTSCHES GEWÄSSERKUNDLICHES JAHRBUCH: Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe bis Havelmündung, 2008 (1.11.2006-31.12.2007). Hamburg, 178 S., 2011.
- DICK, S. und SOETJE, K. C.: Ein operationelles Ölabbreitungsmodell für die Deutsche Bucht. *Dt. hydrogr. Z., Ergh. A*, 16, 43 S., 1990.
- DICK, S.: MyOcean – Ein Projekt zum Aufbau europäischer mariner Basisdienste. *KFKI-aktuell* 2/2010, 11-12.
- DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; KLEIN, H. and KOMO, H.: The operational circulation model of BSH (BSHmod) – Model description and validation. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 29, 49, 2001.
- DICK, S.; KLEINE, E. and JANSSEN, F.: A new operational circulation model for the North Sea and the Baltic using a novel vertical co-ordinate – setup and first results. In: DAHLIN, H.; BELL, M. J.; FLEMMING, N. C. and PETERSSON, S. E. (Ed.): *Coastal to Global Operational Oceanography: Achievements and Challenges*. 225-231, 2010.
- DÜCKER, H. P.; GLINDEMANN, H.; THODE, K. und WITTE, H.-H.: Konzept für eine nachhaltige Entwicklung der Tideelbe als Lebensader der Metropolregion Hamburg. Ein Diskussionsbeitrag der Hamburg Port Authority und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Hamburg, 18 S., 2006.
- DUWE, K.: Modellierung der Brackwasserdynamik eines Tideästuars am Beispiel der Unterelbe. *Diss. Univ. Hamburg*, 184 S., 1988.
- FUNKQUIST, L. and KLEINE, E.: An Introduction to HIROMB, an operational baroclinic model of the Baltic Sea. *SMHI Report Oceanography* 37, 36 pp., 2007.
- GANSKE, A. and ROSENHAGEN, G.: Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tideelbe. *DWD*, 32 S., 2010.
- GÖNNERT, G.; ISERT, K.; GIESE, H. und PLÜß, A.: Charakterisierung der Tidekurve. *Die Küste*, 68, 99-143, 2004.
- HENSEN, W.: Stromregelungen, Hafengebauten, Sturmfluten in der Elbe und ihr Einfluß auf den Tideablauf. *Festschr. 30. Dt. Geographentag*, Hirt, Kiel, 60-94, 1955.
- HÜBBE, H.: Fünf Abhandlungen über das Fahrwasser der Unter-Elbe. Hamburg, Nestler und Melle, 76 S., 1854.
- KLEINE, E.: Die Konzeption eines numerischen Verfahrens für die Advektionsgleichung – Literaturübersicht und Details der Methode im operationellen Modell des BSH für Nordsee und Ostsee. *BSH Hamburg*, 106 S., 1993.
- KLEINE, E.: Das operationelle Modell des BSH für Nordsee und Ostsee – Konzeption und Übersicht. *BSH Hamburg*, 126 S., 1994.
- KLEINE, E.: A class of hybrid vertical coordinates for ocean circulation modelling. *Proc. 6th HIROMB Scientific. Workshop*, St. Petersburg 2003, 7-15, 2004.
- KLEINE, E.: A phenomenological model of the mechanics of sea ice. http://www.boos.org/fileadmin/user_upload/AnnualMeetings/Kopenhagen_2010/Ice_mod_HIBOO.pdf, 22.12.2013.

- KREMP, C.; RUDOLPH, E. und SEHILI, A.: OPTEL-C. Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee (OPTEL-C). *Die Küste*, 79, 2012.
- KUHN, W.: Physikalisch-meteorologische Überlegungen zur Nutzung von Gewässern für Kühlzwecke. *Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A*, 21, 95-122, 1972.
- LAMB, H.: *Hydrodynamics*. Cambridge, 738 S., 1932.
- LUCHT, F.: Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone der Elbe. *Dt. Hydrogr. Z.* 6, 18-32, 1953.
- MARSHALL, J.; HILL, C.; PERELMAN, L. and ADCROFT, A. : Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling. *J. Geophys. R.* 102, No. C3, 5733-5752, 1997.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Implementation of the equilibrium tide in a shelf sea model. *Environmental and Chemical Physics* 24, 127-132, 2002.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Sturmfluten in der Elbe und deren Vorhersage im Wandel der Zeiten. In: OHLIG, C.: *Hamburg – die Elbe und das Wasser sowie weitere wasserhistorische Beiträge*. Schriften der DWhG 13, 77-95, 2009.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Gezeitenvorausrechnungen mit der Harmonischen Darstellung der Ungleichheiten. [Mit englischer Übersetzung: On Tidal Predictions by Means of Harmonic Representation of Inequalities]. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 50. 29 S., 2013.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; BORK, I.; JENSEN, J.; KOZIAR, CH.; MUDERSBACH, CH.; MÜLLER, A. und RUDOLPH, E.: Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. *Hansa* 143, 12/06, 72-88, 2006.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and BORK, I.: Development of an operational Elbe tidal estuary model. In: MCKEE SMITH, J. and LYNETT, P. J. (Ed.) *Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering ICCE 2010, Shanghai, China, 2010*.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and KNÜPFER, K.: Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS) – Part I (Skew surge forecast). *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 47. 22 pp., 2010.
- NEEDLER, G.T. and LEBLOND, P.H.: On the influence of the horizontal component of the earth's rotation on long period waves. *Geophysical Fluid Dynamics* 5, 23-45, 1973.
- NIES, H.; GAUL, H.; OESTEREICH, F.; ALBRECHT, H.; SCHMOLKE, S.; THEOBALD, N.; BECKER, G.; SCHULZ, A.; FROHSE, A.; DICK, S.; MÜLLER-NAVARRA, S. H. und HERKLOTZ, K.: Die Auswirkungen des Elbehochwassers vom August 2002 auf die Deutsche Bucht. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie* 32, 81 S., 2003.
- OELLERICH, J.; DÜCKER, H. P.; WITTE, H. H. und OSTERWALD, J.: Fahrrienenanpassung von Unter- und Außenelbe. *Hansa* 143/5, 67-71, 2006.
- PICHLER, H.: *Dynamik der Atmosphäre*. Mannheim-Wien-Zürich. 456 S., 1984.
- PRANDLE, D.: *Estuaries. Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology*. Cambridge, 236 S., 2009.
- RADEMACHER, S.: Das Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS im Oder- und Elbegebiet. *BfG Veranstaltungen* 6/2004, 64-74, 2004.
- RAPPARD, P. V.: Darstellung von Modellsimulationen der Tideelbe auf Karten und als Web-Applikation. *Diplomarbeit Univ. Karlsruhe (FH)*. 67 S., 2008.

- REICHS-MARINEAMT: Gezeitentafeln für das Jahr 1913. 312 S., Berlin, 1912.
- ROHDE, H.: Eine Studie über die Entwicklung der Elbe als Schifffahrtsstraße. Mitt. Franzius-Inst. TU Hannover 36,17-241, 1971.
- RUDOLPH, E.: Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe. *promet* 31, 186-190, 2005.
- SAVENIJE, H. H. G.; TOFFOLON, M.; HAAS, J. and VELING, E. J. M.: Analytical description of tidal dynamics in convergent estuaries. *J. Geophys. Res.* 113, C10025, doi: 10.1029/2007JC004408, 2008.
- SMILE CONUSLT GMBH: Präprozessor Janet. Erste Schritte. Einführung in Janet 2.5. (Stand 03.12.2008). Hannover, 51 S., 2008.
- SMITH, S. D. and BANKE, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. R. Met. Soc.* 101, 665-673, 1975.
- SOETJE, K. C. and BROCKMANN, C.: An operational numerical model of the North Sea and the German Bight. In: SÜNDERMANN, J. and LENZ, W. (Ed.) *North Sea Dynamics*. 95-107, 1983.
- STAATLICHES AMT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT WESTMECKLENBURG: Dokumentation Elbehochwasser Januar 2011, Teil 1, Meteorologische Situation und Hydrologischer Verlauf des Hochwassers, 20 S., 2011.
- STROTMANN, T.; RADEGAST, C. und FERK, U.: OPTEL-D – Studien zur Stauentwicklung in der Tideelbe. Abschlussbericht. Hamburg Port Authority, 2011.
- WÄRMELASTPLAN FÜR DIE TIDEELBE, Sonderaufgabenbereich Tideelbe der Länder Hamburg – Niedersachsen – Schleswig-Holstein mit Wassergütestelle Elbe. 15 S., 2008.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION OST: Staustufe Geesthacht, Stand Juni 1996. 7 S., 1996.
- ZILLICH, G.: Ermittlung der Abflußganglinie aus der Wasserstandsganglinie an beliebigen Querschnitten in tidebeeinflussten Gewässern. *Mitteilungen Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie, und landwirtschaftlichen Wasserbau der Technischen Universität Hannover* 40, 159-329, 1977.