

Für die Anwendung auf die Wasserstraßen und Häfen an der Ostseeküste geeignete hydronumerische Modelle

Guntram Seiß

Zusammenfassung

Seit den frühen 1990er Jahren besteht ein wachsender Bedarf der Anpassung der Häfen der deutschen Ostseeküste an moderne Schiffstypen. Die neuen Erkenntnisse der Gesellschaft über den Klimawandel beeinflussen ebenfalls die praktische Planung der Wasserstraßenverwaltung.

Diese Entwicklungen führten zu neuen Anforderungen in der Begutachtung während der Planungsprozesse und der Beratung der Wasserstraßenbehörden des Bundes. Die Werkzeuge zur Modellierung mussten angepasst werden, um die Fragen betreffend die Ostseeküste abdecken zu können. Die stark barokline Natur des Systems machte es erforderlich, thermische Prozesse zu berücksichtigen. Modellierung über lange Zeiträume erfordert schnellere Modelle und die begrenzte Zahl der Mitarbeiter einen flexiblen, effizienten Modellbaukasten.

Parallel zur Entwicklung des Baukastens für die Ostseeküste mussten Fragen an den Zufahrten zum Peenestrom, der Schlei und der Häfen von Wismar und Rostock beantwortet werden. Innerhalb des Projektes KLIWAS wurden weitere Erkenntnisse zur Reaktion der inneren Küstengewässer auf einen Anstieg des Meeresspiegels erarbeitet. Von diesen Projekten werden hier Schlaglichter präsentiert.

Schlagwörter

Ostsee, Hafenzufahrt, Werkzeugkasten, numerische Modelle, Klimawandel, Fahrwasser, Anpassung

Summary

Since the early 1990s there has been a growing demand for fairways to the ports along the German Baltic Sea coast to be adapted for modern types of vessels. Practical planning by fairway management authorities is also influenced by a growing and broadly shared understanding of climate change.

This has resulted in new assessment requirements during planning processes and the consultations of the Federal fairway management authorities. It was necessary to adapt modelling tools to fit them to deal with issues concerning the Baltic Sea coast. The highly baroclinic nature of the system required inclusion of thermic processes. Long-term modelling requires faster models and the limited staff of the institute required a flexible, efficient modelling toolbox.

In parallel to the development of a modelling framework for the Baltic Sea coast, issues relating to the entrance of the Peenestrom, the ports of Wismar and Rostock and the Schlei estuary also needed to be addressed. Further insights on the reaction of inner coastal waters to changes in sea level were also tackled in the context of the KLIWAS project. Some of these project highlights are presented here.

Keywords

Baltic Sea, port entry, toolbox, numerical models, climate change, fairway, adaption

Inhalt

| | | |
|---|---|-----|
| 1 | Einleitung | 370 |
| 2 | Herausforderungen | 370 |
| 3 | Modellbeschreibung | 371 |
| 4 | Geschichte des Ostseemodellbaukastens | 375 |
| 5 | Weitere Anwendungen | 376 |
| 6 | Schlussfolgerungen | 378 |
| 7 | Schriftenverzeichnis | 378 |

1 Einleitung

Seit den frühen 1990er Jahren besteht ein wachsender Bedarf der Modernisierung und Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur der neuen Bundesländer. Da die Werften in Wolgast und Wismar größere Schiffe bauen, mussten die Fahrrinntiefen an die geänderten Schiffsgrößen angepasst werden. Angesichts des Tiefgangs und der Breite der Schiffseinheiten, die in Zukunft die Häfen Rostock und Wismar anlaufen werden, werden weitere Anpassungen der Fahrrinnen erforderlich sein.

Die inneren Küstengewässer stellen wertvolle natürliche Lebensräume und Erholungsgebiete dar. Mit der wachsenden Verfügbarkeit von Informationen rücken Umweltthemen vermehrt in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Konflikte zwischen dem wachsenden gewerblichen Verkehrsaufkommen und anderen konkurrierenden Interessen treten dadurch immer stärker zutage und müssen bereits in der Planungsphase konstruktiv gelöst werden.

Die Notwendigkeit, tragbare Lösungen für Umweltkonflikte zu finden, führt zu neuen Anforderungen an die Begutachtung und somit zu der Entscheidung, einen Modellbaukasten für die Ostsee mit einem Betrachtungsschwerpunkt auf den deutschen Ostseeküstengewässern zu entwickeln.

2 Herausforderungen

Im Planungsprozess für Schifffahrtsrinnen sind mehrere unterschiedliche Arten von Fragestellungen zu berücksichtigen. Im Hinblick auf die Ostseeküste sind die folgenden Themen von besonderer Relevanz:

- Änderungen des lokalen mittleren Wasserspiegels und seiner Variabilität
- Änderungen des lokalen Salzgehalts und der Temperatur
- Ausbreitung von verbrachtem Baggergut
- Veränderungen der Seegangcharakteristik und welleninduzierter Belastungen

Auch wenn es für die Lösung von Fragestellungen im Rahmen von Genehmigungsverfahren nicht immer unbedingt zweckdienlich ist, das physikalische System möglichst

präzise zu reproduzieren, muss das Modellsystem ausreichend genau sein, um das fragliche Gebiet möglichst realitätsnah abzubilden, da sonst potentielle Gegner einer wasserbaulichen Maßnahme für den Schiffsverkehr die Glaubwürdigkeit der Modellergebnisse in Zweifel ziehen würden.

Die Anforderungen an Modelle für Plangenehmigungen von Verkehrsprojekten in Deutschland sind hoch und beinhalten unter anderem folgende Aspekte:

- Die Geometrie kleinmaßstäblicher bathymetrischer Strukturen wie z. B. Fahrrinnen oder Inseln im betrachteten Gebiet muss möglichst in ausreichender Approximation dargestellt werden.
- Der offene Modellrand zur See muss vom Untersuchungsgebiet weit genug entfernt sein, damit das Modell nicht auf Veränderungen der Bathymetrie reagiert, die an diesen Rand heranreichen.
- Die von Temperatur, Salzgehalt und Sedimenten angetriebene Dynamik muss berücksichtigt werden.

Die Dynamik der Ostsee beruht auf einer langfristigen, durch Wind und Dichteänderungen angetriebenen Zirkulation. In den tieferen Becken der Ostsee findet sich eine permanente Halokline. Zu diesem Grundzustand kommen singuläre Ereignisse hinzu, beispielsweise Sturmfluten oder Salzwassereinträge von der Nordsee. Im Winter bewirkt die Abkühlung eine starke Konvektion und führt zu Eisbildung an der Oberfläche. Im Sommer entsteht durch die Aufwärmung eine ausgeprägte Thermokline. Alle diese Vorgänge haben einen starken Einfluss auf die räumliche und zeitliche Auflösung eines Modells und seine Kalibrierung.

3 Modellbeschreibung

Um alle Anforderungen der Genehmigungsverfahren zu erfüllen, wurde entschieden, einen Modellbaukasten für die Ostsee zu entwickeln (SEIB 2012; RAHLF und SEIB 2012). Der Baukasten ist ein modulares System aus folgenden Komponenten, die unabhängig voneinander einstellbar sind:

- Numerische Löser-Software
- Werkzeuge zur Vorbereitung
- Werkzeuge zur Nachbearbeitung und Präsentation
- Berechnungsgitter
- Hochauflösende digitale Bathymetrie-Modelle
- Randwerte
- Kalibrierungsdaten

Lediglich die Berechnungsgitter und Randwerte hängen von der eingesetzten numerischen Löser-Software ab. Basisdatensätze wie digitale Bathymetrien, Pegeldata für die Validierung oder geographische Informationen, mit Hilfe derer Ergebnisbilder illustriert werden, sind zentral verfügbar. Diese Datensätze können in jedem Modell eingesetzt werden. Software-Tools für die Aufbereitung und Nachbearbeitung werden von der BAW-Modellierungsgruppe zur Verfügung gestellt (BAW 1996-2014).

Die Modellgitter leiten sich aus einem Basisgitter ab, das die gesamte Ostsee abdeckt und am Skagerrak seeseitig offen ist. Von der inneren Ostsee bis zur Küstenlinie ist die

räumliche Auflösung feiner. Für zu untersuchende Gebiete wird in das Basisgitter ein Teilgitternetz eingefügt, das die Auflösung von Details der Bathymetrie im Hinblick auf die jeweilige Fragestellung liefert (Abb. 1). Hoch aufgelöste Teilgitternetze sind Teil der Baukastendatenbank – derzeit bestehen sie für die Unterwarnow, die Kieler Förde und die Schlei. Die Teilgitternetze funktionieren auch als unabhängige Modelle für bestimmte Anwendungszwecke, etwa die rasche Vorhersage von genauen Wasserständen oder Strömungen.

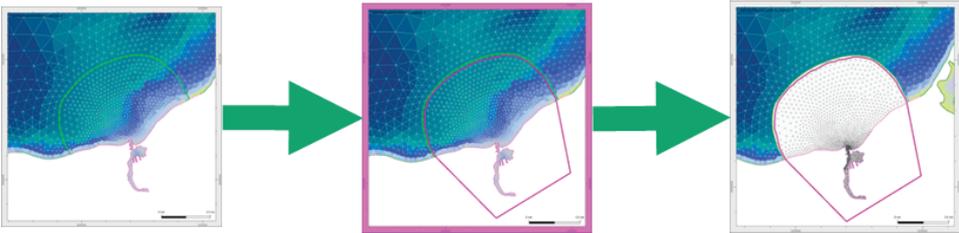


Abbildung 1: Prinzip der Generierung eines regional höher aufgelösten Berechnungsgitters durch Einfügen eines Teilgitternetzes für ein bestimmtes Gebiet.

An unserem Institut wird üblicherweise das UNTRIM-Modell als numerischer Löser für die hydrodynamischen Gleichungen eingesetzt (CASULLI und WALTERS 2000) (CASULLI und ZANOLLI 2002).

Die atmosphärischen Randwerte für das Modell stammten ursprünglich vom Deutschen Wetterdienst und wurden so aufbereitet, dass sie in die Modellierungssoftware eingegeben werden können. Derzeit sind Werte aus dem Zeitraum 01/2005 - 11/2012 für die Modellierung verfügbar. In diesem Fall muss die Modellsoftware an das gemeinsame Datenformat NetCDF (UNIDATA PROGRAM CENTER) angepasst werden.

Am seeseitigen Rand können die Wasserstände auf Basis der Daten des Pegels Smögen eingesteuert werden, wenn auf die Zeitreihe ein Zeitversatz von 30 Minuten angebracht wird - Smögen liegt 120 km nord-nordwestlich von Göteborg (Abb. 2).

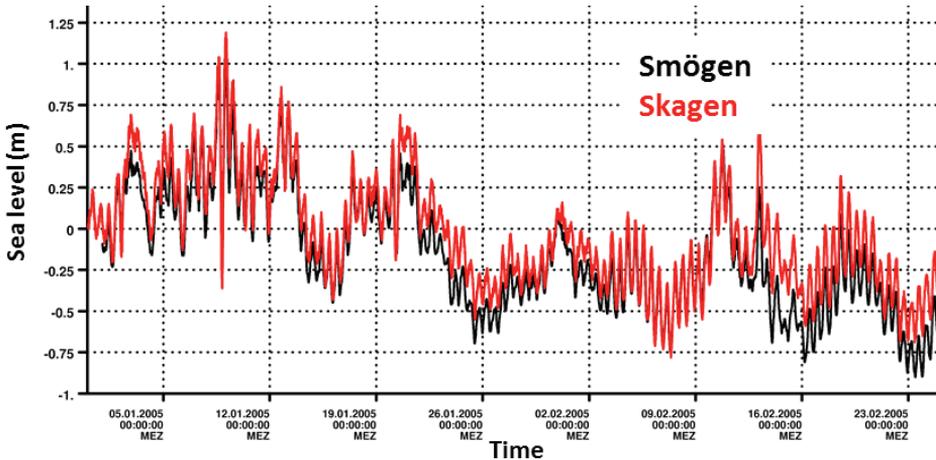


Abbildung 2: Typische Zeitreihen am offenen Modellrand.

Diese Approximation reicht aus, um das Tidesignal und die langfristige Entwicklung des mittleren Wasserstandes im Innern zu reproduzieren. Die Daten sind für den Zeitraum 2001 bis 2012 verfügbar. Vorkompilierte Daten sind bereits für mehrere Jahre verfügbar. Für vergangene Jahre können die Randbedingungen mit Hilfe des langfristigen Signals des Pegels Göteborg und der harmonischen Gezeitenkonstanten der Station Smögen rekonstruiert werden, oder durch die unmittelbare Verwendung der Daten des Pegels Ska-gen. Zur Unterstützung bei der Generierung realistischer Randbedingungenzeitreihen stehen verschiedene Software-Tools zur Verfügung (BAW 1996-2014).

Die aktuelle Version der UNTRIM-Simulationssoftware verwendet noch eigene Datenformate der BAW für den Import von Randbedingungen. Die Unterstützung des international verbreiteten NetCDF-Datenformats (UNIDATA PROGRAM CENTER) ist derzeit in Arbeit und wird technisch im Hinblick auf die Verwendung bestehender, von anderen Stellen zur Verfügung gestellter Datensätze einen erheblichen Fortschritt bringen.

Als Anfangswerte für das Modell kann der Datensatz von (JANSSEN et al. 1999) dienen. Allerdings wird noch etwas Programmieraufwand erforderlich sein, damit diese NetCDF-Daten (UNIDATA PROGRAM CENTER) in der Modellsoftware UNTRIM in der gelieferten Form verwendet werden können.



Abbildung 3: Die moderne Pegelanlage bei der Messstelle Wismar Baumhaus, erkennbar an der geringen Größe des Pegelhäuschens, liefert hoch aufgelöste Wasserstandzeitreihen (Foto: SEIB 2009).

Die Modelle werden validiert, indem die an mehreren Pegeln gemessenen Wasserstände mit den vom Modell simulierten Zeitreihen verglichen werden. Über das Internet sind teilweise Datenquellen für Pegeldaten der Ostsee verfügbar. Die Datenbank der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes liefert zusätzlich hoch aufgelöste Zeitreihen sämtlicher von ihr betriebenen Pegel von 1989 bis heute. Abb. 3 zeigt ein typisches Beispiel einer solchen Pegelstation. Historische Messungen, die bisher nur in Papierform in Archiven abgelegt waren, werden laufend digitalisiert und diese Datenbankressource wird damit gefüllt. Hier kommt ein Standardverfahren zur Anwendung, um die Erfassung und Speicherung sämtlicher Daten aus unterschiedlichen Quellen bei der BAW zu ermöglichen. So liegen die Daten in vergleichbarer Qualität und in einem Datenformat vor, welches für Nachbearbeitungstools lesbar ist.

Ein typischer Validierungsschritt besteht im visuellen Vergleich der simulierten Kurve mit der Ganglinie des Pegels an demselben Standort. Differenzen werden berechnet, um den maximalen Fehlerbereich für den momentanen Wasserstand zu schätzen. Abweichungen können das Ergebnis einer von der Realität abweichenden Energieverteilung im Modellgebiet sein, die sich in den Amplituden der Extremereignisse zeigt. Phasenverschiebungen zeigen an, dass die Spektren des Modells von der Natur abweichen. Abweichende mittlere Wasserstände sind für die Validierung normalerweise nicht von Bedeutung; sie weisen häufig auf systematische Abweichungen vom Referenzniveau der seeseitigen Randbedingung hin, deshalb wird hier eine konstante Korrektur eingebracht.

Abb. 4 zeigt einen Vergleich der Zeitreihen zwischen Messung und Modell am Pegel Schleswig am Ende der Förde für einen Zustand mit extremem Niedrigwasser. In dieser Simulation wird ein hoch aufgelöstes Berechnungsgitter der Schlei verwendet, welches durch den von der Wetterstation Schleswig abgeleiteten lokalen Wind angetrieben wird. Der Wasserstand am offenen Modellrand wurde mit dem Pegel Schleimünde eingesteuert.

Der Vergleich zeigt eindeutig, dass das Modell aufgrund der ausreichend guten Darstellung der Randwerte in der Lage ist, die Hydrodynamik in dieser sehr komplexen Geometrie zu reproduzieren. Insbesondere in diesem Fall war es zur Erreichung dieses hochwertigen Resultats nicht erforderlich, die Parameter anzupassen. Sämtliche physikalischen Kräfte (Advektion, Druck, Dissipation, externe Kräfte) scheinen innerhalb des Modells in der richtigen Größenordnung vorhanden zu sein. Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass immer die Möglichkeit bestehen kann, mit einem numerischen Modell zu einer guten Darstellung der Hydrodynamik zu gelangen, wenn die relevanten Vorgänge in der Zeit-Raum-Domäne aufgelöst werden.

Selbst die beiden extremen Niedrigwasser-Ereignisse wurden reproduziert. Diese Ereignisse hängen entscheidend von der Qualität des lokalen Windfeldes ab, welches reproduziert werden konnte, indem die Windgeschwindigkeit aus der Wetterstation Schleswig übernommen und mit einem geeigneten Faktor multipliziert wird. Der Faktor dient der Hervorhebung der Tatsache, dass die Windgeschwindigkeit auf Grund geringerer Reibung über der Wasseroberfläche höher ist.



Abbildung 4: Vergleich der Wasserstände des Modells (rote Linie) mit den Messungen (schwarze Linie) am Pegel Schleswig.

4 Geschichte des Ostseemodellbaukastens

Die ersten Projekte wurden mit einem Modellgitter durchgeführt, das über offene Ränder bei Fehmarn, Bornholm und südlich des Sund verfügt (BAW2009/2010). Dieser Ansatz reichte aus, um die sich im Projektzusammenhang ergebenden Fragestellungen zu behandeln. Er war jedoch nicht in der Lage, eine realistische Darstellung des absoluten Salzgehalts zu liefern, weil Fehler in den Randbedingungen an den offenen Rändern verhältnismäßig groß ausfallen konnten, die durch eine Zone mit einem relativ steilen Salzgehaltsgradienten verlaufen. Die Bereitstellung hinreichender Daten für den Salzgehalt wurde dadurch erheblich erschwert.

Aus dieser Erfahrung erwuchs die Entscheidung, ein Berechnungsgitter zu entwickeln, das die gesamte Ostsee abdeckt. Der einzige offene Rand bei Skagen erleichterte es, dass hinreichende Randwerte für Wasserspiegel, Salzgehalt und Temperatur bereitgestellt werden konnten.

Das erste modulare Gitter wurde im Zuge eines Beratungsprojekts zum Mündungsgebiet der Warnow (BAW 2011) aufgebaut. Beispielergebnisse aus dieser Untersuchung finden sich in Abb. 5. Die Abbildung zeigt die Veränderung in der Variabilität des Parameters Salzgehalt verursacht durch eine Ausbaggerung. Die Analyse basiert auf einem Zeitraum von vier Wochen, in denen es zu Extremereignissen mit hohen und niedrigen Wasserständen kam. Die Farben sind wie folgt zu interpretieren:

- Die blauen Farben im nördlichen Teil zeigen eine Dämpfung der Salzgehaltsvariabilität an, weil sich die Zone der höchsten Salzgehaltsvariabilität nach Süden verschoben hat.
- Die roten Farben markieren eine Erhöhung der Variabilität im südlichen Teil, der nun zunehmend durch das Meer und den advektiven Transport von Seewasser beeinflusst ist.

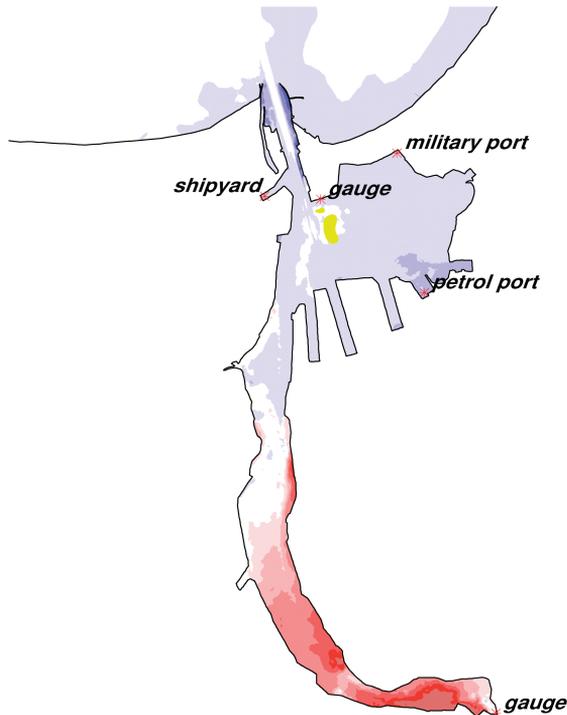


Abbildung 5: Veränderungen in der Variabilität des Salzgehalts im Bereich der Warnow-Mündung verursacht durch eine Vertiefung der Fahrrinne.

Dieses Beispiel zeigt, dass das Konzept, ein Modell der gesamten Ostsee mit Verfeinerung nur im Untersuchungsgebiet zu verwenden, recht gut funktioniert.

Es fehlte jedoch noch ein wichtiger Prozess – die temperaturbeeinflusste Dynamik. In den folgenden Jahren wurde der Antrieb durch die räumlich variable Oberflächentemperatur implementiert. Der Datenpool wurde neu organisiert und ergänzt. Neue Strategien wurden entwickelt, um selbst bei Nichtverfügbarkeit der Pegel Skagen und Smögen ausreichende Randwerte für Wasserstände zu erzeugen, indem spektrale Informationen zu Gezeiten und langfristige Signale anderer nahegelegener Pegel verwendet werden.

5 Weitere Anwendungen

In der Schlei wurde eine Studie zur Tracer-Verteilung durchgeführt. Diese Studie erfolgte im Rahmen eines separaten Modelllaufs eines hoch aufgelösten Teilgitters mit aus dem

Basismodell der Ostsee abgeleiteten Randwerten. Die Konfiguration in den inneren Gewässern der Schlei ist in Abb. 6 dargestellt. Eine Tracer-Quelle nahe Schleswig simuliert den Zufluss verschmutzten Wassers.

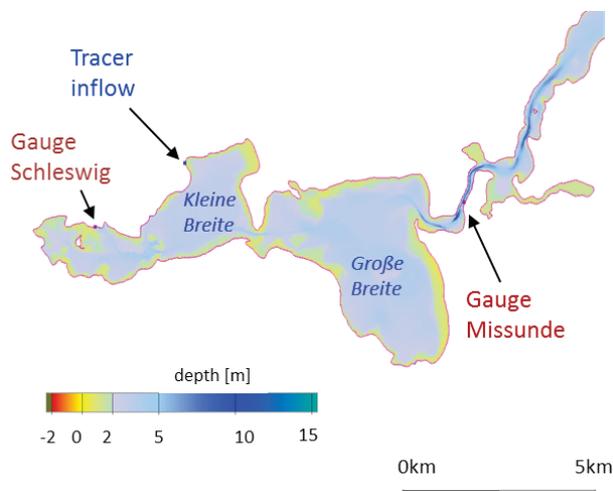


Abbildung 6: Bathymetrie der inneren Schlei mit Position der Tracer-Quelle und Pegelpositionen.

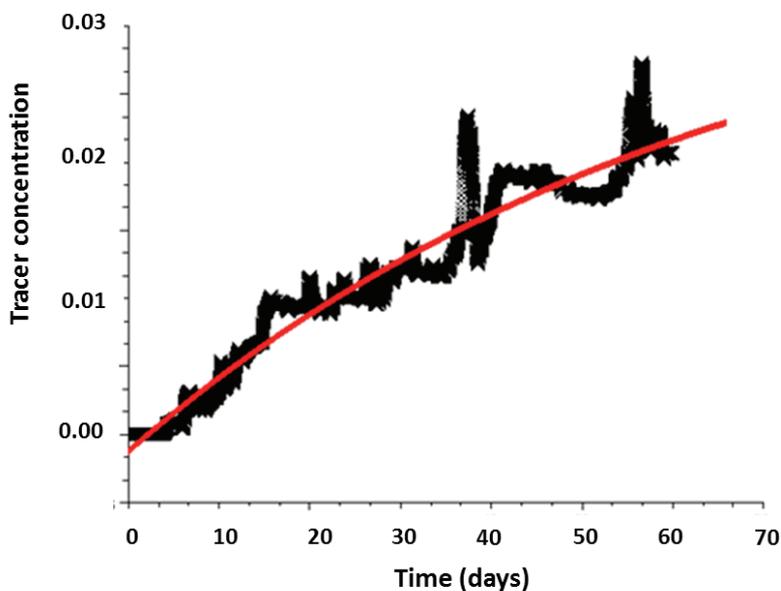


Abbildung 7: Bewertung der Tracer-Konzentration an einer Messstation in der inneren Schlei nach Einleitung. Die Markierungen zeigen die modellierten Werte, die durchgezogene Linie zeigt die exponentielle Anpassung.

Zur Bewertung der typischen Zeitskalen, die die Förde benötigt, um sich an das dynamische Gleichgewicht anzupassen, wurde die Tracer-Konzentration eines einzigen Punktes in den inneren Gewässern der Schlei an eine Exponentialfunktion angepasst. Der Vorgang ist in Abb. 7 für eine Position in den inneren Gewässern der Schlei dargestellt. Die durchschnittliche Zeitreihe der Tracer-Konzentration zeigt klare exponentielle Charakteristik. Die abgeleitete typische exponentielle Zeitskala der roten Kurvenanpassung beträgt etwa 142 Tage. In dieser Zeit erreicht die Konzentration 90 % des Wertes im Gleichgewichtszustand.

Auch im Rahmen des KLIWAS-Projektes wurde das Schlei-Modell in einem Teil einer Sensitivitätsstudie zum Einfluss des Anstiegs des Meeresspiegels auf die Variabilität kurzfristiger Wasserstandsänderungen auf Grund meteorologischer Ereignisse eingesetzt. Diese Studie verglich die Ergebnisse eines niedrig aufgelösten eingefügten Teilmodells mit den Ergebnissen, die das hoch aufgelöste Modell lieferte. Die Signaleigenschaften in der Variabilität der Wasserstandsänderungen sind in beiden Modellen gleich. Das höher aufgelöste Modell zeigt jedoch weniger ausgeprägte Veränderungen bei der Variabilität des Wasserstands als das gröber aufgelöste Modell. Der Schritt von qualitativen Antworten zu quantitativen Werten ist durch die ausreichende zeitliche und räumliche Auflösung des verwendeten Modells bestimmt; dies wird auch aus dem Validierungsbeispiel deutlich.

6 Schlussfolgerungen

Das Konzept des Ostseemodellbaukastens scheint die Bedürfnisse der BAW bei der Modellierung von Vorgängen in Küstengewässern für die praktischen Zwecke des Betriebs der deutschen Schifffahrtsstraßen zu erfüllen. Eine Vielzahl unterschiedlicher praktischer Anwendungen zeigt die Flexibilität und die Stärken des Konzepts einer modularen Modellierungsumgebung. Die Qualität der Resultate hängt hauptsächlich von der Qualität der von der Software verwendeten Eingangsdaten ab. Bei Wahl einer entsprechenden Auflösung des Berechnungsgitters wird die Reproduktion realer Ereignisse hohen Anforderungen gerecht.

Die Bemühungen sollten nun darauf ausgerichtet werden, gemeinsame Datenformatstandards innerhalb der Modellierungssoftware zum Einsatz zu bringen, um einen einfacheren und kosteneffektiveren Zugang zu von Dritten geprüften Datensätzen zu gewährleisten.

Mehrere physikalische Aspekte bedürfen noch weiterer Verbesserungen oder müssen in der Zukunft in den Software-Teil des Ostseemodellbaukastens integriert werden, doch der Teil des Modellbaukastens mit hochwertigen Daten steht nun zur Anwendung bereit. Die weiteren Schritte zur Softwareverbesserung könnten die Aufnahme eines einfachen Eismodells umfassen sowie Tests anderer Modellierungssoftwareprodukte, die auf unstrukturierten Gittern basieren.

7 Schriftenverzeichnis

BAW: Program Descriptions, Bundesanstalt für Wasserbau.

Stand 01.04.2014: http://www.baw.de/methoden_en/index.php5/Program_Descriptions

- BAW: Fahrrinnenanpassung, Anpassung der inneren Hafengewässer und Hafenausbau Wismar. Hydrodynamik. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 2009/2010.
- BAW: Machbarkeitsstudie zum Ausbau des Seekanals Rostock auf eine Tiefe von 16,60 m unter NHN. Hydrodynamik. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg, 2011.
- CASULLI, V. and WALTERS, R. A.: An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. In: International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 32, 3, 331-348, 2000.
- CASULLI, V. and ZANOLLI, P.: Semi-implicit numerical modelling of nonhydrostatic free-surface flows for environmental problems. In: Mathematical and Computer Modelling, Vol. 36, 9-10, 1131-1149, doi: 10.1016/S0895-7177(02)00264-9, 2002.
- JANSSEN, F.; SCHRUM, C. and BACKHAUS, J. O.: A climatological data set of temperature and salinity for the Baltic Sea and the North Sea. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg, 245 p., 1999.
- RAHLF, H. und SEIB, G.: Aktuelles HN-Modell der Ostsee. Grundlage für Untersuchungen in den Ostseehafenzufahrten. In: BAW aktuell, 2, 14, 2012.
- SEIB, G.: Das Ostseemodell der Bundesanstalt für Wasserbau. Technische Dokumentation. Bundesanstalt für Wasserbau Dienststelle Hamburg, 2012.
- UNIDATA PROGRAM CENTER (ed.): Network Common Data Form (NetCDF). Stand 01.04.2014: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>