

Abschlußbericht  
zum KFKI/BMBF – Projekt

03 KIS 029

Simulation morphodynamischer Vorgänge  
unter dem Einfluß von Dichteeffekten  
am Beispiel der Einbringung von Baggergut

Mai 2005

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03KIS029 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## VORWORT

Baggergutumlagerungen im Ästuarbereich sind gängige Praxis im alltäglichen Bemühen, die für die Seeschifffahrt nötigen und vom Bund garantierten Mindesttiefen in den Fahrrinnen und Zufahrten der Seehäfen gewährleisten zu können.

Aufgrund der rasanten Entwicklung der Schiffsgrößen und der resultierenden Tiefgänge in den letzten Jahrzehnten sind die ausreichenden Wassertiefen im Anfahrtsweg der Seehäfen an der deutschen Nordseeküste ein wesentlicher Standortfaktor geworden, der nur durch fortwährende Vertiefungen der Zufahrtswege dauerhaft erhalten werden kann.

Die angestrebten -und oft mit erheblichem Aufwand hergestellten und unterhaltenen- Wassertiefen richten sich daher unter zunehmender Vernachlässigung morphologischer Gleichgewichtsbetrachtungen verstärkt nach den global gültigen Anforderungen der internationalen Seeschifffahrt. Die Attraktivität eines Seehafens und damit dessen konjunkturelle Perspektive ist aus diesem Grunde direkt an die schiffbare Wassertiefe im Zufahrtsbereich und ihre dauerhafte Bereitstellung gebunden.

Als Betreiber der Wasserstraßen sind die Wasser- und Schifffahrsdirektionen und Landesbehörden in der Pflicht, die Erfüllung der beschriebenen Anforderungen zu gewährleisten. Um Planungssicherheit herzustellen, wird die Einhaltung festgelegter Mindesttiefen garantiert.

Aus diesem Grunde wurden und werden die Ästuar- und Mündungen der deutschen Nordseezuflüsse, soweit für die Schifffahrt erforderlich, seit etwa 150 Jahren sowohl durch strombauliche Maßnahmen als auch kontinuierliche Unterhaltungsbaggerungen auf Tiefen gehalten, die im natürlichen Gleichgewichtszustand nicht anzutreffen waren. Je deutlicher diese Differenz zwischen Ist- und Gleichgewichtszustand ausfällt, um so ausgeprägter stellt sich – vereinfachend gesagt – das Bestreben des Gewässers, die Gleichgewichtsbedingungen durch erhöhte Auflandung wiederherzustellen, ein.

Die Außen- und Unterweser sind beispielsweise seit 1875 in mehreren Ausbaustufen stetig von ursprünglichen 5 m schiffbarer Tiefe auf nunmehr 14 m unter SKN vertieft worden, ähnlich stellt sich die Situation in Elbe und Ems dar. Die stetig zunehmenden Baggergutmengen der Unterhaltungsbaggerei spiegeln dabei die zunehmenden Netto-Auflandungsraten in den Gewässern wider. Der Kostenrahmen dieser für die Erhaltung der wirtschaftlichen Situation maßgeblichen Arbeiten ist erheblich. So wurden in den letzten Jahren allein in der Tideelbe etwa 8-10 Millionen m<sup>3</sup> jährlich gebaggert.

Solche Baggergutmengen sind an Land kaum oder gar nicht zu verbringen, daher sind Baggergutumlagerungen gängige Praxis.

Das zur Auflandung beitragende Sediment hat zwei wesentliche Quellen. Für den tidebeeinflussten Bereich eines Flusses gilt aufgrund der Oberwasserzuflüsse, daß während der Ebbdauer eine größere Wassermenge den Fluß verläßt, als über die Flutperiode hineinströmt. Unter anderem bewirkt die Differenzmenge (der Oberwasserabfluß) im morphologisch-dynamisch ausgeglichenen Zustand die Selbsträumung des Systems. Der Oberwasserabfluß

transportiert dabei erhebliche Mengen suspendierten Feststoffes mit hohen Anteilen organischer Substanz in den Ästuarbereich. Aufgrund des seewärts zunehmenden Salzgehaltes stirbt in dem als Trübungszone bezeichneten Übergangsbereich ein Großteil der Süßwasserorganismen ab, was zur Bildung von organischen Feinstoffen führt, die verstärkt sedimentieren. Analog dazu erhöht sich die Sedimentmenge biogenen Ursprungs durch den Eintrag von halophilen Organismen in die Trübungszone, die aufgrund des dort abnehmenden Salzgehaltes das gleiche Schicksal ereilt.

Die zweite Sedimentquelle kommt durch die häufig im Ästuar auftretenden salzgehaltsbedingten (baroklinen) Dichte- und Schichtungseffekte zustande. Diese bewirken eine dreidimensionale Zirkulation infolge derer sohnah verstärkt Sediment aus dem Ästuar nach oberstrom transportiert wird.

In einem spezifischen, als Null-Zone bezeichneten Bereich des Systems hebt sich der durch das Oberwasser verursachte, netto stromab gerichtete Transport mit dem durch den baroklinen Effekt getriebenen und netto stromauf gerichteten Transport auf. Insbesondere dort kommt es zu verstärkter Sedimentation.

Das aufgelandete Sediment wird im Rahmen der Unterhaltungsbaggerei in den Fahrrinnen und Hafenzufahrten gebaggert und an definierten Verbringungsstellen, die sich häufig im äußeren Ästuarbereich befinden, eingebracht. Die Intention dieser Baggergutumlagerungen ist, das Baggergut in Bereiche zu verbringen, die zum einen in hydraulischer bzw. sedimentdynamischer, zum anderen in nautischer Hinsicht für den dauerhaften Verbleib des Materials geeignet sind. Das so verbrachte Sediment soll den Auflandungsprozessen in den Baggerstrecken möglichst dauerhaft entzogen werden. Es ist jedoch bekannt, daß ein großer Teil des umgelagerten Materials die Einbringungsstelle wieder verläßt.

Die Verklappung von Bodenmaterial, dessen Zusammensetzung zumeist von derjenigen an der Verbringungsstelle abweicht, bewirkt in den meisten Fällen ein lokales morphodynamisches Ungleichgewicht, sowohl in Bezug auf die Sohlage als auch hinsichtlich der Kornzusammensetzung des resultierenden Bodengemisches. Dies gilt insbesondere für das Verbringen von Material mit hohem Anteil kohäsiver Sedimente, wie es vorrangig im Rahmen der Unterhaltungsbaggerungen unter den oben beschriebenen Umständen anfällt. Die im allgemeinen durch Bodenklappen oder Klappschuten praktizierte Einbringung führt zu einem verstärkten Impulseintrag und zur Erhöhung der Turbulenz im Nahfeld der Einbringungsstelle, die einen erheblichen Teil des Materials direkt in Suspension bringt. Diese weist deutlich höhere Konzentrationen als die natürliche Hintergrundtrübung des Gewässers auf und bewirkt hohe lokale Dichtegradienten und hieraus resultierende Ströme mit hoher Sedimentaufladung (Dichtestrom). Diese werden durch den Schwerkrafteinfluß verstärkt entlang des lokalen Bodengradienten und damit nicht zwangsläufig entlang der Hauptströmungsrichtung bewegt. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des verklappten Materials und der lokalen Turbulenz der Hauptströmung nimmt die Dichte der Suspension mit der Zeit durch Sedimentationsvorgänge ab. Hierbei ist ein Sortierungsprozeß entsprechend der Sinkgeschwindigkeit der eingebrachten Fraktionen zu beobachten. Für kohäsives Feinstmaterial kommen durch die lokale Konzentration beeinflusste Sinkgeschwindigkeiten zum Tragen („hindered settling“,

Flockulation), die sowohl erhöhte als auch verringerte Sinkgeschwindigkeiten zur Folge haben können.

Der übrige Teil des eingebrachten Materials lagert sich zunächst in unmittelbarer Nähe zur Klappstelle ab und wird im Laufe der Zeit als Suspension oder Geschiebe weiterbewegt, je nachdem, welche lokalen Strömungszustände und Materialeigenschaften dort aufeinandertreffen.

## INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis.....	7
1 Einleitung .....	9
1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	10
1.2 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
1.3 Aufgabenstellung.....	10
2 Prozessbeschreibung.....	12
2.1 Sedimenttransport .....	12
2.1.1 Geschiebe.....	12
2.1.2 Suspension kohäsiven Materials, Fluid Mud .....	14
2.2 Geschichtete Strömungen .....	15
2.2.1 Salinität / Barokline Stratifikation .....	15
2.2.2 Sediment-induzierte Dichteschichtungen .....	17
2.3 Ästuardynamik.....	18
2.4 Baggergutumlagerungen .....	19
3 Modellbeschreibung SMOR3D.....	23
3.1 Modellstruktur .....	23
3.2 Hydrodynamik.....	24
3.2.1 Bodenreibung .....	25
3.2.2 Turbulenz.....	26
3.2.3 Schichtungsansatz.....	26
3.3 Salztransport .....	27
3.4 Sedimenttransport .....	27
3.4.1 Entrainment .....	27
3.4.2 Sinkgeschwindigkeit .....	28
3.4.3 Suspensionstransport.....	29
3.4.4 Geschiebetransport .....	30
3.5 Bodenevolutionsmodell .....	30
3.6 Baggerguteinbringung .....	31

4	Untersuchungsgebiete / Naturmessungen .....	31
4.1	Eingesetzte Meßverfahren .....	32
4.2	Elbe .....	33
4.3	Außenweser .....	37
5	Simulationsergebnisse .....	40
5.1	Modellgebiet Elbe .....	40
5.1.1	Wasserstände / Strömungsgeschwindigkeiten .....	42
5.1.2	Materialumlagerung vor Wittenbergen am 17. November 1995 .....	44
5.1.3	Materialumlagerung vor dem Neßsand bei Flutstrom.....	49
5.2	Modellgebiet Außenweser .....	50
5.2.1	Wasserstände / Strömungsgeschwindigkeiten .....	52
5.2.2	Barokline Schichtung der Außenweser.....	53
5.2.3	Baggergutumlagerung unter Ästuarbedingungen (Außenweser) .....	55
6	Schrifttum.....	60

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1:	Schematische Überströmung eines Transportkörpers, [WALLISCH, 1998]	13
Abbildung 2:	Längsschnitt eines teilgeschichteten Ästuars, schematische Darstellung [DYER, 1973]	17
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der vertical gravitational circulation, [USGS, 2002]	19
Abbildung 4:	Bauarten von Geräten zur Baggergutverklappung links: Split-Hopper, rechts: Hopper mit Bodenklappen	20
Abbildung 5:	Schematische Darstellung einer Baggergutverklappung [WES, 1992]	21
Abbildung 6:	Sinkgeschwindigkeit von Korngruppen, schematisch [Zanke, 1982]	22
Abbildung 7:	SMOR3D Modellkopplung, schematisch	24
Abbildung 8:	Verlauf von $\zeta$ und $v_{t, strat}$ in Abhängigkeit von $Ri$	27
Abbildung 9:	Konzentrationsabhängige Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Ästuarare, [VAN RIJN, 1993]	29
Abbildung 10:	Gebietsübersicht Elbe bei Wittenbergen mit Umlagerungsstellen	34
Abbildung 11:	Nahfeldtopographie des Untersuchungsgebietes Neßsand / Wittenbergen	35
Abbildung 12:	Exemplarische Isolinien darstellung zur Baggergutumlagerung am Neßsand bei ablaufender Tide	36
Abbildung 13:	Exemplarische Isolinien darstellung zur Baggergutumlagerung am Neßsand bei auflaufender Tide	37
Abbildung 14:	Untersuchungsgebiet Außenweser, Detailausschnitt Fedderwarder Fahrwasser mit Längswerken, Buhnen und den Klappstellen 01 und 03	38

Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der bei Fahrwassertonne 36 gemessenen Strömungen und Salzgehalte	39
Abbildung 16: Modellrand des Umgebungsmodells der Tideelbe	41
Abbildung 17: Umriß der hochauflösenden 3D Detailmodelle zur Simulation von Baggergutumlagerungen in der Tideelbe	42
Abbildung 18: Exemplarische Vertikalprofile einer ADCP- Messung aus der Elbe bei Wittenbergen	43
Abbildung 19: oben: Mit Sohltopographie hinterlegter Meßpfad, Elbe bei Wittenbergen, 17.11.1995 unten: Vergleich berechneter und gemessener Strömungsgeschwindigkeiten entlang des Meßpfades nach vertikaler Integration der ADCP - Meßwerte	44
Abbildung 20: Gebietsübersicht und Topographie der Elbe bei Wittenbergen	45
Abbildung 21: Position der Umlagerungsstelle, Meßprofile und Nahfeldtopographie	45
Abbildung 22: Vergleich von gemessenen (links) und berechneten (rechts) Vertikalprofilen der umlagerungsbedingten Suspensionskonzentration	47
Abbildung 23: Räumliche Isoflächendarstellung der Suspensionsverteilung. blau: 50 mg/l, gelb: 200 mg/l	48
Abbildung 24: Vergleich von qualitativem Ausbreitungspfad (oben) und Simulation (mitte und unten) für eine Flutstromverklappung am Neßsand. Die Simulationsergebnisse zeigen den Zustand 12 und 60 Minuten nach Beginn der Einbringung	49
Abbildung 25: Gebietsübersicht Jade-Weser-Ästuar mit Modellrand	51
Abbildung 26: Vergleich zwischen gemessenen (oben) und berechneten (unten) Wasserstandsdifferenzen zwischen Pegel Robbensüdsteert und Hilfspegel im Wurster Arm	52
Abbildung 27: Vergleich von gemessener (unten) und berechneter (oben) Verteilung des absoluten Strömungsgeschwindigkeit entlang des Meßpfades	53
Abbildung 28: Gebietsübersicht mit Modellrand, Längsschnitt	54
Abbildung 29: Vertikalschnitte der Salzgehaltsverteilung entlang Längsschnitt oben: Barokline Schichtung bei ablaufender Tide unten: Vollständige Durchmischung gegen Ende der Flutphase	55
Abbildung 30: Außenweser-Fahrwassser (Fedderwarder Fahrwasser): Topographie mit Ausschnittsrahmen (grau) für Meßgebiet.	56
Abbildung 31: Detailtopographie, Meßpfad und Umlagerungsstelle (rot). Zeitangaben relativ zu Einbringungsbeginn	57
Abbildung 32: Vergleich von gemessener (unten) und berechneter (oben) Verteilung der Suspensionskonzentration entlang des Meßpfades	58
Abbildung 33: Vergleich von gemessener (unten) und berechneter (oben) Verteilung des Salzgehaltes entlang des Meßpfades	59

## 1 EINLEITUNG

Das vorliegende Projekt befaßt sich mit Dichteeffekten innerhalb des Wasserkörpers am Beispiel der Einbringung von Baggergut. Hierzu wurden Naturmessungen zur Verdriftung von Baggergut durchgeführt und parallel ein morphodynamisch-numerisches Modell erweitert und zur Reproduktion der gemessenen Werte angewandt.

Die den Berechnungen zugrundeliegenden Messungen wurden in zwei grundsätzlich sehr verschiedenen Gebieten durchgeführt: Die ersten Messungen fanden im Auftrag des Amtes für Strom und Hafenbau in Hamburg bereits Mitte der 90er Jahre in der Tideelbe auf Höhe des Mühlenberger Loches statt. Die damaligen Ergebnisse sind sicherlich als einer der Auslöser für das vorliegende Projekt zu werten. Weitere Messungen wurden, bereits im Rahmen dieses Projektes, durch die GKSS in der Außenweser auf Höhe der Längswerke des Federwarder Fahrwassers durchgeführt. Die dortige Situation ist zusätzlich zur Tide durch ausgeprägte barokline Dichteeffekte gekennzeichnet.

Die Messungen wurden mit schiffsgestütztem Gerät ausgeführt. Zum Einsatz kamen optische und hydroakustische Verfahren zur Messung der Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule. Das Meßschiff bewegte sich im Zuge der einzelnen Messungen im Nahfeld der Einbringungsstelle unter Berücksichtigung des zu erwartenden Versatzes durch das umgebende Strömungsfeld. Dabei wurden unter anderem Vertikalprofile der Sedimentkonzentration in der Wassersäule entlang der Kurslinie gewonnen, die zur Validierung des Simulationsmodells herangezogen wurden.

Die Simulationen erfordern aufgrund der kleinräumigen, hochgradig instationären Prozesse ein dreidimensionales Strömungsmodell, das in direkter Rückkopplung sowohl gelöstes Salz, suspendiertes Sediment und die zugehörigen Auswirkungen auf das Strömungsfeld berechnet. Um der Ungleichförmigkeit des Sediments rechnung zu tragen, ist eine fraktionierte Betrachtung des Sediments nötig. Die Dynamik des umgebenden Strömungsfeldes wird sowohl kleinräumig (durch Baggergutumlagerungen) als auch großräumig (durch barokline Effekte) von den lokalen Dichteunterschieden beeinflusst, hierfür ist eine Rückkopplung zwischen Turbulenzmodell und räumlicher Dichteverteilung nötig.

Morphodynamisch-numerische Simulationen zum Verbleib von umgelagertem Baggergut sind bislang nicht üblich. Sie stellen jedoch ein leistungsfähiges Werkzeug zur Bewertung potentieller Umlagerungsstellen hinsichtlich ihrer Eignung dar.

Durch den gezielten Einsatz morphodynamischer Simulationen kann abgeschätzt werden, wie lange das Baggergut an der Einbringungsstelle verbleibt, wohin es anschließend transportiert wird sowie ob und wann es letztendlich wieder für die Auflandungsprozesse in den Baggerstrecken zur Verfügung steht. Damit kann eine wesentliche Unsicherheit in der bisherigen Planung von Unterhaltungskonzepten für Fahrwasser deutlich reduziert werden. Es wird erwartet, daß mit Hilfe der Simulationen zum Verbleib des Baggergutes eine Optimierung des Sedimentmanagements und damit letztendlich eine Reduzierung der Kosten erreicht werden kann. Das in diesem Projektbericht vorgestellte Simulationsmodell ist grundsätzlich für alle o.g. Ästuarformen geeignet, die folgenden Ausführungen beschränken sich

jedoch auf die flachen und ggf. deltaförmigen Ästuare der deutschen Nordseeküste und ihre charakteristischen Eigenschaften.

### **1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt konnte im wesentlichen wie im Rahmen des Antrages geplant durchgeführt werden. Kleinere Abweichungen resultieren aus der Tatsache, daß die von der GKSS durchzuführenden Naturmessungen in der Außenweser aufgrund des Schiffseinsatzplanes bereits im April 2001 und damit vor dem offiziellen Beginn des Projektes durchgeführt wurden. Eine zweite Meßkampagne konnte ebenfalls aus terminlichen Gründen von Seiten der GKSS nicht durchgeführt werden.

Die Nachbereitung der Elbe-Meßdaten vom April und November 1995 durch die GKSS mit Hilfe der SEDIVIEW-Software war im Nachhinein nicht mehr möglich, da keine Kalibrierdatensätze mehr vorlagen und diese von den damaligen Ausführenden nicht mehr nachbeschafft werden konnten. Die durch die GKSS für eine einzelne Messung durchgeführte Nachberechnung mit SEDIVIEW wurde daher mit Kalibrierdaten bewerkstelligt, die aus den parallel durchgeführten Siltmeter-Messungen geschätzt wurden.

Weitere, geringfügige Änderungen im Arbeitsplan wurden in Rücksprache mit der projektbegleitenden Beratergruppe vorgenommen, hierfür sei auf die Sitzungsprotokolle der Beratergruppentreffen verwiesen.

### **1.2 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Mit den im Rahmen des durchgeführten Projektes nötigen Naturmessungen wurde die GKSS beauftragt. Gleiches gilt für die Nachbereitung von bereits 1995/96 aufgenommenen Meßergebnissen aus dem Bereich der Tideelbe bei Hamburg.

Zudem waren umfangreiche Daten zum Aufbau, zur Kalibration und zum Betrieb der Modelle von Weser und Elbe nötig. Diese wurden von den folgenden Behörden geliefert:

- Amt für Strom und Hafenbau, Hamburg
- Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Ilmenau
- Wasser- und Schiffsamt Bremerhaven
- Wasser- und Schiffsamt Hamburg
- Wasser- und Schiffsamt Lauenburg

### **1.3 Aufgabenstellung**

Die zu bearbeitende Aufgabenstellung gliedert sich grob in die Bereiche

- Interpretation der Meßdaten aus Tideelbe und Außenweser,
- Erweiterung des numerischen Modells SMOR3D zur Simulation der dichtebeeinflussten Prozesse in voller Rückkopplung sowie

- Verifikation des Modells anhand der Meßdaten und Abschätzung der Prognosefähigkeit.

## 2 PROZESSBESCHREIBUNG

Dieses Kapitel beschränkt sich auf eine qualitative Beschreibung der maßgeblichen Prozesse im Rahmen der Umlagerung von Baggergut unter Ästuarbedingungen. Auf Formeln und Ansätze zur quantitativen Abschätzung wird bewußt verzichtet, da diese den Rahmen des vorliegenden Beitrages sprengen würden. Die im Modell implementierten Ansätze finden sich einschließlich ihrer mathematischen Formulierung in Kapitel 3.

### 2.1 Sedimenttransport

Die Mechanismen des Sedimenttransports im Ästuar unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen in alluvialen oder gezeitenbeeinflussten Flußgebieten oder auch Seen. Unterschiede resultieren im wesentlichen aus den veränderten hydrodynamischen Randbedingungen infolge barokliner Schichtungseffekte und damit aus dem veränderten „Antrieb“ der Sedimentbewegung. Hinzu kommen umlagerungsinduzierte Nahfeldeffekte wie sohnnahe Dichteströme.

#### 2.1.1 Geschiebe

Das natürlich anstehende, wie auch das zusätzlich eingebrachte Material kann in zwei physikalisch sehr unterschiedlichen Prozessen als Geschiebe oder in Suspension transportiert werden. Der tatsächliche Transportzustand hängt vom Zusammenspiel der Sedimenteigenschaften mit den lokalen Strömungsgrößen ab. Der Übergangsbereich zwischen Geschiebe und Suspension entzieht sich einer präzisen Formulierung und ist letztlich durch Beobachtungen und verschiedene Konventionen nur unscharf definiert.

Geschiebe bewegt sich sohnnah rollend oder springend. Maßgeblich für eine rollende Bewegung ist die von der Strömung auf das Einzelkorn ausgeübte Schleppkraft. Sind die turbulenten Fluktuationen der Strömung ausreichend groß, bewirkt die sogenannte Liftkraft aufgrund von Druckunterschieden zwischen Ober- und Unterseite des Kornes das Abheben von der Sohle und damit die springende Bewegung. Die mittlere Bewegungsgeschwindigkeit des als Geschiebe transportierten Sediments ist dabei kleiner als die der Strömung.

Den zweiten wesentlichen Komplex im Zusammenhang mit dem Sedimenttransport bildet der Transport feiner Sedimente in Suspension. Um ein Einzelkorn in Suspension transportieren zu können, müssen die „aufwirbelnden“ Strömungskomponenten (genauer gesagt die vertikalen Fluktuationen der Strömung) größer sein als die Sinkgeschwindigkeit des Kornes. Auch die vertikale Komponente der mittleren Strömung kann bereits im laminaren Bereich Suspensionen feinen Sediments bilden. Damit kommt der Sinkgeschwindigkeit der Sedimentpartikel eine wesentliche Bedeutung zu.

Für Einzelkörner nicht-kohäsiven Materials existieren Ansätze, um deren Sinkgeschwindigkeiten hinreichend genau bestimmen zu können, siehe hierzu auch Kapitel 3.4.2. Es ist jedoch aus Laborversuchen bekannt, daß das Absinken aus der Suspension im allgemeinen in Form von Korngruppen stattfindet, deren Sinkgeschwindigkeit größer als die des Einzelkornes ist. Dieser Vorgang ist in Kapitel 2.4 detaillierter beschrieben.

## Transportkörper

In Abhängigkeit von den Sedimenteigenschaften und der Fließtiefe kann es zudem zur Bildung von Transportkörpern kommen. Der Geschiebetransport findet in diesem Fall auf vollkommen andere Weise statt, als dies bei ebener Sohle der Fall wäre. Man unterscheidet bei Transportkörpern zwischen Klein- (Riffeln) und Großformen (Dünen).

Riffel sind hinsichtlich ihrer Länge und Höhe klein gegenüber der Wassertiefe. Vereinfachend kann man sagen, daß Sediment unterhalb eines kritischen Durchmessers ( $\sim 0.5$  mm) mit Bewegungsbeginn sofort beginnt, Riffel zu bilden. Wird die Strömungsgeschwindigkeit weiter gesteigert, ist auch die Bildung von Dünen möglich, solange das Sediment einen kritischen Mindestdurchmesser ( $\sim 0.1$  mm) nicht unterschreitet, unterhalb dem grundsätzlich keine Dünenbildung mehr möglich ist. Die direkte Beeinflussung des Strömungsfeldes durch die Riffel reicht bis etwa zur dreifachen Riffelhöhe in die Wassersäule. Beim Vorhandensein geeigneter Kornverteilungen können auch kombinierte Strukturen (Riffel auf Dünen) existieren.

Die Gewässersohle tendiert zur Dünenbildung, sobald das Sediment oberhalb eines spezifischen Durchmessers ( $\sim 0.6$  mm) liegt und die Strömungsgeschwindigkeit hinreichend groß ist. Bei niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten findet Sedimenttransport auf ebener Sohle statt. Dünen weisen Längen auf, die deutlich größer als die Wassertiefe sind und erreichen Höhen bis zu einem Drittel der Fließtiefe. Sie beeinflussen, anders als Riffel, das Strömungsfeld in der gesamten Wassersäule. Der Vollständigkeit halber seien hier noch die sog. Antidünen erwähnt. Diese stellen sich bei schießendem Abfluß ein und bewegen sich durch einen rückschreitenden Erosionsprozeß entgegen der Fließrichtung.

Die Überströmung einer Düne kann in drei grundsätzliche Abschnitte eingeteilt werden. Zunächst liegt die sohlnahe Strömung an der ansteigenden Dünenkontur der Luvseite an. Die Stromlinien werden hier durch die vorgegebene Begrenzung des Strömungsfeldes gekrümmt und die Fließtiefe verringert sich in Stromrichtung. Hieraus resultiert eine beschleunigte Strömung. Am Dünenkamm findet eine abrupte Vergrößerung der Fließtiefe und eine Strömungsablösung statt. Die am Dünenkamm beginnende freie Grenzschicht trennt den darunter gelegenen Rezirkulationsbereich und die freie Strömung darüber. Nach etwa der Hälfte der Tallänge legt sich die Hauptströmung wieder an den Luvhang der folgenden Düne an.

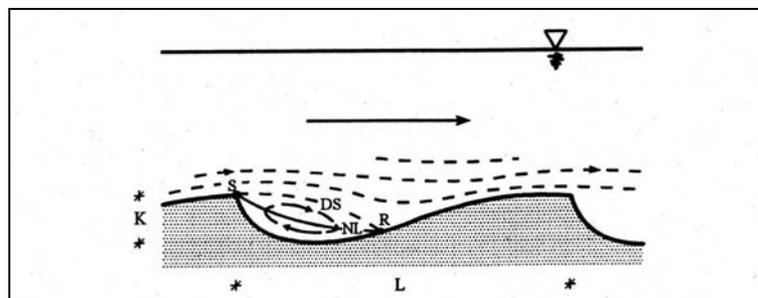


Abbildung 1: Schematische Überströmung eines Transportkörpers,  
[WALLISCH, 1998]

Eine der wesentlichen Auswirkungen von Sohdünen ist die erhebliche Durchmischung des Bodenkörpers beim Passieren der Düne. Zudem werden Sortierungsvorgänge innerhalb der

Fraktionierung des Bodenkörpers beobachtet, wonach verstärkt feineres Material an der Oberfläche und gröberes in unteren Bereichen der durchwandernden Sohlstruktur konzentriert wird. Zusätzlich bewirkt die Strömungsablösung am Dünenkamm die verstärkte Suspendierung von Sediment.

Die zweite Auswirkung besteht in der Beeinflussung der wirksamen Rauheit durch das Vorhandensein von Transportkörpern. Zur aus der Oberflächenbeschaffenheit des Flußbettes resultierenden Rauheit, welche eine ebene Sohle eines bestimmten Materials aufweisen würde, kommt daher eine sogenannte Formrauheit welche die Energieverluste infolge der Transportkörperumströmung repräsentiert.

Durch die Strömungsablösung am Dünenkamm wird verstärkt Sediment suspendiert.

Im tidebeeinflussten Bereich bewirkt die zyklische Richtungsänderung der Strömung ein verändertes Dünenprofil hin zu einer gedrungeneren Kontur mit erhöhten Umlagerungen im Kammbereich [NASNER, 1974].

### **2.1.2 Suspension kohäsiven Materials, Fluid Mud**

Für kohäsives Material stellt sich die Situation ungleich komplizierter dar. Die kohäsiven Eigenschaften von Sedimenten haben mehrere Ursachen. Unterhalb eines spezifischen Korndurchmessers (von etwa 100 µm) dominieren selbst bei Sanden die kohäsiven Anziehungskräfte zwischen den Einzelkörnern das Bewegungsverhalten. Viele Tonmineralien, die häufig einen wesentlichen Anteil der Feinstfraktionen in natürlichen Gewässern stellen, weisen zudem elektrostatische Eigenschaften auf. Sedimente biogenen Ursprungs, die in großen Mengen in den Trübungszonen von Ästuaren entstehen und meist auch einen erheblichen Anteil des im Rahmen der Unterhaltungsbaggerei verbrachten Baggergutes stellen, weisen durch sog. EPS (Extrazelluläre Polymere Substanzen, bakterielle Schleime) ausgeprägt kohäsive Eigenschaften auf.

Aufgrund der geringen Korndurchmesser und häufig auch geringen Dichte bewegen sich die Sinkgeschwindigkeiten der Einzelkörner gegen Null. Durch die Anziehungskräfte zwischen den einzelnen Partikeln kommt es jedoch zur Flockulation des Sediments (Aggregatbildung), woraus Strukturen größeren Durchmessers aber geringer Dichte entstehen. Diese weisen gegenüber dem Einzelkorn deutlich erhöhte Sinkgeschwindigkeiten auf. Die Flockengröße wird begrenzt durch die mechanische Stabilität der Struktur. Diese wird bei zunehmender Größe und damit Sinkgeschwindigkeit steigender hydraulischer Belastung ausgesetzt, die ein unbegrenztes Anwachsen der Flocken verhindert. Die zweite mechanische Belastung resultiert aus der lokalen Turbulenz, durch welche die einzelnen Flocken ständigen Scherungen ausgesetzt sind. Die beschriebenen Sedimente konsolidieren in strömungsberuhigten Bereichen des Gewässers zu Schlick.

Die mechanische Belastbarkeit der nur durch Kohäsion zusammengehaltenen Strukturen hängt stark von der zugrundeliegenden Mischung der einzelnen Bestandteile ab, die zwischen den verschiedenen Ästuaren und sogar innerhalb eines Ästuars eine große Variabilität

aufweisen können. Die resultierenden Sinkgeschwindigkeiten sind daher nur schwer abzuschätzen und bedürfen einer Kalibrierung mit Meßdaten aus dem jeweiligen Gebiet (siehe hierzu auch Abbildung 9).

Eine weitere wesentliche Eigenschaft von kohäsiven Sedimenten ist die Konzentrationsabhängigkeit der Sinkgeschwindigkeiten. Durch gegenseitige Kollisionen während des Absinkens wird die Sinkgeschwindigkeit reduziert („hindered settling“), weil zum einen Impulsenergie verloren geht und zum anderen die Flocken in kleinere Strukturen zerbrechen, die wiederum eine geringere Sinkgeschwindigkeit aufweisen. Da das Kollisionsrisiko direkt mit der Sedimentkonzentration zusammen hängt, sind die Sinkgeschwindigkeiten kohäsiver Sedimente konzentrationsabhängig.

Auch das freie Abfließen des Wassers zwischen den einzelnen Aggregaten wird mit steigender Konzentration zunehmend behindert.

## **2.2 Geschichtete Strömungen**

Als Ästuar bezeichnet man den Mündungsbereich eines Flusses in die offene See, oder genauer gesagt den Interaktionsbereich zwischen dem salzarmen Frischwasserzufluß und dem salzhaltigen Seewasser. Ästuare existieren demnach in allen Regionen der Erde, unterscheiden sich jedoch extrem in Ihrer topographischen Ausprägung. Das Spektrum reicht von flachen, meist deltaförmigen Flußmündungen, wie sie unter anderem an der deutschen Nordseeküste existieren, bis zu fjordförmigen Topographien mit großen Wassertiefen und erheblichen Tiefenunterschieden innerhalb des Ästuars.

Die großräumige hydrodynamische Situation im Ästuar resultiert aus mehreren Einflüssen. Der dominanteste ist im allgemeinen der durch die Gezeiten induzierte Tidehub und die hieraus resultierenden Strömungen. Hinzu kommen der Oberwassereinfluß des mündenden Flusses und die aus der Einmischung des Frischwassers von oberstrom resultierenden Schichtungseffekte.

Stärkere Winde können großflächigen Aufstau oder Absunk induzieren, zudem haben die windinduzierten Wellen im Flachwasser einen verstärkt aufwirbelnden Einfluß auf den Sedimenttransport.

### **2.2.1 Salinität / Barokline Stratifikation**

Die Interaktion des Frischwassers mit dem Seewasser verursacht Mischungs- und Schichtungsprozesse, die durch den salzgehaltsbedingten Dichteunterschied motiviert werden. Die Dichte des Seewassers variiert mit dem Salzgehalt und der Temperatur, jedoch ist die temperaturbedingte Variation der Dichte in unseren Breiten klein im Vergleich zum Salzgehaltsgefälle.

Eine Verdeutlichung der salzgehaltsbedingten Schichtungsformen und eine Klassifikation von Ästuartypen anhand ihrer charakteristischen Schichtung ermöglicht die folgende, stark schematisierte Beschreibung des grundsätzlichen Prozesses.

Leitet ein Fluß Frischwasser in ein tideloses Ästuar ein, und man legt zudem ein ideales Fluid (viskositätslos) zugrunde, so wird das weniger dichte Frischwasser an der Oberfläche eine Schicht oberhalb des dichteren, salzhaltigen Wasserkörpers bilden. Da die Strömung zunächst reibungsfrei sein soll, handelt es sich hier um eine horizontale und absolut stabile Schichtung. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Frischwasserschicht nimmt aufgrund der Querschnittsaufweitung in Richtung See mit zunehmender Entfernung vom Fluß ab. Zudem bewirkt der Coriolis-Effekt eine horizontale Ablenkung der Strömung nach rechts (in Strömungsrichtung, auf der nördlichen Halbkugel), wodurch die Oberflächenströmung an der rechten Seite des Ästuars (seewärts blickend) konzentriert wird. Die dichtere untere Schicht weist in diesem Fall keine Strömungsgeschwindigkeit auf, da durch die fehlende innere Reibung kein Impulseintrag aus der strömenden Schicht stattfindet. Aus dem gleichen Grunde findet keinerlei Durchmischung zwischen beiden Schichten statt.

Wenn in dieser Situation eine Fluidviskosität eingeführt wird, stellt sich eine Scherung des Geschwindigkeitsprofils in der strömenden Schicht ein und eine seewärts gerichtete Schubspannung wirkt auf die Grenzschicht zwischen beiden Fluiden. Diese bewirkt eine Zirkulation innerhalb der dichteren Schicht und sorgt für eine Schiefstellung der Grenzfläche von Salz- und Frischwasser. Diese nimmt solange seewärts zu, bis das Gefälle im Gleichgewicht mit der treibenden Schubspannung ist.

Der sich einstellende Salzkeil weist eine charakteristische Struktur auf, deren flußseitige Spitze leicht ausgerundet ist und deren Grenzflächengefälle zur Seeseite hin ansteigt. Infolge des Coriolis-Effekts bekommt die Grenzfläche zudem ein laterales Gefälle nach rechts (seewärts blickend, auf der Nordhalbkugel). Die Wasseroberfläche fällt lateral nach links ab.

Die Viskosität des Fluids bewirkt über die Scherung im Bereich der Grenzfläche zudem den Eintrag von dichtem Salzwasser in die strömende obere Schicht. Ist die Scherung der Grenzfläche ausreichend stark, beginnt die Bildung von internen Wellen in der Grenzfläche, die unter weiterer Belastung letztendlich brechen und auf diese Weise salziges Wasser in die obere Schicht einmischen. Dieser Mischungsprozeß erfordert innerhalb des Salzkeiles aus Kontinuitätsgründen eine stromauf gerichtete Ausgleichsströmung. Die in die obere Schicht eingemischte Salzwassermenge vergrößert zudem den dortigen Abfluß. Es kann gezeigt werden, daß die aus der Einmischung in die obere frei fließende Schicht resultierende Zunahme der dortigen Abflußmenge ein vielfaches der Oberwassermenge des Zulaufes erreichen kann [DYER, 1977].

Führt man nun in die bisherige Betrachtung die gezeiteninduzierten Wasserstandsschwankungen am seeseitigen Rand des Ästuars ein, beginnt der gesamte Wasserkörper des Ästuars im Tidezyklus zu schwingen. Die hierdurch induzierten Strömungsgeschwindigkeiten stellen bereits bei geringem Tidehub die wesentliche Anregung des Systems dar. Aus dem Verhältnis des Volumens des Tideprismas zum Gesamtvolumen des Ästuars resultieren hierbei unterschiedliche Schichtungsintensitäten. Je größer der durch die Gezeiten bedingte zyklische Wasseraustausch im Verhältnis zum Gesamtvolumen ausfällt, desto stärker tendiert die lokale Situation zur vollständigen Durchmischung.

Die in den Gesamtprozeß involvierte Energie ist groß aufgrund der zyklisch auszutauschenden Wassermenge. Sie dissipiert durch Bodenreibung, welche die Produktion der turbulenten kinetischen Energie im System erhöht. Die turbulenten Wirbel wiederum werden im Bereich der maximalen Dichtegradien stark gedämpft, was sowohl eine Erhöhung der potentiellen Energie im System (in Form eines erhöhten Wasserstandes) als auch die Dissipation von kinetischer Energie in Wärme zur Folge hat. Die turbulenten Wirbel ihrerseits bewirken eine verstärkte Durchmischung der beiden Schichten, wodurch erhebliche Anteile salzhaltigen Wassers in die oberflächennahe Strömung eingemischt werden und umgekehrt. Dies reduziert den vertikalen Dichtegradien und damit die Schichtungsstabilität. Infolge des oberflächennah eingemischten salzhaltigeren Wassers wird zudem der seewärts gerichtete Oberflächenabfluß verstärkt. Aus Kontinuitätsgründen erhöht sich die landeinwärts gerichtete bodennahe Ausgleichsströmung. Die beschriebene Situation stellt eine ausgeprägte Zwei-Schichten-Strömung dar, welche die gezeiteninduzierten Strömungen überlagert. Als Resultat sind zeitgleich entgegengesetzte Strömungsrichtungen in der Wassersäule möglich, sobald die tideinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten gegen Ende der jeweiligen Tidephase die Größenordnung der Ausgleichsströmung annehmen.

Der an der deutschen Nordseeküste anzutreffende Ästuartyp wird entsprechend der Klassifikation nach [CAMERON und PRITCHARD, 1963] als teilgeschichtet bezeichnet. Das Austauschvolumen des Tideprismas dominiert gegenüber vergleichsweise kleinen Frischwasserzuflüssen. Die Wassertiefen sind relativ gering (meist deutlich unter 30 m) und das Breiten-Tiefen-Verhältnis ist groß. Typischerweise besteht der Großteil der Grundfläche des Gebietes aus flachen Bereichen mit wenigen Metern Fließtiefe, die während des Tideniedrigwassers sogar Trockenfallen können und die von einzelnen tiefen Rinnen durchzogen werden.

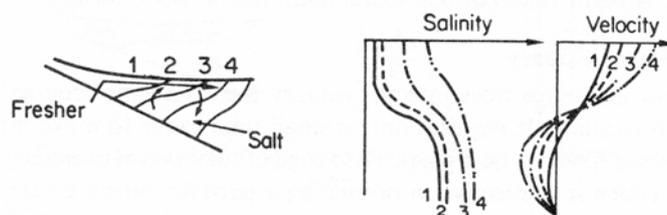


Abbildung 2: Längsschnitt eines teilgeschichteten Ästuars, schematische Darstellung [DYER, 1973]

Aufgrund des hohen Austausches zwischen den beiden Schichten findet sich in Ästuaren dieses Typs ein gleichmäßigerer Verlauf der vertikalen Salzverteilung. Auch in Längsrichtung ist eine gleichmäßigere Zunahme des Salzgehaltes zu beobachten. Diese Verteilungen können zudem innerhalb des Tidezyklus stark variieren und werden in ihrer Lage längerfristig auch durch die Oberwassermenge beeinflusst.

### 2.2.2 Sediment-induzierte Dichteschichtungen

Aufgrund der geringen Sinkgeschwindigkeiten von Feinstdimenten können diese, hinreichende Strömungsintensität vorausgesetzt, über vergleichsweise große Distanzen als Suspension transportiert werden. Durch die bodennahe Reduktion der Sinkgeschwindigkeiten infolge der Konzentrationsabhängigkeit kann es dabei zu hohen Suspensionskonzentratio-

nen in Sohlhöhe kommen. Sind die bodennahen Konzentrationen ausreichend hoch, um die Dichte der Suspension gegenüber der des umgebenden Wassers zu erhöhen, können – analog zur baroklinen Stratifikation - Schichtungseffekte dominant werden, die eine teilweise Entkoppelung der Suspensionsschicht vom übrigen Wasserkörper zur Folge haben. Diese resultiert aus einer teilweisen bis vollständigen Dämpfung des Impulsaustausches im Bereich der maximalen Dichtegradienten. Der beschriebene Prozeß ermöglicht sohlnahe Dichteströme, die sich – durchaus abweichend von der Hauptstromrichtung – verstärkt entlang des lokalen Bodengradienten bewegen.

Derartige Dichteströme können im Zusammenhang mit Baggerguteinbringungen entstehen, wenn genügend Feinmaterial in der eingebrachten Menge enthalten ist. Die Bildung der Schichtung entspricht dabei dem energieärmsten Zustand des Systems, weshalb sich, eine passende Kombination von suspendierter Sedimentmenge und lokaler Strömungsintensität vorausgesetzt, zwangsläufig eine Schichtung bildet.

### **2.3 Ästuardynamik**

Die Ausbreitung der Tidewelle innerhalb des Ästuars wird durch die zyklischen gezeitenbedingten Wasserstandsschwankungen am seeseitigen Rand angeregt. Dabei stellt sich die momentane Wasserspiegelauslenkung stets als Überlagerung einer oder (in Abhängigkeit von der Länge des Ästuars) mehrerer einlaufender Wellen mit den (Teil-) Reflektionen ihrer Vorgänger dar. Die Dissipation der Wellenenergie durch Reibung an der Gewässersohle führt dabei zu einer stetigen Verminderung der Amplitude der Einzelwellen. Dem entgegen wirkt die Erhöhung der Amplitude durch die Verengung des Fließquerschnittes nach stromaufwärts.

Da sich die Komponenten einer Tidewelle als Flachwasserwelle bewegen, hängt ihre Fortbewegungsgeschwindigkeit von der Wassertiefe ab. Hierdurch kommen die Wellenberge schneller voran als die Wellentäler, woraus eine Asymmetrie der Tidekurve resultiert.

Die Form der Tidekurve innerhalb des Ästuars wie auch der lokale Betrag des Tidehubes und die Lage der Kenterpunkte hängen daher sehr stark von der nichtlinearen Deformation der Einzelkomponenten durch die Topographie des Ästuars und des angrenzenden Flusses ab und können nicht ohne weiteres verallgemeinert werden.

Ist die beschriebene grundsätzliche Situation überlagert mit der baroklinen Schichtung eines zumindest teildurchmischten Ästuars, so wird der Oberwasserabfluß verstärkt im oberen Bereich der Wassersäule abgeführt.

Der Ebbstrom beginnt unter diesen Bedingungen in Oberflächennähe am flußseitigen Ende des Ästuars, sobald der Gradient der Wasserspiegeloberfläche beim Erreichen des Tide Scheitels nachläßt. Dieser Prozeß schreitet dann seewärts fort. Am seeseitigen Ende wird die Ebbströmung an der Oberfläche erst gebremst, wenn der Gradient des ansteigenden Wasserspiegels dies erzwingt. Dieser Prozeß schreitet anschließend landeinwärts fort. Die Flutströmung setzt daher sohlnah eher als an der Oberfläche ein. Umgekehrt beginnt die Ebbströmung an der Oberfläche eher als an der Sohle.

Die beschriebene Situation hat wesentliche Auswirkungen auf die Vertikalprofile der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit. Zum einen können um die Kenterpunkte herum entgegengesetzte Strömungsrichtungen an Sohle und Oberfläche existieren, zum anderen wird das Verhältnis der sohl- und oberflächennahen Strömungsgeschwindigkeiten zueinander verändert. Die mittleren Ebbstromgeschwindigkeiten in Sohlhöhe werden reduziert und in Oberflächennähe erhöht. Umgekehrt nehmen die mittleren bodennahen Flutstromgeschwindigkeiten insbesondere in der ersten Hälfte der Flutphase deutlich zu.

Im Mittel über den gesamten Tidezyklus bewirkt diese aus der Dichteschichtung resultierende barokline vertikale Zirkulation einen landwärts gerichteten Nettostrom in Sohlhöhe und einen seewärts gerichteten an der Oberfläche.

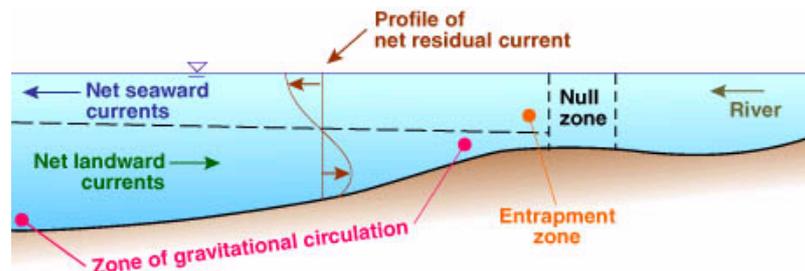


Abbildung 3: Schematische Darstellung der vertical gravitational circulation, [USGS, 2002]

Die in Sohlhöhe intensivierte Strömung hat erheblichen Einfluß auf die Netto-Sedimenttransportraten, die hierdurch im Ästuar ebenfalls nach oberstrom gerichtet sind. Im Bereich des flußseitigen Endes des Salzeintrages von See her läßt der dichteinduzierte Effekt und damit der netto nach oberstrom gerichtete Transport allmählich nach und verschwindet schließlich ganz. Wenig weiter oberstrom dominiert bereits der durch den Oberwasserabfluß erzwungene, netto seewärts gerichtete Transport, so daß an in dem als Null-Zone bezeichneten Zwischenbereich verstärkt Sedimentation auftritt.

## 2.4 Baggergutumlagerungen

Die Baggerguteinbringung stellt eine Anfangsbedingung für die numerische Simulation der Baggergutumlagerung dar. Aus diesem Grund wird hier neben einer kurzen Darstellung der wesentlichen Einbringungsmethoden eine qualitative Prozeßbeschreibung gegeben.

Die Baggerguteinbringung beginnt mit der Zugabe des Materials in den Wasserkörper und endet, nachdem der Großteil der Zugabemenge die Sohle erreicht hat und die direkten Auswirkungen der Einbringung dahingehend abgeklungen sind, daß die weiteren Abläufe mit den Methoden des Sedimenttransports beschrieben werden können.

Das im Ästuarbereich umzulagernde Sediment wird zumeist im Rahmen der Unterhaltungsbaggerei von selbstfahrenden Geräten (Laderaumsaugbagger, „Hopper“) oder Schuten (Barges) an definierte Umlagerungsstellen („Klappstellen“) verbracht.

Die Umlagerungsstellen werden von den zuständigen WSDen und Landesbehörden festgelegt. Auswahlkriterien sind unter anderen die Sicherstellung der Erreichbarkeit der Klappstelle über den gesamten Tidezyklus und die Nähe zur Baggerstelle, um die Fahrzeiten von und

zur Umlagerungsstelle aus ökonomischer Sicht zu minimieren. Ein weiteres Kriterium ist, das gebaggerte Sediment den Auflandungsprozessen in den Unterhaltungsstrecken möglichst langfristig zu entziehen.

Die Konsistenz des im Laderaum befindlichen Baggergutes variiert in Abhängigkeit von der Baggermethode und dem Transportverfahren von der Sohle in den Laderaum. Klappschuten werden im allgemeinen durch Eimerketten-, Greifer- oder Löffelbagger beladen, was insbesondere bei kohäsivem Baggergut das Vorhandensein großer Klumpen im Laderaum zur Folge haben kann. Laderaumsaugbagger lösen und transportieren das Baggergut hydraulisch, wodurch die Laderaumfüllung deutlich homogener ausfällt. Im Fall kohäsiven Sediments können aber dennoch Klumpen von Bodenmaterial existieren, deren Größe jedoch auf den minimalen Querschnitt im Fördersystem beschränkt ist. Dies ist meist die freie Durchgangswerte der Baggerpumpe.

Grundsätzlich kann zwischen kontinuierlicher und momentaner Materialeinbringung unterschieden werden. Im ersten Fall wird das Wasser-Boden Gemisch durch eine Rohrleitung kontinuierlich dem Wasserkörper zugegeben.

Die im Ästuarbereich weitaus häufiger eingesetzte Technik ist die momentane Einbringung des Baggergutes durch das Entladen des Baggers binnen weniger Sekunden bis Minuten.

Es existieren zwei wesentliche Bauformen bei Laderaumsaugbaggern und Klappschuten, wonach zwischen Geräten mit Bodenklappen und solchen, die über ihre volle Länge aufgeklappt werden können (Split-Barge, Split-Hopper), unterschieden wird. Die Entladung eines Schiffes mit Bodenklappen dauert wenige Minuten, die eines Split-Schiffes nur Sekunden.

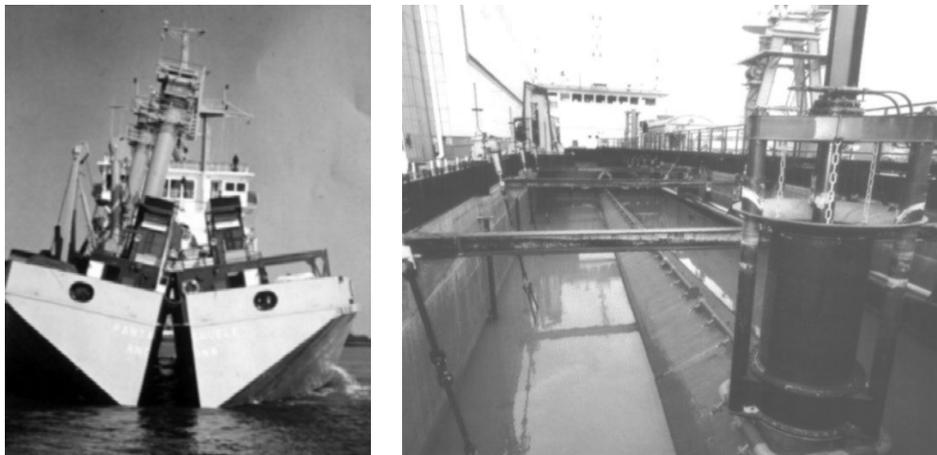


Abbildung 4: Bauarten von Geräten zur Baggergutverklappung  
links: Split-Hopper, rechts: Hopper mit Bodenklappen

Dieser Aspekt der Bauart hat aufgrund der unterschiedlichen Entladungszeit wesentlichen Einfluß auf den Einbringungsvorgang. Er betrifft die Form der initialen Sedimentablagerung nach dem Ende des Einbringungsvorganges wie auch die mit der Einbringung verbundene Turbulenz- und Suspensionsproduktion im Nahfeld der Einbringungsstelle.

Suspendiertes Baggergut kann im Laderaum bereits vor Beginn der eigentlichen Einbringung in die Wassersäule existieren, da die Laderaumfüllung abhängig von der Art des zu bag-

gernden Bodens und der Förderungsart einen hohen Wasseranteil aufweisen kann. Dies gilt insbesondere für das Baggern von vorrangig schlickhaltigem Material. Wird das Baggergut durch hydraulischen Rohrleitungstransport in den Laderaum gefüllt, befindet sich zudem stets ein Rest der Transportwassermenge im Laderaum. Zur Verflüssigung der Ladung wird zudem häufig Wasser unter hohem Druck zugegeben, um Gewölbebildung und damit ein Stocken des Entladungsprozesses zu verhindern.

Während der Einbringung sinkt ein Strom aus hochkonzentrierter Suspension und ggf. Klumpen und Steinen zur Sohle. Von einem Strahl kann in diesem Zusammenhang nur in erster Näherung gesprochen werden, da das Gemisch aus Suspension, Sand, Bodenklumpen und Steinen sehr inhomogen ist. Das Baggergut-Wasser-Gemisch und das umgebende Wasser bilden daher mindestens zwei Phasen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften. Zudem ist der Zugabeprozess infolge von Rutschungen im Laderaum wie auch der kurzen Entladungszeit hochgradig instationär.

Es existiert jedoch eine freie Scher- oder Grenzschicht, da das beschriebene Gemisch wesentlich dichter als seine Umgebung ist und mit hoher Geschwindigkeit absinkt.

Der Dichteunterschied zum umgebenden Wasser stabilisiert den Strom, da Impulsdämpfung in Richtung des Dichtegradienten auftritt. Jedoch werden vereinzelt Teile der Suspension aus dem fallenden Strom herausgerissen und durch die Turbulenz der freien Grenzschicht in den umgebenden Wasserkörper eingemischt. In umgekehrter Richtung wird seitlich umgebendes Wasser in den Baggergut-Strom eingemischt, wodurch der Querschnitt aufgeweitet und weiteres Sediment suspendiert wird.

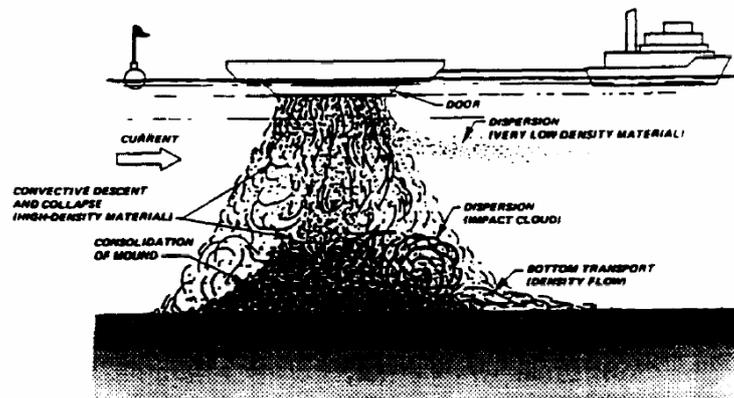


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Baggergutverklappung [WES, 1992]

Die Fallgeschwindigkeit des oben beschriebenen Gemisches ist dabei in Abhängigkeit von Verklappungsdauer, Baggergutzusammensetzung und -menge um Größenordnungen höher als die Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Kornbestandteile. Den Extremfall bildet die Entladung einer Klappschute oder eines Greiferbaggers innerhalb weniger Sekunden. Ein Großteil der Ladung fällt in diesem Fall gleich einem wassergesättigten Bodenkontinuum zur Gewässersohle. Bei den im allgemeinen an den Verbringungsstellen anzutreffenden Wassertiefen

von 5m – 20m kann dieser Zustand bis zum Auftreffen auf die Sohle erhalten bleiben [Boutin, 2002].

Auch für gleichmäßigere Einbringungsverfahren gilt jedoch, daß das Baggergut nicht gleichmäßig verteilt, sondern in Korngruppen zur Sohle absinkt, Abbildung 6. Die gesteigerte Sinkgeschwindigkeit resultiert aus der Behinderung der freien Wasserbewegung innerhalb der Partikelwolke. Dies hat das Absinkverhalten eines wesentlich größeren Körpers mit einer Dichte, die deutlich geringer als die des reinen Feststoffanteiles ist, zur Folge. In Abhängigkeit von der Partikelkonzentration findet Impulsaustausch zwischen den Einzelkörnern statt, wodurch die Sinkgeschwindigkeit der Einzelkörner in der Partikelwolke abnehmen kann (hindered settling).

Innerhalb des absinkenden Gemisches findet zudem eine ausgleichende Sekundärbewegung statt, deren Effekt dem einer mitlaufenden Wand ähnelt [Zanke, 1982]. Diese wird durch den Gradienten der Vertikalgeschwindigkeit in Scherschichtnähe induziert und bewirkt neben einer weiteren Zunahme des Anteiles an suspendiertem Sediment eine Erhöhung der Fallgeschwindigkeit.

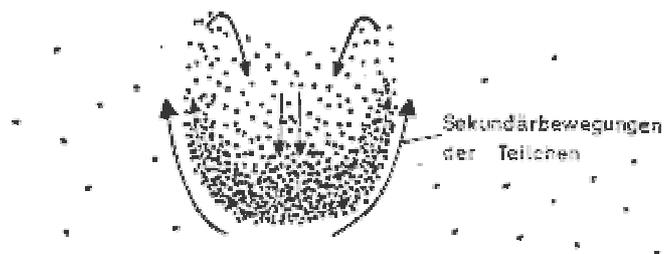


Abbildung 6: Sinkgeschwindigkeit von Korngruppen, schematisch [Zanke, 1982]

In Laboruntersuchungen wurden für feinkörniges Baggergutgemisch Gruppensinkgeschwindigkeiten vom etwa 1000-fachen der Sinkgeschwindigkeit der Einzelkörner beobachtet [BOUTIN, 2002].

Das beschriebene Absinken des Baggergutgemisches bewirkt im Bereich der Scherfläche einen erheblichen Eintrag turbulenter kinetischer Energie und erzwingt zudem eine vertikal nach oben gerichtete Ausgleichsströmung im direkten Umkreis der Verklappung. Diese transportiert suspendiertes Sediment in höhere Bereiche der Wassersäule. Bei den in Flüssen und Ästuare anzutreffenden Wassertiefen resultiert hieraus die an der Oberfläche erkennbare Vertrübungswolke im Nahfeld der Verklappung.

Die grobkörnigen und klumpenförmigen Anteile des Baggergutes bilden an der Gewässer- sohle der Einbringungsstelle unterschiedliche Ablagerungsformationen. Im Schrifttum sind sowohl ringkrater- als auch haufenförmige Strukturen dokumentiert [WES, 1992]. Die Ausprägung der Ablagerungsformation unmittelbar nach Ende der Einbringung wird unter anderem durch Faktoren wie Sedimentbeschaffenheit, Dauer und Flächenhaftigkeit der Zugabe, Wassertiefe an der Einbringungsstelle und dem Verhältnis von Zugabemenge und -Dauer beeinflusst. Systematische Untersuchungen zu diesem Aspekt liegen bislang nicht vor [DRP, 1992].

Der Großteil des suspendierten Sediments konzentriert sich bereits Minuten nach dem Abklingen des verklappungsinduzierten lokalen Impulses in Sohlnähe und bewegt sich dort zunächst in Form eines Dichtestromes. Von diesem Punkt ab kann die weitere Ausbreitung des Materials mit den Mechanismen des Sedimenttransports beschrieben werden.

### **3 MODELLBESCHREIBUNG SMOR3D**

SMOR3D beinhaltet ein dreidimensionales, instationäres Strömungsmodell, ein fraktioniertes Sedimenttransportmodell für Geschiebe und Suspension und ein Bodenevolutionsmodell. Die Gleichungen dieser Modelle werden in direkter, zeitschrittweiser Rückkopplung gemeinsam gelöst. Die räumliche Diskretisierung erfolgt durch die Methode der finiten Elemente, für die zeitliche Diskretisierung kommt ein Drei-Ebenen Leap-Frog-Schema zum Einsatz.

Im Hydrodynamikteil werden die dreidimensionalen instationären Reynoldsgleichungen (RANS) unter Anwendung der hydrostatischen Druckapproximation gelöst. Zur Turbulenzschließung ist ein algebraischer Mischungswegansatz implementiert.

Für Salz- und Suspensionstransport kommen dreidimensionale Implementierungen von Advektions-Diffusions-Transportgleichungen zum Einsatz.

Das Bodenevolutionsmodell diskretisiert den Bodenkörper durch einen Mehrschichtansatz, der neben der Fraktionierung und den resultierenden Resuspensionseigenschaften eine exakte Volumenerhaltung des Materials gewährleistet.

Um die Prozesse im Rahmen von Baggergutumlagerungen unter Ästuarbedingungen modellieren zu können, wurden die folgenden Erweiterungen und Änderungen implementiert:

Das Einkorn-Sedimenttransportmodell wurde durch ein Mehrfraktionsmodell ersetzt. Implementiert wurde eine fraktionierte Entrainment-Funktion nach VAN RIJN sowie fraktionierter Geschiebe- und Suspensionstransport. Das Bodenmodell wurde durch ein fraktioniertes Mischungsschichtmodell ersetzt, welches zudem die Bilanzierung jeder einzelnen Fraktion erlaubt. Neben dem Suspensionstransport wurde der Salztransport durch eine Advektions-Diffusions-Gleichung berücksichtigt. Ein Schichtungsansatz kontrolliert den vertikalen Impulsaustausch in Abhängigkeit der vertikalen Dichtegradien. Hierzu wird über die Fluidichte eine Rückkopplung zwischen dem Turbulenzmodell und den lokalen Salz- und Sedimentkonzentrationen hergestellt.

#### **3.1 Modellstruktur**

Die fünf Module Hydrodynamik (Kapitel 3.2), Salz (Kapitel 0), Suspension (Kapitel 3.4.3), Geschiebe (Kapitel 3.4.4) und Bodenmodell (Kapitel 3.5) sind innerhalb der Zeitschleife direkt gekoppelt. Abbildung 7 verdeutlicht den Informationsfluß zwischen den einzelnen Programmteilen.

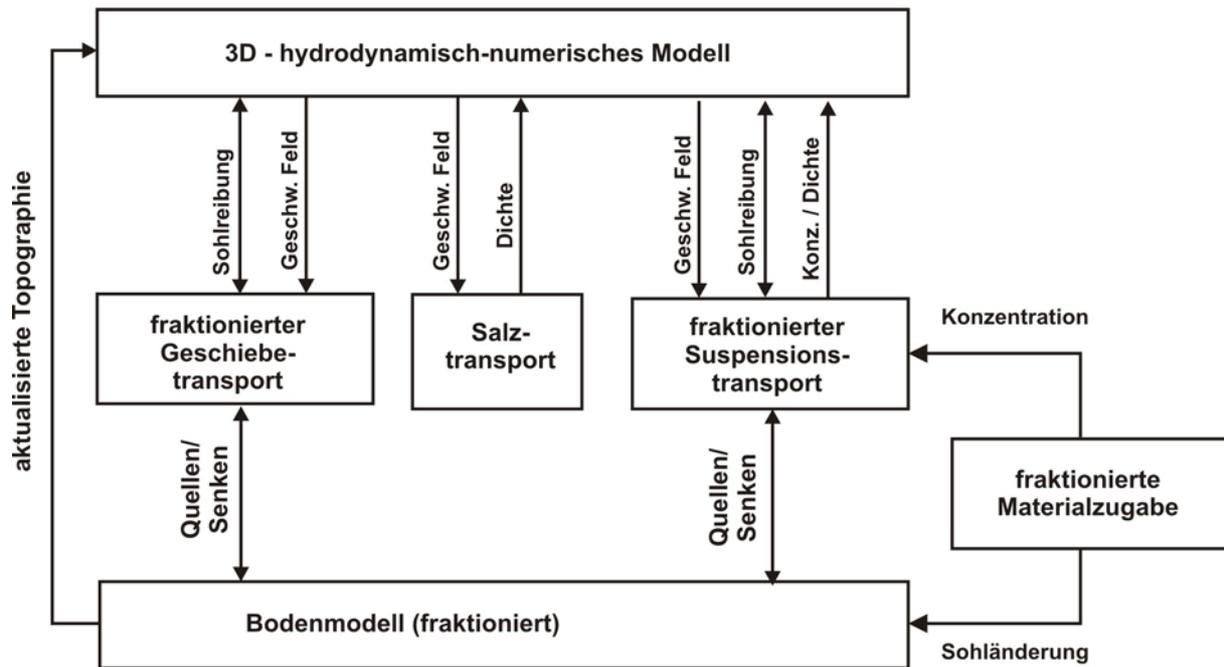


Abbildung 7: SMOR3D Modellkopplung, schematisch

### 3.2 Hydrodynamik

Die Hydrodynamik eines Wasserkörpers kann grundsätzlich mit den zeitlich gemittelten Impulsgleichungen (Reynoldsgleichungen) und der Kontinuitätsgleichung beschrieben werden.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} v_{t,h} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_{t,h} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_{t,v} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\tau_x}{\rho} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} v_{t,h} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_{t,h} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_{t,v} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\tau_y}{\rho} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} v_{t,h} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_{t,h} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_{t,v} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\tau_z}{\rho} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

u, v und w bezeichnen hier die drei Geschwindigkeitskomponenten in x-, y- und z-Richtung (z positiv nach oben). Die Formulierung der Impulsgleichungen beinhaltet bereits die Abschätzung der turbulenten Schubspannungen durch einen Wirbelviskositätsansatz (Boussinesq-Approximation).

Die Randbedingungen zur Lösung der horizontalen Impulsgleichungen werden durch Steuerdateien dynamisch vorgegeben, die zur Lösung der vertikalen Impulsgleichung nötigen Randbedingungen entsprechen der Annahme, daß keine Flüsse durch die Sohle stattfinden und die zeitliche Änderung der freien Oberfläche der Kontinuitätsgleichung genügt.

Die Sohl- und Wandreibung wird durch die Schubspannungen  $\tau_{x,y,z}$  berücksichtigt. Der implementierte Ansatz verwendet den Reibungsbeiwert nach Newton-Taylor entsprechend Gleichung (3.5).

$$\frac{\tau}{\rho} = r_f \frac{u^2}{H} \quad (3.5) \quad \begin{array}{l} H = \text{Fließtiefe [m]} \\ u = \text{Strömungsgeschwindigkeit [m/s]} \end{array}$$

Durch die Reduzierung von Gleichung (3.3) auf die beiden im allgemeinen stark dominanten Terme der Erdbeschleunigung und des vertikalen Druckgradienten (hydrostatische Druckapproximation, Gl. (3.6)) und anschließender Integration über  $z$  geht Gleichung (3.3) in die folgende Form (3.7) über:

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (3.6) \quad p = g \rho z \quad (3.7)$$

Diese Annahme ist in natürlichen Gewässern mit Einschränkungen hinsichtlich einiger Nahfeldprobleme, in denen nennenswerte vertikale Beschleunigungen oder Verzögerungen auftreten, gültig.

Der in breiten Gerinnen nicht vernachlässigbare Einfluß des Coriolis-Effekts wird durch den Koeffizienten  $f$  in den horizontalen Impulsgleichungen erfaßt und errechnet sich nach Gleichung (3.8).

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (3.8) \quad \begin{array}{l} \omega = \text{Winkelgeschwindigkeit} \\ \phi = \text{geogr. Breite} \end{array}$$

### 3.2.1 Bodenreibung

Für die Berechnung der Boden- und Wandreibung wird von einem logarithmischen Geschwindigkeitsprofil ausgegangen. Die Reibung im 3D-Modell wirkt direkt nur auf die sohlnahe unterste Schicht des Wasserkörpers.

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (3.9)$$

Hierbei beschreibt  $z_0$  den Nullpunkt der logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung,  $\kappa$  die Karman-Zahl und  $u^*$  die Schubspannungsgeschwindigkeit. Der Reibungsbeiwert  $r_f$  ist fließtiefenabhängig. Er wird für die Berechnung vorgegeben. Die dimensionsbehaftete Rauheitshöhe  $z_0$  hat sich als gute Beschreibung der Eigenschaften der Wand erwiesen und wird aus dem Reibungsbeiwert zurückgerechnet unter der Annahme, daß  $r_f$  für eine Schicht der Stärke 1m gegeben war.

$$r_f = \left( \frac{\kappa}{\ln \left( \frac{\Delta z}{2z_0} \right)} \right)^2 \quad (3.10) \quad z_0 = \frac{\Delta z}{2e^{\sqrt{r_f}}} \quad (3.11)$$

### 3.2.2 Turbulenz

Das Turbulenzmodell ist durch einen Wirbelviskositätsansatz realisiert. Dabei werden die horizontalen und die vertikale Komponente getrennt behandelt. Diese Methodik trägt den stark abweichenden Abmessungen des Modellgebietes in der Horizontalen und Vertikalen und der daraus resultierenden Anisotropie der Turbulenz Rechnung. Zudem erlaubt dieses Vorgehen bei geringem zusätzlichem Rechenaufwand die Berücksichtigung von Schichtungseffekten. Den in der Vertikalen implementierten algebraischen Mischungswegansatz zeigt Gleichung (3.12).

$$v_{t,v} = \kappa^2 z^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (3.12)$$

Der dargestellte Ansatz reproduziert unter Normalabflußbedingungen das logarithmische Geschwindigkeitsprofil.

### 3.2.3 Schichtungsansatz

Um Schichtungseffekte infolge vertikaler Dichtegradienten berücksichtigen zu können, wurde ein parametrischer Schichtungsansatz implementiert. Die Schichtungsintensität wird dabei in Abhängigkeit von der lokalen Gradienten-Richardson-Zahl  $Ri$  gesteuert. Diese beschreibt das Verhältnis der die Schichtung stabilisierenden Kräfte zu den die Wassersäule durchmischenden.

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho / \partial z}{\left(\partial u / \partial z\right)^2} \quad (3.13)$$

Die  $Ri$ -abhängige Dämpfung des vertikalen Impulsaustausches wird durch einen Ansatz nach ORTON realisiert. Implementiert ist

$$\zeta = \frac{\sigma Ri}{1 - \sigma \gamma_{strat} Ri} \quad (3.14)$$

$$v_{t, strat} = \frac{v_t}{1 + \gamma_{strat} \zeta} \quad (3.15)$$

$\gamma_{strat} = 4.0$  ist ein empirischer Schichtungsparameter. Abbildung 8 verdeutlicht den Verlauf von  $\zeta$  und  $v$  über  $Ri$ . Bei instabilen Schichtungen wird die turbulente Durchmischung zwischen den betreffenden Schichten verstärkt.

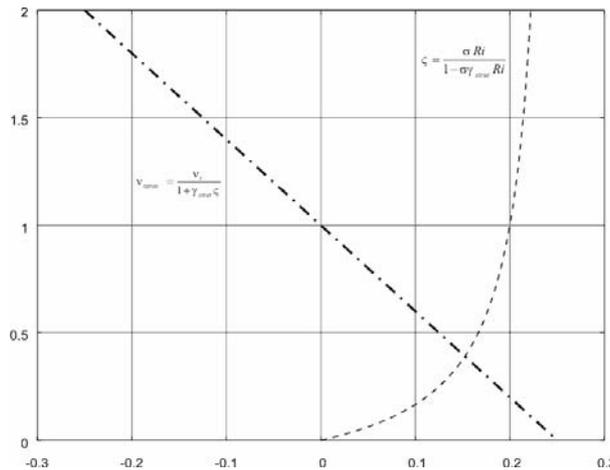


Abbildung 8: Verlauf von  $\zeta$  und  $v_{t, \text{strat}}$  in Abhängigkeit von  $Ri$

### 3.3 Salztransport

Salztransport wird mit Hilfe der Advektions-Diffusions-Gleichung modelliert. Die Randbedingungen in der Horizontalen werden durch eine Steuerdatei dynamisch vorgegeben, für die Vertikale gilt, daß kein Salztransport durch die Sohle und die Oberfläche stattfinden kann.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_{t,h,s} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_{t,h,s} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_{t,v,s} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.16)$$

$C$  ist hier die Konzentration der gelösten Salzmenge,  $K_{v,h}$  sind die Diffusionskoeffizienten für gelöstes Salz. Aus der Annahme, daß die Diffusion von gelösten Stoffen identisch mit der des Impulses ist, resultiert die turbulente Schmidt-Zahl von 1, d.h.  $K_v$  errechnet sich analog zu (3.12) und (3.15).

### 3.4 Sedimenttransport

#### 3.4.1 Entrainment

Für das Entrainment von kohäsionslosem Sediment ist der Ansatz nach [VAN RIJN, 1984a] implementiert. Er wurde für Einkornmaterial empirisch bestimmt. Die dimensionslose Entrainmentrate nach Einstein ist

$$\Phi = \frac{E}{\rho_s (\Delta g D)^{0.5}} \quad (3.17)$$

$\Phi$  = dimensionslose Entrainmentrate

$E$  = Entrainmentrate [kg/m<sup>2</sup>/s]

$\rho_s$  = Sedimentrohddichte [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$

$D$  = Korndurchmesser [m]

Für fraktioniertes Material folgt nach van Rijn

$$\Phi = 0.00033 \cdot D_{*,i}^{0.3} \cdot T_i^{1.5} \quad (3.18)$$

bzw. in fraktionierter und dimensionsbehafteter Darstellung

$$E_{i,uni} = 0.00033 \cdot \rho_{s,i} \cdot (\Delta_i g D_i)^{0.5} \cdot D_{*,i}^{0.3} \cdot T_i^{1.5} \quad (3.19)$$

Hierbei ist  $D_*$  der dimensionslose Korndurchmesser nach BONNEFILLE (3.20).

$$D_{*,i} = D_i \left( \frac{(\Delta_i - 1) g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (3.20)$$

und  $T$  der dimensionslose „Transport Stage Parameter“ nach VAN RIJN (3.21)

$$T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*,crit,i})^2}{(u_{*,crit,i})^2} \quad (3.21)$$

Die maximale Menge des erodierten Materials wird durch Multiplikation mit der Auftretenswahrscheinlichkeit in der transportaktiven Schicht der Sohle berechnet:

$$E'_i = p_i \cdot E_{i,uni} \quad (3.22)$$

Für kohäsive Sedimente wird der Entrainment-Ansatz nach PARTHENIADES genutzt.

$$E_{coh} = E_0 \exp(\alpha (\tau_b - \tau_e)^{0.5}) \quad (3.23)$$

In (3.23) stellt  $E_0$  eine Erosionsrate in  $\text{kg/m}^2/\text{s}$  dar, die von einer konsolidierten oder zumindest teilkonsolidierten Sohle ausgeht und deren Eigenschaften von Fall zu Fall vergleichsweise stark streuen können.  $E_0$  muß daher mit Hilfe von Meßdaten kalibriert werden.  $\tau_e$  ist die kritische Sohlschubspannung, von der ab Erosion stattfindet.

### 3.4.2 Sinkgeschwindigkeit

Der Sinkgeschwindigkeit kommt für die Suspensionstransportmodellierung große Bedeutung zu, da sie direkten Einfluß auf die Sedimentbilanz in der Wassersäule hat. Für kohäsionsloses Sediment wurde Gleichung (3.24) nach [Zanke, 1982] implementiert. Diese bildet auch den Übergang in den Stokes-Bereich gut ab. Für einen Formfaktor von 0.7, der im allgemeinen für natürliches Sediment angenommen wird, ergibt sich

$$w_s = \frac{11\nu}{d} \left( \sqrt{1 + 0.01D_*^3} - 1 \right) \quad (3.24)$$

Bei kohäsivem Sediment kommen Prozesse wie Flockulation und „hindered settling“ zum Tragen, daher sind für diesen Fall konzentrationsabhängige Sinkgeschwindigkeiten implementiert. Abbildung 9 verdeutlicht die erhebliche Streuung der gemessenen Sinkgeschwindigkeiten in verschiedenen Ästuaren. Aus diesem Grund sind die Koeffizienten der Gleichungen (3.25) und (3.26) nur durch Kalibration anhand von Meßdaten abzuschätzen.

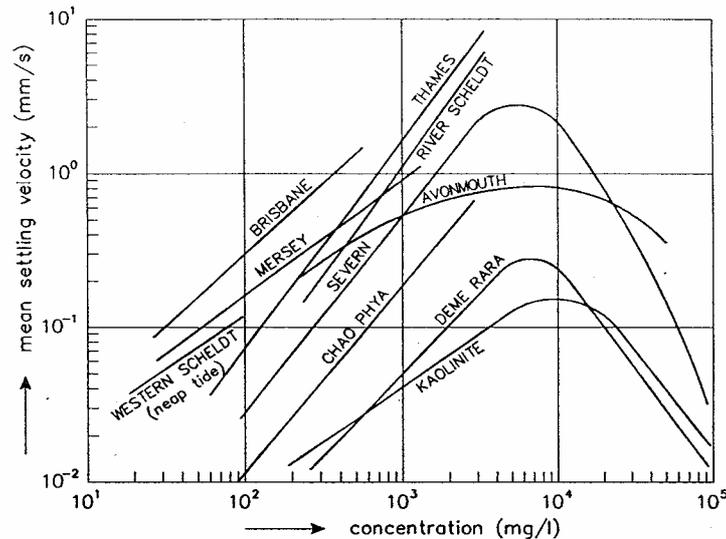


Abbildung 9: Konzentrationsabhängige Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Ästuarer, [VAN RIJN, 1993]

$$w_{s,m} = k \cdot C^m \quad \text{für } C < 10 \text{ [g/l]} \quad (3.25) \quad \begin{array}{l} w_{s,m} = \text{Aggregat-Sinkgeschwindigkeit [m/s]} \\ w_s = \text{Partikelsinkgeschwindigkeit [m/s]} \end{array}$$

$$w_{s,m} = w_s (1 - \alpha C)^\beta \quad \text{für } C > 10 \text{ [g/l]} \quad (3.26) \quad \begin{array}{l} k = \text{Koeffizient} \\ m = \text{Koeffizient (1 ~ 2)} \\ \alpha = \text{Koeffizient} \\ \beta = \text{Koeffizient (2 ~ 6)} \end{array}$$

### 3.4.3 Suspensionstransport

Der Transport suspendierten Sediments wird durch eine Advektions-Diffusions-Gleichung beschrieben.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_{h,sus} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_{h,sus} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_{v,sus} \frac{\partial C}{\partial z} + Q_{ges,sus} + S_{ges,sus} \quad (3.27)$$

Der Wert der advektierten Suspensionskonzentration  $C_{ges}$  setzt sich dabei aus der Summe der Einzelbeiträge je Fraktion zusammen. Die turbulente Schmidtzahl für den Suspensions-transport wird mit 1 angenommen.

Die Randbedingung an der freien Oberfläche (3.28) resultiert analog zum Salztransport darin, daß kein Materialtransport durch dieselbe stattfindet.

$$-w_s C - K_{v,sus} \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{fof} = 0 \quad (3.28)$$

$$-w_s C - K_{v,sus} \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{bod} = Q_{ges,sus} + S_{ges,sus} \quad (3.29)$$

An der Sohle existieren Quellen und Senken infolge Entrainment und Deposition. Die Deposition (3.30) stellt bezogen auf den Suspensionstransport eine Senke der Transportgleichung dar. Das Entrainment aus dem Bodenkörper (3.31) entspricht in diesem Sinne einer Quelle der Transportgleichung:

$$S_{ges,sus} = \sum_n w_{s,i} \cdot C_{a,i} \quad (3.30)$$

$$Q_{ges,sus} = \sum_n \Phi_{i,sus} \cdot P_{i,sus} \quad (3.31)$$

### 3.4.4 Geschiebetransport

Sediment kann in Suspension wie auch als Geschiebe transportiert werden. Der Entrainment-Ansatz nach VAN RIJN ist eine Formulierung des Gesamttransportes. Durch Multiplikation mit einer charakteristischen, fraktionsabhängigen Länge („Sprungweite“, (3.33)) kann van Rijns Entrainment-Ansatz dahingehend umgeformt werden, daß ein breitenormierter Sedimenttransport (3.32) berechnet wird. In fraktionierter Darstellung lautet dieser

$$q_{b,i} = E_{i,n} \cdot \lambda_i \cdot p_i \quad (3.32) \quad \text{mit: } \frac{\lambda}{D_i} = 3D_{*i}^{0.6} \cdot T_i^{0.9} \quad (3.33)$$

Der Parameter  $p_i$  beschreibt den Anteil der betreffenden Fraktion an der Gesamtgeschiebemenge.

### 3.5 Bodenevolutionsmodell

Das Bodenmodell hat die vorrangige Aufgabe, die Sohlhöhenänderung entsprechend der Bilanz der Geschiebeflüsse, der Quellen und Senken des Suspensionstransportes und der Baggergutzugabe durch eine entsprechende Änderung der Sohlage zu berücksichtigen. Die Sedimentkontinuität eines Kontrollvolumens wird durch die Exner-Gleichung beschrieben. Diese ist im folgenden in fraktionierter Darstellung gegeben.

$$\frac{1}{\partial t} \sum_i (1-p_i) \partial a_i = \sum_i \frac{\partial q_{b,x,i}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b,y,i}}{\partial y} + Q_i + S_i \quad (3.34)$$

Die linke Seite der Gleichung enthält den Porenanteil  $p_i$  des Sedimentes bei natürlicher Lagerung.  $a$  ist die Sohlage. Die Quellen- und Senkenterme  $Q$  und  $S$  korrespondieren bis auf das Vorzeichen mit denen des Suspensionstransportes, siehe hierzu die Gleichungen (3.30) und (3.31).  $q_{b,x,y}$  sind die Geschiebetransportraten entsprechend Gleichung (3.32). Diese Implementierung gewährleistet die exakte Massenerhaltung des Sediments beim Übergang von der festen Sohle in den Sedimenttransport.

Das Bodenevolutionsmodell ist als Zweischicht-Modell implementiert. Aktiv am Sedimenttransport beteiligt ist nur die obere der beiden Schichten, die untere fungiert als „Speicher“ für Baggergut im Bereich von Auflandungsbereichen.

Dem Bodenmodell kommen zwei weitere Funktionen zu: Es begrenzt in nicht erodierbaren Bereichen oder im Fall von Sohlpflasterung die Menge des für die Entrainment-Funktion zur Verfügung stehenden Materials, und es ermöglicht eine realistischere Abbildung des Resuspensionsprozesses insbesondere jener Sedimentfraktionen, die durch die Baggerguteinbringung ins System gelangt sind. Eine Bilanzierung des Baggergutanteiles und seine Verteilung

lung im Gesamtgebiet ist auf diesem Wege ebenfalls möglich. Der verwendete Ansatz erlaubt Sedimenttransport auf fester Sohle.

Das beschriebene Verfahren gewährleistet die Erhaltung der durch die Baggergutumlagerung eingebrachten Materialmenge im Gebiet. Baggergut, das über offene Modellränder das Gebiet verläßt wird ebenfalls erfaßt. Dieses steht dem Sedimenttransport im Modell nicht länger zur Verfügung.

### **3.6 Baggerguteinbringung**

Zum Einbringungsprozeß von Baggergut durch Verklappung existieren keine bzw. nur wenig aussagekräftige Messungen. Dies liegt in der Schwierigkeit, die in kurzer Zeit ablaufenden Prozesse meßtechnisch zu erfassen sowie dem hohen Grad an Nichtlinearität, den das Absinken ungleichförmiger Materialmischungen hoher Konzentration mit sich bringt, begründet. Ansätze zur mathematischen Beschreibung des Verklappungsvorganges existieren gleichwohl [WES, 1995], diese gehen jedoch von stark abstrahierenden Annahmen aus und liefern häufig bereits für Standardfälle mit homogener Baggergutzusammensetzung ungenügende Resultate [BOUTIN, 2002].

Mathematisch ließe sich der Einbringungsvorgang mit Hilfe einer numerischen Mehrphasensimulation näherungsweise beschreiben [LIU, 2004], jedoch steht der erforderliche Berechnungsaufwand in keinem Verhältnis zur erreichbaren Aussagegenauigkeit.

Die Baggerguteinbringung ist in der numerischen Simulation in Form einer abstrahierten Anfangsbedingung realisiert. Hierzu wird linear über den Einbringungszeitraum verteilt ein Teil des Baggergutes der Wassersäule an der Verklappungsstelle als Suspension zugegeben, das übrige Material direkt in der Mischungsschicht der Sohle plaziert und die lokale Sohlage entsprechend angehoben.

Das umzulagernde Material muß vor der Berechnung entsprechend seiner Menge und fraktionsweisen Zusammensetzung definiert werden. Gleiches gilt für die Dauer des Einbringungsvorganges. Sie variiert in der Regel zwischen wenigen Sekunden (Split-Barge) und einigen Minuten (Bodentüren).

Die Zugabe in der Wassersäule erfolgt entsprechend eines parabolischen Profils über die gesamte Wassertiefe verteilt. Diese Zugabe-Verteilung hat sich der über die Wassertiefe konstanten als überlegen erwiesen, da sie im Falle kurzer Zugabezeiträume und damit hoher Zugabekonzentrationen ein realistischeres Verhalten der freien Oberfläche bewirkt.

## **4 UNTERSUCHUNGSGEBIETE / NATURMESSUNGEN**

Dieses Kapitel gibt eine einleitende Vorstellung der beiden Untersuchungsgebiete Tideelbe und Außenweser und eine Kurzvorstellung der wesentlichen Ergebnisse der im Rahmen dieses Projektes und zum Teil bereits vor diesem ausgeführten Naturmessungen. Für Details und weiterführende Informationen sei auf die jeweils angegebenen Quellen und insbe-

sondere den Bericht der GKSS zu den Vertrübungsmessungen in der Außenweser verweisen.

#### **4.1 Eingesetzte Meßverfahren**

Zur Messung der Suspensionskonzentration kamen akustische und optische Verfahren zum Einsatz.

ADCP – Geräte (Acoustic Doppler Current Profiler) sind zunächst zur Messung von vertikalen Geschwindigkeitsprofilen konzipierte Strömungsmeßgeräte. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt durch die Auswertung der Dopplerverschiebung des von Feinstoffen im Wasser reflektierten akustischen Signals. ADCP-Geräte messen die Strömungsgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag in Abhängigkeit von der Wassertiefe. Die Wassersäule wird hierzu in diskrete Intervalle („Bins“) eingeteilt.

Die im vorliegenden Fall maßgebliche Funktion zur indirekten Messung von Suspensionskonzentrationen beruht auf der Erfassung der Signalabschwächung beim Durchgang durch die Wassersäule. Die Intensität des reflektierten Signals läßt Rückschlüsse auf die in Suspension befindlichen Feststoffkonzentration im über die Laufzeit zugeordneten Bereich der Wassersäule zu, solange die Beschaffenheit des dort suspendierten Materials genau genug bekannt ist. Suspendiertes Quarzmaterial weist in diesem Zusammenhang wesentlich andere Reflektions- und Streueigenschaften auf als Material organischen Ursprungs. Die Auswertung des aus dem Durchgang der akustischen Wellen durch die Wassersäule resultierenden inversen Problems liefert daher eine näherungsweise Konzentrationsverteilung in der Vertikalen.

Zur Durchführung der oben beschriebenen Auswertung ist eine Kalibration mit einer Probe des suspendierten Sedimentes nötig, da nicht allein die Konzentration, sondern auch die Eigenschaften des suspendierten Sediments (Korndurchmesser, mechanische Eigenschaften des Materials) die Rückstreu- und Dämpfungseigenschaften beeinflussen. Diesem Punkt kommt im Zusammenhang mit Baggergutumlagerungen eine wesentliche Bedeutung zu, da das zusätzlich eingebrachte Material hinsichtlich seiner Zusammensetzung erheblich von der des natürlichen Hintergrundes an der Einbringungsstelle abweicht und das durch die Einbringung erzeugte Gemisch durch Entmischungsvorgänge zeitlich variiert.

Um über die Laufzeit des akustischen Signals eine eindeutige Zuordnung der Meßposition in der Wassersäule vornehmen zu können, existiert ein „Totzeitbereich“ zwischen den Sende-/Empfangsmembranen des ADCP und dem ersten auswertbaren Bin in der Wassersäule. In diesem Bereich sind keine Messungen möglich. Seine Ausdehnung variiert mit den gewählten Systemparametern und beträgt bei den vorgestellten Messungen ein bis zwei Meter, siehe hierzu auch Abbildung 18. Der nicht auswertbare Bereich der Wassersäule vergrößert sich zudem durch die Eintauchtiefe des ADCP.

Die Detektion der festen Sohle unterliegt verfahrensbedingt ebenfalls Einschränkungen. Aufgrund der im Vergleich zu Echoloten recht hohen Trägerfrequenz der ADCP-Geräte von 1,2 MHz (Elbe) bzw. 600 KHz (Weser) wird die feste Sohle bereits im obersten Horizont des Bodenkörpers, bzw. mit dem ersten Dichtesprung in Sohlhöhe, detektiert. Dies ist im Falle vor-

rangig sandiger Sohlen akzeptabel, liefert jedoch beim Vorhandensein ausgeprägter Fluid-Mud Lagen häufig zu niedrige Wassertiefen, da bereits Suspensionen höherer Konzentration als feste Sohle interpretiert werden.

Für die Berechnung des inversen Problems wurde die Software SEDVIEW [DRL, 1995] eingesetzt.

Neben den akustischen kamen auch optische Verfahren zum Einsatz. Die sog. Siltmeter sind an einer Sonde montiert, die während der Messungen fortwährend durch die Wassersäule gefiert und gehievt wird. An dieser befinden sich optische Sensoren, die entweder die Abschwächung einer Lichtquelle bekannter Energie nach dem Durchgang durch das Fluid ermitteln, oder aber die Intensität des von der Suspension rückgestreuten Signals auswerten.

Durch den Einsatz mehrerer Sensoren unterschiedlicher Empfindlichkeit wird der Meßbereich erweitert. Siltmeter sind auch in Bereichen höherer Konzentrationen einsetzbar, wo der Einsatz des ADCP aufgrund des Signal/Rauschverhältnisses nicht mehr möglich ist.

Die mit der oben beschriebenen Ausstattung ermittelten Datensätze bestehen aus zweidimensionalen Vertikalschnitten entlang der Kurslinie, die das Meßschiff zurückgelegt hat. Aus diesem Grund sind die im folgenden kurz vorgestellten Ergebnisse als räumlich und zeitlich abhängige Werte zu betrachten. Die Messungen erstrecken sich jeweils über einen Zeitraum von ein bis drei Stunden.

Für detailliertere Angaben zur eingesetzten Meßtechnik sei an dieser Stelle auf die Berichte der GKSS [Riethmüller, 2005; Witte, 1996; DRL, 1995] zu diesem Thema verwiesen.

Verwertbarkeit der Elbe-Messungen nur eingeschränkt möglich (siehe auch Sachstandsbericht vom Juni 2002), da nicht mehr exakt reproduzierbar mangels Kalibrierungsproben.

## **4.2 Elbe**

Die Umlagerungsmessungen in der Tideelbe im wurden in den Jahren 1995, 96 und 98 und damit bereits vor dem Beginn dieses Projektes im Auftrag der hamburgischen Behörde für Strom- und Hafengebäude durchgeföhrt.

Mit der Durchführung beauftragt wurden die britischen Unternehmen Dredging Research Ltd. und Ravenrodd Consultants Ltd. sowie die GKSS aus Geesthacht.



Abbildung 10: Gebietsübersicht Elbe bei Wittenbergen mit Umlagerungsstellen

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Bereich des Mühlenberger Lochs, siehe Abbildung 10. Die dortigen Umlagerungsstellen werden vom Amt für Strom- und Hafenbau betrieben und mit dem im Rahmen der Unterhaltungsbaggerei in den hamburgischen Hafenbecken anfallenden Baggergut beaufschlagt. Die Zusammensetzung des umgelagerten Sedimentes variiert dabei je nach Baggerstelle zwischen Feinsand und Schlack.

Die Topographie des Nahfeldes der Umlagerungsstelle zeigt Abbildung 11. Die zugrundeliegenden Daten stammen aus einer 2 x 2 m Rasterpeilung des Amtes für Strom- und Hafenbau und zeigen den Zustand von November 1995.

Der Querschnitt ist in diesem Bereich deutlich gegliedert. Die südliche Begrenzung bildet der Neßsand, zwischen der tiefen Rinne und der Uferböschung befindet sich ein sanft ansteigender Übergangsbereich von einigen hundert Metern Breite. Die nördliche Uferflanke steigt bis zur Streichlinie der dortigen Bühnen steil an. In der tiefen Hauptrinne des Querschnitts existieren ausgeprägte Transportkörper (Sohldünen) von 2 - 4 m Höhe.

Die in diesem Bereich gelegenen und vom Amt für Strom- und Hafenbau betriebenen Umlagerungsstellen sind durch die gelben Ringe markiert. Die südliche Klappstelle wird für Flut- und Ebbstromumlagerungen benutzt, die nördliche nur bei Umlagerungen während ablaufender Tide.

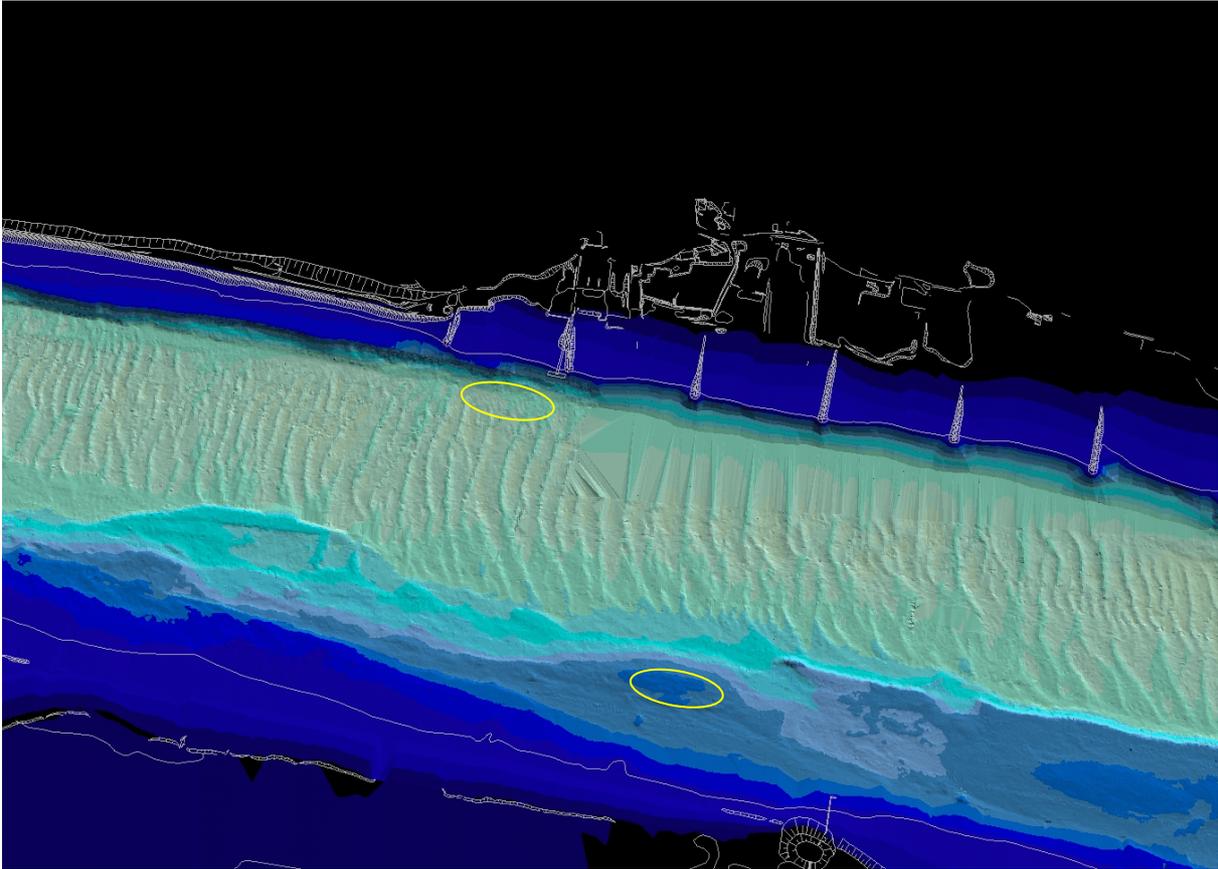


Abbildung 11: Nahfeldtopographie des Untersuchungsgebietes Neßsand / Wittenbergen

Das im Rahmen der ersten Umlagerungsreihe im April 95 verklappte Material wies einen hohen Sandanteil auf und führte aufgrund dessen zu vergleichsweise geringen Suspensionskonzentrationen, da sich die Entmischung des eingebrachten Materials aus dem Wasserkörper durch Absinkvorgänge deutlich schneller vollzieht, als dies bei organischem Feinstmaterial der Fall ist. Bodennahe Suspensionen hoher Konzentration traten aufgrund dessen nicht auf. Die in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellten räumlich-zeitlichen Verteilungen wurden daher über die Tiefe integriert und in der Horizontalen zu Isolinien darstellungen interpoliert.

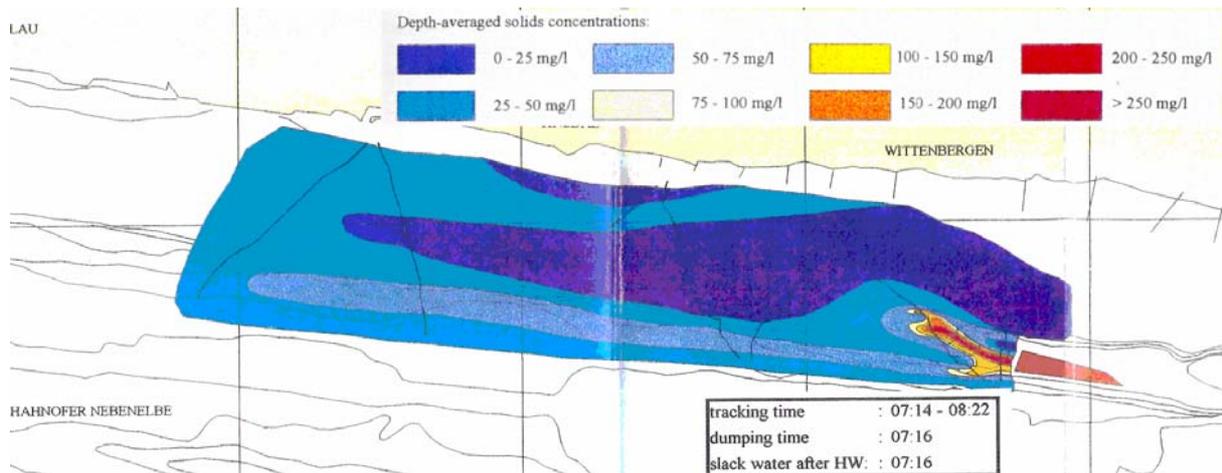


Abbildung 12: Exemplarische Isoliniendarstellung zur Baggergutumlagerung am Neßsand bei ablaufender Tide

Abbildung 12 zeigt exemplarisch die Ausbreitung des bei ablaufender Tide an der Umlagerungsstelle Neßsand eingebrachten Materials als Isoliniendarstellung. Als schwarze Linien sind die vom Meßschiff gefahrenen Profile zu erkennen, auf denen die tiefengemittelten Suspensionskonzentrationen berechnet wurden. Die Umlagerungsstelle ist durch das rote Polygon markiert. Die der Darstellung zugrundeliegenden Profile wurden über einen Zeitraum von 68 min gemessen und stellen damit keinen instantanen Zustand des Systems dar (siehe hierzu auch Kapitel 4.1).

Abbildung 13 zeigt analog die Materialausbreitung infolge einer Einbringung bei auflaufender Tide. Die Umlagerungsstelle befindet sich knapp außerhalb des westlichen Bildrandes. Deutlich zu erkennen ist auf Höhe der Ostseite des Mühlenberger Loches die Verlagerung der höchsten Konzentrationen in Richtung des gegenüberliegenden Nordufers. Diese Verlagerung wird als dichteinduzierter Effekt betrachtet. Die Verlagerung in die tiefe Rinne erfolgt nicht bereits im unmittelbaren Nahfeld der Verklappungsstelle, da das Mühlenberger Loch durch einen Füllstrom aus der tiefen Rinne befüllt wird und dieser zunächst der Bewegung des suspendierten Materials entgegen gerichtet ist. Nach dem Passieren des Mühlenberger Lochs bewegt sich das suspendierte Material in den tiefen Hauptquerschnitt.

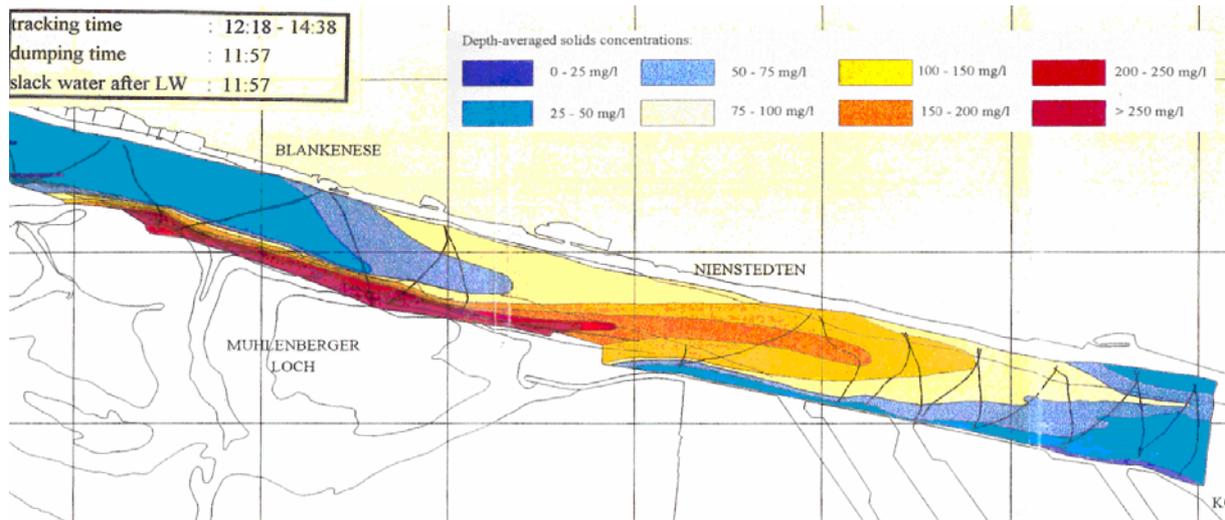


Abbildung 13: Exemplarische Isoliniendarstellung zur Baggergutumlagerung am Neßsand bei auflaufender Tide

Die o.g. Messungen verdeutlichen das Transportverhalten für Suspensionen niedriger Konzentration, welches bei annähernd gleichmäßiger Durchmischung der gesamten Wassersäule im betrachteten Gebiet zu beobachten ist. Zusammenfassend zeigt die obere Darstellung in Abbildung 24 die unter den beschriebenen Bedingungen beobachteten qualitativen Transportpfade für das eingebrachte Material.

### 4.3 Außenweser

Das Untersuchungsgebiet in der Außenweser befindet sich im Bereich der Leitwerke des Fedderwarder Fahrwassers im Bereich von km 79 bis km 90, siehe Abbildung 14. Dort werden vom WSA Bremerhaven verschiedene Klappstellen zur Verbringung des in der Unter- und Außenweser anfallenden Baggergutes betrieben.

Die großräumige hydrodynamische Situation in der Außenweser ist durch die gezeiteninduzierten Strömungen in Überlagerung mit vertikaler barokliner Zirkulation gekennzeichnet. Das Jade-Weser-Ästuar ist mit Tidehüben von 2-4 m mesotidal. Hinsichtlich der seiner baroklinen Stratifikation gilt es nach der Klassifikation von Pritchard als teilgeschichtet.

Die Unterhaltungsstrategie sieht vor, während auflaufender Tide die nord-westliche Verklappstelle 03 (Robbenplate Nord), bei ablaufender Tide die südlicher gelegene Klappstelle 01 (Robbensüdsteert) zu beaufschlagen. Beide Umlagerungsstellen befinden sich zwischen den beiden in der Abbildung zu erkennenden Längsleitwerken. Diese werden zur Hochwasserzeit überströmt.

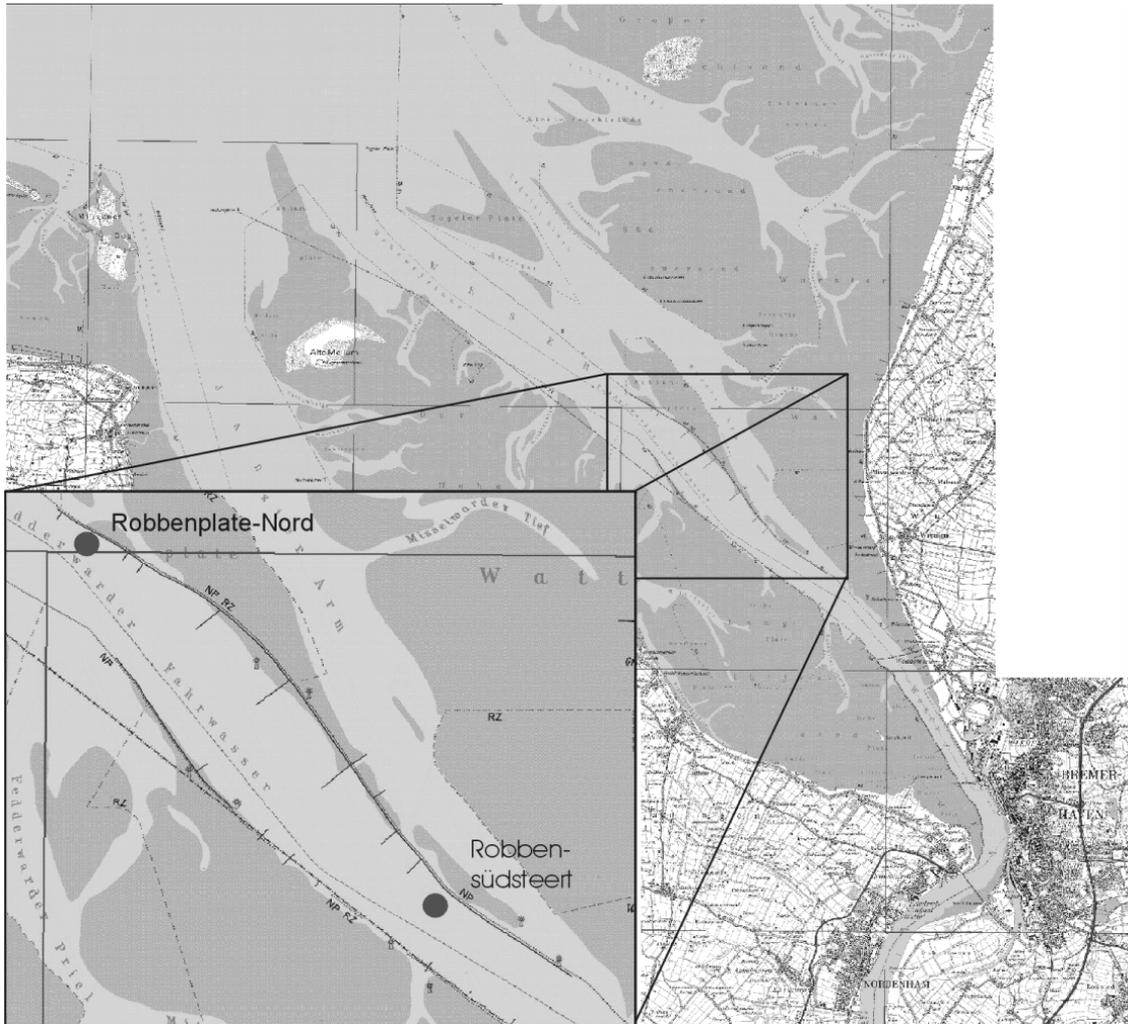


Abbildung 14: Untersuchungsgebiet Außenweser, Detailausschnitt Fedderwarder Fahrwasser mit Längswerken, Buhnen und den Klappstellen 01 und 03

Parallel zu den Schwebstoffmessungen wurden vom WSA – Bremerhaven im Fahrwasser auf Höhe von Fahrwassertonne 36 Salzgehaltsmessungen auf unterschiedlichen Wassertiefen durchgeführt.

Abbildung 15 zeigt über den Verlauf einer Tide exemplarisch die Strömungsgeschwindigkeiten und Richtungen sowie die Salzgehalte. Gemessen wurde 2 m unterhalb der Oberfläche (helles blau), bei 7 m Tiefe (blau) und 2 m über der Sohle (dunkelblau).

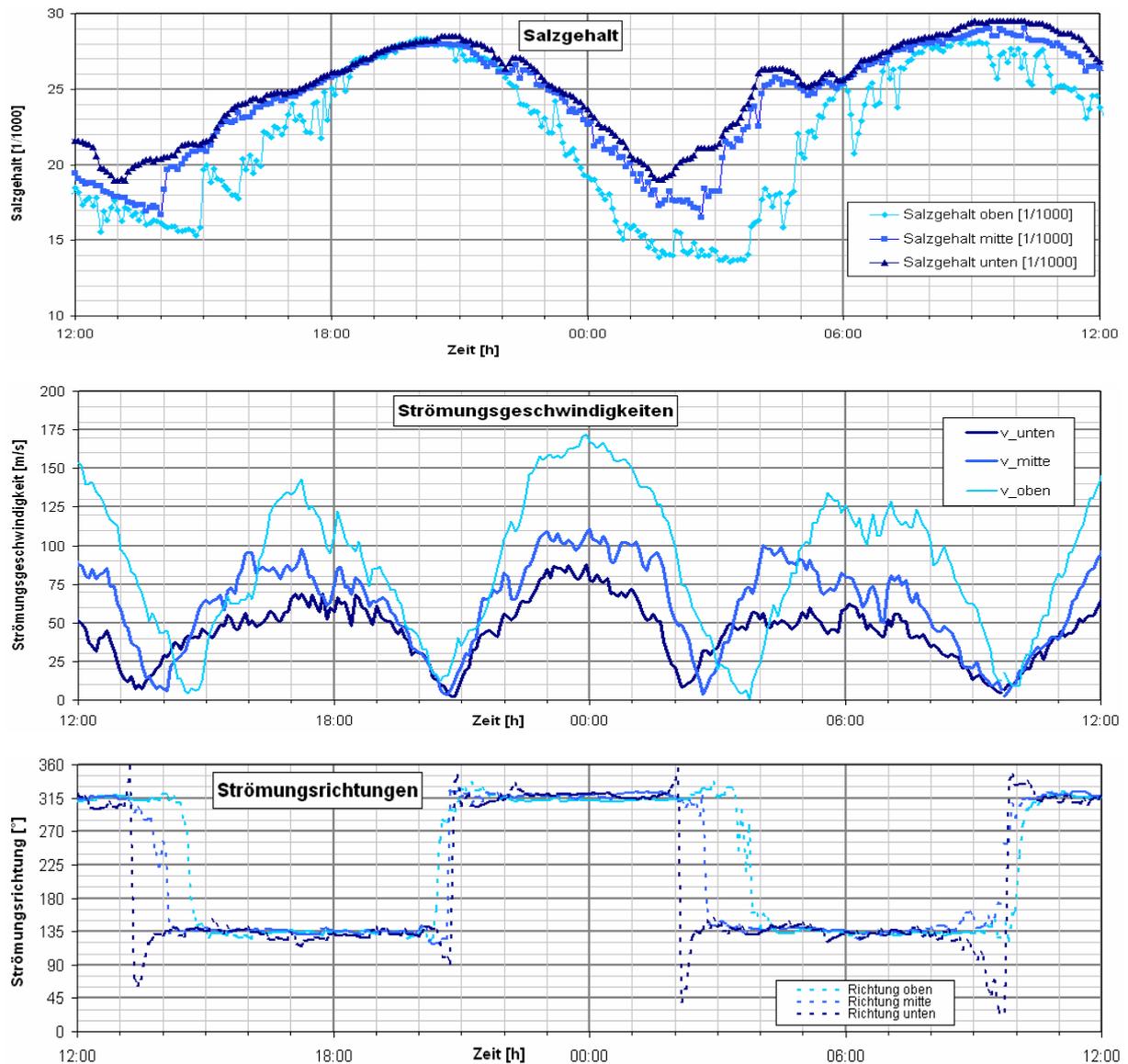


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf der bei Fahrwassertonne 36 gemessenen Strömungen und Salzgehalte

Deutlich erkennbar ist der in diesem Bereich wirksame barokline Dichteeffekt.

Die Ebbstromkenterung findet an der Gewässersohle etwa 1,5 h eher als in Oberflächennähe statt. Dies bewirkt eine Tendenz zu einem netto stromauf gerichteten Strom in Sohlhöhe, siehe auch Kapitel 2.3.

Im Bereich der beiden Klappstellen 01 und 03 wurden im Rahmen dieses Projektes im April 2001 und damit noch vor Beginn der Bearbeitung durch den Antragsteller insgesamt 15 Baggergutumlagerungen in einem Zeitraum von 6 Tagen aufgemessen. Das umgelagerte Material stammte aus dem Bereich des Blexer Bogens (Strom-km 60-65) und bestand aus kohäsivem Feinstmaterial mit mittleren Durchmessern zwischen 10 und 15  $\mu\text{m}$ .

Abweichend von den Messungen in der Tideelbe sah die Meßstrategie der GKSS in der Außenweser verstärkt die Ermittlung der longitudinalen Materialausbreitung vor, weshalb bis auf wenige Ausnahmen auf kreuzende Kurse durch den gesamten Querschnitt zwischen den

Leitwerken verzichtet wurde. Für Details zu den in der Außenweser durchgeführten Vertrübungsmessungen sei auf den Abschlußbericht der GKSS von 2005 verwiesen.

## **5 SIMULATIONSERGEBNISSE**

### **5.1 Modellgebiet Elbe**

Da die Situation im Untersuchungsgebiet nicht durch großräumige barokline Effekte beeinflusst ist, wurde für die Simulation der Umlagerungen von der beschleunigten Berechnung mit Hilfe dreidimensionaler Detailmodelle, deren Randsteuerung über ein tiefenintegriertes Umgebungsmodell realisiert wurde, Gebrauch gemacht.

Modelliert wurde die gesamte Tideelbe vom Wehr in Geesthacht bis zum seeseitigen Modellrand seewärts von Cuxhaven mit einem tiefenintegrierten 2DH-Modell, siehe Abbildung 16.

In diese Berechnung eingehängt wurden jeweils hochauflösende dreidimensionale Detailmodelle, für deren Gebietsabmessungen siehe Abbildung 17.

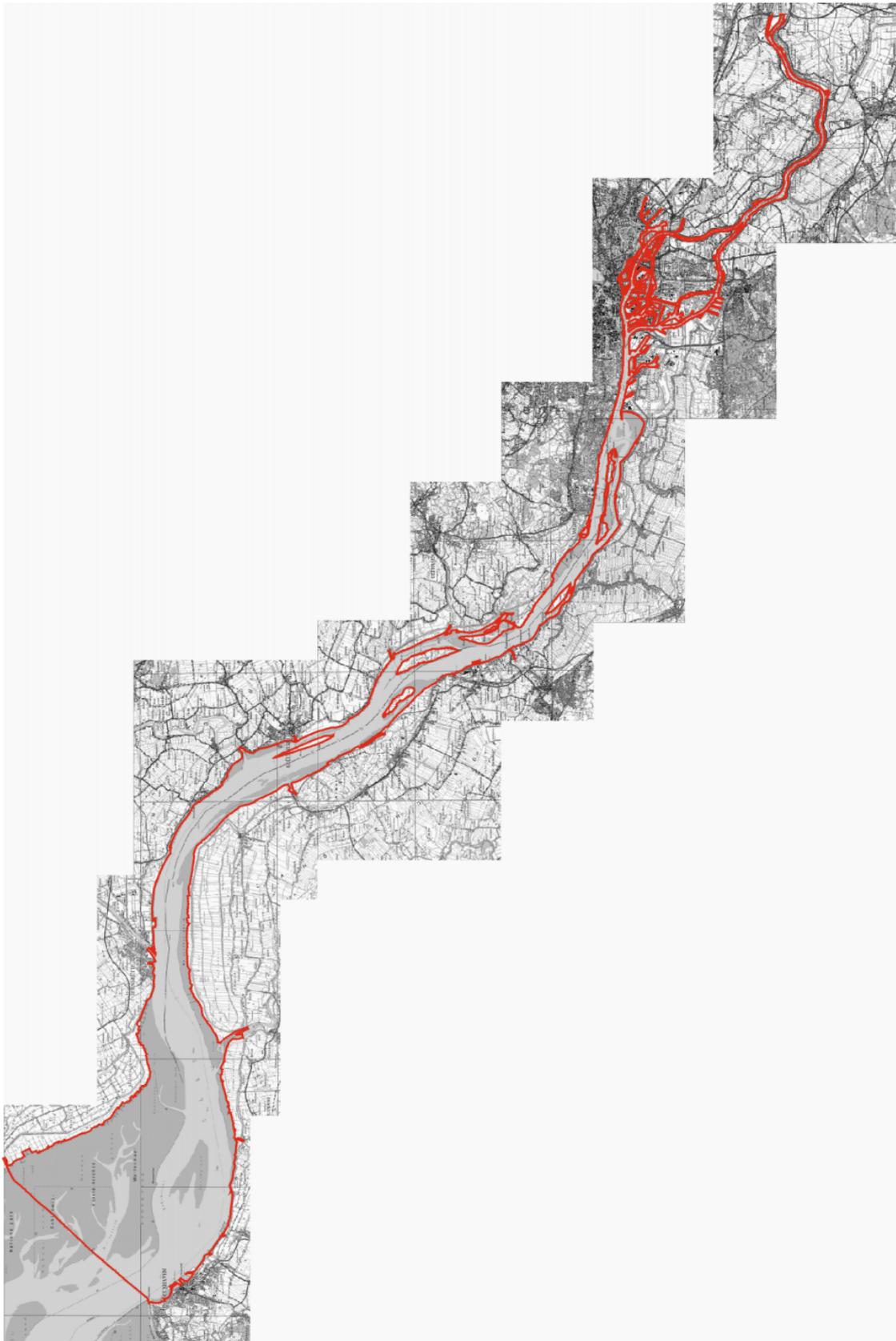


Abbildung 16: Modellrand des Umgebungsmodells der Tideelbe



Abbildung 17: Umriß der hochauflösenden 3D Detailmodelle zur Simulation von Baggergutumlagerungen in der Tideelbe

### 5.1.1 Wasserstände / Strömungsgeschwindigkeiten

Im Rahmen einer Modellkalibrierung wird vorrangig die Sohlreibung variiert, bis die berechneten Wasserspiegellagen mit den an den Pegeln im Gebiet gemessenen übereinstimmen. Nur selten stehen zur Kontrolle der Modellgüte auch Geschwindigkeitsmessungen zur Verfügung, die zusätzliche Aussagen über die zu erwartende Qualität der Sedimenttransport-Berechnung zulassen. Um die Qualität der zwei- und dreidimensionalen Modellrechnungen beurteilen zu können, wurden daher die mit dem ADCP gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten mit berechneten Werten verglichen. Es stellte sich hierbei heraus, daß die 1995 durchgeführten ADCP-Messungen die Strömungsgeschwindigkeiten zeitdiskret auflösen, wobei das gewählte Mittelungsintervall zum Zeitpunkt der Messung so kurz eingestellt war, daß die Meßwerte die turbulenten Fluktuationen der Strömung enthalten, also keinen direkten Vergleich mit den im numerischen Modell berechneten mittleren Werten zulassen, siehe auch Abbildung 18. Aus diesem Grunde war ein Vergleich mit den Ergebnissen der dreidimensionalen Berechnung nicht möglich.

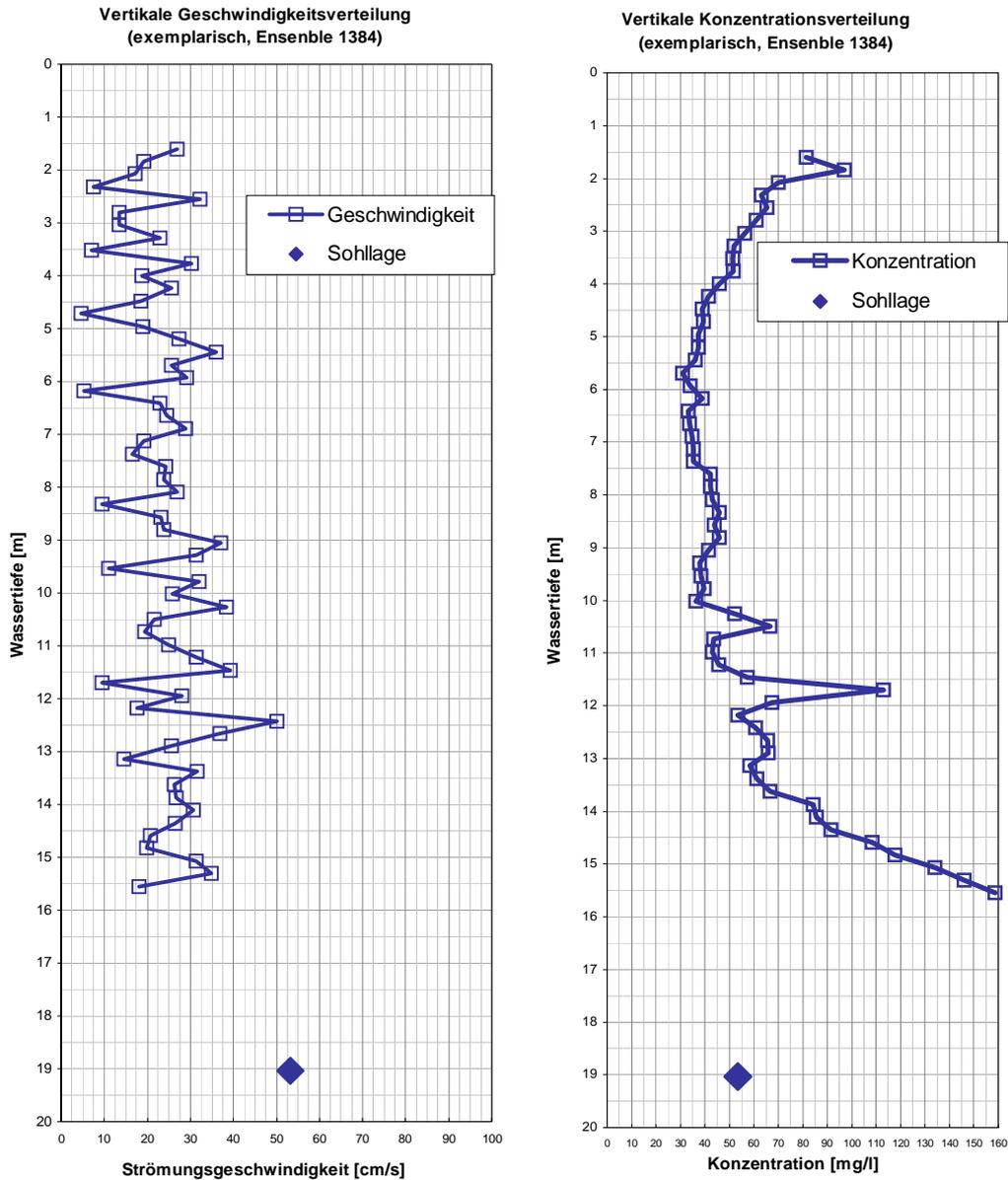


Abbildung 18: Exemplarische Vertikalprofile einer ADCP-Messung aus der Elbe bei Wittenbergen

Nach vertikaler Integration der Meßergebnisse konnte ein qualitativer Vergleich mit den durch das tiefenintegrierte Umgebungsmodell berechneten Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt werden, siehe Abbildung 19. Obwohl selbst die vertikal integrierten Meßwerte noch stark streuen, ist eine gute mittlere Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen.

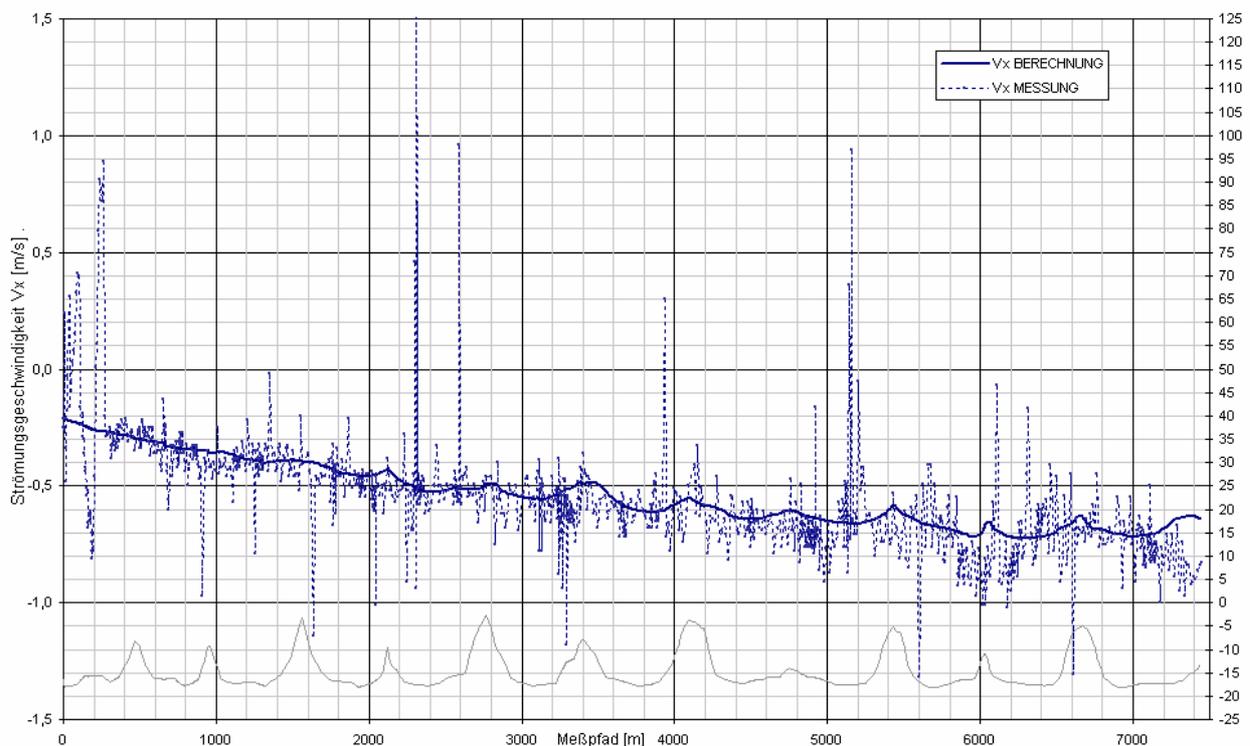
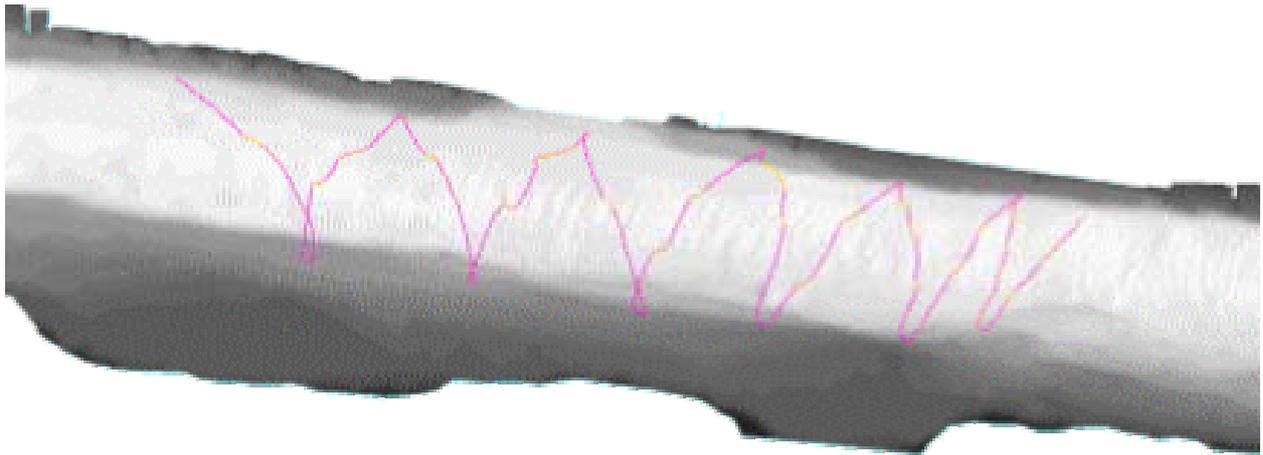


Abbildung 19: oben: Mit Sohltopographie hinterlegter Meßpfad, Elbe bei Wittenbergen, 17.11.1995 unten: Vergleich berechneter und gemessener Strömungsgeschwindigkeiten entlang des Meßpfades nach vertikaler Integration der ADCP - Meßwerte

### 5.1.2 Materialumlagerung vor Wittenbergen am 17. November 1995

Den in diesem Abschnitt vorgestellten Berechnungsergebnissen liegt eine Vertrübungsmessung vom 17. November 1995 zugrunde. Die bereits 1995 aufgenommenen Daten wurden im Rahmen dieses Projektes von der GKSS nachprozessiert, wobei für die Kalibrierung des inversen Modells mangels detaillierterer Informationen über die Zusammensetzung des umgelagerten Materials auf Siltmeterprofile zurückgegriffen wurde.

Für die dreidimensionale Modellierung kam ein Ausschnittmodell (Abbildung 17) zum Einsatz, dessen Randsteuerung mit Werten aus dem Umgebungsmodell erfolgte.

Abbildung 20 zeigt das modellierte Gebiet und eine Detaildarstellung des Nahfeldes der Umlagerungsstelle.

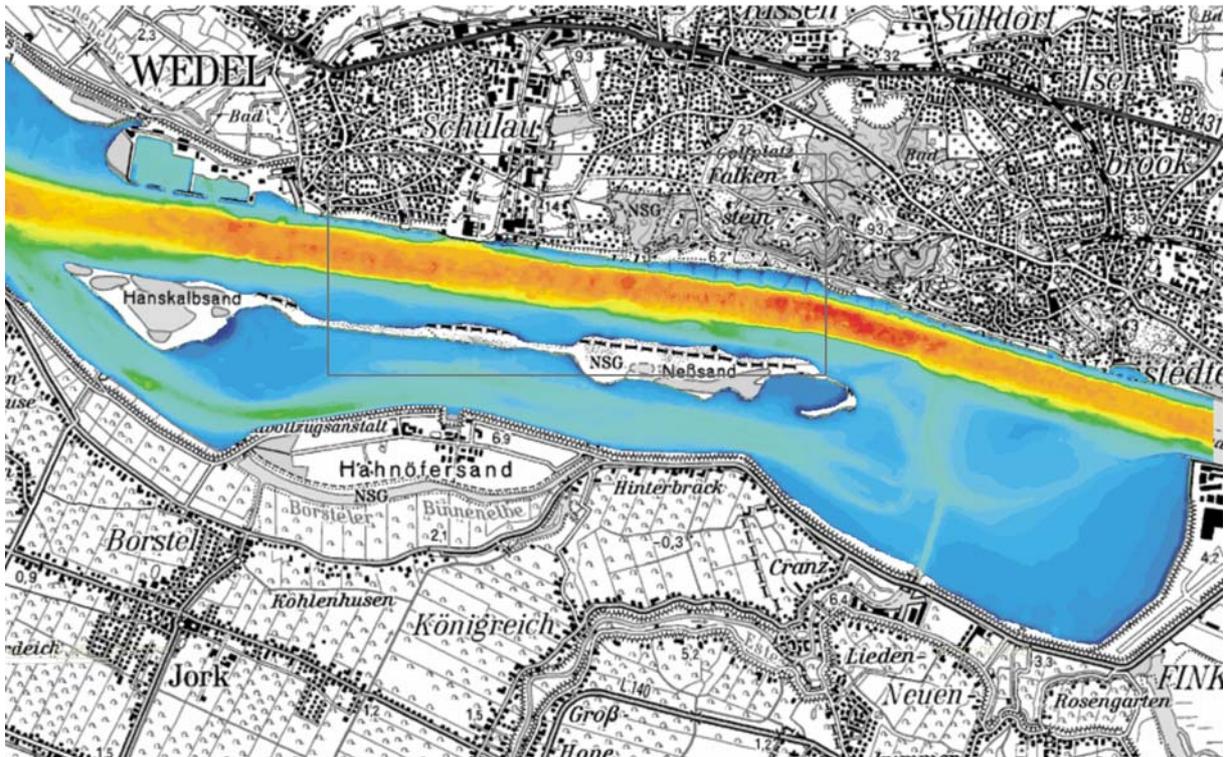


Abbildung 20: Gebietsübersicht und Topographie der Elbe bei Wittenbergen

Der innerhalb des Rahmens gelegene Bereich ist einschließlich der Topographie und der Position der Vergleichsquerschnitte in Abbildung 21 vergrößert dargestellt.

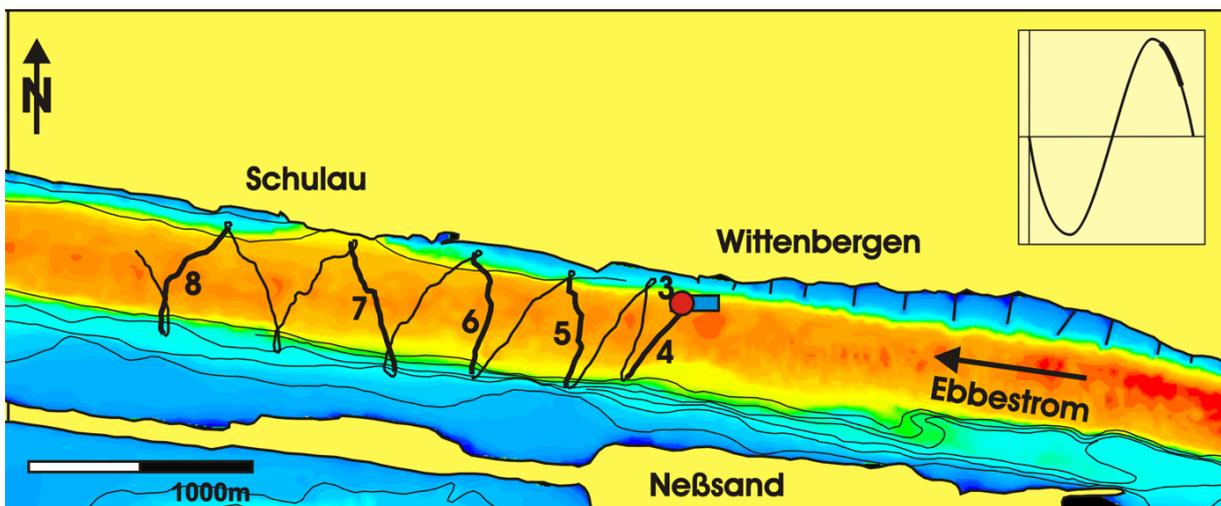


Abbildung 21: Position der Umlagerungsstelle, Meßprofile und Nahfeldtopographie

Die Baggergutumlagerung bestand aus dem gleichzeitigen Entladen von vier Klappschuten mit vorrangig schlickhaltigem Material. 84% der Baggergutmenge waren feiner als 0,063 mm, der mittlere Korndurchmesser betrug 1,23  $\mu\text{m}$ .

Als Anfangsbedingung der Baggerguteinbringung wurden aufgrund des sehr hohen Anteils kohäsiven Materials der Simulation zum Einbringungszeitpunkt zwei Fraktionen (1,2  $\mu\text{m}$ , kohäsiv und 0.2 mm, rollig) über eine angenommene Einbringungsdauer von 40 Sekunden kontinuierlich zugegeben. 80% der Zugabe erfolgten direkt in Suspension (Verwendung eines parabolischen Vertikalprofils der Konzentrationsverteilung als Startvorgabe), 20 % wurden dem Bodenmodell in Form einer Aufhöhung der Sohle zugegeben. Die Verwendung abstrahierter Anfangsbedingungen der Einbringung des Baggergutes ist in den Abschnitten 2.4 und 3.6 begründet und beschrieben. Der Vergleich mit den Messungen zeigt, daß diese Art von Anfangsbedingung bei geringem numerischem Aufwand gute Ergebnisse liefert.

Abbildung 22 zeigt das Ergebnis einer Simulation der oben beschriebenen Umlagerung mit dem numerischen Modell SMOR3D in den entsprechenden räumlich und zeitlich zugeordneten Vertikalschnitten. Die Gegenüberstellung mit den Meßergebnissen in der linken Spalte erlaubt einen direkten Vergleich.

Zur Interpretation der im folgenden dargestellten Meßwerte sei auf die Ausführungen in Abschnitt 4.1 verwiesen. Einschränkend sei hier erwähnt, daß die Meßergebnisse der Suspensionskonzentration infolge der inversen Ermittlung aus den akustischen Rückstreuungintensitäten des ADCP mit einem gewissen Rauschen behaftet sind und daß andererseits numerische Simulationen durch die verfahrensbedingte räumliche und zeitliche Mittelung wie auch die begrenzte Auflösung geglättete Ergebnisse produzieren. Auch das Abbildungsvermögen des Übergangsbereiches von hochkonzentrierter sohnaher Sedimentsuspension in die feste Sohle (in den Abbildungen grau dargestellt) ist beim akustischen Meßverfahren begrenzt. Die Auswertung liefert daher häufig zu geringe Fließtiefen.

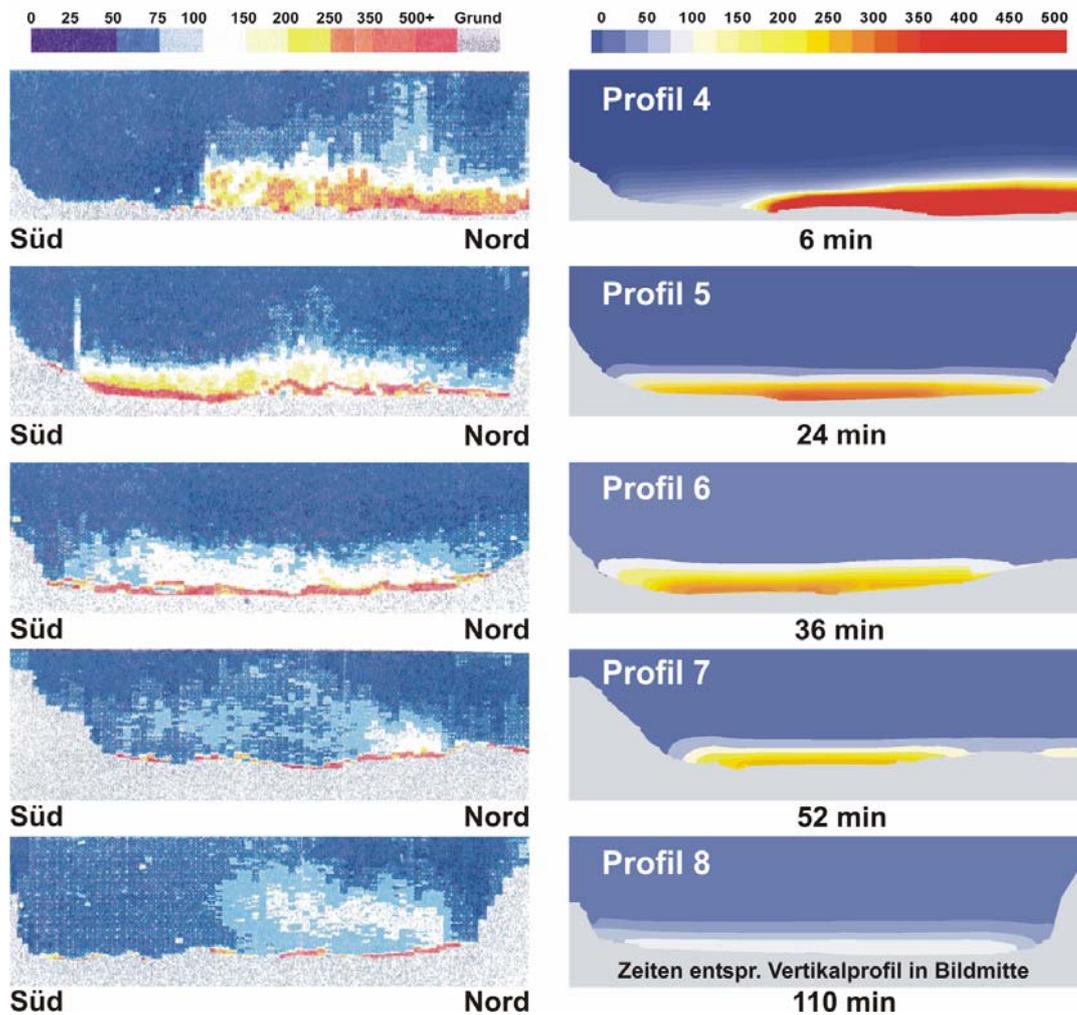


Abbildung 22: Vergleich von gemessenen (links) und berechneten (rechts) Vertikalprofilen der umlagerungsbedingten Suspensionskonzentration

Die numerische Simulation reproduziert das Ausbreitungsverhalten der sohlnahen Dichteströmung. Insbesondere die zeitliche Ausbreitung der Dichteströmung quer zur Hauptstromrichtung wird gut reproduziert. Die Berechnung zeigt in Übereinstimmung mit den Messungen, daß der sohlnahe Dichtestrom etwa 8 Minuten nach Beginn der Materialeinbringung bereits zwei Drittel der Gewässerbreite quer zur Hauptströmung zurückgelegt hat.

Die Profile 5 und 6 zeigen die Materialausbreitung über den gesamten Querschnitt der tiefen Rinne bei deutlicher Schichtung. Beim Durchfahren der Querschnitte 7 und 8 läßt die Schichtungsintensität allmählich nach. Die Messungen zeigen hier bereits eine deutliche Durchmischung in der Wassersäule. Diese ist durch lokale Turbulenz im Strömungsfeld begründet, die als Folge des in SMOR3D verwendeten statistischen Turbulenzmodells nur integral berücksichtigt wird. Das numerische Modell berechnet daher verfahrensbedingt eine gleichmäßigere Einmischung über den gesamten Querschnitt, die sich durch eine gleichmäßigere Aufhellung der Hintergrundfarbe zeigt.

Zur Verdeutlichung des Dichtestromes und der resultierenden Schichtung ist in Abbildung 23 die momentane räumliche Verteilung der Suspensionskonzentration im gesamten Gebiet für

drei diskrete Zeitpunkte dargestellt. Die transparent-blaue Isofläche repräsentiert Konzentrationswerte von 50 mg/l, die gelbe Werte von 200 mg/l.

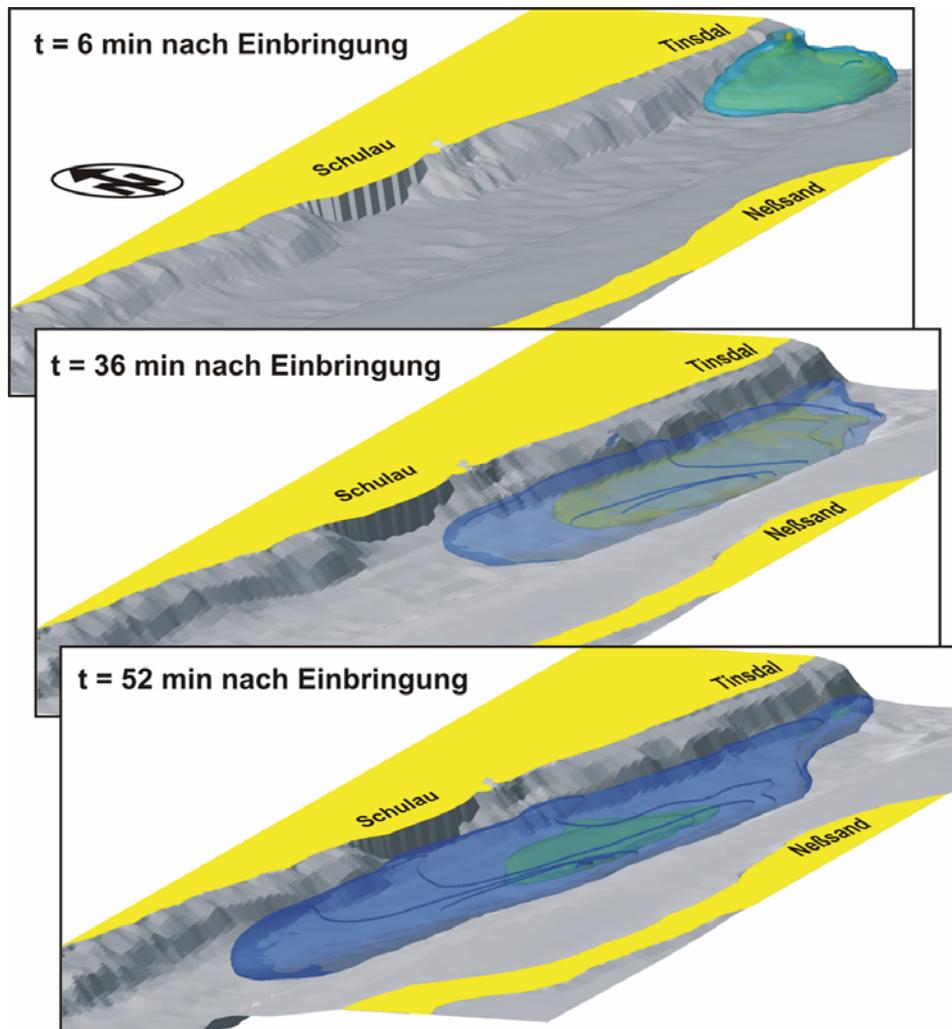


Abbildung 23: Räumliche Isoflächendarstellung der Suspensionsverteilung.  
blau: 50 mg/l, gelb: 200 mg/l

Die obere der drei Grafiken zeigt die Verteilung 6 Minuten nach der Materialeinbringung. Die Wassersäule ist voll durchmischt, Konzentrationen von 200 mg/l und mehr sind zu diesem Zeitpunkt auch an der Oberfläche zu finden.

Die mittlere Grafik zeigt die momentane Suspensionsverteilung 36 Minuten nach der Baggerguteinbringung und weist eine deutliche Schichtung des Wasserkörpers und die laterale Ausbreitung über den gesamten Fließquerschnitt auf.

Dieser Zustand ist 52 Minuten nach der Verklappung noch vorhanden, jedoch hebt sich die 50 mg/l Isofläche infolge des Nachlassens der Schichtungsintensität. Suspensionskonzentrationen von 200 mg/l existieren an der vorderen Front der Vertrübungswolke bereits nicht mehr. Deutlich zu erkennen ist, daß das zunächst an der Einbringungsstelle sedimentierte Material auch 52 Minuten nach der Einbringung noch resuspendiert wird und so die Baggergutwolke in der Nähe der Klappstelle mit Sediment versorgt.

### 5.1.3 Materialumlagerung vor dem Neßsand bei Flutstrom

Abbildung 24 verdeutlicht die qualitativen Ausbreitungspfade von umlagerungsbedingtem Feinsedimenten bei einer Flutstromverklappung am Nordufer des Neßsand. Das Modellerte Ereignis fand am 27. April 1995 durch das Entleeren einer Klappschute mit vorrangig sandigem Material an der Klappstelle Neßsand statt.

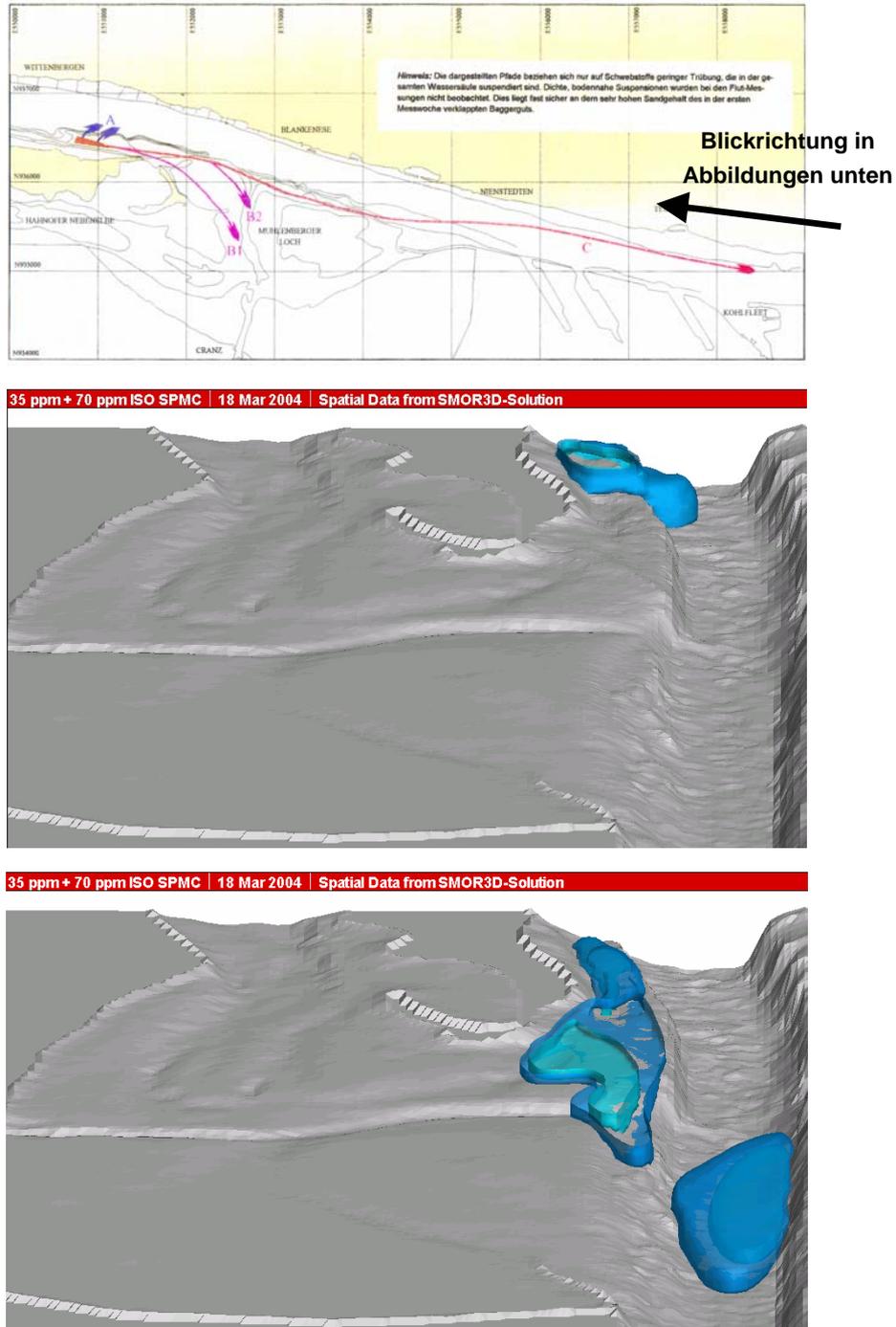


Abbildung 24: Vergleich von qualitativem Ausbreitungspfad (oben) und Simulation (mitte und unten) für eine Flutstromverklappung am Neßsand. Die Simulationsergebnisse zeigen den Zustand 12 und 60 Minuten nach Beginn der Einbringung

Die obere Hälfte von Abbildung 24 zeigt die aus den zusammengefaßten Flutstrom-Messungen vom April 95 abgeleiteten qualitativen Ausbreitungspfade, die unteren beiden zwei Isoflächendarstellungen (35 ppm und 70 ppm) für die Zeitpunkte 12 und 60 Minuten nach Beginn der Materialeinbringung.

Der im oberen Teil von Abbildung 24 durch die violetten Pfeile dargestellte Eintrag von Feinstsediment in das Mühlenberger Loch findet sich in den Berechnungsergebnissen ebenfalls wieder. Dieser liegt in einem in das Mühlenberger Loch gerichteten Füllstrom begründet, der ebenfalls den parallel zur Hauptströmung auf der Böschung zur tiefen Rinne transportierten Teil der Vertrübungswolke stabilisiert und damit entlang des Mühlenberger Loches dessen Absinken in den Hauptquerschnitt verhindert. Direkt nach der Verklappung bewegt sich ein Teil der eingebrachten Materialmenge als Dichtestrom quer zur Hauptströmung entlang des lokalen Bodengradienten in die tiefe Rinne und wird dort in Hauptstromrichtung advektiert. Abbildung 24 zeigt diesen Anteil nach 60 Minuten als einzelne Vertrübungswolke in der rechten unteren Bildecke. Aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten im Hauptquerschnitt ist diese bereits weiter transportiert worden als der Anteil auf der Böschung.

## **5.2 Modellgebiet Außenweser**

Im Bereich des Untersuchungsgebietes dominiert die großräumige barokline vertikale Zirkulation das Strömungs- und Sedimenttransportregime. Dieser Effekt soll insbesondere wegen seines erheblichen Einflusses auf die im Vordergrund stehenden suspensiven Transportvorgänge nicht vernachlässigt werden, so daß hier die Modellierung des vollständigen Jade-Weser-Ästuars mit einem dreidimensionalen Modell nötig ist.

Modelliert wurde daher ein Gebiet von gut 950 Km<sup>2</sup> Grundfläche, welches neben Außenweser und Jade ebenso die gesamte Tideweser bis zum Wehr in Hemelingen umfaßt. Abbildung 25 zeigt das Jade-Weser-Ästuar mit der Modellgrenze. Die in der südöstlichen Bildecke anschließende Tideweser wurde bis zum Wehr in Hemelingen mit modelliert.

Die Steuerung der offenen Modellränder wurde mit einem übergeordneten großräumigen Modell der Deutschen Bucht realisiert. Hierzu wurde die Dynamik der Tidewelle entlang des seeseitigen Modellrandes entsprechend der Lösung des übergeordneten Modells parametrisiert. Die parametrische Funktion wurde dann mit den Pegelaufzeichnungen des Wasserstandspegels Leuchtturm Alte Weser aus dem Untersuchungszeitraum skaliert.

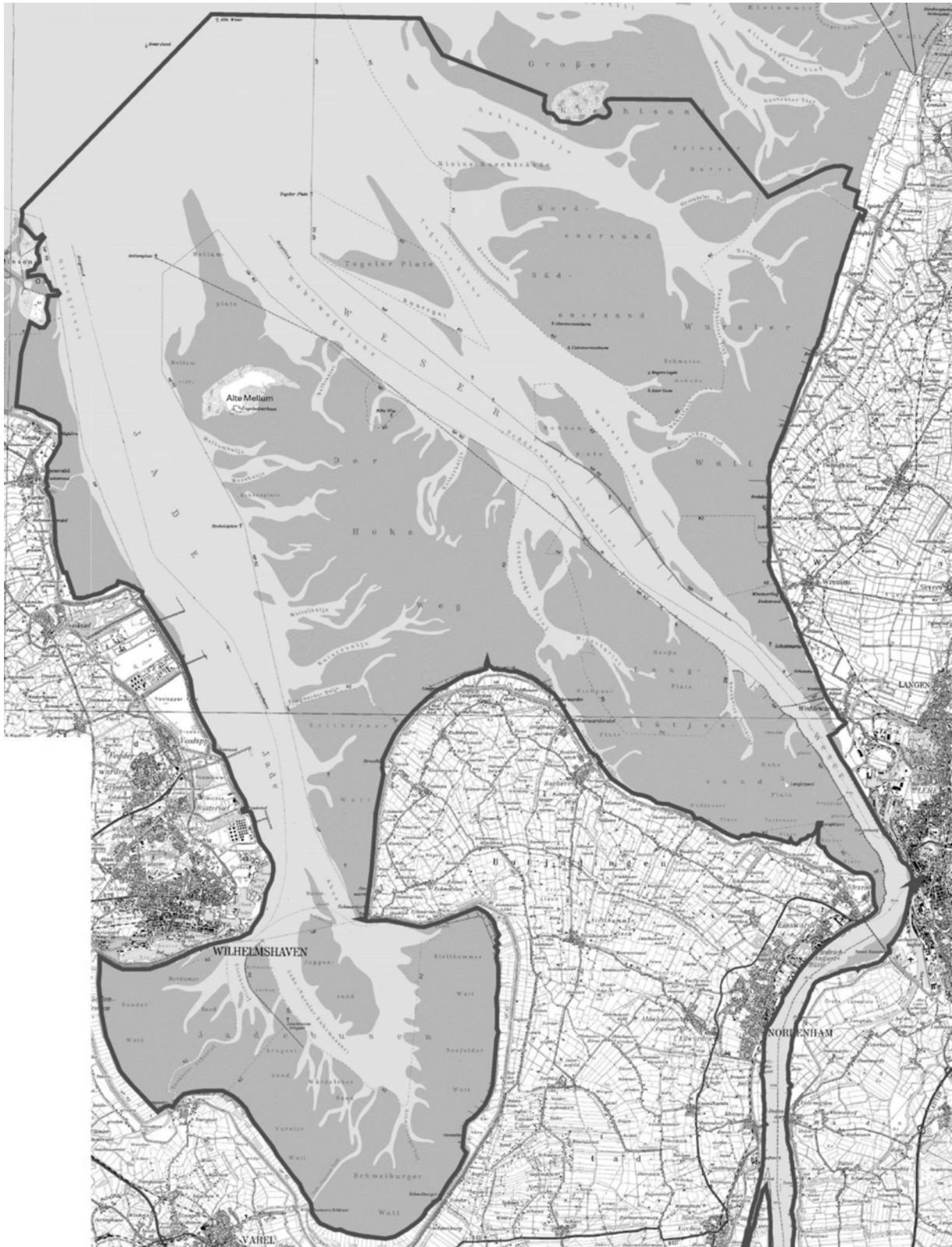


Abbildung 25: Gebietsübersicht Jade-Weser-Ästuar mit Modellrand

### 5.2.1 Wasserstände / Strömungsgeschwindigkeiten

Zur Kontrolle der Modellkalibrierung werden Wasserstands- und Strömungsmessungen aus dem Untersuchungsgebiet mit Modellergebnissen verglichen.

In den Meßprotokollen der GKSS vom April 2001 ist eine Querüberströmung des Längswerkes auf der Robbenplate dokumentiert, derzufolge oberflächennah suspendiertes Baggergut über das Leitwerk transportiert wurde. Diese Querüberströmung ist ebenfalls in einem Gutachten der BfG [BFG, 1994] belegt und wurde dort unter anderem durch den temporären Einsatz eines Hilfspegels im Wurster Arm vermessen.

Abbildung 26 zeigt den Vergleich von gemessenen und berechneten Wasserspiegeldifferenzen zwischen dem Pegel Robbensüdsteert und dem oben beschriebenen Hilfspegel, der temporär auf gleicher Höhe im Wurster Arm von der BfG betrieben worden ist, um Dauer und Richtung der Querüberströmung des Leitwerks Robbensüdsteert abschätzen zu können. Die Wasserspiegeldifferenz resultiert aus den unterschiedlichen Laufzeiten der Tidewelle in den beiden durch die Robbenplate getrennten Rinnen.

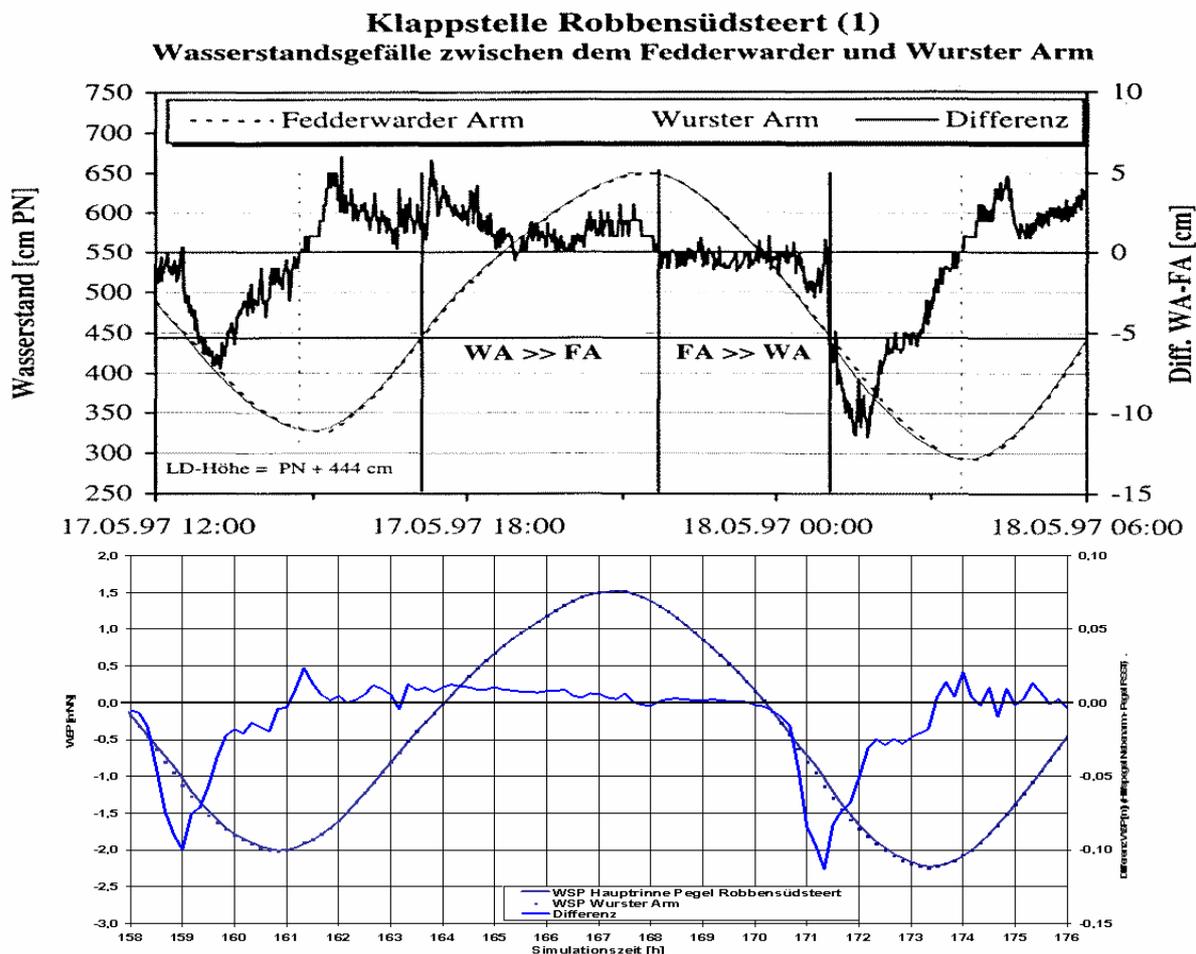


Abbildung 26: Vergleich zwischen gemessenen (oben) und berechneten (unten) Wasserstands-differenzen zwischen Pegel Robbensüdsteert und Hilfspegel im Wurster Arm

Die gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den BfG-Messungen bestätigt die parametrisierte Steuerung des seeseitigen Modellrandes.

Der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten entlang eines Meßpfades im Rahmen einer Vertrübungsmessung verdeutlicht, daß auch die im Untersuchungsgebiet berechneten Strömungsgeschwindigkeiten gut mit den gemessenen übereinstimmen.

Für die Interpretation der ADCP-Messung sei nochmals auf die Anmerkungen in Abschnitt 4.1 verwiesen.

Abbildung 27 zeigt den Vergleich von gemessenen und berechneten Vertikalprofilen der Strömungsgeschwindigkeit entlang des Meßpfades aus der Messung 08. Der Datensatz umfaßt die letzten beiden Stunden einer ablaufenden Tide. Im letzten Drittel des dargestellten Zeitraumes zeigen Messung und Rechnung in guter Übereinstimmung, daß die Ebbströmung in Sohlhöhe zuerst zum Stillstand kommt. Auch der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit wird in guter Übereinstimmung getroffen.

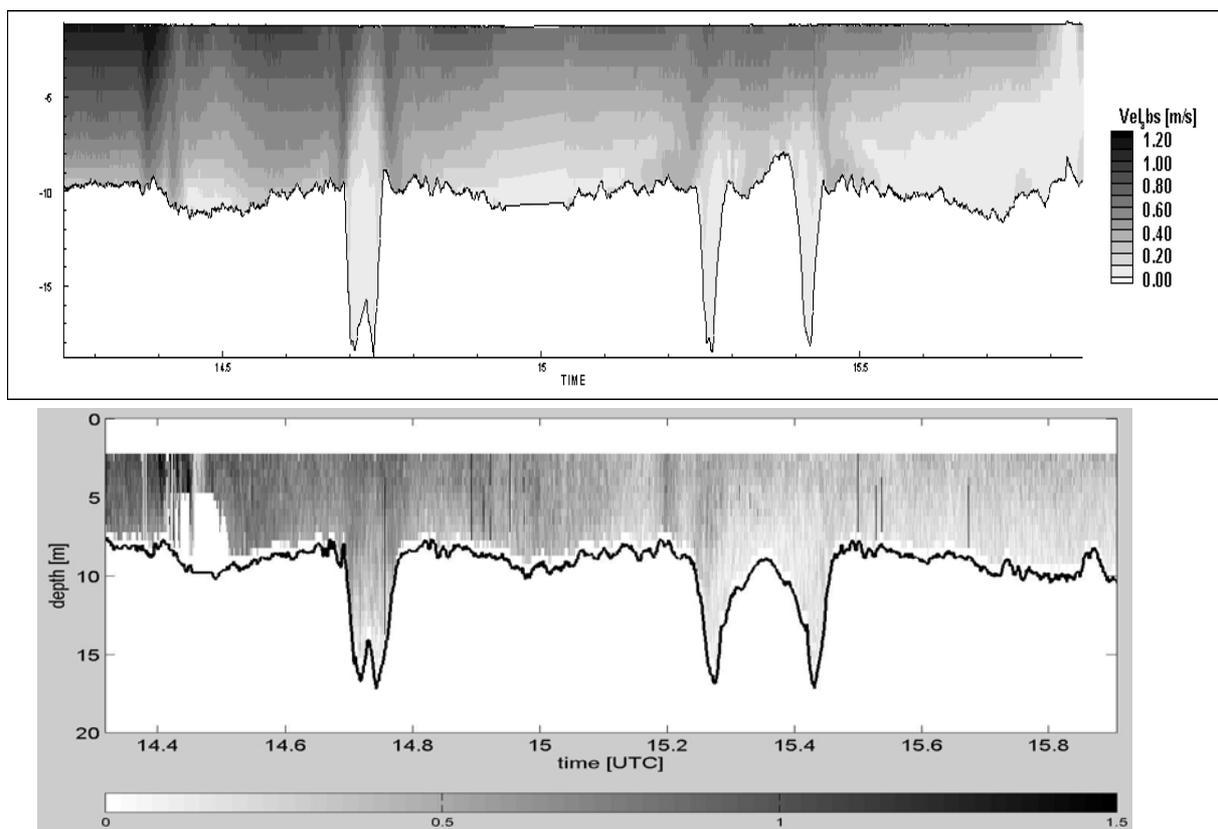


Abbildung 27: Vergleich von gemessener (unten) und berechneter (oben) Verteilung der absoluten Strömungsgeschwindigkeit entlang des Meßpfades

Die Stromkenterung setzt gegen 15,5h UTC in Sohlhöhe zuerst ein. Im Bereich der hier dargestellten Umlagerungsstelle ist daher ebenfalls eine schwache barokline Schichtung vorhanden.

### 5.2.2 Barokline Schichtung der Außenweser

Die Reproduktion der hydrodynamischen Situation einschließlich schichtungsbedingter Effekte ist aufgrund des „treibenden“ Einflusses der Strömung Voraussetzung für die korrekte Berechnung von Baggergutverdriftungen.

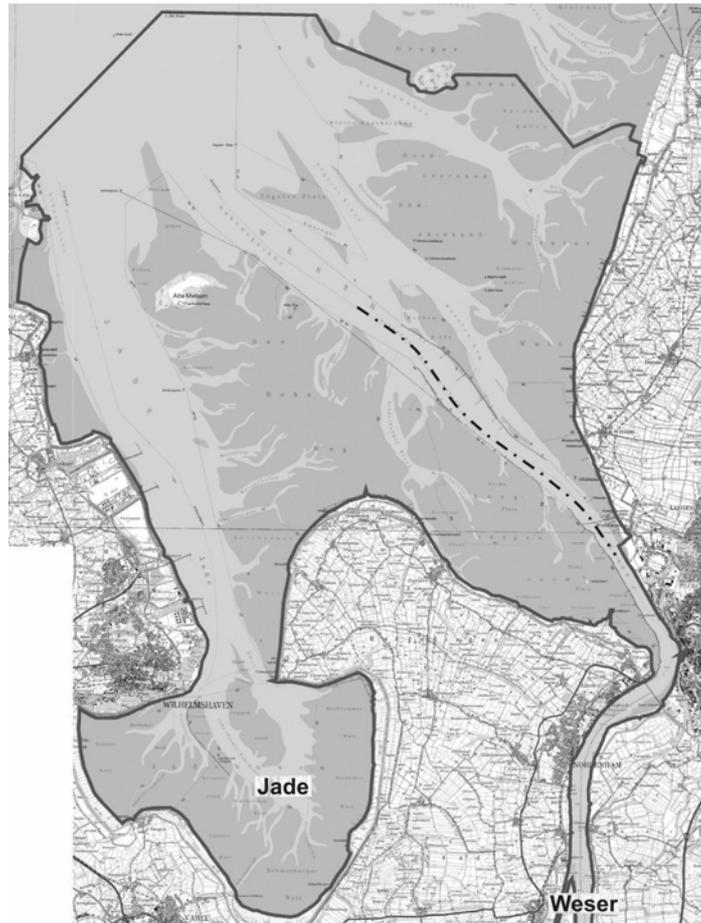
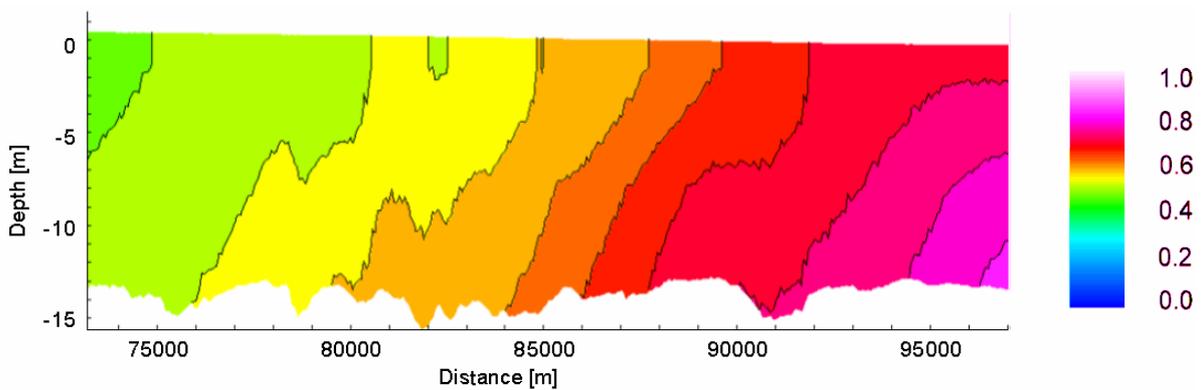


Abbildung 28: Gebietsübersicht mit Modellrand, Längsschnitt

Abbildung 28 zeigt als gestrichelte Linie die Position eines Längsschnittes. Dieser erstreckt sich über eine Länge von etwa 24 Km von Weser-Km 70 (Containerterminal bei Bremerhaven) bis nördlich der Längswerke des Fedderwarder Fahrwassers, Weser-Km 96.

Um die in der punktuellen Messung ermittelte barokline Schichtung zu verdeutlichen, sind in Abbildung 29 zwei Vertikalschnitte in Längsrichtung des tiefen Hauptquerschnittes dargestellt.



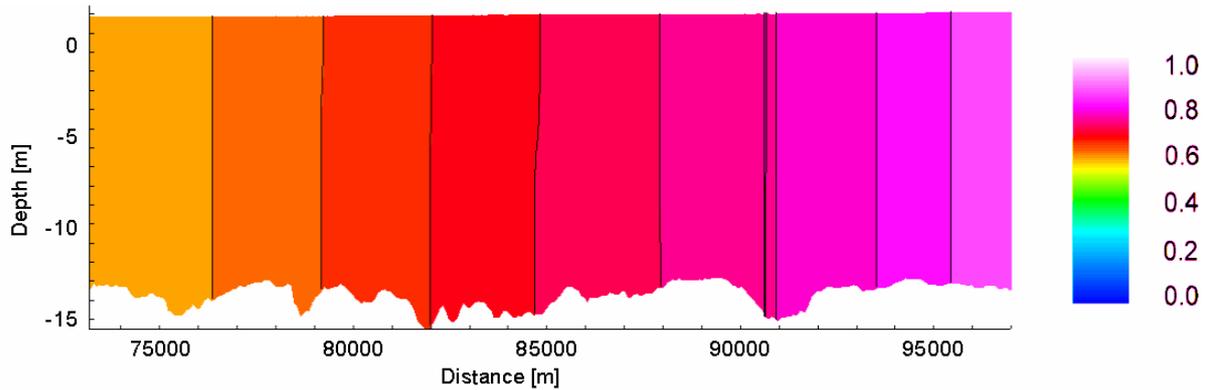


Abbildung 29: Vertikalschnitte der Salzgehaltsverteilung entlang Längsschnitt  
 oben: Barokline Schichtung bei ablaufender Tide  
 unten: Vollständige Durchmischung gegen Ende der Flutphase

Dargestellt sind die Isolinien des Salzgehaltes. Die seeseitige Grenze befindet sich rechts, der Salzgehalt ist mit den auftretenden Maxima der Verteilung normiert, da die absoluten Werte in Abhängigkeit von der Oberwassermenge, des Spring-Nipp-Zyklus und der momentanen Windsituation deutlich variieren. Die Darstellung ist zudem stark überhöht.

In Abbildung 29 oben ist deutlich die barokline Schichtung bei ablaufender Tide zu erkennen. Im Bereich der Umlagerungsstellen (Weser-Km 80 - 88) wird eine normierte Differenz von 0,2-0,3 erreicht, was in absoluten Werten einer Salzgehaltsdifferenz von 3-5 Promille entspricht. Dieses Ergebnis korreliert gut mit den bei Fahrwassertonne 36 durchgeführten Meßreihen (Abschnitt 4.3).

Der zur Hochwasserzeit existierende völdurchmischte Zustand ist in der unteren Abbildung dargestellt. Er stellt sich in der Simulation übereinstimmend mit den Messungen gegen Ende der Flutphase ein und hält bis kurz nach der Ebbstromkenterung an.

Die Reproduktion der baroklinen Schichtung entspricht mit guter Genauigkeit der durch Punktmessungen ermittelten Schichtung des Natursystems.

### 5.2.3 Baggergutumlagerung unter Ästuarbedingungen (Außenweser)

Im Ästuar sind die Dichteeinflüsse infolge der Baggerguteinbringung überlagert mit denen infolge Salinität. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Berechnungsergebnisse werden verglichen mit Messungen, die im Rahmen einer BMBF-finanzierten Meßkampagne von der GKSS in der Außenweser durchgeführt wurden. Zum Einsatz kam dabei die bereits in Kapitel 4.1 beschriebene akustische (ADCP-Backscatter) und optische (Siltmeter) Instrumentierung.

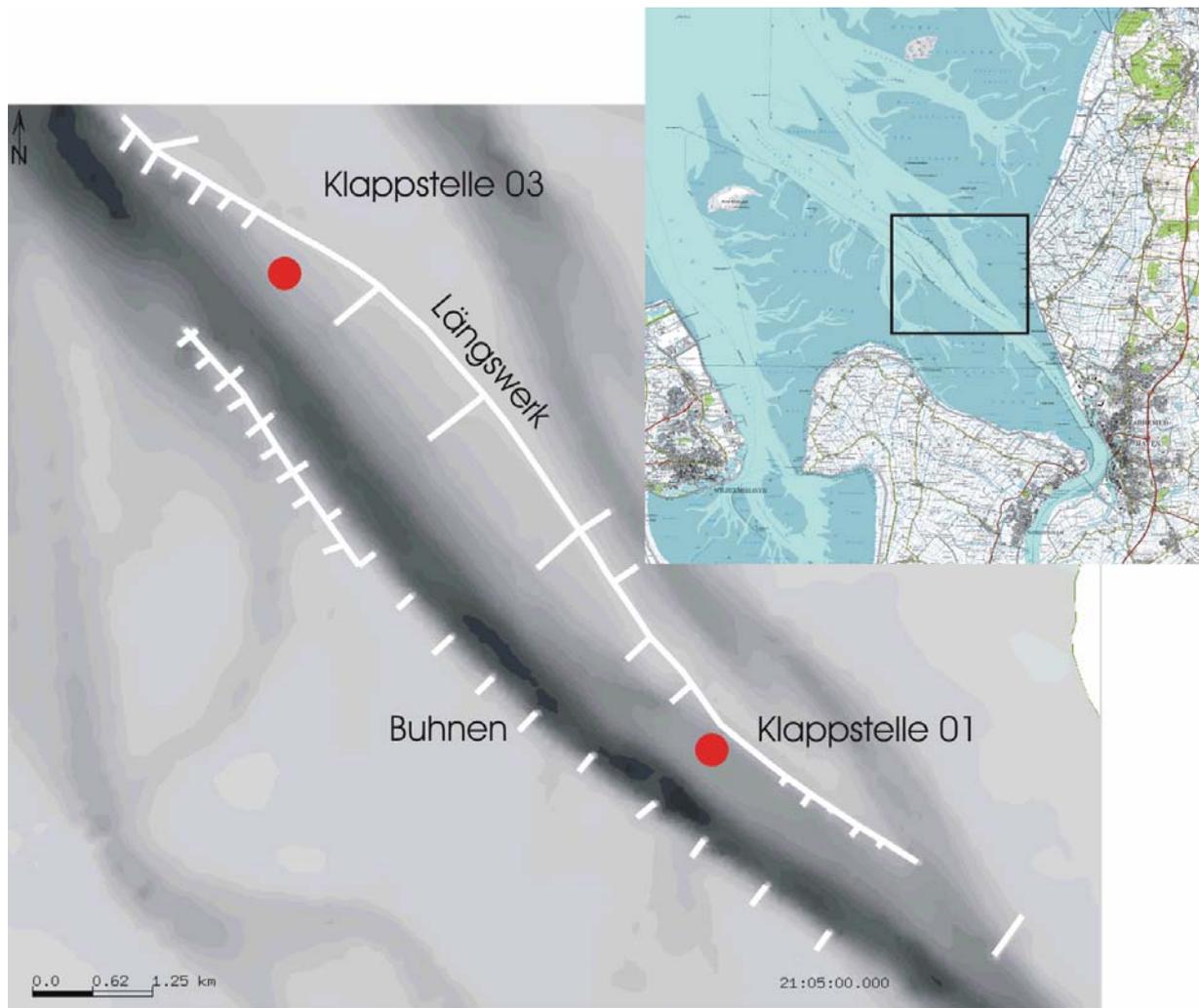


Abbildung 30: Außenweser-Fahrwasser (Fedderwarder Fahrwasser):  
Topographie mit Ausschnittsrahmen (grau) für Meßgebiet.

Zwischen den Längswerken sind vom WSA Bremerhaven zwei Einbringungsstellen ausgewiesen (siehe Abbildung 30). Diese werden je nach Tidephase (Position 01 bei ablaufender, Position 03 bei auflaufender Tide) beschickt.

Die Topographie zeigt das Längswerk am oberen Rand der Abbildung 31 sowie den Übergang zur tiefen Rinne am unteren Bildrand. Die Sohle im dargestellten Bereich weist eine mittlere Lage von -10 mNN auf. In der oberen linken Bildecke ist ein ausgeprägter Bühnenkopfkolk zu erkennen, innerhalb dessen die Sohle in etwa auf dem Niveau der tiefen Rinne (ca. -16 mNN) liegt.

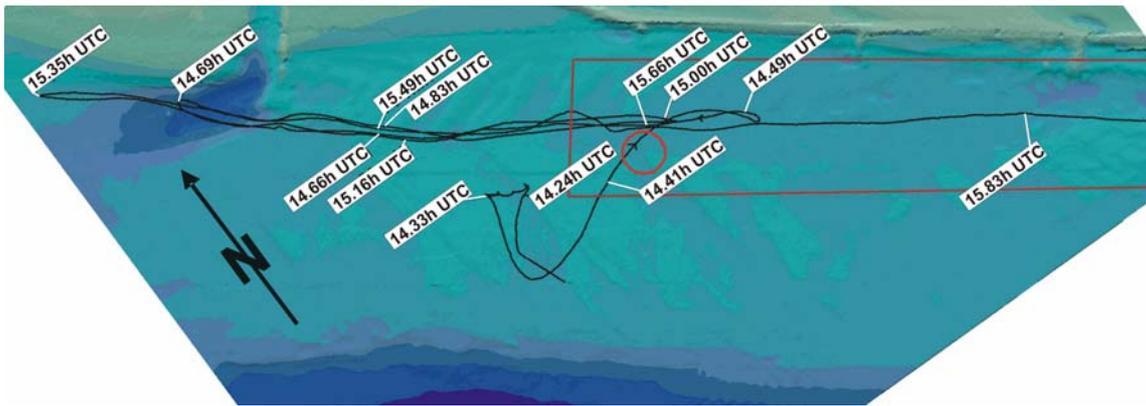


Abbildung 31: Detailtopographie, Meßpfad und Umlagerungsstelle (rot).  
Zeitangaben relativ zu Einbringungsbeginn

Die Meßprofile beschränken sich auf das Nahfeld der Baggerguteinbringung innerhalb des in Abbildung 30 grau gestrichelt dargestellten Bereiches. An der als Klappstelle 01 bezeichneten Position wurde kurz vor Flutstromkenterung ein Laderaumsaugbagger mit etwa 1695 m<sup>3</sup> vorrangig schlickhaltigem Baggergut durch Bodenklappen entladen. Die Stromkenterung fällt in die Dauer der Messung. Das Meßgebiet ist einschließlich seiner Detailtopographie in Abbildung 31 dargestellt.

Die schwarze Kurslinie des Meßschiffes ist mit Zeitangaben versehen. Diese markieren die jeweilige Position des Meßschiffes zum angegebenen Zeitpunkt. Die Einbringungsstelle ist durch einen roten Kreis markiert. Man beachte, daß die Zeitangaben in Abbildung 31 wie auch die Zeitachsen der Darstellungen in den Abbildung 32, 29 und 30 dezimale Stundenangaben (bezogen auf UTC) sind. Die Einbringung des Materials fand demnach gegen 14,33h entsprechend 16:20 UTC statt.

Die Klappstelle wurde vom Meßschiff etwa sechs Minuten nach Beginn der Einbringung erreicht. Zehn Minuten nach Einbringungsbeginn (14,41h UTC) erfolgte eine Kursänderung in Richtung der ablaufenden Tide parallel zum Längswerk. Nach etwa 21 Minuten (14,66h UTC) wurde der Bühnenkopfkolk erreicht, wenig später in Gegenstromrichtung gewendet und die Vertrübungswolke erneut durchfahren. Nach 40 Minuten (15,00h UTC) wurde die Einbringungsstelle erneut erreicht, anschließend wieder gewendet und erneut die Vertrübungswolke bis durch den Bühnenkolk durchfahren. Etwa eine Stunde nach der Einbringung wurde nordwestlich des Kolkes ein letztes Mal in Richtung der Einbringungsstelle gewendet.

Auch für diese Messung gilt daher, daß die in den folgenden Abbildungen dargestellten Meßprofile keinen instantanen Systemzustand, sondern vielmehr eine zeitliche und örtliche Abfolge entsprechend der Kurslinie des Meßschiffes repräsentieren.

Abbildung 32 zeigt den Vergleich aus gemessener und berechneter vertikaler Konzentrationsverteilung entlang des dargestellten Meßpfades. Die Meßwerte (untere Grafik) weisen in direkter Nähe zur Einbringung eine Lücke auf, die aus einer Skalenüberschreitung des Meßbereiches resultiert. Die numerische Modellierung bietet die Möglichkeit, anders als die Naturmessung das durch die Umlagerung eingebrachte Material getrennt vom natürlichen Hin-

tergrund betrachten zu können, wovon hier aufgrund der deutlicheren Darstellung gebrauch gemacht wurde.

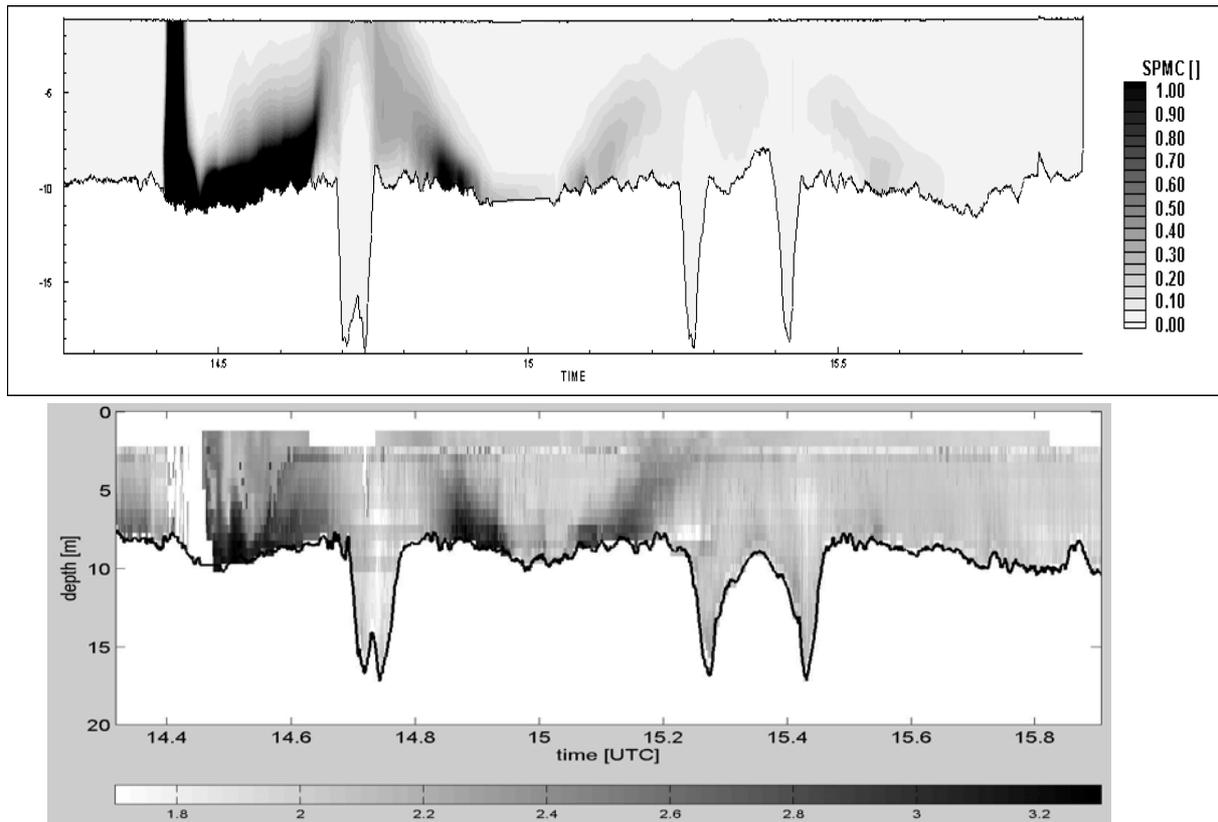


Abbildung 32: Vergleich von gemessener (unten) und berechneter (oben) Verteilung der Suspensionskonzentration entlang des Meßpfades

Die sich bereits Minuten nach der Einbringung einstellende Konzentration in Sohlnähe wird vom Modell reproduziert. Beim Erreichen des Kolkes (14,7h UTC) gehen die gemessenen Konzentrationen auf die Größenordnung des natürlichen Hintergrundes zurück. In den Kolk ist entgegen der Erwartung, daß die einbringungsbedingt dichtere Suspension in die Vertiefung fließt, kein Materialeintrag erfolgt. Dieser stellt sich auch beim erneuten Erreichen des Kolkes ca. 55 Minuten nach der Einbringung (etwa 15,3h UTC) nicht ein. Zu diesem Zeitpunkt ist eine deutliche „Schiefstellung“ der Vertrübungswolke zu beobachten, wobei Fluid höherer Konzentration und damit höherer Dichte in Oberflächennähe gelangt ist. Dieser Zustand ist beim anschließenden Durchfahren der Vertrübungswolke ab 15,5h UTC noch immer vorhanden, jedoch weisen Messung und Simulation eine infolge von Absingvorgängen reduzierte Suspensionskonzentration auf.

Die Begründung für dieses zunächst wenig plausible, jedoch von Messung und Berechnung bestätigte Ergebnis liefert die in Abbildung 33 dargestellte Salzgehaltsverteilung entlang des Meßpfades. Übereinstimmend bestätigen Messung und Simulation, daß in der Flutstromkennterphase der Bühnenkopfkolk mit deutlich salzhaltigerem Wasser gefüllt ist als seine Umgebung. Die resultierende höhere Fluidichte in diesem Bereich zwingt das mit der Restströmung seewärts transportierte suspendierte Sediment in die oberen Bereiche der Wassersäule.

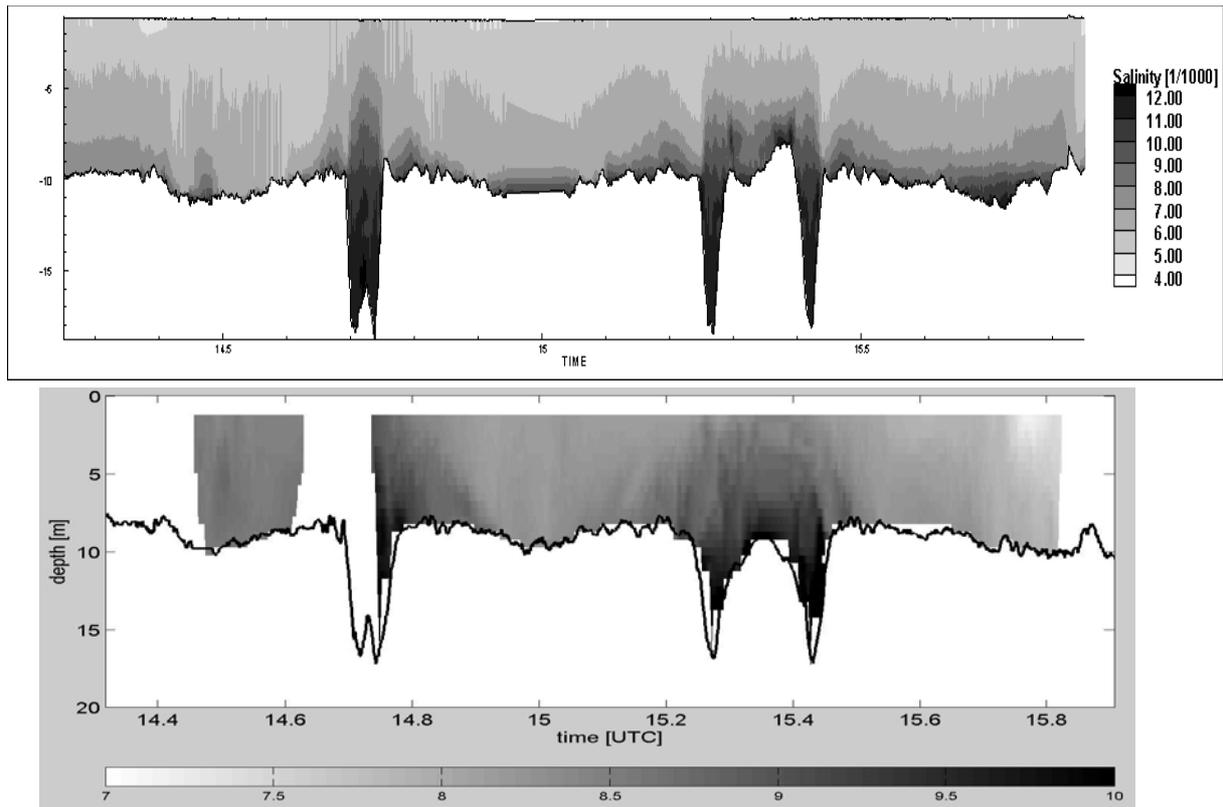


Abbildung 33: Vergleich von gemessener (unten) und berechneter (oben) Verteilung des Salzgehaltes entlang des Meßpfades

Die dargestellte Messung verdeutlicht die gute Reproduktion der lokalen hydrodynamischen Situation durch das numerische Modell. Diese wird ebenfalls durch den in Abbildung 27 dargestellten Vergleich der gemessenen mit den berechneten Strömungsgeschwindigkeiten entlang des Meßpfades deutlich. Beide Grafiken zeigen die erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der oberen Böschung des Kolkes wie auch die geringen Strömungsgeschwindigkeiten im Kolk selbst.

## 6 SCHRIFTTUM

**BfG** – Bundesanstalt für Gewässerkunde: Anpassung der Fahrrinne der Außenweser an die weltweit gültigen Anforderungen der Containerschifffahrt, Bericht Nr. 0664, Koblenz 1994

**Boutin**, R.: Dumping of Muddy Dredged Material in Shallow Water – State of Knowledge, Experimental Study and Reliability of Modeling, PIANC Bulletin Vol. 110, 2002

**Cameron**, W.M. and **Pritchard**, D.W., „Estuaries“ aus The Sea, Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, 1963

**Dyer**, K.R.: Estuaries – A Physical Introduction, John Wiley & Sons, London, New York, Sydney, Toronto 1977

**Dyer** K.R.: Coastal and Estuarine Sediment Dynamics, John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1986

**Riethmüller**, R.: Datenbericht für den F&E-Auftrag „Baggergut“, GKSS Forschungszentrum Geesthacht, Institut für Küstenforschung, 2005

**Graf**, W. H.: Hydraulics of Sediment Transport, Mc Graw-Hill, New York, 1971

**Liu**, P.: A Finite Volume / Volume of Fluid Method for Solving the Navier-Stokes-Equation with Application to Water-Wave Problems, Lecture Notes, 2004

**Mewis**, P.: Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flußkurven, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der TU Darmstadt, Heft 126, 2002

**Nasner**, H.: Über das Verhalten von Transportkörpern im Tidegebiet, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover, Heft 40, 1974

**Orton**, P.M., **Kineke**, G.C.: Comparing Calculated and Observed Vertical Suspended-Sediment Distributions from a Hudson River Estuary Turbidity Maximum, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 52 (3), 2001

**Partheniades**, E.: Erosion and Deposition of Cohesive Soils, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91 (1)

**Pritchard**, D.W.: A Study of the Salt-Balance in a Coastal Plain Estuary, Journal of Marine Research, Vol.13, 1954

**Rijn**, L. van: Sediment Pickup Functions, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110 (10), 1984

**Rijn**, L. van: Sediment Transport, Part 1: Bed Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110 (10), 1984

**Rijn**, L. van: Sediment Transport, Part 2: Suspended Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110 (11), 1984

**Rijn**, L. van: Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas, Aqua Publications, Amsterdam, 1993

**USACE:** Engineering and Design: Dredging and Dredged Material Disposal, Engineer Manual 1110-2-5025, 1983

**USGS,** Summary of Findings About Circulation and the Estuarine Turbidity Maximum in Suisun Bay, Ca, <http://sfbay.wr.usgs.gov/access/suisunbay/>, 2002

**Wallisch, S.:** Ein mathematisches Modell zur Berechnung der hydromechanischen Beanspruchung von Riffelsohlen, Techn. Berichte über die Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau der TU Darmstadt, Heft 54, 1998

**WES** Waterways Experiment Station: Fine Sediment Erodibility Characterization, Dredging Research Technical Notes, DRP-1-03, 1990

**WES** Waterways Experiment Station: Analysis of Dredged Material Deposition Patterns, Dredging Research Technical Notes, DRP-1-10, 1992

**WES** Waterways Experiment Station: Erosion by Entrainment of Fluidized Cohesive Sediments, Dredging Research Technical Notes, DRP-1-15, 1994

**WES** Waterways Experiment Station: The Automated Dredging and Alternatives Management System (ADDAMS), Environmental Effects of Dredging; Technical Notes, EEDP-06-12, 1995

**Witte, G.:** Untersuchungen zur Baggergutausbreitung und Wassergüte nach Umlagerung vor Wittenbergen – Kurzzeitausbreitung, Bericht SB 224/95 SF, Amt für Strom- und Hafenausbau Hamburg, 1996

**Zanke, U.C.E:** Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982