

Sedimenttransport und Sedimentmanagement im Elbeästuar

Holger Weilbeer

Zusammenfassung

Am Beispiel der Tideelbe wird gezeigt, welche Art von Daten, Modellierungs- und Analyserwerkzeugen benötigt werden, um den Sedimenttransport in einem Ästuar qualitativ und auch quantitativ beschreiben zu können. Mit Hilfe dieser Methoden können Optionen für das Sedimentmanagement untersucht werden.

Schlagwörter

Elbe, Ästuar, numerisches Modell, Schwebstoffmessungen, Baggern, Sedimenttransport, Sedimentmanagement

Summary

In this article, the tidal Elbe serves as an example to show which kind of data, modelling and analysis tools are required for a qualitative and quantitative description of sediment transport in an estuary. These methods can be used to investigate sediment management options.

Keywords

Elbe, estuary, numerical model, suspended sediment measurements, dredging, sediment transport, sediment management

Inhalt

1	Einleitung.....	444
2	Das Elbeästuar - Überblick.....	445
3	Modellsystem.....	448
4	Sedimenttransport im Elbeästuar	449
4.1	Messungen	449
4.2	Modellergebnisse	452
4.3	Monitoring von Baggerarbeiten	455
5	Anwendung auf Sedimentmanagement-Aufgaben	456
5.1	Sedimentmanagement-Konzept.....	456
5.2	Untersuchung von Umlagerungsstellen.....	458
5.3	Modellierung des Baggergeschehens	459
6	Ausblick.....	460
7	Schriftenverzeichnis	461

1 Einleitung

Die durch Tidewellen sowie Salz-, Brack und Süßwasserzonen geprägten Ästuar transportieren mit ihren alternierenden Strömungen große Feststoffmengen. Je größer die Wassertiefen der Fahrrinnen, desto größer ist das ausgetauschte Tidevolumen und desto mehr Feststoffe können mit der strömenden Wassermasse transportiert werden. Dies führt zu Steigerungen bei den Baggeraufwendungen. Zur Erhaltung der erforderlichen Wassertiefen für die Schifffahrt fallen jährlich mehr als 45 Mio. m³ Baggergut in Deutschland an. Der Löwenanteil davon wird in den Seeschiffahrtsstraßen und Seehäfen mit mehr als 40 Mio. m³ gebaggert. Aus dieser Mengenbetrachtung wird bereits deutlich, dass das Feststofftransportgeschehen in den Ästuaren eine herausragende Bedeutung hat. Ein wesentliches Ziel besteht darin, die Baggermengen und Baggerkosten trotz der bis heute ungebrochenen Schiffsgrößenentwicklung nicht weiter anwachsen zu lassen.

Das gebaggerte Material wird zum überwiegenden Teil an temporär festgelegten Verbringstellen im Gewässer umgelagert, wodurch es im System verbleibt und die Sedimenttransportraten und damit auch die morphologische Entwicklung beeinflusst. Die Wahl der Verbringstellen muss nach hydromorphologischen Kriterien unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte erfolgen. Eine Ausbreitung des umgelagerten Baggergutes im Gewässer ist in der Regel gewünscht, ein Wiedereintrieb in Baggerbereiche sollte jedoch möglichst nicht erfolgen, um Sediment- bzw. Baggerkreisläufe nicht zu forcieren. Durch eine geschickte Wahl der Verbringstellen und -zeitpunkte können möglicherweise auch bevorzugte morphologische Entwicklungen unterstützt werden. Die Genese der Wattgebiete ist z. B. im Hinblick auf eine Kompensation der Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs von großer Bedeutung.

Das Verständnis der Hydro- und Morphodynamik des Ästuars in Verbindung mit dem Wissen um die Zusammenhänge mit Gewässergüteparametern sind somit elementare fachwissenschaftliche Voraussetzungen für eine Optimierung des Sedimentmanagements. Als Beispiele seien hier der Sedimenttransport stromauf durch Tidal Pumping und der Einfluss barokliner Prozesse auf die Strömung und den Sedimenttransport in der Gradientenzone des Ästuars genannt. Beide Phänomene sind wichtig für den resultierenden Sedimenttransport und die wesentliche Ursache für mögliche Sedimentkreisläufe. Sie müssen daher bei der Konzeption und der Umsetzung einer Sedimentmanagementstrategie adäquat berücksichtigt werden.

In diesem Beitrag soll am Beispiel der Tideelbe gezeigt werden, welche Arten von Daten, Modellierungen und Analysewerkzeugen für eine qualitative und quantitative Beschreibung der Sedimenttransportvorgänge in einem Ästuar erforderlich sind. Die Methoden können zur Untersuchung von Sedimentmanagementoptionen herangezogen werden.

In Kapitel 2 erfolgt ein Abriss der historischen Entwicklung des Elbeästuars und in Kapitel 3 eine Beschreibung des in dieser Studie eingesetzten Modellierungssystems. In Kapitel 4 werden die Messungen und Modellergebnisse für den Sedimenttransport im Elbeästuar vorgestellt. Kapitel 5 befasst sich mit besonderen Anwendungen des Modells in ausgewählten Sedimentmanagementaufgaben.

2 Das Elbeästuar - Überblick

Das Elbeästuar gehört zu den wichtigsten deutschen Schifffahrtsstraßen. Die Elbmündung ist im Südwesten der Deutschen Bucht gelegen, das Wehr Geesthacht markiert die Tidegrenze. Die Entfernung vom Wehr bis zu der circa 15 km breiten Mündung beträgt über 160 km (Abb. 1).

Im Laufe der Jahrhunderte wurde das Elbeästuar durch mehrfache Eingriffe an die veränderten Anforderungen der Seeschifffahrt angepasst. Zwischen 1860 und 1999 wurde die Fahrrinne um bis zu 10 m vertieft. Des Weiteren erfolgten im Laufe der letzten 50 Jahre unterschiedliche Maßnahmen wie etwa der Bau des Wehrs Geesthacht oder die Absperrung von Nebenarmen, Verfüllungen von Hafenbecken, Eindeichungen und Einpolderungen. Die Morphologie des Elbeästuars ist heute gekennzeichnet durch die tiefe zum Hamburger Hafen führende Fahrrinne, landwärtig ein komplexes System von Inseln, Nebenflüssen und Nebenarmen sowie seeseitig ausgedehnte Wattflächen und Gezeitenrinnen.

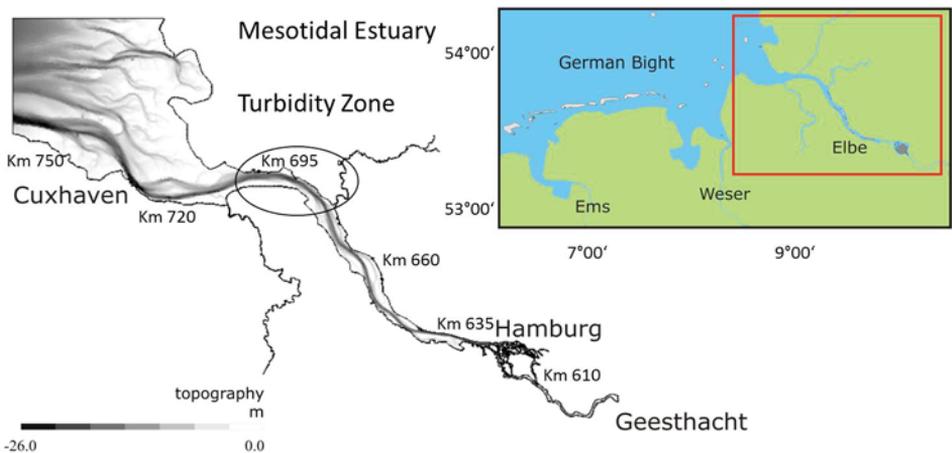


Abbildung 1: Elbeästuar: Geographische Lage und Ortsbezeichnungen.

Anthropogene Eingriffe haben Veränderungen in der Tidecharakteristik und bei den Feststofftransportprozessen ausgelöst. Abb. 2 zeigt das mittlere Tidehoch- und Tideniedrigwasser am Gezeitenpegel St. Pauli, Hamburg, von 1900 bis 2010. Aufgrund einer Absenkung des Tideniedrigwassers und einer Erhöhung des Tidehochwassers ist der Tidehub beträchtlich gestiegen (1 m in den letzten 35 Jahren). Die Asymmetrie der Tidekurve verstärkt sich, das heißt der Flutstrom erfolgt verkürzt jedoch mit höheren Geschwindigkeiten (steilerer Flutast), die Stauwasserdauer zwischen Flut und Ebbe ist verlängert, und der Ebbstrom ist verlängert (flacherer Ebbeast) mit entsprechend verringerten Strömungsgeschwindigkeiten. Das veränderte hydrodynamische Regime bildet wahrscheinlich die Hauptursache für den verstärkten Stromauftransport von Sediment durch Tidal Pumping. Mit dem starken Flutstrom wird Sediment stromaufwärts transportiert, setzt sich während Stauwasserdauer ab, sodass geringere Sedimentmengen mit einem schwächeren Ebbstrom stromabwärts transportiert werden. Der resultierende Sedimenttransport hängt von der Intensität des Oberwasserabflusses ab (Kapitel 4.2).

Häufige Unterhaltungsbaggerungen an der Schifffahrtsrinne sind erforderlich, um die Sicherheit des Schiffsverkehrs zu gewährleisten. Der Bedarf an Unterhaltungsbaggerungen stieg deutlich seit der letzten Vertiefung im Jahr 1999, vor allem im oberen Teil des Ästuars bei Hamburg (Abb. 3). Die Grafik zeigt darüber hinaus eine Veränderung bei der Managementstrategie für feine Sedimente. Seit 2008 wurde sämtliches stromabwärts von Hamburg ausgebaggerte Feinsedimentgut an Verbringstellen in der Trübungszone umgelagert (Abb. 1), um so die Sedimentkreisläufe zu vergrößern. Infolgedessen stiegen die Baggeraufwendungen im Bereich des Osteriffs.

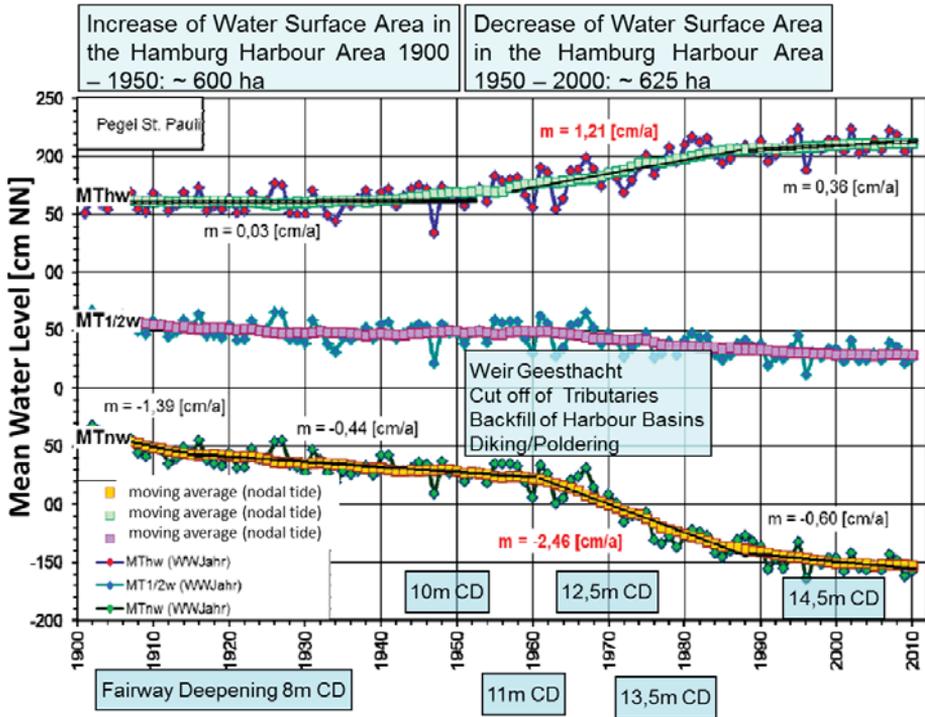


Abbildung 2: Mittleres Tidehoch- und Tideniedrigwasser am Gezeitenpegel St. Pauli, Hamburg, von 1900 bis 2010. Bedeutende anthropogene Eingriffe sind gekennzeichnet. Abbildung entnommen aus: <http://www.portal-tideelbe.de/Projekte/FRA1999/index.html>, modifiziert.

Der als „östliche Mittelrinne“ bezeichnete Abschnitt des äußeren Ästuars zeigt ebenfalls einen deutlich erhöhten Wert. Die Baggergutmenge verdoppelte sich im Jahr 2008, und auch in benachbarten Abschnitten erhöhten sich die Baggeraufwendungen. Die Ursache für diesen starken Anstieg ist in der großräumigen Morphodynamik der Außenelbe zu suchen, die sich aus einer Kette ausgeprägter hydrologischer und meteorologischer Ereignisse ergibt. In der Wintersaison 2007/2008 kam es zu einer beträchtlich erhöhten Anzahl von Gezeitenhochwasserereignissen (Thw > 2,40 m NHN) (BAW 2013). Die hydrodynamische Belastung der Flachwasserbereiche im Wattenmeer durch Wellen- und Strömungsangriffe war höher und größere Feststoffmengen wurden bewegt.

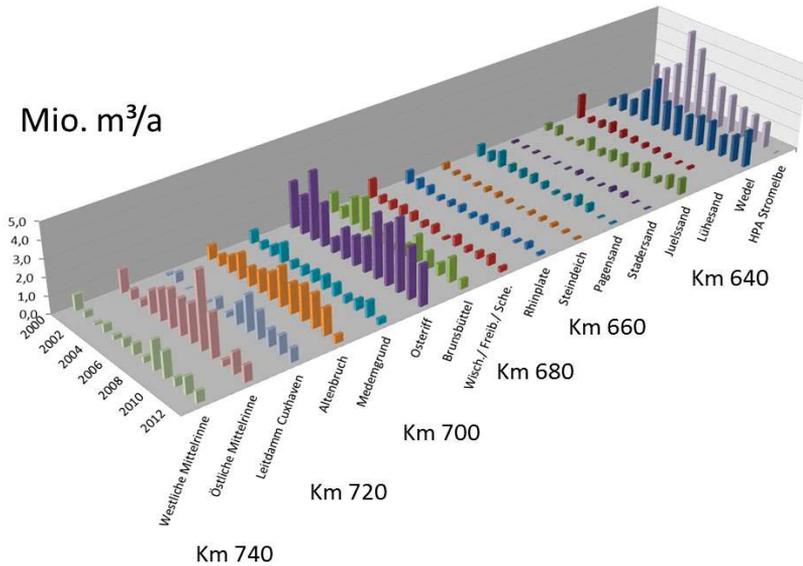


Abbildung 3: Unterhaltungsbaggerungsaufkommen im Elbeästuar von 2000 bis 2012. (Datenquelle: Baggerbüro Küste, GDWS-Nord).

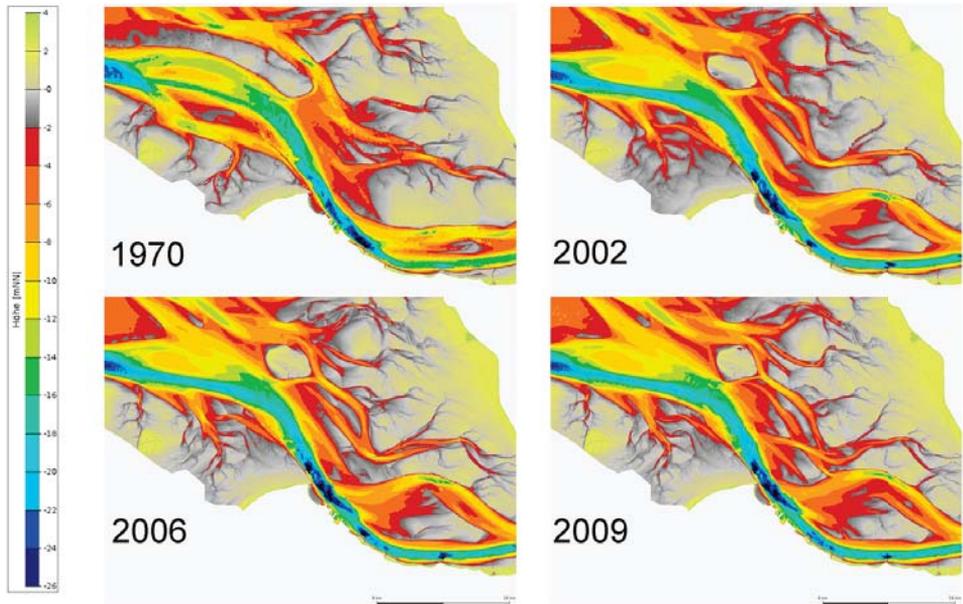


Abbildung 4: Morphologische Entwicklung der Außenelbe von 1970 bis 2009.

Die morphologische Entwicklung der Außenelbe ist von großer Bedeutung, einerseits im Hinblick auf die Baggermengen, andererseits aber auch im Hinblick auf die Genese des Wattenmeers als wichtigem Lebensraum und seiner Bedeutung für den Küstenschutz. Die Morphologie der Außenelbe beeinflusst darüber hinaus die Hydrodynamik der

gesamten Tideelbe, indem sie im äußeren Bereich des Ästuars für einen Abbau der Tideenergie sorgt. Die morphologische Entwicklung der letzten 40 Jahre ist in Abb. 4 dargestellt. Die Einflüsse des Leitdamms „Kugelbake“ nördlich von Cuxhaven sind besonders ausgeprägt. An manchen Stellen kommt es zum Verlust von Millionen Kubikmeter Material, an anderen Stellen müssen zur Unterhaltung der Fahrrinne Millionen Kubikmeter Sediment ausgebaggert werden.

Alle diese Fragestellungen erfordern die Beobachtung, wissenschaftliche Untersuchung und Systemanalyse der Sedimenttransportprozesse unter Verwendung moderner numerischer Methoden. Es gilt, die kausale Wirkungskette, die zu diesen offensichtlich auf anthropogene Eingriffe zurückzuführenden Veränderungen geführt hat, besser zu verstehen.

3 Modellsystem

Die in diesem Beitrag beschriebenen Modellläufe werden mit dem Strömungs- und Schwebstofftransportmodell UnTRIM in Verbindung mit dem morphologischen Modell SediMorph sowie - für einige Anwendungsfälle - in Verbindung mit dem Modul DredgeSim zur Simulation des Baggerns und Verklappens durchgeführt.

- UnTRIM ist ein Berechnungsmodell zur Lösung unterschiedlicher zwei- und dreidimensionaler Differenzialgleichungen zur Beschreibung hydrostatischer und nicht-hydrostatischer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche (CASULLI und WALTERS (2000); CASULLI und ZANOLLI (2002, 2005); LANG 2005).
- Bei SediMorph handelt es sich um ein Softwarepaket zur zwei- und dreidimensionalen Simulation von Kornfraktionen und Transportprozessen im und am Boden von Gewässern (BAW 2005).
- Durch den Einsatz von DredgeSim lassen sich Bagger- und Verklappungsvorgänge in freifließenden Gewässern berücksichtigen. Dadurch können anthropogene Einflüsse auf den Sedimenttransport und die Morphologie simuliert und Unterhaltungsstrategien entwickelt und bewertet werden, und dies abgestimmt auf unterschiedliche Optimierungskriterien (z. B. Minimierung von Baggerkosten). DredgeSim kann auf zwei unterschiedliche Arten zur Anwendung kommen. In beiden Fällen muss der Anwender Bagger- und Verbringstellen definieren. Datum, Zeit und Menge des entnommenen Baggerguts und seine Unterbringung werden vom Anwender im zeitgesteuerten Unterhaltungsmodus vorgegeben. Im kriteriengesteuerten Unterhaltungsmodus hingegen erfolgen Baggerungen nach vorgegebenen Baggerkriterien, z. B. wenn Sedimentablagerungen in einer Schifffahrtsrinne die Nutzbarkeit der Schifffahrtsrinne beeinträchtigt. Dieses Simulationsmodul wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der BAW und der Universität der Bundeswehr München entwickelt (MAERKER und MALCHEREK 2007).

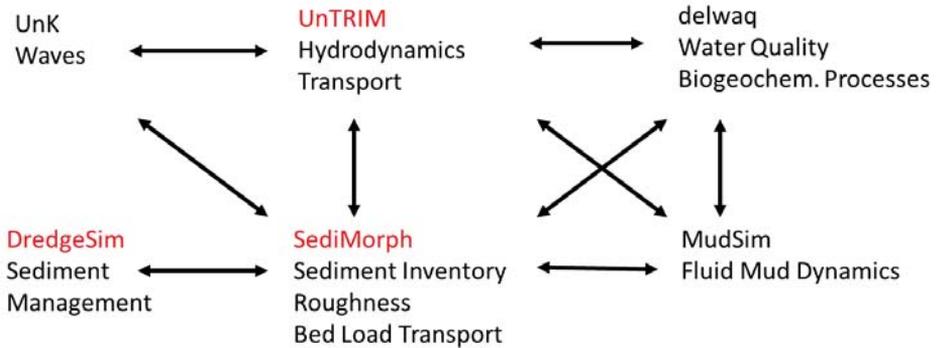


Abbildung 5: Simulationsmodule des BAW-Modellsystems. Die wichtigsten Module für die vorliegende Studie sind in Rot hervorgehoben.

Abb. 5 zeigt das Interaktionsschema der in den Anwendungsfällen eingesetzten Simulationsmodule. Das Modellierungssystem enthält alle nötigen Simulationsmodule, mit denen es als Werkzeug zur Vorhersage der Reaktionen des Ästuars auf die vorgeschlagenen Maßnahmen dienen kann. Die im vorliegenden Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden mit validierten Modellen des Elbeästuars erzeugt (BAW 2006, 2012)

4 Sedimenttransport im Elbeästuar

4.1 Messungen

Im Rahmen besonderer Messkampagnen müssen Naturmessdaten von Sedimentkonzentrationen und Transportraten zur Verwendung bei der Kalibrierung und Validierung erhoben werden. Zur Verbesserung unseres Verständnisses des Schwebstoffregimes und zum Aufbau einer Datenbank zur Validierung des numerischen Modells wurde 2006 ein mittelfristiges Messprogramm eingeleitet (und 2010 und 2011 wiederholt).

Das Naturmessungsprogramm umfasst das gesamte Elbeästuar und liefert unter anderem Daten zu Schwebstoffkonzentrationen und -transportraten. Die Messungen werden mit Acoustic Doppler Current Profilern (ADCP) durchgeführt, da diese Geräte in der Lage sind, Daten über (beinahe) das gesamte Tiefenspektrum in einer zeitlichen und räumlichen Auflösung zu liefern, so dass sie für den Vergleich mit den Ergebnissen numerischer Modelle äußerst geeignet sind. Einige Messergebnisse entlang Querprofilen werden in diesem Beitrag vorgestellt. Weitere Messergebnisse und zusätzliche technische Informationen finden sich bei MAUSHAKE und AARDOM (2007) sowie MOL (2007).

Die Naturmessungen wurden im Herbst 2006 durchgeführt. In diesem Zeitraum war der Oberwasserabfluss geringer als $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Insgesamt drei Querprofilmessungen wurden durchgeführt, wobei jede ein charakteristisches hydrographisches Regime repräsentiert (Cuxhaven: Meereszone; Rhinplatte: Trübungszone; Hamburg: Flusszone). Die Ganztidmessungen umfassen mehr als 200 schiffsgestützte Querprofilmessungen auf drei Transekten mit etwa 160 Kalibrierungsprofilen und über 300 Wasserproben.

Abb. 6 zeigt einige gemessene Verteilungen von Schwebstoffkonzentrationen für drei Querprofile. In jedem Fall wurde die maximale Konzentration während des Ebbstroms und des Flutstroms für jedes Profil gewählt. Die Transportraten und die integralen Flüsse

können unmittelbar aus den Messdatensätzen berechnet werden, da mit den ADCPs letztlich nicht nur Strömungsgeschwindigkeiten, sondern auch Schwebstoffkonzentrationen gemessen bzw. berechnet werden können. Die gemessenen Sedimentkonzentrationen, Transportraten und -geschwindigkeiten sind in Abb. 7 als querprofilintegrierte Werte dargestellt.

Querprofil bei Hamburg:

Die maximalen Flutkonzentrationen an der Zufahrt zum Hamburger Hafen (Querprofil Hamburg) sind sehr viel höher als die maximalen Ebbekonzentrationen. Spitzenwerte der mittleren gemessenen Konzentrationen von über 0,4 g/l werden während der Flut erreicht, woraufhin ein Rückgang auf 0,05 g/l während Stauwasserdauer vor Eintreten der Ebbe erfolgt (Abb. 7). Aufgrund der beträchtlichen Gezeitenasymmetrie in diesem Teil des Ästuars ist der Ebbstrom langsamer als der Flutstrom. Daher sind die Feststoffkonzentrationen während Ebbe geringer als während der Flut und erreichen Höchstwerte von 0,2 g/l. Während Stauwasser vor Eintreten der Flut verringern sich die Konzentrationen auch hier – auf 0,05 g/l. Die berechneten Transportraten sind ein deutliches Anzeichen eines flutstromdominierten Transportregimes in diesem Bereich: Während des Flutstroms wurde ein Transport von 27.000 t gemessen, während des Ebbstroms nur 13.000 t.

Querprofil bei Rhinplatte:

In der Trübungszone des Elbeästuars (Querprofil Rhinplatte) steigt die Konzentration in manchen Bereichen auf über 2 g/l, beispielsweise an den Rändern der Fahrrinne (Abb. 6). Nahe dem Boden sind höhere Werte zu erwarten, jedoch reicht die Messmethode hierfür nicht. Während der maximalen Flutströmung werden Werte der mittleren (querprofilintegrierten) gemessenen Konzentrationen von über 0,6 g/l erreicht, woraufhin ein Rückgang auf 0,10 g/l während Stauwasserdauer vor Eintreten der Ebbe erfolgt (Abb. 7). Die Feststoffkonzentrationen während Ebbe sind höher als während der Flut und erreichen Höchstwerte von 0,7 g/l. Diese Höchstkonzentration am Ende des Ebbstroms ist wahrscheinlich auf einen schlickigen Abschnitt einige Kilometer stromauf von diesem Querprofil zurückzuführen. Dies weist nicht notwendigerweise auf ein ebbstromdominiertes Transportregime hin, weil die Länge des Querprofils, die mit dem Schiff abgefahren werden konnte, bei Ebbe kürzer war und somit Seitenbereiche mit geringeren Sedimentkonzentrationen nicht berücksichtigt werden konnten. Sowohl während des Flutstroms als auch während des Ebbstroms betrug der gemessene Schwebstofftransport ca. 72.000 t.

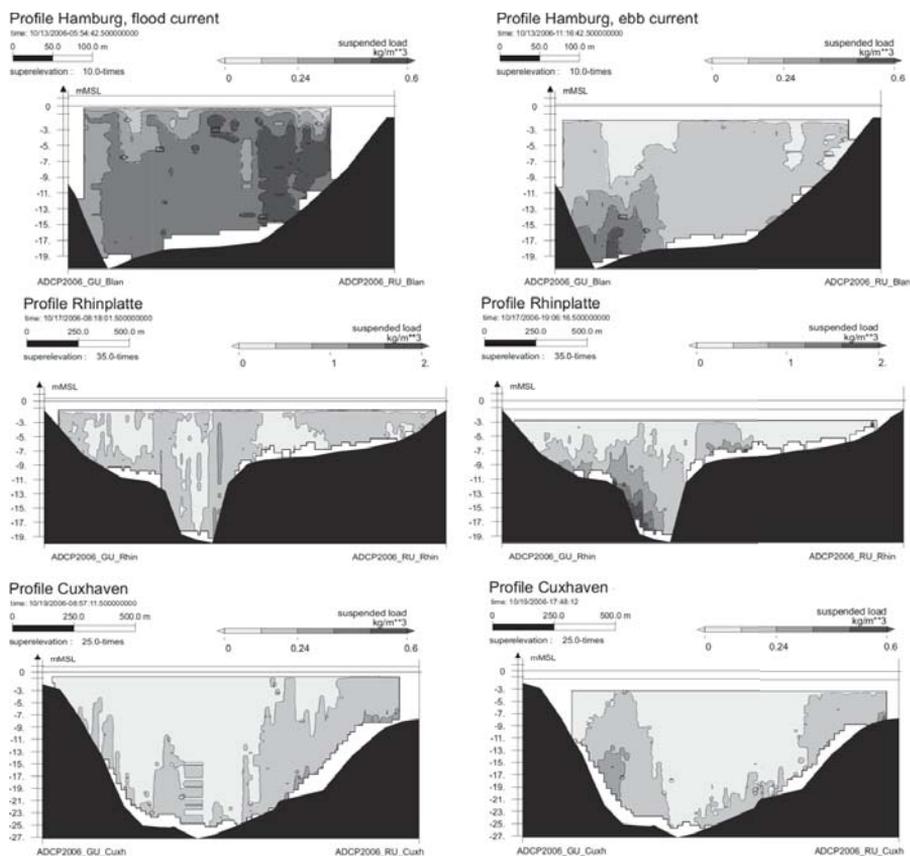


Abbildung 6: Maximale gemessene Sedimentkonzentrationen an den Querprofilen Hamburg/Blankenese, Glückstadt/Rhinplatte und Cuxhaven während Flut und Ebbe. Am Querprofil Glückstadt/Rhinplatte wurde der Maßstab an die höheren Sedimentkonzentrationen in diesem Bereich angepasst.

Querprofil bei Cuxhaven:

Die geringsten Konzentrationen wurden am marinen Transekt nahe Cuxhaven gemessen. Die maximalen Ebbstromgeschwindigkeiten treten im westlichen Bereich des Profils auf, bei Flut finden sich die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im östlichen Bereich des Profils. Entsprechend unterschiedlich zeigen sich die Schwebstoffkonzentrationsprofile in Abb. 6. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich wird die Morphologie hauptsächlich vom Sandtransport bestimmt. Die durchschnittlichen Sedimentkonzentrationen sind gering und schwanken zwischen 0,02 g/l und 0,11 g/l mit einem tidegemittelten Wert von 0,07 g/l (Abb. 7). Sowohl während Flut als auch während Ebbe wurde eine transportierte Schwebstoffmenge von 30.000 t gemessen.

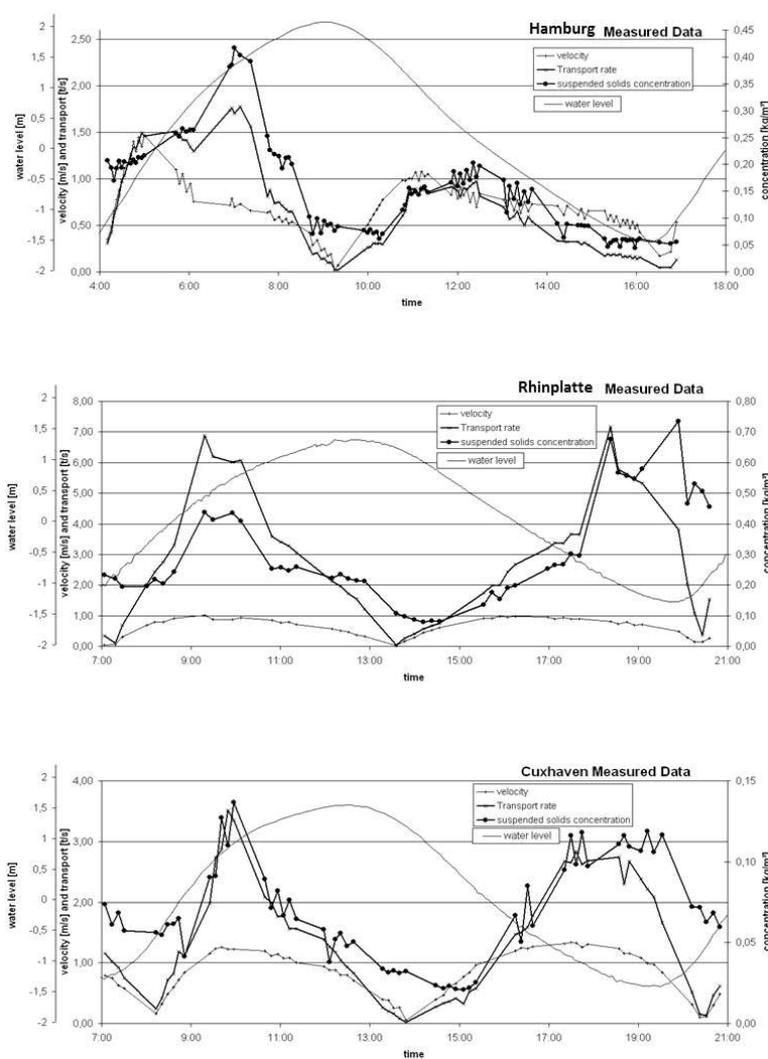


Abbildung 7: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten, Sedimentkonzentrationen und Transportraten an den Querprofilen Hamburg/Blankenese (obere Grafik), Glückstadt/Rhinplatte (mittlere Grafik) und Cuxhaven (untere Grafik). Die Werte sind über die Querschnittsfläche gemittelt.

4.2 Modellergebnisse

Diese Daten wurden im Kalibrierungsprozess verwendet. Das ortsspezifische Modell wurde zunächst anhand der bathymetrischen und hydrologischen Bedingungen des Jahres 2006 kalibriert. Im Laufe des Kalibrierungsprozesses wurde auch der Einfluss von Sinkgeschwindigkeitsformulierungen untersucht. Dieser Vorgang kann hier nicht im Detail beschrieben werden. Eine Haupteckkenntnis war, dass sich keine der getesteten Sinkgeschwindigkeitsformulierungen für das gesamte Ästuar eignet. Der Modellaufbau mit zwei Sedimentfraktionen mit jeweils konstanter Sinkgeschwindigkeit lieferte die besten

Resultate. Flokkulationsvorgänge, die wahrscheinlich für das starke Absinken der Sedimentkonzentrationen während des Stauwassers verantwortlich sind, sind im Modell jedoch noch nicht in befriedigendem Maße berücksichtigt. Trotz dieser Schwäche sind die mittleren mit dem Modell berechneten Sedimentkonzentrationen und -transportraten qualitativ und quantitativ für das gesamte Elbeästuar in einem akzeptablen Bereich, das heißt, das Modell reproduziert einigermaßen die allgemeine Charakteristik der Sedimentdynamik im Ästuarsystem.

Abb. 8 zeigt einen Vergleich zwischen den gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentkonzentrationen am Querprofil Glückstadt/Rhinplatte. Allgemein ist zu sehen, dass die gemessenen Werte eine größere Streuung aufweisen und die modellierten Werte gleichmäßiger ausfallen. Die vertikale Verteilung der Sedimentkonzentrationen ist in den Messungen ausgeprägter. Die hohen bodennahen Konzentrationen scheint das Modell zu unterschätzen, andererseits sind gemessene Daten in dieser Region oft nicht valide.

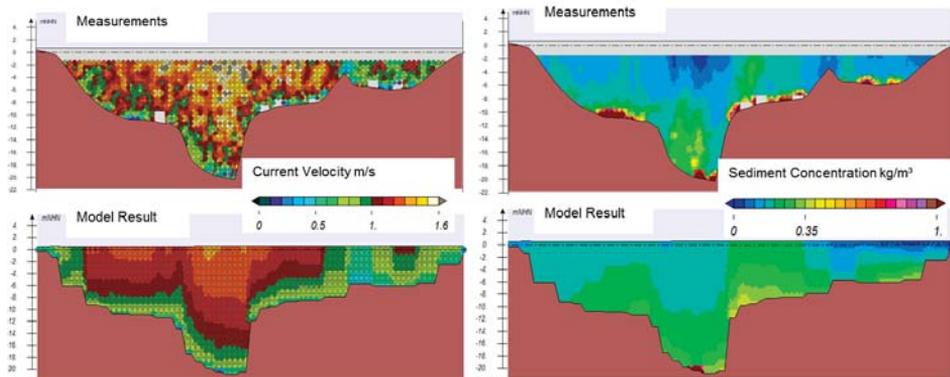


Abbildung 8: Elbemodell 2006: Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten (Grafik links) und Sedimentkonzentrationen (Grafik rechts) am Querprofil Glückstadt/Rhinplatte.

Messergebnisse und Modellergebnisse für einen ähnlichen Aufbau des Elbemodells 2010 sind in Abb. 9 dargestellt. Die gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeiten, Sedimentkonzentrationen, Abflüsse und Transportraten am Querprofil bei Elbe-Km 689 werden über die Querschnittsfläche gemittelt. Hierbei ist anzumerken, dass bei diesem Kalibrierungsvorgang das Modell bereits 6 Monate lang in Betrieb war, bis es mit gemessenen Daten verglichen wurde, das heißt, die hydrologische Historie ist in den Modellergebnissen inhärent. Im Großen und Ganzen passt das Modell gut zu den Messdaten. Das Modell wird für die in Kapitel 5.3 beschriebene morphodynamische Anwendung verwendet.

In weiter speziellen Modellanwendungen wird nur der Oberwasserabfluss variiert ($Q = 180, 720$ and $1260 \text{ m}^3/\text{s}$), um seinen Einfluss auf hydrodynamische und Sedimenttransport-Prozesse zu untersuchen. Alle sonstigen Eingangsparameter, auch die Ausgangsbedingungen wie etwa Sedimentverteilung und Salzgehaltsverhältnisse sowie andere Randbedingungen und -werte waren in den Modellläufen einheitlich.

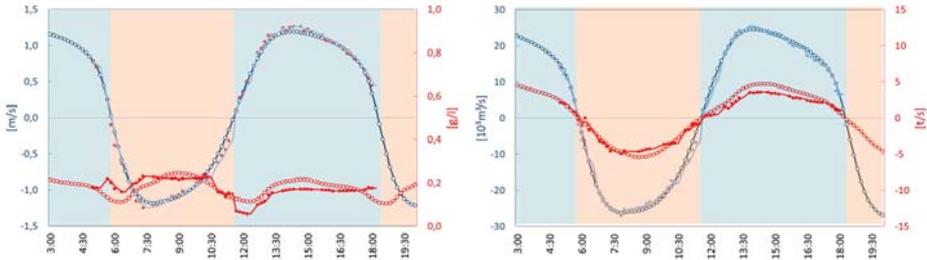


Abbildung 9: Elbemodell 2010: Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentkonzentrationen (Grafik links) und zugehörige Abflüsse und Transportraten (Grafik rechts) am Querprofil bei Elbe-Km 689. Die Werte sind über die Querschnittsfläche gemittelt.

Die Modellläufe erstrecken sich über einen Simulationszeitraum von vier Wochen (2. Juni bis 30. Juni 2006). Die Analyse der Modellergebnisse beginnt nach neun Tagen Simulation (11. Juni 2006 bis 25. Juni 2006). Während dieses Zeitraums (ein Spring-Nipp-Zyklus) werden alle 10 Min. sämtliche Modellergebnisse gespeichert. Über mehrere Nachbearbeitungsschritte werden diese Daten analysiert, um Minima, Mittel und Maxima des Wasserstands, der Strömungsgeschwindigkeit, des Salzgehalts und der Sedimentkonzentration für jedes Element zu berechnen. Zusätzlich wird der Sedimenttransport durch definierte Querprofile und entlang definierter Längsprofile für jeden Modelllauf berechnet. Die Analyse liefert einen Satz von Größen, die für die Beschreibung des Systemverhaltens nützlich sind, und dient als eine Basis für den Vergleich unterschiedlicher Modellläufe.

Abb. 10 zeigt auf der rechten Seite Schwebstoffkonzentrationen entlang der Fahrrinne. Hierbei handelt es sich um zeitgemittelte Werte dreidimensionaler Modellergebnisse für einen Spring-Nipp-Zyklus. In allen Modellläufen gibt es ein Trübungsmaximum. Der höhere Süßwasserzufluss spült die Schwebstofffracht seewärts. In diesen Läufen treten höhere Sedimentkonzentrationen auf. Auf der linken Seite ist das Verhältnis zwischen den Schwebstofftransportraten während der Flut und während der Ebbe dargestellt. Dieser Wert gibt keinerlei Information zu Mengen, vielmehr charakterisiert er das Transportregime der Schwebstofffracht. Gemeinsam mit dem Wissen um die absoluten Transportraten stellt dieses Verhältnis ein wichtiges Kriterium vor allem für die Bewertung von Verbringstellen dar. Die höchsten Werte dieses Verhältnisses treten bei niedrigen Oberwasserabflüssen nahe dem Hamburger Hafen auf.

Es gibt zwei hydrodynamische Ursachen für dieses Transportverhalten – barokline Effekte aufgrund der Dichtegradienten und das Tidal Pumping – beide in Abb. 10 aufgezeigt. Der Einfluss barokliner Prozesse auf den Sedimenttransport ist groß. Die starke Dominanz des sohnahen Transports in Flutrichtung zwischen Cuxhaven und Brunsbüttel, welcher auch bei höheren Oberwasserabflüssen sichtbar wird, deutet auf weitere Sedimentkreisläufe im Elbeästuar hin. Darüber hinaus sagen die Modellläufe für niedrige oder mittlere Oberwasserzuflüsse einen deutlichen Sedimenttransport in Flutrichtung vorher, zumindest stromauf von Brunsbüttel. Die Ursache dieses Transportregimes liegt in der Tideasymmetrie (siehe Kapitel 2). Aufgrund dieses Transportregimes reichern sich in diesem Teil der Elbe langfristig feine Sedimente an und führen zu einem erhöhten Bedarf an Unterhaltungsbaggerungen.

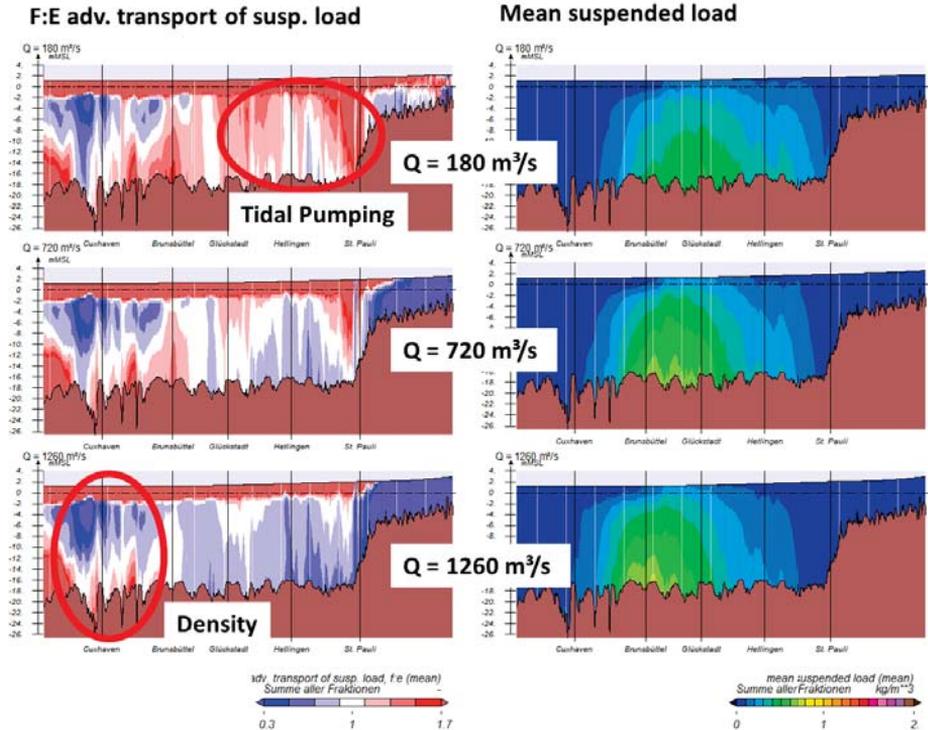


Abbildung 10: Flut/Ebbe-Verhältnis (F:E) des Schwebstofftransports (Grafik links) und der mittleren Schwebstofffracht (Grafik rechts) für die Oberwasserzuflüsse $Q=180 / 720 / 1260 \text{ m}^3/\text{s}$. 3D-Daten, gemittelt über einen Spring-Nipp-Zyklus. Besondere Eigenschaften sind durch rote Umkreisungen hervorgehoben.

4.3 Monitoring von Baggerarbeiten

Bagger- und Umlagerungsmaßnahmen führen zu Veränderungen in der Morphologie, den Sedimentkonzentrationen und somit zu Veränderungen im resultierenden Sedimenttransport. Die Ausbreitung von Sedimenten und Veränderungen in den Sedimentkonzentrationen können als ökonomische und ökologische Kriterien für den Vergleich und die Beurteilung realistischer Bagger- und Umlagerungsszenarien dienen (Ort, Gezeitenphase, Sedimenteigenschaften etc.). Für mittel- bis langfristige morphodynamische Simulationen werden auch detaillierte Daten tatsächlicher Bagger- und Umlagerungsmaßnahmen, oder zumindest Informationen zur angewendeten Sedimentmanagement-Strategie, benötigt.

In der Regel liegen nur Informationen zu jährlichen Baggeregutmengen für bestimmte Fahrrinnenabschnitte (Abb. 3) vor. Eine detaillierte räumliche und zeitliche Analyse dieser Daten ist nicht möglich, somit eignen sich diese Daten auch nicht für die Verwendung im Rahmen numerischer Simulationen.

Baggerdaten, die sich für einen Modelllauf eignen sollen, müssen die Bagger- und Umlagerungsvorgänge sehr detailliert beschreiben. Dazu sind u. a. erforderlich:

- Baggerpolygon zur Beschreibung des Baggerbereichs
- Datum und Uhrzeit der Baggerung
- Volumen und Dichte des Baggerguts
- Polygon zur Definition des Verbringbereichs
- Datum und Uhrzeit der Verbringung
- Mehrere Identifikationsnummern für die eindeutige Beschreibung des Baggerumlaufes

Sofern solche Daten vorliegen, lassen sich Bagger- und Umlagerungsvorgänge im Detail im Rahmen einer numerischen Simulation berücksichtigen. Seit 2009 ist die Mehrheit der im Elbeästuar eingesetzten Baggerschiffe mit Sensoren für das laufende Monitoring während des Betriebs ausgerüstet und diese Daten stehen nun für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Wenn das morphodynamische Modell nur durch Baggerdaten angetrieben wird, wird nur derjenige Teil der Bodenevolution sichtbar, der durch Baggervorgänge beeinflusst ist. Abb. 11 zeigt Baggerpolygone im Raum Osteriff und die daraus resultierende Sohlevolution basierend auf Monitoringdaten aus dem Jahr 2010.

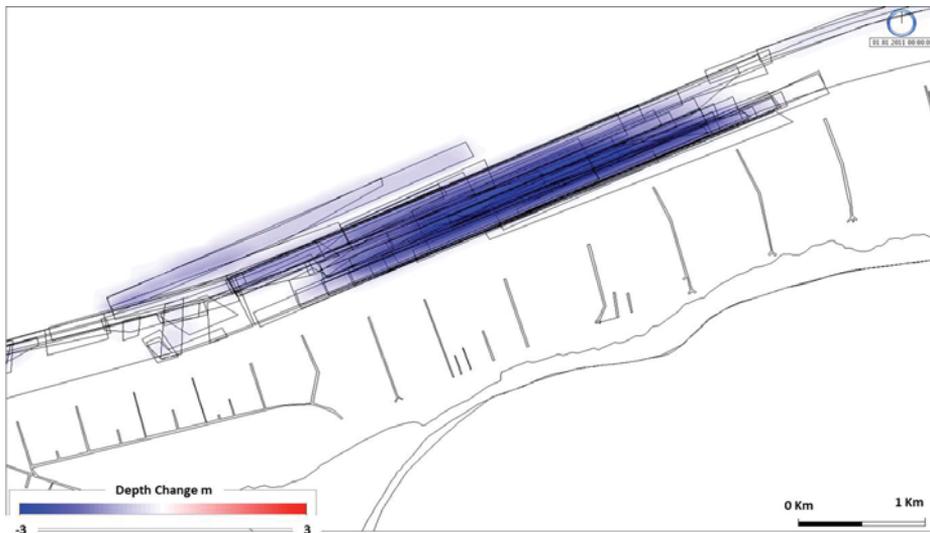


Abbildung 11: Baggerpolygone im Raum Osteriff und die daraus resultierende Sohlevolution basierend auf Monitoringdaten aus dem Jahr 2010.

5 Anwendung auf Sedimentmanagement-Aufgaben

5.1 Sedimentmanagement-Konzept

Das in Zusammenarbeit aller verantwortlichen Behörden ausgearbeitete Strombau- und Sedimentmanagementkonzept (HPA und WSV 2008) umfasst u. a. strombauliche Maßnahmen und eine optimierte Unterhaltung. Das Konzept befindet sich laufend in der Weiterentwicklung, bei gleichzeitiger Durchführung der vorgesehenen Maßnahmen (ENTELMANN 2012; BAW 2013; BfG 2013)

Hauptziel möglicher strombaulicher Maßnahmen ist es, den unerwünschten Auswirkungen der flutstromdominierten Tidecharakteristik und den damit verbundenen Sedi-

menttransporten entgegenzuwirken. Dies kann erreicht werden, wenn sich das Tidevolumen oberstromig vergrößern lässt und Möglichkeiten geschaffen werden, die Strömungsenergie der einlaufenden Tide stärker abzubauen. Mögliche Maßnahmen hierzu können die Errichtung hydraulischer Bauwerke sein, aber auch die Vergrößerung von Flachwasserbereichen in der Außenelbe und die Gewinnung zusätzlicher tidebeeinflusster Gebiete im oberen Teil.

Darüber hinaus werden optimierte Unterhaltungs- und Umlagerungsstrategien angestrebt, um anfallende Baggergutmengen zu reduzieren. In dieser Hinsicht ist es wichtig, Baggerkreisläufe zu erkennen, sie großräumiger zu gestalten oder zu durchbrechen, wenn es zum Rücktransport umgelagerten Baggerguts im Ästuar kommt. Eine Möglichkeit hierzu ist die Umlagerung feinkörniger Sedimente in den ebbstromdominierten Bereich. Größere Sedimente können dagegen strombaulich verwendet werden. Darüber hinaus können der Einfluss des Oberwasserzuflusses sowie die zeitabhängige Veränderung des Strömungsregimes zur Optimierung der Bagger-, insbesondere jedoch der Umlagerungsmaßnahmen ausgenutzt werden.

Durch den Bau mehrerer Sedimentfänge könnte das Absetzen der Sedimente gezielt forciert werden, um Akkumulationen in kritischen Bereichen zu verhindern. Auf diese Weise lassen sich Sedimentationsvorgänge in Ästuaren steuern und der Eintrag unbelasteter Sedimente in bereits schadstoffbelastete Hafenbecken wird verhindert.

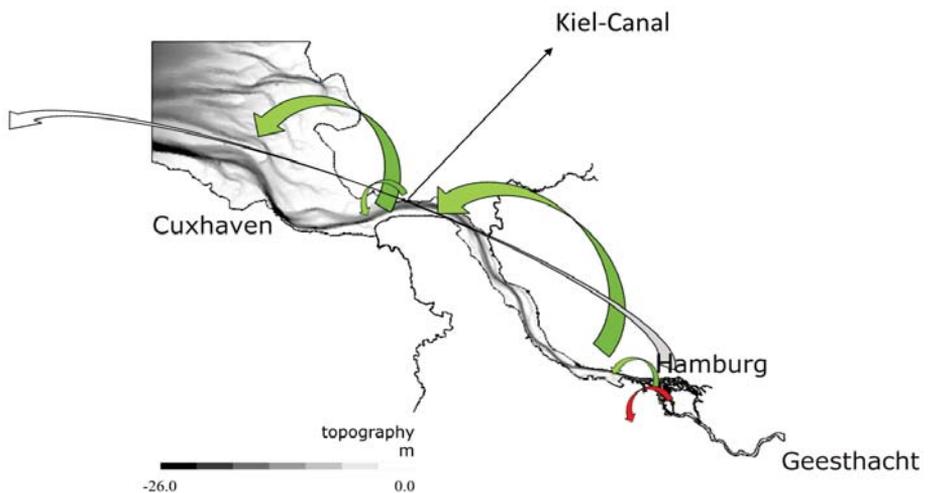


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Managementkonzepts für Feinsedimente, angewendet von 2005 bis 2011. Rote Pfeile markieren die Deponierung an Land.

Aktuell wird das meiste Baggergut im Ästuar selbst umgelagert (Abb. 12). Darüber hinaus verfügt die Hamburg Port Authority über eine einstweilige Genehmigung, gewisse Mengen Feinsediments in der Nordsee zu verklappen. So wurden etwa 1 Million m³ Feinsediment im Laufe der Jahre 2005-2011 aus dem Ästuar entfernt. Geringere Mengen, die mit unterschiedlichen aus oberstromig gelegenen Quellen antransportierten Schadstoffen belastet sind und sich im Hafen anlagern, müssen an Land behandelt und entsorgt werden. Diese Art der Bewirtschaftung erfordert noch immer die Behandlung und Deponierung von schadstoffbelastetem Baggergut. Die Verbesserung der Gewässergüte der

Elbe und Reinhaltung der Sedimente ist noch immer ein wichtiges Ziel, welches vollständig realisierbar wäre, wenn sich die Schadstoffeinleitung entlang der oberstromigen Zuflüsse stoppen ließe. Ein Beitrag hierzu ist das Entfernen schadstoffbelasteter Sedimente aus dem Hafen.

5.2 Untersuchung von Umlagerungsstellen

Das Modellsystem wurde angewendet, um den Einfluss der Umlagerungsstellen im Elbe-Ästuar zu untersuchen. Der Aufbau des Modells für diese Anwendung ist nahezu identisch mit den in 4.2 beschriebenen Untersuchungen, doch zusätzlich zum ursprünglichen Sedimentkataster werden drei weitere Fraktionen berücksichtigt. Diese Sedimentfraktionen (Fein-, Mittel- und Grobschluff) verfügen über physikalische Eigenschaften, die mit dem sonst verwendeten Sedimentinventar identisch sind. Diese Sedimente lagern in Umlagerungsbereichen, sind erodierbar und können durch die Gezeitenströmung transportiert werden.

Mit dieser Modellanwendung lässt sich das Transportverhalten verschiedener Arten von Sedimenten von unterschiedlichen Orten im Ästuar analysieren. Die Ausbreitung der markierten Sedimente zeigt, wie sich die Lage der untersuchten Umlagerungsstelle auswirkt. Basierend auf diesen Informationen und dem Wissen über Bagger- und Verklappungsstrategien lassen sich Sedimentkreisläufe erkennen.

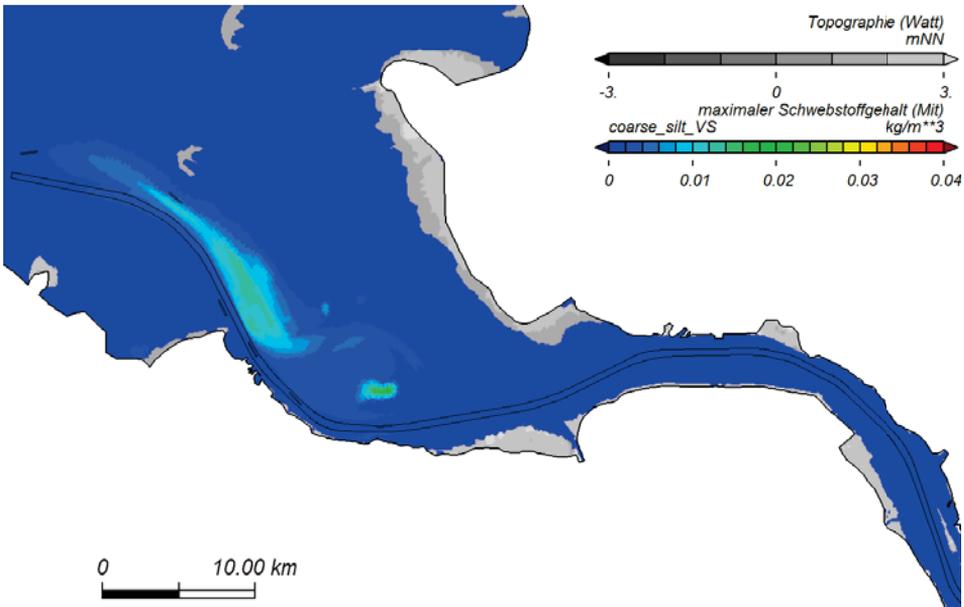


Abbildung 13: Ausbreitung feiner Sedimente von der Umlagerungsstelle bei Elbe-Km 738, erkennbar anhand der maximalen Sedimentkonzentrationen von an der Umlagerungsstelle erodiertem Grobschluff.

Die Methode wurde nicht nur auf alle neueren Umlagerungsstellen im Elbeästuar angewendet, sondern auch auf neue potenzielle Verbringstellen, die möglicherweise geeigneter sind (BAW 2012, 2013). Ein Beispiel aus diesen Untersuchungen ist die Verbreitung von

Grobschluff von einer Umlagerungsstelle bei Elbe-Km 738 – dargestellt in Abb. 13. Die bevorzugte Transportrichtung wird anhand der maximalen Sedimentkonzentrationen von an der Umlagerungsstelle erodiertem Grobschluff deutlich. Wasserbaulich ist dies ein geeigneter Ort, weil ein Sedimenttransport überwiegend nach Südost in Richtung der flachen Bereiche erfolgt, nicht jedoch in Richtung der Fahrrinne (schwarze Linie). So wird die Bildung von Wattenmeerbereichen unterstützt, oder zumindest der Materialverlust in diesem Bereich kompensiert.

5.3 Modellierung des Baggergeschehens

Zuletzt wurde das Modellsystem (Kapitel 3) zur Simulation der Hydro- und Morphodynamik des Jahres 2010 unter Berücksichtigung sämtlicher bekannter Bagger- und Umlagerungsmaßnahmen verwendet. Abb. 14 zeigt die modellierte Sohlevolution in der Mündung des Elbeästuars. Bagger- und Umlagerungsstellen sind erkennbar. Größerskalige morphologische Trends stimmen gut mit den beobachteten Veränderungen überein (Abb. 15), insgesamt scheint der für diesen Modelllauf verwendete Modellaufbau die Erosion in manchen Bereichen zu überschätzen. Nichtsdestoweniger ist dieses Modell ein unverzichtbares Werkzeug für die Bewertung unterschiedlicher Sedimentmanagementstrategien. Es kann für die Überprüfung von Management-Handlungsoptionen verwendet werden, und der Unterschied zwischen zwei Modellläufen zeigt den Einfluss der Variation.

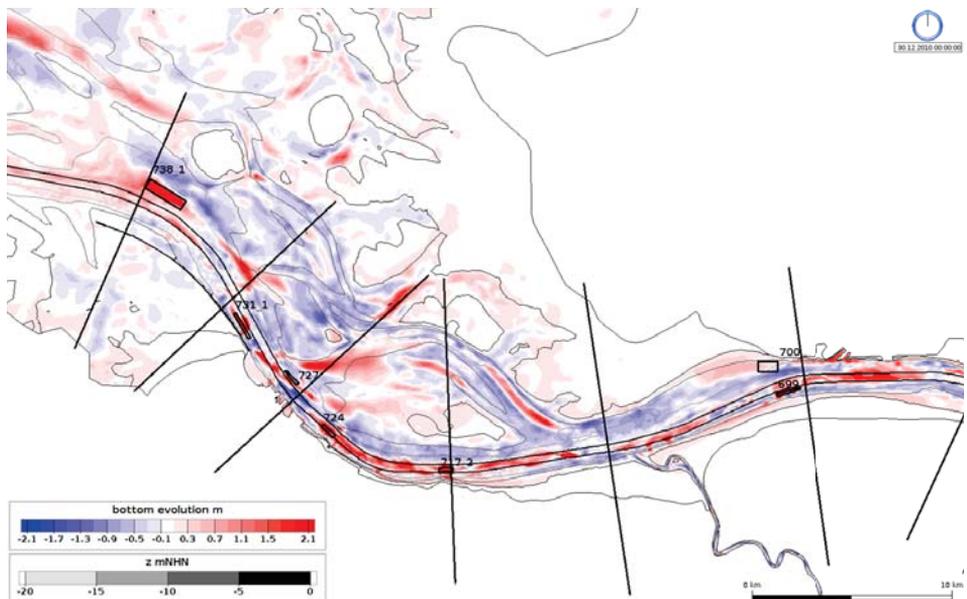


Abbildung 14: Modellierte Sohlevolution in der Mündung des Elbeästuars für das Jahr 2010. Ergebnis eines dreidimensionalen Modelllaufs. Sämtliche bekannte Bagger- und Umlagerungsmaßnahmen sind berücksichtigt. Bagger- und Umlagerungsstellen sind erkennbar. Die schwarzen Linien kennzeichnen die Grenzen zwischen Baggerbereichen entsprechend Abb. 3. Zahlen bezeichnen Flusskilometer.

Abschließend zeigt Abb. 15 den Unterschied in der Topographie zwischen 2011 und 2010. Aus dem Monitoring bekannte Baggerstellen sind als grüne Polygone gekennzeichnet. Die Sohlevolution in der Nähe der Umlagerungsstellen wird erkennbar durch das Verbringgeschehen beeinflusst, wie in Abb. 14 bereits verdeutlicht. Es gibt jedoch auch großräumigere morphologische Trends, die von den Umlagerungsstellen beeinflusst zu werden scheinen, z. B. die Ablagerungen südöstlich der Umlagerungsstelle bei Elbe-Km 738 (Abb. 13)

In der Mündung des Elbeästuars sind große morphologische Veränderungen zu beobachten. Ein besseres Verständnis der Ursachen dieser Veränderungen ist nötig, da der morphologische Zustand der Außenelbe einen beträchtlichen Einfluss auf die Gezeitendynamik des gesamten Ästuars ausübt. Soweit möglich sollten die angestrebten morphologische Entwicklungen durch eine flexible und adaptive Sedimentmanagement-Strategie flankiert werden.

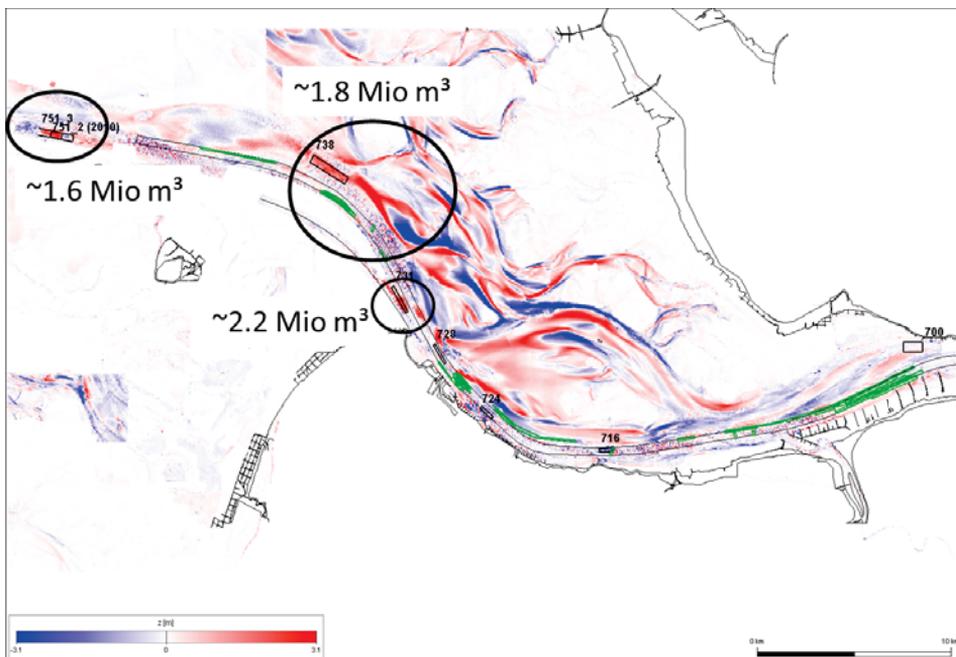


Abbildung 15: Topographieunterschiede 2011-2010. Baggerstellen sind als grüne Polygone gekennzeichnet. Die Sohlevolution in der Nähe der Umlagerungsstelle wird erkennbar durch das Verbringgeschehen beeinflusst.

6 Ausblick

Ein fachlich tiefgreifendes Verständnis der Sedimentprozesse und fundiertes Sedimentmanagement ist insbesondere im Gebiet der Nordseeästuarer unverzichtbar. Aus den dargestellten Zusammenhängen wird ersichtlich, dass beim Umgang mit dem Baggergut nicht nur die Minimierung der Kosten und Mengen, sondern auch weitere Zielsetzungen im Sinne einer nach Mehrfachzielsetzungen gesteuerten Optimierungsstrategie sinnvoll sind. Ein optimiertes Sedimentmanagement muss zukünftig alle genannten Prozesse

berücksichtigen können. Derzeit ist die Langzeitwirkung ständig wiederkehrender Sedimentmanagementmaßnahmen noch weitgehend unbekannt. Es fehlen noch eine Reihe wissenschaftlicher und praktischer Grundlagen. Diese wären für das Management unmittelbar nutzbar und könnten zum Systemverständnis beitragen. Es besteht daher ein Bedarf an der Weiterentwicklung bestehender Ansätze. Die Managementstrategie in adaptiver Art und Weise zu optimieren, stellt eine Daueraufgabe dar, weil sich die Ästuar-systeme unablässig hydromorphologisch durch menschliche und natürliche Einflüsse verändern.

7 Schriftenverzeichnis

- BAW: Model validation and system studies for hydrodynamics, salt and sediment transport in the Elbe Estuary - Basic information for the River engineering and sediment management concept, Version 1.0, Hamburg, 2012.
- BAW: Handlungsoptionen zur Optimierung der Unterhaltungsstrategie im Mündungstrichter der Tidelbe, Hamburg, 2013.
- BAW: Validierung des Elbmodells. Bundesanstalt für Wasserbau, 2006.
<http://www.zukunftelbe.de/Projektbuero/planaenderung/Downloads/h/h1/Anlage8.pdf>
- BAW: Mathematical module SediMorph – Validation document, Bundesanstalt für Wasserbau, 77 p., 2005.
http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-sedimorph.pdf
- BfG: Sedimentmanagement Tidelbe – Strategien und Potenziale - Systemstudie II. Ökologische Auswirkungen der Unterbringung von Feinmaterial. Band 1 (2), Endbericht. Im Auftrag des Wasser- und Schifffahrtsamtes Hamburg. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-1763, 2013.
- CASULLI, V. and WALTERS, R. A.: An Unstructured Grid, Three-Dimensional Model based on the Shallow Water Equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 32, 331-348, 2000.
- CASULLI, V. and ZANOLLI, P.: Semi-Implicit Numerical Modelling of Non-Hydrostatic Free-Surface Flows for Environmental Problems, Mathematical and Computer Modelling, 36, 1131-1149, 2002.
- CASULLI, V. and ZANOLLI, P.: High resolution methods for multidimensional advection-diffusion problems in free-surface hydrodynamics. In: Ocean Modelling, Vol. 10, 1-2, 137-151, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.06.007, 2005.
- ENTELMANN, I.: Optimierung von Unterhaltungsstrategien an der Tidelbe - Fragestellungen zum Sedimenttransport. In: Dynamik des Sedimenthaushaltes von Wasserstraßen. 14. Gewässermorphologisches Kolloquium der BfG, Koblenz, 2012.
- HPA und WSV – Hamburg Port Authority and Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes: Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tidelbe. Hamburg/Kiel, 2008. <http://www.kuestendaten.de/publikationen/index.html>
- LANG, G.: Mathematical model UnTRIM – Validation Document. Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), 2005.
<http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/PDF/vd-untrim.pdf>

- MAERKER, C. und MALCHEREK, A.: DredgeSim – Erstellung der Grundversion eines Modul-pakets zur morphodynamisch-numerischen Simulation von Unterhaltungsmaßnahmen. Bericht im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, 2007.
- MAUSHAKE, C. and AARDOM, J.: Suspended sediment measurements on the river Elbe using ADCP, Underwater Acoustic Measurements 07 UAM07 proceedings, Heraklion, Greece, 2007.
- MOL, J.: Suspended Sediment Measurements in the Elbe, AquaVison reports AV_DOC_070101, AV_DOC_070102 and AV_DOC_070301 contracted by BAW-AK, Hamburg, 2007.