



BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

BAW



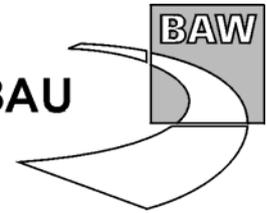
GUTACHTEN

**Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe
an die Containerschifffahrt**

**Gutachten
zur ausbaubedingten Änderung
der morphodynamischen Prozesse**

BAW-Nr A3955 03 10062

H.1 c



**Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe
an die Containerschifffahrt**

**Gutachten
zur ausbaubedingten Änderung
der morphodynamischen Prozesse**

Auftraggeber: Projektbüro Fahrrinnenanpassung
der Unter- und Außenelbe beim
Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg der WSV
(Bündelungsstelle) und Hamburg Port Authority
Moorweidenstraße 14
20148 Hamburg

Auftrag vom: 1. November 2004, Az.: A;192-4;427.04

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 03 10062

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeiter: Dr. Heyer, Dr. Winkel, Dr. Weilbeer

Hamburg im August 2006

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Mit dem Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom 15. September 2004 zur Aufnahme der weiteren Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe in den Bundesverkehrswegeplan erhielt das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord den uneingeschränkten Planungsauftrag für die Hauptuntersuchung. Seitens der Freien und Hansestadt Hamburg wurde das damalige Amt Strom- und Hafenbau (jetzt Hamburg Port Authority) mit der Planung des weiteren Fahrrinnenausbauers beauftragt.

Für das Planfeststellungsverfahren wurde die BAW vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg und der Hamburg Port Authority über das gemeinsame Projektbüro Fahrrinnenanpassung (JAP-Auftrag Nr. A3955 03 10062 und Schreiben vom 1.11.2004, Geschäftszeichen A;192-4;427.04) beauftragt, eine wasserbauliche Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter zu erstellen.

Im Rahmen dieser Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe soll die Fahrrinne der Elbe so vertieft werden, dass moderne Containerschiffe mit einem Tiefgang bis 13,50 m (Salzwasser) tideunabhängig verkehren können und tideabhängig fahrende Containerschiffe den Hamburger Hafen innerhalb eines zweistündigen Tidefensters mit einem Tiefgang von 14,50 m (Salzwasser) verlassen können. Dabei soll ebenfalls der Verlauf und die Breite der Fahrrinne den Erfordernissen der zukünftigen Schiffstypen angepasst und eine Strecke für die Begegnung von großen ein- und auslaufenden Schiffen hergestellt werden.

Für das vorliegende Gutachten wird der geplante Ausbauzustand mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen (HN)-Modells bezüglich seiner Wirkung bei Normaltiden untersucht und die Änderungen in Bezug auf den planerischen Ist-Zustand dargestellt. Diese Untersuchungen werden für unterschiedliche Szenarien durchgeführt:

- Spring-Nipp Zyklus mit niedrigem, häufigsten Oberwasser
- Spring-Nipp Zyklus mit hohem Oberwasser.

Die hochaufgelöste Modelltopographie des planerischen Ist-Zustandes sowie des Ausbauzustandes der Unter- und Außenelbe wird auf der Grundlage der Topographie von 2003 unter Berücksichtigung der Sollgeometrie erzeugt. Die ausbaubedingten Änderungen der Tidekennwerte in der Elbe ergeben sich aus der Differenz zwischen dem Ausbauzustand und dem planerischen Ist-Zustand.

Für den untersuchten Ausbauzustand ergeben sich in der Unter- und Außenelbe bei den betrachteten Szenarien verschiedene signifikante Änderungen der Kennwerte für den Sedimenttransport und die Morphodynamik. Diese wurden fachlich vor dem Hintergrund der beobachteten Veränderung der Morphologie interpretiert um verschiedene Fragen zu beantworten.



1. Führt der Ausbau zu einer veränderten Sedimentbilanz im Übergangsbereich Ästuar - Deutsche Bucht? Diese Frage ist von Bedeutung, weil eine negative Sedimentbilanz, die mit Sedimentverlusten im Gesamtästuar verbunden wäre, langfristig nachteilige Wirkungen (z.B. Zunahme des Tidehubes) auf die Ästuarentwicklung ausüben würde.
Die Maßnahme verändert nicht die Feststoff-Transportprozesse westlich vom Großen Vogelsand. Im Untersuchungsgebiet ergeben sich an der Westküste von Schleswig-Holstein zwischen dem Bullenloch im Süden und dem Trischendamm im Norden nur tendenzielle (geringe, nicht messbare) Veränderungen durch Zunahme der flutstromorientierten Transporte in den Wattströmen. Im Niedersächsischen Nationalpark und im Hamburgischen Nationalpark sind keine Veränderungen zu verzeichnen.

2. Werden in den tiefen Rinnen die heute bestehenden charakteristischen Richtungen des Netto-Transports für die im System vorhandenen Korngrößenklassen (sowohl für Geschiebe als auch für die im Wasserkörper in Suspension transportierten Sedimente) verändert? Diese Frage ist von Bedeutung, weil eine ausbaubedingte Veränderung der Netto-Transportbänder im Ist-Zustand die langfristige Morphodynamik des Systems und die Unterhaltung der Fahrrinne nachhaltig beeinflussen kann.
Die charakteristischen Richtungen der Netto-Transporte verändern sich nicht, wohl aber die Transportmengen. Die mit dem Ebbestrom dominierenden Transporte werden unterhalb des Elbehafens Brunsbüttel in der tiefen Rinne verstärkt. Dieser Sachverhalt kann zukünftig für das Sedimentmanagement genutzt werden. Oberhalb der Rhinplate werden die mit dem Flutstrom dominierenden Transporte suspendierter Sedimente um ca. 10 % verstärkt. Das resultierende Transportband reicht nach stromauf bis in den Lühebogen hinein. Auch die Geschiebefrachten nehmen zu, sie sind jedoch im Vergleich zu den suspendierten Frachten von untergeordneter Bedeutung. Zur Interpretation dieser Aussage muss berücksichtigt werden, dass der in Flutstromrichtung orientierte Netto-Transport suspendierter Sedimente seine Bedeutung erst mit Oberwasserzuflüssen erlangt, die kleiner sind als $750 \text{ m}^3/\text{s}$. Große Oberwassermengen spülen die Sedimente in stromab gelegene Gewässerabschnitte, kleine Oberwassermengen intensivieren den Netto-Transport stromauf. Eine Verstärkung um 10 % ist deshalb bei großen Oberwasserzuflüssen nicht gegeben.
Die bisher zwischen Schulau und dem Köhlbrandbogen mit dem Flutstrom dominierenden Transporte werden abgeschwächt.

3. Kann es durch ausbaubedingte Veränderung der Netto-Transporte zu neuen Unterhaltungsschwerpunkten kommen?
Die Unterhaltungsbaggermengen werden in der Begegnungsstrecke oberhalb der Lühekurve um mehr als 50 % (bezogen auf die Baggerabschnitte Wedel und Wedeler Au) zunehmen. Die sich tatsächlich einstellenden Mengen werden aber auch vom zukünftigen Sedimentmanagement oberhalb der Rhinplate abhängig sein.

Im Köhlbrandbogen und in der Norderelbe werden die Baggermengen nicht signifikant zunehmen, wenn die Kreislaufmenge (Baggern und Verbringen sowie Rücktransport des Materials durch den Strom) von der Hamburg Port Authority vermindert werden kann.

Die Baggerungen oberhalb vom Glameyer Stack werden sich weiter nach stromab in den Altenbrucher Bogen verschieben.

In der Seeschiffahrtsstraße Elbe werden die Baggermengen insgesamt zunehmen. Unter Berücksichtigung aller in diesem Gutachten präsentierten Berechnungen und Auswertungen, der Kenntnis der derzeitigen Baggerschwerpunkte und der Baggermengenentwicklungen sowie des vorhandenen wasserbaulichen Erfahrungswissens werden die Zunahmen abgeschätzt. Zunächst hat die Analyse ergeben, dass die Baggermengen oberhalb von Nienstedten nicht nennenswert zunehmen werden. Die Abschätzung der Zunahmen kann deshalb auf die Baggermengen beschränkt werden, die in den zurückliegenden Jahren im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg und des WSA Cuxhaven gebaggert wurden. Als Bezugszeitraum werden hierfür die Jahre 2003 bis 2005 verwendet. In diesem Zeitraum wurde in den genannten Bereichen im Mittel 11,3 Mio. m³ pro Jahr gebaggert. Diese Menge wird nachfolgend als Bezugsbaggermenge bezeichnet.

- Da im Bezugszeitraum in den Baggerabschnitten Wedel und Wedeler Au etwa 20 % der Baggermengen aus der Bundesstrecke gebaggert wurden, bedeutet dies, dass in der Begegnungsstrecke nach dem Ausbau mehr als 30 % der Bezugsbaggermenge anfallen werden. Die ausbaubedingte Zunahme beträgt somit mehr als 10 % bezogen auf die Bezugsbaggermenge. Dabei ist neben der Zunahme im Stromauftransport der Sedimente auch zu berücksichtigen, dass die verbreiterte Begegnungsstrecke ein zusätzliches Sedimentationspotenzial bietet.
- An der Rhinplate wird mit einer Zunahme von 3 % bezogen auf die definierte Bezugsbaggermenge gerechnet. Im Bezugszeitraum betrug der Mittelwert ca. 3% der Bezugsbaggermenge, so dass an der Rhinplate wieder mehr als 5 % der Baggermengen in der Bundesstrecke anfallen werden.
- Im Altenbrucher Bogen wird es aufgrund einer zunehmenden Baggerfrequenz und längerfristiger morphologischer Anpassungsprozesse an der südlichen Flanke des Medemgrundes ebenfalls eine Zunahme von mehr als 3 % bezogen auf die definierte Bezugsbaggermenge geben. Der Prozentsatz kann nur grob geschätzt werden, weil eine Berücksichtigung des Erosionsverhaltens des Gewässerbodens mit erheblichen Unschärfen behaftet ist.
- In den weiter vertieften Abschnitten und in den Abschnitten, in denen die Strömungen in der Fahrrinne zunehmen, wird der gravitationelle Sedimenttransport (das entlang von Böschungen durch die Schwerkraft abgleitende Geschiebe) ein wenig zunehmen, so dass nach dem Ausbau mit abschnittsweise erhöhten Seiteneintreibungen gerechnet werden kann, die zeitweise am Fahrrinnenrand gebaggert werden müssen. Diese Zunahmen werden entlang der gesamten Fahrrinne ebenfalls mit 3 % (bezogen auf die definierte Bezugsbaggermenge) abgeschätzt.

Eine exakte Berechnung der zukünftigen Baggermengen ist nicht möglich. Dies ergibt sich einerseits aus den Modellunschärfen und andererseits aus der Unkenntnis der hydrologischen Verhältnisse in den Jahren und Jahrzehnten nach dem Ausbau. Ein Vergleich der betroffenen Baggerabschnitte zeigt aber eindeutig, dass die wesentlichen Zunahmen in der Begegnungsstrecke zu erwarten sind. In dieser Strecke wird auch eine nennenswerte Zunahme der Baggerflächen erwartet.

Die Zunahmen der Baggermengen könnten reduziert werden, wenn das Baggergut nach dem Ausbau nicht mehr in den flutstromdominanten Abschnitten des Systems umgelagert wird. Eine mittelfristig weiter geführte Optimierung des Systems Tideelbe sollte auch auf Grundlage von umfangreichen Naturdaten insbesondere im Hinblick auf die Erfassung der Sedimentdynamik erfolgen. Ein wesentliches Ziel liegt dabei in der Reduzierung der Baggermengen und vor allem der Kosten.

4. Kann es durch ausbaubedingte Veränderung der Netto-Transporte zu fortschreitenden Erosionsstrecken kommen? Die Beantwortung dieser Frage ist von Bedeutung, weil eine über lange Strecken und über lange Zeiten fortschreitende Erosion die Dynamik des Systems schrittweise verstärken könnte.

Fortschreitende Erosionsstrecken werden sich aufgrund der verhältnismäßig geringen Zunahme des Tidehubes ausbaubedingt nicht einstellen. In einigen Böschungsabschnitten der Fahrrinne wird es – wie auch nach dem jüngsten Ausbau – zu Anpassungen kommen. Eine fortschreitende Eintiefung der Fahrrinne wird über längere Strecken ausgeschlossen.

Zwischen Glameyer Stack und Medemrinne-Ost wird es lokal zu Aufweitungen (Tiefen- und Breitenzunahme) der Rinne kommen. Dies verstärkt die Leistungsfähigkeit der tiefen Rinne und vermindert den Durchfluss durch die parallele Medemrinne. Durch eine natürliche Verbreiterung der tiefen Rinne nach Norden in Richtung Medemgrund wird die Strömung am Niedersächsischen Ufer partiell reduziert.

Die fortschreitenden Erosionen am westlichen Medemsand werden in – wenn auch abgebremster Weise – weiter voran schreiten. Dieser Prozess verläuft unabhängig von den Fahrrinnenanpassungen.

Durch Vertiefung der Fahrrinne und durch das Strombauwerk in der Medemrinne wird es in der Hauptrinne zu langfristigen morphologischen Anpassungsprozessen durch partiell veränderte Sandtransporte kommen. Die extreme Dynamik der Medemrinne wird abgeschwächt. Ihre im westlichen Abschnitt bestehende Verlagerung nach Norden wird gebremst. Es wird erwartet, dass die durch das Strombauwerk eingebrachte Dämpfung der Tidedynamik von Außen- und Unterelbe langfristig erhalten bleibt. Darüber hinaus wird eine Grundlage geschaffen, das Konzept mittel- bis langfristig weiter zu entwickeln. Nach Realisierung der Fahrrinnenanpassung besteht die Möglichkeit mit weiteren (räumlich verteilten) Strombaumaßnahmen die Wirkung der Dämpfung schrittweise, aufeinander abgestimmt und vor allem mit der weiteren Entwicklung des Natursystems zu verstärken. Im Vergleich zu dieser Vorgehensweise wäre ein Konzept abzulehnen, das zur Schaffung der Dämpfung nur einmal stark in das Natursystem eingreifen würde.



5. Kann es in den Prielsystemen der Außenelbe zu beschleunigten Verschlickungen oder Versandungen kommen? Diese Frage ist von Bedeutung, weil Fisch- und Krabbenfangplätze betroffen sein könnten.

Durch den Ausbau wird es in der Außenelbe nicht dazu kommen. Mit einer durch das Strombauwerk in der Medemrinne abgebremsten Morphodynamik kann möglicherweise die Versandung / Verschlickung reduziert werden, weil nach dem Ausbau jährlich weniger Sedimente im Medemgebiet freigesetzt werden.

6. Kann es in den Nebenarmen und Seitenbereichen der Tideelbe zu beschleunigten Verschlickungen oder Versandungen kommen? Diese Frage ist von Bedeutung, weil ein beschleunigter Verlust von Flutraum insbesondere in der Hahnöfer Nebenelbe (aber auch in den sich stromab anschließenden Nebenelben) in einer komplexen Wirkungskette den Stromauftransport verstärken kann.

Es wurde bereits dargestellt, dass oberhalb der Rhinplate die mit dem Flutstrom dominierenden Transporte suspendierter Sedimente zunehmen werden. Das resultierende Transportband reicht nach stromauf bis in den Lühebogen hinein. Hieraus folgt, dass auch in den Nebenelben ausbaubedingte Zunahmen im Eintrag schllickiger Sedimente eintreten werden. Die Zunahmen des Netto-Transports in den Nebenelben nach stromauf sind aber geringer als in der Hauptelbe. In der Hahnöfer Nebenelbe wird eine signifikante Entlastung der bestehenden Sedimentationen eintreten.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	3
2.1	Systemgeometrie der geplanten Anpassungen der Außen- und Unterelbe	3
3	Bearbeitungskonzept	6
3.1	Vorgaben	6
3.2	Untersuchungsmethode	7
4	Morphologie des Elbe-Ästuars	9
4.1	Geologie	9
4.2	Anthropogene Eingriffe in das Elbeästuar	9
4.2.1	Fahrwasserausbauten	9
4.2.2	Unterhaltungsbaggerungen	11
4.2.3	Morphologischer Nachlauf	11
5	Sedimentologie des Elbeästuars	13
5.1	Sedimentinventar	13
5.2	Schwebstoffdynamik	16
6	Morphodynamische Prozesse im Untersuchungsgebiet	21
6.1	Erosion, Sedimentation und Konsolidierung	21
6.2	Ursachen des Sedimenttransportes	22
6.2.1	Strömungsbedingter Sedimenttransport	22
6.2.2	Seegangsbeeinflusster Sedimenttransport	24
6.2.3	Äolischer Sedimenttransport	26
7	Örtliche Verhältnisse im Untersuchungsgebiet	27
7.1	Meteorologische Verhältnisse – Wind	27
7.2	Hydrographische Verhältnisse	28
7.2.1	Tideverhältnisse und Oberwasserzuflüsse	28
7.2.2	Seegangsverhältnisse	30
8	Relative Bedeutung der morphodynamischen Prozesse	34
8.1	Strömungsinduzierte Prozesse	34
8.2	Seegangsinduzierte Prozesse	34
8.3	Äolischer Sedimenttransport	36
9	Mathematische Verfahren zur Simulation der Morphodynamik	37



9.1	Simulationsmodelle und deren Wechselwirkung	37
9.2	Anmerkungen zur Analyse und zur Interpretation morphodynamischer Prozesse	40
10	Modellbildungen und Modellbetrieb	42
10.1	Modellgebiet und Berechnungsgitter	42
10.2	Modellsteuerung	46
10.2.1	Wasserstand	47
10.2.2	Oberwasser	47
10.2.3	Salz	48
10.2.4	Sediment	48
10.3	Modellkalibrierung und –validierung	49
10.4	Ergänzende Modellansätze	51
10.5	Von der Modellkalibrierung zur wasserbaulichen Systemanalyse	52
10.6	Untersuchungsszenarien	53
11	Analyse der Modellergebnisse	54
11.1	Hinweise zur Ergebnisdarstellung und -analyse	54
11.2	Hinweise zur Strukturierung der Ergebnisanalyse	55
11.3	Prozessorientierte Analyse für wichtige Kennwerte	55
11.3.1	Strömungsgeschwindigkeiten	55
11.3.2	Morphologisch wirksame Bodenschubspannungen	61
11.3.3	Geschiebetransport	63
11.3.4	Suspensionstransport	66
11.3.5	Evolution der Gewässersohle	69
11.4	Prozessorientierte Analysen für morphologische Einheiten	77
11.4.1	Außenelbe im Übergang zur Deutschen Bucht	78
11.4.2	Priele, Sände und Wattgebiete nördlich Medemsand	79
11.4.3	Kratzsand, Medemrinne, Medemgrund, Altenbrucher Bogen	79
11.4.4	Neufelder Sand bis Elbehafen Brunsbüttel	82
11.4.5	Elbehafen Brunsbüttel bis Rhinplate	83
11.4.6	Rhinplate bis Lühesand	84
11.4.7	Lühesand bis Nienstedten	85
11.4.8	Eintrag suspendierter Sedimente in die Nebenelben	86
11.4.9	Hamburger Hafen bis Bunthäuser Spitze	87
11.4.10	Bunthäuser Spitze bis Wehr Geesthacht	87
12	Bewertung der ausbaubedingten morphologischen Änderungen unter Berücksichtigung der Betroffenheiten	89
12.1	Grundlagen	89
12.2	Auswirkungen auf die Unterhaltungsaufwendungen in der Fahrrinne	90
12.3	Auswirkungen auf die Zufahrt zu den Häfen	94
12.4	Auswirkungen auf die Klappstellen in der Außenelbe	94



12.5	Auswirkungen auf Sportboothäfen und Freizeitanlagen	96
12.6	Auswirkungen auf erosionsgefährdete küstennahe Watten	101
12.7	Auswirkungen auf die Nebenarme der Untereibe	101
12.8	Auswirkungen auf die Siel-Außentiefs	102
Literaturverzeichnis		104

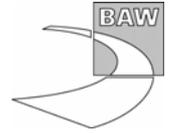
Anlagenbände:

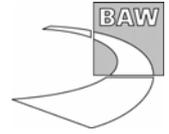
- Anlage 1 Vergleichszustand und Ausbauzustand – 3D Ergebnisse
- Anlage 2 Langfristsimulationen – 2D Ergebnisse
- Anlage 3 Seegangmodellierung

Abbildungsverzeichnis

Seite

Bild 1: Übersicht über die im Januar 2005 verfügbaren Bodenproben	14
Bild 2: Entnahmestellen von 2005 aufgenommenen Sedimentbeprobungen	15
Bild 3: Entnahmestellen von 2005 aufgenommenen Sedimentbeprobungen	15
Bild 4: Entnahmestellen von 2005 aufgenommenen Sedimentbeprobungen	16
Bild 5: Interpretation des ADCP-Signals	18
Bild 6: Lage der aufgenommenen Querprofile in der Tideelbe	19
Bild 7: Aus ADCP-Daten abgeleitete querschnittsgemittelte Konzentrationen	20
Bild 8: Relative Häufigkeit der Windstärken an der Windmessstation Cuxhaven	27
Bild 9: Relative Häufigkeit der Windrichtungen an der Windmessstation Cuxhaven	28
Bild 10: Tidehoch- und -niedrigwasser entlang der Unter- und Außenelbe	29
Bild 11: Oberwasserzufluss in die Unterelbe Januar bis November 2002 in Geesthacht	30
Bild 12: Messstationen in der Außenelbe und vor Helgoland	31
Bild 13: Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen an der Station Cuxhaven	32
Bild 14: Signifikante Wellenhöhe für die Messstation Außenelbe	33
Bild 15: Klassierung der gemessenen signifikanten Wellenhöhen	33
Bild 16: Modellinterne Wechselwirkungen in der Wassersäule	39
Bild 17: Analyse von morphologischen Prozessen	41
Bild 18: Ausdehnung und Tiefenverteilung des "Elbe-Modells" der BAW	42
Bild 19: Gitterelemente in der Nordsee	43
Bild 20: Gitternetz in der Elbe bei Brunsbüttel	43
Bild 21: Gitternetz in der Elbe bei Hamburg	44
Bild 22: Gitternetz untere Oste	44
Bild 23: Wasserspiegelauslenkung für eine Randknoten am seeseitigen Rand	46
Bild 24: Oberwasserentwicklung (Neu-Darchau) im Jahr 2002	47
Bild 25: Oberwasserentwicklung (Neu-Darchau) im Validierungszeitraum	48
Bild 26: Querschnittsintegrierte mittlere Schwebstoffkonzentrationen	50





1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Mit dem Kabinettsbeschluss der Bundesregierung vom 15. September 2004 zur Aufnahme der weiteren Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe in den Bundesverkehrswegeplan erhielt das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord den uneingeschränkten Planungsauftrag für die Hauptuntersuchung. Seitens der Freien und Hansestadt Hamburg wurde das damalige Amt Strom- und Hafenbau (jetzt Hamburg Port Authority) mit der Planung des weiteren Fahrrinnenausbaues beauftragt.

Für das Planfeststellungsverfahren wurde die BAW vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg und der Hamburg Port Authority über das gemeinsame Projektbüro Fahrrinnenanpassung (JAP-Auftrag Nr. A3955 03 10062 und Schreiben vom 1.11.2004, Geschäftszeichen A;192-4;427.04) beauftragt, eine wasserbaulichen Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter zu erstellen.

Im Rahmen dieser Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe soll die Fahrrinne der Elbe so vertieft werden, dass moderne Containerschiffe mit einem Tiefgang bis 13,50 m (Salzwasser) tideunabhängig verkehren können und tideabhängig fahrende Containerschiffe den Hamburger Hafen innerhalb eines zweistündigen Tidefensters mit einem Tiefgang von 14,50 m (Salzwasser) verlassen können. Dabei soll ebenfalls der Verlauf und die Breite der Fahrrinne den Erfordernissen der zukünftigen Schiffstypen angepasst und eine Strecke für die Begegnung von großen ein- und auslaufenden Schiffen hergestellt werden.

Aufgrund der umfangreichen Untersuchungen wurde von der BAW das folgende Bearbeitungskonzept zur Ermittlung der Auswirkungen der Fahrrinnenanpassung zugrunde gelegt:

- **Tidedynamik und Salztransport**

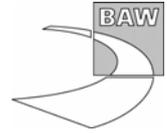
Ermittlung der maßgebenden Kennwerte der Tidedynamik und des Salztransports auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Kennwerte.

- **Sturmfluten**

Ermittlung der heutigen Sturmflutverhältnisse auf der Basis einer hochauflösenden HN-Modellierung des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Sturmflutkennwerte unterschiedlicher Sturmfluten.

- **Morphodynamik**

Beschreibung der heutigen Transportprozesse auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Transportprozesse.



- **Schiffserzeugte Belastungen**

Beschreibung der heutigen schiffserzeugten Belastungen auf der Basis von Naturuntersuchungen und hydraulischen Modellversuchen sowie Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen.

Das vorliegende Gutachten behandelt ausschließlich die Untersuchungen zum Teilaspekt der **morphodynamischen Prozesse**. Diese umfassen die Erosion, den Transport und die Deposition von Sedimenten im Untersuchungsgebiet sowie die daraus resultierenden Unterhaltungsaufwendungen und Sohlhöhenänderungen. In weiteren Gutachten der BAW werden die Teilaspekte Tidedynamik und Salztransport (BAW 2006 a), Sturmfluten (BAW 2006 b) und schiffserzeugte Belastungen (BAW 2006 c) behandelt.

2 Unterlagen und Daten

2.1 Systemgeometrie der geplanten Anpassungen der Außen- und Unterelbe

Zur besseren Verständlichkeit dieses Gutachtens werden die geplanten baulichen Maßnahmen in Außen- und Unterelbe in kurzer Form beschrieben. Einzelheiten zu den Bestandteilen und der Konstruktion der Systemgeometrien werden im BAW-Gutachten zur Tidedynamik und zum Salztransport (BAW 2006 a, Abschnitt 4) gegeben.

Der „planerische Ist-Zustand“ (PIZ) basiert als Vergleichszustand auf der Topographie des Modellgebietes des Jahres 2003. Die Peilungen des Jahres 2003 wurden verwendet, weil bei Beginn des Projektes keine jüngeren Daten verfügbar waren. Weiterhin sind folgende bauliche Vorhaben, deren Realisierung bereits läuft bzw. als sicher angenommen werden kann, in das Berechnungsnetz integriert:

- Die Tiefen der für die Aufspülung im Mühlenberger Loch vorgesehenen Ausgleichsflächen am Hahnöfersand.
- Der Tiefwasserliegeplatz Finkenwerder.
- Verlängerung des Europakais um den 4. Liegeplatz in Cuxhaven
- Die Solltiefen der Zufahrt zwischen BAB-Elbtunnel und Altenwerder.
- Die Rückdeichung der Spadenländer Spitze und die Deichrückverlegung Wilhelmsburg (überwiegend schon vor 2003 realisiert).

Ausgehend von dieser Systemgeometrie wurde der Ausbauzustand (AZ) konstruiert. Dieser ist so konzipiert, dass das Bemessungsschiff die Unter- und Außenelbe tideunabhängig mit 13,50 m Salzwassertiefgang passieren kann. Die tideabhängig ausgehende Fahrt des Bemessungsschiffes mit einem Tiefgang von 14,50 m ist in einem zweistündigen Startfenster ab Seemannshöft von 1,5 bis 3,5 Stunden nach Tideniedrigwasser St. Pauli möglich.

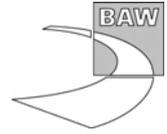
Im Vergleich zur letzten Fahrrinnenanpassung wird die Ausbaugrenze im Köhlbrand weiter stromauf verlegt. Das Ende der Ausbaustrecke liegt nun bei km 619,5 (vorher km 621,8); die Ausbaustrecke umfasst damit auch den gesamten Bereich des neuen Containerterminals in Altenwerder (CTA). Vertiefungen von Hafenbecken und deren Zufahrten finden im Bereich des Waltershofer Hafens und des Vorhafens statt. Vom BAB-Elbtunnel (km 627) bis St. Margarethen bei km 689,1 wird die erforderliche Solltiefe durch das tideunabhängig verkehrende Bemessungsschiff mit 13,50 m Salzwassertiefgang bestimmt. Dies bedeutet gegenüber der heutigen Solltiefe im Sockelbereich von NN -15,80 m eine Vertiefung um 1,50 m auf NN -17,30 m. Über dem BAB-Elbtunnel bleibt die Solltiefe bei NN -16,70 m, stromauf des Elbtunnels sind bis zu den jeweiligen Ausbaugrenzen in Norder- und Süderelbe Solltiefen von NN -17,40 m vorgesehen. Stromab von St. Margarethen fällt die Solltiefe für die tideabhängig

auslaufende Fahrt stetig bis auf NN -19,00 m bei km 734 (Mittelgrund) ab und bleibt bis zum seewärtigen Ausbauende auf dieser Höhe.

Die Trasse der Fahrrinne bleibt im Bereich von See bis zur Störkurve mit der heute bereits vorhandenen Regelbreite von 400 m unverändert. Von der Störkurve bis zur Lühekurve wird die Regelbreite von 300 auf 320 m vergrößert. Durch diese Verbreiterung um 20 m soll eine Begegnung der Bemessungsschiffe mit addierten Schiffsbreiten von 92 m ermöglicht werden. Für die Begegnung tideabhängig einlaufender Massengutschiffe mit tideabhängig auslaufenden Containerschiffen wird etwa zwischen km 644 (Ausgang Lühekurve) und km 636 (Blankenese) ein im Mittel 385 m breiter Begegnungsbereich eingerichtet. Im Bereich der Hamburger Delegationsstrecke wird die Regelbreite der Fahrrinne stromauf dieser Begegnungsstrecke ebenfalls um 20 m vergrößert. Dementsprechend beträgt die Regelbreite in der heute 250 m breiten Strecke zwischen km 636 und Nienstedten bei der Ausbauvariante 270 m. Von Teufelsbrück (km 630) bis zum Bubendey-Ufer bei km 628 wird die nördliche Grenze der Fahrrinnenstrasse um etwa 20 m nach Norden verschoben.

Bei der Anpassung der Unter- und Außenelbe sollen die durch die Fahrrinnenvertiefung ausgelösten Effekte (Erhöhung des Tidehubes, Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten, Erhöhung des Stromauftransportes von Sediment und Verschiebung der Brackwasserzone nach oberstrom) minimiert werden. In der Voruntersuchung konnte gezeigt werden, dass hierzu Unterwasserablagerungsflächen (UWA) im Mündungsbereich der Elbe geeignet sind, die das Eindringen der Tideenergie aus der Nordsee in das weiter oberstrom liegende Ästuar behindern. Dazu sind zwei Unterwasserablagerungsflächen als Strombauwerke, namentlich die UWA „Medemrinne“ und die UWA „Neufelder Sand“ vorgesehen. Die Fläche der UWA Medemrinne beträgt $A=6,28$ Mio. m^2 mit einer Füllmenge $V=12,27$ Mio. m^3 . Die Fläche der UWA Neufelder Sand beträgt $A=5,7$ Mio. m^2 mit einer Füllmenge $V=10,2$ Mio. m^3 . Neben diesen beiden großen UWA's gibt es eine Vielzahl kleinerer Gebiete, in denen das Baggergut untergebracht werden soll. Zum Teil sollen diese Maßnahmen auch dem Uferschutz dienen.

• UWA St. Margarethen	$V=1,3$ Mio. m^3 ,	$A=0,335$ Mio. m^2
• Übertiefenverfüllung St. Margarethen	$V=0,1$ Mio. m^3 ,	$A=0,060$ Mio. m^2
• UWA Scheelenkuhlen	$V=2,3$ Mio. m^3 ,	$A=0,483$ Mio. m^2
• UWA Brokdorf	$V=0,75$ Mio. m^3 ,	$A=0,267$ Mio. m^2
• Ufervorspülung Brokdorf	$V=0,118$ Mio. m^3 ,	$A=0,143$ Mio. m^2
• Ufervorspülung Hollerwettern	$V=1,57$ Mio. m^3 ,	$A=1,137$ Mio. m^2
• Ufervorspülung Glückstadt	$V=1,36$ Mio. m^3 ,	$A=1,057$ Mio. m^2
• Ufervorspülungen Kollmar	$V=0,306$ Mio. m^3 ,	$A=0,446$ Mio. m^2
• Spülfelder Pagensand	$V=1,295$ Mio. m^3 ,	$A=0,347$ Mio. m^2
• Spülfeld Schwarztonnensand	$V=1,03$ Mio. m^3 ,	$A=0,591$ Mio. m^2
• Ufervorspülung Eschschallen	$V=0,56$ Mio. m^3 ,	$A=0,345$ Mio. m^2
• Ufervorspülung Hetlingen	$V=0,118$ Mio. m^3 ,	$A=0,144$ Mio. m^2



- Ufervorspülung Lühe-Wisch $V=0,286 \text{ Mio. m}^3$, $A=0,139 \text{ Mio. m}^2$
- Ufervorspülung Wittenbergen $V=0,200 \text{ Mio. m}^3$, $A=0,250 \text{ Mio. m}^3$

Gegenwärtig existiert auf der Elbe kein permanent verfügbarer Warteplatz für den tideabhängigen Verkehr. Aus nautischer Sicht ist ein Warteplatz erforderlich. Für seine Herstellung vor Brunsbüttel mit einer Tiefe von NN -18,30 m werden 1,8 Mio. m³ Sediment auf einer Fläche von 50 ha gebaggert.

3 Bearbeitungskonzept

3.1 Vorgaben

Das Bearbeitungskonzept zur Ermittlung der ausbaubedingten Wirkungen der Fahrrinnenanpassung auf das Sedimenttransportregime und die Morphodynamik resultiert aus den Vorgaben des Scoping-Termins gemäß §5 UVPG (WSD Nord 2005). Demnach sind für mittlere Tideverhältnisse und verschiedene hydrologische Szenarien vorhabensbedingte Änderungen des Sedimenttransportes im Elbe-Ästuar zu beschreiben.

Für die Ermittlung und Bewertung morphologischer Veränderungen ist folgender Untersuchungsumfang vorgegeben:

- Beschreibung der aktuellen morphologischen Entwicklungen im Untersuchungsgebiet.
- Abschätzung der voraussichtlichen morphologischen Entwicklung des Untersuchungsgebietes ohne Realisierung der Fahrrinnenanpassung von Außen- und Unterelbe im Rahmen einer „Nullvarianten“-Betrachtung.
- Abschätzung der voraussichtlichen morphologischen Entwicklung des Untersuchungsgebietes bei einer Realisierung der Fahrrinnenanpassung von Außen- und Unterelbe.

Eine Abschätzung der langfristigen ausbaubedingten morphologischen Veränderung ist für folgende Bereiche vorzunehmen:

- Zufahrten zu den Häfen
- Hafen und Freizeitanlagen
- Erosionsgefährdete küstennahe Watten (insbesondere Nationalparks)
- Außenelbe-Klappstellen
- Siel-Außentiefs
- Nebenarme der Unterelbe

Zur Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der Seegangsverhältnisse sind Vergleichsbetrachtungen vor und nach der Fahrrinnenanpassung für ausgewählte Seegangsbedingungen durchzuführen.

Zur Herleitung der gutachterlichen Aussagen ist, neben den reinen Modellergebnissen, wasserbauliches Expertenwissen z.B. auf Basis weiterer Modellierungen, Naturmessungen, Sensitivitätsstudien etc. einzusetzen. Zur fachwissenschaftlichen Absicherung der Prognosewerte sind Parameter- und Systemstudien durchzuführen.

3.2 Untersuchungsmethode

Grundsätzliche Wirkungsmechanismen

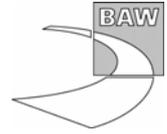
Durch die geplanten Veränderungen in der Geometrie der Fahrrinne und durch die bleibende Unterbringung des Baggergutes in Unterwasserablagerungsflächen wird die Tidedynamik im Elbeästuar verändert. Diese ausbaubedingten Änderungen sind im BAW-Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport (BAW 2006a) detailliert dargestellt. Da die Feststofftransporte und die morphodynamischen Prozesse im Wesentlichen durch das Strömungsregime geprägt werden, können bei ausbaubedingt veränderten Tidedrömungen und Wasserständen auch ausbaubedingte Wirkungen auf das Sedimenttransportregime und auf die Morphodynamik (Veränderung der Gewässersohle) auftreten. Das durch die Tidedrömungen geprägte Transportregime wird ferner durch seegangsinduzierte Prozesse beeinflusst, weil mit Seegang mehr Sedimente in den Wasserkörper eingetragen werden können als bei alleiniger Strömungswirkung. Insbesondere im extremen Flachwasser (Wassertiefe sehr viel kleiner als die Wellenlängen im Seegang) kann ein beachtlicher Beitrag zur Mobilisierung von Sedimenten geleistet werden. Die durch den Ausbau bedingten Veränderungen der Tidedynamik, der Seegangsverhältnisse und der daraus resultierenden Feststofftransporte müssen somit berücksichtigt werden. Daher werden im vorliegenden Gutachten sowohl die Änderungen der Tidedynamik als auch des Seegangsgeschehens unter Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Wechselwirkung bezüglich der resultierenden Wirkungen auf die Feststofftransportprozesse untersucht.

Untersuchungsmethode der wasserbaulichen Systemanalyse

Das Sedimenttransportregime des Elbeästuars wird durch komplexe physikalische Wirkungsmechanismen geprägt. Die Prognose der ausbaubedingten Änderungen musste nach Stand der Technik und Wissenschaft mit hoch auflösenden hydrodynamischen, morphodynamischen numerischen Modellen (kurz: HMN-Modellen) auf einem leistungsfähigen Computer durchgeführt werden, die alle relevanten physikalischen Einflussgrößen beschreiben.

Mit bewährten Methoden der wasserbaulichen Systemanalyse wurden die ausbaubedingten Änderungen der abiotischen Systemparameter als physikalische Kenngrößen des Sedimenttransportes ermittelt. Diese Kenngrößen sind Grundlage für die Bewertung der umweltrelevanten Auswirkungen, wobei auch die zu erwartende mittel- bis langfristigen Entwicklung der Morphodynamik im Untersuchungsgebiet zu beachten ist.

Zunächst wurde ein an Naturmessungen (z.B. Pegel-, Strömungs-, Salzkonzentrations- und Schwebstoffkonzentrationsmessungen) kalibriertes und validiertes Modell des heutigen Elbe-Ästuars erstellt. Die zeitliche und örtliche Auflösung des Rechengitters, der Modellrand, die Steuerwerte aber auch die Modellverfahren selbst wurden dabei so gewählt, dass alle charakteristischen physikalischen Zustände und Prozesse naturähnlich nachgebildet werden. Die Modelle beschreiben im Ist-Zustand die gegenwärtigen Gewässerverhältnisse ein-



schließlich der Transportprozesse. Durch Berücksichtigung der Baumaßnahmen in der Modelltopographie des Ist-Zustandes, deren Realisierung bereits beschlossen oder sehr wahrscheinlich ist, entsteht ein Modell des planerischen Ist-Zustandes **PIZ** als Vergleichszustand.

In der Modelltopographie des PIZ wird als Ausbauvariante die geometrische Formänderung der Anpassung der Tideelbe mit allen Ausbaumerkmale berücksichtigt, so dass ein Modell des Ausbauzustandes **AZ** entsteht. Das Modell für den Ausbauzustand berechnet unter Verwendung identischer Randwertsteuerungen alle erforderlichen Daten, mit denen eine gesicherte Prognose für die zu erwartenden ausbaubedingten Veränderungen des Feststofftransports und der Morphodynamik des Gewässerbodens unter Berücksichtigung wasserbaulichen Expertenwissens erzielt werden kann. Grundlage hierfür ist die Differenzbildung der berechneten abiotischen Systemkenngößen für den AZ und für den PIZ im gesamten Untersuchungsgebiet. Mit dieser Methode können die allein aus den Ausbaumaßnahmen resultierenden Änderungen bestimmt werden.

4 Morphologie des Elbe-Ästuars

4.1 Geologie

Aus geologischer Sicht ist das Elbe-Ästuar eiszeitlich und nacheiszeitlich geprägt, d.h. die oberflächennah anstehenden Sedimente sind holozänen und pleistozänen Ursprungs. Die Holozänbasis ist infolge von Erosionsrinnen unregelmäßig. Im Mündungsbereich der Elbe befinden sich oberflächennah überwiegend holozäne Sedimente (Klei, Sand). Östlich von Elbe-km 640 tritt an der Gewässersohle auch pleistozäner Geschiebemergel auf. Eine auffällige rezente Entwicklung stellt die Verschlickung von Nebenelben und anderer schwächer durchströmter Gebiete dar.

Eine räumliche Gliederung ist heute durch das Elbefahrwasser sowie weitere tiefe Rinnen, Inseln, Sandbänke und ausgedehnte Wattgebiete gegeben. Die wesentlichen prägenden Wirkgrößen sind einerseits hydrologischer Natur (Tideströmung, Oberwasserabfluss und Seegang) und andererseits anthropogenen Ursprungs (Eindeichungen und Fahrwasservertiefungen bzw. -begradigungen sowie Strombauwerke).

4.2 Anthropogene Eingriffe in das Elbeästuar

4.2.1 Fahrwasserausbauten

Mit dem Aufkommen der ersten Dampfbagger auf der Niederelbe begann Mitte des 19. Jahrhunderts der etappenweise Ausbau des Elbfahrwassers, der in wechselnder Folge die Beseitigung von Untiefen, Sohlvertiefungen, Verbreiterungen und Querschnittsaufweitungen sowie Fahrwasserbegradigungen und -fixierungen beinhaltete.

Die Außen- und Unterelbe wurde in der Vergangenheit mehrfach vertieft. Zwischen 1922 und 1950 fand der „-10,0 KN-Ausbau“ der Elbe statt. Bereits sieben Jahre nach Abschluss dieser Arbeiten begann die Vertiefung auf KN -11,0 m, die 1962 abgeschlossen war. Von 1964 bis 1969 wurde eine Fahrrinntiefe von KN -12,0 m hergestellt und von 1974 bis 1978 wurde die Elbe auf KN -13,50 m vertieft. Seit 1999 beträgt die vorherrschende Solltiefe KN -14,4 m.

Neben den Sohlvertiefungen stellt der Bau des Kugelbakeleitdammes (1939 bis 1972 mit Unterbrechung in den Kriegsjahren) einen nachhaltigen anthropogenen Eingriff im Außenelbebereich dar. Zwischen 1975 und 1977 wurde dieser Leitdamm von ca. 9 km auf ca. 10 km verlängert. Die Motivation dieser Baumaßnahme war die Schaffung eines stabilen Fahrwassers. Eine der damals vorhandenen drei großen Rinnen im Außenelbebereich wurde

durch diese Maßnahme abgetrennt, so dass dieses Gebiet seitdem durch die Mittelrinne und die Norderrinne gekennzeichnet ist.

Zur Sicherung der Uferbereiche, zur Stabilisierung des Fahrwassers und zur Reduzierung von Baggermengen wurden an vielen Stellen in der Elbe Schutzbauwerke errichtet, z.B. im Bereich Altenbruch bei Cuxhaven, am Osteriff, im Bereich der Lühe- und der Schwingemündung, am Juelssand, am Fährmannssand, in der Pagensander Nebenelbe.

Am Pagensand wurde bereits von 1922 bis 1930 zur Stromregelung ein 1,7 km langer Leitdamm (Pagensand Nord) gebaut. Zusätzlich wurde der Schwarztonnensand erstmals abgaggert. Zwischen 1969 und 1992 wurde der Sand an der Fahrwasserseite drei weitere Male gaggert, um die Strömung auf das Hauptfahrwasser zu konzentrieren und die seitliche Überströmung der Sände in Richtung des Fahrwassers einzuschränken und Eintreibungen zu unterbinden. Zwischen 1971 und 1977 fand eine Sohlaufhöhung zwischen der Mündung des Ruthenstromes und Schwarztonnensand statt und das Watt „Schwarztonnensand“ wurde auf 1,5 m bis 1,8 m über MThw aufgespült. Seit den Instandhaltungsmaßnahmen des Leitdammes Pagensand Nord zwischen 1987 und 1989 liegen das Fahrwasser und der Schwarztonnensand fest, die Fahrrinne muss jedoch regelmäßig gaggert werden.

Der Hamburger Hafen wurde bis zur Mitte der 20er Jahre des vorherigen Jahrhunderts bereits so weit ausgebaut, dass seine Wasserfläche größer war als in heutiger Zeit. Der Köhlbrand wurde mehrfach verlegt und sein Querschnitt den jeweiligen Erfordernissen angepasst. Schon in 1910 überstiegen die Gesamtbaggermengen zur Unterhaltung der Fahrrinne die 9 Mio. m³ Grenze. Weil die Elbe zwischen Finkenwerder und der Lühemündung sehr breit war, wurden in diesem Abschnitt Unterwasserlängsbauwerke errichtet, um zwei ausge dehnte Becken zu schaffen, in die Ausbau- und Unterhaltungsbaggergut gespült werden konnte. Aus diesen haben sich im Laufe der Zeit die Inseln Nesssand und Hanskalbsand entwickelt.

1999 wurden die Querschnitte in den Bereichen Krautsand und Twielenfleth durch die Errichtung von Unterwasserablagerungsflächen eingeengt. Durch diese Maßnahmen wurden lokal die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Transportkapazitäten erhöht, so dass die Unterhaltungsbaggermengen an der Baggerstelle Rhinplate geringer wurden.

Ebenfalls im Jahr 1999 fand die Teilverfüllung des Mühlenberger Lochs im Rahmen der DA-Erweiterung statt, insgesamt wurden 140 ha verfüllt. Im Bereich des Hamburger Hafens wurden diverse Hafenbecken verfüllt, es wurden Schleusen und Sperrwerke errichtet, wodurch insgesamt mehrere Hektar Wasserfläche verloren gingen. Von 1950 bis 2005 ist im Bereich des Hamburger Hafens ein Wasserflächenverlust von ca. 625 ha zu verzeichnen. Im gesamten Bereich der tidebeeinflussten Elbe wurden Sperrwerke und Deiche errichtet.

4.2.2 Unterhaltungsbaggerungen

Mit dem schrittweisen Ausbau des Fahrwassers der Tideelbe hat sich immer wieder nach einem morphologischen Anpassungsprozess in der Fahrrinengeometrie ein dynamischer Gleichgewichtszustand zwischen den Sedimentumlagerungen und der Fahrrinnenunterhaltung eingestellt. Auftretende Baggerschwerpunkte konnten für den Zeitraum vor der jüngsten Fahrrinnenanpassung häufig mit der jährlichen Variation der Oberwassermengen korreliert werden. Unterhaltungsbaggerungen werden in der Tideelbe in den Amtsbereichen der WSÄ Cuxhaven, Brunsbüttel und Hamburg durchgeführt. Dazu kommen die Baggeraktivitäten in der Delegationsstrecke und im Hamburger Hafen, für die Hamburg Port Authority verantwortlich ist.

In der Außenelbe konzentrieren sich die größten Baggeraufwendungen auf die Bereiche Osteriff und Brunsbüttel. Weitere intensiver zu unterhaltende Stellen befinden sich in den Bereichen östliche Mittelrinne, Altenbruch und Medemgrund. Insgesamt schwanken die Baggermengen im Zeitraum von 2001 bis 2004 im Bereich des WSA Cuxhaven zwischen 4,8 Mio. m³/a und 8,5 Mio. m³/a. Die Baggermengen des WSA Brunsbüttel liegen relativ konstant bei 7 Mio. m³/a.

Im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg sind die Baggerabschnitte Wedel und Wedeler Au als Hauptbaggerschwerpunkte und weiter stromab die Bereiche Lühesand, Juelsand und Pagensand zu nennen. Im Bereich Rhinplate sind seit der Einrichtung der UWA Krautsand und gleichzeitiger Fahrrinnenanpassung die Baggermengen signifikant zurückgegangen. Insgesamt fallen im Bereich des WSA Hamburg zwischen 3,5 Mio. m³/a und 5,5 Mio. m³/a Baggergut an.

Der Großteil des Baggergutes aus dem Bereich des Hamburger Hafens wird am unterstromigen Ende der Delegationsstrecke umgelagert. Neben dieser Praxis wird schadstoffbelastetes Sediment an Land deponiert und in einem zeitlich begrenzten Versuch wird ein Teil des Baggergutes in der Deutschen Bucht südlich von Helgoland umgelagert. Die im Zuständigkeitsbereich der Hamburg Port Authority anfallenden Baggermengen sind von über 4 Mio. m³/a in den Jahren 2000 bis 2003 auf mehr als 8 Mio. m³/a Baggergut in 2004 und 2005 angestiegen.

4.2.3 Morphologischer Nachlauf

Als morphologischer Nachlauf wird die Reaktion einer beweglichen Gewässersohle im Wirkungsbereich einer wasserbaulichen Maßnahme auf ausbaubedingte hydrodynamische Veränderungen (veränderte Strömungsgeschwindigkeiten, Sohlschubspannungen, Wasserstände, Überflutungsdauern etc.) bezeichnet. Nach einer Fahrrinnenvertiefung ist bereichsweise eine weitere Eintiefung der Sohle (Erosion) unter das Niveau der durch Baggerung hergestellten Sohle ebenso möglich wie ein Anwachsen über das hergestellte Niveau (Sedimentation). Die an die Fahrrinne angrenzenden Böschungen können ebenfalls einem verän-

derden Strömungsangriff ausgesetzt sein und z.B. stärker erodieren. Veränderungen in schwächer durchströmten Gebieten wie z.B. eine zunehmende oder verringerte Verschlickungstendenz gehören ebenfalls zum morphologischen Nachlauf. Als letztes Beispiel können Strömung und Wellen in sandigen Bereichen Sohlformen ausbilden (Riffel und Dünen), deren typische Längen und Höhen sich ebenfalls ausbaubedingt verändern können.

Die Morphodynamik der Fahrrinne im Elbeästuar unterliegt bestimmten trendbehafteten Entwicklungen, die sich auch in den Unterhaltungsschwerpunkten ausdrücken. Nach Realisierung von Fahrrinnenausbauten können einzelne Trends verstärkt oder abgeschwächt werden, so dass sich die Schwerpunkte der Unterhaltungsbaggerungen möglicherweise verändern. Extreme Naturereignisse wie häufigere Sturmfluten oder häufigere extreme Oberwasserzuflüsse können aber die für mittlere Verhältnisse gültigen Trendentwicklungen für mehrere Jahre verändern. Vor diesem Hintergrund ist eine genaue Quantifizierung des allein ausbaubedingten Anteils morphologischer Veränderungen in einem Tideästuar durch Naturmessungen nicht möglich, zumal die durch die Hydrodynamik bestimmte Veränderung der Sohle und der Sohlformen noch zusätzlich lokal durch Nassbaggerarbeiten und durch Umlagerungen von Baggermengen beeinflusst wird. Ohne das Wissen um Baggerstellen und Verklappungsbereiche können Differenzbilder verschiedener Jahrestopografien leicht zu falschen Interpretationen führen.

Zur Abschätzung eines morphologischen Nachlaufes werden also verschiedene Informationen benötigt. Mit Hilfe von vergleichenden Betrachtungen der Wassertiefen und Fahrrinnenböschungen sowie morphologischen Entwicklungen vor und nach bisher durchgeführten Wasserbaumaßnahmen sollten unter Kenntnis von Ort, Zeit und Umfang des Eingriffs und unter Berücksichtigung lokalen Bagger- und Verklappungsaktivitäten die morphologischen Reaktionen in ihren Größenordnungen erkennbar werden.

Das Wissen um die morphologischen Reaktionen auf die zurückliegenden Ausbauten des Systems ist hilfreich, um die in diesem Gutachten zu untersuchenden Veränderungen des Sedimenttransportregimes, die durch die geplante Fahrrinnenanpassungen hervorgerufen werden können, abgesichert prognostizieren zu können. Dabei spielen die Ergebnisse aus der Beweissicherung für den jüngsten KN -14,4 m Ausbau insofern eine wichtige Rolle, als die nun geplanten Anpassungen weitestgehend in Fahrwasserabschnitten vorgenommen werden, die bereits beim vorherigen Ausbau gebaggert wurden.

5 Sedimentologie des Elbeästuars

5.1 Sedimentinventar

Eine zentrale Grundlage für fachlich fundierte Aussagen bei wasserbaulichen und bei gewässerökologischen Fragestellungen ist die umfassende Kenntnis des Sedimentinventars des Untersuchungsgebietes. Dazu gehören Kornverteilungen der Oberflächensedimente, aber auch Bohrkern, die Hinweise auf den geologischen Aufbau des Bodens geben. Diese Information ist wichtig, da die Zusammensetzung und der Zustand der Gewässersohle auch im numerischen Modell den Sedimenttransport quantitativ beeinflusst, und zudem über die Kornrauheit und die Formrauheit von Riffel und Dünen eine dissipative Wirkung auf die Tideenergie hat.

Hydro- und morphodynamische numerische Modelle stellen hohe Anforderungen an diese Datengrundlage. Im Idealfall wird ein sedimentologischer Anfangszustand aus konsistenten flächenhaft vorliegenden Sedimentdaten konstruiert. Die räumliche Dichte, mit der diese oft heterogenen Daten vorhanden sein müssten, ist daher vergleichbar mit der Dichte der zur Beschreibung der Topographie eines Gebietes notwendigen Daten. Eine solche Datendichte ist durch die Entnahme von Einzelproben zwar nicht zu realisieren, aber dennoch muss das Simulationsgebiet mit einem sinnvoll definierten und dem Naturzustand möglichst nahe kommenden Sedimentinventar überdeckt werden, das die Kornverteilungen und Sedimenteigenschaften zumindest der Oberflächensedimente flächenhaft beschreibt.

Die zu Beginn dieses Projektes verfügbaren Sedimentdaten für das Elbeästuar, die in der nachfolgenden Abbildung dargestellt sind, stammen aus unterschiedlichen Quellen und wurden bei der BAW-DH mit Hilfe eines geographischen Informationssystems bearbeitet. Für den Außenbereich der Elbe wurden Daten verwendet, die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie an ca. 3400 unregelmäßig verteilten Punkten erhoben wurden. Im Amtsbereich des WSA Cuxhaven liegen ca. 340 Messungen (regelmäßiges 1Km-Raster), und im Amtsbereich des WSA Hamburg gab es ca. 100 bereits ausgewertete Baggerproben aus dem Bereich der Fahrrinne sowie die Daten der Beprobungspunkte der UVU'96: Unregelmäßig verteilte Messpunkte, die drei Kompartimente „Fahrrinne“, „Flachwasser“ und „Wattgebiet“ charakterisieren sollen.

Der wesentliche Schwachpunkt dieser Daten besteht darin, dass sie aus einem Zeitraum von ca. 30 Jahren stammen und dass bei den meisten Sedimentproben keine Analysen unterhalb der 0,063 mm Grenze durchgeführt wurden. Besonders für die Modellierung des Schwebstofftransportes sind Informationen über diesen Teil des Korngrößenspektrums notwendig.

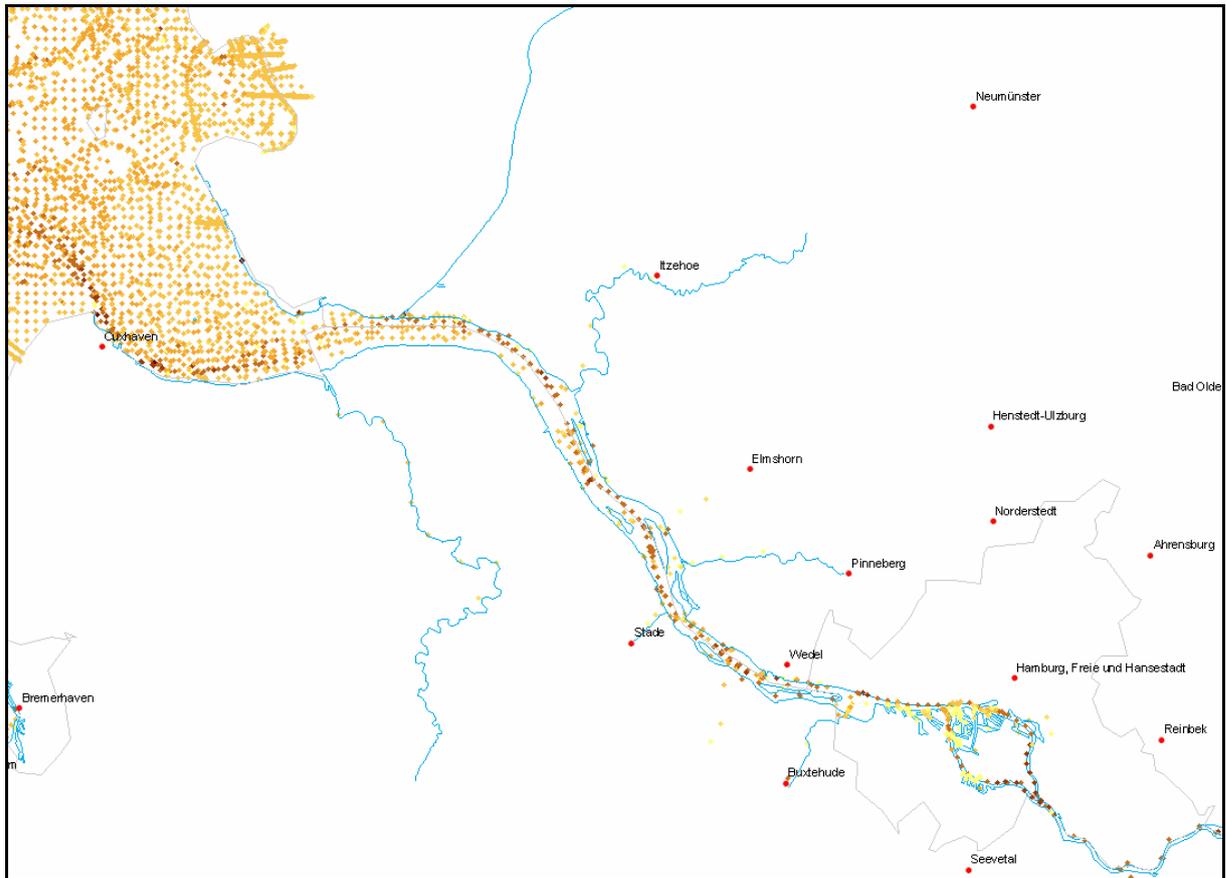


Bild 1: Übersicht über die im Januar 2005 verfügbaren Bodenproben zur Beschreibung des Sedimentinventars im Elbeästuar.

Aus diesem Grund wurden im Jahre 2005 ergänzende Sedimentbeprobungen (ca. 1.000 Bodenproben) insbesondere im Bereich der WSÄ Hamburg und Cuxhaven durchgeführt, die nach den Erfordernissen der in diesem Gutachten dargestellten morphodynamischen Untersuchungen konzipiert waren. Zur Gewinnung dieses aktuellen Sedimentdatensatzes wurde seitens der BAW-DH eine Beprobung in einem regelmäßigen Grundmuster von 1km entlang der Flusslängsachse als zweckmäßig angesehen. Innerhalb eines Profils sollten mindestens 7 Proben genommen werden. Die Lage der Entnahmepunkte wurde tiefenorientiert vorgegeben (Mitte Fahrrinne, ca. NN -10m, NN -5m und NN -1m Tiefe jeweils in Richtung der Ufer). Die so vorgegebenen Orte für die Probennahme sind in Bild 2 bis Bild 4 dargestellt.

Diese Einzelmessungen wurden genutzt, um zunächst Gebiete mit ähnlichen Sedimenteigenschaften zu definieren, und dann mittels einer gewichteten räumlichen Interpolation die Berechnungspolygone des Elbemodells mit Sedimentdaten zu belegen. Vor dieser Beprobung bereits vorhandene Informationen wurden ebenfalls verwendet, wenn dadurch Datenlücken geschlossen werden konnten. In den zu baggernden Bereichen des Ausbaustandes wird die vorherige Sedimentbelegung des Vergleichszustandes weiter verwendet.

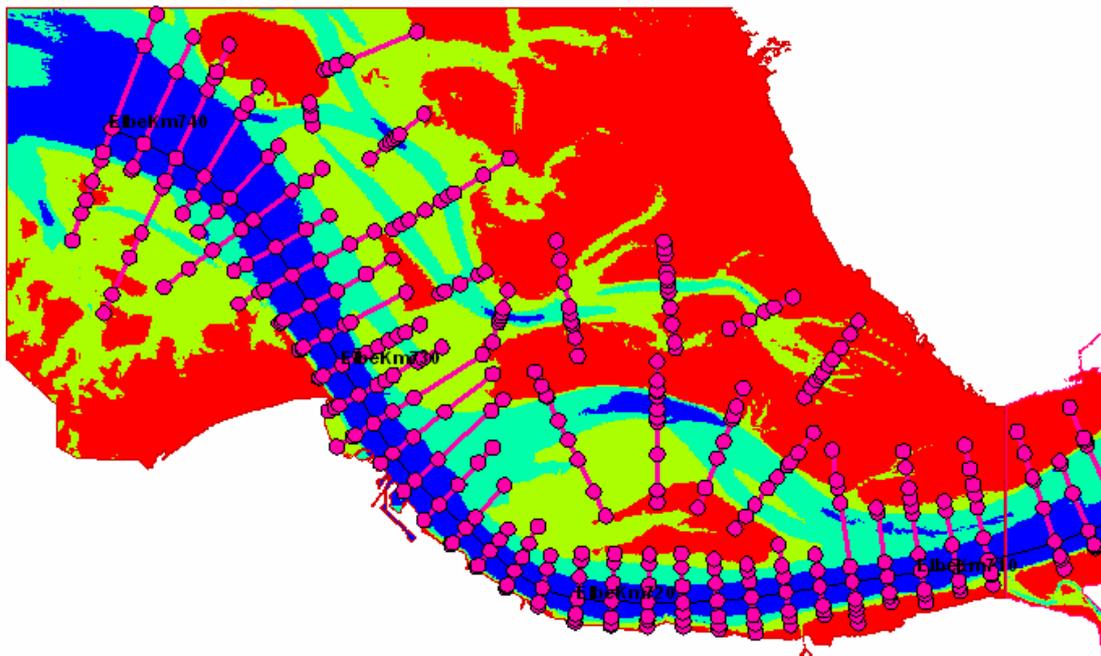


Bild 2: Entnahmestellen von 2005 aufgenommenen Sedimentbeprobungen

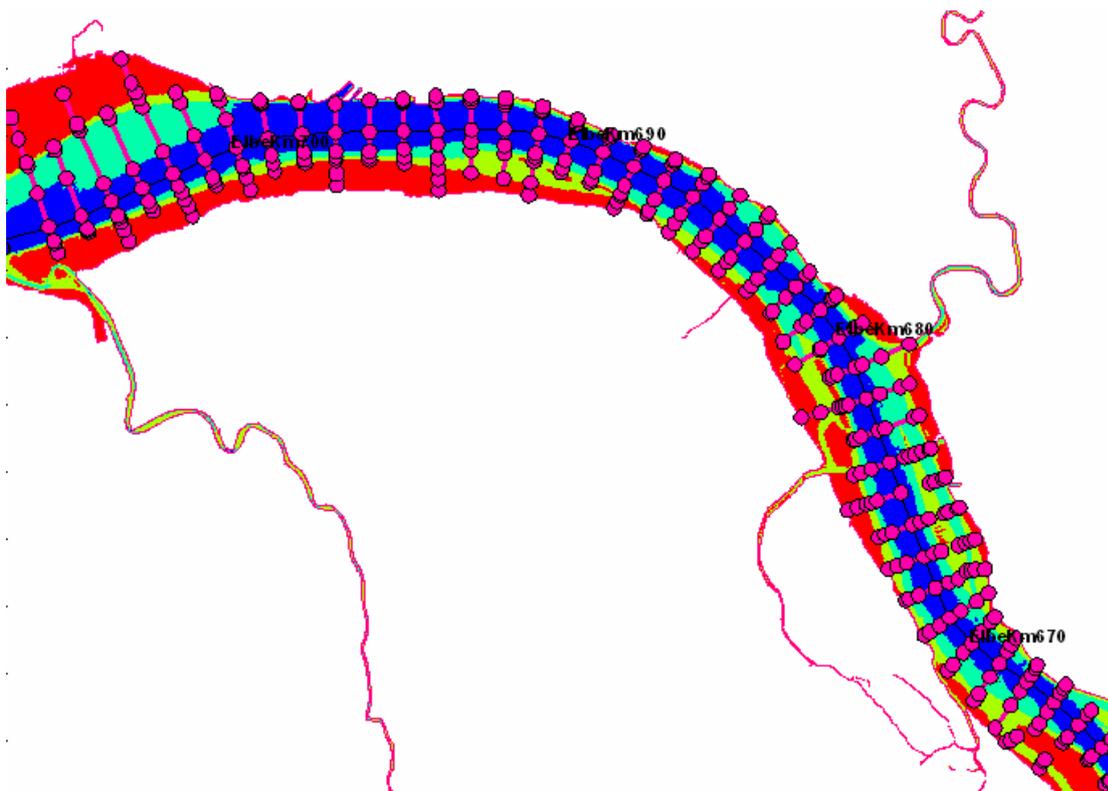


Bild 3: Entnahmestellen von 2005 aufgenommenen Sedimentbeprobungen

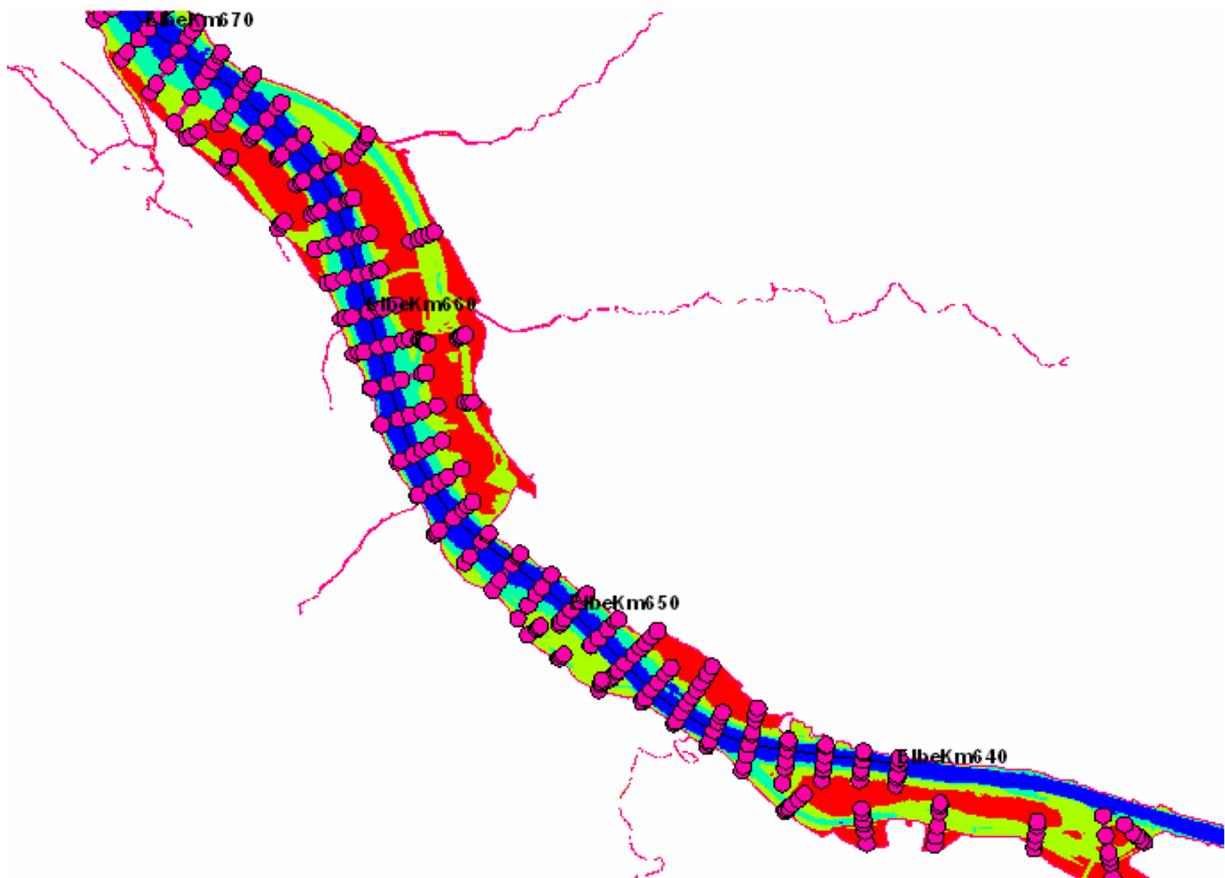


Bild 4: Entnahmestellen von 2005 aufgenommenen Sedimentbeprobungen

Zusätzlich mussten bereichsweise gezielte Vorbelegungen z.B. für die obere Tideelbe vorgenommen werden. In diesen Gebieten wurde aufgrund der überwiegend starken Strömung ein sandiger Untergrund angenommen. Die verbleibenden Datenlücken werden schließlich durch konstante Werte geschlossen, die ebenfalls eine vorwiegend sandige Sedimentverteilung vorgeben.

Die Simulationen wurden mit 7 Fraktionen durchgeführt, die im Wesentlichen der Einteilung nach der Udden-Wentworth-Skala entsprechen. Der Geschiebetransport wird durch 5 Fraktionen („sehr feiner Sand“ bis „grober Sand“) beschrieben. Der Schwebstofftransport wird mit 2 Fraktionen simuliert („mittlerer Schluff“ und „grober Schluff“).

Die so konstruierten anfänglichen Sedimentverteilungen der einzelnen Fraktionen im Untersuchungsgebiet sind in dem Anlageband zu diesem Gutachten dargestellt.

Anlage 1
Bilder 35 - 69

5.2 Schwebstoffdynamik

Über die Zusammensetzung und die Dynamik suspendierter Sedimente in der Tideelbe gibt es nur bruchstückhafte Informationen. Die Tideelbe ist zwar ein teilweise intensiv erforschtes

Gewässer, doch die wissenschaftlichen Untersuchungen, die in der Vergangenheit in diesem Gebiet durchgeführt wurden, liefern insgesamt ein eher phänomenologisches Gesamtbild des Sedimenttransportregimes. Die bisherigen Datengrundlagen, auf deren Basis ein bestimmtes Systemverhalten erklärt oder interpretiert wurde, entsprechen in der Regel nicht den Anforderungen, die von einem dreidimensionalen HN-Modell an die Qualität von Validierungsdaten gestellt werden müssen.

Vorhandene Informationen sind punktuelle, aus Proben oder aus langfristig aufgezeichneten Messungen abgeleitete Daten. Anhaltspunkte zu der Größenordnung und der zeitlichen Variation von Schwebstoffkonzentrationen in der Trübungszone liefern Messungen der GKSS, die 1991 von zwei Pontons (Nähe Brunsbüttel und Glückstadt) durchgeführt wurden (Kappenberg et al. (1996)). Demnach betragen z.B. die Schwebstoffkonzentrationen in 5 m Wassertiefe im Bereich der Trübungszone im Mittel ca. 0,4 g/l, ein Wert, der sowohl innerhalb eines Tidezyklus stark variiert, aber auch mit dem Oberwasser und mit dem Nipp-Spring-Zyklus. Die Konzentrationen an der Station bei Krautsand erreichten im Maximum Werte um 1000 mg/l im Frühjahr und Herbst 1991. Die während dieser Tiden auftretenden kleinsten Konzentrationen liegen bei 100 mg/l im Frühjahr und 200 mg/l zum Jahresende. Im Sommer fielen die größten Konzentrationen deutlich geringer aus.

Im Bereich Nienstedten zeigen Messungen des damaligen Amtes für Strom- und Hafengebäude (pers. Mitteilung) Schwebstoffkonzentrationen von ca. 50 - 100 mg/l, die aber ebenfalls mit der hydrologischen Situation variieren.

Im Rahmen des ARGE-Messprogramms 2002 wurden sechs Längsprofilbeprobungen mit Hilfe eines Hubschraubers über das gesamte Jahr durchgeführt. In der Analyse wurde unter anderem die Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe ermittelt. Die Probenahme erfolgte in 0,5 m Wassertiefe bei vollem Ebbestrom, da aufgrund der vertikalen Durchmischung die Wasserproben zu diesem Zeitpunkt am ehesten repräsentativ für die gesamte Wassersäule sind (ARGE Elbe, 2000 [3]). Am 13.05.2002 wurden bei Brunsbüttel 110 mg/l, bei Grauerort 26 mg/l und bei Seemannshöft 29 mg/l an Schwebstoffen gemessen.

Aus diesen Einzelmessungen wurde ein Gesamtbild (FHH, Amt für Strom- und Hafengebäude, 1997) über das Verhalten der Trübungszone im Elbeästuar konstruiert. Die Form und Lage der Trübungszone verändert sich demnach in Abhängigkeit des Oberwasserzuflusses. Die maximalen Schwebstoffkonzentrationen erreichen bei hohem Oberwasser ($Q > 900 \text{ m}^3/\text{s}$) ca. 0,35 g/l. Das Maximum befindet sich bei Strom-km 690, und insgesamt ist die Trübungszone gedrängter als bei einem niedrigen Oberwasser von z.B. $500 \text{ m}^3/\text{s}$. In diesem Fall beträgt die maximale Konzentration ca. 600 mg/l, wobei das Maximum ca. 10 Km weiter stromauf bei Strom-km 680 liegt.

Aufgrund des Mangels an geeigneten Daten zur Kalibrierung und Validierung des Sedimenttransportmodells, die analog zu Wasserstands- und Strömungsmessungen in gleicher Weise

auch für den Schwebstofftransport benötigt werden, wurden von der BAW-DH die ADCP-Daten, die im Jahr 2002 auf 15 Querprofilen über die gesamte Unterelbe aufgenommen wurden (Bild 6), erneut prozessiert, da unter bestimmten Voraussetzungen und Annahmen das Backscattersignal des ADCP in Schwebstoffkonzentrationen umgerechnet werden kann.

Das während der ADCP-Messungen ausgesendete akustische Signal wird an der Oberfläche der Feststoffe reflektiert und als relatives Backscattersignal wieder aufgefangen. In der Wassersäule verliert es an Intensität, da es durch Wasserinhaltsstoffe absorbiert wird. Des Weiteren beeinflussen auch Größen wie die Viskosität, der pH-Wert und die Temperatur des Wassers und vor allem die Laufzeitlänge die Signalstärke. Bereinigt man mit Kenntnis dieser Werte und unter Berücksichtigung gerätespezifischer Parameter das aufgefangene Messsignal, erhält man ein absolutes Backscattersignal, das nach Kalibrierung durch Schwebstoffproben Auskunft über die Schwebstoffverteilung in der Wassersäule gibt (Bild 5). Dabei macht man sich einen linearen Zusammenhang zwischen dem absoluten Backscattersignal und dem zehnten Logarithmus der Feststoffkonzentration zunutze (${}_{10}\log(\text{SSC}) = A \cdot \text{Backscatter} + B$).

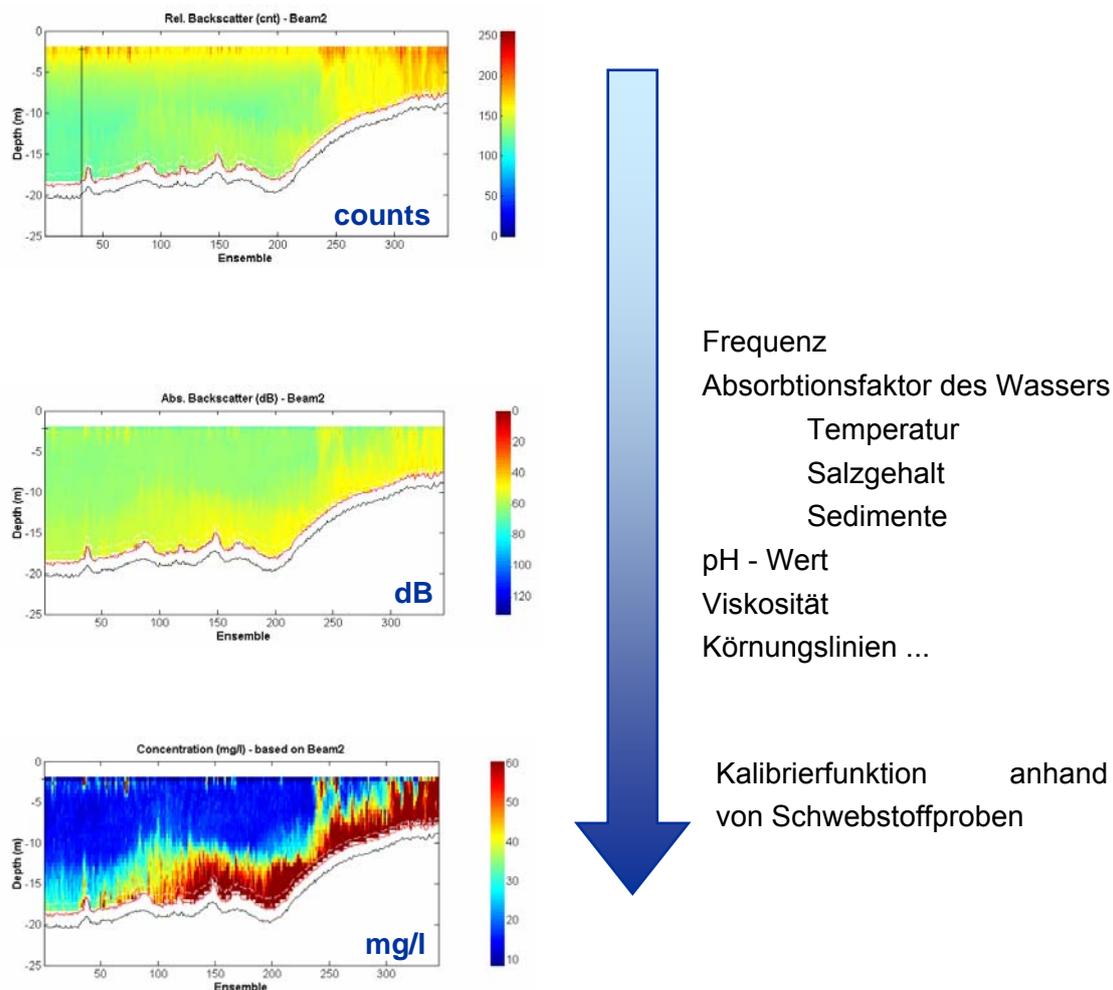


Bild 5: Interpretation des ADCP-Signals nach Maushake (2005)

Diese Prozedur ist sehr parametersensitiv, doch unter Verwendung der Erfahrungen, die bei der BAW-DH und bei anderen Institutionen in den letzten Jahren bei diesem Verfahren gesammelt wurden, konnten die erforderlichen Parameter sinnvoll abgeschätzt werden.

Das Ergebnis dieser Prozedur sind flächenhafte Schwebstoffkonzentrationen auf den genannten Querprofilen zu verschiedenen Tidephasen. Diese Daten sind noch mit Unsicherheiten behaftet, da die damaligen Messungen nicht für diese Analyse konzipiert waren. Dennoch sollen sie hier erwähnt werden, da sie das vorherrschende Bild der Schwebstoffdynamik im Elbeästuar stützen. Als Zusammenfassung sind in Bild 7 die querschnittsgemittelten Konzentrationen zu markanten Tidezeitpunkten angegeben. Die Konzentrationen nehmen von der Mündung aus stromauf bis zu Querprofil Nr. 5 kontinuierlich zu. An QP 06 kommt es zu einem Rückgang der Konzentrationen. Bei den darauf folgenden Positionen in der Trübungszone der Elbe befindet sich das Konzentrationsmaximum mit einem Wert von ca. 900 mg/l. Von diesem Punkt an nehmen die Schwebstoffgehalte schrittweise ab – mit der Ausnahme, dass es an QP 11 noch einmal zu einem kurzfristigen Anstieg der Konzentrationen während des Flutstroms kommt. Sowohl die Größenordnung der Schwebstoffkonzentrationen als auf die räumliche Ausdehnung der Trübungszone deckt sich mit den gängigen Vorstellungen. Eine genauere Erfassung der suspendierten Frachten einschließlich deren Abhängigkeit von den hydrologischen Verhältnissen kann mit den dargestellten Ergebnissen nicht ersetzt werden. Weitere Monitoring-Einsätze sind insbesondere zur Optimierung des Sedimentmanagements an der Tideelbe erforderlich.

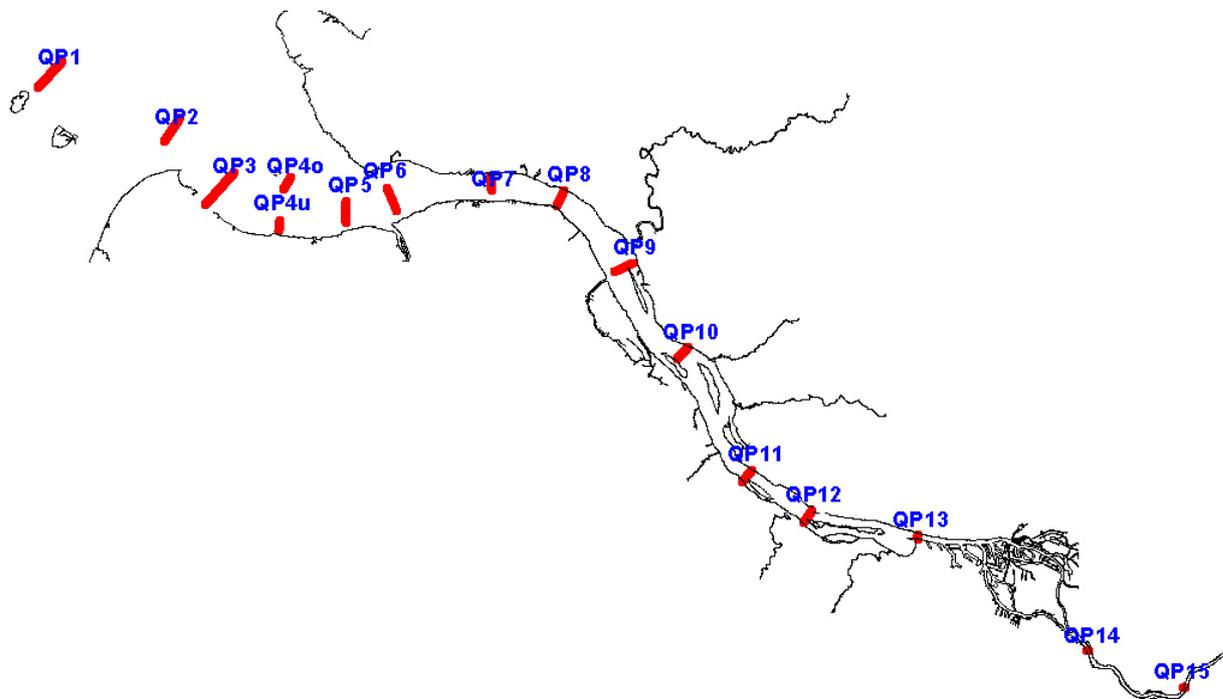


Bild 6: Lage der aufgenommenen Querprofile in der Tideelbe

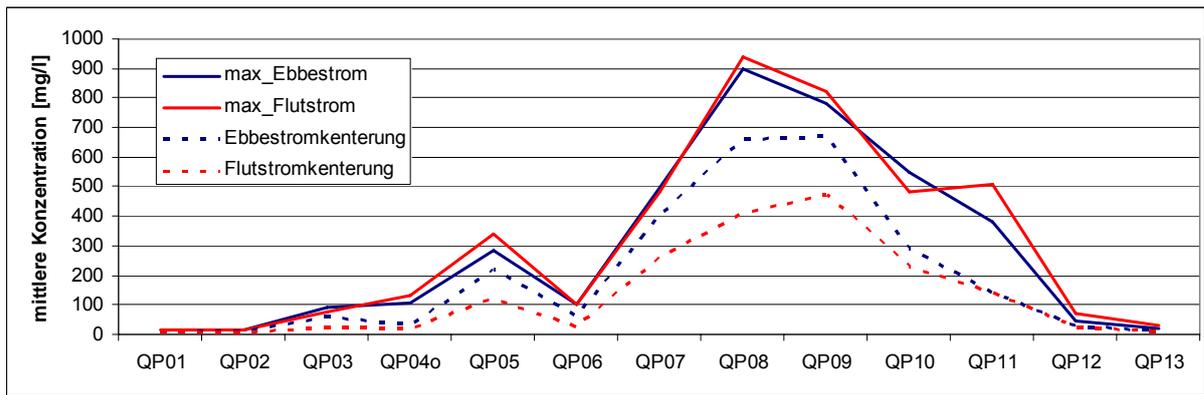


Bild 7: Aus ADCP-Daten abgeleitete querschnittsgemittelte Konzentrationen zu ausgewählten Zeitpunkten

6 Morphodynamische Prozesse im Untersuchungsgebiet

6.1 Erosion, Sedimentation und Konsolidierung

Bestehen Sohlen, Böschungen und Ufer fließender Gewässer aus beweglichen Sedimenten, so werden diese bei ausreichend großer Strömungsgeschwindigkeit mobilisiert und transportiert. Beim Transport wird unterschieden zwischen der Bewegung des Sedimentes entlang der Sohle (Geschiebetransport) und der Verfrachtung suspendierter Sedimente im Wasserkörper (Suspensionstransport). In der Natur besteht zwischen beiden Transportarten keine scharfe Grenze. Im Grobkornbereich (Sande, Kiese) werden die Sedimente überwiegend oder ausschließlich sohnah als Geschiebe transportiert. Feinkörnige Sedimente (Schluff und Ton, auch Feinsand) werden vornehmlich in Suspension bewegt. Werden über einen Kontrollraum (z.B. zwischen zwei Gewässerquerschnitten) die eingetragenen und ausgetragenen Sedimente bilanziert, lassen sich *Erosionen* und *Sedimentationen* quantifizieren. Durch Änderungen in der Sohlenlage und in der Kornzusammensetzung verändern sich auch die Strömungen. Die veränderten Strömungen führen wiederum zu einer Umformung der Sohle. Bei einer im zeitlichen Mittel ausgeglichenen Bilanz besteht quasi ein dynamischer Gleichgewichtszustand, d.h. trotz erheblicher Sedimenttransportraten ändert sich die Sohle nur sehr langsam entweder in eine Richtung oder wechselnd infolge Erosion und Deposition von Sedimenten. Allgemein gesprochen ist das dynamische Gleichgewicht durch Erosions- oder Sedimentationsprozesse gekennzeichnet, die sich in der Wechselwirkung zwischen Sohlenentwicklung und Strömungsänderung nicht selbst verstärken.

Treten in einen Gebiet dauerhaft Sedimentationen auf, so kommt es bedingt durch die damit verbundene Auflast zu einer *Konsolidierung* des Bodens, d.h. zu einer mit der Zeit zunehmenden Verdichtung (Verfestigung) und damit auch Setzung des Bodens. Dabei wird das Porenwasser aus den Bodenporen durch die Auflast heraus gedrückt, sofern die Entwässerung nicht behindert wird. Die Druckspannungen im Boden gehen dabei allmählich vom Porenwasser auf das Korngerüst über. In diesem Prozess verändern sich auch die mechanischen Eigenschaften des Bodens (Reibungswinkel, Kohäsion, Scherfestigkeit, Dichte). Die Festigkeit und Standsicherheit und damit auch der Widerstand gegen Erosion eines konsolidierenden Bodens nimmt zu. Verdichtung und Setzung nehmen - bei gleich bleibender Belastung - mit der Zeit ab und konvergieren nach langer Zeit normalerweise gegen einen Grenzwert. Die Konsolidierung ist vor allem eine Eigenschaft bindiger Böden (Schluffe, Tone), die noch genügend Wasser enthalten. Nichtbindige Böden aus rolligem Material (Sande, Kiese) konsolidieren wenig. Wird ein konsolidierter oder teilweise konsolidierter Boden entlastet, geht seine Setzung nur geringfügig wieder zurück.

6.2 Ursachen des Sedimenttransportes

Im Küstenbereich wird die morphodynamische Entwicklung überwiegend durch natürliche äußere Antriebsprozesse gesteuert, wie

- tideinduzierte und barokline (durch Dichteunterschiede induzierte) Strömungen und
- seegangsinduzierte Prozesse sowie
- windinduzierte Sedimenttransporte (äolischer Transport).

Je nach Örtlichkeit im Untersuchungsgebiet dominieren einzelne Prozesse oder es beeinflussen sich diese Prozesse in unterschiedlicher Weise. In den tiefen Rinnen spielt der strömungsbedingte Transport die größte Rolle; ebenso die von den Strömungen und Sediment-eigenschaften erzeugten Sohlschubspannungen, welche die Erosions- bzw. Resuspensionsraten bestimmen. In den Seegang ausgesetzten Flachwasser- und Wattgebieten dominieren die durch Seegangsprozesse induzierten Erosionsraten, die den Wasserkörper mit Feststoffen lokal aufladen, deren Weitertransport aber vor allem durch Tideströmungen bzw. wind-erzeugte Triftströmungen erfolgt.

6.2.1 Strömungsbedingter Sedimenttransport

Die im Bereich des Elbeästuars auftretenden wechselnden Strömungen und Wasserstände werden in erster Linie durch den Einfluss der Tidewellen hervorgerufen. Ferner werden sie durch den Oberwasserzufluss und den Wind beeinflusst und sind mit dem örtlich aus Windwirkung erzeugten Seegang überlagert. Mit der Strömung werden verschiedene Stoffe in gelöster oder partikulärer Form (Salz und Sedimente) transportiert. Der Sedimenteintrag in das Ästuar erfolgt mit dem Oberwasser der Elbe und dem Oberwasser der Nebenflüsse an der Niederelbe sowie aus dem Mündungsgebiet des Elbeästuars, wo je nach Systemzustand (z.B. bei sehr großen Oberwasserzuflüssen) auch ein erheblicher Sedimentaustrag vonstatten gehen kann. Im Rahmen des Vorhabens, die Wirkungen aus der Fahrrinnenanpassung zu beurteilen, stehen vor allem die im Elbeästuar stattfindenden Sedimentumlagerungen im Vordergrund. Darüber hinaus ist die Veränderung der Nettotransporte zwischen der Außenelbe und der Deutschen Bucht von Interesse.

Eine wesentliche Eigenart des Elbeästuars wird hervorgerufen durch das Aufeinandertreffen und das Vermischen von salzhaltigem Meerwasser aus der Deutschen Bucht mit dem Süßwasser des oberwasserseitigen Zuflusses im Übergangsbereich von Unter- und Außenelbe. Durch die unterschiedlichen Dichten von Salz- und Süßwasser kommt es im Ästuar zu Dichtegradienten in der Vermischungszone, die als Brackwasserzone bezeichnet wird. Die im Tidezyklus räumlich und zeitlich unterschiedliche Verteilung der Salzgehalte und damit der Dichten im Wasserkörper der Brackwasserzone erzeugt wechselnde Dichteströmungen. Die Lage der Brackwasserzone verändert sich in Anpassung auf veränderte länger anhaltende Wetterperioden und vor allem auf den Jahresgang der Oberwasservariation.



Der Wasserkörper ist in der Vermischungszone bei voll ausgebildeter Ebbe- und Flutströmung durch die intensive Turbulenz in der Fahrrinne gut durchmischt. Während dieser Tidephasen treten geringe Vertikalgradienten im Salzgehalt auf. Zu den Zeiten der Stromkenterungen vergrößern sich die vertikalen Salzgradienten und führen z.B. bereits vor der (infolge von Massenträgheitseffekten verzögerten) Ebbestromkenterung zu einem sohnahen Einstrom salzreicheren Wassers, das auch Sedimente in Suspension und als Geschiebe mit sich führt. Mit dem weiter entwickelten Flutstrom treten kurzzeitig labile Schichtungen auf, wenn die Dichte der oberen Wasserschichten aufgrund starker Strömungen größer wird als die der sohnahen Schichten. Durch die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrrinne und Ufernähe entstehen laterale Dichteunterschiede und Dichteströmungen. Die Dichtegradienten quer zur Fließrichtung können größer sein als die in Längsrichtung vorhandenen. Das Geschwindigkeitsfeld erhält infolgedessen komplexe, dreidimensionale dichteinduzierte Sekundärströmungen, die auch den suspendierten Sedimenttransport beeinflussen.

Im oberen Abschnitt der Brackwasserzone tritt damit zeitweise eine sohnah Schichtung des Wassers mit höheren Salzgehalten auf. Durch Vermischung nimmt das salzärmere Wasser an der Oberfläche Wassermassen aus den unteren Schichten auf und transportiert diese oberflächennah aus der Flussmündung heraus. Aus Gründen der Kontinuität strömt das salzreichere Wasser in den unteren Schichten flussaufwärts. Dieser ästuarinen Zirkulation wird die Ansammlung von Schwebstoffen in der Trübungszone zugeschrieben, die somit eine Konvergenzzone darstellt. Im Übergangsbereich zum Süßwasser stellt sich ein örtlich begrenztes Trübungsmaximum mit überdurchschnittlich hohen Schwebstoffgehalten ein. Die Größe des Trübungsmaximums wird von der Stärke der ästuarinen Zirkulation, der durch Fluss- und Meerwasser herantransportierten Menge suspendierten Materials und von der Sinkgeschwindigkeit der beteiligten Teilchen beeinflusst. Die Ausprägung des Trübungsmaximums ist sowohl von der Variation des Salzgehaltes durch die Tide als auch von der Variation des Oberwasserzuflusses abhängig. Als Folge kann sich die Lage des Trübungsmaximums im Elbeästuar in Abhängigkeit der Randbedingungen zwischen dem Osteriff und Glückstadt verschieben. Die variablen Konzentrationen von Salz und suspendiertem Material führen zu einer veränderlichen Gesamtdichte des Fluids und zu einer Beeinflussung der Strömungsturbulenz. So dämpfen stabile Dichteschichtungen die Turbulenz, instabile Dichteschichtungen hingegen fördern den turbulenten Austausch in der Vertikalen. Damit stehen das ästuarine Zirkulationssystem und die durch die Tide und das Oberwasser hervorgerufenen Strömungen in Wechselwirkung zueinander.

In diesem Zusammenhang sind die Mechanismen des Suspensionstransportes von Bedeutung. Im Gegensatz zu gelösten Substanzen (wie dem Salz) besitzen in Suspension befindliche Sedimente eine eigene Dynamik, die durch ihre - bezogen auf die Eigenschaften der Sedimente – spezifischen Sinkgeschwindigkeiten geprägt sind. Im Tidezyklus ergibt sich je nach suspendierter Sedimentmenge und den Sinkgeschwindigkeiten der beteiligten Fraktionen ein periodisches Deponieren und Resuspendieren mit zwischenzeitlichem advektiven (mit der Strömung verlaufenden) Transport von Feinsedimenten. Vor allem die 14-tägige



Ungleichheit der Spring- und Nipptiden (aber auch andere Ungleichheiten) haben Einfluss auf den Suspensionsgehalt. So werden bei Nipptiden mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten weniger Sedimente mobilisiert und in der Wassersäule verteilt und über kürzere Strecken transportiert. Gelangen in Suspension befindliche Sedimentfraktionen in schwach durchströmte Hafenbereiche, Bühnenfelder oder sonstige Flachwasserzonen, so werden sie sich aufgrund der geringen Turbulenz und der längeren Verweilzeiten dort absetzen und konsolidieren. Sie werden durch die Tideströmungen nur zum Teil wieder abtransportiert und bewirken dadurch morphologische Änderungen, die bis zur Verlandung führen können.

Weiterhin kommt es in Verbindung mit dem weiter stromauf zunehmend asymmetrischer werdenden Tideverlauf infolge des über Jahrzehnte abgesunkenen Tideniedrigwassers und der damit erzeugten Asymmetrie im Verhältnis der maximalen Flut- und Ebbeströmungen zu einem Netto-Stromauftransport bestimmter Schwebstofffraktionen in der Unterelbe. Auch die Stauwasserzeit nimmt Einfluss auf den Netto-Stromauftransport. Da die Stauwasserzeit und die Wassertiefe bei Flutstromkenterung größer sind als bei Ebbestromkenterung, kommt es – insbesondere in den oberen Ästuarabschnitten - zu größeren Depositionen während Stauwasser bei Flutstromkenterung.

Oberhalb der durch den Flutstrom noch stark geprägten Feststofftransporte bekommt der Abfluss des Oberwassers eine zunehmende Bedeutung, was in diesem Bereich einen Netto-Stromabtransport bewirkt. Die sich aus diesen Mechanismen ergebende Konvergenzzone der einander entgegen gerichteten Nettotransporte liegt normalerweise weit oberhalb der Brackwasserzone. Die Lage und Charakteristik der Konvergenzzone wird durch das Hamburger Hafengebiet beeinflusst.

In den stärker durchströmten Fahrrinnenabschnitten der Unter- und Außenelbe außerhalb der genannten Konvergenzonen herrschen dagegen sandige Sedimente an der Sohle vor, die morphologische Sohlformen (Riffel und Dünen) ausbilden und einem streckenweise ausgeglichenen oder netto-stromabgerichteten bzw. auch netto-stromaufgerichteten Geschiebetransport an der Fahrwassersohle unterliegen.

6.2.2 Seegangsbeeinflusster Sedimenttransport

Die wesentlichen Wirkungen des Seegangs auf den Sedimenttransport und die Morphodynamik sind

- die Mobilisierung von Sediment im Flachwasser durch die Orbitalbewegung der Wasserteilchen an der Sohle,
- das Aufwirbeln von Sediment in der Brandungszone durch Wellenbrechen,
- der durch Seegang induzierte Küstenlängstransport und
- welleninduzierte (über die Wellenperiode gemittelte) Strömungen (radiation stresses).



Diese Seegangswirkungen verteilen sich in unterschiedlicher Intensität auf die nachfolgend genannten Teilgebiete im Elbeästuar. Dabei stehen sie in Wechselwirkung mit der Tidedrömung und unterliegen insbesondere den tidebedingten Wasserstandsschwankungen.

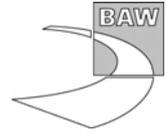
- Intensive Wirkung des Seegangs an den Außensänden
- Durch die Grundberührung und das Brechen der Wellen wird Sediment in die Wassersäule eingetragen und durch die Tidedrömung weitertransportiert.
- Relativ intensive Wirkung des Seegangs an den Rinnenrändern in der Außenelbe
- An den Böschungen der tiefen Rinnen verändert sich der Charakter des Seegangs durch Beeinflussung der Wellenfortschrittsrichtung und der Wellenhöhen, was zu einer höheren Sohlbelastung führen kann.
- Wirkung des Seegangs auf Wattflächen
- Auch auf den Wattflächen, die lediglich geringen Tidedrömungsgeschwindigkeiten unterliegen, bringt der Seegang Sediment in Suspension.

Die Verteilung der Oberflächensedimente ist auch im Elbeästuar ein Abbild der äußeren hydrodynamischen Kräfte in Form des Zusammenwirkens von Tidedrömung, Oberwasserabfluss und Seegangsklima in Abhängigkeit von Eintrittswahrscheinlichkeiten, Intensitäten und regional begrenzten Wirkungsbereichen. In den Tiderinnen ist die Belastung der Sohle durch die Tidedrömung größer als die durch den Seegang. Auf den Wattflächen hingegen kehrt sich das Verhältnis um. Im Bereich der Außensände können besonders hohe Seegangsbelastungen auftreten. In flachen Bereichen, in denen die Tidedrömungen schwach sind, stehen feinkörnige Sedimente (Feinsand, Schluff, Schlick) an, wenn diese Bereiche nicht einer wiederkehrenden Seegangsbelastung oder auch Belastung durch Schiffswellen ausgesetzt sind. Im Bereich hoher Strömungsgeschwindigkeiten sind vorwiegend sandige und kiesige Sedimente an der Sohle anzutreffen, der Boden kann aber auch aus eiszeitlich verfestigtem (konsolidiertem) feinkörnigem Material (Ton, Mergel) bestehen.

Die beschriebenen Wirkungen des Seegangs auf den Sedimenttransport spielen sich in kleinen Raum- und Zeitskalen ab, was am folgenden Beispiel verdeutlicht wird:

Das einzelne an der Sohle liegende Sedimentkorn kann, z.B. bei vorherrschendem Seegang im Zeitbereich einer Wellenperiode (mehrere Sekunden) in Abhängigkeit der Intensität der Orbitalströmung zu Beginn des Wellenberges mobilisiert, danach transportiert, zwischendurch ggf. wieder abgelagert, zu Beginn des Wellentales erneut aufgenommen und in entgegengesetzter Richtung zurücktransportiert werden.

Dieser Prozess wiederholt sich nun bei jeder Welle und für jedes Sedimentkorn, wobei allerdings zusätzlich beachtet werden muss, dass die Intensität der Kornbewegung von vielen Einflussfaktoren wie z.B. Sedimentbeschaffenheit, Seegangsspektrum und Wassertiefe abhängig ist und demzufolge auch in kurzen Zeiträumen von Sekunden sehr stark schwanken kann. Der durch den Seegang erzeugte Nettotransport der Sedimentkörner ist folglich



klein, wenn Tide- oder Triftströmungen fehlen oder gering sind. Die Seegangsriffel auf Sandwatten kennzeichnen beispielsweise diese kleinräumigen Transporte.

6.2.3 Äolischer Sedimenttransport

Der äolische Sedimenttransport hat z.B. für die morphodynamische Entwicklung der ostfriesischen Inseln eine hohe Bedeutung. In der Unter- und Außenelbe spielt diese Form des Sedimenttransportes nur eine untergeordnete Rolle.

Der äolische Sedimenttransport hatte aber z.B. auch beim Bau der DA-Erweiterung einen nicht zu vernachlässigenden temporären Einfluss auf die Sedimentationen im Mühlenberger Loch, weil bei Starkwind Sand von der DA-Erweiterungsfläche aufgenommen und in die Umgebung weiter transportiert wurde.

7 Örtliche Verhältnisse im Untersuchungsgebiet

Im Folgenden werden die charakteristischen örtlichen Verhältnisse der Einflussgrößen beschrieben, die hinsichtlich der Steuerung der morphologisch prägenden Prozesse von Bedeutung sind. Sie dienen als Orientierung bei der Anwendung numerischer Modellverfahren für die Abbildung der relevanten Prozesse sowie als Hinweis zur Herleitung von Eingangsdaten für die Modelle selbst und gehen in die wasserbauliche Bewertung von berechneten Modellergebnissen ein.

7.1 Meteorologische Verhältnisse – Wind

Anhand der Station Cuxhaven kann die Frage untersucht werden, ob der gewählte Untersuchungszeitraum hinsichtlich der Meteorologie typisch ist. Diese Station bietet sich an, da hier längerfristige Zeitreihen vorliegen. Bild 8 zeigt, dass die Windstärkenverteilung im gewählten Zeitraum in etwa der des Jahres 2002 entspricht, wenn man davon absieht, dass, wie um diese Jahreszeit üblich, die stärkeren Windereignisse fehlen. Die Häufigkeit der Windrichtungen entspricht, wie aus Bild 9 ersichtlich, in etwa der Verteilung des ganzen Jahres 2002.

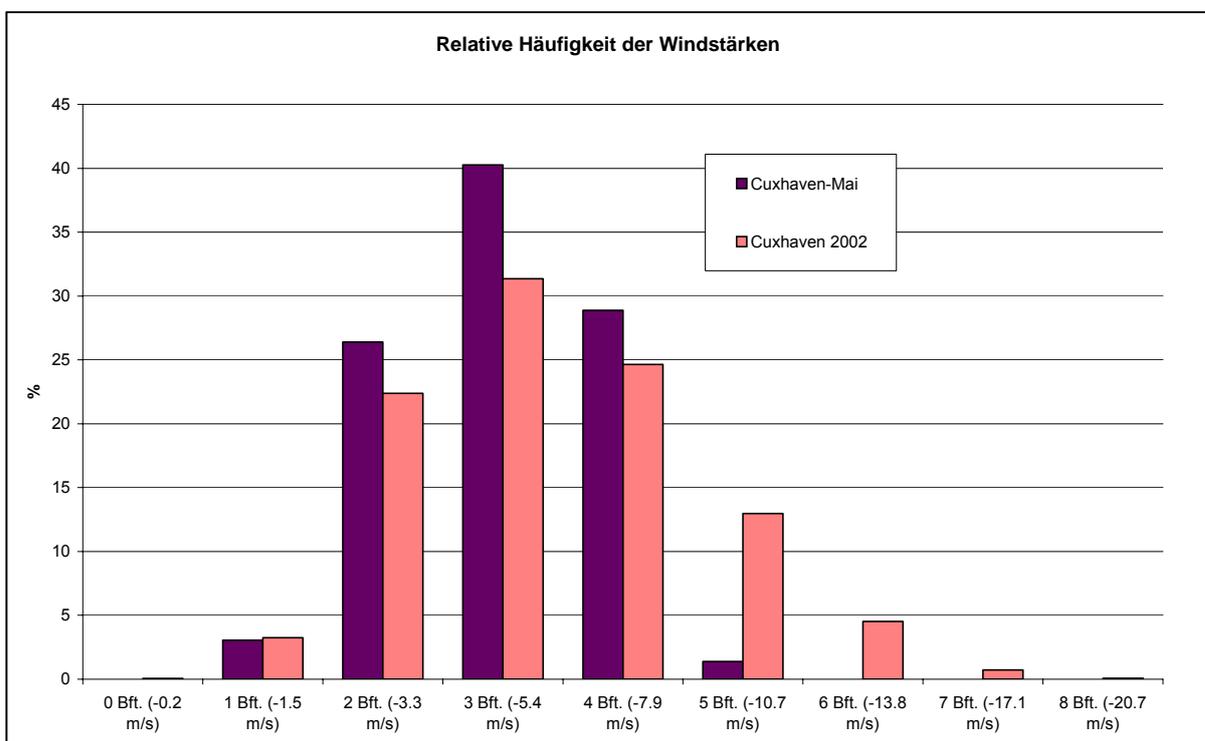


Bild 8: Relative Häufigkeit der Windstärken an der Windmessstation Cuxhaven in der Zeit vom 11.5. - 25.5.2002

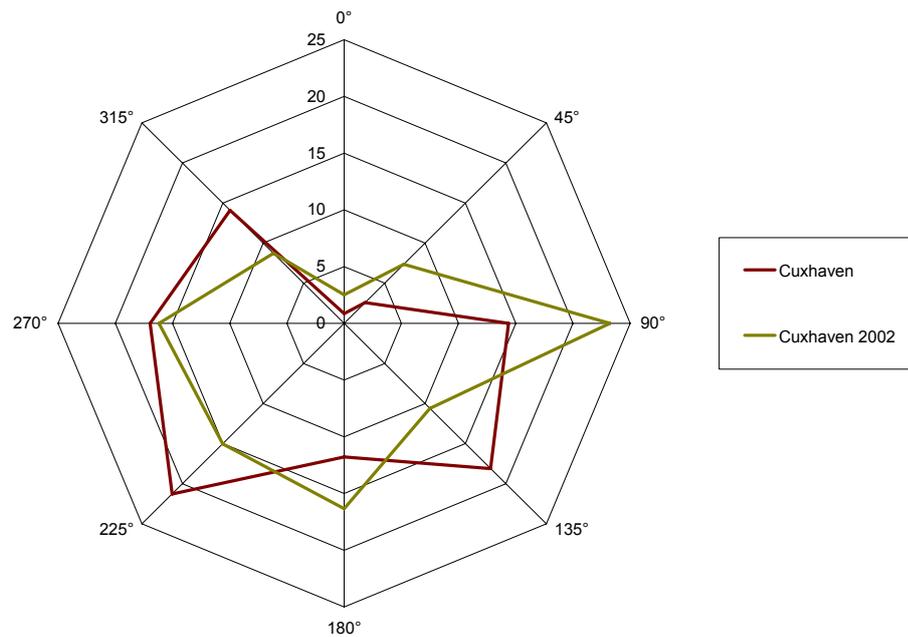


Bild 9: Relative Häufigkeit der Windrichtungen an der Windmessstation Cuxhaven in der Zeit vom 11.5. - 25.5.2002

7.2 Hydrographische Verhältnisse

7.2.1 Tideverhältnisse und Oberwasserzuflüsse

Die Tidedynamik der Elbe wird durch

- die aus der Deutschen Bucht (Nordsee) halbtägig einlaufende Tidewelle,
- die Oberwasserzuflüsse aus dem Einzugsgebiet der Elbe und
- die charakteristischen Eigenschaften der Tideelbe selbst, also der vorhandenen Längen, Tiefen, Querschnitte und Volumina

geprägt. Durch Reibungseinflüsse und Flachwassereffekte sowie Strombauwerke werden die Obertiden verstärkt, die durch Reflexionen und Teilreflexionen verändert werden. Aus der Überlagerung dieser überwiegend nichtlinearen Prozesse ergibt sich die komplexe Tidedynamik der Unter- und Außenelbe (s. auch Gutachten zur Tidedynamik: BAW 2006a).

Die hydrologische Situation für Mai 2002 ist in Bild 10 dargestellt und ist, wie man sofort erkennt, nicht typisch für das ganze Jahr oder gar das 5-Jahres-Mittel.

Die Linien mit den Symbolen (Dreieck, Kreis, Viereck) markieren die Höhen der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasser für das Jahr 2002 und für das 5-jährige Mittel 1998/2002, wobei deren Niveau durchweg höher liegt als das im Monat Mai 2002 (Kreuze ohne Linien).

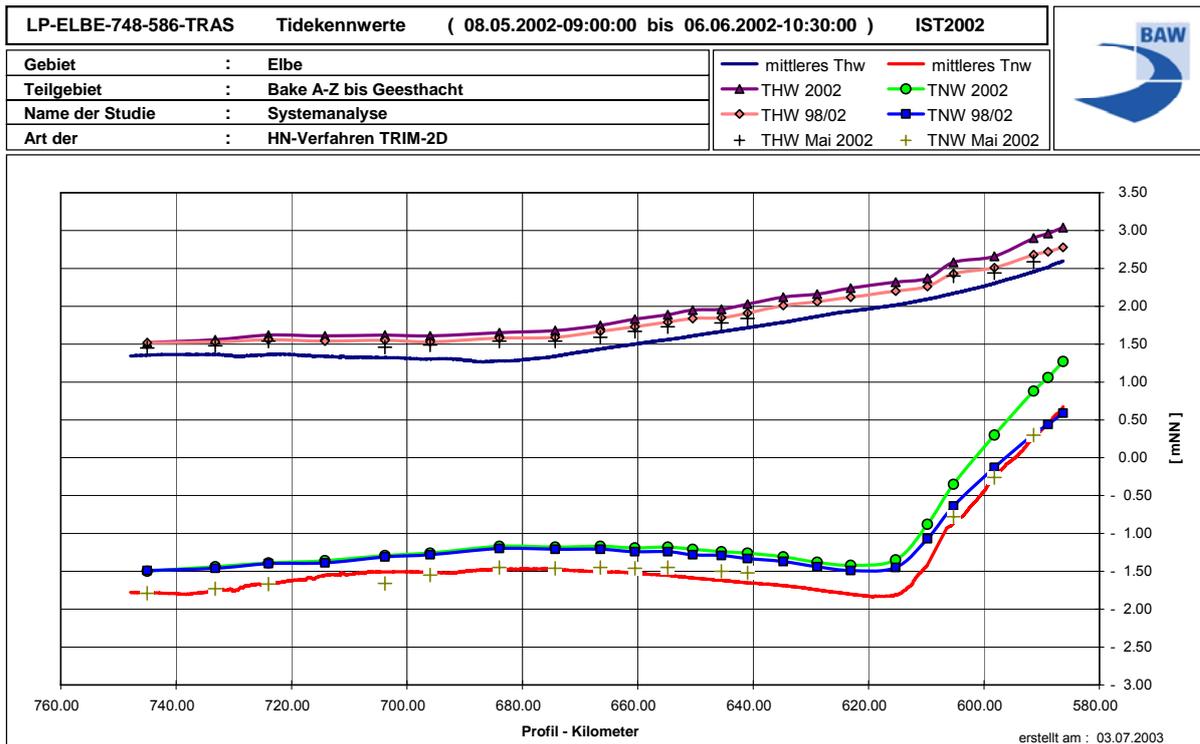


Bild 10: Tidehoch- und -niedrigwasser entlang der Unter- und Außenelbe im Mai 2002, im Jahr 2002 und im 5-jährigen Mittel

So liegt das Niedrigwasser durchschnittlich um 33 cm und das Tidehochwasser durchschnittlich um 15 cm tiefer als die Jahresmittelwerte. Sicher ist eine Ursache das große Hochwasser der Elbe im August 2002, dessen Auswirkung sich im Unterschied zwischen den Jahresmittelwerten und den 5-jährigen Mitteln niederschlägt. Besonders signifikant ist diese Wirkung in den Tideniedrigwasserwerten oberhalb Hamburgs, wo die Differenz zwischen 29 cm und 68 cm beträgt. Unterhalb Hamburgs ist diese Differenz nie größer als 7 cm.

Auch im Tidehochwasser ist eine signifikante Abweichung vom 5-jährigen Mittelwert zu beobachten, die in Cuxhaven bereits 6 cm beträgt und bis Geesthacht auf 26 cm zunimmt. Aus anderen Untersuchungen der BAW ist bekannt, dass die Tidehochwasserstände der Elbe unterhalb Hamburgs nur wenig auf hohe Oberwassermengen reagieren. Auch kann diese Reaktion nicht größer sein als die des Tideniedrigwassers, so dass die Abweichungen des Jahresmittelwerts des Tidehochwassers vom 5-jährigen Mittelwert im Wesentlichen andere Ursachen (großräumige Meteorologie) haben muss.

Die Werte für das mittlere Tidehoch- und Niedrigwasser des Monats Mai 2002 liegen jedoch durchgängig unterhalb der Werte für das 5-jährige Mittel, wobei das Tidehochwasser zwischen 2 cm und 9 cm (im Mittel 6 cm) und das Tideniedrigwasser zwischen 1 cm und 35 cm (im Mittel 22 cm) niedriger liegt. Es bleibt festzuhalten, dass gegenüber mittleren Verhältnissen im Mai 2002 höhere Tidehübe auf einem niedrigeren Mittelwasser eintraten.

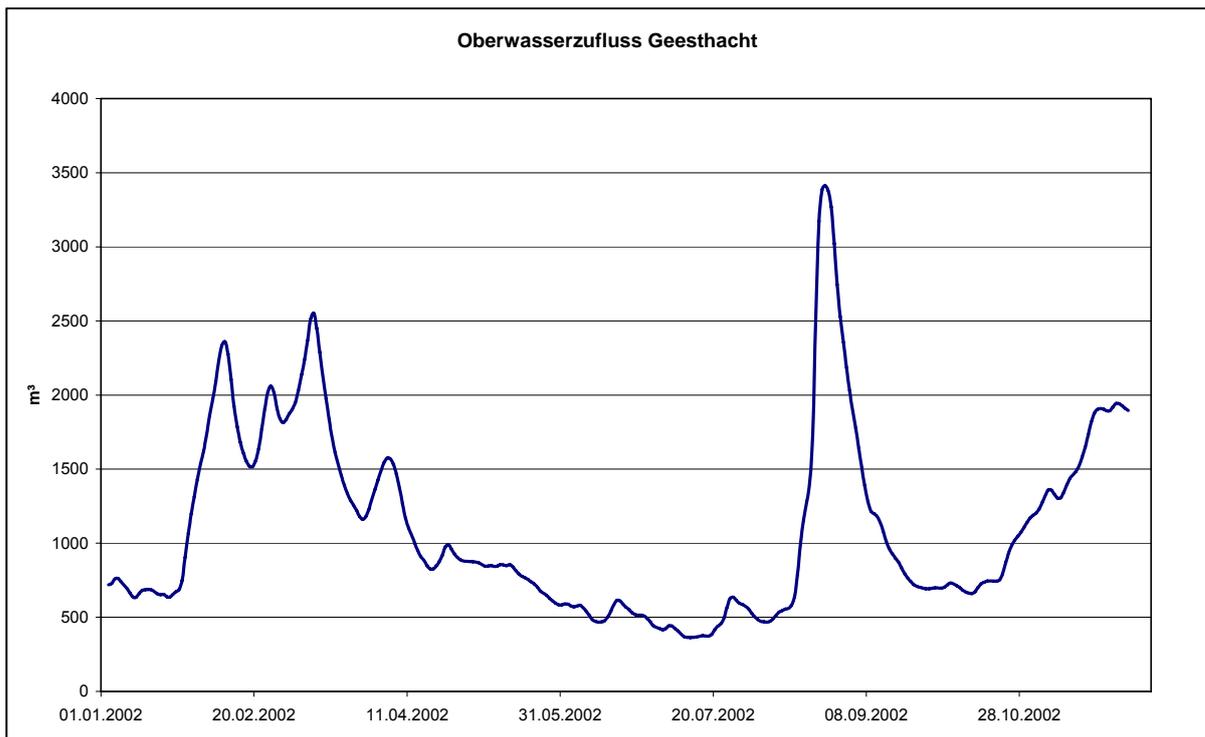


Bild 11: Oberwasserzufluss in die Unterelbe Januar bis November 2002 in Geesthacht

Der Tideeinfluss endet am Wehr Geesthacht. Er bestimmt damit auch die Tidewasserstände der unterhalb des Wehres liegenden Nebenflüsse. Dagegen nimmt der Einfluss des Oberwassers, der starken saisonalen Schwankungen unterliegt, in seewärtiger Richtung zunehmend ab. Der mittlere Festlandsabfluss beträgt etwa $700 \text{ m}^3/\text{s}$. Minimale Werte kleiner $250 \text{ m}^3/\text{s}$ treten im Spätsommer oder Herbst auf, maximale Werte größer als $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ in der Regel im Frühling. Die mittlere Schwebstoffkonzentration des Oberwassers beträgt $40 \text{ g}/\text{m}^3$.

7.2.2 Seegangsverhältnisse

In Anbetracht der Topographie des Untersuchungsgebietes und der vorherrschenden Windverhältnisse können die Seegangsverhältnisse wie folgt charakterisiert werden:

- Aufgrund der großen Fließquerschnitte und der großen Wassertiefen in der Außenelbe kann Seegang aus nordwestlichen Richtungen in Abhängigkeit der Tidephase sehr weit von der Nordsee in die Außenelbe hineinlaufen. Dieser aus der Nordsee einlaufende Seegang wird durch den Einfluss der komplexen Verhältnisse des Elbmündungsgebietes kontinuierlich gedämpft.
- Unter günstigen Verhältnissen (z.B. Nordwestwind und erhöhter Wasserstand) kann der aus der Nordsee einlaufende Seegang zu einer Belastung insbesondere des Medemgrundes, des Altenbrucher Bogens und des Osteriffs werden.

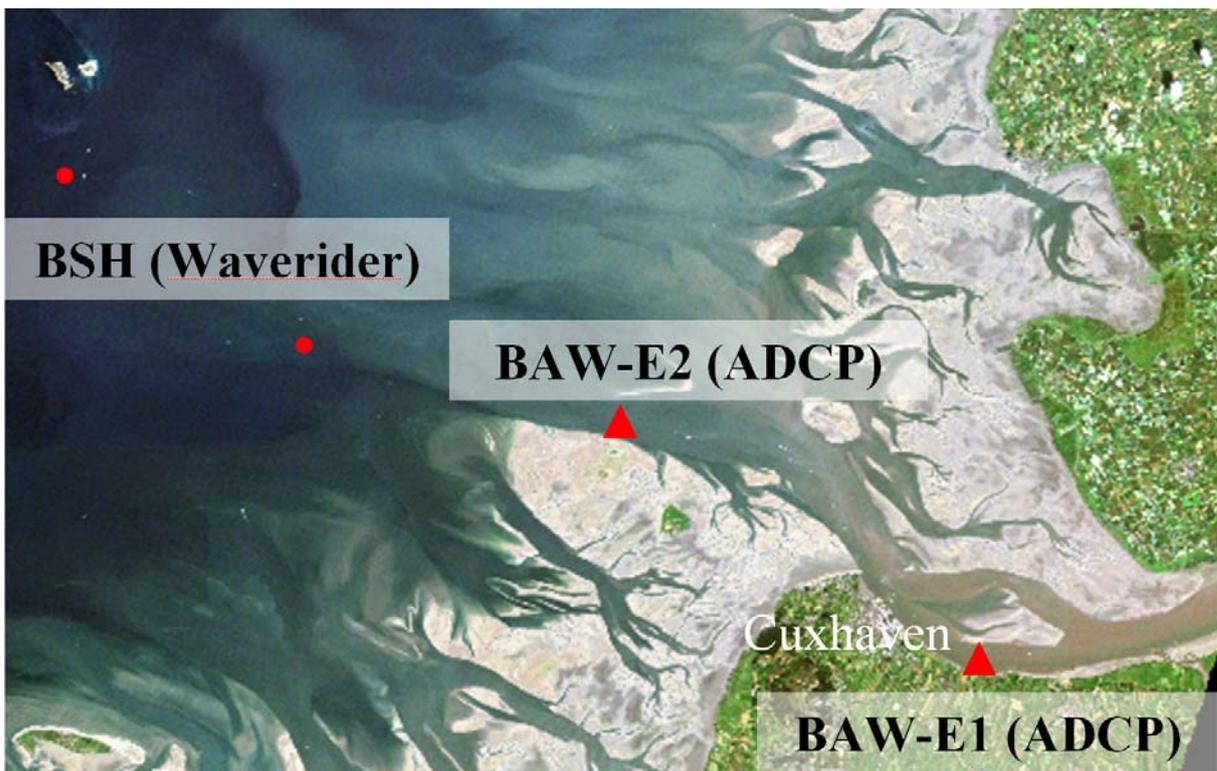


Bild 12: Messstationen (hier: Funkstationen) der BAW gemeinsam mit dem WSA Cuxhaven sowie des BSH in der Außenelbe und vor Helgoland

Zur Erfassung und Analyse der Seegangsverhältnisse in der Außenelbe und der Außenweser wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-DH) in Zusammenarbeit mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern Cuxhaven und Bremerhaven fünf Mess-Stationen betrieben. Davon liegen in der Elbe zwei Stationen. Die Messdaten dieser Stationen und die des BSH (Bild 12) dienen als Grundlage für die Validierung von numerischen Seegangsmo-
dellen, die bei der BAW in Kombination mit anderen numerischen Verfahren zur Hydro- und Morphodynamik für die Bearbeitung von projektbezogenen Fragestellungen eingesetzt werden. Als Messsysteme setzt die BAW-DH Akustische Doppler Current Profiler (ADCP) als kombinierte Strömungs- und Seegangssensoren ein, die auf der Gewässersohle als Permanentstationen mit autarker Stromversorgung und Datenfernabfrage verankert sind. Dagegen setzt das BSH für die Seegangsmessung vor Helgoland und der Außenelbe Waverider Bojen ein.

Für den Zeitraum Januar bis Mai 2005 stehen Seegangsmessungen der Stationen Außenelbe (BSH) und Altenbrucher Bogen (BAW) zur Verfügung. Diese wurden in Kombination mit Winddaten (Bild 13) von der Station Cuxhaven des Deutsche Wetterdienstes (DWD) analysiert.

Die charakteristische Seegangstransformation in der Elbmündung wird anhand der Messzeitreihen der signifikanten Wellenhöhen für diesen Zeitraum (Bild 14) deutlich. Dieser Zeitraum ist gekennzeichnet durch Wind aus unterschiedlichen Richtungen mit Windgeschwindigkeiten bis zu 17 m/s (Bild 13). Hier werden signifikante Wellenhöhen bis zu 6 m in der Außenel-

be gemessen, während im Altenbrucher Bogen (Elbe 1) die Wellenhöhen nur bei knapp über 1 m liegen.

Eine statistische Auswertung für den Messzeitraum Januar bis Mai 2005 veranschaulicht die Häufigkeitsverteilung der signifikanten Wellenhöhen im Bild 15 für die Station Elbe 1 (Altenbrucher Bogen). Hier werden Klassenbreiten von 0,10 m betrachtet. Im Altenbrucher Bogen treten in diesem Zeitraum signifikante Wellenhöhen bis zur Klasse 1,0 m auf. Die am häufigsten auftretenden Wellenhöhen liegen im Bereich um 0,3 m.

Die unterschiedlichen Seegangsverhältnisse an den beiden Messstationen resultieren aus der unterschiedlichen Lage. Die Station in der Außenelbe liegt im tiefen Wasser und wird nicht durch Land oder Wattflächen „abgeschattet“. Dadurch kann sich der Seegang nahezu ungehindert aus der Nordsee kommend bis in die Außenelbe entwickeln. Das gleiche gilt für den Wind der diesen Seegang antreibt. Die Station im Altenbrucher Bogen wird dagegen nur nach Norden hin nicht durch Land „abgeschattet“. Lokaler Seegang kann sich dadurch nur bei Wind mit einer Nord-Komponente entwickeln. Diese Entwicklung wird jedoch durch die nördlich des Altenbrucher Bogens liegenden Wattflächen Medemgrund und Medemsand behindert. Nicht nur diese Wattflächen stellen ein Hindernis für den aus der Nordsee einlaufenden Seegang dar, sondern auch die wechselnde Strömungsverhältnisse in der Elbe.

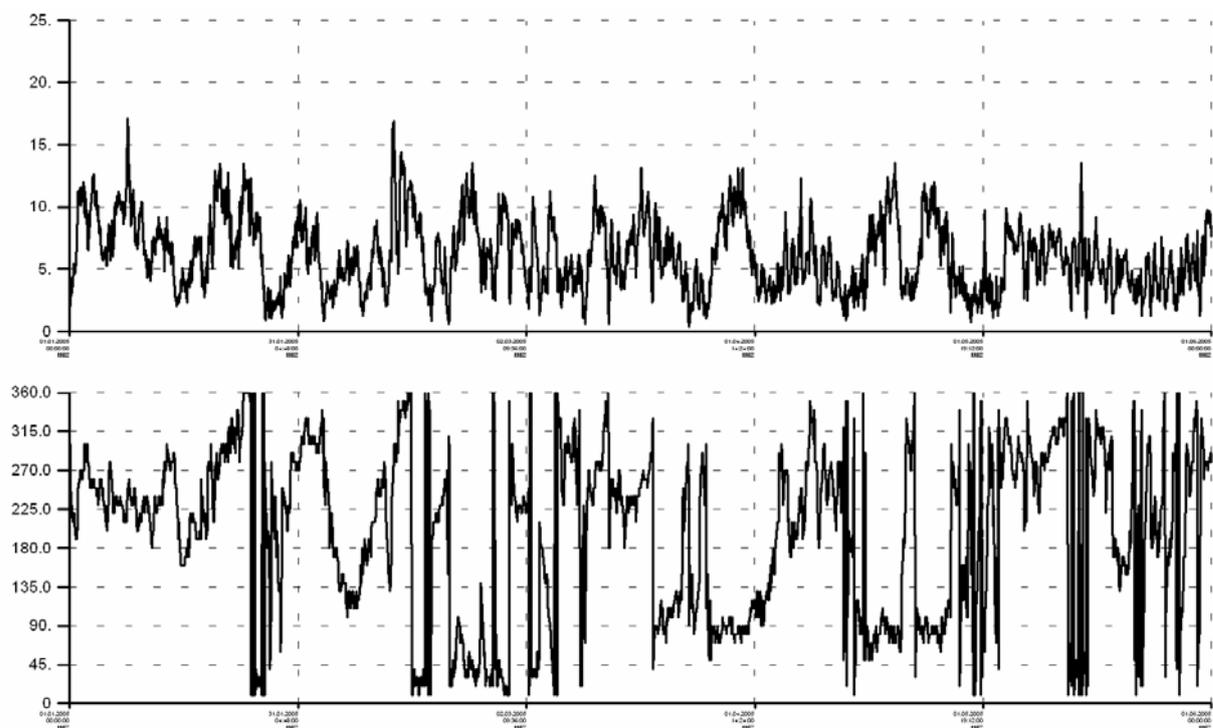


Bild 13: Windgeschwindigkeit (m/s) und Windrichtung (Grad) gemessen vom DWD an der Station Cuxhaven für den Zeitraum 1.1.2005 bis 1.6.2005

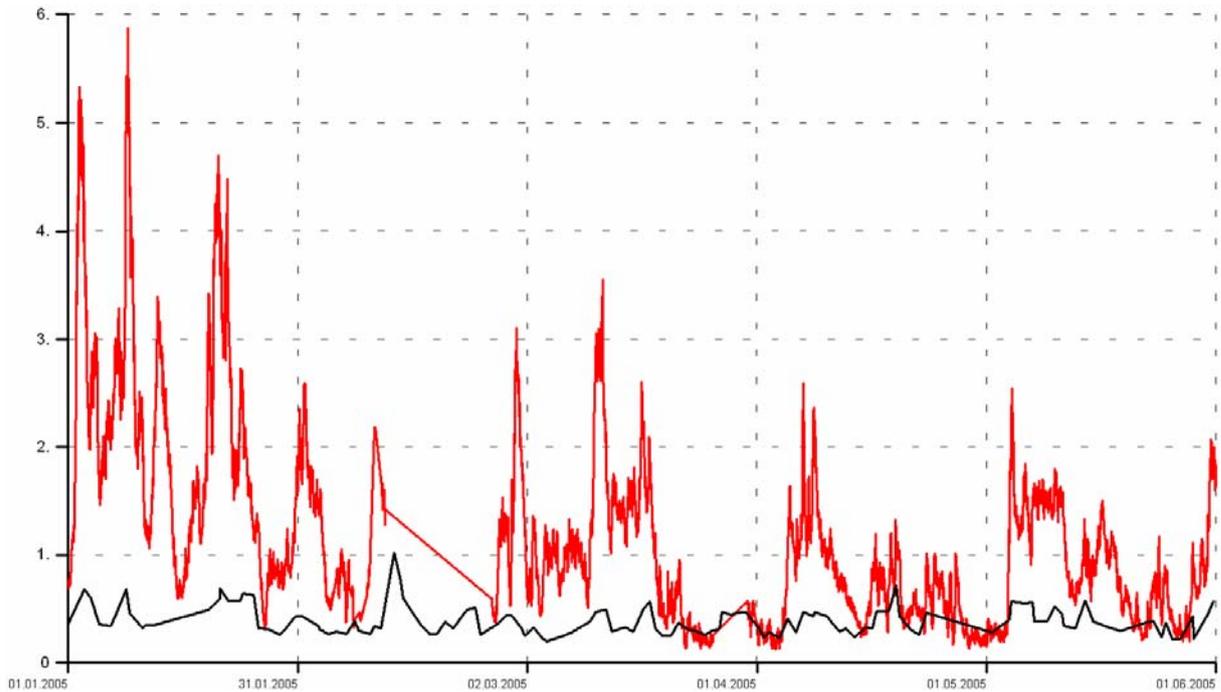


Bild 14: Signifikante Wellenhöhe (m) für die Messstation Außenelbe in Rot und das Tagesmaximum der signifikanten Wellenhöhen für Elbe1 (Altenbrucher Bogen) in Schwarz für die Zeit vom 1.1.2005 bis 1.6.2005

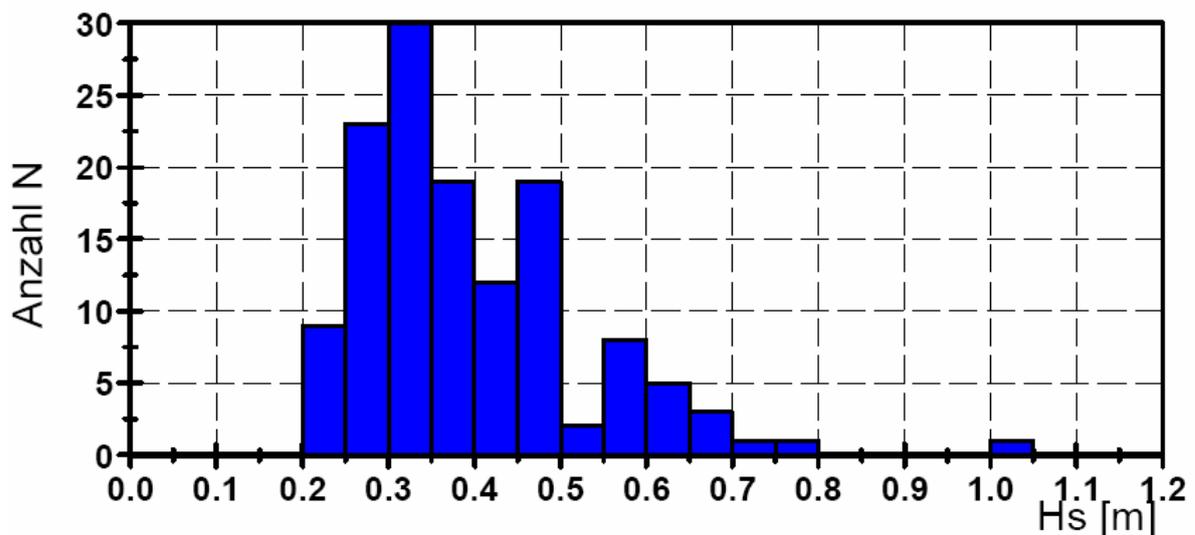


Bild 15: Klassierung (Klassenbreite 0,1 m) der gemessenen signifikanten Wellenhöhen nach Eintrittshäufigkeit für den Zeitraum Januar bis Mai 2005

8 Relative Bedeutung der morphodynamischen Prozesse

8.1 Strömungsinduzierte Prozesse

Die relevanten morphodynamischen Prozesse sind im Untersuchungsgebiet entscheidend durch die Tidedrömungen in der relativ tiefen Fahrrinne und die barokline Zirkulation geprägt, die maßgeblich zur Ausbildung der Trübungszone im Elbeästuar beiträgt. Im Gutachten zur Tidedynamik (BAW 2006a) sind im Detail die zu erwartenden ausbaubedingten Änderungen der Tidedrömungen und der Wasserstände sowie des Salztransportes auf der Grundlage von dreidimensionalen Modelluntersuchungen aufgezeigt worden. Diese Ergebnisse sind im Hinblick auf die Analyse und Interpretation der Feststofftransportprozesse unverzichtbar. Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass die relevanten ausbaubedingten Änderungen der Tidedynamik besonders deutlich im Wirkungsbereich der Strombauwerke in der Medemrinne und dem Neufelder Sand auftreten. Wie sich die Veränderungen der Tidedynamik in der gesamten Außen- und Unterelbe auf die Feststofftransporte, auf den Feststoffhaushalt und auf die Morphodynamik des Gesamtsystems auswirken werden, muss ebenfalls mit einem dreidimensionalen Modell für die Sedimentbewegung untersucht werden. Das von der BAW eingesetzte Modell führt hydro- und morphodynamische Simulationen mit fraktionierten Feststoffen (Suspension und Geschiebe) für den Vergleichszustand PIZ und den Ausbauzustand AZ durch.

8.2 Seegang induzierte Prozesse

Der Eintrag von Seegangenergie in das Elbeästuar ist nachweislich für Winde aus westlichen bis nördlichen Richtungen am größten. Für die Ausbreitung und Umformung des Seegangs unter Ansatz dieses Szenarios sind nachfolgend beschriebene Auswirkungen zu erwarten.

Die Maßnahme umfasst im Wesentlichen örtliche Vertiefungen von Fahrrinnenabschnitten der Außen- und Unterelbe und den Bau von zwei „weichen Strombauwerken“ aus Sand in der Medemrinne und am Neufelder Sand. Die Strombauwerke Medemrinne und Neufelder Sand sind Unterwasserablagerungsflächen d.h. diese Bauwerke stellen eine lokale Verringerung der Wassertiefe dar. Eine Abnahme der Wassertiefe wird zu einer Zunahme der Dissipation von Seegangenergie führen und damit zu einer Abnahme der Wellenhöhen im Nahfeld dieser Strombauwerke. Der Grad der Abnahme wird abhängig von dem jeweiligen Seegangereignis sein. Eine Abnahme der Energiedissipation durch die Vertiefung der Fahrrinne wird sich nur dann einstellen, wenn der Seegang vor dem geplanten Ausbau noch Grundberührung hatte. Dann kann durch die Fahrrinnenvertiefung tendenziell mehr Seegangenergie über die Fahrrinne in die Tideelbe gelangen. Außerdem werden aber durch die Vertiefung und die damit einhergehende Veränderungen der Tidedynamik auch Seegangstransformati-

onsprozesse wie Shoaling (Abhängigkeit der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit von der Wassertiefe) und Refraktion (Abhängigkeit der Wellenfortschrittsrichtung von dem Gradienten der Wassertiefe und der Strömung entlang des Wellenkamms) beeinflusst. Der Einfluss der Fahrrinnenvertiefung auf den Shoaling-Effekt führt zu einer Erhöhung der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit. Gleichzeitig wird durch die Vertiefung der Gradient der Wassertiefe zwischen der Fahrrinne und den benachbarten Seitenbereichen vergrößert, so dass in der Tendenz durch den Einfluss der Tiefenrefraktion mehr Seegangsenergie aus der Rinne in diese Seitenbereiche gelangen kann. Die Strömungsrefraktion kann in Verbindung mit ausbaubedingten Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten diesen Effekt noch verstärken oder dämpfen.

Durch den Ausbau der Wasserstraße wird es durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Seegang, Topographie und Strömung örtlich differenziert und ereignisabhängig in der Tendenz sowohl zu Zu- als auch zu Abnahmen der Wellenhöhen kommen

Die genannten Auswirkungen werden hinsichtlich ihrer Bedeutung bei der Ermittlung maßnahmenbedingter Änderungen des Sedimenttransportregimes der Tideelbe ermittelt und interpretiert. Als Basis dafür wird eine wasserbauliche Systemanalyse mit einem spektralen Seegangsmodell gewählt, das aus Gründen der Rechenzeitökonomie gekoppelt mit einem zweidimensionalen hydro- und morphodynamischen Tidemodell betrieben werden kann. Die dabei fehlende Modellierung der dreidimensionalen Prozesse ist hinnehmbar, da diese zur Beurteilung der ausbaubedingten Veränderungen der auf den Seegang bezogenen Wirkungsmechanismen von nachrangiger Bedeutung sind. Die Simulation erfolgt für relevante Systemzustände (charakteristische Szenarien des Seegangs und der Tide) jeweils im Vergleichs- und Ausbauzustand. Der Sedimenttransport wird in Form von Suspension und Geschiebe fraktioniert modelliert.

In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, dass die Wellenhöhe einschl. ihrer ausbaubedingten Veränderung, zwar ein augenfälliges Anzeichen für die Seegangsbelastung darstellt, als Kenngröße aber nur auf die Wasseroberfläche, in ihrer Wirkung aber nicht auf die Gewässersohle bezogen ist, wo die Sedimentmobilisierung stattfindet. So erreichen die Geschwindigkeiten der Wasserteilchen in einer Welle, die sich auf Orbitalbahnen bewegen, ihr Maximum an der Wasseroberfläche. Zur Sohle hin nimmt die Orbitalgeschwindigkeit jedoch kontinuierlich ab. Die Belastung der Gewässersohle ist daher nicht nur von der Wellenhöhe und der Wellenlänge sondern vor allem auch von der Wassertiefe abhängig. In den Modellrechnungen werden deshalb die seegangsinduzierten Orbitalgeschwindigkeiten an der Sohle mit denen der Tideströmung überlagert. Ferner werden die seegangsinduzierten Strömungen („radiation stresses“) berücksichtigt.



8.3 Äolischer Sedimenttransport

Da das großräumige Windgeschehen durch die Anpassung der Unter- und Außenelbe nicht verändert wird, können demnach keine ausbaubedingten Änderungen des äolischen Sedimenttransportes auftreten. Im Sinne einer wasserbaulichen Systemanalyse ist es daher eine zulässige Vereinfachung, in den weitergehenden Untersuchungen den äolischen Sedimenttransport unberücksichtigt zu lassen.

9 Mathematische Verfahren zur Simulation der Morphodynamik

9.1 Simulationsmodelle und deren Wechselwirkung

Bei der Simulation der relevanten Prozesse mit mathematischen Modellen werden Atmosphäre, Hydrosphäre und Geosphäre in gekoppelten Modulen oder separaten Modellen behandelt, die an ihren Grenzflächen Stoff- und/oder Impulsflüsse austauschen. Ein Atmosphärenmodell berechnet Wind- und Luftdruckfelder, die den Hydrosphärenmodellen für Seegang und Strömung zusätzliche Kräfte bzw. Spannungen an der Oberfläche induzieren. An der Gewässersohle stehen Hydrodynamik und Morphodynamik in enger Wechselwirkung.

- Das dreidimensionale HN-Simulationsverfahren UnTRIM¹ simuliert die wichtigsten dreidimensionalen Prozesse der Tidedynamik, sowie den Transport von Salz und fraktionierten suspendierten Sedimenten.
- Das morphodynamische Simulationsverfahren SediMorph² berechnet den fraktionierten Geschiebetransport und berechnet bzw. verwaltet die Erosions- und Depositionsströme suspendierter Sedimente.
- Das spektrale Seegangmodell UnK (k-Modell)³ simuliert die Ausbreitung und Veränderung des Seegangs. Das Seegangmodell UnK kann auch gekoppelt mit UnTRIM und SediMorph betrieben werden, um die Wechselwirkung zwischen Tidedynamik, Seegang und Feststofftransport zu erfassen.

Die Simulationen werden mit zeit- und ortsvariablen Wind – und Luftdruckfeldern durchgeführt, um zusätzlich wirkende Kräfte bzw. Spannungen an der Wasseroberfläche zu berücksichtigen.

Für alle genannten Simulationsverfahren liegen bei der BAW Validierungsdokumente vor, in denen die Grundlagen, die Funktionalität und die Validität dargestellt sind. Nachfolgend werden daher lediglich die wesentlichen Eigenschaften der Verfahren genannt.

UnTRIM ist ein semi-implizites Finite-Differenzen- bzw. Finite-Volumen-Verfahren für unstrukturierte orthogonale Gitter zur Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Oberfläche. Dem Verfahren liegen folgende Erhaltungssätze der Strömungsmechanik zugrunde:

- Kontinuitätsgleichung inkompressibler Fluide
- Reynolds gemittelte Navier-Stokes-Gleichung für den Impuls

¹ http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/hnm_untrim-de.html

² <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/sedimorph/index.html>

³ <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/kmodel/index.html>

- Advektions-Diffusions-Gleichung (Transportgleichung) für Salz, Temperatur und fraktionierte suspendierte Sedimente

Beim spektralen Seegangmodell *UnK* handelt es sich um ein Verfahren mit nichtlinearer Energiedissipation durch turbulente Diffusion (z.B. beim Wellenbrechen), welches am GKSS Forschungszentrum (Geesthacht) unter dem Namen k-Modell entwickelt und später an das Anforderungsprofil der BAW hinsichtlich der Kopplung mit hydro- und morphodynamisch numerischen Modellen angepasst wurde. *UnK* dient zur instationären Berechnung der Entstehung, Ausbreitung und Dissipation von Seegang im Ozean, in Küstengewässern und Ästuarien. Das Verfahren basiert auf der Erhaltungsgleichung der Aktionsdichte der Wellen (wave action density), die in ihrer erweiterten Form die nichtlineare Seegangs-Turbulenz-Wechselwirkung berücksichtigt. Das Verfahren kann auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter arbeiten und in direkter Kopplung mit den Verfahren *UnTRIM* und *SediMorph* verwendet werden.

Das Verfahren *SediMorph* ist eine Eigenentwicklung der Bundesanstalt für Wasserbau zur Simulation von dreidimensionalen sedimentologischen Prozessen an der Gewässersohle. Hierzu werden Massenbewegungen infolge Geschiebe- und Suspensionstransport der einzelnen Kornfraktionen sowie des Porenwassers bilanziert. Aus diesen Sedimentströmen werden Sohlhöhenveränderungen bilanziert. Auch die Beschreibung des Aufbaus und der Veränderung des Bodens, d.h. die Verwaltung des Sedimentinventars, die Genese von Dünen etc. ist innerhalb des Moduls *SediMorph* realisiert. Ferner wird der fraktionierte Geschiebetransport berechnet. Auch das Verfahren *SediMorph* arbeitet auf unstrukturierten orthogonalen Gittern.

Die im Modell berücksichtigten Wechselwirkungen im Wasserkörper zwischen Strömungs- und Stofftransportprozessen sind in Bild 16 schematisch dargestellt. Die primären Ergebnisse eines Strömungsmodells sind (dreidimensionale) **Strömungsgeschwindigkeiten u** und **Wasserstände h** , mit denen unter Verwendung der **turbulenten Viskosität ν_t** die Advektion und die Diffusion der zu transportierenden Größen wie **Salz S** , **Temperatur T** und **Schwebstoff c** berechnet werden können. Bei der Lösung der Schwebstofftransportgleichung muss aber wie oben erwähnt die **Sinkgeschwindigkeit w_c** als zusätzliche Vertikalkomponente berücksichtigt werden.

Sedimentflüsse aus der bzw. in die Wassersäule bei Deposition bzw. Erosion von Schwebstoffen werden über Quell- und Senkterme der Transportgleichung modelliert. Den dominierenden Einfluss hat dabei die **Sohlschubspannung τ_b** , die nicht nur wichtig für die Dissipation der Strömungsenergie und den Grad der Turbulenz ist, sondern auch die Stärke des **Erosionsstromes Q_c** bestimmt.

Der Einfluss der variablen Salzkonzentrationen und Wassertemperaturen auf die **Fluidichte ρ** kann über eine empirische Zustandsgleichung für Meerwasser berechnet werden

(UNESCO, EOS80). Dieser Dichte wird dann noch gegebenenfalls die Massenkonzentration des Schwebstoffes überlagert. Die veränderliche Gesamtdichte wirkt über zwei verschiedene Wege auf die Hydrodynamik ein. Ein direkter Einfluss erfolgt durch den Druckterm in den Impulsgleichungen, da dort die **Fluidichte** ρ als Variable enthalten ist. Dichteströmungen sind somit automatisch Bestandteil der Ergebnisse dreidimensionaler Modelle.

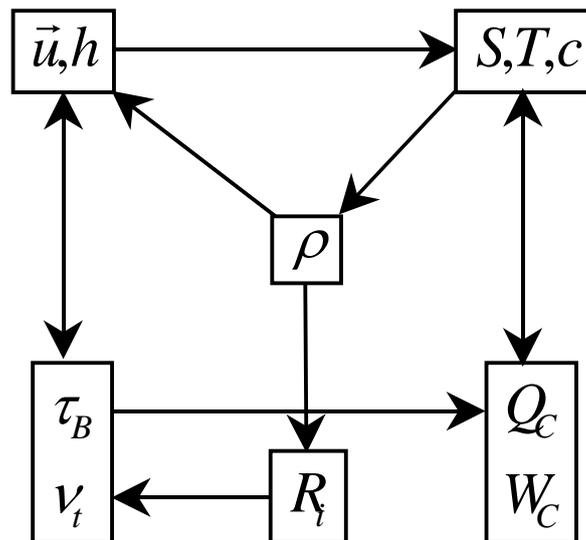


Bild 16: Modellinterne Wechselwirkungen zwischen Strömungs- und Stofftransportprozessen in der Wassersäule.

Ein zweiter Weg ist indirekt und basiert auf der Annahme, dass eine stabile Schichtung einen dämpfenden Einfluss auf die **Turbulenz** hat (d.h. v_t müsste kleiner werden), eine instabile Dichteschichtung hingegen den turbulenten Austausch in der Vertikalen anfährt. In den HN-Modellen wird dieser Annahme entweder durch empirische Dämpfungsfunktionen für algebraische Turbulenzmodelle oder durch einen zusätzlichen Dämpfungsterm in Zweigleichungs-Turbulenzmodellen Rechnung getragen. Eine Maßzahl für die Stabilität einer Schichtung ist die **Richardson-Zahl R_i** , die als Funktion des vertikalen Dichte- und des Geschwindigkeitsgradienten stabilisierende und zerstörende Kräfte in ein Verhältnis setzt. Leider werden wenig allgemeingültige Parametrisierungen der oben beschriebenen Effekte in den empirischen Dämpfungsfunktionen verwendet, da die Datengrundlage nicht umfangreich genug ist.

Die Wechselwirkungen innerhalb einer Simulation werden noch komplexer, wenn durch die Strömung Sediment transportiert wird und die Gewässersohle sich in ihrer Form und Sedimentzusammensetzung verändert.

9.2 Anmerkungen zur Analyse und zur Interpretation morphodynamischer Prozesse

Eine vollkommen naturähnliche Simulation des Sedimenttransports würde eine genaue Berechnung der zeit- und ortsveränderlichen Erosionsraten im gesamten Untersuchungsgebiet erfordern. Dies ist jedoch nicht möglich, weil die natürliche sehr variable räumliche und zeitliche Verteilung aller Sedimenteigenschaften (Kornzusammensetzung, Konsolidierungsgrad des Bodens, biologische Besiedlung etc.) nicht vollständig in der Natur für das gesamte Untersuchungsgebiet kleinräumig erhoben werden kann. Eine messtechnische Aufnahme aller relevanten Sedimentparameter müsste zudem in allen Erosionsgebieten nicht nur die Oberflächensedimente, sondern auch die Sedimente in den darunter liegenden Schichten erfassen. Wenn nun aber die Erosionsraten nicht vollkommen bestimmt werden können, können auch die Transportraten und folglich auch die sich aus den Transportraten ergebenden Depositionsraten nicht vollkommen naturähnlich berechnet werden. Aus diesem Sachverhalt können sich Diskrepanzen zwischen Natur und Modell in den berechneten Erosions- und Depositionsmengen ergeben. Die natürliche Erosion an der Gewässersohle und damit auch der Abtransport der erodierten Sedimentmassen mit der Strömung ist deshalb in einer Simulation mit Unschärfen und Unsicherheiten versehen.

Trotz dieser grundsätzlich nicht überwindbaren Unschärfen liefert ein Modelleinsatz nach den Regeln einer strukturierten wasserbaulichen Systemanalyse belastbare Hinweise für das ausbaubedingt veränderte Systemverhalten. Im Vorgehen der BAW wird zunächst allein die dreidimensionale Tidedynamik untersucht, um die Ergebnisse hinsichtlich der zu erwartenden morphologischen Prozesse über die relevanten Kenngrößen für die Strömungsgeschwindigkeiten und die Sohlschubspannungen im Detail zu analysieren und zu interpretieren. Mit diesen Grundlagen und mit dreidimensionalen hydro- und morphodynamisch numerischen Simulationen lassen sich ausbaubedingte morphologische Änderungen über einen beschränkten Zeitraum von mehreren Wochen für das Elbeästuar auf der sicheren Seite liegend abschätzen, wenn der oben dargestellte Sachverhalt (Unschärfe der Erosionsmengen) berücksichtigt wird. Die Unschärfen im Erosionsverhalten können beispielsweise durch eine gegenüber der Natur höhere Erodierbarkeit des Gewässerbodens im Simulationsmodell berücksichtigt werden. Mit einer für die Simulation eingestellten höheren Erodierbarkeit treten die Ausbauwirkungen deutlicher zutage.

Aussagen für eine langfristige Prognose über mehrere Jahre oder gar Jahrzehnte können ebenfalls mit mathematischen Simulationsmodellen gewonnen werden. Da die erwähnten Unschärfen im Erosionsverhalten des Gewässerbodens aufgrund fehlender Naturdaten für die tiefer liegenden Schichten (die durch fortschreitende Erosionen zutage treten können) noch weiter zunehmen, müssen Langzeitaussagen vor allem auf (zum Teil schon bestehende) signifikante Trends eingehen, die sich ausbaubedingt einstellen können. Für das hiermit vorgelegte Gutachten sind – vor dem Hintergrund der Vorgaben des Scoping-Termins – Fragen und Antworten zu folgenden Trends von besonderem Interesse:

- Führt der Ausbau zu einer veränderten Sedimentbilanz im Übergangsbereich Elbeästuar - Deutsche Bucht?
- Verändern sich in den tiefen Rinnen die heute bestehenden charakteristischen Richtungen des Nettotransports für die im System vorhandenen Korngrößenklassen (sowohl für Geschiebe als auch für die im Wasserkörper transportierten Sedimente).
- Kann es durch ausbaubedingte Veränderung der Netto-Transporte zu neuen Unterhaltungsschwerpunkten kommen?
- Kann es durch ausbaubedingte Veränderung der Netto-Transporte zu fortschreitenden Erosionsstrecken kommen?
- Kann es in den Prielsystemen der Außenelbe zu beschleunigten Verschlickungen oder Versandungen kommen?
- Kann es in den Nebenarmen und Seitenbereichen der Tideelbe zu beschleunigten Verschlickungen oder Versandungen kommen?

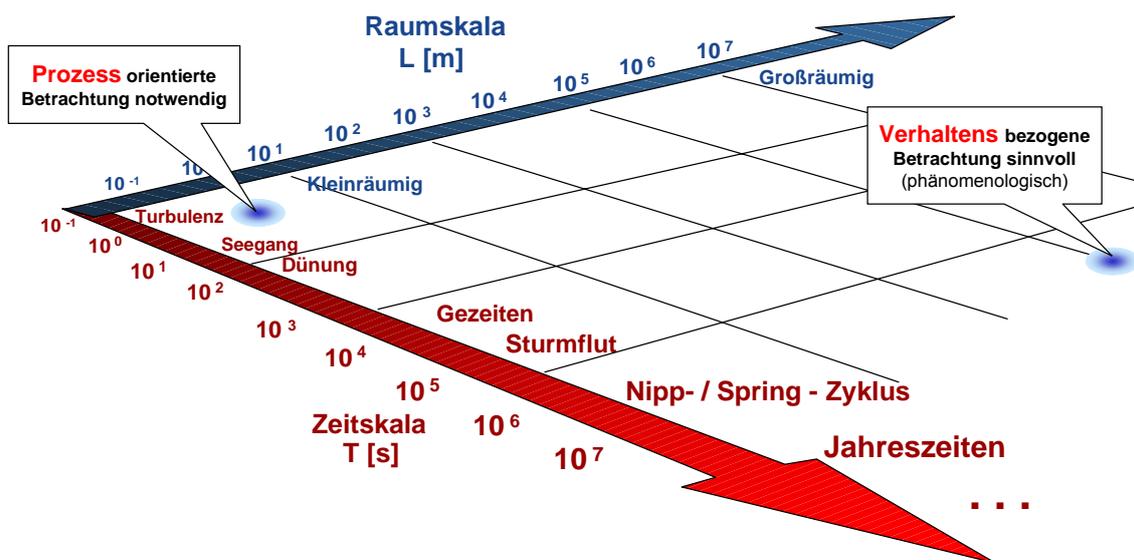


Bild 17: Analyse von morphologischen Prozessen vor dem Hintergrund unterschiedlicher Raum- und Zeitskalen

Im Rahmen der Analyse langfristiger Trends ist weiterhin zu beachten, dass im sehr großräumigen Elbeästuar zahlreiche Einflussparameter zu berücksichtigen sind, die in ihrer Kombinationswirkung unter Langzeitaspekten zu einer sehr hohen Komplexitätsstufe führen, so dass eine alleinige Beurteilung auf der Grundlage von Simulationsmodellen (Prozess orientierte Analyse) nicht ausreichen kann. Daher muss auch eine phänomenologische Betrachtung und Beschreibung der Morphodynamik durchgeführt werden.

10 Modellbildungen und Modellbetrieb

10.1 Modellgebiet und Berechnungsgitter

Das Modellgebiet des verwendeten HN – Modells wurde so gewählt, dass die maßgebenden physikalischen Prozesse hinsichtlich der ausbaubedingten Änderungen simuliert werden konnten. Es ist identisch mit dem Modell, das für das Tidedynamik-Gutachten (BAW2006a) verwendet wurde (Bild 18:) und dort auch ausführlich beschrieben wird. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle nur die wichtigsten Informationen zum Modellgebiet und dem Berechnungsgitter wiedergegeben, die detaillierte Beschreibung ist dem Tidegutachten zu entnehmen.

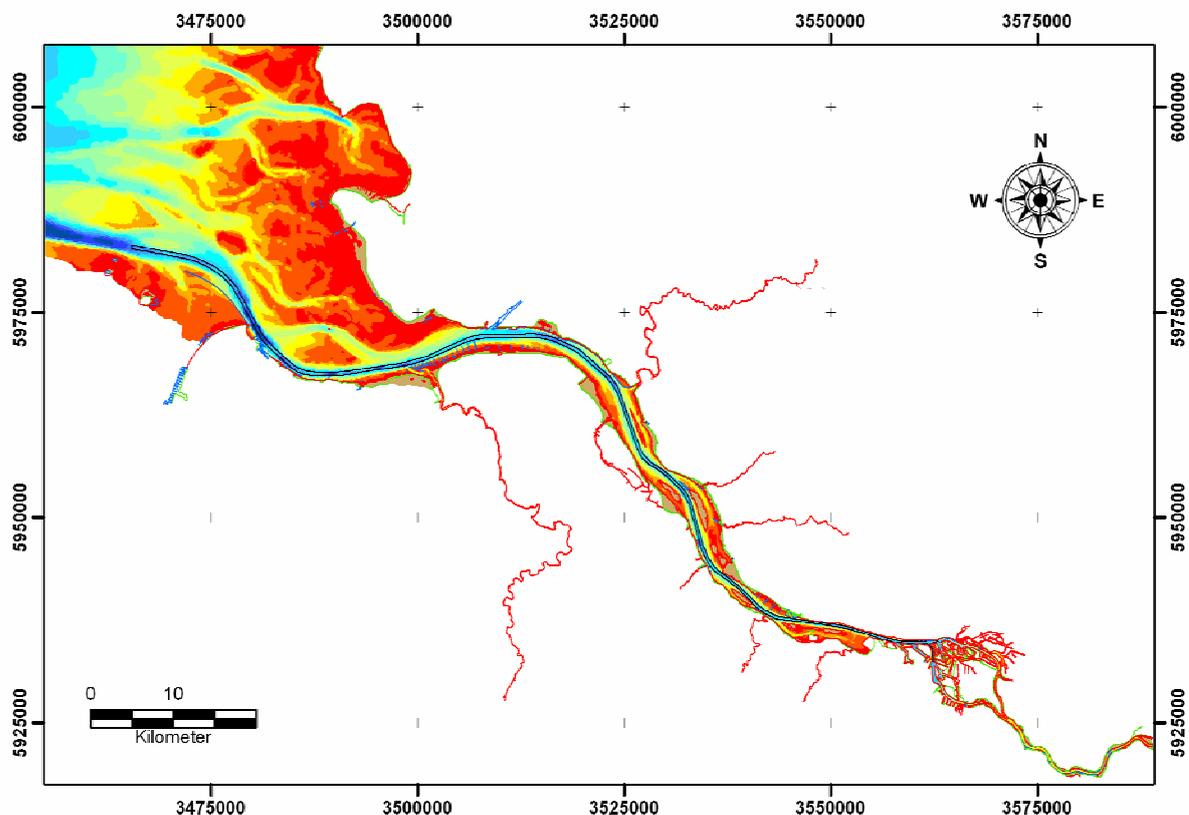


Bild 18: Ausdehnung und Tiefenverteilung des "Elbe-Modells" der BAW

Die Gesamtanzahl der unregelmäßigen Dreiecks- und Viereckselemente beträgt in der horizontalen ca. 140.000, was bei einer vertikalen Auflösung von 1 m zu ca. 1 Million Elementen führt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen 3 Beispiele der Gitterauflösung: Bild 19 zeigt das relativ grobe Gitter in der Nordsee, Bild 20 ein bereits feines Gitter bei Brunsbüttel und Bild 21 ein Gitter mit sehr kleinen Elementen bei Hamburg-Finkenwerder.

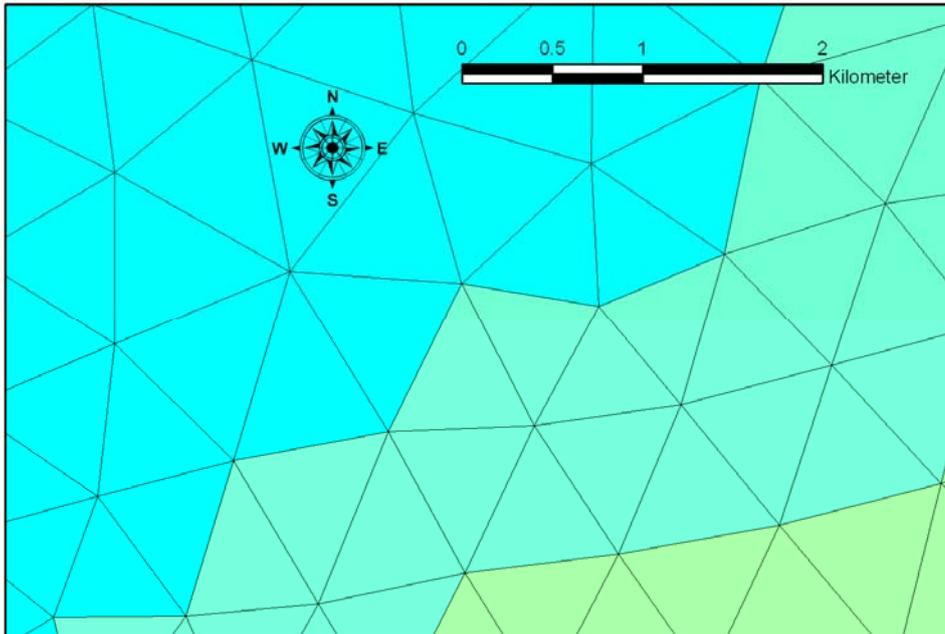


Bild 19: Gitterelemente in der Nordsee

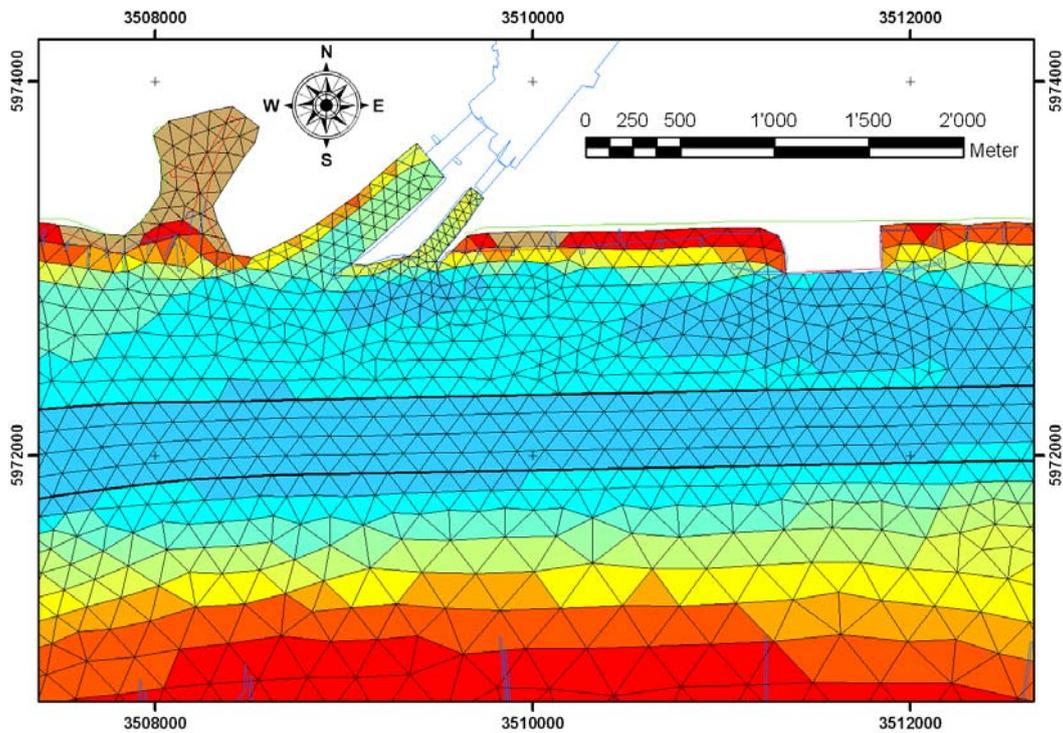


Bild 20: Gitternetz in der Elbe bei Brunsbüttel

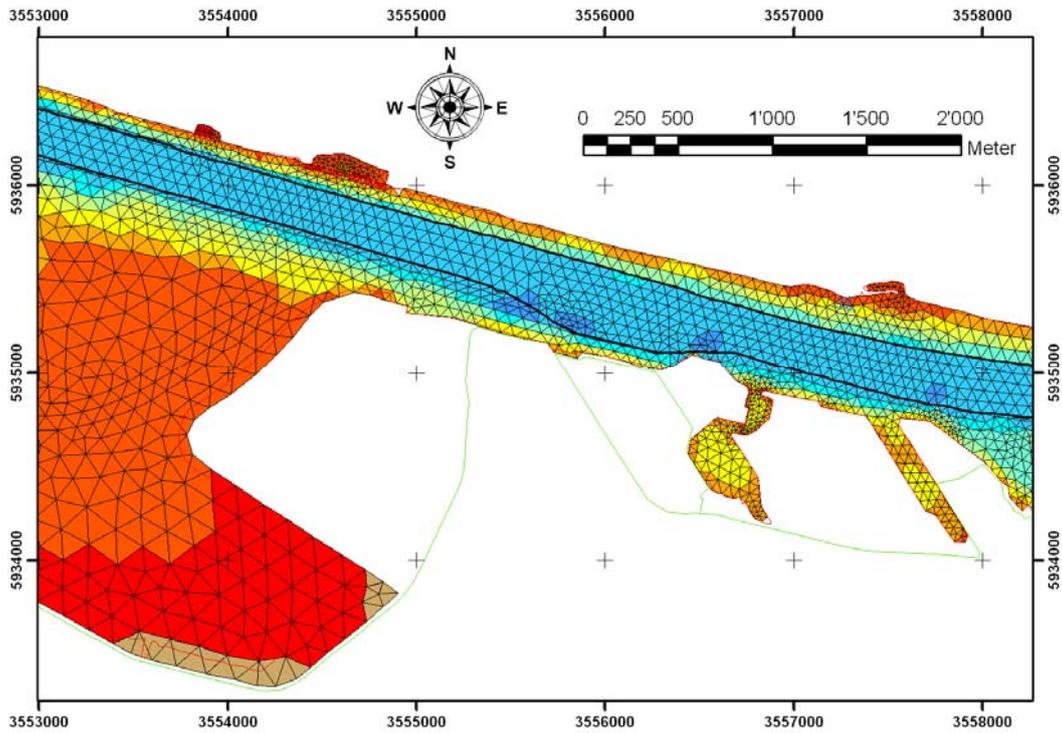


Bild 21: Gitternetz in der Elbe bei Hamburg

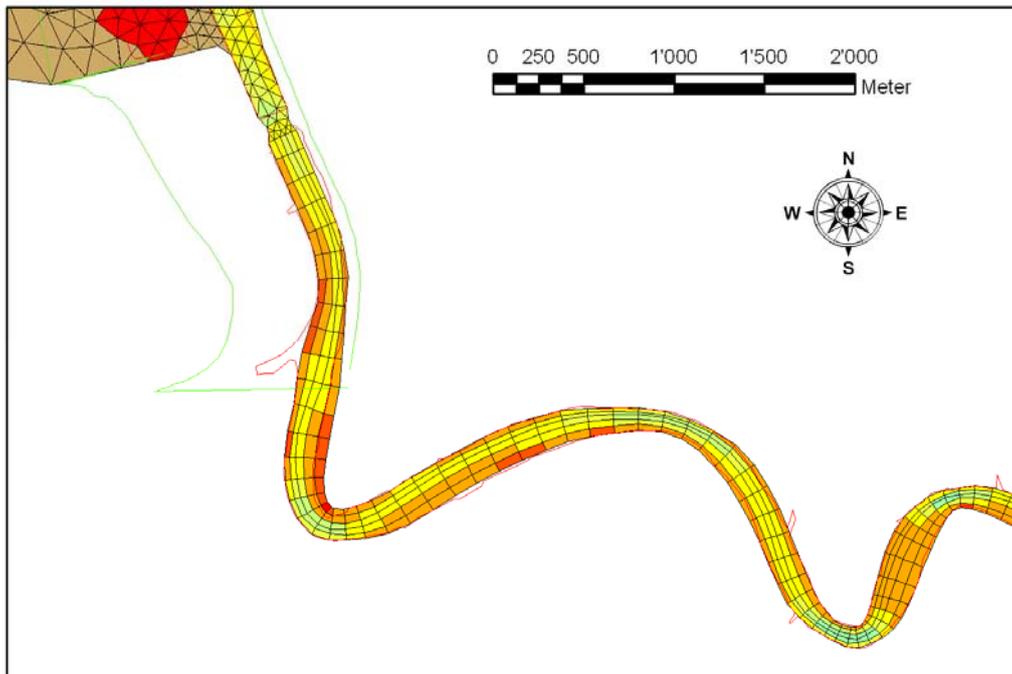


Bild 22: Gitternetz untere Oste



In der von den Planfeststellungsbehörden der Freien und Hansestadt Hamburg sowie der Wasser und Schifffahrtsverwaltung des Bundes herausgegebenen Festlegung des Untersuchungsrahmens gem. § 5 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) vom 26.5.2005, wurde festgelegt, dass die Tidedynamik in Nebenflüssen nur dann untersucht werden muss, „wenn prognostizierte ausbaubedingte Wasserstandsveränderungen bezüglich MT_{nw} oder M_{Thw} an den Flussmündungen größer als 2 cm sind.“ Aus diesem Grund sind die Oste (Bild 22) und die Stör Bestandteil des Berechnungsnetzes. Ein primärer Grund besteht vor allem darin, dass ausbaubedingte Veränderungen des Salzgehaltes an den Mündungen dieser Nebenflüsse auftreten, und diese daher im Gesamtsystem untersucht werden müssen.

Die Kantenlängen des Berechnungsnetzes variieren von ca. 1,50 m bis über 1300 m, die häufigsten Elemente haben Kantenlängen um 50 m. Die Fläche der Elemente variiert dabei von ca. 8 m² bis über 600000 m², wobei die häufigsten Elemente eine Fläche um 1500 m² haben.

Diese Elemente sind mit Tiefenwerten belegt worden, die aus den digital vorliegenden Peildaten der Wasser- und Schifffahrtsämter, des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie und der Hamburg Port Authority extrahiert worden sind. Es wurden die jeweils aktuellsten vorliegenden Jahreshauptpeilungen verwendet:

Amt	Jahrgang
BSH	2003
WSA Cuxhaven	2003
WSA Brunsbüttel	2003
WSA Tönning	2003
WSA Hamburg	2003
WSA Lauenburg	2003
Hamburg Port Authority	2003

Tabelle 1: Für die Modelltopographie verwendete aktuelle Jahreshauptpeilungen

Weiterhin wurden Daten aus der Fächerecholotpeilung, die zwischen Ende 2001 und Anfang 2002 im Bereich des WSA Cuxhaven durchgeführt wurde, sowie der Laserscan-Befliegung des Wattgebietes aus 1999 und 2001 verwendet. Zusätzlich wurden Daten einer Befliegung des Gebietes des WSA Lauenburg sowie einer Befliegung der Hahnöfer Nebenelbe und des Mühlenberger Loches mit herangezogen. Zuletzt wurden die seit 1999 neu vermessenen Bauwerke im Bereich der WSA Cuxhaven und Hamburg eingearbeitet.

Generell kann festgestellt werden, dass nahezu alle Gebiete der Modelltopographie mit Tiefen größer als 5 m mit Fächerecholot oder Flächenpeilung gepeilt wurden und fast alle

trocken fallenden Gebiete mit Laserscan befliegen worden sind, so dass in diesen Gebieten die Datengrundlage in einer sehr guten Qualität vorhanden ist.

Für die Modelltopographien des Vergleichszustandes (PIZ) und der Ausbauzustandes (AZ) werden gleiche Rechengitter verwendet. Die Bestandteile dieser beiden Systemgeometrien wurden bereits in Kapitel 2.1 zusammengefasst. Eine ausführliche Beschreibung ist dem Tidedynamik-Gutachten (BAW2006a) zu entnehmen.

10.2 Modellsteuerung

Ästuarmodelle sind immer nur Ausschnittsmodelle, an deren offenen Rändern zeitabhängige Randwerte für den Wasserstand oder die Strömungsgeschwindigkeit und für die transportierten Substanzen vorgegeben werden müssen. In der Regel wird ein Ästuarmodell seeseitig durch Vorgabe der Wasserspiegelauslenkung und an der oberstromseitigen Grenze durch die Vorgabe eines Zuflusses gesteuert, der über den aktuellen Wasserstand in Strömungsgeschwindigkeiten umgerechnet wird. An diesen Rändern müssen auch Massenkonzentrationen für Salz und alle Schwebstofffraktionen vorgegeben werden.

Für die Steuerung des Modells der Unter- und Außenelbe werden Randwerte verwendet, die hinsichtlich der Tidedynamik einen charakteristischen Systemzustand im Ästuar repräsentieren und den Zeitraum eines Nipp-Spring-Zyklus abdecken. Als Analysezeitraum wird der 11.5.2002 bis 25.5.2002 gewählt, der Simulationszeitraum umfasst zusätzlich noch einen 8-tägigen Vorlauf.

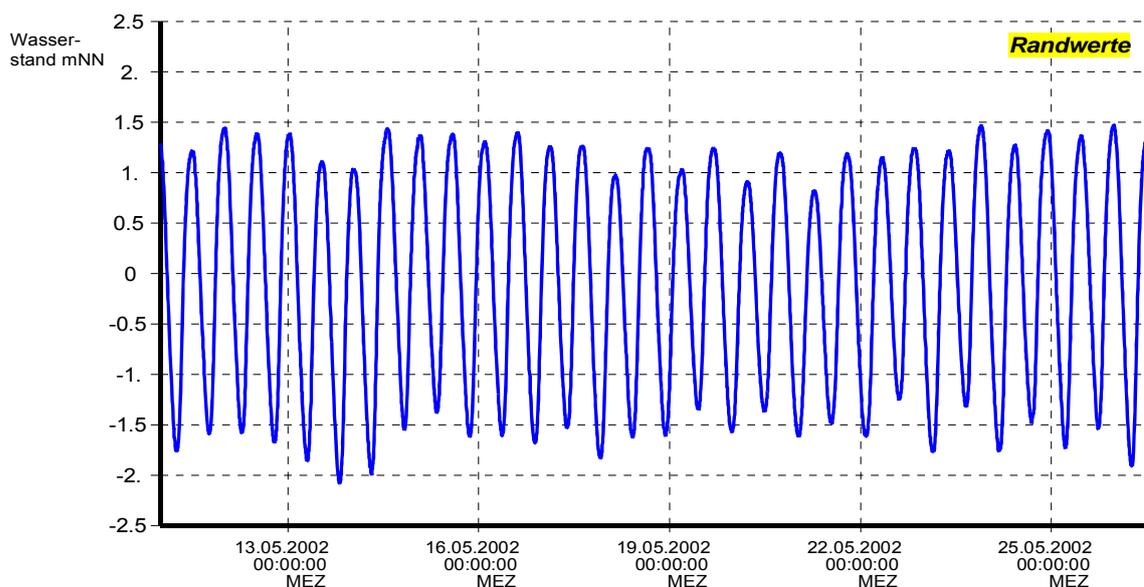


Bild 23: Wasserspiegelauslenkung für eine Randknoten am seeseitigen Rand

10.2.1 Wasserstand

Die Randwerte für den Wasserstand wurden aus einer Kombination von Messungen an den Baken A+Z und Ergebnissen des Nordseemodells der BAW-DH berechnet. Die Wasserstände variieren entlang des Randes, d.h. jeder Randzelle wird eine Zeitreihe wie in Bild 23 dargestellt zugewiesen.

10.2.2 Oberwasser

Die Tidegrenze ist durch das Wehr Geesthacht gegeben. Das bedeutet auch, dass an dieser Stelle das Oberwasser vorgegeben werden muss. Dafür wurden Abflussganglinien, die für Neu-Darchau ermittelt wurden, mit einem zeitlichen Versatz von ca. 2 Tagen bei Geesthacht in das Modellgebiet eingesteuert. Diese Werte sind als Zeitreihen in Bild 24 für das Jahr 2002 und in Bild 25 für den Validierungszeitraum dargestellt. Bei weiteren Simulationen für dieses Gutachten wurde der Oberwasserzufluß konstant zu 350 m³/s bzw. 1500 m³/s gesetzt.

In den Nebenflüssen Oste und Stör werden konstante Zuflüsse vorgegeben. Weitere Zuflüsse zum Elbe-Ästuar werden nicht berücksichtigt, da sie keinen signifikanten Beitrag zur Tidedynamik des Ästuars liefern und somit ohne Verlust der Prognosefähigkeit in der Modellierung vernachlässigt werden können.

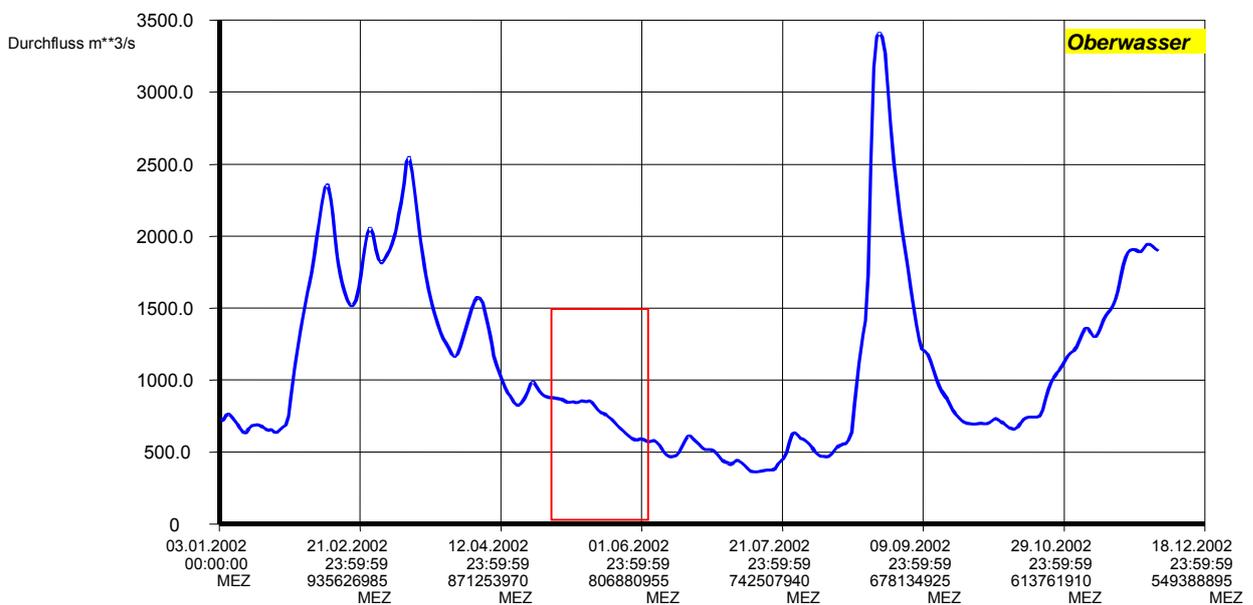


Bild 24: Oberwasserentwicklung (Neu-Darchau) im Jahr 2002. Der Validierungszeitraum ist rot gekennzeichnet.

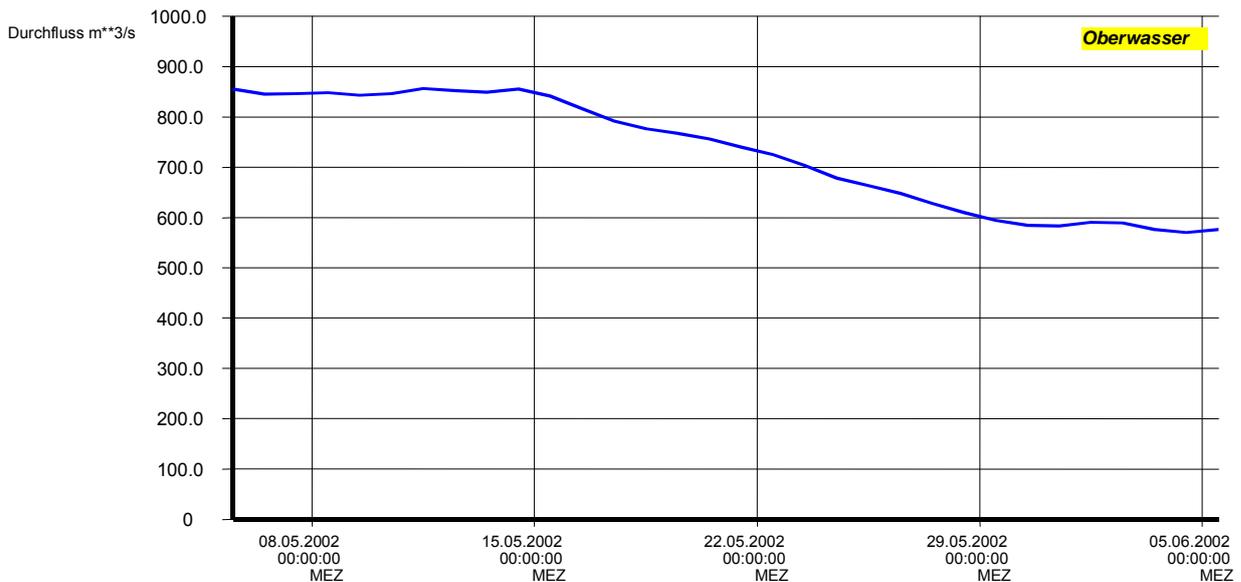


Bild 25: Oberwasserentwicklung (Neu-Darchau) im Validierungszeitraum.

10.2.3 Salz

In der Natur unterliegen die Salzkonzentrationen an der seeseitigen Modellgrenze kleinen Schwankungen. Zur Kalibrierung und Validierung des Modells für den Ist-Zustand werden die variablen Werte berücksichtigt. Bei den Simulationen mit konstantem Oberwasser werden die Randwerte für die Salzkonzentration konstant auf einen Wert von 30 PSU gesetzt.

10.2.4 Sediment

Im Simulationsmodell werden bindige Sedimente (Schluff) in Suspension und nicht bindige Sedimente (Sande) als Geschiebe transportiert. Zur Vorgabe von Randwerten für die Schwebstoffkonzentrationen am seeseitigen Rand liegen keine Messungen vor. Da das Systemverhalten des Schwebstofftransportes während des Simulationszeitraumes nicht durch die Randwerte am seeseitigen Rand bestimmt wird, wurden diese Randwerte konstant auf einem Wert von 0,0 g/l gesetzt.

Mit dem Oberwasser wurde für jede Schwebstofffraktion (Grob- und Mittelschluff) eine Konzentration von 0,02 g/l vorgegeben, so dass die gesamte Schwebstoffkonzentration des Oberwassers 0,04 g/l beträgt. Dies entspricht ungefähr der mittleren Schwebstoffkonzentration der Elbe in diesem Bereich.

Für den Geschiebetransport wurden keine „harten“ Randwerte vorgegeben, sondern ein Gleichgewichtszustand angenommen, d.h. entsprechend dem Systemverhalten kann das Geschiebe am offenen Modellrand das Gebiet verlassen bzw. eingetragen werden („Null-Gradienten-Randbedingung“).

10.3 Modellkalibrierung und –validierung⁴

Durch Vergleich in der Natur gemessener und im Modell berechneter Werte wird gezeigt, dass durch das Modell alle charakteristischen Systemeigenschaften des Elbeästuars naturähnlich nachgebildet werden. Der Nachweis der Naturähnlichkeit wird hinsichtlich der Wasserstandsdynamik für die gewässerkundlichen Pegel in der Außen- und Unterelbe und hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte für die Dauermessstationen des WSA Cuxhaven und des WSA Hamburg geführt. Zusätzlich können die Strömungsgeschwindigkeiten an den erwähnten (Kapitel 5.2) ADCP-Profilen kontrolliert werden. Die an diesen Positionen und Querschnitten gemessenen und berechneten Wasserstände, Strömungen und Salzgehalte wurden in einem Validierungsdokument zusammengestellt (BAW 2006a, Anhang 8). Auf eine gesonderte Wiedergabe in diesem Gutachten wird daher verzichtet.

Der Prozess der Kalibrierung und der Validierung der Ergebnisse des Sedimenttransportes ist deutlich komplexer und umfangreicher im Vergleich zu dem Vorgehen bei den hydrodynamischen Ergebnissen. Aufgrund der Heterogenität der Kornverteilungen des Sohlmaterials, der stark variierenden örtlichen Gegebenheiten, den damit direkt verbundenen unterschiedlichen Transporteigenschaften sowie den dynamischen Veränderungen des Systems in der Natur wie auch im Modell kann eine Validierung von Sedimenttransportergebnissen grundsätzlich nur unvollständig sein. Die zeitliche und räumliche Varianz des Sedimenttransportes ist wesentlich größer als z.B. die des Wasserstandes. Stimmen Modellergebnisse des Wasserstandes gut mit den an den Pegeln gemessenen Werten überein, so kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass das Modell auch an anderen Stellen im Modellgebiet die Wasserstände zuverlässig berechnet. Diese Übertragbarkeit ist aus den oben genannten Gründen bei dem Sedimenttransport nicht gegeben. Man muss daher von Anfang an Unschärfen und Unsicherheiten akzeptieren und diese bei der Modellierungsstrategie und bei der Beurteilung von Modellergebnissen berücksichtigen.

Neben den Unsicherheiten in den Eingangs- und Validierungsdaten gibt es weitere in der Modellbildung und der Simulation. Dabei ist die Sinkgeschwindigkeit der Suspension die wichtigste Eingangsgröße in Sedimenttransportmodellen. Die Sinkgeschwindigkeit wird zur Lösung der Transportgleichung für die Suspension benötigt. Sie hängt im Wesentlichen von der Größe, Dichte und Form der Schwebstoffe ab. In dem vorliegenden Gutachten wurde z.B. den als Suspension transportierten Sedimentfraktionen eine Sinkgeschwindigkeit zuge-

⁴ „Kalibrierung“ bezeichnet die Vorgehensweise beim Anpassen verschiedener Parameter eines numerischen Modells, um ein realitätsnahes Modellverhalten zu erzielen. Das ortsspezifische numerische Modell wird dabei noch bewusst verändert.

„Validierung“ wird der Nachweis genannt, dass die Ergebnisse eines numerischen Modells für einen gewissen Anwendungsbereich innerhalb eines bestimmten Genauigkeitsbereiches für die beabsichtigte Modellanwendung liegen. Das ortsspezifische numerische Modell wird dabei nicht verändert, der Nachweis ist umfassender (Datenmenge, hydrologische Situation, ...).

ordnet, die nach einem Ansatz von STOKES berechnet wurde⁵. Für groben Schluff ergibt sich eine Sinkgeschwindigkeit von ca. 2 mm/s. Für mittleren Schluff beträgt die Sinkgeschwindigkeit ca. 0,5 mm/s.

In Kapitel 5.2 wurde bereits erläutert, dass für den untersuchten Zeitraum keine Sedimentmessungen vorhanden sind. Dennoch konnte anhand früherer Untersuchungen und mittels einer bestimmten Interpretation der vorhandenen ADCP-Daten ein Bild von den Schwebstoffverhältnissen im Elbe-Ästuar skizziert werden, mit dem nun die Modellergebnisse verglichen werden können. Es ist sofort erkennbar (Bild 26), dass von dem Modell verschiedene bekannte Phänomene reproduziert werden können.

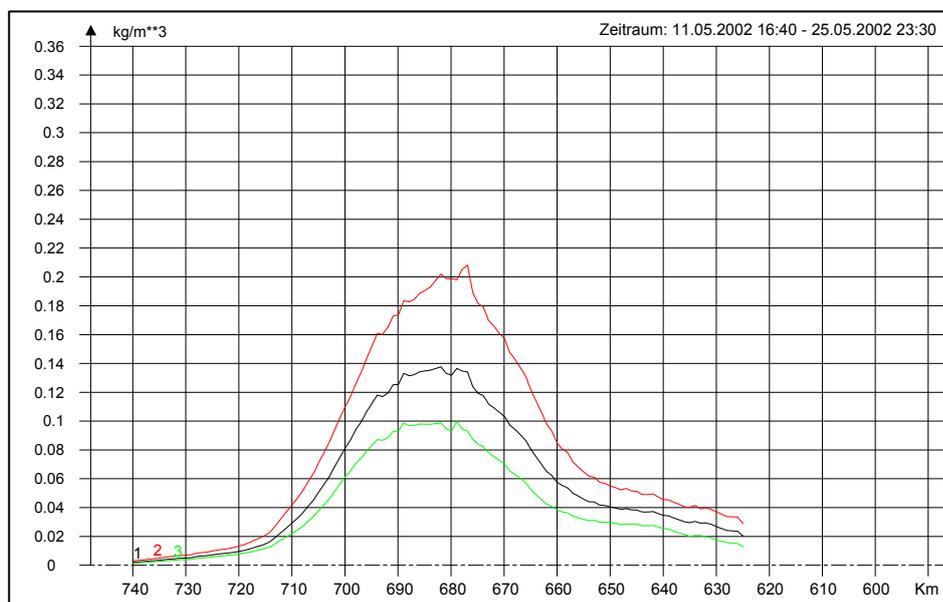


Bild 26: Querschnittsintegrierte mittlere Schwebstoffkonzentrationen im Validierungszeitraum in der Unter- und Außenelbe. In Rot das Maximum, in Grün das Minimum und in Schwarz der Mittelwert der mittleren Schwebstoffkonzentrationen.

Es existiert eine Trübungszone, die sowohl von ihrer Lage als auch hinsichtlich der berechneten Schwebstoffkonzentrationen mit dem in Kapitel 5.2 skizzierten Bild übereinstimmt. Das Maximum der Trübungszone liegt bei KM 680 mit querschnittsintegrierten mittleren Konzentrationen von ca. 0,14 g/l. Anhand synoptischer Darstellungen wird ersichtlich, dass dieser Mittelwert bei ausgeprägten Flut- und Ebbeströmungen in den unteren Bereichen der Wassersäule deutlich überschritten wird.

⁵ Spearman & Roberts (2002) verglichen die Wirkung verschiedener Ansätze und schlussfolgerten, dass keine Formulierung bevorzugt werden kann. Es gibt also keinen allgemein gültigen Ansatz. Sie empfahlen zunächst möglichst einfache Modellierungen mit wenigen in der Natur zu bestimmenden

Die seeseitige Flanke der Trübungszone weist einen steileren Gradienten auf als die stromauf gelegene Flanke. Auch dieses Bild stimmt prinzipiell mit dem überein, das die Messungen liefern (Bild 7). Die Messwerte liegen grundsätzlich höher als die in Bild 26 dargestellten Konzentrationen, da hier über den gesamten Querschnitt integriert wurde, also auch die flacheren Bereiche mit ihren geringeren Konzentrationen mit berücksichtigt wurden. Der Mittelwert, der aus den Messungen berechnet wurde, repräsentiert zwangsläufig nur die tieferen Bereiche, in denen schiffsgestützt gemessen werden konnte. In diesen Bereichen treten größere Konzentrationen auf, weswegen auch der Mittelwert größerer ist.

In Richtung Hamburg nehmen die mittleren Konzentrationen auf einen Wert um 0,04 g/l ab. Dieses Verhalten deckt sich mit den erwähnten Messungen des damaligen Amtes für Strom- und Hafenanbau, die Schwebstoffkonzentrationen von ca. 0,05 – 0,1 g/l für den Bereich Nienstedten aufweisen. Zeitreihen von Schwebstoffkonzentrationen im Bereich des Trübungsmaximums (hier nicht dargestellt) sind qualitativ mit den Messungen der GKSS zu vergleichen. Man kann dabei die Variation sowohl innerhalb eines Tidezyklus als auch mit dem Nipp-Spring-Zyklus erkennen. Insgesamt liegen die simulierten Werte etwas unterhalb den von der GKSS dokumentierten.

Die Ausführungen des vorliegenden Kapitels zeigen, dass diese eher deskriptiven Anhaltspunkte von dem Modell insgesamt zufrieden stellend erreicht werden. Auch die Verschlickungsvorgänge in Flachwassergebieten, strömungsberuhigten Zonen und Hafenbecken können mit den Modellergebnissen des suspendierten Transportes nachvollzogen werden. Hierzu sei auf die flächenhaften Darstellungen der Analysen für den PIZ im Anlageband verwiesen, die ein differenzierteres Bild von den modellierten Schwebstofftransportvorgängen im Elbeästuar zeigen, als es an dieser Stelle ausgeführt werden soll.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das verwendete Modell die erforderliche Naturähnlichkeit aufweist. Die hydrodynamischen Prozesse der Tidedynamik werden in der Tideelbe mit der erforderlichen Genauigkeit nachbildet. Die für eine morphologische Analyse erforderlichen Prozesse werden so naturähnlich wiedergegeben, wie es derzeit (auch im internationalen Vergleich) möglich ist. Mit der dargelegten Systematik der wasserbaulichen Systemanalyse und den eingesetzten Methoden können die Wirkungen der geplanten Fahrrinnenanpassung in der Tideelbe auf die Prozesse des Sedimenttransportes (Geschiebe und Suspension) und der Sohlevolution (Morphodynamik) prognostiziert werden.

10.4 Ergänzende Modellansätze

Wie oben bereits erwähnt wurde, gibt es neben den Unsicherheiten in den Eingangs- und Validierungsdaten weitere Unsicherheiten in der Modellbildung und der Simulation. Die Sinkgeschwindigkeit ist dabei einer der wichtigsten Eingangsgrößen, da sie die vertikale Bewe-

Parametern zu verwenden, solange keine ausreichenden Naturdaten zur Verfügung stehen, um das Modell zu verfeinern.

gung mitbestimmt und dadurch sowohl die Ausbreitung der Schwebstoffe beeinflusst als auch durch Sedimentation Schwebstoffe temporär dem Transport im Wasserkörper entzieht.

Die Sinkgeschwindigkeit der Suspension ist ein komplexes Thema, weil kohäsive Partikel dazu neigen, nach Zusammenstoßen Agglomerate (Flocken) zu bilden, wodurch auch ihre Sinkgeschwindigkeit beeinflusst wird. Es existieren verschiedene mathematische Formulierungen unterschiedlicher Komplexität zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeiten kohäsiver Schwebstoffe, die zum Teil sogar widersprüchlichen Charakters sind. Am häufigsten sind Formulierungen, die diese Effekte über eine Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit von der Schwebstoffkonzentration und turbulenten Größen parametrisieren.

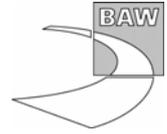
Aus diesem Grund wurden ergänzend zu den Modellergebnissen des fraktionierten Modells für den suspendierten Transport weitere Ansätze angewendet, die von konzentrationsabhängigen Sinkgeschwindigkeiten ausgehen. Zur Anwendung kamen

- eine konzentrations- und turbulenzabhängige Formulierung nach Malcherek (1995) und van Leussen (1994), die das Potenzgesetz und den absoluten Geschwindigkeitsgradienten verwendet.
- eine konzentrations- und turbulenzabhängige Formulierung nach Manning (2005), die einen empirischen Charakter hat, aber keine freien Parameter verwendet.

Bei Bedarf wird auf diese Modellläufe und deren Analysen zurückgegriffen, um eventuelle Unsicherheiten in den gutachterlichen Aussagen so zu reduzieren.

10.5 Von der Modellkalibrierung zur wasserbaulichen Systemanalyse

Die nach der Modellkalibrierung noch verbleibenden Abweichungen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen können im Wesentlichen auf nicht erfasste lokale Windeffekte, Abweichungen in der Modelltopographie aufgrund der zeitlichen Differenz zwischen Pegel- und Strömungsmessung, Peilung, Lageänderungen der Strömungsmessgeräte bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten, Ungenauigkeiten in der Pegel- und Strömungsmessung, etc. zurückgeführt werden. Diese Abweichungen zwischen Messung und Berechnung haben keine Auswirkungen auf die Prognosefähigkeit der verwendeten numerischen Modelle, da nicht die vollkommen exakte Nachbildung eines bestimmten hydrodynamischen Zustandes das wesentliche Ziel der vorliegenden Untersuchung ist, sondern die Bestimmung eines zuverlässigen mathematischen Ersatzsystems für alle relevanten physikalische Prozesse in der Natur. Mit diesem mathematischen Ersatzsystem werden alle Änderungen infolge der Fahrrinnenanpassung berechnet und analysiert. Die ausbaubedingten Änderungen der Kenngrößen werden durch die Gegenüberstellung von Vergleichszustand und Ausbauzustand ermittelt. Durch diese Relativbetrachtung wird die hohe „innere Genauigkeit“ der Modelle genutzt, indem unvermeidbare Fehlereinflüsse z.B. aus Peilfehlern, Messfehlern etc. weitgehend eliminiert bzw. minimiert werden, die in den untersuchten Vergleichs- und Ausbauzuständen vorhanden sind. Aus diesem Grund ist es fachlich zulässig, Änderungen der verschiedenen Kennwerte sehr detailliert auszuwerten.



10.6 Untersuchungsszenarien

Folgende Szenarien wurden untersucht:

1. Spring-Nipp-Zyklus Mai 2002 mit gemessenem Oberwasser, variablen Windfeldern und variablen Randwerten für den seeseitigen Salzgehalt.
2. Spring-Nipp-Zyklus Mai 2002 mit häufigstem Oberwasser ($350 \text{ m}^3/\text{s}$), ohne Wind und mit konstantem seeseitigem Salzgehalt (30 PSU).
3. Spring-Nipp-Zyklus Mai 2002 mit hohem Oberwasser ($1500 \text{ m}^3/\text{s}$), ohne Wind und mit konstantem seeseitigem Salzgehalt (30 PSU).

Lauf 1 diente der Validierung, aus den Läufen 2 und 3 werden die wesentlichen gutachterlichen Aussagen abgeleitet.

11 Analyse der Modellergebnisse

11.1 Hinweise zur Ergebnisdarstellung und -analyse

Da die Transportprozesse in einem Ästuar überwiegend dreidimensional geprägt sind, werden zur Vorbereitung der Ergebnisinterpretation die Berechnungsergebnisse der 3D-Modellierung analysiert. Auf Ergebnisse einer 2D-Modellierung mit Seegangswirkung wird nur dort eingegangen, wo die zusätzlichen seegangsinduzierten Effekte die ausbaubedingten Änderungen nennenswert beeinflussen. Die in den Untersuchungsergebnissen angegebenen Kenngrößen wurden, soweit nicht anders angegeben, für den Zeitraum 11. bis 25.05.2002 analysiert.

Um die ausbaubedingten Änderungen der charakteristischen Kenngrößen infolge der Fahrrinnenanpassung zu veranschaulichen, werden aus den Kenngrößen der Analysen des Ausbauzustandes (AZ) und des Vergleichszustandes (PIZ) für jedes Gitterelement Differenzen gebildet und flächenhaft für das Untersuchungsgebiet farblich kodiert dargestellt. Dies erfolgt über eine diskrete Farbskalierung, so dass eine Klasseneinteilung der Änderungen erfolgt. Zunahmen im Ausbauzustand werden mit positivem Vorzeichen und Abnahmen dementsprechend mit negativem Vorzeichen versehen. Ausbaubedingte Änderungen mit Absolutwerten außerhalb der gewählten Legende erhalten separat gewählte Farbkodierungen. Zur Orientierung werden in den Abbildungen die bestehenden Bauwerke als Linien dargestellt. Außerdem werden die Fahrrinne, der Deich, die MTHW-Linie und die Unterwasserablagerungsflächen kenntlich gemacht.

Die numerischen Simulationen bieten die Möglichkeit, auch kleine "Tendenzen" ausbaubedingter Änderungen zu erkennen. Dies erweitert das Systemverständnis und erleichtert die Ergebnisinterpretation und -bewertung. Im Gutachten werden nicht signifikante Änderungen als „tendenziell“ bezeichnet. Signifikante Änderungen werden i.d.R. mit (wenn auch möglicherweise nur langfristig messbaren) Ausbauwirkungen in Verbindung gebracht. Sie können in der Bewertung zwischen „schwachen“ und starken Ausbauwirkungen liegen. Tendenzielle Änderungen werden mit Untersuchungen im Felde kaum nachzuweisen sein. Auch wird eine Differenzierung der durch Messungen in der Natur ermittelten Änderungen eines Systemzustandes nach bestimmten Prozessen oder Ursachen nicht nachzuweisen sein.

Weitere Informationen zur Kennwertanalyse können den Internetseiten der BAW entnommen werden: <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/kenn/kenn-de1.html>

11.2 Hinweise zur Strukturierung der Ergebnisanalyse

Die zur Untersuchung der Sedimenttransporte und der Morphodynamik wesentlichen Kennwerte sind die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten, die morphodynamisch wirksamen Sohlschubspannungen, die Kenngrößen des Suspensionstransports, die Kenngrößen des Geschiebetransports und die Sohlevolution (auch als Tiefenerosion bezeichnet). Die ausbaubedingten Änderungsgrößen dieser Kennwerte müssen im unmittelbaren Zusammenhang mit den entsprechenden Kenngrößen im Vergleichszustand interpretiert werden.

In den nachfolgenden Kapiteln 11.3.1 bis 11.3.5 werden zunächst die wichtigsten morphodynamischen Kenngrößen für den Vergleichszustand und für die ausbaubedingten Änderungen der Reihe nach für das gesamte Elbeästuar dargestellt und beschrieben. Eine Interpretation der Ergebnisse erfolgt dabei in diesem ersten Schritt nur im Rahmen der einzelnen Kenngröße.

Im Kapitel 11.4 wird dann in einem zweiten Schritt eine zusammenfassende Darstellung der Ausbauwirkungen (unter Berücksichtigung der wichtigsten Kenngrößen und vor allem unter Berücksichtigung der bisher beobachteten morphologischen Änderungen) für die verschiedenen morphologischen Einheiten im Elbeästuar gegeben.

Mit diesen Grundlagen kann schließlich in einem dritten Schritt in Kapitel 12 eine Bewertung der ausbaubedingten Veränderungen unter Berücksichtigung der Betroffenheiten durchgeführt werden.

11.3 Prozessorientierte Analyse für wichtige Kennwerte

11.3.1 Strömungsgeschwindigkeiten

Für eine Analyse der Vorgänge zur Mobilisierung und zum Transport von Sedimenten sind die Kenngrößen der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten wichtig. Hierfür eignen sich insbesondere die über die simulierten Tiden gemittelten Maximalwerte in den einzelnen Flut- und Ebbestromphasen. Obwohl diese im Tidezyklus nur kurzzeitig auftreten geben sie dennoch wichtige Hinweise zur morphologischen Reaktion eines Gewässersystems, weil häufiger auftretende Maximalwerte der Strömungen die Erosion des Gewässerbodens bestimmen können und auch weil der Anstieg zu den maximalen Strömungswerten und der Abfall von diesen die Turbulenzproduktion im Gewässer maßgeblich beeinflussen. Aus diesen Gründen werden zunächst die maximalen Strömungsverhältnisse im Vergleichszustand und die ausbaubedingten Veränderungen der Strömungskennwerte im Detail vorgestellt. Zur komprimierten Darstellung der Ergebnisse werden die berechneten 3D-Strömungen als Mittelwert über die Wassertiefe in den zugehörigen Abbildungen dargestellt. Die Wirkung der dreidi-

mensionalen Strömungen auf die Erosion des Gewässerbodens kann noch differenzierter mit Hilfe der Analysen zur räumlichen Verteilung der Bodenschubspannungen dargestellt werden. Hierzu wird auf die Ausführungen im nachfolgenden Kapitel verwiesen.

Vergleichszustand (PIZ)

Die über den Analysezeitraum gemittelten Maximalwerte der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten sind in den tiefen Rinnen am größten. Hier kann die Bodenreibung der großen strömenden Wassermasse den geringsten Widerstand entgegen setzen. Differenziert betrachtet, kann sich das lokale Strömungsmaximum vor allem in den Kurven der Rinnen (auch zwischen zwei Kurvenabschnitten) außerhalb der Rinnenmitte oder ganz außerhalb der Fahrrinne befinden. Wo sich im Verlauf der Rinnen aufgrund der topographischen Umgebung und des im Tidezyklus wechselnden Wasserstandes Einschnürungen im Gewässerquerschnitt ergeben, wird die Strömung lokal beschleunigt.

siehe Anlage1
Bilder
70,72,74,76,78,
80,82,84,86,88

Entlang der gesamten Fahrrinne unterhalb des Hamburger Hafens wurden - bezogen auf die mittleren Verhältnisse des gewählten Analysezeitraumes – für die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten Werte zwischen 1,2 m/s und 1,6 m/s analysiert. Lokal ausgeprägt große Flutströmungen ergaben sich innerhalb der Fahrrinne für die folgenden Gewässerabschnitte: km 735 bis km 740 im Bereich der Kurve parallel zum Leitdamm Kugelbake, auf Höhe der Kugelbake bei km 730, stromauf und stromab vom Glameyer Stack (km 715 bis km 723) und bei Scheelenkuhlen km 685. Auch zwischen dem Pagensand und dem Schwarztonnensand sowie am Twieflether Sand sind lokal höhere Strömungen innerhalb der Fahrrinne analysiert worden. Des weiteren auf der Höhe von Mojenhörn bei km 647 sowie zwischen Nienstedten und Tinsdal.

Bild 70

Bild 72

Für die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten ergaben sich in der Fahrrinne (unterhalb des Hamburger Hafens) die folgende Verhältnisse: Entlang der gesamten Fahrrinne wurden Werte zwischen 0,8 m/s und nahezu 2,0 m/s analysiert, mit lokal ausgeprägten Strömungserhöhungen insbesondere an der Kugelbake. Im Vergleich zu den Flutströmungen ergaben sich hohe Werte insbesondere im Abschnitt zwischen dem Hadelner Außendeich bei km 710 und der Kurve am Leitdamm Kugelbake bei km 740. Gerade in diesem Abschnitt erreicht die Ebbestromung höhere Werte, weil der Ausstrom des Ebbestromvolumens der Tideelbe hier bei niedrigeren Wasserständen erfolgt, als dies beim Einstrom des Flutstromvolumens geschieht. Eine weitere lokal höher ausgeprägte Ebbestömung wurde am Elbehafen Brunsbüttel im nördlichen Böschungsbereich der Fahrrinne analysiert.

Bild 80

Bild 80

In der Medemrinne erreicht die maximale Ebbestromgeschwindigkeit Werte um 1,0 m/s bis 1,4 m/s, wobei die hohen Werte im Scheitel der Kurve auftreten und hier fortgesetzte Erosionen induzieren, die eine fortschreitende Verlagerung der westlichen Medemrinne nach Norden bewirken. Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten sind in der Medemrinne um ca. 0,2 m/s kleiner als die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten. Dadurch ist bei Flutstrom auch das Erosionspotenzial im Scheitel der Kurve geringer.

Bild 80

Die maximalen Flutströmungen sind im Klotzenloch und in den weiter nördlich gelegenen Rinnen denen der Medemrinne ähnlich. Bei den maximalen Ebbeströmungen ist diese Ähnlichkeit nicht gegeben, weil die Prielwurzelgebiete geringere Strömungen aufweisen. Die Medemrinne ist somit in Abweichung zu den nördlich gelegenen Watrinnen überwiegend eine ebbestromdominante Rinne.

Morphodynamische Analysen für ausbaubedingte Änderungen der Verhältnisse in der Tideelbe müssen vor allem auch auf die Nebanelben fokussiert werden. Diese sind auf der Elbseite von Schleswig-Holstein die Glückstädter Nebanelbe, die Pagensander Nebanelbe (stromauf über das Steinloch mit der Hauptrinne verbunden) und die Haseldorfer Binnenelbe (stromauf über das Dwar sloch mit der Hauptrinne verbunden). Auf der Elbseite Niedersachsens sind es die Nebanelbe zwischen Schwarztonnensand und Asseler Sand, die Lühesander Süderelbe und die Hahnöfer Nebanelbe mit ihrer Verbindung zum Mühlenberger Loch. Zur Einschätzung des Vergleichszustandes werden die maximalen Strömungen dieser Nebanelben klassifiziert und bieten damit eine Vergleichsgrundlage, weil die Durchströmbarkeit einer Nebanelbe ein wichtiges Beurteilungskriterium darstellt:

- Glückstädter Nebanelbe – max. Flutstrom bis über 1,0 m/s, gleichmäßige Durchströmung (keine ausgeprägte Sedimentation im oberen Abschnitt), max. Ebbestrom von gleicher Größenordnung (jedoch um etwa 10% geringer) mehr auf tiefere Profillagen konzentriert.
- Nebanelbe am Schwarztonnensand – max. Flutstrom nur in einzelnen eingeschnürten Abschnitten hoch, in anderen Abschnitten nur bis 0,6 m/s bzw. 0,4 m/s (im oberen Abschnitt Sedimentablagerungen vor Einmündung in die Hauptrinne), max. Ebbestrom geringer als max. Flutstrom.
- Pagensander Nebanelbe – max. Flutstrom im unteren Mündungstrichter partiell über 1,0 m/s, weiter stromauf abnehmend, durch Einschnürung im Steinloch wieder lokale Strömungszunahme, ebenso lokale

Bild 70, 80

Bild 72, 82

Bild 72, 82

Strömungszunahme im Übergang zur Haseldorfer Binnenelbe, max. Ebbestrom ca. 20 % geringer als max. Flutstrom, bei Ebbestrom geringerer Durchfluss durch das Steinloch.

- Haseldorfer Binnenelbe - max. Flutstrom im oberen Abschnitt bis 0,8 m/s, max. Ebbestrom bis 0,6 m/s.
- Lühesander Süderelbe – max. Flutstrom bis 0,8 m/s in Einschnürungsbereichen auch etwas größer, max. Ebbestrom geringer, insbesondere im Einstrombereich des Ebbestroms.
- Hahnöfer Nebenelbe – max. Flutstrom 0,8 m/s durchgängig bis auf Höhe des Estefahrwassers (lokal auch bis zu 1,4 m/s). Weil diese Nebenelbe ca. 10 km lang ist, somit die in der tieferen Fahrrinne schneller voranschreitende Tidewelle für den frühzeitigen Einstrom von Tidewassermenge in das Mühlenberger Loch aus der Hauptrinne heraus sorgt, trifft der Flutstrom aus der Nebenelbe im Übergang zum Mühlenberger Loch auf eine vermindertes Wasserspiegelgefälle. Die resultierende Strömungskonvergenz führt somit zur Sedimentation im Mühlenberger Loch. Der max. Ebbestrom ist im Vergleich zum max. Flutstrom vom Mühlenberger Loch bis zum Hahnöfer Sand überwiegend stark reduziert, hervorgerufen durch eine lange Ebbestromdauer und den Ausstrom von Tidewassermengen aus dem Mühlenberger Loch in die Hauptrinne.

Bild 74, 84

Bild 74, 84

Mit Ausnahme der Glückstädter Nebenelbe sind somit alle anderen Nebenelben flutstromdominante Teilsysteme, die aufgrund der natürlichen Asymmetrie der Tide zu natürlichen Sedimentationen neigen.

Ausbauzustand

Der Ausbauzustand - bestehend aus der Anpassung der Fahrrinnenrassen, als Strombauwerke erosionsstabil eingebrachte Unterwasserablagerungsflächen in der Medemrinne und am Neufelder Sand und sonstigen Ablagerungsflächen (siehe Gutachten zur Tidedynamik, BAW 2006 a) - führt zu Änderungen der maximalen Strömungen.

siehe Anlage 1

Bilder

71,73,75,77,79

81,83,85,87,89

Die maximale Flutstromgeschwindigkeit nimmt in der Fahrrinne in folgenden Abschnitten zu: von km 710 bis km 730 um 0 cm/s bis maximal +15 cm/s. Eine weitere Strömungszunahme erfolgt parallel zur UWA Neufeld zwischen km 698 und km 708 mit maximal +10 cm/s. Die Strömungszunahmen oberhalb Glameyer Stack und am Neufelder Sand reichen über die Fahrrinnenbreite insbesondere noch Norden hinaus. Weitere lokale Zunahmen von maximal +8 cm/s der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten ergeben sich in der Kurve bei Scheelenkuhlen in einem Abschnitt von ca. 5 km. Geringere Zunahmen sind stromab Nordspitze Rhinplate, nörd-

Bild 71

lich Schwarztonnensand bis Mitte Pagensand zwischen km 660 und km 671, zwischen Schwingemündung und dem Anleger Bützfleth (km 645 bis km 658) sowie parallel zum südlichen Teil des Lühesandes zu erwarten.

Bild 73

Abnahmen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in der Fahrrinne werden lokal am Elbehafen Brunsbüttel (am Warteplatz) eintreten. Oberhalb Lühesand nehmen die maximalen Flutströmungen insbesondere in der Begegnungsstrecke um bis zu -12 cm/s ab. Weiter Abnahmen finden sich im Abschnitt bei Nienstedten (max. -7 cm/s) und größere Abnahmen vor allem im Köhlbrandbogen (max. -10 cm/s), unterhalb Hohe Schaar (max. -20 cm/s) sowie in der Zufahrt zu den Hafengebieten an der Nordeelbe (max. -12 cm/s).

Bild 75

Bild 71

Bild 75

Bild 77

Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit nimmt in der Fahrrinne in folgenden Abschnitten zu: geringfügig von der Kugelbake bis zur seewärts beginnenden Fahrrinnenkurve (+6 cm/s), mit größeren Erhöhungen bis +18 cm/s im Altenbrucher Bogen zwischen km 710 und km 726, weiter stromauf an den Osteriffstacks (bis zu +15 cm/s), lokal stromauf und stromab von Scheelenkuhlen und lokal am nordöstlichen Fahrrinnenrand bei Steindeich.

Bild 81

Abnahmen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit in der Fahrrinne werden lokal am Elbehafen Brunsbüttel (am Warteplatz) eintreten. Stromauf vom Schwarztonnensand sind die Änderungen der maximalen Ebbeströmungen zunächst sehr gering: an der Südspitze von Pagensand und auch vom Twielenflether Sand bis Lühesand sind lokale Abnahme von maximal -5 cm/s zu erwarten. Von der Südspitze Lühesand bis in den Hamburger Hafen nehmen die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten mit räumlich variierenden Werten (bis -10 cm/s) ab.

Bild 81

Bild 83

Auf der Unterwasserablagerungsfläche im Ostteil der Medemrinne nimmt die maximale Ebbestromgeschwindigkeit um +20 cm/s (lokal bis zu ca. +30 cm/s) zu, weil das Strombauwerk den Rinnenquerschnitt verkleinert. Diese Einschnürung vermindert den Durchflussquerschnitt bei Flutstrom etwas geringer als bei Ebbestrom. Folglich ist die Abnahme des maximalen Ebbestroms im Westteil der Medemrinne auch größer als die Abnahme des maximalen Flutstroms. Bis zum Scheitel der Medemrinnenkurve ergibt sich eine Abnahme der maximalen Strömungen um bis zu -25 cm/s bei Ebbestrom. Die Abnahme des maximalen Flutstroms beträgt hier nur ca. -10 cm/s.

Bild 81

Bild 81

Über dem Strombauwerk „Unterwasserablagerungsfläche Neufelder



Sand“ sind die Verhältnisse umgekehrt. Da diese am Rande des Gewässerquerschnitts eingebaut wird, kommt es zu einer Abnahme der Strömungen über dem Strombauwerk und zu einer Zunahme in der tiefen Fahrrinne, wobei direkt über dem Strombauwerk die Abnahme bei Flutstrom größer ist als bei Ebbestrom.

Die gemeinsame Wirkung beider Strombauwerke führt nördlich der Fahrrinne zwischen Scheelenkuhlen und der Medemrinnenmündung-Ost nahezu durchgängig zur Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten (ausgenommen natürlich im Einschnürungsbereich der Medemrinne).

Bild 81

Dieser Sachverhalt ist auch im Zusammenhang mit den Erosionen zu bewerten, die sich in den vergangenen Jahren in diesem Gebiet eingestellt haben. Diese führten – bezogen auf den Gesamtquerschnitt der Elbe - von St. Margarethen bis über Brunsbüttel hinaus zu erheblichen Sedimentverlusten. Auch am Medemsand waren die Sedimentverluste größer als die Sedimentationen an den nördlichen Rinnenflanken des Medemgrundes. Weitere empfindliche Sedimentverluste in Form einer flächenhaften Erosion waren in der mittel- bis langfristigen Rückschau im Gebiet zwischen dem Gelbsand, dem Luechter Loch und der südlich davon gelegenen Fahrrinne zu verzeichnen. In diesem Gebiet wird es ausbaubedingt kaum zu Veränderungen der Strömungen kommen, es sind nur lokale Abnahmen der Strömungen nördlich der Fahrinnenkurve am Leitdamm Kugelbake zu erwarten.

Bild

Für die Nebenelben ergeben sich folgende ausbaubedingte Veränderungen der maximalen Strömungsgrößen:

- Glückstädter Nebenelbe – keine nennenswerten Änderungen
- Nebenelbe am Schwarztonnensand – keine nennenswerten Änderungen
- Pagensander Nebenelbe – lokale Abnahme des max. Flutstroms nördlich der Krückaumündung und lokale Zunahme des max. Ebbestroms südlich der Krückaumündung. Sonst keine nennenswerten Änderungen.
- Haseldorfer Binnenelbe – keine nennenswerten Änderungen
- Lühesander Süderelbe – keine nennenswerten Änderungen
- Hahnöfer Nebenelbe – Abnahme des max. Flutstroms im Mühlenberger Loch und stromauf vom Hahnöfer Sand bis -8 cm/s. Abnahme des max. Ebbestroms nur in der Nebenelbe, nicht im Mühlenberger Loch.

Bild 83

Bild 83

Bild 85

Bild 85

11.3.2 Morphologisch wirksame Bodenschubspannungen

Analysen zur Verteilung der morphologisch effektiven (strömungswirksamen) Bodenschubspannungen werden für den Vergleichszustand und für die ausbaubedingten Änderungen im Ausbauzustand als Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung und als Maximalwert für den Analysezeitraum durchgeführt. Damit werden die Nipp- und Springtideverhältnisse in die Auswertung einbezogen. Die effektive Bodenschubspannung wird in Abhängigkeit von der Kornrauheit des Bodens und vom Quadrat der bodennahen Strömungsgeschwindigkeit in der Einheit $[N/m^2]$ berechnet.

Vergleichszustand

Der über den gesamten Analysezeitraum berechnete Mittelwert der effektiven Bodenschubspannung zeigt in der generellen Übersicht im Untersuchungsgebiet die folgende Verteilung:

- In den trockenen fallenden Wattgebieten wird der Wert von $0,4 N/m^2$ nicht überschritten.
- In den tiefen Rinnen finden sich überwiegend Werte bis zu $0,8 N/m^2$.

siehe Anlage 1
Bilder
138,140,142,144,
146

Größere Werte von $0,9 N/m^2$ bis zu $1,1 N/m^2$ finden sich in lokal begrenzten Gebieten innerhalb der Fahrrinne oder in direkter Nachbarschaft zur Fahrrinne. Diese lokalen Erscheinungen stimmen einerseits mit der Verteilung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten überein. Andererseits finden sich weitere Gebiete, in denen die effektive Bodenschubspannung hoch ist, obwohl die vertikal gemittelten maximalen Strömungen dies zunächst nicht vermuten lassen. Dieser Sachverhalt ist zurückzuführen auf die (in die Berechnung der Bodenschubspannung eingehende) dreidimensionale Strömungsverteilung, in der die horizontalen Gradienten realistische Werte zeigen, von denen die Gradienten der vertikal gemittelten dreidimensionalen Strömungen aber abweichen können. Zu den Gebieten hoher Bodenschubspannung ohne gleichzeitiges Auftreten hoher über die Wassertiefe gemittelter Maximalströmungen gehören: der nördlich der Fahrrinne an der Ostemündung gelegene Abschnitt, der Abschnitt zwischen Rhinplate-Süd und Fahrrinne, der Abschnitt zwischen Pagensand-Süd und Fahrrinne und der Abschnitt zwischen Fahrrinne und Hanskalbsand.

Bild 138
Bild 140
Bild 142

Der größte im Untersuchungsgebiet auftretende Mittelwert der effektiven Bodenschubspannung befindet sich mit ca. $1,6 N/m^2$ lokal ausgeprägt zwischen Kugelbake und Fahrrinne.

Um die angesprochene Verteilung der Mittelwerte hinsichtlich der Streuung der berechneten Werte realistisch einschätzen zu können, wird in

siehe Anlage 1
Bilder
148,150,152,154,
156

weitere Abbildungen die Standardabweichung der effektiven Bodenschubspannungen dargestellt. Maximalwerte der Standardabweichung werden an der Kugelbake und seewärts der Kugelbake (hier westlich neben der Fahrrinne), lokal in der Fahrrinne bei km 730, km 720, am Glameyer Stack und bei km 710, zwischen Fahrrinne und dem Ufer bei Brokdorf sowie südlich der Fahrrinne am Hanskalbsand und am Neßsand erreicht. In diesen lokal ausgeprägten Bereichen erreicht die Standardabweichung Werte bis zu $0,8 \text{ N/m}^2$.

Bild 148

Die Verteilung der maximalen Bodenschubspannungen ist im gesamten Untersuchungsgebiet überwiegend in Richtung des Flutstroms ausgerichtet. Dies ist bei der Interpretation der ausbauinduzierten Veränderungen zu beachten.

siehe Anlage 1
Bilder
128,130,132,134,
136

Ausbauzustand

Nach der Anpassung der Fahrrinne von Außen- und Unterelbe werden die mittleren effektiven Bodenschubspannungen um maximal $0,2$ bis $0,3 \text{ N/m}^2$ zunehmen. Zunahmen bis zu $0,3 \text{ N/m}^2$ ergeben sich über dem Strombauwerk in der Medemrinne und in der Fahrrinne im Altenbrucher Bogen zwischen km 711 und km 730, wobei im Altenbrucher Bogen der Flächenanteil mit Zunahmen größer $0,2 \text{ N/m}^2$ kleiner 10% beträgt. Zu beachten ist, dass die Zunahmen oberhalb Glameyer Stack (Abschnitt von ca. 5 km) weiter über den Fahrrinnenrand hinaus in Richtung Niedersächsisches Ufer reichen. Aus diesem Sachverhalt ist zu folgern, dass an der Unterwasserböschung Erosionstendenzen nach dem Ausbau verstärkt und Sedimentationstendenzen herab gesetzt werden.

siehe Anlage 1
Bilder
139, 141,143,145,
147

Bild 139

Zunahmen der effektiven Bodenschubspannung im Abschnitt des Strombauwerks am Neufelder Sand sind insbesondere nördlich der Fahrrinne zu verzeichnen. An den drei Unterwasserablagerungsflächen im Bogen stromab der Störmündung und an der Unterwasserablagerungsfläche Eschschallen sind ebenfalls lokale Zunahmen hervorzuheben. Weitere Zunahmen ergeben sich in der Fahrrinne zwischen Schwarztonnensand-Nord und Pagensand-Mitte sowie in der Fahrrinne des Lühebogens. Oberhalb des Lühebogens überwiegen die Abnahmen der mittleren effektiven Bodenschubspannung.

Bild 139

Bild 139

Bild 141

Eine Analyse der maximalen effektiven Bodenschubspannungen liefert das gleiche Verteilungsmuster für die Zunahmen und Abnahmen. Es ist jedoch hervorzuheben, dass die Zunahmen im Altenbrucher Bogen (nur lokal insbesondere in Grobsand-Abschnitten ausgeprägt) bis zu $0,8 \text{ N/m}^2$

Bilder
129,131,133,135,
137

betragen. Dies sind die maximalen Änderungen, die nur einmal im simulierten Spring-Nipp-Zyklus der Tide auftreten.

11.3.3 Geschiebetransport

Durch die von den Flut- und Ebbeströmungen auf die Gewässersohle übertragenen effektiven Bodenschubspannungen wird ein sohnaher Transport von Sedimenten (Geschiebe) induziert. Als kennzeichnende Transportgröße für die im Mittel über eine Tideperiode verfrachtete Sedimentmasse je Breitereinheit wird die mittlere volumetrische Ebbe- bzw. Flutstrom-Geschiebefracht [m^3/m] verwendet. Die Differenz aus Flut- und Ebbestrom-Geschiebefracht wird als residueller Transport (oder Netto-Transport) bezeichnet. Mit zuletzt genannter Kenngröße lassen sich nach Richtung und Intensität ausgeprägte Transportbänder veranschaulichen, die über viele Tiden gemittelt die Morphodynamik prägen.

Vergleichszustand

Die Analyse der mittleren Geschiebefrachten in Kilogramm bzw. (als Volumenstrom) als m^3 pro Meter Breite der Elbe zeigt zunächst einmal wo überhaupt Geschiebe vorhanden ist und wo es von den Normaltiden bewegt werden kann. Der Geschiebetransport konzentriert sich vor allem auf die Fahrinne und die angrenzenden Böschungsbereiche. In der Außenelbe ist der Geschiebetransport mit geringerer Intensität (im Vergleich zur Fahrinne) auch in den unteren Abschnitten der großen Wattströme und Rinnen zu erkennen. Hier weist die mittlere Flutstrom-Geschiebefracht Größenordnungen von $0,04 \text{ m}^3/\text{m}$ auf. Diese Werte gelten für den Flutstrom auch im Ostteil der Medemrinne, während der Flutstrom im Westteil weniger Geschiebe transportiert. Deshalb ist die mittlere Geschiebefracht mit dem Ebbestrom in der Medemrinne insbesondere im westlichen Rinnenabschnitt weitaus größer und erreicht hier Werte bis zu $0,08 \text{ m}^3/\text{m}$ (umgerechnet in einen Massenstrom entspricht dieser Wert ca. $200 \text{ kg}/\text{m}$).

siehe Anlage 1
Bilder
158,160,162,164,
166

Bild 158

In der Fahrinne und in den angrenzenden lokalen Bereichen werden hingegen Geschiebefrachten bis zu $0,3 \text{ m}^3/\text{m}$ erreicht. Charakteristisch ist aber, dass der mittlere Geschiebetransport mit dem Flutstrom keine durchgängigen Transportbänder in der Elbe aufweist, sondern sehr variabel auf die lokalen Verteilungen der effektiven Sohlschubspannungen und vor allem auf die naturähnlich berücksichtigte (differenzierte) Sedimentverteilung reagiert.

Die mittleren Geschiebefrachten mit dem Ebbestrom zeigen hingegen durchgängigere Transportbänder, insbesondere von der Südspitze der

Bilder

Rhinplate bei km 670 bis zur oberen Einmündung in die Medemrinne bei km 710. Ausgeprägt sind die Transportbänder unterhalb des Elbehafens Brunsbüttel vor allem auch neben der tiefen Fahrrinne. Mit den Sedimenten dieser Transportbänder wird der Sedimenthaushalt im Gebiet Medemsand / Medemgrund beeinflusst. Ein weiteres intensives Transportband verläuft von der Wurzel des Leitdamms Kugelbake entlang der südwestlichen Fahrrinnenböschung und führt dort zur Erosion.

168,170, 172,174,
176

Bild 168

Ausbauzustand

Die für den mittleren Geschiebetransport des Ebbestroms im Vergleichszustand dargestellten Transportbänder zwischen Rhinplate und Medemsand werden durch die Strombaumaßnahmen (in der Medemrinne und am Neufelder Sand) um ca. 15% abgeschwächt. Im Altenbrucher Bogen (km 710 bis km 730) wird hingegen die Dynamik der Geschiebetransporte intensiviert. Dies gilt für beide Transportrichtungen, wobei die Zunahmen mit dem Ebbestrom (lokal bis zu 30 %) in tiefen Fahrrinnenabschnitten stromab von Glameyer Stack überwiegen. Hierdurch wird es zu verstärkten Unterhaltungsbaggerungen im Abschnitt bei km 730 kommen. Möglicherweise ist es richtig, das grobkörnigere Baggergut dem Strom bei km 710 wieder zurückzugeben. Hierzu ist eine Beobachtung des Systemverhaltens nach dem Ausbau erforderlich.

siehe Anlage 1
Bilder
159, 161,163,165,
167 und
169, 171,173,175,
177

Bild 169

Das Modell berechnet auch einen Geschiebetransport für die Strombauwerke in der Medemrinne und am Neufelder Sand. Hier wurde für die Simulationen bewusst kein grobes Abdeckmaterial (das nicht erodieren kann) vorgegeben, wie es für die Ausführung der Strombauwerke zu empfehlen ist. Es wurde im Ausbauzustand das Sohlmaterial wie im Vergleichszustand vorgegeben, um die Wirkungen der ausbaubedingten Strömungserhöhungen auf die natürliche Kornverteilung und damit auf den möglichen Geschiebetransport zu studieren. Das Simulationsergebnis zeigt, dass die Zunahme des Geschiebetriebs über der UWA Medemrinne nicht größer wäre, als die Zunahme in der Fahrrinne.

Bild 159 und 169

In der Fahrrinne am Osteriff wird der Geschiebetransport ausbaubedingt vornehmlich mit dem Ebbestrom intensiviert (bis zu ca. 15%). Diese Wirkung wurde durch das Design der Strombauwerke bewusst angestrebt, um die Unterhaltungskosten am Osteriff zu verringern. Hier haben sich bisher im mehrjährigen Mittel ca. 15 bis 20 % der Gesamtbaggermengen der Tideelbe (Bundesstrecke) ergeben.

Bild 169

Im Störbogen von St. Margarethen bis zur Rhinplate wird der Geschiebe-



transport ausbaubedingt stärker mit dem Flutstrom als mit dem Ebbestrom intensiviert. Mit dieser Veränderung kann möglichen Geschiebedefiziten in diesem Abschnitt der Tideelbe entgegen gewirkt werden.

Bild 159 und 169

Von Steindeich weiter Stromauf ist die Analyse der Netto-Geschiebetransporte von Bedeutung, die im Mittel mit jeder Tide entweder stromauf oder stromab gerichtet sein können. Bis zum Lühesand und vom Lühesand weiter bis zum Hanskalbsand nehmen die stromauf gerichteten Netto-Transporte ausbaubedingt überwiegend (lokal sind auch wenige Abnahmen zu verzeichnen) um bis zu 10% zu.

Bilder
179, 181, 183, 185,
187
Bild 181

In der Begegnungsstrecke und direkt am Hanskalbsand kehren sich die Verhältnisse um, weil die Netto-Transporte hier stromab gerichtet sind. Nach Realisierung der Anpassungsmaßnahme ist deshalb mit Unterhaltungsbaggerungen parallel zum Hanskalbsand zu rechnen. Am stromaufwärtigen Ende der Begegnungsstrecke bei km 635 ist aufgrund einer geringfügigen Einschnürung der Fahrrinne wieder mit einem Netto-Transport nach stromauf zu rechnen. Im Köhlbrand und in der Norderelbe (Hafenzufahrt) ist die ausbaubedingte Änderung des Netto-Transports gering, in einigen Bereichen überwiegend stromab gerichtet.

Bild 185

Bild 185

Bild 185

Bild 187

Insgesamt sind die ausbauinduzierten Veränderungen der sohnahen Geschiebefracht bezogen auf die transportierten Mengen verhältnismäßig gering, weil beispielsweise ein 400 m breites Netto-Transportband mit einer ausbaubedingten Zunahme von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}$ einen zusätzlichen Transport von 8 m^3 mit jeder Tide bewirkt. Diese Werte sind klein im Vergleich zu den Mengen des Suspensionstransports.

Hinweis: Die berechneten Mengen hängen von der gewählten Transportformel für die Geschiebefrachten ab. Sie geben nur einen Anhalt, weil alle Geschiebetransportformeln die Prozesse in der Natur nur annähernd beschreiben können.

11.3.4 Suspensionstransport

Die Suspensionskonzentrationen der Tideelbe stellen sich in Abhängigkeit der antreibenden hydrodynamischen Kräfte und der Sedimenteigenschaften der Gewässersohle ein. Wichtige Kenngrößen sind die über den Analysezeitraum gemittelten (tiefenintegrierten) Suspensionskonzentrationen und der advective (von der Strömung gesteuerte) Transport, der im Wasser suspendierten Sedimente. Die Kenngrößen für den Suspensionstransport beschreiben die im Mittel über die Flut- bzw. Ebbestromdauer von der Strömung transportierten suspendierten Sedimentmassen je Breitereinheit mit der Einheit [kg/m] bzw. die sich daraus ergebende Differenz des Flut- und Ebbetransports als Netto-Suspensionstransport.

Wenn die durch einen Gewässerquerschnitt strömende Wassermenge während der Flut- bzw. der Ebbestromphase sehr groß ist, kann auch die mit dem Wasser in Suspension transportierte Sedimentmenge groß sein. Mit Hilfe einer Berechnung der suspendierten Transporte durch Kontrollquerschnitte in der Tideelbe oder in den Abzweigungen zu den Nebengewässern kann eine Bilanzierung der mit der Strömung verfrachteten suspendierten Massen ermöglicht werden. Damit können für einzelne Gewässerabschnitte integrale Werte im Sinne der Betrachtung des Sedimenthaushalts besser analysiert werden.

Vergleichszustand

Die Analyse der mittleren Suspensionskonzentrationen zeigt, dass das Modell den Kern der Trübungszone zwischen der Störmündung und der Rhinplate naturähnlich erfasst. Die vertikal über die gesamte Wassertiefe gemittelte mittlere Suspensionskonzentration beträgt hier mehr als 200 mg/l (maximal treten in der Simulation über 320 mg/l auf). Stromab bis zum Osteriff nimmt die mittlere Konzentration auf unter 50 mg/l ab. Mit den Abnahmen der mittleren Suspensionskonzentration nach stromauf ergibt sich in der Simulation auf Höhe des Mühlenberger Lochs ein Wert von unter 50 mg/l.

siehe Anlage 1
Bilder
198,200,202,204,
206

Bild 198

Bild 202

Die mittlere Variation der Suspensionskonzentration zeigt ähnliche Werte und räumliche Verteilungen wie die mittleren Konzentrationen, wobei die Abnahmen nach stromauf stärker sind (die Variation sinkt bereits am Twielenflether Sand auf unter 50 mg/l) als die mittleren Konzentrationen. Somit ergeben sich über den simulierten Zeitraum gemittelte maximale Konzentrationen von über 200 mg/l zwischen der Einfahrt zum NOK und Steindeich bei km 670, also entlang einer Strecke von ca. 25 km. Hohe Konzentrationen können im Tidezyklus stromauf und stromab folglich über viele Kilometer transportiert werden.

Bilder
208,210,212,214,
216

Bild 210

Bild 208

Ein besonderes Augenmerk ist in den Ästuaren auf die Transportmengen der suspendierten Sedimente zu richten. Das im Ästuar vorhandene be-

Bilder
218,220,222,224,

wegliche Sedimentdepot und die auf dieses wirkenden Strömungsgeschwindigkeiten (überlagert mit den Sinkgeschwindigkeiten der im Wasserkörper suspendierten Sedimente) bestimmen die Größenordnungen der advektiven Transporte im Vergleichszustand. Die höchsten advektiven Transportmengen treten in der Kern-Trübungszone auf. Hier betragen die Werte im Störbogen zwischen St. Margarethen und der Rhinplate bis zu 60.000 kg/m, lokal sogar bis zu 70.000 kg/m. In der Außenelbe bis zum Glameyer Stack sind die Werte hingegen um den Faktor 20 geringer. An der Ostemündung erreichen die Werte maximal 8.000 kg/m. Stromauf der Kern-Trübungszone bis nach Steindeich werden Werte von über 40.000 kg/m erreicht, die sich weiter stromauf entlang Pagensand auf ca. 30.000 kg/m und bis zur Schwingemündung auf ca. 25.000 kg/m verringern. Am Lühesand liegen die Werte noch bei ca. 20.000 kg/m.

226 und
228,230,232,234,
236

Die advektiven Netto-Transporte weisen oberhalb der Rhinplate überwiegend in eine stromaufwärts zeigende Richtung. Die Werte der flutstromorientierten Netto-Transporte in der tiefen Fahrrinne betragen an der Rhinplate 15.000 bis 18.000 kg/m, am Steindeich lokal bis zu 10.000 kg/m und auf Höhe Pagensand bis maximal ca. 6.000 kg/m. 3.000 kg/m betragen die Werte noch beim Lühesand und sie setzen sich auf diesem Niveau bis in den Zufahrtbereich des Hamburger Hafens fort. Der Vergleichszustand (mit einem Oberwasserzufluss von 350 m³/s) ist somit durch eine Kaskade stromaufwärts gerichteter Netto-Transporte suspendierter Sedimente zwischen der Rhinplate und dem Hamburger Hafen gekennzeichnet, die sich aus den umfangreichen feinen Sedimenten der Kern-Trübungszone nährt.

Bilder
238,240,242,244,
246

Bild 238

Bild 242

Bild 244

Ausbauzustand

Durch die Anpassung der Fahrrinne werden sich die Konzentrationen der suspendierten Sedimente wie folgt verändern:

siehe Anlage 1

- Schwache Zunahmen der maximalen Suspensionskonzentrationen (+3 bis +5 mg/l) in der Fahrrinne zwischen dem Warteplatz Brunsbüttel und dem Kugelbakenleitdamm.
- Deutliche Abnahmen der maximalen Suspensionskonzentrationen (-3 bis -15 mg/l) nördlich der Fahrrinne zwischen Nordspitze Rhinplate, weiter durch den Störbogen bis in die Medemrinne.
- Signifikante Zunahmen der maximalen Suspensionskonzentrationen (bis ca. +10 mg/l) zwischen Südspitze Rhinplate bis etwa zum Dwarsloch.
- Vom Dwarsloch bis zur Ostspitze Lühesand nur noch schwache Zunahmen der maximalen Suspensionskonzentrationen.

Bild 189

Bild 189

Bild 189 und 191

Bild 191 und 193

- Von der Lühemündung nach stromauf signifikante Abnahmen der maximalen Suspensionskonzentrationen bis in die Norderelbe und den Köhlbrandbogen.

Bild 193 und 195

In den Nebanelben verhalten sich die ausbaubedingten Veränderungen der maximalen Suspensionskonzentrationen wie folgt:

- Schwache Zunahmen in der Glückstädter Nebanelbe; Bild 189
- Signifikante Zunahmen in der Nebanelbe am Schwarztonnensand, der Pagensander Nebanelbe und der Haseldorfer Binnenelbe; Bild 191
- Schwache Zunahmen in der Lühesander Süderelbe; Bild 193
- Signifikante Zunahmen im Ostabschnitt der Hahnöfer Nebanelbe und im Mühlenberger Loch (südlich DA Erweiterung), schwache Abnahmen im Westabschnitt der Hahnöfer Nebanelbe. Bild 193

Ein ähnliches Bild ergibt sich (mit geringeren ausbaubedingten Zunahmen) für die mittleren Suspensionskonzentrationen.

Bilder
199,201,203,205,
207

In der Hahnöfer Nebanelbe ergeben sich für die mittleren Suspensionskonzentrationen jedoch keine nennenswerten Zunahmen, sondern nur tendenzielle Abnahmen. Insbesondere die ausbaubedingten Änderungen der Variation der Suspensionskonzentrationen sind mit den Änderungen der maximalen Werte vergleichbar.

Bild 203

Erhöhte Suspensionskonzentrationen führen bei gleichzeitig zunehmenden Durchflussmengen zu größeren Transportmengen suspendierter Sedimente. Dies erkennt man an der Zunahme der mit dem Flut- und Ebbestrom advektiv transportierten Mengen.

Die ausbaubedingten Änderungen des Netto-Transportes suspendierter Sedimente wurden im Ergebnis wie folgt mit Hilfe des Simulationsmodells analysiert: Im ebbestromdominanten Bereich der Fahrrinne – in der die großen Durchflüsse vorliegen – also zwischen km 690 bei St. Margarethen und Cuxhaven nimmt der Netto-Transport pro Breitenmeter um bis zu 600 kg/m stromab gerichtet zu. Hohe Werte ergeben sich in der Fahrrinne im Umfeld des Elbehafens zwischen km 690 und km 700. Suspendierte Sedimente können somit auch nach dem Ausbau - auch bei geringen und häufig auftretenden Oberwassermengen - diesen Abschnitt des Ästuars bevorzugt in Richtung Deutsche Bucht verlassen.

Bilder
239, 241,243,245,
247

Bild 239

Diese ebbestromorientierte Zunahme kehrt sich oberhalb der Störmündung um in eine flutstromorientierte Zunahme. Stromab der Fahrrinnenkurve bei km 670 ist eine signifikante ausbaubedingte Zunahme von lokal über +1000 kg/m analysiert worden. Zwischen Steindeich und dem Dwars-

Bild 239

loch und weiter zwischen dem Lühesand und dem Hanskalbsand ergibt sich in der Fahrrinne eine annähernd durchgängige, ausbaubedingte Zunahme der Netto-Transportmengen suspendierter Sedimente von maximal 600 kg/m und in Teilabschnitten bis 1000 kg/m. Mit Bezug auf den Vergleichszustand nehmen die Netto-Transporte in der Fahrrinne um ca. +10% zu.

Bild 241

Weiter stromauf von Schulau werden die im Vergleichszustand stromauf gerichteten Netto-Transportmengen der suspendierten Sedimente insbesondere im südlichen Streifen der Fahrrinne reduziert. Diese Abnahmen setzen sich fort bis zur Köhlbrandmündung und noch weiter in die Norderelbe hinein. Die Abnahmen liegen ebenfalls in der Größenordnung von maximal -600 kg/m und in Teilabschnitten bis -1000 kg/m. Aus den unterhalb der Begegnungsstrecke zunehmenden Stromauftransporten und den in der Begegnungsstrecke und in den Zufahrtbereichen des Hamburger Hafens abnehmenden Stromauftransporten ergibt sich, dass nach dem Ausbau mit einer Zunahme der Unterhaltung vornehmlich von Weichsedimenten in der Begegnungsstrecke zu rechnen ist. Im Köhlbrandbogen und in der Norderelbe wird es deshalb nur in den aufgeweiteten Abschnitten der Fahrrinne (einschließlich Drehkreis) zu etwas mehr Sedimentationen kommen.

Bild 243

Bild 245

In den Nebenelben kommt es aufgrund der verhältnismäßig geringen Durchflussmengen nicht zu in den Graphiken sichtbaren Veränderungen der Netto-Transporte suspendierter Feststoffe. Hier ist eine gesonderte Auswertung mit Bilanzierungen über Querprofile erforderlich.

Seegangswirkung

Durch den Ausbau induzierte Veränderungen des Seegangs werden im Kapitel 11.4 berücksichtigt, in dem auf die relevanten morphologischen Einheiten des Elbeästuars eingegangen wird.

siehe Anlage 3

11.3.5 Evolution der Gewässersohle

Die verschiedenen deterministischen und stochastischen hydrodynamischen Prozesse erzeugen im Elbeästuar generell eine fortlaufende Veränderung der Gewässersohle. Die Modellrechnungen zeigen schon im Vergleichszustand ständige morphologische Veränderungen. Aufgabe dieses Gutachtens ist es, die durch die Fahrrinnenanpassung der Tideelbe bedingten Veränderungen zu prognostizieren. Hierfür werden die Differenzen der berechneten zeitlichen Änderungen der Wassertiefen (Sohlhöhen) für den Vergleichszustand und den Ausbauzustand berechnet. Auf die vielfältigen Einflussfaktoren und die sich daraus ergebenden

den Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Entwicklung der Sohlhöhen (Morphodynamik) wurde bereits in Kapitel 9 hingewiesen. Daher sind die verwendeten Skalen zur Darstellung der ausbaubedingten Änderungen nur mit Einschränkungen verwertbar. Die Ergebnisse der morphodynamischen Simulation müssen – sofern vorhanden – im Zusammenhang mit den in der Natur beobachteten Veränderungen der Wassertiefen räumlich differenziert interpretiert werden. Im Rahmen dieser Aufgabe steht für das Elbeästuar ein umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung. Die räumliche Differenzierung ist insbesondere im Hinblick auf die Sedi-mentbelegung durchzuführen. Beispiel: Tiefenänderungen in den stärker durchströmten Rinnen müssen im Elbeästuar in der Regel mit der Umlagerung von Geschiebefrachten in Zusammenhang gebracht werden.

Die BAW hat im Rahmen der Untersuchungen derzeit geplanter Ausbaumaßnahmen für die Unter- und Außenelbe, für die Unter- und Außenweser und für die Ems auf der Grundlage weiter entwickelter Analysen festgestellt, dass eine zweidimensionale Simulation der Strömungen und der durch diese gesteuerten transportwirksamen Prozesse erheblichen, physikalisch bedingten Einschränkungen unterliegt. Diese Einschränkungen können nur in einer Interpretation der Analyseergebnisse berücksichtigt werden, wenn eine umfassende dreidimensionale Simulation auch der dichteinduzierten Strömungen und Transporte als Vergleich durchgeführt wurde. Aus dieser Erkenntnis heraus werden nachfolgend vor allem die dreidimensionalen Modellergebnisse für die Interpretation und Bewertung der ausbaubedingten Veränderungen des Sedimenttransports und der Morphodynamik herangezogen. Der Einfluss des Seegangs und die langfristige Morphodynamik wurden aus Gründen der Rechenzeitersparnis nur mit zweidimensionalen Modellen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können jedoch nicht ohne Berücksichtigung der 3D-Ergebnisse interpretiert werden.

Zur Berechnung der Sohlhöhenentwicklung wurden somit verschiedene Szenarien untersucht:

- Eine **zweiwöchige Echtzeitentwicklung** der Sohlhöhen des simulierten Nipp-Spring-Zyklus erfolgte im UnTRIM-SediMorph 3D Modell des Vergleichs- und Ausbauzustandes.
- Zusätzlich wurde die **Langzeitentwicklung** mit verschiedenen 2D-Modellen abgeschätzt.

Es ist zu beachten, dass die in der 2D-Simulation berechneten (über die Wassertiefe gemittelten) Strömungen die Verhältnisse insbesondere in der Brackwasserzone nicht naturähnlich wieder geben. Dies muss bei der Interpretation der morphodynamischen Ergebnisse berücksichtigt werden. Auf der anderen Seite wäre derzeit die Simulation der Langzeitentwicklung (die von einzelnen Vertretern der Einvernehmensbehörden gefordert wurde) nur mit einem unvertretbar hohen Aufwand (Bedarf an sehr langen Einsatzzeiten der verwendeten Hochleistungsrechnersysteme) möglich, wenn diese auf Grundlage des vollständigen 3D-Modells durchgeführt werden sollte. Dieser Aufwand konnte im Rahmen der hier vorgelegten Untersuchungen nicht erbracht werden. Nach Stand einer individuell bestimmten Ausprägung der Wissenschaft und Technik wird die morphologische Langzeitentwicklung deshalb



unter Einsatz eines Beschleunigungsfaktors (morphologische Zeitraffung) zweidimensional modelliert (Lesser et. al, 2004). Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass ein Beschleunigungsfaktor 10, die Wirkung von 10 Tiden auf die Morphodynamik ergibt, wenn nur eine Tide berechnet wird. Diese Methode wird von der BAW als kritisch eingeschätzt, insbesondere in Gebieten, in denen dreidimensionale Strömungen (z.B. in der Brackwasserzone oder bei topografisch beeinflussten Strömungen mit vertikalen Komponenten) eine wichtige, nicht zu vernachlässigende Rolle spielen. Da die Verwendung der 2D Methoden mit morphologischer Zeitraffung einerseits von der Einvernehmensseite gefordert wurde und diese Methoden andererseits Auskunft darüber geben können, ob heftige ausbaubedingte Systemreaktionen insbesondere im Umfeld der Strombauwerke zu erwarten sind, ist die BAW in einer internen Studie wie folgt vorgegangen (BAW, 2006):

- Zum Einsatz kamen für diese Aufgabe die Simulationsverfahren Delft3D im 2D-Modus (Lesser et. al, 2004) mit einem Beschleunigungsfaktor von 20.
- UnTRIM-SediMorph kam mit Beschleunigungsfaktoren von 5 und 7 zum Einsatz.
- Zusätzlich wurde noch das Simulationsverfahren MARTIN (Milbradt et. al) ohne Beschleunigungsfaktor für einen Simulationszeitraum von 60 Tagen für Vergleichsbetrachtungen verwendet.

Für diese Simulationen wurde der Gewässerboden zunächst homogen mit mittleren Korndurchmessern von 0,2 mm (leicht erodierbarer Feinsand), 0,4 mm (Mittelsand) und 0,6 mm (Grobsand mit größerem Erosionswiderstand) vorbelegt. *UnTRIM* Simulationen wurden zusätzlich mit der variablen Sedimentverteilung aus Naturdaten durchgeführt. Weiterhin wurden Simulationen unter Berücksichtigung von Seegang durchgeführt, um den Effekt der Aufwirbelung von Sedimenten außerhalb der tiefen Rinnen mit zu berücksichtigen.

Beobachtete Änderungen in der historischen Entwicklung

Für das Elbeästuar werden wiederkehrend umfangreiche Messungen der Wassertiefen und der Watthöhen durchgeführt. Die räumliche und zeitliche Auflösung der Messdaten und die Genauigkeit der Messungen (auch die Beschickung der Messdaten auf ein einheitliches Bezugsniveau) wurden mit dem Stand der Technik stetig verbessert. Mit diesen Grundlagen können verhältnismäßig zuverlässige Differenzdarstellungen zwischen den topografischen Aufnahmen einzelner Jahre berechnet werden. Damit erhält man einen detaillierten Einblick in die mittel- bis langfristigen Entwicklungen der Wassertiefen. Es werden exemplarisch folgende Differenztopografien für das gesamte Untersuchungsgebiet herangezogen:

siehe Anlage 1
Bilder 11 bis 34

- Veränderung der Wassertiefen von 1992 bis 2002
- Veränderung der Wassertiefen von 1997 bis 2002
- Veränderung der Wassertiefen von 2000 bis 2003

Die Veränderung der Topographie ab 2000 beinhaltet nicht die jüngste Anpassung der Fahrrinne. Der Vergleich aller Differenztopografien erlaubt

visuelle Analysen mit der Fragestellung, ob sich nach dem jüngsten Ausbaulängjährige morphologische Entwicklungstendenzen verändert haben. Die mit dem Modell simulierten Tiefenänderungen sind insbesondere vor diesem Hintergrund zu bewerten.

Änderungen im Ausbauzustand – 3D Echtzeitentwicklung

Das dreidimensionale Transportmodell, liefert die berechneten Änderungen der Wassertiefen infolge ausbaubedingter Sedimentumlagerungen über mehr als 30 Tiden. Da diese Tiden keine Extremereignisse beinhalten, sind die resultierenden ausbaubedingten Tiefenänderungen gering:

- Sie sind kleiner als +0,1 m in ausgeprägt lokalen Gebieten mit hoher morphologischer Veränderungsintensität. Dies ist beispielsweise nördlich der Fahrrinne im Bereich St. Margarethen zwischen km 685 bis km 691 analysiert worden. Hier befinden wir uns in der Kern-Trübungszone, wo außerhalb der Fahrrinne höhere Schluffanteile im Bodensubstrat anzutreffen sind.
- Um mehr als die Hälfte geringer sind die berechneten ausbaubedingten Tiefenänderungen im Verlauf der tiefen Rinnen, wo die Anteile von Mittel- bis Grobsand dominieren.

siehe Anlage 1
Bilder 248 bis 252

Wenn in Auswertung der Ergebnisse im Mittel eine ausbaubedingte Erosion von +0,05 m Tiefenzunahme an der Fahrrinnenböschung über den Verlauf von 30 Tiden auf der sicheren Seite liegend angesetzt wird und angenommen wird, dass sich diese Erosion in die Tiefe in gleicher Intensität zeitlich fortsetzt, ergibt sich z.B. für eine Jahr eine Erosion von ca. +1,2 m. Dieser Wert ist an exponierten lokalen Böschungsbereichen mit starken Strömungszunahmen (möglicherweise auch verstärkt durch schiffserzeugte Strömungsbelastungen) nicht auszuschließen. Über längere Abschnitte der Fahrrinnenböschungen oder gar der Fahrrinnensohle wird dieses Erosionsmaß ausgeschlossen, weil eine derartige Aufweitung unmittelbar zur Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten führen würde.

Diese Aussage wird durch die zweidimensionalen Untersuchungen über längere Zeiträume gestützt. In den durchgeführten Simulationen erreichen lokale Tiefenzunahmen (Erosionen) bei Vorgabe von Mittelsand nach einem einjährigen Simulationszeitraum im Rinnenabschnitt oberhalb von Glameyer Stack (in diesem Abschnitt erreichen die Strömung durch das Strombauwerk in der Medemrinne die größten Zunahmen) maximal +1,0 m.

Mit dieser grundlegenden Erkenntnis können die ausbaubedingten Ve-

ränderungen der im Naturzustand vonstatten gehenden morphologischen Entwicklung mit Hilfe der 3D Modellergebnisse wie folgt für mittlere Tideverhältnisse und häufig auftretende Oberwassermengen ($350 \text{ m}^3/\text{s}$) prognostiziert werden:

- Seewärts km 750 werden keine ausbaubedingten Änderungen eintreten.
- Im Abschnitt km 740 – km 745 kommt es zu geringen Böschungsanpassungen und Umlagerungen in der Fahrrinne.
- Zwischen km 735 – km 740 kommt es im Scheitel der Kurve zu signifikanten Böschungsanpassungen.
- Westlich der Fahrrinne zwischen km 727 und dem Steinriff wird es zu einer schwachen Abnahme der in der Natur vorherrschenden Erosionen kommen. Parallel dazu wird eine Tendenz zur Erosion in der Fahrrinne prognostiziert.
- Auf Höhe des Bühnenfeldes stromauf Cuxport wird die natürliche Erosion schwach zunehmen. Dies gilt auch für den durch Bühnen geschützten Prallhang stromab von Altenbruch. Hingegen wird unterhalb km 720 die Sedimentation an den Ausläufern des Medemgrundes zunehmen.
- In der Fahrrinne unterhalb von Glameyer Stack wird es auf einer Strecke von ca. 5 km anfänglich zu Umlagerungen mit nachfolgend zeitlich und räumlich wechselnden Erosionen und Sedimentationen kommen.
- Von der Medemmündung bis Glameyer Stack wird es in der tiefen Fahrrinne zu Erosionswirkungen kommen, welche die seit der jüngsten Fahrrinnenvertiefung aufgetretenen Sedimentationen hier unterbinden und die Sohle weiter eintiefen können.
- Unmittelbar stromauf wird es bis zur Ostemündung zu Sedimentationen kommen, die verhindern, dass die für den direkt stromab gelegenen Abschnitt prognostizierten Erosionen sich nachteilig auf die Tidedynamik des Gesamtsystems auswirken werden.
- In der Medemrinne kommt es zu einer Minderung der extremen Morphodynamik, wodurch die seit Jahren anhaltende Migrationsgeschwindigkeit der Rinne nach Norden abnimmt. Zusätzlich wird sich der Querschnitt vor allem im Scheitel der Rinne (wo sie über die größten Wassertiefen verfügt) und im Westteil der Rinne an die durch das Strombauwerk im Ostteil der Rinne verminderten Durchflussmengen anpassen. Hieraus resultieren in den ersten Jahren Sedimentationen bzw. verminderte Erosionen, die mittel- bis langfristig zum Erliegen kommen. Die mittelfristigen Sedimentationen werden aufgrund der weiterhin wirkenden Rinnendynamik kaum nachzuweisen sein.

Bild 248

Bild 248

Bild 248

Bild 248

- Oberhalb der Ostemündung wird es parallel zum Strombauwerk am Neufelder Sand zu einer Anpassung der Böschung an beiden Fahrrinnenrändern kommen.
- Auch am nördlichen Fahrrinnenrand im Abschnitt des Elbehafens Brunsbüttel wird es zu Anpassungen der Böschungen kommen. In der Zufahrt zum Elbehafen und in der Liegewanne werden die Sedimentationen partiell zunehmen.
- Nördlich der Fahrrinne im Bogen zwischen Büttel über St. Margarethen, Scheelenkuhlen bis nach Brokdorf wird es zu lokalen Erosionen wie auch nach dem jüngsten Fahrrinnenausbau kommen. Hierbei werden vermehrt schluffige Sedimente freigesetzt werden. Es kommt in diesem Bogen nördlich der Fahrrinne aber auch zu Sedimentationen, die darauf hindeuten, dass hier ausbaubedingt Sedimentumlagerungen erfolgen werden. An der Unterwasserablagerungsfläche Brokdorf können Erosionen erwartet werden, wenn das abgelagerte Material über eine leichte Erodierbarkeit verfügt.
- Auch die Ufervorspülungen an der Störmündung können erodieren, falls das Material über einen geringen Erosionswiderstand verfügen sollte. Dadurch kann es zu schwachen Sedimentationen in der Störmündung bzw. vor dem Störsperwerk kommen, die jedoch bei höheren Oberwasserführungen der Stör ausgespült werden.
- Parallel zur Schüttstelle Krautsand Nord wird es zur moderaten Anpassung der Fahrrinnenböschungen kommen. Dies hat zur Folge, dass die nach dem jüngsten Ausbau in dieser Strecke aufgetretenen Erosionstendenzen reduziert werden.
- Es ist zu erwarten, dass die Ufervorspülung Kollmar am Steindeich nicht stabil sein wird.
- Die Ufervorspülung Eschschallen wird die Sedimentation in der Pagensander Nebenelbe verstärken. Deshalb wird von der Realisierung dieser Maßnahme mit Nachdruck abgeraten. Diese Empfehlung wurde vom Vorhabensträger in den aktuellen Planungen berücksichtigt.
- In der Fahrrinne parallel zum Pagensand bis zur Schwingemündung wird es zu erneuten Anpassungen der Fahrrinnenböschungen kommen.
- In der Begegnungsstrecke zwischen dem Hamburger Yachthafen und Wittenbergen wird es anfänglich zu Sedimentumlagerungen mit nachfolgenden Sedimentationen kommen. Hier treten bezogen auf die gesamte Ausbaustrecke in der Fahrrinne die größten ausbaubedingten Sedimentationen auf.

Bild 248

Bild 248

Bild 248

Bild 249

Bild 249

Bild 250

- Parallel zur Begegnungstrecke wird es in der Hahnöfer Nebenelbe und im Mühlenberger Loch in einzelnen flachen Bereichen – vor allem in der Ausgleichsrinne - zu signifikanten Zunahmen der laufenden Sedimentationsprozesse kommen. Die Wirksamkeit der durch das Mühlenberger Loch gebaggerten Ausgleichsrinne (die mit dem durch die DA-Erweiterung reduzierten Flutraum bereits abgenommen hat) wird durch das zunehmende Sedimentationspotenzial weiter eingeschränkt. Zwischen Seemannshöft und DA-Erweiterung wird es in der Fahrrinne zu Materialumlagerungen kommen.
- Im Köhlbrandbogen, auf eine Strecke von ca. 1 km unterhalb der Fischauktionshalle (km 624) sowie in der Süderelbe am Kattwyk-Ufer wird es in den Randbereichen der Rinnen zu Zunahmen der Sedimentationen kommen.

Bild 250

Bild 251

Bild 251

Änderungen im Ausbauzustand – 2D-zeitgeraffte Langzeitentwicklung

Die mit den 3D Modellergebnissen analysierten ausbaubedingten Änderungen der Wassertiefen (Sohlhöhen) zeigen, dass insbesondere Anpassungen an den Fahrrinnenböschungen und Umlagerungen in einzelnen Fahrrinnenabschnitten vonstatten gehen werden. Diese Prozesse sind überwiegend auf den in tiefen Rinnen vorherrschenden Geschiebetransport zurück zu führen. Die durch den Ausbau induzierten unmittelbaren Anpassungen der Fahrrinnengeometrie werden oberhalb des Medemgebiets innerhalb von ca. 1000 gelaufenen Tiden abgeklungen sein. Weil die ausbaubedingte Zunahme des Tidehubes und damit auch die nur abschnittsweise zunehmenden Strömungen verhältnismäßig gering sind, müssen diese Anpassungsprozesse zwar als signifikant aber dennoch als klein eingestuft werden.

Weiterhin wurde analysiert, dass insbesondere im Abschnitt der Trübungszone schlackige Sedimente aus den Seitenbereichen (ausbaubedingt in veränderter Form als im Vergleichszustand) ausgetragen werden. Da die erodierten Schlufffraktionen sich großräumig verteilen, sind die daraus resultierenden ausbaubedingten Änderungen der Sedimentationen nur in Gebieten mit großen Wassertiefen (wie z.B. am Kattwyk-Ufer im Hamburger Hafen) oder größeren Zunahmen der Sedimentationen (wie z.B. in der Ausgleichsrinne im Mühlenberger Loch) in den Grafiken für die Sohlevolution sichtbar.

Die langfristigen Auswirkungen der ausbaubedingten Veränderungen von Transporten suspendierter Sedimente müssen deshalb zusätzlich mit Bilanzierungen über Gewässerabschnitte oder Bilanzierungen über morphologische Einheiten wie z.B. Nebenelben abgeschätzt werden. Diesem Sachverhalt wird im nachfolgenden Kapitel zur prozessorientierten Analyse bezogen auf morphologische Einheiten nachgegangen.

Aus den dargestellten Zusammenhängen heraus konzentriert sich die 2D-zeitgeraffte Langzeitenwicklung auf die (bereits im Rahmen der Analyse der 3D-Ergebnisse angeschnittene) Frage, wie sich der in den tiefen Rinnen bettbildende Geschiebetransport insbesondere im Medemgebiet als Reaktion auf die Strombauwerke auswirken wird.

Anlage 2
Bilder 2-1 bis 2-12

Das für diese Aufgaben eingesetzte *Delft3D* Modell zeigt für einheitliche Kornverteilungen von Feinsand, Mittelsand und Grobsand die charakteristischen Merkmale der für den Zeitraum eines Jahres berechneten ausbaubedingten Veränderungen:

- Sedimentationen in der Fahrrinne unterhalb der Ostemündung, im Scheitel der Medemrinne und in der Fahrrinne oberhalb des Amerika Hafens.
- Erosionen in der Rinne an den Osteriff Stacks, oberhalb von Glameyer Stack, unterhalb des Altenbrucher Kanals und nur bei Vorgabe von Grobsand auf Höhe der Seebäder Brücke in Cuxhaven.

Bilder 2-4, 2-5,2-6

Mit den verschiedenen Ansätzen berechnet das zweidimensionale morphodynamische Modell für denselben Prognosezeitraum prinzipiell vergleichbare Verteilungen der ausbaubedingten Änderungen, wobei die Änderungen im Flächenumfang beim Feinsand größer sind. Dies hängt damit zusammen, dass der Feinsand (nicht naturähnlich) im Modell viel zu leicht erodieren kann.

Das Modellverfahren *MARTIN* berechnet über 120 Tiden ohne morphologischen Zeitraffer (mit und ohne Berücksichtigung von Seegang und ebenfalls mit einer Feinsand-Vorbelegung) zwischen den Osteriff-Stacks und dem Altenbrucher Bogen eine vergleichbare Verteilung der mit den *Delft3D*-Ergebnissen dargestellten Erosions- und Sedimentationsgebiete. Das Modell prognostiziert in der Fahrrinne zwischen km 725 und km 735 jedoch eine durchgängige Sedimentation. In der Natur befindet sich in diesem Abschnitt vor allem Mittel- und Grobsand. Das Ergebnis dieser Systemstudie zeigt damit, dass sich in der Medemrinne und in der Hauptrinne ausbaubedingt keine progressiv fortschreitenden Erosionen

Bilder 2-7,2-8,
2-9,2-10

ergeben werden.

Auch das *UnTRIM-SediMorph* Modell zeigt (mit einer in der Natur erhobenen realistischeren Sedimentverteilung) Änderungen nach 700 Tiden, die der dargestellten Verteilung von Erosions- und Sedimentationsgebieten entsprechen, wobei die Erosionen überwiegen. Die Tiefenänderungen sind hier dem Betrage nach aber viel geringer als bei den Modellverfahren *Delft3D* und *MARTIN*, was den natürlichen (beobachteten) Verhältnissen näher kommt.

Bilder 2-11, 2-12

Die mit den drei Modellverfahren durchgeführte Studie offenbart, dass eine langfristige morphologische Prognose allein mit Simulationsmodellen derzeit noch nicht (wahrscheinlich auch nicht in der mittelfristigen Zukunft) belastbar erstellt werden kann. Die Untersuchungen stellen daher Systemstudien dar, mit denen grundsätzliche Systemreaktionen untersucht werden, die mit dem wasserbaulichen Erfahrungswissen des Bearbeiters, den qualitativ besseren 3D-Modellergebnissen und den bisher in der Natur erfassten Veränderungen abgeglichen werden müssen.

11.4 Prozessorientierte Analysen für morphologische Einheiten

Die Analysen der berechneten Feststofftransporte müssen für den Vergleichszustand und für die ausbaubedingten Änderungen des Ausbauzustandes getrennt für den Geschiebetransport und für den suspendierten Transport durchgeführt werden, weil es sich um sehr unterschiedliche Transportarten handelt. In den tiefen Rinnen verläuft der Transport analog zur Strömung alternierend. Wichtig sind daher die Netto-Transporte, die auch als residuelle oder Rest-Transporte bezeichnet werden. Diese bestimmen die langfristige Entwicklung der Morphologie. Von besonderer Wichtigkeit sind vor allem die Richtungen und erst in zweiter Bedeutung die Mengen der Netto-Transportgrößen. Zeigt beispielsweise die ausbaubedingte Änderung einer Netto-Transportgröße in die Richtung des Flutstroms, so kann es dennoch sein, dass die Netto-Transportgröße im Ausbauzustand in Ebbestromrichtung zeigt, weil bereits im Vergleichszustand eine ausgeprägte Ebbestromorientierung der Größe vorgelegen hat und die ausbaubedingte Änderung diese Ausprägung lediglich ein wenig abschwächt. Eine ausbaubedingte Änderungsgröße muss deshalb im unmittelbaren Zusammenhang mit den entsprechenden Kenngrößen im Vergleichszustand interpretiert werden. Nachfolgend werden die wichtigsten Kenngrößen der Feststofftransporte für den Vergleichszustand und für die durch den Ausbauzustand erzeugten Änderungen in einer **prozessorientierten Analyse** zusammengefasst dargestellt und in ihren Auswirkungen im Zusammenhang mit der Kenntnis der in der Natur beobachteten Morphodynamik interpretiert.

Bei der Interpretation der modellierten Suspensionstransporte ist auch die in der Natur vorhandene Flockendynamik zu berücksichtigen. Die im Modell verwendeten in Suspension transportierten Fraktionen Grobschluff und Mittelschluff repräsentieren durch ihre unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten einen Teil des in der Natur auftretenden Spektrums an

Sinkgeschwindigkeiten. Zusätzlich wurden Simulationen durchgeführt, bei denen das von der BAW eingesetzte Verfahren das Bilden und Zerfallen von Flocken (die eine größere Sinkgeschwindigkeit aufweisen können, als die in den Flocken gebundenen einzelnen Partikel) über eine konzentrationsabhängige Parametrisierung der Sinkgeschwindigkeiten einer Fraktion abbildet.

Zur Analyse morphologischer Einheiten wird die folgende Einteilung verwendet, die dynamische Zusammenhänge im Sedimenttransport berücksichtigt:

- Außenelbe im Übergang zur Deutschen Bucht
- Priele, Sände und Wattgebiete nördlich Medemsand
- Kratzsand, Medemrinne, Medemgrund, Altenbrucher Bogen
- Neufelder Sand bis Elbehafen Brünsbüttel
- Elbehafen Brunsbütte bis Rhinplate
- Rhinplate bis Lühesand
- Lühesand bis Nienstedten
- Nebelben
- Hamburger Hafen bis Bunthäuser Spitze
- Bunthäuser Spitze bis Wehr Geesthacht

11.4.1 Außenelbe im Übergang zur Deutschen Bucht

Das Gebiet westlich der gedachten Linie von Trischen im Norden bis zur Kugelbake im Süden unterliegt ständig großen natürlichen Veränderungen der Morphologie. Westlich vom Gelbsand bis einschließlich Großer Vogelsand und auch südwestlich vom Gelbsand bis zur Fahrrinnenkurve am Leitdamm Kugelbake haben in der mittel- bis langfristigen Rückschau erhebliche flächenhafte Erosionen stattgefunden. Auch ist die Erosion im Luechter Loch durch partielle Eintiefungen weiter voran geschritten. Diese erheblichen Sedimentverluste haben in der vergangenen Dekade zu einer schleichenden Verstärkung des Tidehubes in der Unterelbe beigetragen.

Durch die geplante weitere Anpassung der Fahrrinne verändern sich die Strömungen in diesem Gebiet nur tendenziell. Außerhalb der Fahrrinne wird es lediglich im Bereich des Kurvenscheitels bei km 735 zu geringen Strömungsabnahmen kommen. Geringfügige Strömungszunahmen des Ebbestroms entstehen nördlich von der Fahrrinne bei km 740, weil das in der Fahrrinne ausbaubedingt zunehmende Ebbestromvolumen dem dortigen Kurvenverlauf der Fahrrinne nicht vollständig folgen will.

Ausbaubedingt wird sich der Sedimenttransport in diesem Gebiet in der Geschiebedynamik der Fahrrinne und ihrer Böschungsbereiche durch einen morphologischen Nachlauf bemerkbar machen. Dadurch wird es nach der Baggerung zu geringfügigen lokalen Umlagerungen und Anpassungen kommen. Diese ausbauinduzierten Veränderungen können durch Messungen nicht erfasst werden, weil die ausbaubedingten Anpassungsprozesse klein bleiben im Vergleich zur weiter voran schreitenden natürlichen Morphodynamik mit weitaus deutli-

cheren Signalen. Die langfristige (über Jahrzehnte) Veränderung der Morphologie im Außenelbegebiet ist derzeit vornehmlich unter Berücksichtigung der beobachteten Trendentwicklungen prognostizierbar.

In der Dynamik der suspendierten Sedimente können Langfristprognosen mit mathematischen Modellen gestützt werden. Im Verlauf der Fahrrinne wird es zwischen der Kugelbake und dem Kurvenscheitel bei km 735 zu geringfügigen – aufgrund der natürlichen Variabilität nicht messbaren – Zunahmen im Suspensionstransport kommen. Außerhalb der Fahrrinne werden sich ausbaubedingt keine signifikanten Veränderungen einstellen.

11.4.2 Priele, Sände und Wattgebiete nördlich Medemsand

Im Gebiet nördlich des Medemsandes und östlich der gedachten Linie von Trischen im Norden bis zur Kugelbake im Süden, ist es in der mittelfristigen Rückschau vor allem im Rinnenverlauf des Klotzenloches zu erheblichen Verlagerungen (bis zu ca. einem Kilometer in 12 Jahren) gekommen. Dabei hat sich der untere Abschnitt des Wattstromes nach Süden in Richtung Medemsand verlagert, während der obere Abschnitt der Rinne nach Norden gewandert ist. Der westliche Teil des Medemsandes wird somit durch Erosionen im Süden (Migration der Medemrinne nach Norden) und Erosionen im Norden (Migration des Klotzenloches nach Süden) stetig verkleinert. In den nördlich vom Klotzenloch gelegenen Gebieten hat - bis an die Schleswig-Holsteinische Westküste reichend - eine flächenhaften Sedimentation stattgefunden, deren Sedimentquellen in den flächenhaften Erosionsgebieten westlich vom Gelbsand und in den suspendierten Sedimentfrachten (vor allem die Mündung der Tideelbe verlassend) zu suchen sind.

Durch die nun beantragte Ausbaumaßnahme wird es an der Schleswig-Holsteinischen Westküste zu einer tendenziellen Zunahme der Sedimentationen kommen. Die ausbauinduzierten Veränderungen werden so gering sein, dass man sie nicht mit Methoden der Beweissicherung erfassen kann. Weitere ausbaubedingte Änderungen werden in diesem Gebiet nicht eintreten.

11.4.3 Kratzsand, Medemrinne, Medemgrund, Altenbrucher Bogen

Dieses Gebiet unterliegt seit Jahrhunderten einer sehr ausgeprägten Morphodynamik. Das Studium alter Karten offenbart, dass das Klotzenloch vor ca. 150 Jahren dort anzutreffen war, wo sich heute die Medemrinne befindet. Die in der längeren Historie wiederholte Abspaltung einer Nebenrinne von der Hauptrinne oberhalb des Altenbrucher Bogens erfolgte in langfristigen Zyklen. In den vergangenen Jahrhunderten gab es jeweils vor Bildung einer neuen Nebenrinne auch anhaltende Phasen ohne Bestehen einer solchen. Die jüngste derartige Situation kann z.B. den Seekarten der 50er und 60er Jahre des vergangenen Jahrhunderts entnommen werden. Bevor sich die Medemrinne (und vor langer Zeit das Klotzenloch äh-

lich wie die Medemrinne) gebildet hatte, existierte ein großes durchgängiges Wattgebiet nördlich des Altenbrucher Bogens mit einer breiteren Elbrinne. In der breiten Elbrinne kam es zu einer mitten im Strom gelegenen Untiefe, dann weiter zu einer Mittelsandbildung und schließlich zur Wattbildung (dem heutigen Medemgrund), wodurch die neue Rinne nördlich des neuen Watts geboren wurde. Die nun einsetzende Migration der Medemrinne nach Norden (die erst Mitte der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts richtig in Fahrt gekommen ist) führte in jedem Jahr zu erheblichen Freisetzungen der im alten Wattsockel des Medemsandes konsolidierten Sedimentmengen (es konnten mehr als 20 Mio. m³ pro Jahr durch die Rinnenmigration vom Strom aufgearbeitet werden), die in das Tideregime eingemischt wurden und zum Anwuchs des Medemgrundes sowie zu unterhaltungsrelevanten Sedimentationen im Fahrrinnenbereich unterhalb des Altenbrucher Bogens beim Amerikahafen führten. Mit diesen Erosionsmengen aus der südlichen Böschung des Medemsandes wurden auch nennenswerte Anteile schluffiger Sedimente freigesetzt, die sich großräumig in den strömungs- und seegangsberuhigten Bereichen der Elbmündung und der Deutschen Bucht verteilen. Es muss angenommen werden, dass geringere Anteile dieser suspendierten Frachten bei niedrigen Oberwasserabflüssen auch nach stromauf transportiert wurden. Die nordwärts gerichtete, fortwährende Migration der Medemrinne ging im stromab gelegenen Mündungsabschnitt am schnellsten vonstatten. Hierdurch wurde auch die Gestalt und der Sedimenthaushalt des gegenüber von Cuxhaven gelegenen Kratzsandes sowie des von diesem nördlich gelegenen Spitzsandes fortgesetzt beeinflusst. Eine Vereinigung der westlichen Medemrinne mit dem unteren Zweig des Klotzenloches kann in ca. 15 Jahren erwartet werden.

In der mittelfristigen Rückschau wuchs im Altenbrucher Bogen westlich vom Glameyer Stack der Medemgrund infolge der beschriebenen Sedimentdynamik auch nach Süden in den Böschungsbereich der Fahrrinne hinein. Diese Sedimentationen reduzierten den Fließquerschnitt der Hauptrinne, so dass es in diesem Elbabschnitt zu einer lokalen Erosion überwiegend im nördlichen Fahrrinnenstreifen gekommen ist.

Das für die weitere Anpassung der Fahrrinne mit zwei Strombauwerken ergänzte, optimierte Ausbaukonzept sieht vor, die durch den Ausbau erzeugte Zunahme des Tidehubes in der Unterelbe zu minimieren. Mit der festgelegten Unterwasserablagerungsfläche im Ostteil der Medemrinne (als weiches, abgedecktes Strombauwerk) wird aber noch ein weiterer Nutzen durch die Beruhigung der Morphodynamik am Medemsand erzielt. Das Strombauwerk reduziert den Durchfluss durch die Medemrinne und vermindert damit die Strömungen (die Ebbe-strömungen stärker als die Flutströmungen) im Scheitel (Prallhang) und im Westteil der Medemrinne. Gleichzeitig werden die maximalen Strömungen (insbesondere der Ebbephase) in der Hauptrinne (im Elbabschnitt parallel zur Medemrinne) um maximal 8% verstärkt. Es wird erwartet, dass sich die Hauptrinne in ihrer morphologischen Systemreaktion im Abschnitt oberhalb Glameyer Stack aufgrund der Strömungszunahme in Tiefe und Breite aufweiten wird, so dass die Strömungsgeschwindigkeiten wieder um wenige Zentimeter pro Sekunde

abnehmen werden. In Folge dieser Aufweitung wird die Unterhaltungssituation im unteren Abschnitt des Altenbrucher Bogens beeinflusst.

Zur Erhaltung der dämpfenden Wirkung des Strombauwerkes in der Medemrinne sollte nach dem Ausbau das Sedimentmanagement im Rahmen der Unterhaltungsbaggerungen optimiert werden, indem die groben Fraktionen im Abschnitt der dargestellten Rinnenaufweitung umgelagert werden.

Auf die Veränderungen in der Hauptrinne wird sich die nicht durch Nassbaggerarbeiten unterhaltene Medemrinne langfristig mit Querschnittsverminderungen (nicht Verschlickungen) an die neuen Verhältnisse anpassen. Die Medemrinne wird aber nicht verschwinden, ihre Migration wird sich im westlichen Abschnitt mit gebremster Leistung vielmehr fortsetzen, so dass die morphologische Verschiedenheit und Dynamik des hier behandelten Elbabschnittes erhalten bleibt.

Die Analyse der ausbaubedingten Veränderungen hat für den ca. 2 km langen Abschnitt direkt oberhalb Glameyer Stack eine Zunahme der maximalen Ebbeströmungen und damit auch eine Zunahme der Geschiebetransporte gezeigt. Es muss deshalb davon ausgegangen werden, dass die überwiegenden Sedimentationen, die sich nach dem jüngsten Ausbau in diesem Abschnitt südlich der Fahrrinne eingestellt haben, nach einem weiteren Ausbau nicht mehr auftreten werden. Es wird daher mit Nachdruck empfohlen, den ufernahen Bereich direkt oberhalb von Glameyer Stack und den Übergang zur Unterwasserböschung durch ein Strombauwerk so zu sichern, dass die Strömungen in der Fahrrinne nicht nennenswert verstärkt werden. Mit dieser Sicherung darf erwartet werden, dass sich Rinnenaufweitungen zwischen der Fahrrinne und der südlichen Kante des Medemgrundes (ggf. unterstützt durch Baggerungen) einstellen, die sich nicht nachteilig auf die Strömungsverhältnisse zwischen Glameyer Stack und Altenbruch auswirken werden.

Aus den in Anlage 3 zusammengestellten Ergebnissen zu den Seegangsuntersuchungen für den bei Sturmfluten aus der Deutschen Bucht in die Außenelbe einlaufenden Seegang und für den Seegang, der primär durch lokale Windfelder mit Vorzugsrichtungen aus West bis Südwest bzw. Ost bis Südost geprägt ist, kann abgeleitet werden, dass die Seegangsbelastung allein bei den Sturmfluten lokal an den Osteriffstacks ausbaubedingt um ca. 5 % zunimmt. Bei den episodisch auftretenden Sturmfluten werden dadurch mehr schlickige Sedimente erodiert und von der Tideströmung aufgenommen. Die Auswirkungen sind aufgrund der geringen Häufigkeit des Auftretens gering, insbesondere auch, weil das Ostesperrwerk vor Eintreten der Sturmflut geschlossen wird, folglich keine erhöhten Sedimentkonzentrationen in die Oste gelangen können. Der mit Winden aus West bis Südwest lokal erzeugte Seegang wird in der tiefen Fahrrinne zwischen km 705 und km 725 ebenfalls leicht zunehmen. Die größten Zunahmen mit ca. 7% sind innerhalb dieses Abschnittes in einem 2 km – Segment direkt unterhalb Glameyer Stack zu verzeichnen. Durch diese Zunahmen werden die Fahrrinnenböschungen ausbaubedingt etwas stärker belastet. Weiterhin besteht eine

Zunahme des lokal erzeugten Seegangs an der Südkante des Medemgrundes, aus der ausbaubedingt ebenfalls eine geringfügig zunehmende Erosionswirkung abzuleiten ist. Im Westlichen Teil der Medemrinne nimmt die Seegangsbelastung geringfügig ab. Der mit Winden aus Ost bis Südost lokal erzeugte Seegang erfährt durch den Ausbau keine signifikanten Veränderungen.

Zusammenfassung: Durch Vertiefung der Fahrrinne und durch das Strombauwerk in der Medemrinne wird es in diesem Elbabschnitt zu langfristigen morphologischen Anpassungsprozessen durch partiell veränderte Sandtransporte kommen. Die extreme Dynamik der Medemrinne wird abgeschwächt. Ihre Verlagerung nach Norden gebremst. Es wird erwartet, dass die durch das Strombauwerk eingebrachte Dämpfung der Tidedynamik von Außen- und Unterelbe langfristig erhalten bleibt. Darüber hinaus wird eine Grundlage geschaffen, das Konzept mittel- bis langfristig weiter zu entwickeln. Nach Realisierung der Fahrrinnenanpassung besteht die Möglichkeit mit weiteren (räumlich verteilten) Strombaumaßnahmen die Wirkung der Dämpfung schrittweise, aufeinander abgestimmt und vor allem mit der weiteren Entwicklung des Natursystems zu verstärken. Im Vergleich zu dieser Vorgehensweise wäre ein Konzept abzulehnen, das zur Schaffung der Dämpfung nur einmal stark in das Natursystem eingreifen würde.

11.4.4 Neufelder Sand bis Elbehafen Brunsbüttel

Das Strombauwerk am Neufelder Sand verstärkt die Flut- und Ebbeströmungen in der Fahrrinne und nördlich der Fahrrinne an den Osteriffstacks jeweils auf einer Strecke von 5 km. Aus diesen Zunahmen ergibt sich keine signifikante Veränderung der Netto-Geschiebefrachten in der Fahrrinne. Erst oberhalb dieser Strömungszunahmen kommt es in der Fahrrinne zu einer Intensivierung der stromauf gerichteten Geschiebefrachten zwischen km 693 und km 700, so dass es am Warteplatz Brunsbüttel zu Eintreibungen von Geschiebe kommen kann. Da die Veränderungen der Geschiebefrachten gering sind, ist festzustellen, dass das Strombauwerk am Neufelder Sand den Geschiebehaushalt in diesem Abschnitt nicht nachhaltig beeinflussen wird. Dies ergibt sich auch aus den in der Fahrrinne abnehmenden Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten oberhalb der lokalen Strömungszunahme, die durch die dämpfende Wirkung beider Strombauwerke (in der Medemrinne und am Neufelder Sand) bewirkt werden.

Eine Zunahme der Verschlickung kann in diesem Gewässerabschnitt unterhalb des NOK ausgeschlossen werden. Die Bilanzierung der in Suspension mit der Strömung im Gesamtquerschnitt transportierten Feststoffmengen hat für den Abschnitt zwischen NOK und Neufelder Sand sogar eine beträchtliche Abnahme der Netto-Gesamttransportmengen ergeben. Oberhalb des NOK nehmen die heute bereits vorhandenen Stromauftransporte von suspendierten Sedimenten bis über Scheelenkuhlen hinaus (km 687) zu.



Bei Sturmfluten sind Zunahmen der maximalen signifikanten Wellenhöhe an der Unterwasserablagerungsfläche Neufeld und im Bereich der Zufahrt zum Hafen Neufeld zu verzeichnen. Da diese Zunahmen auch bei Kantenfluten auftreten können, ist damit zu rechnen, dass temporär (in Zeiten mit geringem Seegang) abgelagerte Schlickfallmengen nach dem Ausbau wieder etwas schneller erodiert werden können. Ein Einfluss auf das Außentief kann daher nicht vollkommen ausgeschlossen werden.

Zusammenfassung: Im Gewässerabschnitt vom Neufelder Sand bis zum Elbehafen Brunsbüttel wird es ausbaubedingt zu keinen mittel- bis langfristig ungünstigen, ausbaubedingten Veränderungen in der Gewässermorphologie kommen. Die Zunahme des Eintriebs von Geschiebe (aus dem stromab gelegenen Fahrrinnenabschnitt) in den Warteplatz Brunsbüttel wird nicht als nachteilig eingestuft, da die dort gebaggerten Sande für Ziele im Sedimentmanagement eingesetzt werden können. Die Zunahme der Ablagerung suspendierter Frachten im Bereich des Elbehafens behindert deren Weitertransport noch stromauf.

11.4.5 Elbehafen Brunsbüttel bis Rhinplate

In der morphologischen Entwicklung nach dem jüngsten Fahrrinnenausbau ist dieser Elbabschnitt durch folgende Entwicklungen gekennzeichnet: Sedimentationen herrschten im Gebiet des Böschrückens südlich der Fahrrinne vor, Erosionen ergaben sich im stromauf anschließenden Gebiet (ebenfalls südlich der Fahrrinne) oberhalb von Scheelenkuhlen, noch weiter stromauf gegenüber der Störmündung an der Brammer Bank besteht ebenfalls ein Sedimentationsgebiet. Die Innenkurve des Störbogens zeigt mit diesem Muster langfristige Prozesse, die mit Verlagerungen von Sedimenten aus dem Gebiet südlich der Fahrrinne am NOK zum Böschrücken und aus dem Gebiet im inneren Kurvenscheitel unterhalb der Brammer Bank auf diese hin gerichtet sind. Nach dem vergangenen Fahrrinnenausbau hat sich das Sedimentationspotenzial am Böschrücken möglicherweise erhöht. Gleichzeitig wurden in der Außenkurve nördlich der Fahrrinne Sedimente durch Erosion freigesetzt, die vor allem auch in Suspension transportiert werden können. Man beachte, dass wir uns (insbesondere in diesem Außenbogen) in der Kern-Trübungszone des Ästuars befinden.

Mit einer weiteren Fahrrinnenanpassung wird das Freisetzungspotenzial schlickiger Sedimente im Außenbogen zunehmen. Eine Ursache dafür ist in den Unterwasserablagerungsflächen St. Margarethen, Scheelenkuhlen und mit geringeren Anteilen auch Brokdorf zu suchen, welche die maximalen Strömungen lokal um bis zu +8 cm/s verstärken.

Aus dem analysierten Systemverhalten können zwei langfristige Folgen abgeleitet werden. Zum einen werden die derzeitigen Sedimentationen am Böschrücken schwach zunehmen. Zum anderen kommt es zu einer schwachen Verlagerungstendenz der Kern-Trübungszone nach stromauf, so dass sich die Flanke des Längsprofils der mittleren suspendierten Feststoffkonzentration oberhalb des Trübungsmaximums im Elbabschnitt zwischen km 650 und km 675 geringfügig nach stromauf verschiebt. In diesem 25 km langen Abschnitt der Elbe



werden die mittleren suspendierten Feststoffgehalte (gemittelt über den gesamten Elbequerschnitt) um 0 mg/l bis 3 mg/l zunehmen.

Zusammenfassung: Die morphologische Entwicklung wird in diesem Elbabschnitt vornehmlich durch den Netto-Transport und die Umlagerung schlackiger Sedimente geprägt. Messbare ausbaubedingte Veränderungen werden hier nur im direkten Wirkungsbereich der Unterwasserablagerungsflächen auftreten. Großräumige Auswirkungen werden sich erst im stromauf gelegenen Elbabschnitt bemerkbar machen.

11.4.6 Rhinplate bis Lühesand

Im Zuge des jüngsten Ausbaus wurde an der Rhinplate zwischen Krautsand und der Wischhafener Süderelbe eine Unterwasserablagerungsfläche fest eingebaut. Diese führte zur Einschnürung der Gewässerquerschnitte und damit zur Zunahme der Strömungen, so dass die vor dem jüngsten Ausbau vorhandenen hohen Baggermengen an der Rhinplate beträchtlich minimiert werden konnten. Durch diese Maßnahme haben sich partielle Erosionen in der Fahrrinne und im direkten Anschlussbereich der Unterwasserablagerungsfläche ergeben. Weitere Erosionserscheinungen waren insbesondere am Schwarztonnensand außerhalb der Fahrrinne und im Böschungsbereich der Fahrrinne unterhalb der Schwingemündung zu verzeichnen. Sedimentationen ergaben sich in den Nebenelben, zwischen der Fahrrinne und dem nördlichen Abschnitt von Pagensand sowie direkt oberhalb der Unterwasserablagerungsfläche Twielenfleth, vor dem Eingang zur Lühesander Süderelbe.

Mit dem neuen Ausbau wird der Fahrrinnenabschnitt parallel zur Rhinplate noch einmal signifikant vertieft. Mit den hergestellten größeren Gewässerquerschnitten werden sich deshalb hier die Strömungen ausbaubedingt nicht erhöhen. Dadurch nehmen insbesondere die Ebbestromgeschiebefrachten (im Vergleich zu den ebenfalls abnehmenden Flutstromgeschiebefrachten) in der Fahrrinne ab. Mit diesem Befund ist zu erwarten, dass das Sedimentationspotenzial parallel zur Rhinplate wieder schwach zunehmen wird. Die beim jüngsten Ausbau der Fahrrinne eingebrachte UWA behält somit ihre Funktion, wird in ihrer Wirkung aber abgeschwächt.

Stromauf von Krautsand bis über die Schwingemündung hinaus nimmt die maximale Flutströmung nach dem Ausbau um bis zu +7 cm/s zu. Die Zunahmen bilden sich in den Abschnitten aus, in denen nicht so tief oder auch gar nicht in die Fahrrinnensohle eingegriffen wird. Diese Zunahmen sind mit Bezug auf den Transport der suspendierten Sedimente signifikant, weil die maximalen Ebbeströmungen in diesem Abschnitt nahezu unverändert bleiben. Damit erhält der Flutstrom gegenüber dem Ebbestrom eine durch den Ausbau zunehmende Dominanz im Gewässerabschnitt von ca. 20 km Länge zwischen der Südspitze Rhinplate und dem Dwarsloch. Mit Bezug auf den Geschiebetransport ist die Zunahme der Flutstromdominanz jedoch nicht signifikant, weil die Veränderungen im Netto-Geschiebetransport gegenüber den Mengen des suspendierten Transports vernachlässigt werden können. Wie bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnt nehmen die mittleren suspendierten Feststoffkonzentrationen in dem um 5 km weiter gefassten Elbabschnitt zwischen km 650 und km



675 um bis zu 3 mg/l zu. In der Überlagerung der ausbaubedingten Wirkungen – Zunahme der Flutströmungen und Zunahme der suspendierten Feststoffkonzentration – entsteht in diesem Abschnitt der Tideelbe eine ausbaubedingte Zunahme der Netto-Transportmengen um ca. 10 % nach stromauf und zwar für die hier behandelten Verhältnisse mit dem häufig auftretenden aber geringen Oberwasser von 350 m³/s. Oberhalb von km 648 (beim Lühesand) sind keine starken ausbaubedingt zunehmenden Netto-Stromauftransporte mehr zu erwarten. Diese Aussage bezieht sich auf die Transportmengen, die über die gesamte Breite der Elbe aufsummiert wurden.

Weil die im Wasserkörper der Tideelbe suspendierten Feststoffe sich nur temporär (bei Stromkenterung oder auch bei Nipptiden) in der stark durchströmten Fahrrinne absetzen werden, ist nun zu fragen, wohin die ausbaubedingt zusätzlich stromauf transportierten Mengen gelangen. Einerseits werden sich Anteile dieser Mengen im Elbabschnitt zwischen Lühesand und Nienstedten akkumulieren können, andererseits werden sie sich in den strömungsberuhigten Gebieten der Nebenelben sowie in den Seitenbereichen an der Hauptelbe absetzen.

Zusammenfassung: Im Elbabschnitt von der Rhinplate bis zum Lühesand ist eine signifikante Zunahme der netto stromauf transportierten, schluffigen Sedimente zu verzeichnen. Im Mittel werden etwa 10% mehr Sedimente stromauf transportiert als im Vergleichszustand. Dieser Wert wurde für eine längere Zeit wirkende Oberwassermenge von 350 m³/s ermittelt. Im langjährigen Mittel führt die Elbe eine Oberwassermenge von 700 m³/s. Die angegebenen 10% in der Zunahme stellen somit eine worst case Betrachtung dar, wenn die bei einem Oberwasserzufluss von 350 m³/s berechneten Transportmengen auf ein Jahr hochgerechnet werden. Bei Oberwasserzuflüssen größer 350 m³/s nimmt die im Tidemittel stromauf transportierte Menge kontinuierlich ab. Für die ausbaubedingte Änderung der transportierten Mengen bei Oberwasserzuflüssen größer 350 m³/s kann der genannte Prozentsatz aber ebenfalls in Ansatz gebracht werden, wobei zu beachten ist, dass die Zunahme von 10 % geringere stromauf transportierten Mengen ergibt, wenn ein größeres Oberwasser herrscht.

11.4.7 Lühesand bis Nienstedten

In der Lühekurve ist es in den Jahren nach dem jüngsten Ausbau zu einem morphologischen Nachlauf in der Unterwasser-Dünenstrecke mit einer Tendenz zur Absenkung der Fahrrinnensohle und zur Abflachung der Binnenböschung gekommen. Auf Höhe des Hamburger Yachthafens hat sich eine Sedimentationszone gebildet, in der Baggerungen über die gesamte Fahrrinnenbreite erforderlich waren. Eine weitere morphologische Systemreaktion ergab sich durch die DA-Erweiterung im Elbabschnitt bis Blankenese sowie begrenzt im Abschnitt der Einschnürung durch die Start- und Landebahn.

Der nächste Ausbau wird die Flutstrom-Geschiebefracht in der Lühekurve verstärken. Da die Ebbestrom-Geschiebefracht in diesem Abschnitt kaum zunimmt (zum Teil sogar abnimmt)

ergibt sich in der Lühekurve ein Netto-Transport von Geschiebe nach stromauf. Diese zusätzlichen Netto-Frachten kommen in der Begegnungsstrecke auf Höhe des Hamburger Yachthafens zum Erliegen und müssen im unteren Abschnitt der aufgeweiteten Begegnungsstrecke gebaggert werden. Die Mengen sind jedoch von untergeordneter Bedeutung im Vergleich zu den im Wasserkörper in Suspension transportierten Netto-Frachten.

Die maximalen und vor allem auch die mittleren Suspensionskonzentrationen nehmen in der Strecke von Nienstedten bis zum Beginn des Lühebogens um 2 bis 3 mg/l ab. Da in diesem Bereich in Folge der Rinnenaufweitungen auch die Strömungen vermindert werden, nehmen die Transportmengen der suspendierten Sedimente ab. Die Netto-Transportmengen der suspendierten Frachten nehmen aber noch im Lühebogen nach stromauf ebenso ausbaubedingt zu, wie die bereits angesprochenen Geschiebetransporte. Die Zunahmen der suspendierten Frachten im Lühebogen sind zwar noch signifikant, jedoch im Vergleich zu den Netto-Transporten im Abschnitt am Pagensand von geringerer Größe. Diese Zunahmen verschwinden auf Höhe des Hafens Schulau. Im Abschnitt zwischen dem Hafen Schulau und Nienstedten sind überwiegend ausbaubedingte Abnahmen (im südlichen Fahrrinnenstreifen) der im Vergleichszustand stromauf gerichteten Netto-Transporte zu verzeichnen. Im südlichen Fahrrinnenstreifen sind die Netto-Transporte im Vergleichszustand größer als im nördlichen Streifen. Aus diesem recht komplexen Sachverhalt kann gefolgert werden, dass sich in der Begegnungsstrecke insbesondere oberhalb des Hafens Schulau ein verstärktes Sedimentationspotenzial auch für Weichsedimente ergeben wird. Durch dieses verstärkte Sedimentationspotenzial wird eine weitere Zunahme des Stromauftransports in das Hafengebiet hinein vermieden. Dieses Sedimentationspotenzial führt zur ausbaubedingt erzeugten Sedimentation, wenn bei geringen Oberwassermengen die Transportkette von der Rhinplate bis zum Lühesand intensiviert wird.

Zusammenfassung: In der Lühekurve wird sowohl der Netto-Geschiebetransport als auch der Netto-Suspensionstransport lokal verstärkt. Die Zunahmen in den Transportmengen verschwinden in der Begegnungsstrecke oberhalb des Hafens Schulau. Weiter oberhalb nehmen die im Vergleichszustand stromauf gerichteten Netto-Transporte ausbaubedingt ab. Dadurch kommt es nicht zu einer Zunahme an suspendierten Sedimenten im Hamburger Hafengebiet. Folglich ist nach dem Ausbau in der Begegnungsstrecke mit einem höheren Unterhaltungsaufwand zu rechnen.

11.4.8 Eintrag suspendierter Sedimente in die Nebenelben

In Kapitel 11.4.6 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Netto-Transportmengen der Suspendierten Sedimente in Richtung des Flutstroms insbesondere im Abschnitt zwischen der Rhinplate und dem Lühesand ausbaubedingt zunehmen werden. Um den Grad der Zunahme im Rahmen der Simulation auch in den Nebenelben abschätzen zu können, wurden in den Nebenelben Querprofile gesetzt, an denen die vom Flut- und Ebbestrom über diese Profile transportierten Suspensionsmengen bilanziert werden konnten. Diese Bilanzierungen wurden sowohl für den Vergleichszustand PIZ als auch für den Ausbauzustand AZ durchge-

führt. Die Bildung der Differenz AZ minus PIZ erlaubt damit die Abschätzung der ausbaubedingten Veränderung des Eintrags der suspendierten Sedimente in die Nebenelben. Für mittlere Tideverhältnisse wurden die folgenden Abschätzungen berechnet:

- Glückstädter Nebenelbe: Zunahme um ca. + 0 %
- Nebenelbe am Schwarztonnensand Zunahme um ca. + 6 %
- Pagensander Nebenelbe: Zunahme um ca. + 5 %
- Lühesander Süderelbe: Zunahme um ca. + 2 %
- Hahnöfer Nebenelbe: Abnahme um ca. - 10 %

Den Abschätzungen liegt die Berechnung mit einem Oberwasserzufluss von 350 m³/s zugrunde. Die mit diesem Szenario berechneten Transportmengen in Tonnen pro Tide dürfen nur im Rahmen einer „worst case“ Betrachtung auf das Jahr hochgerechnet werden, weil der mittlere langjährige Oberwasserzufluss 700 m³/s beträgt und der Netto-Stromauftransport von Sedimenten mit steigenden Oberwasserzuflüssen abnimmt. Für die ausbaubedingte Änderung der in den Nebenelben transportierten Mengen bei Oberwasserzuflüssen größer 350 m³/s können die genannten Prozente aber ebenfalls in Ansatz gebracht werden.

Die kontinuierlich nach stromauf geringer werdenden Zuwächse korrespondieren mit den beschriebenen Verhältnissen der Transportprozesse in der Tideelbe.

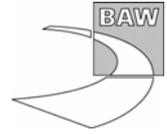
11.4.9 Hamburger Hafen bis Bunthäuser Spitze

Im Gebiet des Hamburger Hafens kann nicht von natürlichen morphologischen Entwicklungen ausgegangen werden. Der Bereich von Teufelsbrück bis nach St. Pauli in der Norderelbe und bis zur Köhlbrandbrücke an der Süderelbe ist stark durch den Schiffsverkehr und vor allem durch die Unterhaltung der Hafenzufahrten geprägt. Dieser Bereich wird deshalb im nachfolgenden Kapitel (in dem einzelne Betroffenheiten angesprochen werden) behandelt.

In den oberen Abschnitten von Süder- und Norderelbe zwischen der Bunthäuser Spitze bis zu den Süderelbbrücken und zwischen der Bunthäuser Spitze bis zur Autobahnbrücke über die Norderelbe werden die Geschiebefrachten (im Abschnitt der Süderelbe auch die suspendierten Frachten mit dem Ebbestrom) ausbaubedingt schwach intensiviert. Gründe dafür können in der (wenn auch moderaten) Zunahme des Tidehubes (in der Süderelbe auch durch eine geringfügig verbesserte Abflussleistung infolge partielle Aufweitung der unteren Querschnitte) gesehen werden. In den oberen Abschnitten von Süder- und Norderelbe haben sich auch nach der jüngsten Fahrrinnenanpassung geringfügige Erosionen ergeben.

11.4.10 Bunthäuser Spitze bis Wehr Geesthacht

In der oberen Tideelbe kommt es unterhalb von km 605 zu geringfügigen Zunahmen der maximalen Schwebstoffgehalte. Die mittleren Schwebstoffgehalte zeigen keine Änderungen.



Aufgrund dieses Sachverhalts muss davon ausgegangen werden, dass sich die Morphodynamik der oberen Tideelbe ausbaubedingt nicht verändern wird.

12 Bewertung der ausbaubedingten morphologischen Änderungen unter Berücksichtigung der Betroffenheiten

12.1 Grundlagen

Im Kapitel 11 wurde bereits ausgeführt, dass die im Ist-Zustand derzeit ablaufende und in der historischen Entwicklung abgelaufene morphologische Entwicklung des Elbeästuars mit ständigen Umlagerungen sehr großer Sedimentmengen verbunden ist und war. Die größten Umlagerungsmengen sind und waren im Elbemündungsgebiet zu verzeichnen. An diesen hatten die vergangenen Ausbauten des Systems den vergleichsweise geringsten Anteil. Die natürliche morphologische Entwicklung des Elbemündungsgebietes beeinflusste auch das Tideverhalten im Gesamtsystem der Unter- und Außenelbe. Die Abschätzung des Einflusses des aktuell geplanten weiteren Ausbaus der Fahrrinne und der mit dieser Maßnahme vorgesehenen Strombauwerke und Unterwasserablagerungsflächen auf die im derzeitigen Systemzustand ablaufenden morphodynamischen Prozesse ist eine sehr komplexe Aufgabe. Aussagen zu Quantitäten sind nur im Ansatz und auch nur in einigen fachlichen Zusammenhängen möglich. Die ausbaubedingte Veränderung der im Naturzustand derzeit ablaufenden morphologischen Prozesse kann deshalb nur mit prozentualen Angaben (bezogen auf den Vergleichszustand) oder mit qualitativen Aussagen (wie z.B. die Baggermengen, die Sedimentationsmengen oder die Erosionen werden tendenziell oder signifikant zunehmen) für mittlere Verhältnisse angegeben werden. Eine exakte Vorhersage ist ohnehin nicht möglich, weil das Erosions- und Sedimentationsgeschehen stark von den Prozessen abhängig ist, die vom Wetter (Oberwassermengen, Windstau, usw.) geprägt werden.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über wichtige Einflussgrößen, die die morphologischen Verhältnisse der Außen- und Unterelbe mittelbar bzw. unmittelbar bestimmen. Einflüsse, die sich ausbaubedingt signifikant verändern, sind zu bewerten und können Betroffenheiten auslösen.

Einfluss	Vergleich der Verhältnisse vor und nach dem Ausbau
Tideeinfluss aus der Nordsee	gleich (ausgenommen Klimaentwicklung)
Wettergeschehen	gleich (ausgenommen Klimaentwicklung)
Sturmflutwasserstände Elbe	nahezu gleich (Ausbau ist Hochwasserneutral < 2cm) – gesondertes Gutachten (BAW, 2006b)
Tidewasserstände Elbe	Veränderungen (Ausbau ist über einen Abschnitt von 40 km der gesamten Unter- und Außenelbe bezogen auf das



	Tnw nicht neutral > 2 cm; im Hinblick auf die Maßnahme sind die Veränderungen aber nicht groß) – gesondertes Gutachten (BAW, 2006a)
Tideströmungen Elbe	Veränderungen (Strömungen ändern sich auch in Abschnitten mit geringen Veränderungen der Tidewasserstände) – gesondertes Gutachten (BAW, 2006a)
Seegang	abgesehen von lokalen Effekten nicht signifikante Veränderungen (Anhang 3)
Schiffserzeugte Belastungen	Veränderungen (vor allem wenn die Bemessungsgeschwindigkeiten nicht eingehalten werden) – gesondertes Gutachten (BAW, 2006c)
Sedimenttransporte	Veränderungen (in Kapitel 11 dargestellt)
Baggern und Umlagern	abschnittsweise Veränderungen

Zunahmen der Sedimenttransporte (Sedimentfrachten) können verstärkte Erosionen oder auch zunehmende Depositionsmengen von Sedimenten an der Gewässersohle bewirken. Je nach Objektbezogenheit spricht man bei lokalen Zunahmen der Sedimentmengen von einer Sedimentation in Rinnen oder Wattgebieten, von Sedimenteintreibungen in Fahrrinnen oder in Fischgründe, von der Versandung oder der Verschlickung von Häfen, Hafenzufahrten, Prielen und Nebenflüssen oder von einer Verlandung von Gebieten, die sich schleichend dem Einfluss von Normaltiden entziehen. Bei lokalen Abnahmen der Sedimente spricht man in der Regel von Erosionen, z.B. von Vorlanderosion, Ufererosion oder Erosion von Ufervorspülungen, Stranderosion, Prallhangerosion oder auch von Erosionen, die z.B. Düker oder sonstige Bauwerke frei spülen könnten. Auch Abnahmen der Sedimenttransporte können zu Sedimentdefiziten führen, wenn bestehende Transportbänder durch bauliche Eingriffe unterbrochen werden. Die unterschiedlichen Begrifflichkeiten deuten auf vielfältige sedimentdynamische Prozesse hin, die in einer konkreten Beziehung zu den Objekten des Gewässers stehen. Nachfolgend werden für angegebene Objektkategorien des Elbeästuars die wichtigsten Feststellungen getroffen. Die Aussagen können auf andere Objekte in den bezeichneten Abschnitten gedanklich übertragen werden.

12.2 Auswirkungen auf die Unterhaltungsaufwendungen in der Fahrrinne

In den Jahren 2000 bis 2005 haben die jährlichen Unterhaltungsbaggermengen in der Bundesstrecke (Revierhoheit des WSA Hamburg, des WSA Brunsbüttel und des WSA Cuxhaven) im Mittel (auf mehrere Jahre jeweils vor und nach dem Ausbau bezogen) um mehr als 10 % zugenommen. Insbesondere ist es zu Verschiebungen der Baggerschwerpunkte nach dem Ausbau gekommen.



- In den vom WSA Cuxhaven unterhaltenen Baggerabschnitten haben in den letzten drei Jahren vor allem die Abschnitte „Östliche Mittelrinne“ und „Altenbruch“ an Bedeutung gewonnen. Die in diesen Abschnitten erfassten Zunahmen sind der Migration der Medemrinne und der damit veränderten Strömungs- und Sedimentdynamik (nicht der Fahrrinnenanpassung) zuzuschreiben. Auf die einzelnen Prozesse soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.
- Im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg haben sich die Baggerschwerpunkte zunehmend in den oberen Abschnitt (direkt unterhalb der Delegationsstrecke) verschoben. Die Ursache dafür lag einerseits in der Zunahme der Flutstromdominanz insbesondere im Bereich von Schulau. Eine weitere Ursache war die Zunahme der Baggermengen im Gebiet der Delegationsstrecke, die an der Hamburger Landesgrenze bei Ebbestrom zyklisch umgelagert wurden, vom Strom in nennenswerten Anteilen zurück zu den Baggerstellen transportiert wurden und somit in einem Kreislauf zur Vermehrung der Baggermengen geführt haben. Dieser Sachverhalt wurde von der BAW ausführlich mit Hilfe von dreidimensionalen Simulationsmodellen untersucht (BAW, 2005).

Im Gebiet der Delegationsstrecke haben sich die Baggermengen in den Jahren 2000 bis 2003 (verglichen zu den Jahren vorher) mehr als verdoppelt. Diese Zunahmen sind (wie bereits ausgeführt) auf die Maßnahme der jüngsten Fahrrinnenanpassung und auf die so genannte „Kreislaufbaggerei“, aber auch auf Maßnahmen im Hamburger Hafen und deren Zufahrten zurück zu führen. In den Jahren 2004 und 2005 haben sich die Baggermengen noch einmal verdoppelt und zwar aufgrund besonderer hydrologischer Verhältnisse (Jahresabflussmenge Neu Darchau in 2004 kleiner 15 Mrd. m³ im Vergleich zu über 26 Mrd. m³ im Vorjahr), aufgrund einer zwangsläufig verstärkten „Kreislaufbaggerei“ und aufgrund von Maßnahmen im Hamburger Hafen.

Hervorzuheben ist, dass die Unterhaltungsbaggerungen in der Bundesstrecke überwiegend aus sandigen Eintreibungen in die Fahrrinne resultieren, die in der Regel einseitig vor allem in den Kurvenabschnitten der Fahrrinnen gebaggert werden. Diese Eintreibungen bilden sich aus Transportbändern auch außerhalb des direkten Fahrrinnenverlaufs. In einzelnen Abschnitten wird über die gesamte Fahrwasserbreite gebaggert, wie z.B. im Abschnitt stromauf Glameyer Stack, am Hanskalbsand oder (in diesem Fall bezogen auf die Delegationsstrecke) im Köhlbrand.

Nach Herstellung der geplanten weiteren Anpassung der Fahrrinne werden sich die Baggerschwerpunkte wie folgt verhalten:

- An der „Mittelrinne Ost“ werden zunächst ausbaubedingte Böschungsanpassungen auftreten, welchen die Baggermengen temporär erhöhen. Diese ausbauinduzierte Zunahme wird durch die stärkeren natürlichen Veränderungen der Transportprozesse überlagert, die aus der weiter nach Norden wandernden Mündung der Medemrinne resultieren. Die Intensität der anhaltenden Nordwanderung wird teilweise durch das Strombauwerk in der Medemrinne abgeschwächt werden. Trotzdem werden im bezeichneten Baggerabschnitt



weiterhin hohe Baggermengen erwartet, die überwiegend durch die natürlichen (nicht die ausbauinduzierten) Prozesse verursacht sein werden.

- Im Baggerabschnitt Altenbruch wird es zu einer Verlagerung der Baggereinsätze kommen. Sedimente, die heute oberhalb von Glameyer Stack gebaggert werden, werden nach dem Ausbau weiter stromab wandern und im Bogen bei Altenbruch gebaggert. Es handelt sich um eine Verlagerung der Sedimentationen. Diese können durch Erosionen direkt oberhalb von Glameyer Stack noch verstärkt werden. Es wird empfohlen das Sedimentmanagement durch kleinräumiges Umlagern von stromab nach stromauf auf diese Systemreaktion hin so lange zu optimieren, bis sich die Hauptrinne und die Medemrinne auf die neuen Verhältnisse durch lokale Aufweitung der Hauptrinne und lokale Abnahme der Medemrinne adaptiert haben.
- Am Baggerabschnitt Osteriff / Neufeld Reede werden die Baggermengen in der Tendenz abnehmen, obwohl sich die Fahrrinnenböschungen insbesondere zwischen km 700 und km 705 anpassen werden.
- Im Abschnitt Rhinplate werden die Baggermengen wieder mehr als 5% der Gesamtbaggermenge in der Bundesstrecke erreichen.
- In der Strecke zwischen Pagensand Nord und Lühesand werden die heutigen Seiteneintreibungen von Baggergut im langjährigen Mittel gleich bleiben. Direkt nach dem Ausbau sind die Mengen durch lokale Rinnenanpassungen etwas größer.
- In der Begegnungsstrecke oberhalb des Lühebogens werden die Baggermengen um mehr als 50 % (bezogen auf die Baggermengen in den Baggerabschnitten Wedel und Wedeler Au) zunehmen. Das tatsächlich eintretende Maß der Zunahme hängt jedoch entscheidend vom Sedimentmanagement ab, das zukünftig zwischen der Rhinplate und dem Hamburger Hafen praktiziert wird.
- In den vor dem Ausbau bereits unterhaltenen Abschnitten oberhalb von Nienstedten werden hingegen die Baggermengen in der Tendenz abnehmen. Voraussetzung hierfür ist jedoch ein optimiertes Sedimentmanagement, das die „Kreislaufbaggerei“ reduziert. In den Bereichen, in denen die Ausbaugrenzen im Köhlbrand und in der Norderelbe weiter nach stromauf verlegt und die Zufahrten zu den Hafenbecken vertieft werden, entstehen zusätzliche lokale Sedimentationen.

In der Seeschiffahrtsstraße Elbe werden die Baggermengen insgesamt zunehmen. Unter Berücksichtigung aller in diesem Gutachten präsentierten Berechnungen und Auswertungen, der Kenntnis der derzeitigen Baggerschwerpunkte und der Baggermengenentwicklungen sowie des vorhandenen wasserbaulichen Erfahrungswissens werden die Zunahmen nachfolgend abgeschätzt. Zunächst hat die Analyse ergeben, dass die Baggermengen oberhalb von Nienstedten, wie bereits ausgeführt, nicht nennenswert zunehmen werden. Die Abschätzung der Zunahmen kann deshalb auf die Baggermengen beschränkt werden, die in den zurückliegenden Jahren im Zuständigkeitsbereich des WSA Hamburg und des WSA Cuxhaven gebaggert wurden. Als Bezugszeitraum werden hierfür die Jahre 2003 bis 2005 verwendet. In diesem Zeitraum wurde in den genannten Bereichen im Mittel 11,3 Mio. m³ pro Jahr gebaggert. Diese Menge wird nachfolgend als Bezugsbaggermenge bezeichnet.



- Da im Bezugszeitraum in den Baggerabschnitten Wedel und Wedeler Au etwa 20 % der Baggermengen aus der Bundesstrecke gebaggert wurden, bedeutet dies, dass in der Begegnungsstrecke nach dem Ausbau mehr als 30 % der Bezugsbaggermenge anfallen werden. Die ausbaubedingte Zunahme beträgt somit mehr als 10 % bezogen auf die Bezugsbaggermenge. Dabei ist neben der Zunahme im Stromauftransport der Sedimente auch zu berücksichtigen, dass die verbreiterte Begegnungsstrecke ein zusätzliches Sedimentationspotenzial bietet.
- An der Rhinplate wird mit einer Zunahme von 3 % bezogen auf die definierte Bezugsbaggermenge gerechnet. Im Bezugszeitraum betrug der Mittelwert ca. 3% der Bezugsbaggermenge, so dass an der Rhinplate wieder mehr als 5 % der Baggermengen in der Bundesstrecke anfallen werden.
- Im Altenbrucher Bogen wird es aufgrund einer zunehmenden Baggerfrequenz und längerfristiger morphologischer Anpassungsprozesse an der südlichen Flanke des Medemgrundes ebenfalls eine Zunahme von mehr als 3 % bezogen auf die definierte Bezugsbaggermenge geben. Der Prozentsatz kann nur grob geschätzt werden, weil eine Berücksichtigung des Erosionsverhaltens der Gewässerbodens mit erheblichen Unschärfen behaftet ist.
- In den weiter vertieften Abschnitten und in den Abschnitten, in denen die Strömungen in der Fahrrinne zunehmen, wird der gravitationelle Sedimenttransport (das entlang von Böschungen durch die Schwerkraft abgleitende Geschiebe) ein wenig zunehmen, so dass nach dem Ausbau mit abschnittsweise erhöhten Seiteneintreibungen gerechnet werden kann, die zeitweise am Fahrrinnenrand gebaggert werden müssen. Diese Zunahmen werden entlang der gesamten Fahrrinne ebenfalls mit 3 % (bezogen auf die definierte Bezugsbaggermenge) abgeschätzt.

Es sei noch einmal mit Nachdruck darauf hingewiesen, dass eine exakte Berechnung der zukünftigen Baggermengen nicht möglich ist. Dies ergibt sich einerseits aus den Modellunschärfen und andererseits aus der Unkenntnis der hydrologischen Verhältnisse in den Jahren und Jahrzehnten nach dem Ausbau. Ein Vergleich der betroffenen Baggerabschnitte zeigt aber eindeutig, dass die wesentlichen Zunahmen in der Begegnungsstrecke zu erwarten sind. In dieser Strecke wird auch eine nennenswerte Zunahme der Baggerflächen erwartet.

Die Zunahmen der Baggermengen könnten reduziert werden, wenn das Baggergut nach dem Ausbau nicht mehr in den flutstromdominanten Abschnitten des Systems umgelagert wird. Eine mittelfristig weiter geführte Optimierung des Systems Tideelbe sollte auch auf Grundlage von umfangreichen Naturdaten insbesondere im Hinblick auf die Erfassung der Sedimentdynamik erfolgen. Ein wesentliches Ziel liegt dabei in der Reduzierung der Baggermengen und vor allem der Kosten.

12.3 Auswirkungen auf die Zufahrt zu den Häfen

In den Hafenbecken und Liegeplätzen des Hamburger Hafens wird keine ausbaubedingte Zunahme der Sedimentationen erwartet. Wo im Bereich der Zufahrten einschließlich der Drehkreise und auch der Vorhäfen Aufweitungen realisiert werden, entstehen zwangsläufig neue Sedimentationsräume.

Am Elbehafen Brunsbüttel kann es zur Zunahme von Schlickablagerungen im oberen Zufahrtsbereich und in der Liegewanne kommen. Es wird empfohlen hier nicht auf Vorrat zu baggern, weil dadurch die Gesamtbaggermengen (in diesem Fall dann durch das Baggermanagement) zunehmen werden.

Am Elbehafen Bützfleth sind keine Zunahmen in der Unterhaltung der fahrrinnenseitigen Liegewanne zu erwarten. Lediglich im Nordhafen ist mit tendenziellen Zunahmen im Sedimentaufkommen zu rechnen.

12.4 Auswirkungen auf die Klappstellen in der Außenelbe

Die vom WSA Cuxhaven eingerichteten Klappstellen werden jährlich mit Verbringungsmengen zwischen ca. 5 Mio. m³ und 8,5 Mio. m³ versorgt. Der Abschnitt der Außenelbe befindet sich nach der Definition der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zwischen km 727,7 und km 769,4. In diesem Abschnitt liegen die Klappstellen:

- 741 Norderrinne (südlich Großer Vogelsand)
- 740 Norderrinne (südlich Gelbsand)
- 733 Zehnerloch (östlich der Fahrrinne am Spitzsand)

Zur Beurteilung der von Klappstellen im Hinblick auf den Sedimenttransport und die morphologische Entwicklung werden weiterhin die Klappstellen

- 717 Medemrinne (im Scheitel der Rinne gelegen)
- 716 Glameyer Stack (dort im nördlichen Fahrrinnenabschnitt gelegen)
- 714 Pegel Otterndorf (am südlichen Fahrrinnenrand stromauf Glameyer Stack)
- 711 Medemrinne Ost
- 706 Oste (südlicher Fahrrinnenrand stromauf Ostemündung)

in die Beurteilung einbezogen.

In den vergangenen Jahren wurden die größten Mengen auf den Klappstellen 733, 716 und 714 umgelagert. Nach Auskunft des Baggerbüros im WSA Cuxhaven ist aber mangels Kapazitäten nahezu jede Klappstelle wichtig. Die Ursache für vorübergehend weniger intensiv beschickte Klappstellen kann in einer zeitweise erschöpften Aufnahmekapazität liegen. Es ist auch zu berücksichtigen, dass die Verbringungswege im Sedimentmanagement minimiert werden. Zeitweise eingeschränkte Aufnahmekapazitäten stehen durch die natürlichen (zum Teil sehr dynamischen) Umlagerungsprozesse im Elbemündungsgebiet nach einer gewissen

Zeit wieder zur Verfügung. Die langfristige Verfügbarkeit der Klappkapazitäten darf durch den weiteren Ausbau der Fahrrinne nicht eingeschränkt werden. Was die Klappstelle 717 Medemrinne angeht, muss jedoch angemerkt werden, dass die vom WSA Cuxhaven in der Unterhaltung vornehmlich eingesetzten Hopperbagger zu große Tiefgänge aufweisen, um diese Klappstelle anfahren zu können. Kleinere Hopperbagger mit Tiefgängen bis zu 6 m (Laderaumvolumen 3000 - 4500 m³) können die Klappstelle im Medembogen aber aufsuchen.

Die Klappstellen 741 und 740 in der Norderrinne und die Klappstelle „733 Zehnerloch“ werden in ihrer Aufnahmekapazität durch den weiteren Ausbau nicht beeinträchtigt. Nach dem Ausbau erreichen die maximalen Flut- und Ebbestromungsgeschwindigkeiten (gemittelt über die Wassertiefe) im Gebiet der Klappstellen - wie auch schon im Vergleichszustand - Werte von 1,2 m/s bis 1,4 m/s.

Die Klappstelle „711 Medemrinne Ost“ wird in ihrer Lage teilweise durch das Strombauwerk in der Medemrinne überdeckt. Die mit mehr als 60 % verbleibende Fläche kann nach Realisierung der Maßnahmen weiterhin als Klappstelle Verwendung finden. Die Aufnahmekapazität wird sich aber nicht so schnell wie vor Herstellung der Maßnahmen wieder regenerieren können. Die sich einstellenden Formänderungen der Sohle wären nach den Verklappungen durch Unterhaltungspeilungen zu beobachten.

Die Klappstelle „717 Medemrinne“ sollte (wenn dies aufgrund des erforderlichen Geräts wirtschaftlich vertretbar ist) nach Realisierung der Maßnahme wieder aktiviert werden, um die tiefen Bereiche im Scheitel der Medemrinne mit Sand zu versorgen. Damit kann die morphologische Anpassung der Rinne beschleunigt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass im Bogen der Medemrinne nach Einbau des Strombauwerks immer noch maximale Strömungen von bis zu 1,2 m/s herrschen werden. Kapazitäten, die an der Klappstelle „Medemrinne Ost“ verloren gehen, könnten an der Klappstelle 717 erschlossen werden.

Die Klappstellen „716 Glameyer Stack“ und „714 Pegel Otterndorf“ werden sich nach Herstellung der Maßnahme schneller regenerieren als in der heutigen Situation. Dies ergibt sich aus der Ebbestromdominanz, die maßnahmenbedingt in diesem Abschnitt noch zunehmen wird. Die vertikal gemittelten, maximalen Ebbestromungsgeschwindigkeiten erreichen hier nach dem Ausbau und nach einer kurzen Zeit der morphologischen Anpassung Werte von über 1,6 m/s.

Auch im Bereich der Klappstelle „706 Oste“ nehmen die maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten ausbaubedingt zu, so dass nach Herstellung der Maßnahmen auch hier ein verbessertes Regenerationspotenzial zu erwarten ist.

12.5 Auswirkungen auf Sportboothäfen und Freizeitanlagen

Die Sportboothäfen an der Tideelbe liegen überwiegend in Gebieten mit geringer Tideströmung. Wenige Sportboothäfen (z.B. in Glückstadt, Wedel oder Finkenwerder) sind unabhängig von der Tide jederzeit erreichbar. Alle anderen Häfen fallen bei Tideniedrigwasser entweder vollständig trocken oder bieten zu wenig Wassertiefe. Die Wassertiefe nimmt im Laufe der Jahre und Jahrzehnte ab, weil ein mit suspendierten Sedimenten befrachteter Wasserkörper in strömungsberuhigten Zonen zu Verschlickungen führt. Dieser Prozess ist den Menschen an der Küste seit Jahrhunderten bekannt. Im Zusammenhang mit dem Ausbau der Seeschiffahrtsstraße Elbe ist zu beurteilen, ob der Naturprozess „Verschlickung“ durch derartige Maßnahmen beschleunigt werden kann.

Grundsätzlich sind folgende Wirkungsmechanismen zu unterscheiden:

- Wenn der Tidehub ausbaubedingt ansteigt, wird im Hafen eine größere Wassermenge im Rhythmus von Flut und Ebbe ausgetauscht. Wenn die Konzentration der suspendierten Sedimente im Wasserkörper vor und nach dem Ausbau gleich bleibt, kommt es dennoch zu einer geringfügigen Zunahme in der Sedimentation von Schlickmengen. Bei einer Zunahme des Tidehubes von 10 cm kann man an der Tideelbe von einer Zunahme der Verschlickung um ca. 3 % sprechen.
- Wenn der Tidehub ausbaubedingt nicht ansteigt, die Konzentration der suspendierten Sedimente im Wasserkörper aber durch ausbaubedingt verstärkte Strömungen zunimmt, kommt es ebenfalls zu einer Zunahme in der Sedimentation von Schlickmengen. Wenn die Konzentration des Wasserkörpers, der mit dem Flutstrom den Hafen füllt, z.B. 0,1 g/l beträgt und die ausbauinduzierte Zunahme 3 mg/l beträgt, kann man ebenfalls von einer Zunahme der Verschlickung um ca. 3 % sprechen.
- In der Summationswirkung der beiden Prozesse (Zunahme Tidehub und Zunahme der Suspensionskonzentration) kommt es folglich zu einer verstärkten Zunahme in der Sedimentation von Schlickmengen. Die Summation der beiden vorher beispielhaft genannten Anteile aus der Zunahme des Tidehubes und der Zunahme der suspendierten Sedimentkonzentration ergibt eine Zunahme der Verschlickung um ca. 6 %.

Die angeführten Beispiele zeigen, dass Maßnahmen zur Minimierung der ausbaubedingten Zunahme des Tidehubes und der ausbaubedingten Zunahme der Suspensionskonzentration auch einen direkten Bezug zu den Betroffenheiten des Bürgers haben.

Dies sind die wichtigsten Kriterien, nach denen aus der Sichtweise eines Gutachters (der sich mit den Veränderungen in der gesamten Tideelbe zu befassen hat) auf die Verschlickung der Sportboothäfen und auch der Freizeitanlagen (z.B. Strände) eingegangen werden kann. Die BAW-DH hat in den vergangenen Jahren ihre Methoden und Verfahren weiter entwickelt, so dass nunmehr für die anstehende Elbvertiefung auf konkrete Berechnungsergebnisse Bezug genommen werden kann. Bauliche Veränderungen im Sportboothafen oder in einem angeschlossenen Gewässer, welches über das Hafengebiet mit der Elbe verbunden ist, können und sollen hier nicht berücksichtigt werden. Sportboothäfen, die oberhalb

von Sperrwerken liegen, werden in ihrem Sedimentationsverhalten natürlich auch durch die Schließzeiten der Sperrwerke beeinflusst. Da diese sich nicht ausbaubedingt verändern werden, wird dieser Sachverhalt hier nicht weiter betrachtet.

Aufgrund der weiter entwickelten Methoden und Verfahren bieten die numerischen Simulationen die Möglichkeit, auch kleine "Tendenzen" ausbaubedingter Änderungen zu erkennen. Dies erweitert das Systemverständnis und erleichtert die Ergebnisbewertung. Wie schon erläutert, werden nicht signifikante Änderungen als „tendenziell“ bezeichnet. Signifikante Änderungen werden i.d.R. mit (wenn auch möglicherweise nur langfristig messbaren) Ausbauwirkungen in Verbindung gebracht. Sie können in der Bewertung zwischen „schwachen“ und „starken“ Ausbauwirkungen liegen. Tendenzielle Änderungen werden mit Untersuchungen im Felde kaum nachzuweisen sein.

Bevor auf die Verhältnisse an einzelnen Sportboothäfen eingegangen wird, sei noch angemerkt, dass sich das Schlickfallpotenzial an der Elbe im Verlauf der vergangenen Jahrzehnte durch Küstenschutzmaßnahmen (ausgedehnte Flächen sind am Elbstrom und seinen Nebenflüssen für den Schlickfall bei Sturmfluten verloren gegangen) und durch in der Häufigkeit zunehmende Umlagerungen schluffigen Baggergutes verändert hat.

Unter Berücksichtigung der Berechnungsergebnisse für die flächenhaften ausbaubedingten Veränderungen des Tidehubes und der maximalen Konzentrationen im Wasserkörper suspendierter Sedimente werden nachfolgend mögliche Betroffenheiten für die Sportboothäfen an der Elbe dargestellt. Um eine auf der sicheren Seite liegende Bewertung abgeben zu können wurden die maximalen (nicht die mittleren) Suspensionskonzentrationen betrachtet. Werte für die ausbaubedingten Zunahmen des Tidehubes wurden aufgerundet.

Sportboothäfen in Schleswig Holstein

- Friedrichskoog (oberhalb Sperrwerk)
Keine ausbaubedingte Zunahme des Tidehubes. Keine ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
➔ Betroffenheit ist nicht gegeben.
- Neufeld
Abnahme des Tidehubes. Keine ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe. Zu Berücksichtigen ist noch die Möglichkeit des Eintreibens von Feststoffen in das Außentief (siehe Kapitel 12.8).
➔ Betroffenheit ist zeitweise gegeben.
- Brunsbüttel
Abnahme des Tidehubes. Abnahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
➔ Betroffenheit ist nicht gegeben.
- Störloch / Borsfleth (oberhalb Störsperrwerk)
Keine signifikante Tidehubänderung. Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 8 mg/l).



- Betroffenheit ist gegeben.
- Wewelsfleth (oberhalb Störsperrwerk).
Keine signifikante Tidehubänderung. Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 8 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Glückstadt Außen- und Innenhafen
Geringe Zunahme des Tidehubes (ca. 2 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 3 mg/l).
→ Schwache Betroffenheit ist gegeben.
- Bielenberg
Geringe Zunahme des Tidehubes (ca. 2 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 8 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Kollmar
Zunahme des Tidehubes (ca. 3 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 6 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Krückaumündung (oberhalb Krückausperrwerk)
Zunahme des Tidehubes (ca. 3 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 6 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Pinnaumündung (oberhalb Pinnausperrwerk)
Zunahme des Tidehubes (ca. 3 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 4 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Haseldorf
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 5 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Hetlingen
Zunahme des Tidehubes (ca. 5 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 3 mg/l). Indirekte Betroffenheit durch das Umlagern von Baggergut kann nicht ausgeschlossen werden.
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Wedel
Zunahme des Tidehubes (ca. 5 cm). Geringe ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe. Indirekte Betroffenheit durch das Umlagern von Baggergut kann nicht ausgeschlossen werden.
→ Betroffenheit ist gegeben.

- Schulau
Zunahme des Tidehubes (ca. 5 cm). Geringe ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe. Indirekte Betroffenheit durch das Umlagern von Baggergut kann nicht ausgeschlossen werden.

→ Betroffenheit ist gegeben.

Sportboothäfen in Niedersachsen

- Cuxhaven
Geringe Zunahme des Tidehubes (ca. 2 cm). Geringe Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Betroffenheit ist nicht gegeben.
- Altenbruch
Zunahme des Tidehubes (ca. 3 cm). Geringe Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe. Es kommt zu morphologischen Anpassungsprozessen.
→ Temporäre Betroffenheit ist gegeben.
- Otterndorf (Medem)
Abnahme des Tidehubes. Geringe Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Betroffenheit ist nicht gegeben.
- Neuhaus (oberhalb Ostesperrwerk)
Abnahme des Tidehubes. Keine Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Betroffenheit ist nicht gegeben.
- Freiburg (oberhalb Sperrwerk Freiburger Hafentriel)
Abnahme des Tidehubes. Keine Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Betroffenheit ist nicht gegeben.
- Wischhafen (oberhalb Sperrwerk Wischhafener Süderelbe)
Keine signifikante Tidehubänderung. Keine Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Betroffenheit ist nicht gegeben.
- Ruthenstrom
Zunahme des Tidehubes (ca. 3 cm). Geringe Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Schwache Betroffenheit ist gegeben.
- Barnkrug (Barnkruger Loch)
Zunahme des Tidehubes (ca. 3 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 5 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Abbenfleth (oberhalb Sperrwerk Bützflether Süderelbe)
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 5 mg/l).



- Betroffenheit ist gegeben.
- Stadersand (oberhalb Sperrwerk Schwinge)
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm an Schwingemündung). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 5 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Lühe (stromauf Lühesperrwerk)
Zunahme des Tidehubes (ca. 5 cm). Geringe ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Neuenschleuse Borstel
Zunahme des Tidehubes (ca. 5 cm). Keine ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Buxtehude (stromauf Estesperwerk)
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm an Estemündung). Geringe ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe an der Mündung.
→ Betroffenheit ist nicht gegeben.

Sportboothäfen in Hamburg

- Mühlenberg
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm). Geringe ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Schwache Betroffenheit ist gegeben.
- Teufelsbrück
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm). Geringe ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Schwache Betroffenheit ist gegeben.
- Finkenwerder
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 5 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.
- Hamburg City
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm). Geringe ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe.
→ Schwache Betroffenheit ist gegeben.
- Harburg
Zunahme des Tidehubes (ca. 4 cm). Ausbaubedingte Zunahme des maximalen Gehalts suspendierter Feststoffe (bis 5 mg/l).
→ Betroffenheit ist gegeben.

12.6 Auswirkungen auf erosionsgefährdete küstennahe Watten

Im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer sind keine ausbaubedingten Veränderungen zu erwarten, weil hier nur tendenzielle Änderungen der Kenngrößen für die Wasserstände, Strömungen und Sedimenttransporte eintreten.

Diese Aussage gilt auch für den Nationalpark Hamburgisches Wattenmeer.

Im Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer werden ausbauinduzierte Veränderungen insbesondere am Medemsand, am Kratzsand und am Spitzsand eintreten, weil die Erosionsraten an der Südkante des Medemsandes durch den Strombau in der Medemrinne vermindert werden. Es kommt zu geringeren jährlichen Umlagerungsmengen. Die in ihrer eignen Dynamik abgebremste Erosion wird für den Nationalpark keine Nachteile mit sich bringen. Im Klotzenloch werden die Tidehübe um maximal 2 cm zunehmen. Die mittlere Flutdauer wird tendenziell abnehmen, so dass mit einer tendenziellen Zunahme des Transports von Sedimenten in Richtung Küstenlinie gerechnet werden kann.

Die Maßnahme in der Medemrinne ist wichtig, weil in den vergangenen Jahren die nördliche Böschung der Medemrinne im Abschnitt unmittelbar stromauf von der Medem-Reede mit einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 200 m pro Jahr nach Norden gewandert ist. Wenn diese Wanderungsgeschwindigkeit beibehalten wird, bricht die Medemrinne in ca. 15 Jahren östlich vom Spitzsand in das Klotzenloch ein. Bei diesem Szenario wurde noch nicht berücksichtigt, dass sich das Klotzenloch nach Süden auf die Medemrinne zu bewegt. Nach dem Einbruch wird sich vom Spitzsand über den Kratzsand bis zum Medemgrund eine durchgängige Sedimentationszone bilden. Die beschriebenen Zusammenhänge laufen unabhängig von den Fahrrinnenanpassungen ab.

Von der Medemrinne-Ost bis zum Elbehafen Brunsbüttel werden die Tidehübe ausbaubedingt reduziert. Dennoch kommt es zu Zunahmen der mittleren Flutströmungen (maximal +7 cm/s) auf dem Watt nördlich der Unterwasserablagerung in der Medemrinne und auf dem Watt westlich der Zufahrt zum Hafen Neufeld. Diese Veränderungen sind jedoch nicht mit einer nachhaltigen Erosionsgefahr verbunden.

12.7 Auswirkungen auf die Nebenarme der Unterelbe

Die Nebenelbe am Schwarztonnensand, die Pagensander Nebenelbe, die Haseldorfer Binnenelbe, die Lühesander Nebenelbe und die Hahnöfer Nebenelbe mit dem Mühlenberger Loch sind sowohl aus naturschutzfachlicher Sicht als auch aus Sicht des Wasserbauers von erheblicher Bedeutung. Wenn wir einmal im Sinne einer Systemstudie annehmen, dass z.B. die Hahnöfer Nebenelbe im Verlaufe des kommenden Jahrhundert durch Sedimentation und sonstige Maßnahmen keinen Flutraum mehr für Normaltiden bieten würde, so wäre die primäre Folge, dass insbesondere des Tideniedrigwasser in Hamburg sehr viel weiter fällt, als es dies bisher schon getan hat. Eine weitere Folge wären erheblich zunehmende Bagger-

mengen in der Delegationsstrecke. Der Flutraum in den Nebanelben sollte deshalb so weit wie möglich erhalten bleiben. Wasserbauliche Maßnahmen dürfen die natürlichen Tendenzen zur Sedimentation deshalb nicht verstärken.

Im Kapitel 11.4.8 wurden Bilanzierungen dargestellt, die Auskunft geben über die Abschätzung der ausbaubedingten Zunahmen des Eintrages suspendierter Sedimente in die Nebanelben. Durch das Design der Fahrrinnenanpassung und durch die Minimierungsmaßnahmen für die Veränderung des Tideniedrigwassers konnte für die empfindliche Hahnöfer Nebanelbe eine ausbaubedingte Verminderung der Eintragsmengen suspendierter Sedimente (im Mittel um -10%) erreicht werden.

Wünschenswert wäre für die Pagensander Nebanelbe, dass die Eintragsmengen nicht zunehmen. Dieses Ziel konnte nicht vollständig erreicht werden, weil hier noch signifikante ausbaubedingte Zunahmen von +5 % zu verzeichnen sind. In der gewichteten Bewertung mit -10% in der Hahnöfer Nebanelbe und +5% in der Pagensander Nebanelbe kann bezogen auf diese Nebanelben jedoch nicht von einer ausbauinduzierten Verschlechterung des Gesamtsystems gesprochen werden.

Die Veränderungen in den kürzeren Nebanelben am Lühesand (+2%) und am Schwarztone sand (+6%) sind in der Gewichtung niedriger einzustufen. Diese Nebanelben können bei größeren Oberwassermengen (als den für die Analyse zugrunde gelegten 350 m³/s) besser durchströmt werden, so dass ihre Tendenzen zur Aufsedimentation geringer einzuschätzen sind.

In der Glückstädter Nebanelbe entsteht ausbaubedingt keine Tendenz zur Aufsedimentation. Hinzu kommt, dass die natürlichen Sedimentationen hier nur einen sehr geringen Einfluss auf die Wasserstandsentwicklungen im Hamburger Raum ausüben.

12.8 Auswirkungen auf die Siel-Außentiefs

Der Zustand von Siel-Außentiefs ist von vielfältigen Faktoren abhängig, die nur im Ansatz prognostisch im Zusammenhang mit Fahrrinnenanpassungen behandelt werden können. Kennwerte zur Bewertung ausbauinduzierter Auswirkungen sind die Veränderungen des Tideniedrigwassers, Veränderungen in der Querüberströmung des Außentiefs und Veränderungen der suspendierten Sedimentkonzentrationen.

Wenn nachfolgend nur die Objekte angesprochen werden, an denen signifikante Veränderungen erwartet werden können, so bleibt nur das Neufelder Außentief. An diesem ist aufgrund der Unterwasserablagerung von Sediment am Neufelder Sand mit einer veränderten Querüberströmung zu rechnen. Durch Seegang westlich vom Außentief aufgenommene schluffige Sedimente können mit der etwas verstärkten Strömung über dem Watt zu geringfügig höheren Sedimentationen im Außentief führen. Eine Betroffenheit kann deshalb nicht



vollständig ausgeschlossen werden. Durch Beweissicherung wird sie jedoch nicht nachzuweisen sein.

Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Hamburg, 31.08.2006

Im Auftrag

Bearbeiter

Bearbeiter

gez. Winkel

gez. Heyer

gez. Weilbeer

.....
Dr. Winkel
(Regierungsdirektor)

.....
Dr.-Ing. H. Heyer
(Leit. Regierungsdirektor)

.....
Dr.-Ing. H. Weilbeer
(Wiss. Angestellter)

Literaturverzeichnis

ARGE Elbe. Stoffkonzentrationen mittels Hubschrauber entnommener Elbewasserproben (1979 – 1989). Bericht. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe. 2000.

<http://www.arge-elbe.de/wge/Download/Berichte/00Hubschr.pdf>

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Untersuchung des Sedimenttransportregimes in der Unterelbe als Grundlage für die Optimierung der Baggerstrategie für den Hamburger Hafen, Gutachten im Auftrag der Hamburg Port Authority, 2005.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe - Ausbaubedingte Änderung von Tidedynamik und Salzgehalt, Gutachten BAW-Nr. A39550310062, 2006a.

BAW (2006 a). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Tidedynamik und Salzgehalt. BAW-Nr. A39550310062, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

BAW (2006 b). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Gutachten zu ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen. BAW-Nr. A39550310062, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

BAW (2006 c). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. BAW-Nr. A39550310062, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW 2006 d): Systemstudien mit verschiedenen mathematischen Simulationsverfahren zur morphologischen Entwicklung im Medemgebiet – Interne Studie.

Freie und Hansestadt Hamburg, Wirtschaftsbehörde, Strom- und Hafenbau: Umlagerung von Baggergut aus dem Hamburger Hafen in der Tideelbe, 1997.

Kappenberg, J., Schymura, G., Kuhn, H., Fanger, H.-U.: Spring-neap variations of suspended sediment concentration and transport in the turbidity maximum of the Elbe estuary. *Arch. Hydrobiolog. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 47, pages 323 – 332, Stuttgart, 1996.



Leussen, W. van: Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. PhD thesis, University of Utrecht, Netherlands, 1994.

Lesser, G.R., Roelvink, J.A., v. Kester, J.A.T.M., Stelling, G.S.: Development and validation of a three-dimensional morphological model, *Coastal Engineering*, 51, pp. 883-915, 2004.

Malcherek, A.: Mathematische Modellierung von Strömungen und Stofftransportprozessen in Ästuaren. Bericht Nr. 44, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 1995.

Manning, A.J.: The development of new algorithms to parametrise the mass settling flux of flocculated estuarine sediments. Presented at IntercoH 2005, Saga, Japan, 2005.

Maushake, C.: Messung der ästuarinen Schwebstoffdynamik als Validierungsgrundlage für die HN-Modellierung. Vortrag zum BAW-Kolloquium, 10. November 2005, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Hamburg, 2005.

<http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/event/2005-11-10/Vortrag3.pdf>.

Milbradt, P., Plüß, A.: Numerical Modelling of Wave Current Interaction in an Estuary, COPEDEC VI, 2003.

Spearman, J., Roberts, W.: Comparison of flocculation models for applied sediment transport. *Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment*. Elsevier Science B.V., pp. 277-293, 2002.

"WSD Nord & BWA – Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord & Behörde für Wirtschaft und Arbeit: Geplante Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt. Festlegung des Untersuchungsrahmens gem. § 5 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Kiel/Hamburg, 2005.