

# AUFBAU UND KALIBRIERUNG EINES 3D-HYDRODYNAMISCHEN ÄSTUARMODELLS ZUR ABBILDUNG DER SALZINTRUSION IN TIDEBEEINFLUSSTEN GEWÄSSERN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON KLIMASZENARIEN

von

Anna Zorndt<sup>1</sup>  
Andreas Wurpts<sup>2</sup>  
Torsten Schlurmann<sup>3</sup>

## ABSTRACT

Regarding the expected climate changes in the near future, the question arises in which way these global changes will impact the coastal systems and what measurements can be taken to ensure the future well-being of the affected regions. In Lower Saxony, where this regards settlements of 6.600 km<sup>2</sup> with a population of 1.2 millions, the Ministry for Science and Culture has launched an interdisciplinary research program (KLIFF) in order to build up a broad data base containing information about impacts of climate change on a regional basis. As part of this research program, this study focuses on the Weser Estuary.

The overall objective of this working package is accounting for the impact of climate change on the salt water intrusion into the Weser Estuary and on the hydrology of adjacent tidally influenced water bodies as well as the ground water. Furthermore, it aims at enlarging the understanding of this dynamic system by coupling 3D hydrodynamic free surface modeling with a river catchment model and a groundwater model both run by project partners<sup>5,6</sup>.

A 3D hydrodynamic free surface model is set up to investigate possible effects of climate change on the salinity in the Weser Estuary. The employed solver is especially dedicated to cross-scale modeling of complex hydrodynamic systems of rivers extending into the estuary and the shelf on the basis of the 3D shallow water equations. The discretization is based on a finite element framework combined with an Euler-Lagrange advection formulation and hybrid coordinates in the vertical. This allows a high grade of flexibility compared to uniform grids. The model solves the equations with semi-implicit schemes, which enable larger time steps.

In the first phase of the study which is presented here, a triangular finite element mesh has been build up with a resolution increasing from O(1 m) in the upper parts of the estuary to O(100 m) in the German Bight and first calibration runs have been made.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [zorndt@fi.uni-hannover.de](mailto:zorndt@fi.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Dr.-Ing., Forschungsstelle Küste, Nds. Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, An der Mühle 5, 26548 Norderney, [andreas.wurpts@nlwkn-ny.niedersachsen.de](mailto:andreas.wurpts@nlwkn-ny.niedersachsen.de)

<sup>3</sup> Prof. Dr.-Ing. habil., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [schlurmann@fi.uni-hannover.de](mailto:schlurmann@fi.uni-hannover.de)

## **1. EINLEITUNG**

Die zukünftigen durch den Klimawandel hervorgerufenen Veränderungen in Temperatur- und Niederschlagsmustern sowie erhöhte Meeresspiegel werden vielfältige Folgen haben, die auf regionaler Ebene bislang kaum untersucht sind. Vom Land Niedersachsen wurde daher das Forschungsvorhaben KLIFF - Klimafolgenforschung in Niedersachsen ins Leben gerufen. In einem Verbund von Universitäten, Forschungseinrichtungen und Behörden werden die Auswirkungen der Klimaänderungen auf Landwirtschaft, Ökologie, Wirtschaft und den Menschen für die Zeithorizonte 2030, 2070 und 2100 untersucht. Im Fokus des Forschungsthemas 7 des Verbundes<sup>4</sup> stehen die Auswirkungen von Klimaänderungsszenarien im Küstengebiet Niedersachsens. Das darin eingebettete Teilprojekt 5 mit dem Titel „Salzwassereintrag in die Unterweser und Wasserhaushalt angrenzender tidebeeinflusster Gewässer“ beschäftigt sich dabei mit der Analyse von Wasserhaushalt, Grundwasserdynamik sowie Strömungs- und Transportverhalten unter spezieller Berücksichtigung der Salz- und Süßwasser-Interaktionen.

Hierfür sollen mit Hilfe eines 3D hydrodynamisch-numerischen Oberflächengewässer-Modells die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Salzgehalte im Ästuar berechnet werden. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern werden diese Ergebnisse mit den Berechnungen aus einem Grundwassermodell<sup>5</sup> und einem Wasserhaushaltsmodell<sup>6</sup> zusammengeführt. Auf dieser Basis erfolgt die Entwicklung von Anpassungsoptionen für die Region.

In diesem Beitrag wird die Methodik von Aufbau und Kalibrierung des 3D hydrodynamisch-numerischen Modells aufgezeigt. Erste Ergebnisse von Modellrechnungen werden präsentiert. Zur Schilderung des Rahmens der hier vorgestellten Arbeit wird in Kapitel 2 zunächst eine Übersicht über das oben genannte Forschungsvorhaben von Teilprojekt 5 des Forschungsverbundes gegeben. In Kapitel 3 wird vertieft auf die speziellen Eigenschaften des für die Berechnung gewählten Modellsystems eingegangen. Im folgenden Kapitel 4 erfolgt eine Beschreibung des zur Berechnung verwendeten Modellgebietes und Berechnungsnetzes. Erste Berechnungsergebnisse werden in Kapitel 5 vorgestellt.

## **2. INTEGRIERTE SIMULATION DES UNTERWESER-EINZUGSGEBIETES UND ÄSTUARS UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON KLIMASZENARIEN**

### **2.1 Forschungsverbund und Synergien**

Im Fokus des Teilprojektes 5 mit dem Titel „Salzwassereintrag in die Unterweser und Wasserhaushalt angrenzender tidebeeinflusster Gewässer“ steht die Untersuchung von Klimaveränderungen auf Wasserhaushalt, Grundwasserdynamik sowie Strömungs- und Transportverhalten unter spezieller Berücksichtigung der Salz- und Süßwasser-Interaktionen. Für eine integrierte Betrachtung der Auswirkungen von Klimawandeländerungen auf das gesamte Wasserhaushaltssystem werden hierfür drei Modellansätze miteinander kombiniert, die Grundwassermodellierung<sup>5</sup> (GWM), die Wasserhaushaltsmodellierung<sup>6</sup> (WHM) und die Oberflächengewässermodellierung. Neben der in diesem Beitrag näher dargestellten

---

<sup>4</sup> KLIFF Forschungsthema 7, "Veränderliches Küstenklima – Evaluierung von Anpassungsstrategien im Küstenschutz (A-KÜST)". Leitung: Dipl.-Ing. Niemeyer, Forschungsstelle Küste im Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz

<sup>5</sup> Prof. Ptak, Dr. Herold, Institut für Angewandte Geologie Göttingen

<sup>6</sup> Prof. Meon, Dr.-Ing. Riedel, Dipl.-Geoökol. Kreye, Leichtweiß-Institut Braunschweig

Oberflächengewässermodellierung werden die weiteren Modellansätze und die Zusammenführung in diesem Kapitel kurz beschrieben.

### **2.1.1 Oberflächengewässermodellierung**

Das am Franzius-Institut angesiedelte Teilprojekt hat das Ziel mit Hilfe eines 3D hydrodynamisch-numerischen Oberflächengewässer-Modells die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Salzgehalte im Weserästuar zu berechnen. Die berechneten geänderten Wasserstände und Salzgehalte sollen den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden als Eingangs- und Abgleichwerte für die Berechnung der Grundwasserströmungen und des Wasserhaushaltsmodells. Schlussendlich soll eine Prognose der Auswirkungen von Klimaänderungen, sowie Ermittlung, Analyse und Bewertung der Deichsicherheit und Bauwerkstabilität erfolgen.

In den Kapiteln 3, 4 und 5 erfolgt eine ausführliche Schilderung von Methodik und bisherigen Ergebnissen.

### **2.1.2 Wasserhaushaltsmodellierung**

Mit Hilfe eines WHM<sup>6</sup> erfolgt die hydrologische Langzeitsimulationen des Wasserhaushalts im Einzugsgebiet der Unterweser. Das Modellgebiet umfasst eine Gesamtfläche von ca. 7000 km<sup>2</sup> und ist in insgesamt 626 unregelmäßige Teileinzugsgebiete untergliedert, welche wiederum in Flächen mit gleichen hydrologischen Eigenschaften (Hydrotope) aufgeteilt sind, die im Allgemeinen lageunabhängig und nichtzusammenhängend sind. Die Simulationen des komplexen Wasserhaushalts erfolgt mit dem hydrologischen Modellsystem PANTA RHEI (Kreye, 2010), welches die wesentlichen Teilprozesse des Wasserhaushaltes mit physikalischen und physikalisch basierten Ansätzen berücksichtigt.

Kalibrierung und Validierung erfolgen auf Grundlage von historischen Klimarandbedingungen sowie Pegeldaten. Es wird erwartet, dass die Belastung mit Klimaszenarien zu flächendeckenden Aussagen über die zukünftige Entwicklung bzw. Veränderung wichtiger agrarökologischer und bodenhydraulischer Variablen wie beispielsweise der Bodenfeuchte und Grundwasserneubildung führt.

### **2.1.3 Grundwassermodellierung**

Weiterhin erfolgt eine Untersuchung und Quantifizierung von Reaktionen und Wechselwirkungen des gekoppelten Systems Boden-Grundwasserleiter-Vorfluter-Küstengewässer unter spezieller Berücksichtigung der unterschiedlichen Salzkonzentrationen im Weserästuar bei veränderten hydraulischen und hydrologischen Randbedingungen als Folge der Klimaänderung<sup>5</sup>. Dies geschieht in einer Zusammenführung von experimentellen und modelltechnischen Ansätzen, um die maßgeblichen Größen durch Messung und Simulation zu identifizieren. Auf dieser Grundlage sollen Prognoseberechnungen im Hinblick auf Süßwasserverfügbarkeit, Wasserqualität und Lage der Salzwasser-Süßwasser-Grenzschicht im Untergrund auf der Einzugsgebietsskala ermöglicht werden (Herold et al., 2010). Verwendet wird hierfür das Modellwerkzeug HYDROGEOSPHERE (Therrien et al., 2008).

Mit Hilfe eines 2D-Modells nördlich von Bremerhaven wurden bereits standortbezogene prozessorientierte numerische Parameterstudien in Form von Szenariomodellierung und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hiermit konnten die Salzwasser- und Süßwasserdynamik

steuernde Parameter und Größen identifiziert sowie die Reaktion des Systems Grundwasserleiter-Vorfluter-Küstengewässer auf veränderte hydraulische und hydrologische Randbedingungen charakterisiert werden.

Die Ergebnisse zeigen unter anderem, dass die hydraulische Leitfähigkeit des Grundwasserleiters den geringsten Einfluss auf die Salzwasserintrusion ins Grundwasser hat, während der Grundwasserzustrom, Änderungen der Salzwasserdichte und Meeresspiegeländerungen einen weitaus höheren Einfluss besitzen. Weniger starke Auswirkungen zeigten Änderungen des Tidehubs oder Extremsturmfluten (Yang, 2010).

Um diese Prozesse auch dreidimensional simulieren und verstehen zu können, erfolgt die Entwicklung eines 3D-Modells. Weiterhin ist der Einsatz von innovativen Geländemessungen (direct-push Verfahren) zur Charakterisierung der Grundwasserdynamik und Bestimmung der Lage der Salzwasser-Süßwasser-Grenzschicht in Planung.

#### **2.1.4 Synergien**

Das Wasserhaushaltsmodell und das 3D-Grundwasser-Modell haben die gleichen flächigen Ausmaße. Hierdurch kann ein Austausch der Berechnungsgrößen der Grundwasserneubildung erfolgen. Das in diesem Beitrag näher beschriebene Oberflächengewässermodell überschneidet sich mit dem Grundwassermodell entlang der Küstenlinie, so dass hiermit berechnete Wasserspiegel und Salzgehalte an das Grundwassermodell übergeben werden können. Die Überschneidung des hydrodynamisch-numerischen Modells mit dem Wasserhaushaltsmodell ermöglicht eine Übergabe von Fließrandbedingungen der Nebengewässerzuflüsse in die Weser vom Wasserhaushaltsmodell.

### **2.2 Berücksichtigung von Klimaszenarien**

Das Ziel des Projektes ist die Untersuchung von geänderten Klimarandbedingungen auf die oben beschriebene Dynamik. Die Hauptantriebsgrößen des GWM und des WHM sind Niederschlag und Temperatur. Nach der Kalibrierung der Modelle für einen Vierzigjährigen Zeitraum soll eine Berechnung unter verschiedenen Klimaszenarien erfolgen.

Die im Forschungsbund KLIFF verwendeten Klimarandbedingungen werden innerhalb des Querschnittsthemas 1 berechnet<sup>7</sup>. Grundlage dieser Berechnungen sind die mit dem globalen Klimamodell ECHAM5/MPI-OM (Jungclaus et al., 2006) unter bestimmten Annahmen berechneten weltweiten Änderungen des Klimas. Zu den Annahmen zählen unter anderem verschiedene Szenarien für die weitere Entwicklung der Treibhausgasemission (IPCC, 2007), von denen die Szenarien A1B, B1 und A2 im Fokus der Berechnungen stehen (siehe Abbildung 1).

---

<sup>7</sup> KLIFF Querschnittsthema 1, "Regionale Klimaprojektionen". Sprecher: Prof. Dr. Lohmann, Alfred-Wegener-Institut für Polar und Meeresforschung.

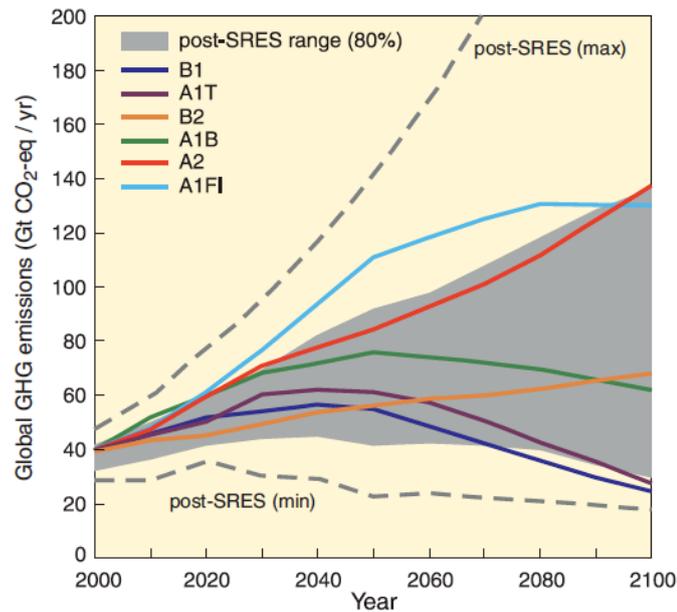


Abbildung 1: Globale Treibhausgasemission pro Jahr ohne Berücksichtigung von Gegenmaßnahmen, farbig dargestellt sechs Szenarien, grau der 80 %-Bereich der letzten veröffentlichten Szenarien und grau gestrichelt der gesamte Wertebereich (IPCC, 2007).

Die so mit dem Atmosphäre und Ozean abdeckenden globalen Klimamodell berechneten Ergebnisse werden zum Antrieb regionalisierter Modelle verwendet (Nesting). Unter Berücksichtigung lokaler Geländedaten können so Ergebnisse in feinerer Auflösung im Bereich weniger Kilometer erreicht werden. In KLIFF werden schwerpunktmäßig die regionalen Klimamodelle REMO (Jacob, 2001), CLM (Rockel, 2008) und WETTREG verwendet. Die Ergebnisse der verschiedenen Modellläufe werden im Rahmen des Forschungsthemas 6<sup>8</sup> zu einer einheitlichen Basis ausgewählter Ensembles aufbereitet und auf das Untersuchungsgebiet Niedersachsen interpoliert. Diese stehen zum Antrieb der oben beschriebenen Grundwasser-, Wasserhaushalts- und Oberflächengewässermodelle zur Verfügung. Innerhalb eines anderen Teilprojektes des Forschungsthemas 7<sup>9</sup> werden darüber hinaus Sturm- und Seegang-Szenarienrechnungen auf Grundlage von Berechnungen des regionalen Klimamodells CLM durchgeführt, deren Ergebnisse als Eingangsgrößen für die Berechnungen mit dem Oberflächengewässermodell verwendet werden.

### 3. SIMULATION VON ÄSTUAR-SCHELF-SYSTEMEN

Die Berechnung der Salzwasserintrusion ins Ästuar erfolgt mit Hilfe eines hydrodynamischen Modells, das besonders für die skalenübergreifende Modellierung von komplexen Fluss-Ästuar-Schelf-Ozean Systemen geeignet ist. Das System ist eine Weiterentwicklung der Anwendung ELCIRC und wird seit 2005 für tägliche Vorhersage und Mehrjahres-Simulationen des Columbia River, USA, eingesetzt. Für eine detaillierte Darstellung der

<sup>8</sup> KLIFF Forschungsthema 6, "Auswirkungen von Klimaänderungen auf Wasserdargebot, Hochwasserrisiko und Gewässerbelastung". Sprecher: Prof. Dr.-Ing. Haberlandt, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, Leibniz Universität Hannover.

<sup>9</sup> KLIFF Forschungsthema 6 Teilprojekt 1, Wasserstands- und Seegangsentwicklung in der südlichen Nordsee bei Klimaänderungen“. Dr. R. Weisse, Institut für Küstenforschung (IKF) im Helmholtz-Zentrum Geesthacht

physikalischen und numerischen Formulierungen wird auf Zhang et al. (2008) verwiesen. Zur Darstellung des Modells sollen hier nur die wichtigsten Unterschiede zu ähnlichen semi-impliziten 3D-Modellen genannt werden. Das mit SELFE benannte System basiert auf den 3D-Flachwassergleichungen. Wie andere semi-implizite Modelle wie beispielsweise ELCIRC oder UnTRIM (Casulli et al., 2000) besitzt auch SELFE den Vorteil, dass alle Terme, welche die numerische Stabilität der Berechnung limitieren, implizit gelöst werden. Hierdurch ist die Berechnung größerer Zeitschritte möglich. Die ausschlaggebende Weiterentwicklung gegenüber ELCIRC ist das Nutzen der Galerkinmethode anstelle einer Finite Differenzen/Finite Volumen Formulierung. Hierdurch entfällt die sog. Orthogonalitätsbedingung für die Netze, ohne die laut Zhang (2008) bei FD/FV Methoden keine Konvergenz garantiert werden kann. Weiterhin ermöglicht es die Nutzung von mindestens linearen anstelle konstanter Ansatzfunktionen für die Wasserspiegelauslenkung. Eine weitere Verbesserung stellt das Nutzen hybrider Koordinaten dar wie in Abbildung 2 gezeigt.

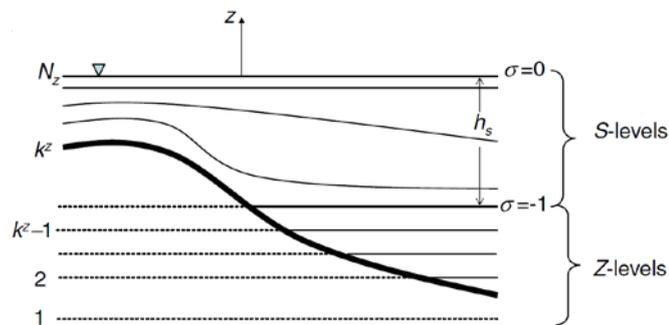


Abbildung 2 Hybride Koordinaten mit (Zhang, 2008).

Diese setzen sich zusammen aus sog. S-Levels im oberen Bereich der Wassersäule, welche dem Geländeverlauf folgen, und Z-Levels unterhalb einer bestimmten Höhe  $h_s$ . Durch die S-Levels kann die sohlnahe Grenzschicht besser aufgelöst und damit typische Ästuarprozesse wie Reibungsverluste und Salzintrusion genauer angenähert werden (Zhang, 2008). Auf diese Weise wurden im Besonderen ausgezeichnete Ergebnisse bei der Vorhersage der Salinität im Columbia River erzielt. Wie Abbildung 3 zeigt, reproduziert SELFE die gemessenen Salzkonzentrationen gut, während ELCIRC diese stark unterschätzt.

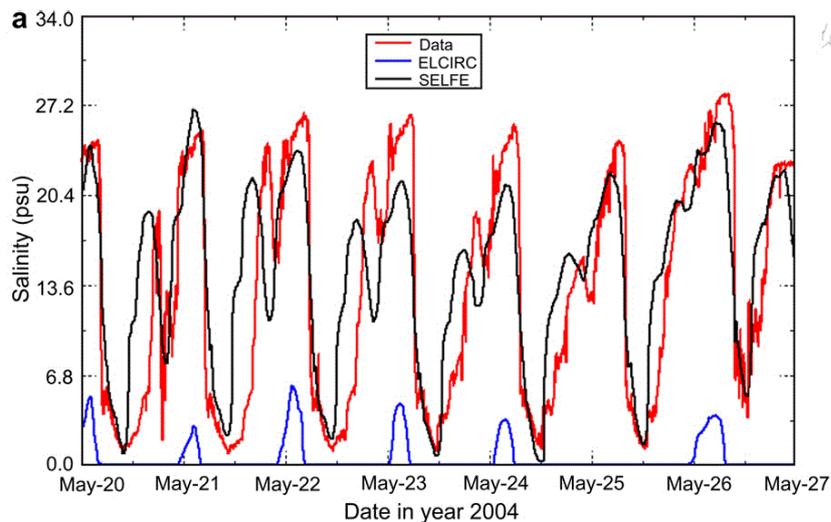


Abbildung 3 Zeitreihe der mit SELFE und ELCIRC berechneten sowie gemessenen Salzkonzentrationen im Columbia Ästuar (Zhang, 2008).

Im Übergangsbereich Schelf-Ozean kommt es beim Gebrauch von reinen S-Levels jedoch zu numerischen Instabilitäten beim Ausbreiten eines Süßwasserbereiches aus den flacheren Bereichen heraus in tiefere. Hierin liegt der Vorteil des hybriden SZ-Schemas.

Als Turbulenzmodelle können die üblichen Ein- oder Zwei-Gleichungs-Systeme gewählt werden, da in SELFE das von Umlauf und Burchard (2003) vorgeschlagene Generic-Length-Scale Model implementiert ist.

## 4. MODELL DES WESERÄSTUARS

### 4.1 Datengrundlage und Verarbeitung zu einheitlicher Datenbasis

Zum Herstellen des unstrukturierten Berechnungsnetzes wurde eine Datengrundlage aus Tiefendaten benötigt, die den aktuellen Zustand der komplexen Ästuarbathymetrie hinreichend genau abbildet. Hierzu wurden Tiefendaten zusammen getragen, welche aus Multi- und Single-Beam Peilungen und hochgenauen Befliegungsdaten bestehen und von den Wasser- und Schifffahrtsämtern sowie dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie zur Verfügung gestellt wurden. Die horizontale und vertikale Genauigkeit der Datenerfassungssysteme liegt bei den meisten Datensätzen im Zentimeterbereich, da die mit modernen globalen Positionierungssystemen (GPS) erhobenen Daten in der Regel einer kinematischen Echtzeit-Positionskorrektur unterzogen werden. Jedoch kommt es durch die Vielzahl der Prozessierungsschritte beim Erheben der Daten im Rahmen von Peilungen dennoch oft zu Ungenauigkeiten. Aus diesem Grund ist eine eingehende automatische sowie visuelle Kontrolle der Datensätze notwendig. Die Datensätze lagen teilweise auf Rastern von 1x1 m interpoliert und teilweise als Punktwolken sehr unterschiedlicher Auflösungen vor. Die Gesamtgröße des Datensatzes beträgt ca. 400 Mio. Punkte. Da zunächst der IST-Zustand des Modells berechnet werden soll, wurden zum Aufbau der Datenbank möglichst aktuelle Datensätze berücksichtigt. Die in der Unterweser und im inneren Teil des Ästuars vorhandenen Datensätze stammen ausschließlich von Messungen der Jahre 2008 und 2009. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die Bathymetrie den IST-Zustand gut genug nachbildet.

Zum Speichern und Prozessieren dieser großen Datenbasis wurde eine spezielle Datenbankstruktur aufgesetzt, die eine frei verfügbare Alternative zu SQL-Datenbanken darstellt (PostGreSQL). Mit einem Paket hierfür eigens implementierter Routinen der prozeduralen Sprache PI-Perl. wurde aus den Teildatensätzen eine einheitliche, strukturierte Datenbasis zur Weiterverwendung in einem Netzgenerator erzeugt. Hierfür wurden die Daten in eine Rangfolge auf Basis ihrer Metainformationen gebracht. Bei der Interpolation der einzelnen Datensätze zu einem einheitlichen Geländemodell konnten so bei sich überlappenden Datensätzen aktuelle Datensätze oder Datensätze höherer Auflösung automatisiert bevorzugt werden.

## **4.2 Vernetzung**

Es erfolgte die Vernetzung der Datenbasis zu zwei Rechengittern. Das erste umfasst rund 80.000 Knoten und wird vorrangig für Kalibrierungsrechnungen eingesetzt. Für die Szenarienberechnungen wurde ein feineres Netz mit rund 200.000 Knoten erstellt. Die Vernetzung erfolgte mit einem von Bilgili et al. (2006) entwickelten Routinenpaket, mit Hilfe ein Gebiet innerhalb eines angegebenen Randpolygons zu einem Netz triangulierter Dreieckselemente vernetzt werden kann.

Das in dieser Studie verwendete Randpolygon orientiert sich im Norden des Modellgebietes an der Kante zum tieferen Schelfmeer und im Unterweserbereich an der Deichlinie. Als südliche Begrenzung ist das Hemelinger Wehr gewählt. Die beiden Nebenflüsse Ochtum und Hunte werden jeweils bis zu ihren Wehren berücksichtigt. Die Lesum wird bis zur Mündung der Hamme und bis in die Lesum herein abgebildet (siehe Abbildung 4).

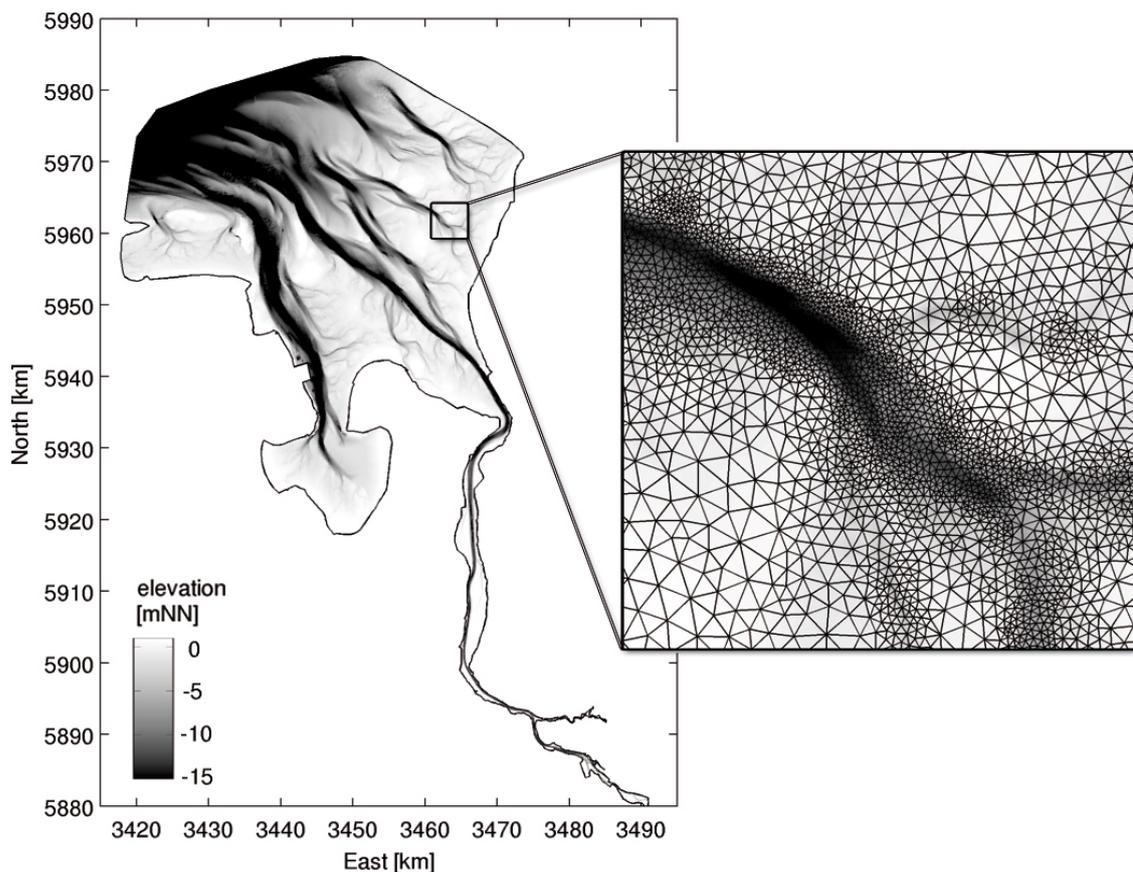


Abbildung 4 Modellgebiet mit verwendetem Randpolygon, Tiefeninterpolation auf Basis des feinen Rechennetzes (links), Detail des tiefenverfeinerten Netzes im Bereich Robinsbalje (rechts).

Um ein Berechnungsnetz zu produzieren, das in Bereichen mit starken bathymetrischen Veränderungen diese ausreichend fein auflöst und trotzdem insgesamt grob genug ist für eine effektive Berechnung, wird in mehreren Schritten vorgegangen.

Für die Herstellung des groben Wesermodells wurden dem Vernetzer in einem ersten Schritt 31 voneinander abgeschlossenen Zonen innerhalb des Randpolygons angegeben. Diesen wurden jeweils unterschiedliche maximale Elementflächen zugeordnet, welche die Feinheit der Diskretisierung beeinflussen. Während im Außenbereich des Ästuars maximale Flächen von  $A = 3.000 \text{ m}^2$  zugelassen wurden, erfolgte eine schrittweise Reduzierung bis in den Bereich der Bremer Häfen auf  $A = 200 \text{ m}^2$ . Weiterhin erfolgte eine Vergrößerung der Elementflächen auf den Überschwemmungsgebieten zwischen dem Hauptfahrwasser und der Deichlinie. Darüber hinaus wurde im ersten Vernetzungsschritt eine minimale Winkelgröße für die Innenwinkel der Dreiecke von  $\beta = 30^\circ$  vorgegeben. Das sich ergebende Rechengitter umfasst rund 80.000 Knoten und ist hinreichend genau für die grundlegende Kalibrierung.

In einem weiteren Verfeinerungsschritt wurden die Elemente dieses Netzes anhand eines Tiefengradienten-Kriteriums überprüft und iterativ verfeinert. Für die maximale Elementfläche  $A$  gilt hierbei:

$$A \leq \frac{h}{\nabla h} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (1)$$

mit dem Tiefengradienten  $\nabla h$  im Element, der Tiefe  $h$  und dem Faktor  $\alpha$ , welcher hier zu  $\alpha = 0.025$  gesetzt wurde. Zusätzlich werden auch in diesem Verfeinerungsschritt ein minimaler Innenwinkel sowie eine minimale Elementfläche vorgegeben. Mit Hilfe dieses zusätzlichen Kriteriums können trotz der generell groben Auflösung im Außenbereich feine Prielstrukturen mit aufgelöst werden, wie Abbildung 4 (rechts) am Beispiel des Nebenarms Robinsbalje zeigt. Insgesamt wurde die Größe des Netzes auf rund 200.000 Knoten erweitert. Eine weitere solverseitige Anforderung an das Netz stellt ein geometrisches Kriterium dar, laut welchem der Mittelpunkt jeder inneren Kante innerhalb des Quadrates sein muss, welches von den Mittelpunkten der vier Nachbarkanten gebildet wird. Dies wird vom Vernetzer nicht automatisch berücksichtigt, so dass das Netz in einem zusätzlich implementierten halbautomatisierten Post-Processing Schritt angepasst werden muss.

## **5. KALIBRIERUNG**

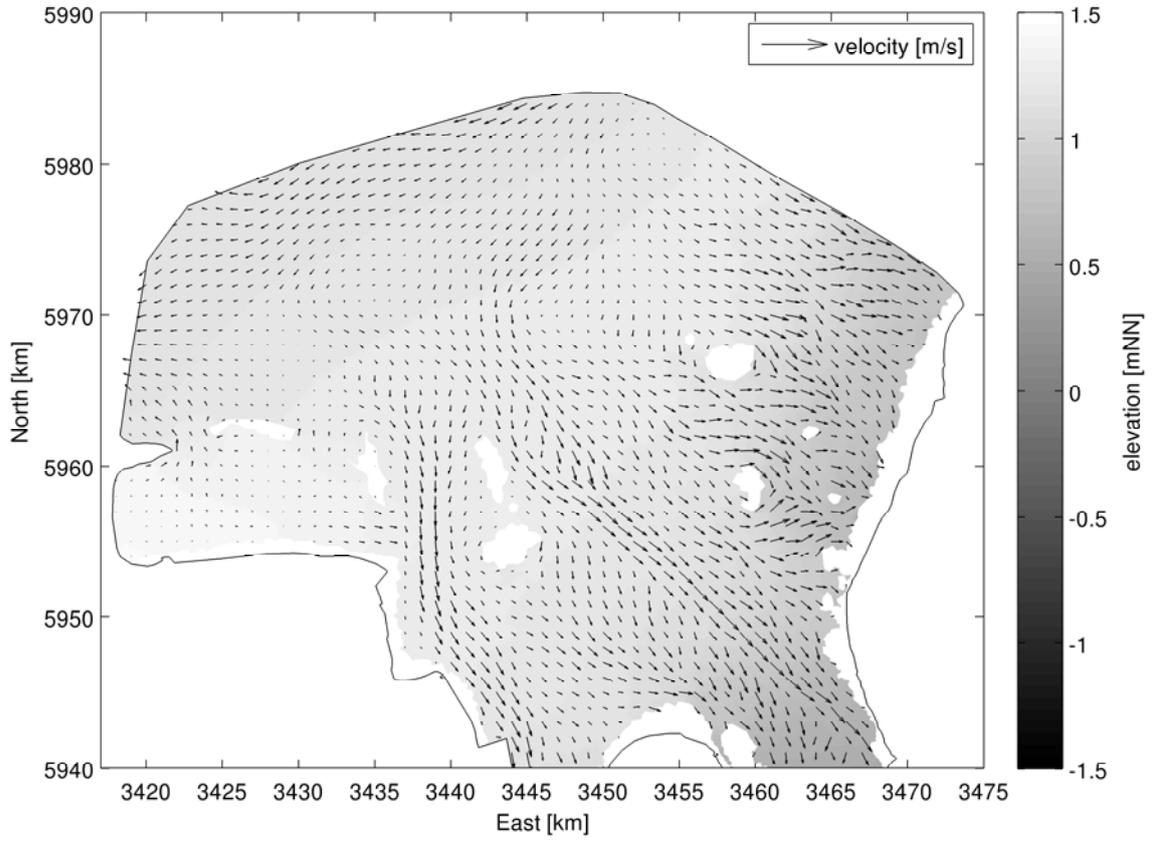
### **5.1 Erste Ergebnisse**

Um die Parameter der verwendeten Modellumgebung auf die Anforderungen der Berechnung einzustellen, wurden eine Reihe Systemstudien an einem idealisierten Ästuarmodell durchgeführt. Hierbei wurde unter anderem die Performanz verschiedener Turbulenzmodelle miteinander verglichen.

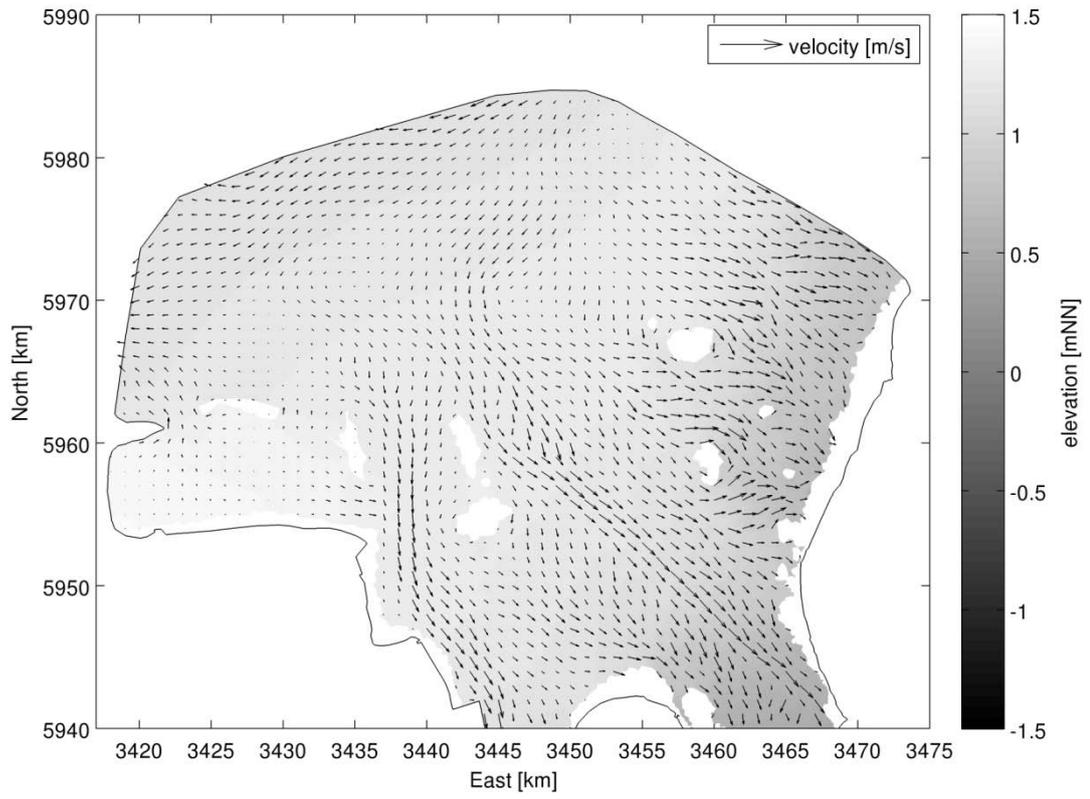
Weiterhin wurde mit den Kalibrierungsläufen für die Abbildung der Hydrodynamik begonnen. Hierfür wurde auf dem offenen Rand zur Nordsee zunächst eine Wasserspiegelauslenkung eingesteuert, bei der es sich um leicht geglättete und phasenverschobene Messwerte des Pegels Leuchtturm Alte Weser handelt, welcher sich ca. 15 km landeinwärts des offenen Randes befindet. Am offenen Rand zum Wehr Hemelingen wurden am Pegel Inschede gemessene Abflusswerte eingesteuert, die ebenfalls geglättet und um  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  erhöht wurden. Als Kalibrierzeitraum wurde zunächst ein zehntägiges Intervall beginnend mit dem 27. April 2009 gewählt, da die Datensätze wie oben beschrieben vorrangig aus den Jahren 2008 und 2009 stammten und innerhalb des Jahres 2009 diese Periode durch einen gleichmäßigen Tidehub ohne Extremereignisse und einen konstanten Binnenabfluss von um  $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$  geprägt ist.

Mit einem Zeitschritt von  $\Delta t = 60 \text{ sec.}$  kann ein numerisch stabile und konvergierende Berechnung durchgeführt werden. Abbildung 5 zeigt die berechneten Wasserspiegelauslenkungen und Strömungsgeschwindigkeiten im Mündungsbereich.

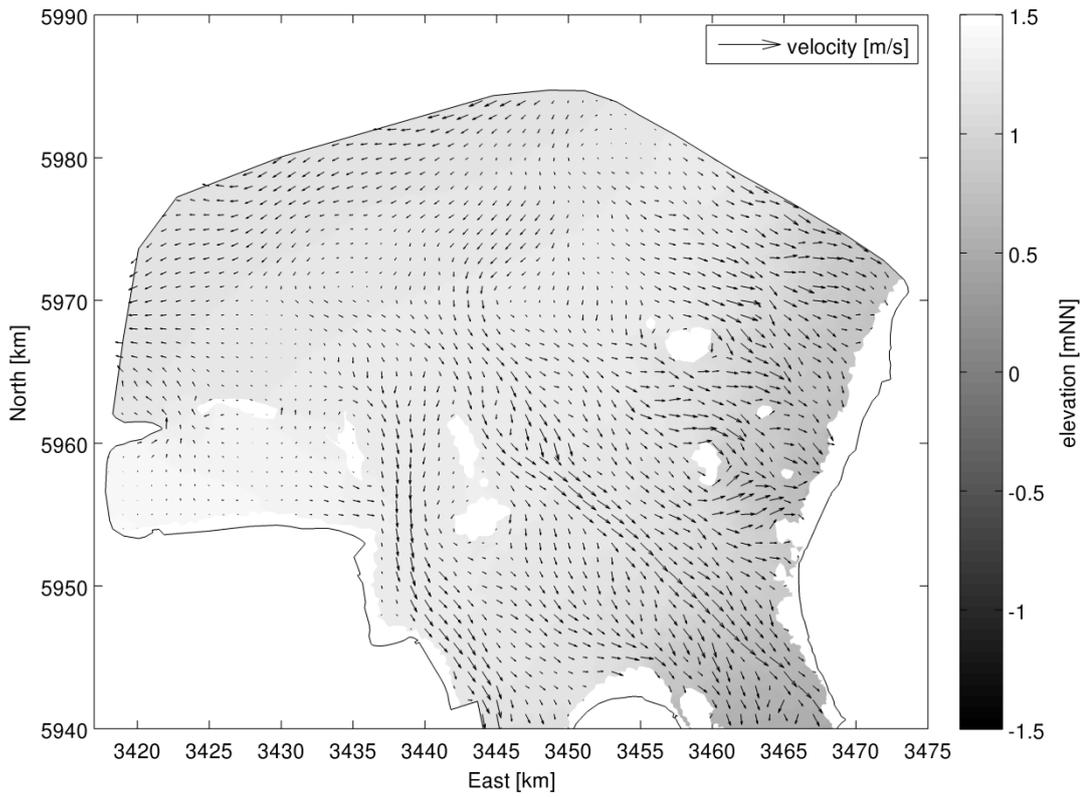
2009-04-29 03:30



2009-04-29 03:30



2009-04-29 03:30



2009-04-27 18:30

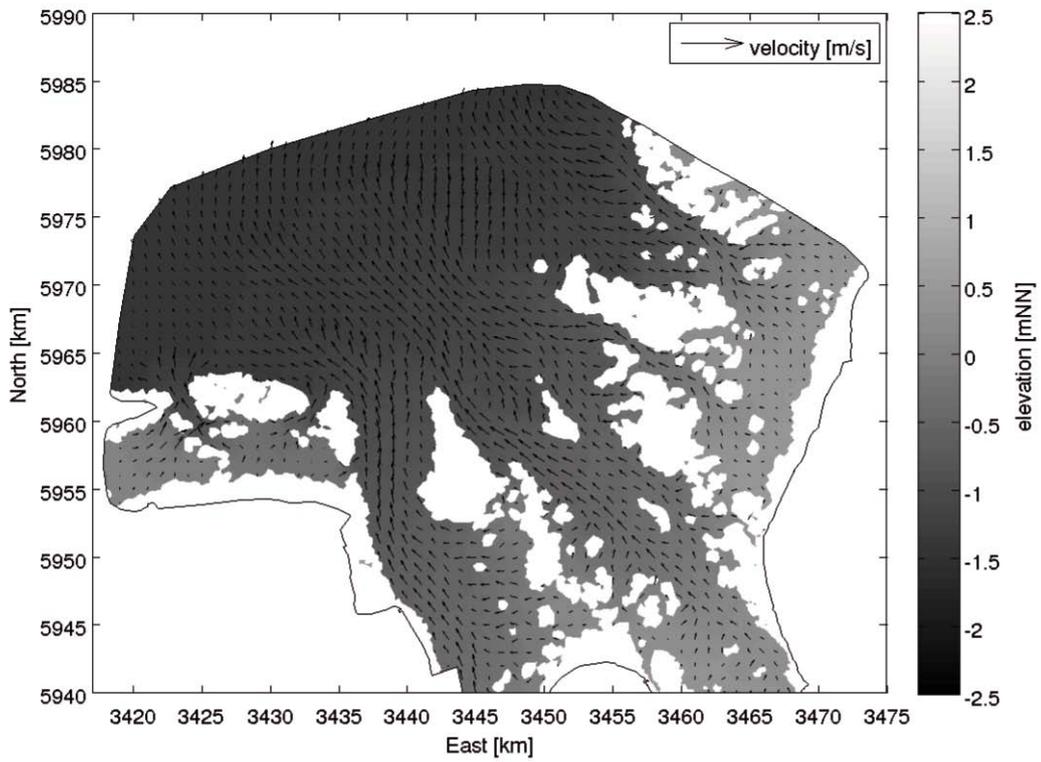


Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung und Wasserspiegelauslenkung in der Wesermündung, unter Flutstrom (oben) und Ebbstrom (unten).

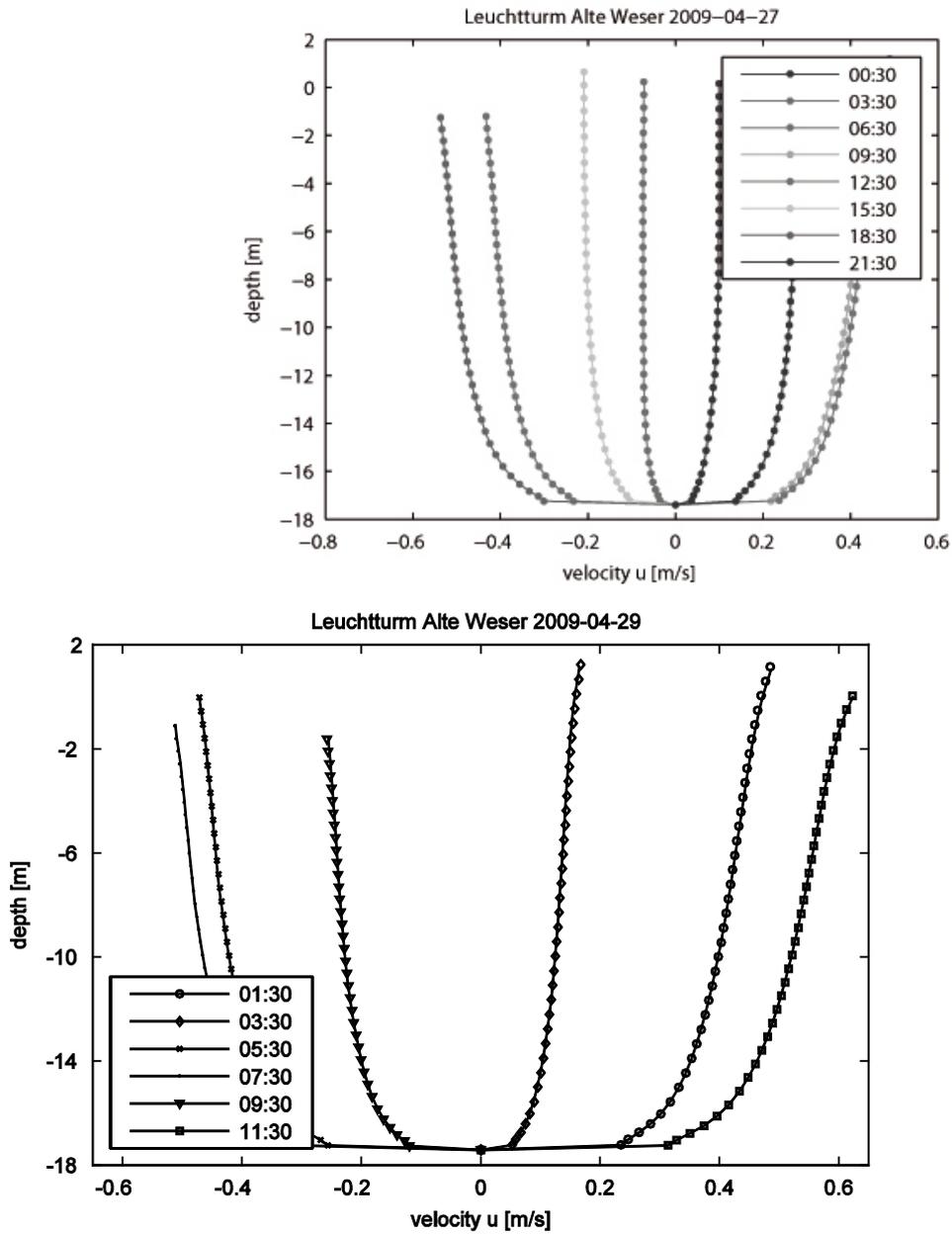


Abbildung 6 Vertikale Geschwindigkeitsprofile im Abstand von drei Stunden während eines beispielhaften Tidezyklus

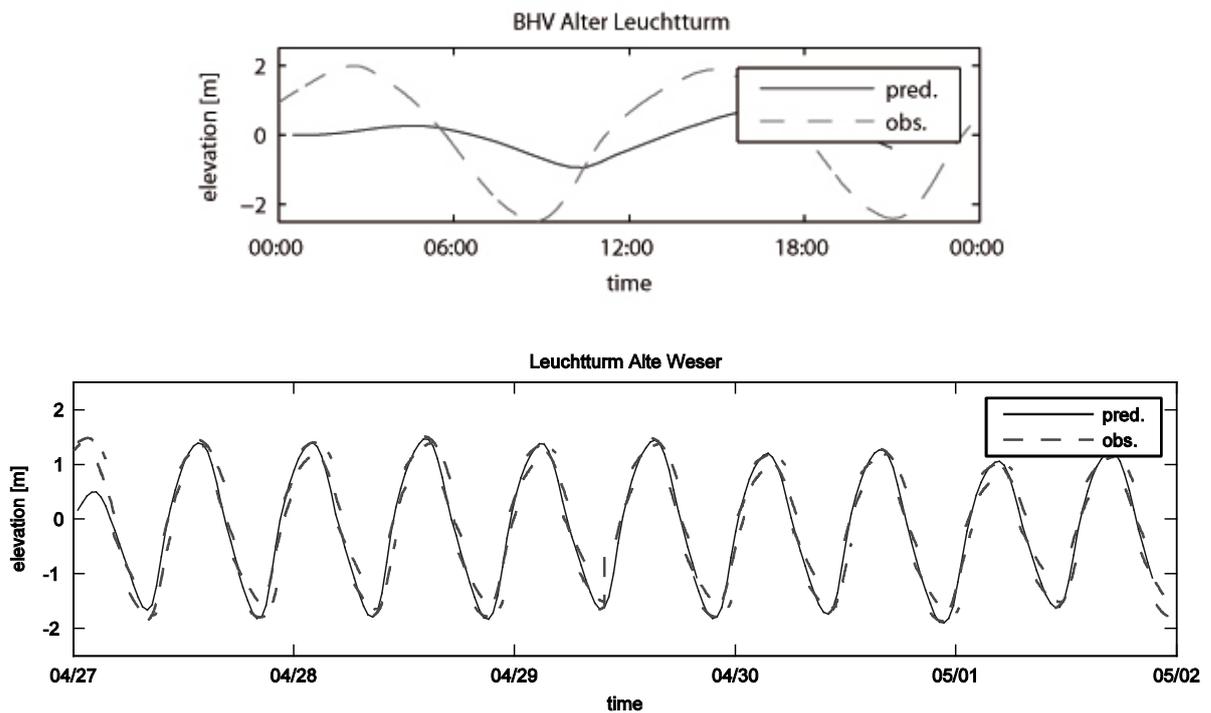


Abbildung 7 Wasserspielauslenkung über die Zeit in der Nähe des Pegels Leuchttonne Alte Weser, am Pegel gemessen (gestrichelt) vs. berechnete Zeitreihe (durchgezogen).

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Hier bitte eine kurze Zusammenfassung mit den wesentlichen Aussagen und Ergebnissen des Vortrags erstellen.

## 7. SCHRIFTTUM

- BILGILI, A., SMITH, K. W., LYNCH, D. R.: BatTri: A two-dimensional bathymetry-based unstructured triangular grid generator for finite element circulation modeling. 2006. *Computers & Geosciences*, 32, pp. 632-642.
- CASULLI, V., WALTERS, R.A.. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. 2000. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 32, 331-348.
- HEROLD, M., YANG, J., GRAF, T., PTAK, T.: Saltwater Intrusion and Storm Surge Processes in Coastal Areas under Climate Change: A modelling study in Northern Germany (in Vorbereitung).
- KREYE, P., GOCHT, M., FÖRSTER, K.: Entwicklung von Prozessgleichungen der Infiltration und des oberflächennahen Abflusses für die Wasserhaushaltsmodellierung. 2010. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 5, Oktober 2010.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

- JACOB, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol.77, Issue 1-4, 61-73.
- JUNGCLAUS, J.H., KEENLYSIDE, N., BOTZET, M., HAAK, H., LUO, J.-J., LATIF, M., MAROTZKE, J., MIKOLAJEWICZ, U., ROECKNER, E., Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, *J. Climate*, 19, 3952-3972, 2006.
- ROCKEL, B., WILL, A., HENSE, A.. eds., Special issue Regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM), *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, 2008
- TERRIEN, R., MCLAREN, R. G., SUDICKY, E. A. AND PANDAY, S. M.: HYDROGEOSPHERE—A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. 2008. Univ. Laval, Quebec, Que., Canada. 275 pp.
- UMLAUF, L., BURCHARD, H.: A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. 2003. *J. Mar. Res.* 6, 235–265
- YANG, J. (2010): Saltwater Intrusion and Flood Processes in Coastal Areas: Numerical Model Development and Application for Langen, Bremerhaven (M.Sc. thesis). Universität Göttingen, 90 pp.
- ZHANG, Y., BAPTISTA, A.M., SELFE: A semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model, *Ocean Modell.* (2008), doi:10.1016/j.ocemod.2007.11.005