

Inhalt	Seite
<b>2</b>	<b>SCHUTZGUT WASSER, OBERIRDISCHE GEWÄSSER - HYDROLOGIE UND MORPHOLOGIE..... 1</b>
<b>2.1</b>	<b>Einleitung ..... 1</b>
<b>2.2</b>	<b>Auswirkungen des Vorhabens auf die Tidewasserstände..... 3</b>
2.2.1	Modell.....3
2.2.2	Auswirkungen des Vorhabens .....5
<b>2.3</b>	<b>Auswirkungen des Vorhabens auf die Salzgehaltsverhältnisse ..... 9</b>
2.3.1	Modell.....9
2.3.2	Auswirkungen .....10
2.3.3	Zusammenfassung .....13
<b>2.4</b>	<b>Auswirkungen des Vorhabens auf die Sturmflutwasserstände ..... 13</b>
2.4.1	Modell.....13
2.4.2	Auswirkungen .....16
2.4.3	Zusammenfassung .....18
<b>2.5</b>	<b>Auswirkungen des Vorhabens auf den Schwebstoffhaushalt ..... 18</b>
2.5.1	Modell.....18
2.5.2	Auswirkungen .....25
<b>2.6</b>	<b>Auswirkung des Vorhabens auf die Morphologie ..... 30</b>
2.6.1	Modell.....30
2.6.2	Auswirkungen .....30
2.6.3	Zusammenfassung .....35
<b>2.7</b>	<b>Auswirkungen des Vorhabens auf Schiffswellen ..... 36</b>
2.7.1	Methodische Vorgehensweise .....36
2.7.2	Schiffswellensituation im Ist-Zustand.....38
2.7.3	Ausbaubedingte Veränderungen .....41
2.7.4	Schlussfolgerung .....47
<b>2.8</b>	<b>Auswirkungen des Vorhabens auf den Seegang ..... 48</b>
2.8.1	Modellverfahren .....48
2.8.2	Modellergebnisse .....49

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.7-1: Schiffswellen in unbeschränktem Fahrwasser (Unterlage H.1d) .....	39
--	----

## **2 SCHUTZGUT WASSER, OBERIRDISCHE GEWÄSSER - HYDROLOGIE UND MORPHOLOGIE**

In diesem Abschnitt des zusammenfassenden UVU-Berichts (UVS) werden die Auswirkungen des Vorhabens auf die Hydrologie, die Schwebstoffe, die Morphologie, die Schiffswellen und den Seegang im Untersuchungsgebiet beschrieben. Grundlage dieser Darstellung sind die Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), die im Planfeststellungsantrag als Unterlage H.1 enthalten sind. Es sind dies im Einzelnen:

- Unterlage H.1a: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport
- Unterlage H.1b: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der Sturmflutkenngößen
- Unterlage H.1c: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse
- Unterlage H.1d: Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der schiffserzeugten Belastungen
- Unterlage H.1e: Gutachten zur Auswirkung der Nullvariante
- Unterlage H.1f: Gutachten zum Verbringungskonzept für Umlagerungen im Medembogen und im Neuen Luechter Grund

### **2.1 Einleitung**

Die Gutachten der BAW (Unterlage H.1) betrachten die Auswirkungen des Vorhabens auf die folgenden physikalischen Kenngrößen:

- Wasserstände und Veränderung der Tidewelle, z. B. der Flut- und Ebbedauern
- Strömungsgeschwindigkeiten
- Salzgehalte
- Sedimentkonzentrationen (synonym wird hier oft der Ausdruck Schwebstoffkonzentration gebraucht)
- Sedimenttransport und daraus resultierende morphologische Veränderungen (Umgestaltungen des Gewässerbettes)
- Schiffs- und Seegangswellen.

Für die Prognose der ausbaubedingten Wirkungen auf diese physikalischen Kenngrößen bedient sich die BAW der sogenannten wasserbaulichen Systemanalyse, die auf der Anwendung numerischer Simulationsverfahren beruht. Mit diesen Simulationsverfahren werden zwei- und dreidimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle des Elbästuars erstellt, welche die physikalischen Prozesse auf der Basis von Erhaltungsgleichungen (partielle Differentialgleichungen) abbilden.

Das überwiegend eingesetzte numerische Verfahren „UnTRIM“ ist ein semi-implizites Finite-Differenzen (Volumen)-Verfahren zur numerischen Lösung der dreidimensionalen Flachwassergleichungen sowie der dreidimensionalen Transportgleichung für Salz und suspendierte Elemente. Das Modellgebiet - hier das Elbästuar - wird dabei in Form eines unstrukturierten orthogonalen Gitters in diskrete Teilgebiete aufgeteilt. Bei

einigen Teilgutachten - insbesondere dem zur Morphologie - werden auch andere numerische Verfahren wie z. B. „Telemac“ oder „Delft3D“ eingesetzt. In den die Prognose beschreibenden Kapiteln wird darauf, sofern erforderlich, noch einmal gesondert eingegangen.

Die Erhaltungsgleichungen berücksichtigen die folgenden wesentlichen physikalischen Prozesse (eine Auswahl):

- Impuls- und Massenerhaltung des Fluids (in Form der Reynolds gemittelten Navier-Stokes-Gleichung)
- Lokale Beschleunigung (Massentreck)
- Advective Beschleunigung
- Coriolis-Beschleunigung
- Barodruckgradient
- Barokliner Druckgradient
- Hydrostatische oder nichthydrostatische Druckverteilung
- Horizontale turbulente Viskosität (lokal isotroph, zeit- und ortsvariabel)
- Turbulente Viskosität in Vertikalrichtung unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung
- Bodenreibung
- Impulseintrag durch den Wind
- Quellen und Senken (in Form von Zu- und Abflüssen)
- Transport konservativer Tracer (z. B. Salzgehalt)
- Advektiver Transport durch die Strömung (z. B. Schwebstoff).

Die physikalischen Prozesse bzw. die benötigten physikalischen Kenngrößen verändern sich nicht nur mit dem Ort (innerhalb des Modellgebietes, also des Ästuars), sondern auch mit der Zeit. Das Ergebnis einer Simulationsrechnung ist deswegen eine Zeitreihe von Berechnungswerten für

- die Wasserspiegelauslenkung der freien Oberfläche,
- die Strömungsgeschwindigkeit,
- die Konzentrationen (z. B. Salzgehalt oder Schwebstoff),
- den hydrodynamischen Druck und
- die Kenngrößen der Morphologie.

Die für jeden Berechnungspunkt vorliegenden Zeitreihen werden einer statistischen Analyse zugeführt, mit deren Hilfe Tidekennwerte bestimmt werden können (sog. *Tidekennwertanalyse*). Erst mit diesem Zwischenschritt wird es möglich, die zeitliche Variabilität der physikalischen Prozesse in kennzeichnende Zahlenwerte zu fassen und so einer Begutachtung zugänglich zu machen. Da die zeitliche Variation dieser physikalischen Kenngrößen im Wesentlichen durch den Tiderhythmus bestimmt werden, werden diese statistischen Kenngrößen auch Tidekennwerte genannt.

Eine ausführliche Beschreibung der Auswertemethode Tidekennwertanalyse befindet sich auf den Internetseiten der BAW ([www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/methoden/](http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/methoden/)).

Das numerische Modell wird für die beiden zu betrachtenden geometrischen Situationen des Elbästuars, nämlich den Ist-Zustand und den geplanten Ausbauzustand erstellt. Für beide Zustände wird die Tidekennwertanalyse durchgeführt. Aus den Differenzen der Tidekennwerte ergeben sich die durch das Modell berechneten Wirkungen des Vorhabens. Die gutachterliche Prognose der BAW ordnet diese durch das Modell berechneten Wirkungen in das vorhandene Expertenwissen über Ästuarhydrologie und –morphologie ein und leitet so eine Prognose der zu erwartenden Auswirkungen ab.

## **2.2 Auswirkungen des Vorhabens auf die Tidewasserstände**

Die Auswirkungen des Vorhabens auf die Tidewasserstände sind im Gutachten der BAW „zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport“ (Unterlage H.1a) beschrieben.

### **2.2.1 Modell**

Die Ausdehnung des Modells wurde so gewählt, dass die maßgebenden physikalischen Prozesse bei Normaltiden innerhalb des Modellgebietes nachgebildet werden können, ohne dass die Auswirkungen des Ausbaus den Rand erreichen. Das Modell hat seinen oberstromigen Rand am Wehr Geesthacht. Der seeseitige Rand wird durch eine Verbindungslinie zwischen Saalenburg - Neuwerk - Nigehörn (dem höchsten Watrückten folgend) - Bake A - nach Norden bis Höhe nördlich Blauortsand - nach Osten bis an die schleswig-holsteinische Küste definiert. In der Horizontalen wird das Modellgebiet in 140.000 unregelmäßige Drei- und Vierecke aufgeteilt. Zusammen mit einer vertikalen Auflösung von 1 m führt dies zu etwa zu 1 Million Elementen. Dabei variieren die Kantenlängen des Netzes zwischen 1,4 m bis 1.368,05 m. Die häufigste Kantenlänge liegt bei 50 m. Von den Nebenflüssen der Elbe sind die Oste und die Stör Bestandteil des Modellgebietes (siehe auch Unterlage H.1a, Bild 1).

Zur Durchführung einer Simulationsrechnung werden an den durchströmten Rändern des Modells Zeitreihen von Randwerten vorgegeben. Dies sind am oberstromigen Rand der Oberwasserzufluss sowie am unterstromigen Rand der Wasserstand.

Für den Oberwasserzufluss wurden durch die BAW zwei Szenarien ausgewählt:

- ein niedriger und gleichzeitig häufig auftretender Oberwasserzufluss von 350 m<sup>3</sup>/s sowie
- ein hoher Oberwasserzufluss von 1.500 m<sup>3</sup>/sec.

Der Oberwasserzufluss in der Größenklasse 350 m<sup>3</sup>/s (325 - 375 m/s) tritt mit fast 12 % Anteil im Jahr am häufigsten auf. Diese Größenklasse wird von nur 10 % aller Abflussereignisse unterschritten, weswegen dieser Abfluss gleichzeitig als niedriger Abfluss gewertet werden kann. Der gewählte hohe Abfluss von 1.500 m<sup>3</sup>/s wird von lediglich 7 % aller Ereignisse überschritten und ist deswegen ein mit einer genügenden Häufigkeit auftretender hoher Oberwasserzufluss (siehe Unterlage H.1a, Bild 31 und Bild 32).

Im Mai 2002 wurden umfangreiche Naturmessungen durchgeführt, um Zeitreihen für die Randwerte, wie auch Zeitreihen physikalischer Kenngrößen im Modellgebiet zu gewinnen. Als Simulationszeitraum wurde der 3. bis 26. Mai 2002 gewählt. Darin umfasst der Analysezeitraum die Zeitspanne vom 11. bis zum 25. Mai 2002. Dies ist ein vollständiger Spring-Nipp-Zyklus. In Unterlage H.1a, Abschnitt 4.1, wird eine hydrologische Analyse dieses Zeitraumes durchgeführt. Zusammenfassend kann dieser Zeitraum mit seinen Tidekennwerten wie folgt charakterisiert werden:

Die Werte für das mittlere Tidehoch- und Niedrigwasser des Monats Mai 2002 liegen durchgängig unterhalb der Werte für das 5-jährige Mittel, wobei das Tidehochwasser zwischen 2 cm und 9 cm und das Tideniedrigwasser zwischen 1 cm und 35 cm niedriger liegen. Gegenüber mittleren Verhältnissen sind im Mai 2002 höhere Tidehübe beobachtet worden, die auf einem niedrigen Tidemittelwasser eintraten. Durch den etwas höheren Tidehub ist sichergestellt, dass die Wirkungen des Ausbaus in der Simulationsrechnung deutlich hervortreten. Während des Analysezeitraumes betrug der mittlere Oberwasserzufluss der Elbe 710 m<sup>3</sup>/s (von 840 m<sup>3</sup>/s auf 570 m<sup>3</sup>/s absinkend).

Für den beschriebenen Zeitraum wurde eine Validierung des Modells durchgeführt, die in der Anlage 8 der Unterlage H.1a dargestellt ist. Die Simulationsergebnisse wurden mit folgenden Messdaten verglichen:

- Wasserstandsmessungen an den diversen Pegelstandorten im Elbästuar
- Messungen der Strömungsgeschwindigkeit an neun über das Elbästuar verteilten Dauermessstationen
- Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten mit stationären ADCP<sup>1</sup>-Geräten an fünf Orten, die im Ergebnis zu sog. Zeittiefendiagrammen der Strömungsgeschwindigkeit führen
- ADCP-Profilmessungen der Strömungsgeschwindigkeiten auf 15 Querprofilen, die vom fahrenden Schiff aus eine Momentaufnahme der Strömungsgeschwindigkeiten im Tidezyklus zeichnen
- Messungen des Salzgehaltes an den vorgenannten Langzeitmessstationen
- Messung des Salzgehaltes in Zeittiefendiagrammen wie vorstehend bei der Strömungsgeschwindigkeit beschrieben.

Die BAW kommt anhand des Vergleiches von berechneten und den vorgenannten gemessenen Werten zu dem Ergebnis, dass das Modell in jedem Abschnitt des Untersuchungsgebietes die maßgeblichen Systemeigenschaften der Hydrodynamik (und hier auch des Transports gelösten Salzes) wiedergibt. Unter dieser Voraussetzung kann gemäß BAW davon ausgegangen werden, dass die ausbaubedingten Änderungen als Folge maßvoller Formänderung der Strömungsberandung (also des Gewässerbettes) belastbar bestimmt werden und das Modell daher prognosefähig ist.

---

<sup>1</sup> Acoustic-Doppler-Current-Profiler: Messgeräte, die mit Ultraschall nach dem Doppler-Prinzip arbeitend und Strömungsgeschwindigkeiten entlang des ausgesendeten Ultraschallstrahls messen können.

## 2.2.2 Auswirkungen des Vorhabens

Die Vertiefung einer Schifffahrtsrinne in einem Ästuar führt zu den folgenden grundlegenden Veränderungsmustern (Unterlage H.1a, Abschnitt 5.2):

- In der vertieften Fahrrinne nimmt das Volumen und somit die Masse des strömenden Wasserkörpers zu.
- Dadurch verringert sich die Wirkung der Bodenreibung auf die strömende Wassermasse, so dass die einlaufende Tidewelle weniger gedämpft wird. Infolgedessen dringt mehr Tideenergie nach stromauf und vergrößert dort den Tidehub.
- Die Zunahme des Tidehubs verstärkt die Strömungsgeschwindigkeit, insbesondere in den Fahrrinnenabschnitten, in denen keine oder nur geringfügige Vertiefungen realisiert werden.
- In Fahrrinnenabschnitten, in denen die größten Vertiefungen oder Aufweitungen hergestellt werden, nimmt die Strömung dann ab, wenn der Tidehub nur geringfügig (< 3 %) zunimmt.

Fahrrinnenabschnitte, deren Querschnitte durch den Einbau von Unterwasserablagerungsflächen reduziert werden, erfahren lokal eine Strömungszunahme. Die hierdurch erzeugte lokale Zunahme der Energiedissipation (der Umwandlung der Strömungsenergie in Wärmeenergie) reduziert die Tideenergie und mittelbar dadurch das Tidevolumen. Dieser Effekt wirkt also der Zunahme des Tidehubes entgegen. Die Strömungsgeschwindigkeiten nehmen deshalb ober- und unterhalb der Querschnittseinstengung ab.

Die beschriebenen grundsätzlichen Veränderungsmuster können anhand der Simulationsergebnisse nachvollzogen werden. Anlage 2 der Unterlage H.1a zeigt in den Bildern 1 bis 80 in Form von Längsschnitten die Veränderungen der Tidewasserstände und der Tidephasedauern. Grundlage dieser Darstellung sind die Simulationsrechnungen mit niedrigem und gleichzeitig häufigem Oberwasserabfluss von 350 m<sup>3</sup>/s. Da sich die Wasserstände und –dauern nicht kleinräumig ändern, geben diese Längsschnitte einen guten Überblick der Veränderung. Beispielsweise zeigt Bild 17 die Simulationsergebnisse für das Tideniedrigwasser entlang der Fahrrinnenachse im Ist-Zustand. Bemerkenswert ist der vergleichsweise große Unterschied zwischen den maximalen und den minimalen Tideniedrigwasser, der an der seeseitigen Grenze fast 80 cm beträgt. Charakteristisch - weil häufig auftretend - ist das mittlere Tideniedrigwasser, welches an der seeseitigen Grenze etwa bei NN -1,7 m liegt, dann bis zur Störmündung (km 680) auf NN -1,45 m ansteigt und bis zum Hamburger Hafen auf ein Minimum von NN -1,8 m absinkt. Die Veränderung des Tideniedrigwassers (Bild 18) zeichnet die Wirkung der Unterwasserablagerungsflächen nach. Von See her betrachtet sinkt das Tideniedrigwasser bis etwa Cuxhaven (km 730) um 2 cm ab, um dann in Folge der Unterwasserablagerungsflächen bis zur Ostemündung (km 710) um etwa 2 cm anzusteigen. Weiter nach oberstrom macht sich die Wirkung des Ausbaus dann wieder bemerkbar und das Tideniedrigwasser sinkt um max. 3 bis 4 cm beim Pegel St. Pauli in Hamburg ab.

Das Tidehochwasser (Bild 1) variiert zwischen NN +1,50 m am seeseitigen Rand und NN +2,50 m am Wehr Geesthacht. Auch hier beträgt die Variation zwischen minima-

lem Tidehochwasser und maximalem Tidehochwasser innerhalb des vorgenannten Spring-Nipp-Zyklus 70 cm. Auch die Änderung des Tidehochwassers zeichnet die Wirkung der Unterwasserablagerungsflächen nach. In Bild 2 wird dies durch ein Absinken des Tidehochwassers zwischen Cuxhaven und der Störmündung erkennbar. Weiter oberhalb nimmt das Tidehochwasser um max. 2 bis 3 cm im Bereich von Lühesand (km 650) zu.

Die kumulierte Wirkung von Tidehochwasser und Tideniedrigwasser ist in der Darstellung des Tidehubs zu finden. Bild 33 der Unterlage H.1a zeigt den Tidehub im Ist-Zustand und Bild 34 seine Veränderung.

Die Unterlage H.1a enthält in der Anlage 2 neben den Längsschnitten entlang der Fahrrinnenachse auch Längsschnitte für alle Nebenrinnen und Nebenelben. Mit Ausnahme der Abschnitte nahe der Unterwasserablagerungsflächen Medemrinne und Neufelder Sand folgen die Änderungswerte hier aber näherungsweise denen der Fahrrinne.

Anlage 4 der Unterlage H.1a enthält darüber hinaus flächenhafte Darstellungen der Tidehochwasser, der Tideniedrigwasser und Tidehubs, aufgeteilt in sog. Teilgebiete. In Bild 8 dieser Anlage ist beispielsweise die Differenz des Tidehubs im Teilgebiet West dargestellt. Hier kann die Wirkung der Unterwasserablagerungsflächen auf die Tidewasserstände nachvollzogen werden. Deutlich erkennbar ist die starke Zunahme des Tidehubs in der Medemrinne nordwestlich der Unterwasserablagerungsfläche, wohingegen in der Fahrrinne von diesem Abschnitt an beginnend bis etwa zur Störmündung eine Abnahme des Tidehubs verzeichnet ist. Die flächenhaften Darstellungen des Wasserstandes zeigen im übrigen noch einmal, dass der Wasserstand wie eine Art Summenparameter sich nicht kleinräumig verändert.

Die Änderungen der Tidewasserstände führen in der Regel auch zu Verformungen der Tidewelle. Dies macht sich z. B. in Form einer Veränderung der Tidewellengeschwindigkeit bemerkbar, die zu Verschiebungen bei der Flut- und Ebbedauer sowie bei der Flutstrom- und Ebbestromdauer führt. In Anlage 2 der Unterlage H.1a sind beispielsweise die Veränderungen der Flut- und Ebbestromdauern dargestellt. Die Flutstromdauer (Bild 146) ändert sich im Einflussbereich der großen Unterwasserablagerungsflächen um ca. +/- 5 Minuten. Weiter innerhalb des Ästuars sind die Änderungen deutlich kleiner. Die großen Änderungswerte in der Nähe der Tidegrenze bei Geesthacht hängen mit der Art der Tidekennwertanalyse zusammen und sind ohne physikalische Bedeutung. Das Gegenstück der Flutstromdauer ist die Ebbestromdauer, deren Änderungen entlang der Fahrrinnenachse Bild 162 enthält.

Strömungsgeschwindigkeiten und ihre Änderungen lassen sich besonders gut anhand der flächenhaften Darstellungen der tiefenintegrierten Strömungsgeschwindigkeiten nachvollziehen. In Anlage 4 der Unterlage H.1a finden sich Abbildungen zu den mittleren und maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten für alle Teilgebiete. Anhand der Stromgeschwindigkeiten und ihrer Änderungen im Teilgebiet West (Bild 11 - Bild 22) wird die Wirkung der Unterwasserablagerungsflächen Medemrinne und Neufelder Sand sichtbar. Die Änderungen der mittleren Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten im Teilgebiet West bleiben darüber hinaus immer innerhalb der ersten Farbumschläge der Farbskala und sind daher kleiner als +/- 0,075 m/s.

Von den vielen Tidekennwerten, die in Anlage 4 dargestellt sind, wird hier noch auf das Verhältnis Flutstromgeschwindigkeit zu Ebbestromgeschwindigkeit hingewiesen. Dies sind für mittlere Werte die Bilder 19, 20, 78, 79, 136, 137, 177, 178, 219 und 220. Die Darstellungen zeigen, in welchen Abschnitten jeweils Flut- oder Ebbestrom dominiert und sind daher Indizien für die zu erwartende Richtung der Netto-Sedimenttransportströme.

Die bisherigen Ausführungen beziehen sich auf die Simulationsrechnungen mit niedrigem und gleichzeitig häufig auftretenden Oberwasser von 350 m<sup>3</sup>/s. Die Simulationsrechnungen mit hohem Oberwasser von 1500 m<sup>3</sup>/s sind entsprechend in den Anlagen 2, 3 und 4, in den Anlagen 5, 6 und 7 der Unterlage H.1a dokumentiert. Die ausbaubedingten Änderungen auf die Tidewasserstände bei hohem Oberwasser können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei hohem Oberwasser liegt das Tidehochwasser in der Elbe höher als bei niedrigem Oberwasser. Dieser Effekt beginnt bereits nahe der seeseitigen Modellgrenze (km 745) bei Neuwerk und wird stetig größer, bis die Differenz des Tidehochwassers bei Bunthäuser Spitze ca. 0,2 m (km 610) erreicht. Bis zum Wehr Geesthacht steigt die Differenz dann bis auf 0,85 m an. Die ausbaubedingten Änderungen des mittleren Tidehochwassers sind bei hohem Oberwasser meistens kleiner als bei niedrigem Oberwasser. Größer sind die Änderungen nur zwischen Südspitze Pagensand (km 660) und Störmündung (km 680), wo die Zunahme des mittleren Tidehochwassers bis zu 0,02 m betragen kann. Signifikant kleiner hingegen sind die Änderungen oberstrom von Finkenwerder (km 630), wo diese nur 0,01 m Zunahme erreichen. Oberhalb der Bunthäuser Spitze beträgt die Änderung nahezu 0 (Unterlage H.1a, Bild 2 der Anlage 2 und Bild 2 der Anlage 5).
- Bei hohem Oberwasser liegt das Tideniedrigwasser in der Elbe höher als bei niedrigem Oberwasser. Dieser Effekt beginnt an der seeseitigen Modellgrenze (km 740) und wird dann stetig größer, bis die Differenz des Tideniedrigwassers im östlichen Teil des Hamburger Hafens (km 620) 0,25 m erreicht. Bis zum Wehr bei Geesthacht steigt diese Differenz auf ca. 2 m an. Die ausbaubedingten Änderungen des mittleren Tideniedrigwassers sind bei hohem Oberwasser meistens größer als bei niedrigem Oberwasser. Signifikant weichen die Änderungen beim hohen Oberwasser von denen bei niedrigem Oberwasser zwischen St. Margarethen (km 690) und Cuxhaven (km 730) voneinander ab, wo die ausbaubedingten Änderungen des Tideniedrigwassers bei hohem Oberwasser um ca. 0,01 bis 0,02 m in negativer Richtung gegen die Änderungen bei niedrigem Oberwasser verschoben sind und bei Cuxhaven (Elbe-km 725) ein Maximum von -0,04 m erreichen. Ebenfalls um 0,01 bis 0,02 m in negative Richtung sind die Änderungen zwischen Hamburger Hafen (km 615) und Pagensand (km 640) verschoben. In den anderen Gebieten sind die Änderungen des Tideniedrigwassers bei hohem Oberwasser und niedrigem Oberwasser nahezu gleich. Da aber, wie oben beschrieben, die bei hohem Oberwasser gegenüber niedrigem Oberwasser stärkere Absenkung des Tideniedrigwassers bei einem signifikanten höherem Tideniedrigwasser stattfindet, werden durch das Szenario hohes Oberwasser keine tieferen Niedrigwasserstände erreicht, als sie durch das Szenario niedriges Oberwasser erreicht werden können. (Unterlage H.1a, Anlage 2 - Bild 18, Anlage 5 - Bild 18).

## Nebenflüsse

Die ausbaubedingten Änderungen der Tidekennwerte in den Nebenflüssen der Elbe wurden im Rahmen der Umweltverträglichkeitsuntersuchung 1995 zur vorangegangenen Fahrrinnenanpassung durch die BAW auf der Grundlage von eindimensionalen numerischen Modellberechnungen prognostiziert. Weil in den Nebenflüssen kein Ausbau erfolgt, ändert sich dort die Charakteristik der Tidedynamik nicht, so dass sich die Wirkungen der Fahrrinnenanpassung in der Hauptelbe, die sich an den Mündungen der jeweiligen Nebenflüsse einstellt, in gleicher Weise in die Nebenflüsse hinein fortpflanzt, wie dies durch die Modellierungen für die Umweltverträglichkeitsuntersuchungen 1995 ermittelt wurde. Aus diesem Grunde wird durch die BAW für die vorliegende Umweltverträglichkeitsuntersuchung eine Abschätzung auf Basis der vorliegenden Modellierungen zu den Nebenflüssen durchgeführt.

Ausbaubedingte Änderungen der Tidewasserstände größer als +/- 2 cm werden nur in den Mündungsbereichen von Oste und Este prognostiziert. An der Mündung der Oste (Oste km 71) steigt das Tideniedrigwasser um 4 cm an. Dieser Anstieg baut sich bis nach Hechthausen (Oste km 31,1) auf 0 cm ab. An der Estemündung (Este km 12,8) sinkt das Tideniedrigwasser um 3 cm ab. Dieser Absink reduziert sich bis Moorende (Este km 5,0) auf - 1 cm.

## Zusammenfassende Prognose

Die BAW hat für das hydrologische Szenario niedriges, häufiges Oberwasser folgende Prognosewerte ermittelt:

- Die größten ausbaubedingten Änderungen des mittleren Tidehochwassers treten in der Hauptrinne der Elbe zwischen Finkenwerder (Elbe-km 630) und Pagensand (km 660) auf. Die Zunahme erreicht dort 0,03 m.
- Die größten ausbaubedingten Änderungen des mittleren Tideniedrigwassers treten im Hauptfahrwasser der Elbe zwischen dem östlichen Hafen Hamburg (km 620) und Neßsand (km 640) auf. Der Absink erreicht max. 0,04 m. Die größten Änderungen des mittleren Tideniedrigwassers im UG sind für den nordwestlichen Teil der Unterwasserablagerungsfläche Medemrinne ermittelt worden. Sie erreichen dort Werte bis zu 0,11 m.
- Im Hauptfahrwasser der Elbe treten die größten ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit südlich des Medemgrundes auf, wo Zunahmen um etwas über 0,15 m/s prognostiziert werden. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit nimmt dort um etwas über 0,25 m/s zu. Nennenswerte Abnahmen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit werden im Bereich der Begegnungstrecke zwischen Ostende Neßsand (Elbe-km 635) und Hafen Schulau (km 645) sowie im Bereich der Mündung des Köhlbrandes in die Norderelbe zu erwarten sein. Die Abnahmen liegen dort um bis zu 0,10 m/s. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit nimmt in diesen Bereichen um bis zu 0,15 m/s ab, wohingegen die maximale Ebbestromgeschwindigkeit nicht so stark abnimmt.
- Die ausbaubedingten Änderungen in den Nebenflüssen der Elbe sind in ihrem Maximum auf die Größe der ausbaubedingten Änderungen an den jeweiligen Mündungen beschränkt. Generell und zusammenfassend betrachtet sind die Änderungen der Tidewasserstände kleiner als +/- 0,2 m, wobei die Änderung des Tidenied-

rigwassers im Nebenfluss stromaufwärts schneller abklingen als die des Tidehochwassers.

Für das Szenario hohes Oberwasser ergeben sich folgende abweichende Prognosen:

- Die ausbaubedingten Änderungen des Tidehochwassers sind bei hohem Oberwasser meist kleiner als bei niedrigem, nennenswert sind nur die Änderungen zwischen Pagensand und Störmündung, die hier bis zu 0,02 m ansteigen können.
- Die ausbaubedingten Änderungen des Tideniedrigwassers sind bei hohem Oberwasser meistens größer als bei niedrigem. Signifikant anders sind die Änderungen zwischen St. Margarethen und Cuxhaven, wo der Absenk bis zu - 0,05 m erreicht.

## **2.3 Auswirkungen des Vorhabens auf die Salzgehaltsverhältnisse**

Die Auswirkungen des Vorhabens auf die Salzgehaltsverhältnisse sind wie die der Tidewasserstände im Gutachten der BAW „zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salztransport“ (Unterlage H.1a) beschrieben.

### **2.3.1 Modell**

Das Modellgebiet für die naturähnliche Nachbildung der Salzgehaltsverhältnisse ist identisch mit dem Modellgebiet für die Tidewasserstände. Mit dem beschriebenen numerischen Verfahren (UnTRIM) werden nicht nur die Erhaltungsgleichungen für Impuls und Masse gelöst, sondern auch die sog. Advektions-Diffusionsgleichung, die den Transport und die Vermischung eines im Wasser gelösten Tracers, in diesem Falle des Salzgehaltes, beschreibt.

Wie bei den Tidewasserständen müssen für die Modellierung der Salzgehalte Zeitreihen von Randwerten am unter- und oberstromigen Rand vorgegeben werden. Dies sind im Wesentlichen Salzgehalte am seeseitigen Rand, die zusammen mit den Wasserständen vorgegeben werden und am oberstromigen Rand eine Salzkonzentration, die mit dem Oberwasserzufluss definiert wird. Gleichzeitig wird für alle Berechnungspunkte im Modellgebiet eine Anfangsbelegung benötigt. In Bezug auf den Salzgehalt wird hier mit 32 PSU der Salzgehalt des Seewassers vordefiniert. Indem das Modell vor der Berechnung des Analysezeitraumes eine Reihe von Berechnungsdurchläufen absolviert, entsteht eine Anfangsbelegung der Salzgehalte, die passend zum Oberwasser naturähnlich ist.

In der Anlage 8 der Unterlage H.1a ist die Verifikation des Modells in Bezug auf die Salzgehalte beschrieben. Dabei wurden die vom Modell berechneten Salzgehaltskonzentrationen mit Dauermessungen im Ästuar verglichen. Die Dauermessstellen entsprechen denen für die Dauerströmungsmessstellen. Die Positionen der 10 Messpunkte sind in den Bildern 79 und 98 der Anlage 8 dargestellt. Zusätzlich wurden an einigen der Dauermessstellen der Außenelbe (Amtsbereich des WSA Cuxhaven) Zeittiefendiagramme des Salzgehaltes gemessen.

Die BAW weist anhand des Vergleiches von berechneten und gemessenen Werten nach, dass das Modell im Untersuchungsgebiet die maßgeblichen Systemeigenschaften bezüglich des Transports gelöster Stoffe, hier des Salzgehaltes, wiedergibt. Unter dieser Voraussetzung geht die BAW davon aus, dass die ausbaubedingten Än-

derungen als Folge maßvoller geometrischer Formänderungen belastbar bestimmt werden können und das Modell daher prognosefähig ist.

### 2.3.2 Auswirkungen

Das Gutachten der BAW (Unterlage H.1a) stellt die Salzgehaltsverhältnisse im Elb-ästuar auf drei verschiedene Art und Weisen dar:

- Längsschnitte der tiefenintegrierten Salzgehaltskonzentrationen entlang der Fahrrinnentrasse und weiterer Nebenelben bzw. Nebenrinnen
- Tiefenlängsprofile der Salzkonzentration entlang der Fahrrinnentrasse
- Flächenhafte Darstellung der tiefengemittelten Salzgehaltskonzentrationen.

Der Ist-Zustand kann wie folgt charakterisiert werden:

- Die vom Seewasser beeinflusste Zone der Elbe erstreckt sich für den Analysezeitraum von See her kommend bis zur Störmündung (Elbe-km 680). Weiter oberhalb treten nur Salzgehalte  $< 0,2$  PSU auf (Anlage 2, Bild 187, minimaler Salzgehalt bei niedrigem, häufigen Oberwasser). Der maximale Salzgehalt am seeseitigen Ende des Ästuars bei Elbe-km 750 beträgt ca. 31 PSU (Anlage 2, Bild 177, maximaler Salzgehalt bei niedrigen, häufigen Oberwasser entlang der Fahrwassertrasse).
- Die Ebbebestromung schiebt das Wasser in Richtung See, so dass am Ende der Ebbebestromung beim Kenterpunkt der Ebbe die von Salzwasser beeinflusste Zone bereits bei Brunsbüttel (ca. Elbe-km 700) endet. Der minimale seeseitige Salzgehalt beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 20 PSU (Anlage 2, Bild 187, sowie Anlage 5, Bild 187, das die Verhältnisse bei hohem Oberwasser zeigt).
- Die Salzgehaltsvariationen pro Tide beträgt an der seeseitigen Grenze des Modells (Elbe-km 750) zwischen 6 und 9 psu, erreicht ihr Maximum mit Werten zwischen 12,5 und 15,5 PSU bei Cuxhaven (Elbe-km 725) und sinkt von dort bis zur Störmündung (Elbe-km 680) auf 0 PSU ab (Anlage 2, Bild 207 für niedriges Oberwasser und Anlage 5, Bild 207 für hohes Oberwasser).

Die vorgenannten Zahlenangaben basieren auf der durchgeführten Verifikationsberechnung für den Analysezeitraum im Mai 2005. Für die Ermittlung der ausbaubedingten Veränderungen wurde abweichend von den Messungen am seeseitigen Rand des Modells eine Konzentration von 30 PSU vorgegeben. Deswegen weichen die Konzentrationsangaben des vorstehenden Textes leicht von den Darstellungen des Ist-Zustandes in den Grafiken ab.

Die ausbaubedingten Änderungen der Salzgehaltsverhältnisse können zunächst an den Längsschnitten der Fahrrinnentrasse nachvollzogen werden. Für niedriges und gleichzeitig häufig auftretendes Oberwasser ändert sich der maximale Salzgehalt pro Tidezyklus um bis zu  $+ 0,8$  PSU (Anlage 2, Bild 178 für den Abschnitt zwischen Osteriff (Elbe-km 710) und Störmündung (km 680)). Der minimale Salzgehalt eines Tidezyklus ändert sich bei niedrigem häufigen Oberwasser ebenfalls um bis zu  $0,8$  PSU, wobei dieser Maximalwert etwa beim Osteriff (Elbe-km 700) auftritt (Anlage 2, Bild 188).

Die Veränderung der mittleren Salzgehaltswerte vermittelt einen ersten Eindruck von der über den Tidezyklus gemittelten vorhabensbedingten Verschiebung der Brack-

wasserzone. Die Änderung erreicht ihren Maximalwert beim Osterriff (km 700) mit etwa 0,7 PSU (Anlage 2, Bild 198).

Bei hohem Oberwasser ergeben sich ähnliche Veränderungsmuster, die jedoch wegen der allgemeinen „Gestauchtheit“ der Brackwasserzone bei hohem Oberwasser räumlich begrenzter sind. So ändern sich die maximalen Salzgehaltskonzentrationen um bis zu 1,4 PSU bei Cuxhaven (Elbe-km 720) (Anlage 5, Bild 178), die minimalen Salzgehaltskonzentrationen um bis zu + 1,4 PSU bei Mittelgrund (Elbe-km 740) (Anlage 5, Bild 188) sowie die mittleren Salzgehalte um etwa + 0,6 PSU bei der Ostemündung (km 710) (Anlage 5, Bild 198). Die Salzgehaltsvariation entlang der Fahrrinne ist bei hohem Oberwasser ausgeprägter. Deswegen ergeben sich hier auch größere Veränderungen, die +/- 1,4 PSU erreichen können und im Bereich zwischen Mittelgrund (km 740) und Osteriff (km 700) auftreten (Anlage 5, Bild 208).

Die Änderung der Salzgehalte über die Wassertiefe können anhand der in der Anlage 3 bzw. Anlage 6 dargestellten Tiefenlängsprofile nachvollzogen werden. Die Darstellungen entlang der Fahrrinnenstrasse für den maximalen Salzgehalt (Anlage 3 und Anlage 6, Bild 97) und den minimalen Salzgehalt (Anlage 3 und Anlage 6, Bild 107) zeigen, dass nur geringe Variationen über die Tiefe auftreten. Die Darstellungen belegen, dass die Tideströmung eine gute Durchmischung über die Wassertiefe bewirkt. Die zugehörigen Änderungen der Salzkonzentrationen entsprechen den vorgenannten anhand der Längsprofile aufgezeigten Zonierungen. Auch die Veränderungswerte variieren nur geringfügig über die Vertikale.

Wegen der guten Durchmischung über die Wassertiefe können die Salzgehaltsverhältnisse, und die Lage der Brackwasserzone gut anhand tiefenintegrierter Salzkonzentrationen nachvollzogen werden. Tiefenintegrierte farbcodierte Salzkonzentrationswerte enthalten die Anlagen 4 und 7 der Unterlage H.1c. Für die Beurteilung der Brackwasserzone ist dabei im Wesentlichen das Teilgebiet West interessant.

In Anlage 4 und Anlage 7, Bilder 43 und 44, sind die maximalen Salzkonzentrationen und deren Veränderungswerte dargestellt. Die Abbildung des Ist-Zustands zeigt, dass die Salzkonzentration deutlich in lateraler Richtung variiert. Demzufolge erzeugen die Unterwasserablagerungsflächen Medemrinne und Neufelder Watt Veränderungen (Bild 46), die 1,4 PSU und an den Rändern zum Watt auch 1,8 PSU erreichen. Die Änderung der maximalen Salzkonzentration reicht nach oberstrom bis zur Höhe Steindeich (Elbe-km 670). Auch die Veränderungswerte des minimalen Salzgehaltes (Bild 46) zeigen deutliche Veränderungen im Bereich der Unterwasserablagerungsflächen. Die Erhöhungen reichen nach oberstrom etwa bis zum Freiburger Hafentriel. Ein vergleichbares Veränderungsmuster zeigen auch die Veränderung der über den Tidezyklus gemittelten Salzkonzentrationen (Bild 48). Zusammenfassend können diese Veränderungen als Verschiebung der Brackwasserzone nach oberstrom in Verbindung mit lokalen Änderungen an den Unterwasserablagerungsflächen Medemrinne und Neufelder Sand charakterisiert werden. In Anlage 7 der Unterlage H.1a, Bild 43 bis Bild 48, werden die gleichen Tidekennwerte für das hydrologische Szenario hohes Oberwasser dargestellt. Die Brackwasserzone liegt bei diesen Oberwasserverhältnissen weiter unterstrom, sie ist gestauchter, aber auch bei diesen Verhältnissen zeigt sich eine Verschiebung nach oberstrom.

Einen guten Einblick in die Physik der Brackwasserzone gewährt die tiefengemittelte Darstellung der Salzgehaltsvariation (Unterlage H.1a, Anlage 4 und Anlage 7, Bild 49). In der Darstellung des Ist-Zustands wird sichtbar, dass große Salzgehaltsvariationen überwiegend in den Bereichen der großen Strömungsrinnen auftreten, weil hier die weitaus überwiegende Menge des Tidevolumens transportiert wird. Bei niedrigem, häufig auftretendem Oberwasser nehmen die Salzgehaltsvariationen im Abschnitt zwischen Mittelgrund (km 740) und Ostemünde (km 710) ab, während die Variation zwischen Ostemündung und Steindeich (km 670) leicht zunimmt (Anlage 4, Bild 50). Ein vergleichbares, wenn auch gestauchtes, Ergebnis zeigen die Simulationsrechnungen für hohes Oberwasser (Anlage 7, Bild 49 und 50).

Die Änderung der Salzgehaltsverhältnisse werden durch die BAW zu einer Prognose der ausbaubedingten Verlagerung der Brackwasserzone zusammengefasst (Unterlage H.1a, Abschnitt 5.3.2):

Ausbaubedingt wird sich die Brackwasserzone nach oberstrom verlagern. Dies geschieht jedoch nicht gleichmäßig für jeden Salzgehaltsbereich, sondern ist abhängig von den lokalen Veränderungen der Tideströmungen. Da die Eingriffe in die Fahrrinne und die Veränderung der Gesamtquerprofile durch die Unterwasserablagerungsflächen sehr unterschiedlich auf dem Längsprofil der Elbe verteilt sind, sind auch die Verschiebungen der Salzgehalte innerhalb der Brackwasserzone sehr unterschiedlich (siehe vorstehende Erläuterungen). Folgende Werte sind für das Szenario niedriges, häufiges Oberwasser errechnet worden:

- Die 1 PSU Isohaline wird um 1400 m nach stromauf verschoben.
- Die 5 PSU Isohaline wird um 1900 m nach stromauf verschoben.
- Die 10 PSU Isohaline wird um 1000 m nach stromauf verschoben.

Die genannten Verschiebungen beziehen sich auf Verlagerungen der Brackwasserzone im Bereich der Hauptströmungsrinne. Sie können aus den Längsschnitten entlang der Fahrrinnterrasse in Anlage 2 anhand der Bilder 177, 178, 187, 188, 197 und 198 nachvollzogen werden.

### **Nebenflüsse**

Ausbaubedingte Veränderungen der Salzkonzentrationen werden durch die BAW für die in der Brackwasserzone der Tideelbe mündenden Nebenflüsse Oste, Stör und den Freiburger Hafenpriel berechnet. An der Ostemündung erhöhen sich ausbaubedingt die maximale Salzkonzentration um 0,4 PSU, die minimale Salzkonzentration um 0,1 PSU und die maximale Salzkonzentrationsvariation um 0,2 PSU. 40 km stromauf bei Hechthausen klingen diese Veränderungswerte auf unter 0,1 PSU ab. An der Störmündung erhöht sich die maximale Salzkonzentration um 0,4 PSU, die minimale Salzkonzentration um 0,3 PSU und die maximale Salzkonzentrationsvariation um 0,3 PSU. 10 km stromauf bei Beidenfleth betragen diese Änderungswerte immer noch 0,3 PSU, 0,2 PSU und 0,2 PSU.

An der Mündung des Freiburger Hafenpriels beträgt die Zunahme der maximalen Salzkonzentration 0,6 PSU, der minimalen Salzkonzentration 0,5 PSU und der maximalen Salzgehaltsvariation 0,3 PSU. Wegen der Kürze des Gewässers und des ge-

ringen Oberwasserzuflusses werden diese Veränderungswerte auch für den Freiburger Hafen prognostiziert.

### 2.3.3 Zusammenfassung

Für das hydrologische Szenario niedriges und gleichzeitig häufiges Oberwasser werden folgende Veränderungen der Salzgehaltsverhältnisse prognostiziert (Unterlage H.1a, Abschnitt 6):

- Die größte Änderung des maximalen Salzgehaltes stellt sich mit 0,7 PSU bei Elbe-km 700 (Brunsbüttel) ein.
- Die obere Grenze der Brackwasserzone rückt um ca. 1400 m nach oberstrom vor<sup>2</sup>.

Für das Szenario hohes Oberwasser ergeben sich zusammengefasst folgende Änderungen:

- Die ausbaubedingte Änderung des maximalen Salzgehaltes beträgt bis zu 1,4 PSU. Das Maximum dieser Änderung liegt bei Elbe-km 713 (Otterndorf), wobei der Bereich 0,1 PSU von Elbe-km 690 (St. Margarethen) bis Elbe-km 730 (Cuxhaven Kugelbake) reicht. Die ausbaubedingten Änderungen sind größer, liegen aber weiter seewärts als bei niedrigem Oberwasser.
- Bei hohem Oberwasser liegt das oberstromseitige Ende der Brackwasserzone (auch hier ist eigentlich die 1 PSU-Isohaline gemeint) um ca. 30 Elbe-km weiter stromab als bei niedrigem Oberwasser. Die Brackwasserzone wird gestaucht, da das seeseitige Ende der Brackwasserzone nicht in dem Maße verschoben wird, wie bei niedrigem Oberwasser.

## 2.4 Auswirkungen des Vorhabens auf die Sturmflutwasserstände

Die Untersuchungen der BAW zu den Auswirkungen des Vorhabens auf die Hochwasserstände bei Sturmfluten sind im Gutachten zu „ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen“ in der Unterlage H.1b dargestellt.

### 2.4.1 Modell

Für die Untersuchung der Sturmflutkenngößen setzt die BAW im Grundsatz das gleiche numerische Simulationsverfahren ein wie bei den Berechnungen zu den normalen Tidewasserständen und zum Salzgehalt. Für die besonderen Anforderungen der modellhaften Nachbildung von Sturmfluten sind einige Ergänzungen bei den zu berück-

---

<sup>2</sup> An dieser Stelle ist anzumerken, dass es keine verbindliche Definition für die Begrenzung der Brackwasserzone in der Tideelbe gibt. Die BAW setzt hier vereinfachend die für das Szenario niedriges Oberwasser ermittelte Verlagerung der 1-psu-Isohaline gleich der Verlagerung der Brackwasserzone. Für den Wasserkörper Übergangsgewässer gilt: oligohalin bis polyhalin (0,3 bis 22 ‰). Nach ARGE ELBE gilt: Die obere Brackwassergrenze in der Tideelbe wurde von ARGE ELBE früher bei einem Chloridgehalt von 300 mg/l festgelegt. Dies entspricht einer elektrischen Leitfähigkeit von <400 mS/m bzw. einem Salzgehalt von ca. 0,5 ‰ psu. Bergemann (1995, 2004) hat eine neue Konvention zur Ermittlung der oberen und unteren Brackwassergrenze formuliert, die eng mit den von ARGE ELBE betriebenen Messstellen verknüpft ist und eine Rechenvorschrift zur Ableitung aus den erhobenen Daten beinhaltet. Die obere Brackwassergrenze wird als „Anstieg des Chloridgehaltes um 30 mg/l Cl über die mittlere Konzentration des angrenzenden Süßwasserbereiches festgelegt“. Damit ist ein Mittelwert gemeint, der für jedes (!) auszuwertende Chloridlängsprofil neu berechnet wird. Derart soll die oberwasser- und einleitungsbedingte Schwankungsbreite der Chloridgehalte im limnischen Bereich der Elbe (1926 bis 1994: 40 - 740 mg/l Cl) berücksichtigt werden

sichtigenden physikalischen Prozessen, wie auch beim Modellgebiet erforderlich, die im folgenden dargestellt werden:

- Zur Modellierung der Sturmfluten wird eine tiefenintegrierte Version des numerischen Verfahrens UnTRIM verwendet. Dieses Verfahren berechnet für jeden Gitterpunkt die Wasserspiegelauslenkung bezüglich NN und die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit.
- Neben den in Abschnitt 2.3.1 dargestellten physikalischen Prozessen berücksichtigt diese Version des Modells auch die räumliche und zeitliche Variabilität des lokalen Windfeldes und den daraus resultierenden räumlich und zeitlich variablen Impulseintrag aus der Atmosphäre. Dieser kann die Strömung und den Wasserstand in Flüssen oder Ästuaren kleinräumig beeinflussen und darf bei Extremereignissen wie Sturmfluten nicht vernachlässigt werden. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird parametrisiert und findet durch eine sog. Windschubspannung Eingang in das partielle Differenzialgleichungssystem des Modellverfahrens.
- Das Modellgebiet entspricht weitgehend dem unter 2.3.1 beschriebenen Modellgebiet. Eine wesentliche Änderung besteht in der oberwasserseitigen Modellgrenze. Da bei hohem Oberwasserzufluss ( $> 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) aber auch bei Sturmflut das Wehr Geesthacht gelegt wird, reicht das Modellgebiet bis Bleckede (Elbe-km 549,7). Ferner werden keine Nebenflüsse berücksichtigt, weil diese während der Sturmflut durch Sperrwerke von der Elbe getrennt werden.

Das Modellgebiet des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) und des Ausbauzustandes (AZ385S) entsprechen den Modelltopographien, die auch bei der Modellierung der normalen Tidewasserstände und der Salzgehaltsverhältnisse verwandt werden.

Für die Ermittlung der ausbaubedingten Veränderung der Sturmflutwasserstände kann nicht wie bei den normalen Tidewasserständen ein Spring-Nipp-Zyklus Grundlage der Modellierung sein, sondern müssen Szenarien historischer oder künstlicher Sturmfluten entwickelt werden, die einen möglichst umfassenden Einblick in die Tidedynamik des Elbästuars bei Sturmfluten vermitteln. Hierzu geht die BAW von den folgenden vier Szenarien aus:

1. Es wird die Sturmflut vom 3.1.1976 (SF76) mit ihrer ausgeprägt steilen Windstaukurve zu Grunde gelegt. Hierzu liegen Pegelaufzeichnungen der Bake W beim Zehner Loch vor, aus denen unter Berücksichtigung einer Übertragungsfunktion der Wasserstandsverlauf am seeseitigen Modellrand für die Modellsteuerung bestimmt wurde.
2. Es wird die Sturmflut vom 28.1.1994 (SF94), die eine füllige Windstaukurve aufweist, zu Grunde gelegt. Für die Modellsteuerung wird der Wasserstandsverlauf aus Modellergebnissen des großräumigen hydronumerischen Modells der deutschen Bucht vorgegeben.
3. Es wird die Sturmflut vom 3./4.12.1999 (SF99), die ein Windstaumaximum in zeitlicher Nähe Sturmflutscheitelwasserstand aufweist, zu Grunde gelegt. Für die Modellsteuerung wird der Wasserstandsverlauf aus Modellergebnissen des großräumigen hydronumerischen Modells der deutschen Bucht vorgegeben.
4. Es wird die Bemessungssturmflut 2085A (SFB) der sog. Länderarbeitsgruppe zu Grunde gelegt. Für die Ermittlung der Wasserstandsrandbedingungen am seeseitigen Modellrand werden mit Hilfe von Übertragungsfunktionen Wasserstände so

vorgegeben, dass die Vorgaben der Länderarbeitsgruppe für den Windstau am Pegel Cuxhaven erreicht werden.

Am landseitigen offenen Modellrand bei Bleckede werden für die historischen Sturmfluten SF76 und SF94 die am Pegel Neu Darchau gemessenen Abflüsse vorgegeben. Für die Bemessungssturmflut SFB ist ein Oberwasserzufluss mit  $q = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$  definiert. Das Wehr Geesthacht ist bei Sturmflut gelegt. Zur Überprüfung der Richtigkeit der Wasserstandsrandbedingungen am seeseitigen Rand werden in Unterlage H.1b, Bild 4 bis 6 die Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen bzw. vorgegebenem Wasserstand am Pegel Cuxhaven dargestellt.

Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre während der Sturmfluten wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe aus modellierten hochaufgelösten lokalen Windfeldern über dem gesamten Modellgebiet vorgegeben. Im Abstand von 2 Stunden liegen für die Zeiträume der Sturmfluten Windfelder mit einer räumlichen Auflösung von  $450 \times 450 \text{ m}$  vor.

Die Kalibrierung des für die Sturmflutberechnung verwendeten Modells wird zunächst mit der dreidimensionalen Version des Verfahrens UnTRIM, wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, durchgeführt. Dafür wird zunächst die gewählte Verteilung der Bodenreibung und Turbulenzparameter, wie bei der Modellierung der mittleren Wasserstände, verwandt. Mit diesen Daten und der Topographie des planerischen Ist-Zustandes wird der Zeitraum der Sturmflut 1994 (SF94) dreidimensional mit Dichteeinfluss durch räumliche Gradienten des Salzgehaltes im Modell nachgerechnet. Aus dem Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Wasserständen ergibt sich, dass die Sturmflutwasserstände im Inneren des Ästuars überschätzt werden. Durch eine Anpassung der Beiwerte für die effektive Sohlrauheit auf den Wattgebieten und in Vorlandbereichen kann eine Verbesserung erreicht werden. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Wasserstandszeitreihen. An den in Unterlage H.1b, Bild 10 bis 13, gezeigten Pegeln Cuxhaven, Glückstadt, St. Pauli und Bunt- haus weichen die modellierten Sturmflutscheitelwasserstände nicht mehr als  $\pm 10 \text{ cm}$  von den gemessenen Scheitelwasserständen ab. Die noch verbliebenen Unterschiede im Wasserstandsverlauf können zum einen mit Veränderungen der Topographie der Unterelbe seit 1994 erklärt werden. Ferner kann auch die Randsteuerung mit Modell- ergebnissen aus dem Nordseemodell zu Unterschieden führen, falls im großräumigen Modell einzelne Phänomene nicht aufgelöst sind.

Insgesamt zeigt die vergleichende Gegenüberstellung der gemessenen und der mit dem numerischen Modell des Elbeästuars berechneten zeitlichen Wasserstandsverläufe, dass das Systemverhalten im Tidezyklus sowohl hinsichtlich der Höhen- als auch der Phasenlage durch das Modell nachgebildet wird.

In einem weiteren Arbeitsschritt untersucht die BAW die Sensitivität der Berechnungsergebnisse in Bezug auf die Abhängigkeit der dreidimensionalen Berücksichtigung der Strömung bzw. der Berücksichtigung des Dichteeinflusses des Salzes. Deswegen werden folgende Vergleichsrechnungen durchgeführt:

- SF94, Oberwasser  $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ , zweidimensional mit und ohne Salzkonzentration
- SF94, Oberwasser  $1350 \text{ m}^3/\text{s}$ , dreidimensional mit und ohne Salzkonzentration.

Indem die Berechnungen jeweils für den Ist-Zustand und den Ausbauzustand durchgeführt werden, können sowohl die absoluten Hochwasserscheitel als auch die durch den Ausbau hervorgerufenen Veränderungen miteinander verglichen werden. Es zeigt sich, dass die Wahl der unterschiedlichen Modellverfahren lediglich einen Einfluss auf die absolute Höhe der Sturmflutkennggröße (primär Wasserstand), jedoch nicht die Größenordnung der ausbaubedingten Änderungen hat. Deswegen führt die BAW die gutachterliche Prognose aller Sturmflutszenarien und deren ausbaubedingten Änderungen auf Grundlage der Berechnungsergebnisse durch, die mit der tiefenintegrierten Version von UnTRIM (2D) sowie ohne Salzeinfluss berechnet werden.

## 2.4.2 Auswirkungen

Für die Untersuchung der Auswirkungen auf die Sturmflutscheitelwasserstände werden die folgenden sechs Sturmflutszenarien in den numerischen Berechnungen nachgebildet:

1. Sturmflut von 1976 (SF76), die durch eine steile Windstaukurve mit einem Anstieg des Windstaus um mehr als 100 cm/h, einen Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 29 m/s bei Scharhörn, einen Scheitelwasserstand in Cuxhaven bis NN +5,12 m, einen Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli bis NN + 6,45 m sowie einen Oberwasserzufluss von 500 m<sup>3</sup>/s gekennzeichnet ist.
2. Sturmflut von 1994 (SF94), die durch eine füllige Windstaukurve mit einem Anstieg des Windstaus um 40 cm/h, einen Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 23 m/s bei Scharhörn, einen Scheitelwasserstand in Cuxhaven bis NN +4,51 m, einen Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli bis NN + 6,02 m sowie einen Oberwasserzufluss von 1350 m<sup>3</sup>/s gekennzeichnet ist.
3. Sturmflut von 1999 (SF99), die durch ein Windstaumaximum in zeitlicher Nähe zum Sturmflutscheitelwasserstand, einen Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 29 m/s bei Scharhörn, einen Scheitelwasserstand in Cuxhaven bis NN +4,53 m, einen Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli bis NN + 5,95 m sowie einen Oberwasserzufluss von 350 m<sup>3</sup>/s gekennzeichnet ist.
4. Bemessungssturmflut 2085A (SFB), charakterisiert durch: Westwind mit Windgeschwindigkeiten bis 32 m/s bei Scharhörn, einen Scheitelwasserstand in Cuxhaven von NN +5,65 m, einen Scheitelwasserstand in Hamburg St. Pauli bis NN + 7,30 m sowie einen Oberwasserzufluss in der Elbe von 2.200 m<sup>3</sup>/s. Die Bemessungssturmflut 2085A ist eine synthetische Sturmflut, deren Verlauf an die historische Sturmflut von 1976 angelehnt ist und die entlang der Tideelbe die Bemessungswasserstände definiert. Der Wasserstandsverlauf am Pegel Cuxhaven entspricht dem der Sturmflut 1976, jedoch mit einem um 0,5 m erhöhten Windstau. Der Oberwasserzufluss ist im Vergleich zur historischen Sturmflut auf 2.200 m<sup>3</sup>/s erhöht und die Windentwicklung hat eine im Vergleich um 10 % höhere Windgeschwindigkeit. Der Oberwasserzufluss von 2.200 m<sup>3</sup>/s entspricht etwa 2/3 des bisher beobachteten höchsten Hochwasserabflusses der Elbe am Pegel Neu Darchau. Mit anderen Worten, dieser Abfluss wird im Mittel an 3 Tagen im Jahr (Jahresreihe 1926 bis 2002) überschritten.
5. Um den Einfluss besonders hoher Hochwasserabflüsse untersuchen zu können, wird diese synthetische Sturmflut in einem 5. Szenario mit einem Oberwasserzufluss von 3.000 m<sup>3</sup>/s und

6. in einem 6. Szenario mit einem Oberwasserzufluss von 4.000 m<sup>3</sup>/s berechnet.

Abflüsse dieser Größenordnung sind bisher bei Sturmfluten in der Elbe noch nicht beobachtet worden. Mit der Wahl dieser Oberwasserszenarien wird die Wirkung der Fahrrinnenanpassung bei extrem hohen Sturmfluten mit extrem hohem Oberwasserzufluss untersucht.

Die für die verschiedenen Szenarien berechneten Scheitelwasserstände sind in Bild 22 der Unterlage H.1b dargestellt. Dabei sind in der Grafik die verschiedenen Szenarien durch eine entsprechende Farbcodierung und Namensgebung aus Sturmfluttyp zusammen mit Oberwasserzufluss erkennbar. Beispielsweise ist mit dem Kürzel „SFB\_Q3000“ das Szenario Bemessungssturmflut mit einem Oberwasserzufluss von 3.000 m<sup>3</sup>/s gemeint.

Bild 23 der Unterlage H.1b zeigt die für die verschiedenen Sturmflutszenarien berechneten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände. Die Erhöhungen der Sturmflutscheitelwasserstände sind grundsätzlich kleiner als 1 cm, während die Minderung der Sturmflutscheitelwasserstände im Bereich der Unterwasserablagerungsfläche, die sich insbesondere bei der Sturmflut 1999 (SF99\_Q350) zeigen, bis zu - 0,03 cm erreicht. Die Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe wird für die sechs untersuchten Sturmflutszenarien, bezogen auf den Elbe-km 748 in Bild 24 der Unterlage H.1b gezeigt. Für die betrachteten Sturmfluten unterscheidet sich die Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe zwischen der Mündung und Hamburg St. Pauli um mehr als 60 Minuten. Beispielsweise wird der Scheitelwasserstand der Sturmflut SF94 etwa 4 Stunden nach dem Scheitelwasserstand in der Elbmündung erreicht, während der Scheitelwasserstand der Sturmflut SF76 bereits 3 Stunden später als in der Elbemündung Hamburg St. Pauli erreicht.

Bild 25 der Unterlage H.1b zeigt die ausbaubedingte Änderung der Eintrittszeit. Diese verändert sich entlang der Außen- und Unterelbe um weniger als +/- 5 Minuten. Die stromauf des Wehrs Geesthacht dargestellten größeren Änderungen entstehen durch die Tidekennwertanalyse und haben keinen physikalischen Hintergrund.

Es wurde ferner untersucht, ob sich die Dauer der Überschreitung bestimmter Wasserstände verändert. Dies ist in den Bildern 26 bis 34 der Unterlage H.1b dargestellt. Alle Veränderungen dieser Überschreitungsdauern bleiben kleiner als +/- 5 Minuten.

Ferner wurden die auf Querschnitten gemittelten Flutstromgeschwindigkeiten und deren Veränderung berechnet. Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten und deren Veränderung sind in den Bildern 36 und 37 der Unterlage H.1b dargestellt, die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten und deren Veränderung in den Bildern 38 und 39. Zusammenfassend wird festgestellt, dass die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit für alle betrachteten Szenarien deutlich unter +/- 10 cm/s liegen. Auch bei diesen Änderungen (Bild 37) wird die Wirkung der Unterwasserablagerungsflächen Medemrinne und Neufelder Watt deutlich. Die Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeiten (Bild 39) bleiben kleiner als +/- 5 cm/s. Analoge Ergebnisse ergeben sich für die Auswertungen der maximalen und mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten.

### 2.4.3 Zusammenfassung

Die aus den untersuchten Sturmflutszenarien folgenden ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Sturmflutscheitelwasserstände verändern sich um weniger als +2cm / - 3 cm.
- Die Eintrittszeiten der Sturmflutscheitelwasserstände verändern sich um weniger als +/- 5 Minuten.
- Die Dauer hoher Wasserstände verändert sich um weniger als +/- 5 Minuten.
- Die querschnittsgemittelten Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten verändern sich um weniger als +/- 10 cm/s.

Die geplante Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe verändert bei hohen Sturmfluten mit hohem Oberwasserzufluss nicht das Hochwasserschutzniveau. Sie wird deswegen als hochwasserneutral im Sinne des 5-Punkte-Programmes der Bundesregierung vom 15. September 2002 bewertet.

## 2.5 Auswirkungen des Vorhabens auf den Schwebstoffhaushalt

Mögliche Auswirkungen des Vorhabens auf den Schwebstoffhaushalt bzw. den Schwebstofftransport werden im Gutachten der BAW „zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse“ (Unterlage H.1c) prognostiziert. Das Gutachten beschreibt den Gesamttransport von Sedimenten, der sich aus dem mit der Strömung advektiv transportierten Schwebstoff und dem an der Sohle transportierten Geschiebe zusammensetzt. Gleichzeitig wird in diesem Gutachten die resultierende Wirkung des Sedimenttransports auf die Umgestaltung des Gewässerbettes, also auf die sog. Morphologie, behandelt.

Der vorliegende Abschnitt behandelt die Auswirkungen des Vorhabens auf den Schwebstoffhaushalt bzw. - hier synonym verwandt - den Schwebstofftransport. Da dieser nur ein Teilprozess des gesamten Sedimenthaushaltes ist, wird in der nachfolgenden Beschreibung über das Modellverfahren und die Randbedingungen vieles von dem erläutert, was erst in den späteren Kapiteln zu den prognostizierten Auswirkungen auf die Morphologie und den Seegang benötigt wird.

### 2.5.1 Modell

Das Modellgebiet wie auch die für die Untersuchung zu Grunde gelegten Topographien des Ist-Zustandes und des Ausbauzustandes sind identisch mit denjenigen der Modellierung für die Tidedynamik (hier in Abschnitt 2.2 dargestellt).

Die BAW stellt ihrem Gutachten die folgende grundsätzliche Analyse der Wirkungsmechanismen voran, die wegen ihrer allgemeinen Bedeutung nachfolgend weitgehend im Wortlaut wiedergegeben wird: Durch die geplanten Veränderungen in der Geometrie der Fahrrinne und durch die bleibende Unterbringung des Baggergutes in Unterwasserablagerungsflächen, wird die Tidedynamik im Elbästuar verändert. Diese ausbaubedingten Änderungen sind in der hier vorliegenden Zusammenfassung im Abschnitt 2.2 beschrieben. Da die Feststofftransporte (also die Sedimenttransporte und hier u.a. auch der Schwebstofftransport) und die dynamischen Prozesse im We-

sentlichen durch das Strömungsregime geprägt werden, können bei ausbaubedingt veränderten Tideströmung und Wasserständen auch ausbaubedingte Wirkungen auf das Sedimenttransportregime und auf die Morphodynamik (Veränderung der Gewässersohle) auftreten. Das durch die Tideströme 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 durch den Seegang geleistet werden. Die ausbaubedingten Veränderungen der Tidedynamik, der Seegangsverhältnisse und der daraus resultierenden Feststofftransporte müssen somit berücksichtigt werden.

Im Vergleich zu den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Prozessen tritt für die Begutachtung der morphologischen Prozesse eine entscheidende Komponente, nämlich die des vorhandenen Sediments, hinzu. Für das Verständnis, welche Sedimente im Elbästuar vorliegen, beschreibt die BAW die geologischen Verhältnisse wie auch die wesentlichen anthropogenen Veränderungen.

Aus geologischer Sicht ist das Elbästuar eiszeitlich und nacheiszeitlich geprägt, d.h. die oberflächennah anstehenden Sedimente sind holozänen und pleistozänen Ursprungs. Die holozäne Basis ist in Folge von pleistozänen Erosionsrinnen unregelmäßig. Im Mündungstrichter der Elbe finden sich oberflächennah überwiegend holozäne Elemente, wie z. B. Klei und Sand. Östlich von Elbe-km 640 (Wedel) tritt an der Gewässersohle auch pleistozäner Geschiebemergel auf. Eine auffällige rezente (also jüngere) Entwicklung stellt die Verschlickung von Nebenelben und anderen schwächer durchströmten Gebieten dar. Eine räumliche Gliederung ist heute also durch das Elbfahrwasser sowie weiterer tiefer Rinnen, Inseln, Sandbänke und ausgedehnter Wattgebiete gegeben. Die wesentlichen prägenden Wirkgrößen sind einerseits hydrologischer Natur (Tideströmung, Oberwasserabfluss und Seegang) und andererseits anthropogenen Ursprungs, wie z. B. Eindeichungen, Fahrwasservertiefungen und Begradigungen sowie Strombauwerke.

Die ersten Fahrwasserausbauten begannen Mitte des 19. Jahrhunderts. Bis 1950 wurde die Elbe mit einer Fahrrinntiefe von 10 m unter Kartennull ausgebaut. Weitere Fahrrinnenvertiefungen in der Folgezeit führten zu der seit 1999 vorhandenen Solltiefe von KN - 14,5 m. Zahlreiche Strombauwerke, wie z. B. der Bau des Kugelbaken-Leitdammes oder die Fixierung der Insel Pagensand begleiteten die Fahrrinnenausbauten. Regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen der Fahrrinne wurden erforderlich, deren Schwerpunkte sich mit den verschiedenen Ausbauten und den begleitenden Strombaumaßnahmen veränderten. Heute konzentrieren sich die größten Baggeraufwendungen in der Außenelbe auf die Bereiche am Osteriff und bei Brunsbüttel. Weiter stromauf liegen Baggerschwerpunkte bei Lühesand, Pagensand und Wedel. Im Bereich des WSA Cuxhaven schwanken die Baggermengen von 2001 bis 2004 zwischen 4,8 Mio. m<sup>3</sup>/a und 8,5 Mio. m<sup>3</sup>/a. Im Amtsbereich des WSA Hamburg fielen in diesem Zeitraum zwischen 3,5 Mio. m<sup>3</sup>/a und 5,5 Mio. m<sup>3</sup>/a an. Die im Zuständigkeitsbereich der Hamburg Port Authority anfallenden Baggermengen sind von über 4 Mio. m<sup>3</sup>/a im

Jahre 2000 bis 2003 auf mehr als 8 Mio. m<sup>3</sup>/a Baggergut im Jahr 2004 und 2005 angestiegen.

Nach einer Fahrrinnenvertiefung reagiert die Morphologie des Ästuars mit Anpassungserscheinungen, die aus den veränderten Strömungsgeschwindigkeiten resultieren. Dabei ist es schwierig, wenn nicht unmöglich, aus Naturmessungen der Morphologie, die Veränderung des morphologischen Nachlaufes heraus zu filtern. Natürliche Trendentwicklungen wie auch extreme Naturereignisse, z. B. Sturmfluten, überlagern diesen morphologischen Nachlauf. Lokal wird die Morphologie durch Nassbaggerarbeiten oder Umlagerung von Baggergut beeinflusst. Die Prognose des morphologischen Nachlaufs, also der Folgewirkung eines Fahrrinnenausbaus ist daher einerseits auf die wasserbauliche Systemanalyse mit numerischen Simulationsmodellen und andererseits auf ein umfangreiches Expertenwissen, welches sich auf die natürlichen Trendentwicklungen wie auch auf die anthropogenen Einwirkungen bezieht, angewiesen.

Für die Modellierung des Sedimenttransportes ist eine Vorbelegung bzw. Anfangsbelegung der Sedimenteigenschaften an der Gewässersohle erforderlich. Die Größe der Sedimentpartikel bestimmt einerseits die Art und Weise des Transportes durch die Strömung. Andererseits wird durch die sog. Kornrauheit auch der Energieverlust beschrieben, den die Strömung durch die Reibung an der Gewässerberandung erfährt.

Im Prinzip ist es erforderlich, an jedem Punkt des Berechnungsgitters über Informationen zu den Sedimenteigenschaften an der Gewässersohle zu verfügen. Eine Beprobung der Gewässersohle in dieser Dichte ist praktisch unmöglich. Für die Entwicklung der Sedimenteigenschaften wurden im Jahre 2005 1000 Bodenproben entnommen und so ausgewertet, dass sie den Anforderungen der morphodynamischen Untersuchung entsprachen. Die Proben wurden auf Querprofilen entnommen, die in Längsrichtung einen Abstand von 1 km voneinander haben. Innerhalb eines Profils wurden mind. 7 Proben vorgesehen, deren Entnahmepunkte tiefenorientiert (Mitte Fahrrinne, ca. NN -10 m, NN -5 m und NN -1 m, jeweils in Richtung der Ufer) gewählt wurden. Die Bilder 2 bis 4 der Unterlage H.1c zeigen die Orte der Probennahme. Aus den Sedimentbeprobungen wurden Gebiete mit ähnlichen Sedimenteigenschaften definiert, die dann mittels gewichteter räumlicher Interpolation auf die Berechnungspolygone des Elbmodells verteilt wurden. In Bereichen, in denen im Ausbauzustand die Sohle tiefer liegt als im Ist-Zustand, wird die Sedimentbelegung des Ist-Zustandes weiter verwendet.

Aus der so bestimmten Sedimentverteilung wurden 7 Fraktionen gebildet, mit denen die Berechnungen durchgeführt werden. Diese 7 Fraktionen entsprechen im Wesentlichen der Einteilung der Korngrößen nach DIN 4022 bzw. entsprechend der Udden-Wentworth-Skala. Der Geschiebetransport wird hier durch 5 Fraktionen sehr feiner Sand bis grober Sand beschrieben, dem Schwebstofftransport werden 2 Fraktionen zugeordnet, nämlich die des mittleren Schluffs und des groben Schluffs. Die Bilder 35 bis 69 der Anlage 1 zur Unterlage H.1c zeigen flächenhaft für die jeweiligen Teilgebiete die Prozentanteile der einzelnen Kornfraktionen im an der Sohle als Anfangsbelegung des Modells vorgegebenen Sedimentgemisch.

Für die Kalibrierung bzw. Verifikation des Sedimenttransportmodells werden Naturmessdaten über den Sedimenttransport benötigt. Über den Geschiebetransport gibt es praktisch keine quantitativen Erkenntnisse, weil dieser zum einen nur sehr schwierig messtechnisch zu erfassen ist und zum anderen für den Gesamtsedimenttransport von untergeordneter Bedeutung ist. Auch die vorhandenen Kenntnisse über den Schwebstofftransport liefern eher ein phänomenologisches Gesamtbild des Sedimenttransportregimes. Die Datengrundlagen entsprechen nur teilweise den Anforderungen, die für die Validierung eines dreidimensionalen hydronumerischen Modells des Sedimenttransportes gestellt werden müssen. Aus den verschiedenen Daten ergibt sich das folgende Gesamtbild der Trübungszone im Elbästuar: Ihre Form und Lage verändert sich in Abhängigkeit des Oberwasserzuflusses. Die maximalen Schwebstoffkonzentrationen erreichen bei hohem Oberwasser ( $Q > 900 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ca.  $350 \text{ mg/l}$ . Das Maximum der Trübungszone liegt dann bei Elbe-km 690 (St. Margarethen). Insgesamt ist die Trübungszone gedrängter (analog zur Salzgehaltsverteilung) als bei niedrigem Oberwasser von z. B.  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bei diesen Oberwasserverhältnissen beträgt die maximale Konzentration  $600 \text{ mg/l}$ , wobei das Maximum der Trübungszone 10 km weiter stromauf bei der Störmündung liegt.

Um weitere Daten für die Validierung der Schwebstoffmodellierung zu bekommen, hat die BAW ADCP-Querprofildaten ausgewertet. Die Lage der Querprofile ist in Bild 6 der Unterlage H.1c dargestellt. Im Ergebnis entstehen aus diesen Daten querschnittsgemittelte Konzentrationswerte zu bestimmten Tidephasen, die Auskunft und Anhaltspunkt über die Lage der Trübungszone und deren Konzentrationen liefern. Danach liegt die maximale Schwebstoffkonzentration bei voll entwickeltem Flut- bzw. Ebbestrom bei etwa  $900 \text{ mg/l}$  etwa in Höhe der Störmündung. Die maximalen Konzentration bei Ebbestromkenterung liegen bei knapp  $700 \text{ mg/l}$  und bei Flutstromkenterung bei knapp  $500 \text{ mg/l}$ . (Die Verteilungen sind in Bild 7 der Unterlage H.1c dargestellt). Diese Werte liegen deutlich höher als die aus der Literatur bekannten, querschnittsgemittelten Werte. Die BAW führt dies auf den Umstand zurück, dass für die ADCP-Profile systembedingt nur im relativ tiefen Wasser gemessen werden konnte, wo die Konzentrationen deutlich höher liegen. Der Mittelwert aus den ADCP-Profilen ist also nicht repräsentativ für den gesamten Querschnitt.

Wie vorstehend beschrieben, verfrachtet die Strömung Sediment in Suspension oder an der Sohle (springend, hüpfend) als Geschiebe. In der Natur besteht zwischen beiden Transportarten keine scharfe Grenze. Im Grobkornbereich (Sande, Kiese) werden Sedimente überwiegend als Geschiebe transportiert. Feinkörnige Sedimente (Schluff und Ton, aber auch Feinsand) werden überwiegend in Suspension bewegt. Weil das Sedimentinventar im Elbästuar überwiegend aus Kornfraktionen kleiner gleich Feinsand besteht, ist der Prozess des Schwebstofftransportes für die Gesamtmenge transportierten Sedimentes weitaus bedeutender als der des Geschiebetransportes. Werden über einen Kontrollraum (z. B. zwischen zwei Gewässerquerschnitten) die ein- und ausgehenden Sedimente bilanziert, lässt sich der Saldo aus Erosion und Deposition (Sedimentation) quantifizieren. Die daraus resultierende Änderung der Gewässersohllage und evtl. ihrer Kornzusammensetzung verändert rückwirkend auch die Strömung. Es entsteht ein dynamisches Gleichgewicht aus Erosions- und Sedi-

mentationsprozessen, die in der Wechselwirkung zwischen Sohlagenentwicklung und Strömungsänderung sich nicht selbst verstärken.

Der Sedimenttransport und damit die morphodynamische Entwicklung werden im Küstenbereich durch folgende Antriebsprozesse gesteuert:

- Tideinduzierte und barokline (durch Dichte induzierte) Durchströmungen
- Seegangsinduzierte Prozesse
- Windinduzierte Sedimenttransporte (äolischer Transport).

In den tiefen Rinnen dominiert der strömungsbedingte Transport, weil dort die stärksten Strömungsgeschwindigkeiten auftreten und die Orbitalbewegungen der Wellen die Gewässersohle nicht mehr erreichen. In dem Seegang ausgesetzten Flachwasser- und Wattgebieten herrschen die durch Seegangsprozesse induzierten Sedimenttransportraten vor, weil die mit der Wellenbewegung verbundene Erosion von Sediment der Gewässersohle den Wasserkörper mit Feststoffen auflädt. Die im Wasserkörper enthaltenen Feststoffe werden durch die Tideströmung und ggf. durch winderzeugte Driftströmungen weiter transportiert. Der äolische Sedimenttransport, der z. B. für die morphodynamische Entwicklung der ostfriesischen Inseln eine hohe Bedeutung hat, spielt in der Unter- und Außenelbe nur eine untergeordnete Rolle. Man kann seine Wirkung aber an unbefestigten Ufern, wie z. B. bei Drommel/Auberg oder am Schwarztonnensand beobachten, wo der äolische Sedimenttransport sog. Strandwälle aufweht.

Für das Verständnis des ästuarinen Sedimenttransportes ist die Wirkung der Brackwasserzone von Bedeutung. In dieser Zone, insbesondere in ihrem oberen Bereich, tritt zu den Zeiten der Tidekenterung, in denen wegen der geringen Strömungsgeschwindigkeiten der Wasserkörper in der Vertikalen nicht mehr vollständig durchmischt ist, eine sohlnahe Schichtung des Wassers mit höheren Salzgehalten an der Gewässersohle auf. Durch die nach der Tidestromkenterung eintretende Vermischung nimmt das salzärmere Wasser an der Oberfläche Wassermassen aus den unteren Schichten auf und transportiert diese oberflächennah in Richtung der Flussmündung. Aus Gründen der Kontinuität strömt salzreicheres Wasser in den unteren Schichten flussaufwärts. Diesem, mit „ästuariner Zirkulation“ bezeichneten Phänomen, wird die Ansammlung von Schwebstoffen in der Trübungszone zugeschrieben, die demnach mit der Brackwasserzone zusammenfällt. Im Übergangsbereich zum Süßwasser stellt sich ein örtlich begrenztes Trübungsmaximum mit überdurchschnittlich hohem Trübungsgehalt ein. Die Ausprägung des Trübungsmaximums ist sowohl von der Variation des Salzgehaltes durch die Tide als auch von der Variation des Oberwasserzuflusses abhängig. In der Folge kann sich die Lage des Trübungsmaximums im Elbästuar zwischen dem Osteriff und Glückstadt verschieben.

Da Schwebstoffe in der Wasserströmung im Gegensatz zu gelösten Substanzen (wie Salz) eine eigene Dynamik besitzen, nämlich eine bezogen auf ihre Eigenschaften spezifische Sinkgeschwindigkeit, setzen sich die Schwebstoffe an der Sohle ab, sobald die Strömungsturbulenz sie nicht mehr in Schwebelage halten kann. Aus dem Tidezyklus entsteht daraus in der Regel eine periodische Deposition und Resuspendierung von Schwebstoffen. Werden Schwebstoffe in Abschnitte des Ästuars, wie z. B. Flach-

wasserzonen, wenig durchströmte Hafenbereiche oder Bühnenfelder transportiert, dann können sie sich dort aufgrund der geringen Strömungsturbulenz und der langen Verweilzeiten absetzen, werden nicht mehr resuspendiert und konsolidieren. Dieser Prozess ruft die sog. Verlandung hervor.

Für die Modellierung der morphodynamischen Prozesse werden durch die BAW folgende Modellverfahren eingesetzt:

- Das dreidimensionale hydronumerische Simulationsverfahren UnTRIM, das, wie zuvor in Abschnitt 2.2 erläutert, die dreidimensionalen Prozesse der Tidedynamik sowie den Transport von Salz und fraktionierten, suspendierten Sedimenten beschreibt.
- Das morphodynamische Simulationsverfahren SediMorph, das den fraktionierten Geschiebetransport berechnet und die Erosions- und Depositionsströme aus Geschiebe- und Schwebstofftransport verwaltet.
- Das spektrale Seegangmodell UnK (k-Modell), welches die Ausbreitung und Veränderung des Seegangs beschreibt. Das Seegangmodell UnK kann auch gekoppelt mit UnTRIM und SediMorph betrieben werden, um die Wechselwirkung zwischen Tidedynamik, Seegang und Feststofftransport zu erfassen.

Das Verfahren UnTRIM wurde bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben.

Das Verfahren SediMorph ist eine Eigenentwicklung der BAW zur Simulation von dreidimensionalen sedimentologischen Prozessen an der Gewässersohle. Hierzu wird die Massenbewegung infolge des Geschiebe- und Suspensionstransports der einzelnen Kornfraktionen sowie des Porenwassers bilanziert. Aus diesen Sedimentströmen resultieren Sohlhöhenveränderungen. Dabei beschreibt das Modell den Aufbau und die Veränderung der Gewässersohle, d.h. es verwaltet das Sedimentinventar. In einem Teilbereich dieses Verfahrens wird auch der fraktionierte Teil des Geschiebetransports berechnet. Das Modell SediMorph arbeitet auf dem gleichen unstrukturierten orthogonalen Gitter wie UnTRIM.

Bei dem spektralen Seegangmodell UnK handelt es sich um ein Verfahren mit nicht-linearer Energiedissipation durch turbulente Diffusion (z. B. beim Wellenbrechen), das am GKSS Forschungszentrum (Geesthacht) unter dem Namen K-Modell entwickelt wurde. UnK dient der instationären Berechnung der Entstehung, Ausbreitung und Dissipation von Seegang im Ozean, in Küstengewässern und Ästuaren. Das Verfahren basiert auf der Erhaltungsgleichung der Aktionsdichte, der Wellen (Wave-action-density), die in ihrer erweiterten Form die nicht-lineare Seegangsturbulenz-Wechselwirkung berücksichtigt. Das Verfahren kann, wie die anderen genannten Verfahren, ebenfalls auf den unstrukturierten orthogonalen Gittern arbeiten.

Die BAW weist ausdrücklich darauf hin, dass eine vollkommen naturähnliche Simulation des Sedimenttransportes nicht möglich ist, weil dafür eine genaue Berechnung der zeit- und ortsveränderlichen Erosions- und Sedimentationsarten im gesamten Untersuchungsgebiet durchzuführen wäre. Dies wärenur dann möglich, wenn die natürliche, räumlich und zeitlich sehr variable Verteilung der Sedimenteigenschaften, wie z. B. Kornzusammensetzung, Konsolidierungsgrad des Bodens oder biologische Besiedlung, vollständig in der Natur für das gesamte Untersuchungsgebiet kleinräumig erhoben werden könnte. Weil dies unmöglich ist, arbeiten die Modelle mit Vereinfachungen.

chungen und Vergrößerungen, aus denen sich Diskrepanzen zwischen Natur und Modell in den berechneten Erosions- und Sedimentationsmengen ergeben.

Trotz dieser Ungenauigkeiten liefern die Modelle nach den Regeln einer strukturierten wasserbaulichen Systemanalyse belastbare Hinweise für ein ausbaubedingt verändertes Systemverhalten. Mit den ausbaubedingten Veränderungen der Tidedynamik, die sich vergleichsweise exakt durch die numerischen Simulationsverfahren bestimmen lassen, können auch kurzfristige (mehrere Wochen) Änderungen der Morphologie bestimmt werden, die vor dem Hintergrund der vorangestellten Unschärfe eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der morphologischen kurzfristigen Änderungen erlauben. Auch Aussagen für eine langfristige Prognose über mehrere Jahre oder gar Jahrzehnte können mit mathematischen Simulationsmodellen gewonnen werden, wenn sie sich auf zum Teil schon bestehende signifikante Trends abstützen, die empirisch belegt sind. Hierfür muss die Analyse der Simulationsergebnisse mathematischer Modelle mit einer phänomenologischen Betrachtung und Beschreibung der Morphodynamik kombiniert werden, die auf wasserbaulichem Expertenwissen beruht.

Im Vergleich zu den in Abschnitt 2.2 und 2.3 beschriebenen Modellverfahren und Randwertsteuerungen, werden für die Sedimenttransportmodellierung folgende weitere Randwertfestsetzungen gewählt:

- Für die Schwebstoffkonzentration und den Geschiebestrom liegen am seeseitigen Rand keine Messungen vor. Da das Systemverhalten des Schwebstofftransportes während des Simulationszeitraumes nicht durch die Werte am seeseitigen Rand bestimmt wird, wurden diese Randwerte konstant auf einen Wert von 0 mg/l gesetzt.
- Mit dem Oberwasser wurde für jede Schwebstofffraktion (Grob- und Mittelschluff) eine Konzentration von 20 mg/l vorgegeben, so dass die Gesamtschwebstoffkonzentration des Oberwassers 40 mg/l beträgt. Dies entspricht ungefähr der mittleren Schwebstoffkonzentration der Elbe in diesem Bereich.
- Für den Geschiebetransport wurden keine harten Randwerte vorgegeben, sondern es wird ein Gleichgewichtszustand angenommen, d.h. entsprechend dem Systemverhalten kann Geschiebe durch den offenen Modellrand das Gebiet verlassen oder eingetragen werden (sog. Null-Gradienten-Randbedingung).

Der Untersuchung werden folgende Szenarien zu Grunde gelegt:

1. Spring-Nipp-Zyklus Mai 2002 (wie in Abschnitt 2.2) mit gemessenem Oberwasser, variablen Windfeldern und variablen Randwerten für den seeseitigen Salzgehalt.
2. Spring-Nipp-Zyklus Mai 2002 mit häufigen niedrigem Oberwasser (350 m<sup>3</sup>/s) ohne Wind und mit konstantem seeseitigen Salzgehalt (30 PSU).
3. Spring-Nipp-Zyklus Mai 2002 mit hohem Oberwasser (1500 m<sup>3</sup>/s) ohne Wind und mit konstantem seeseitigen Salzgehalt (30 PSU).

Das erste Szenario dient der Validierung. Aus den Läufen 2 und 3 werden durch die BAW die wesentlichen gutachterlichen Aussagen abgeleitet.

Die Validierung des Modells hinsichtlich der Parameter Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt ist in Abschnitt 1.2 beschrieben.

Die Kalibrierung und Validierung des Schwebstofftransportes ist weitaus komplexer, wegen der vorstehend ausgeführten räumlichen und zeitlichen Variabilität des Sedimenttransportes. Trotzdem kann nachgewiesen werden, dass die wesentlichen Charakteristika des Schwebstofftransportes nachgebildet werden können. Bild 26 der Unterlage H.1c enthält die berechneten querschnittsintegrierten mittleren Schwebstoffkonzentrationen im Validierungszeitraum, aufgetragen über den Längsschnitt der Unter- und Außenelbe. Die Lage der Trübungszone sowie die berechneten Konzentrationswerte stimmen mit aus der Literatur bekannten Kenntnissen über die in der Natur vorhandenen Trübungszone gut überein.

Zusammenfassend stellt die BAW fest, dass die für eine morphologische Analyse erforderlichen Prozesse so naturähnlich wiedergegeben werden, wie es derzeit (auch im internationalen Vergleich) möglich ist.

## 2.5.2 Auswirkungen

Im folgenden werden die Auswirkungen auf den Schwebstoffhaushalt zusammenfassend wiedergegeben. Die BAW beschreibt den Schwebstofftransport (in Unterlage H.1c „Suspensionstransport“ genannt) mittels der beiden folgenden Kenngrößen:

- Tiefenintegrierte Suspensionskonzentration [mg/l], die flächenhaft oder in Form von Schnitten z. B. entlang der Fahrrinnenachse oder entlang einer Nebenelbe dargestellt wird.
- Advektiv (also mit der Strömung) transportierte Fracht [kg/m], womit die pro Breitenmeter senkrecht zur Hauptströmungsrichtung in einer Zeiteinheit transportierte Fracht gemeint ist.

Das grundsätzliche Veränderungsmuster der Schwebstoffkonzentrationen kann wie folgt zusammengefasst werden:

Die Analyseergebnisse der BAW zeigen in Form von flächenhaften Darstellungen die Tidekennwerte „mittlere Schwebstoffkonzentration“, „maximale Schwebstoffkonzentration“ und „Schwebstoffkonzentrationsvariation“ (Unterlage H.1c Bild 188 bis Bild 217). Von den genannten Tidekennwerten sind die über den jeweiligen Tidezyklus (Flut und Ebbe) gemittelten Sedimentkonzentrationen entscheidend, weil sie den Mittelwert der über den gesamten Tidezyklus an einem Ort beobachtbaren Sedimentkonzentrationen beschreiben. Im Gegensatz zu maximalen Konzentrationen (Kurzzeitwerte) sind die mittleren Konzentrationen weniger anfällig gegenüber kurzzeitigen Erscheinungen wie dem Überfluten und Trockenfallen von Wattflächen, die eine Veränderungsanalyse auf Basis der maximalen, in einer Tidephase beobachteten Schwebstoffkonzentrationen einseitig beeinflussen. Die Abbildungen für die mittleren (aber in der Grundtendenz auch die maximalen) Schwebstoffkonzentrationen in Unterlage H.1c zeigen folgendes grundlegendes Muster:

- Etwa stromab von Glückstadt (in der Hauptelbe etwas weiter stromauf, in der Glückstädter Nebenelbe etwas weiter stromab) verändern sich die mittleren Sedimentkonzentration bzw. der mittlere Schwebstoffgehalt nicht oder sie werden kleiner. Lediglich im Bereich der Unterwasserablagerungsflächen Neufeld und Medemrinne sowie an der Störmündung und auf den Sänden zwischen Freiburg und Wischhafen gibt es punktuelle Zunahmen der Sedimentkonzentration.

- Zwischen Glückstadt und Dwarsloch erhöht sich die mittlere Sedimentkonzentration um etwa bis zu 5 mg/l. Diese Zunahme ergibt sich sowohl in der Hauptelbe als auch in den angrenzenden Nebanelben (Nebanelbe am Schwarztonnensand, Pagensander Nebanelben, Haseldorfer Binnenelbe). Auf der Nordostseite von Pagensand und im Gebiet der Krückaumündung werden kleinräumig größere Erhöhungen der mittleren Sedimentkonzentration bis etwa 10 mg/l durch das Modell berechnet.
- Stromaufwärts des Dwarsloches zeigen die Modellrechnungen gleichbleibende oder abnehmende Sedimentkonzentrationen an. Lokale Zunahmen werden in der Nähe der Estemündung (Mühlenberger Loch), in der Süderelbe zwischen Harburg und Bunthaus sowie in einigen Hafenbecken Hamburgs prognostiziert.

Die Zu- und Abnahmen der Schwebstoffkonzentrationsvariation korrespondieren mit den Zu- und Abnahmen der mittleren Konzentration.

Die Erhöhung der mittleren Schwebstoffkonzentration entspricht einer Zunahme der advektiven Transportraten (Frachten), die sich wie folgt zusammenfassend darstellt: Unterhalb der Störmündung wird der ebbestromdominante Schwebstoffstrom verstärkt, werden Sedimente also aus dem Ästuar in das Küstenmeer verfrachtet. Oberhalb der Störmündung kehrt sich die Schwebstoffstromrichtung um. Der hier bereits im Ist-Zustand flutstromorientierte Schwebstoffstrom wird verstärkt. Oberhalb von Wedel vermindert sich durch den Ausbau der flutstromorientierte Schwebstoffstrom, wodurch eine Reduktion des Schwebstoffeintrags in die Hahnöfer Nebanelbe, das Mühlenberger Loch und den Hamburger Hafen bewirkt wird.

Im Folgenden werden die zu erwartenden Auswirkungen auf das Schwebstoffregime durch die Fahrrinnenanpassung differenziert für die einzelne Abschnitte beschrieben.

Die mittleren Schwebstoffkonzentrationen verändern sich zwischen dem Wehr Geesthacht und der Bunthäuser Spitze nicht. Im Abschnitt Süderelbe zwischen Bunthäuser Spitze und den Häfen in Harburg erhöht sich die mittlere Schwebstoffkonzentration um bis zu 3 mg/l. Die durch das Modell berechnete mittlere Konzentration im Ist-Zustand liegt bei bis zu 40 mg/l (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bilder 204 bis 207). Der ebbestromorientierte advektive Schwebstoffstrom verändert sich ausbaubedingt nicht (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bild 245 und 247). Vorhabensbedingt verstärkte Unterhaltungsaufwendungen sind in diesem Abschnitt nicht zu erwarten.

Im Abschnitt zwischen Bunthäuser Spitze und Mühlenberger Loch nimmt die mittlere Schwebstoffkonzentration um bis zu 5 mg/l ab. Die Abnahme beginnt in der Süderelbe nahe des Containerterminals Altenwerder und in der Norderelbe unterhalb der Elbbrücken. Sie ist im Mühlenberger Loch am größten. Die mittlere Schwebstoffkonzentration im Ist-Zustand wird durch das Modell mit etwa 30 bis 40 mg/l berechnet. In einigen trockenfallenden Hafenbecken treten lokal auch Zunahmen der mittleren Schwebstoffkonzentration auf (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bilder 204 und 205).

Der im Ist-Zustand im Wesentlichen stromauf gerichtete advektive Schwebstoffstrom in der Größenordnung von 3.000 kg/m wird in einem Bereich etwa zwischen dem Köhlbrand und dem Mühlenberger Loch um ca. 500 kg/m reduziert (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bilder 244 und 245). Vorhabensbedingt reduzierte Unterhaltungsaufwendungen sind im Wasserkörper Hafen lediglich tendenziell zu erwarten. BAW

(Unterlage H.1c) gibt an, dass die Baggermengen oberhalb von Nienstedten (Höhe Mühlenberger Loch, ca. Fahrrinnenkilometer 633) „nicht nennenswert zunehmen werden“.

Im Abschnitt zwischen Mühlenberger Loch und Lühemündung reduziert sich die mittlere Schwebstoffkonzentration um bis zu 5 mg/l. BAW berechnet die Schwebstoffkonzentrationen im Ist-Zustand in diesem Abschnitt mit etwa 50 mg/l (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bild 202-203).

Der advective stromaufgerichtete Restschwebstoffstrom, überwiegend in der Größenordnung von 3.000 kg/m, nimmt zwischen Mühlenberger Loch und Kraftwerk Wedel (km 640) um bis zu 600 kg/m ab, zwischen Lühesand und Wedel nimmt er um bis zu 600 kg/m zu (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bild 242-243). Mit Anlage der Begegnungsstrecke wird jedoch eine Feststoffsene geschaffen, die häufig gebaggert werden muss. Infolge des verstärkten advektiven Stromauftransportes zwischen Lühesand und Wedel ist mit um >10% verstärkten Unterhaltungsbaggerungen zu rechnen (bezogen auf eine Bezugsbaggermenge von 11,3 Mio. m<sup>3</sup> in den Jahren 2003 bis 2005, vgl. Unterlage H.1c).

Im Abschnitt zwischen Schwinge-Mündung und Kugelbake liegen die Brackwasser- und die Trübungszone. In Abhängigkeit von der Tidephase und dem Oberwasserzufluss werden hier hohe Schwebstoffgehalte beobachtet, die im Zeitmaßstab „Stunden“ mit dem Tidezyklus und im Zeitmaßstab „Wochen“ mit dem Oberwasser schwanken.

Zu Beginn der Ebbe- und Flutphasen treten durch die erhöhte Turbulenz und die damit einhergehende Mobilisierung von Feststoffen sohin erhöhte Schwebstoffkonzentrationen auf. Bei Strömungskenterung treten insbesondere oberflächennah die geringsten Schwebstoffkonzentrationen auf, weil zu diesem Zeitpunkt ein großer Teil der Schwebstoffe kurzzeitig sedimentiert.

Die im Zeitmaßstab „Stunden“ schwankende Schwebstoffkonzentration bei niedrigem und gleichzeitig häufigem Oberwasser hat die BAW analysiert. Die in diesem Abschnitt mit dem Modell berechnete Variation erreicht maximale Werte um 150 mg/l mit lokalen Spitzen - vor allem im Bereich von Wattgebieten - über 200 mg/l. Ausbaubedingt nimmt die Variation in dem Abschnitt Rhinplate bis Lühesand um bis zu 7 mg/l zu. Stromab der Rhinplate erhöht sich die Variation nur in der Fahrrinne, während sie in den Randbereichen abnimmt (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bild 208 - 211). Die Erhöhung der Schwebstoffkonzentrationsvariation korrespondiert mit der Erhöhung der mittleren Schwebstoffkonzentrationen, die hier vor allem im Unterabschnitt zwischen Rhinplate und Lühesand zu erwarten ist.

Im Einzelnen ergibt die Modellierung der BAW folgende Veränderungsanalyse: Im Ist-Zustand liegt die mittlere Schwebstoffkonzentration an der Schwingemündung bei 50 mg/l und nimmt bis zum Südende der Rhinplate auf etwa 120 mg/l zu. In diesem Abschnitt erhöht sich die mittlere Schwebstoffkonzentration ausbaubedingt um bis zu 5 mg/l (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bild 198 - 201). Weiter stromab erreicht die mittlere Schwebstoffkonzentration Maximalwerte über 200 mg/l im Bereich des Störbogens, um dann seewärts wieder abzunehmen. In dem Abschnitt unterhalb der Störmündung gibt es fast keine Veränderungen der mittleren Schwebstoffkonzentrationen, bis auf

wenige Ausnahmen reduziert sie sich in den Seitenbereichen teilweise um bis zu 7 mg/l (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bild 198 - 199).

Im Ist-Zustand weisen die advektiven Nettoschwebstofftransporte oberhalb der Rhinplate überwiegend stromaufwärts (flutstromorientiert). Die Größenordnung im Ist-Zustand beträgt bei der Rhinplate 15.000 bis 18.000 kg/m, am Steindeich lokal bis zu 10.000 kg/m, bei Pagensand 6.000 kg/m und bei der Schwingemündung 4.000 kg/m (Unterlage H.1c, Anlage 1, Bild 238 - 241).

Im ebbstromorientierten Bereich unterhalb von St. Margarethen nimmt der Nettoschwebstofftransport nach unterstrom gerichtet um 600 kg/m zu. Diese ebbstromorientierte Zunahme kehrt sich oberhalb der Störmündung in eine flutstromorientierte Zunahme um. Zwischen Steindeich und dem Dwar sloch und weiter stromauf ergibt sich eine annähernd durchgängige, ausbaubedingte stromaufgerichtete Zunahme des advektiven Nettoschwebstofftransportes um 600 kg/m mit Maximalwerten bis 1.000 kg/m (Unterlage H.1c). Vorhabensbedingt veränderte Unterhaltungsaufwendungen sind zu erwarten. BAW (Unterlage H.1c) gibt Zunahmen an der Rhinplate, dem Altenbrucher Bogen sowie infolge von Seiteneintreibungen entlang der gesamten Fahrrinne an.

Im Abschnitt Kugelbake bis Seegrenze ändern sich sowohl die Schwebstoffkonzentrationen als auch die advektiven Schwebstofftransportraten nicht (Unterlage H.1c).

### **Nebenelben**

Wie vorstehend beschrieben, erhöhen sich die mittleren Schwebstoffkonzentrationen im Abschnitt Rhinplate bis Lühesand. Davon sind auch die Nebenelben betroffen, die eine zur Hauptrinne synchrone Erhöhung erfahren. Ausbaubedingt ändert sich die mittlere Schwebstoffkonzentration wie folgt:

- Glückstädter Nebenelbe: schwache Erhöhung um bis 3 mg/l
- Nebenelbe Schwarztonnensand: Erhöhung um 3 mg/l
- Pagensander Nebenelbe: Erhöhung um 5 mg/l, lokal an der Nordwestseite auch etwas stärker
- Haseldorfer Binnenelbe: Erhöhung um 3 mg/l
- Lühesander Süderelbe: keine Veränderung
- Hahnöfer Nebenelbe: Abnahme um 3 mg/l, lokal bis zu 7 mg/l
- Mühlenberger Loch: bereichsweise Zunahme um 3 mg/l nahe der Estemündung und südlich der Airbuserweiterungsfläche

Auch die advektiven Schwebstofftransportströme in die Nebenelben ändern sich ausbaubedingt. Dies lässt sich, wegen der für die Hauptrinne gewählten Skalierung, anhand der flächenhaften Darstellungen der advektiven Schwebstoffströme nicht zeigen. Statt dessen werden diese in Unterlage H.1c in Abschnitt 11.4.8 als Ergebnisse einer Auswertung anhand von Querprofilen wiedergegeben. Demnach ändert sich der Suspensionseintrag in die Nebenelben wie folgt:

- Glückstädter Nebenelbe: keine Änderung

- Nebelbe am Schwarztonnensand: Zunahme um ca. 6 %
- Pagensander Nebelbe: Zunahme um ca. 5 %
- Lühesander Nebelbe: Zunahme um 2 %
- Hahnöfer Nebelbe: Abnahme um -10 %

Unterhaltungsbaggerungen finden in den Nebelben im Ist-Zustand nicht statt und sind auch zukünftig nicht zu erwarten.

Bis auf die Oste und die Stör wurden die Nebenflüsse der Elbe in der Modellierung der BAW nicht berücksichtigt. Ggf. zu erwartende vorhabensbedingte Auswirkungen auf den Schwebstoffhaushalt in den Unterläufen dieser Nebenflüsse lassen sich aber aus der Veränderung der Schwebstoffkonzentrationen in der Elbe ableiten.

In der Oste zeigen die Modellergebnisse keine Veränderung der mittleren Schwebstoffkonzentrationen, die maximalen Schwebstoffkonzentrationen, die im Ist-Zustand bei 80 mg/l liegen, nehmen bereichsweise um bis zu 3 mg/l zu. Vorhabensbedingt veränderte Unterhaltungsaufwendungen sind in der Oste jedoch nicht zu erwarten. In der Stör, deren Mündung im Bereich des Trübungsmaximums des Übergangsgewässers liegt, sind die Schwebstoffkonzentrationen im Ist-Zustand mit mehr als 200 mg/l deutlich höher. Hier nehmen die mittleren Schwebstoffkonzentrationen an der Mündung um bis zu 7 mg/l zu. Weiter oberstrom bei Itzehoe nehmen die mittleren Schwebstoffkonzentrationen um 3 mg/l ab.

Das Gewässersystem im Bereich des Krautsandes, bestehend aus Wischhafener Süderelbe, Ruthenstrom und angrenzenden Gewässern sowie der Freiburger Hafenpriel ist in einem Teilabschnitt der Elbe gelegen, in dem sich keine Veränderungen der mittleren Schwebstoffkonzentrationen ergeben.

Die Nebenflüsse Krückau und Pinnau münden in die Pagensander Nebelbe, BAW gibt dort eine Erhöhung der mittleren Schwebstoffkonzentration um 5 mg/l an. Es ist davon auszugehen, dass eine entsprechende Erhöhung auch in den tidebeeinflussten Bereichen der beiden Nebenflüsse auftreten wird.

In der Bützflether Süderelbe und der Schwinde liegen ähnliche Verhältnisse wie bei Krückau und Pinnau vor. Da sich im Mündungsbereich dieser Nebenflüsse bzw. Nebengewässer die mittlere Schwebstoffkonzentration in der Elbe um bis zu 5 mg/l erhöht, werden sich auch in diesen beiden Nebengewässern, soweit tidebeeinflusst, die Schwebstoffkonzentrationen erhöhen, zumal insbesondere die Bützflether Süderelbe über keinen nennenswerten eigenen Oberwasserzufluss verfügt.

Die Nebenflüsse Lühe und Wedeler Au / Hetlinger Binnenelbe sowie die Flottbek münden in einen Abschnitt der Elbe, in dem die mittlere Schwebstoffkonzentration großräumig abnimmt. Es ist daher auch in diesen Nebengewässern mit einer Abnahme zu rechnen. Die Mündung der Flottbek weist jedoch ein Fluttor auf, dieses schließt, wenn die Wasserstände in der Elbe höher als die Binnenwasserstände sind. Die Veränderungen in der Elbe können deshalb und bedingt durch die mindere Größe des Durchlasses, nur eingeschränkt bzw. phasenweise in der Flottbek wirken.

Auch die Este mündet in einen Abschnitt der Elbe, in dem die mittleren Sedimentkonzentrationen großräumig abnehmen. Da aber lokal im Mühlenberger Loch in der Nähe

der Estemündung auch Erhöhungen der mittleren Schwebstoffkonzentration durch die BAW prognostiziert werden, kann insgesamt von gleichbleibenden Verhältnissen im tidebeeinflussten Bereich der Este ausgegangen werden.

Die weiter oberstrom gelegenen Nebenflüsse Seeve, Luhe und Ilmenau münden in einen Abschnitt der Elbe, in dem keine Veränderungen der mittleren Schwebstoffkonzentration prognostiziert werden.

## **2.6 Auswirkung des Vorhabens auf die Morphologie**

Die Auswirkungen des Vorhabens auf die Veränderung der Morphologie, also die Veränderung des Gewässerbettes, werden im Gutachten der BAW „zur ausbaubedingten Änderung der morphologischen, morphodynamischen Prozesse“ (Unterlage H.1c) beschrieben. In diesem Kapitel werden neben der möglichen vorhabensbedingten Veränderung der Morphologie auch die prognostizierten Veränderungen der Unterhaltungsbaggerung beschrieben.

### **2.6.1 Modell**

Die durch die BAW eingesetzten Modellierungswerkzeuge sind in Abschnitt 2.5.1 beschrieben. Für die Analyse der ausbaubedingten Veränderungen werden außerdem die im folgenden beschriebenen zusätzlichen Modellverfahren eingesetzt. Diese zusätzlichen Modellverfahren beziehen sich insbesondere auf verschiedene Methoden zur Prognose der Sohlhöhenveränderung. Hierzu werden neben der zweiwöchigen Echtzeitmodellierung mittels des bereits beschriebenen Verfahrens UnTRIM weitere Verfahren mit der Möglichkeit zur Abschätzung von Langzeitentwicklungen eingesetzt. Es sind dies:

- Das Simulationsverfahren Delft3D, das im 2D-Modus betrieben wurde und in dem ein Zeitbeschleunigungsfaktor von 20 eingesetzt wurde.
- Das Verfahren UnTRIM-SediMorph mit einem Beschleunigungsfaktor von 5 - 7.
- Das Simulationsverfahren MARTIN ohne Beschleunigungsfaktor für einen Simulationszeitraum von 60 Tagen.

Die Berechnungen mit diesen Verfahren sind in der Anlage 2 zur Unterlage H.1c dokumentiert.

Der angesprochene Zeitbeschleunigungsfaktor in den Modellen verstärkt die berechneten morphologischen Veränderungen im Sinne eines Zeitraffers, so dass mit einer geringen Anzahl Zeitschritten ein längerer Zeitraum simuliert werden kann.

Diese von der BAW als „Systemstudie“ bezeichneten Modellierungen werden zur Absicherung der im folgenden dargestellten Prognose zur Sohlevolution, also zur Veränderung der Gewässersohle, eingesetzt.

### **2.6.2 Auswirkungen**

Die mit den verschiedenen Modellen berechneten Veränderungen der Morphologie sind detailliert im Abschnitt 9 der Unterlage H.1c beschrieben. Eine Synthese der verschiedenen Modellergebnisse und Kombinationen mit wasserbaulichem Expertenwis-

sen in Form einer wasserbaulichen Systemanalyse erfolgt in Abschnitt 11 der genannten Unterlage, als sog. prozess-orientierte Analyse für morphologische Einheiten. Hieraus werden die wesentlichen Ergebnisse der Prognose zusammenfassend wiedergegeben. In diese Prognose fließt auch die Betrachtung des Schwebstofftransportes ein, weil dieser zu den insgesamt bewegten Frachten erheblich beiträgt.

#### Außenelbe im Übergang zur deutschen Bucht

Im Ist-Zustand unterliegt dieses Gebiet ständigen großen natürlichen Veränderungen der Morphologie. In der mittel- bis langfristigen Rückschau haben in dem Gebiet westlich des Gelbsandes bis einschließlich Großer Vogelsand und auch südwestlich vom Gelbsand bis zur Fahrrinnenkurve am Leitdamm Kugelbake erhebliche flächenhafte Erosionen stattgefunden. Diese erheblichen Sedimentverluste haben in den vergangenen Dekaden zu einer schleichenden Verstärkung des Tidehubes in der Unterelbe beigetragen. Das geplante Vorhaben verändert die Strömungen in diesem Gebiet nur wenig. Die Auswirkungen des Ausbaus auf den Sedimenttransport werden sich in diesem Gebiet in der Geschiebedynamik in der Fahrrinne und an den Böschungsrändern durch einen morphologischen Nachlauf bemerkbar machen. Dies resultiert aus geringfügigen lokalen Umlagerungen und Anpassungen, die aber aufgrund der starken natürlichen Entwicklung nicht mess- und beobachtbar sind. Innerhalb der Fahrrinne wird es zwischen Kugelbake und dem Kurvenscheitel bei Elbe-km 735 zu geringfügigen, aufgrund der natürlichen Variabilität nicht messbaren, Zunahmen im Suspensionstransport kommen.

#### Priele, Sände und Wattgebiete nördlich Medemsand

In diesem Gebiet hat sich in der mittelfristigen Rückschau vor allen Dingen das Rinnsystem des Klotzenloches erheblich verlagert. Dadurch ist es zu einer Annäherung des südlichen Abschnitts des Klotzenloches an den nördlichen Abschnitt der Medemrinne gekommen. In den nördlich vom Klotzenloch gelegenen Wattgebieten hat sich bis an die schleswig-holsteinische Westküste reichend eine flächenhafte Sedimentation eingestellt, deren Sedimentquellen in dem Rückgang der Sände, die im vorangegangenen Absatz beschrieben wurden, vermutet wird. Das beantragte Vorhaben wird zu einer tendenziellen Zunahme der Sedimentation an der schleswig-holsteinischen Küste führen. Diese Veränderungen werden so gering sein, dass sie nicht mess- und beobachtbar sind.

#### Kratzsand, Medemrinne, Medemgrund, Altenbrucher Bogen

In diesem Gebiet ist in den letzten 150 Jahren eine sehr ausgeprägte dynamische Entwicklung der Morphologie belegt. Mehrfach hat es in dieser längeren Historie Abspaltungen einer Nebenrinne von der Hauptrinne oberhalb des Altenbrucher Bogens gegeben. Die Entwicklung des Medemgrundes zwischen der Hauptrinne und der Medemrinne hat in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts eingesetzt. Überschlägige Massenbetrachtungen zeigen, dass pro Jahr mehr als 20 Mio. m<sup>3</sup> Material in diesem Abschnitt der Medemrinne durch den Strom aufgenommen wurden und zum Anwuchs des Medemgrundes sowie zur unterhaltungsrelevanten Sedimentation im Fahrrinnen-

bereich unterhalb des Altenbrucher Bogens beim Amerikahafen beitragen. Die in diesen Sedimentmengen enthaltenen nennenswerten Anteile Schluff sind vermutlich während niedriger Oberwasserabflüsse nach stromauf transportiert worden und haben sich im inneren Ästuar abgelagert.

Im Rahmen des beantragten Vorhabens werden in diesem Bereich die beiden Strombauwerke Medemrinne und Neufelder Sand errichtet, die neben der Dämpfung der Tidedynamik auch eine Beruhigung der Morphodynamik am Medemsand bewirken werden. Das Strombauwerk wird den Durchfluss durch die Medemrinne reduzieren und die maximalen Tideströmungen in der Hauptrinne (im Elbabschnitt parallel zur Medemrinne) um 8 % verstärken. Die BAW erwartet, dass sich die Hauptrinne im Abschnitt oberhalb Glameyer Stack in einer morphologischen Folgereaktion aufweiten wird. Gleichzeitig wird die grundsätzliche Dynamik der Medemrinne aber erhalten bleiben, sie wird sich nur mit gebremster Leistung fortsetzen. Insgesamt wird die morphologische Verschiedenheit und Dynamik des hier vorhandenen Elbabschnittes nur verlangsamt, aber nicht verhindert.

Auch in dem ca. 2 km langen Abschnitt der Hauptrinne oberhalb Glameyer Stack wird es zu einer Zunahme der Geschiebetransporte kommen. Die nach dem jüngsten Ausbau in diesem Abschnitt beobachtete Sedimentation wird nach dem beantragten Vorhaben nicht mehr auftreten. Um die Ufer in diesem Bereich zu sichern, ist die Unterwasserablagerungsfläche Glameyer Stack vorgesehen.

#### Neufelder Sand bis Elbehafen Brunsbüttel

Das in diesem Abschnitt vorgesehene Strombauwerk am Neufelder Sand verstärkt die Flut- und Ebbeströmung in der Fahrrinne und nördlich der Fahrrinne an den Osteriff Stacks jeweils auf einer Strecke von 5 km. Diese Zunahmen führen jedoch zu keiner signifikanten Veränderung der Nettogeschiebefrachten in der Fahrrinne. Oberhalb dieser Strömungszunahmen kommt es in der Fahrrinne zu einer Intensivierung der stromauf gerichteten Geschiebefracht zwischen Elbe-km 693 und 700, so dass am Warteplatz Brunsbüttel mit Eintreibung von Geschiebe gerechnet werden muss. Insgesamt verbleiben diese Änderungen gering. Eine Zunahme der Verschlickung kann in diesem Gewässerabschnitt oberhalb der NOK ausgeschlossen werden, weil in der Bilanz die in Suspension mit der Strömung im Gesamtquerschnitt transportierten Feststoffmengen in dem Abschnitt zwischen NOK und Neufelder Sand abnehmen werden (Nettogesamttransportmengen).

#### Elbehafen Brunsbüttel bis Rhinplate

Im Ist-Zustand wird dieses Gebiet, das im Kern mit der Trübungszone zusammenfällt, durch folgende morphologische Entwicklung gekennzeichnet: In der Innenkurve, z. B. auf dem Wattgebiet des Böschrückens oder noch weiter stromauf gegenüber der Störmündung in der Brammer Bank, füllt sich die Gewässersohle durch Sedimentation auf. An der Außenkurve, nördlich der Fahrrinne, werden Sedimente durch Erosion freigesetzt, die vornehmlich in Suspension transportiert werden können. Im Ausbauzustand wird das Freisetzungspotential Schlick im Außenbogen zunehmen, weil es in Folge der Unterwasserablagerungsflächen St. Margarethen und Scheelenkuhlen zu

lokalen Veränderungen der maximalen Strömungen bis zu 8 cm/s kommt. In der langfristigen Folge resultiert daraus, dass die derzeitige Sedimentation am Böschrücken schwach zunehmen wird und zudem die Kerntrübungszone des Ästuars eine Tendenz zur Verlagerung nach oberstrom erfährt.

#### Rhinplate bis Lühesand

Im Ist-Zustand ist dieser Abschnitt durch Erosionen entlang der bei der vorangegangenen Fahrrinnenanpassung angelegten Unterwasserablagerungsfläche Krautsand gekennzeichnet. Dadurch haben sich die vor dem letzten Ausbau bestehenden großen Unterhaltungsaufwendungen an der Rhinplate reduziert. Weitere Erosionen finden an den Böschungsbereichen der Fahrrinne unterhalb der Schwingemündung statt. Sedimentationen bestehen im Ist-Zustand in den Nebnelben, zwischen der Fahrrinne und dem nördlichen Abschnitt von Pagensand sowie direkt oberhalb der Unterwasserablagerungsfläche Twielenfleet beim Eingang zur Lühesander Süderelbe. Im Ausbauzustand ist der Abschnitt parallel zur Rhinplate noch einmal signifikant vertieft. Die Strömungsgeschwindigkeiten werden sich deswegen hier nicht erhöhen. Dadurch nehmen die Ebbestromgeschiebefrachten deutlich ab, die Flutstromgeschiebefrachten nehmen in geringerem Umfang ab. Es wird erwartet, dass deswegen das Sedimentationspotential parallel zur Rhinplate wieder zunimmt. Stromauf von Krautsand bis über die Schwingemündung hinaus nimmt der maximale Flutstrom um bis zu 7 cm/s zu. Weil der maximale Ebbestrom in diesem Abschnitt nahezu unverändert bleibt, wird dieser Gewässerabschnitt zunehmend flutstromdominant. Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, nehmen die Schwebstoffkonzentrationen um bis zu 3 mg/l zu. In Überlagerung der ausbaubedingten Wirkung auf die Strömung ist deswegen in diesem Abschnitt der Tideelbe eine ausbaubedingte Zunahme der Nettotransportmengen um ca. 10 % nach stromauf zu erwarten. Weil diese Berechnung für das hydrologische Szenario niedriges häufiges Oberwasser von 350 m<sup>3</sup>/s durchgeführt wurde, kann diese Angabe als Worst-Case-Betrachtung gelten. Es ist zu erwarten, dass sich ein Teil dieser stromauf transportierten Mengen im Elbeabschnitt zwischen Lühesand und Nienstedten akkumuliert. Ein Teil wird sich auch in diesem Abschnitt in den Nebnelben sowie in den Seitenbereichen der Hauptelbe absetzen.

#### Lühesand bis Nienstedten

Im Ist-Zustand ist es nach dem jüngsten Ausbau zu einem morphologischen Nachlauf in der Lühekurve gekommen, der in einer Absenkung der Fahrrinnensohle und einer Abflachung der Binnenböschung besteht. Auf Höhe des Hamburger Yachthafens gibt es eine Sedimentationszone, die kontinuierliche Unterhaltungsbaggerungen erfordert. Ausbaubedingt nimmt im Abschnitt der Lühekurve die Nettotransportgeschiebefracht nach stromauf zu. Diese zusätzlichen Nettofrachten kommen in der Begegnungsstrecke auf Höhe des Hamburger Yachthafens zum Erliegen und müssen im unterstromigen Abschnitt der aufgeweiteten Begegnungsstrecke gebaggert werden. Diese Mengen sind jedoch von untergeordneter Bedeutung im Vergleich zu den in Suspension transportierten Frachten, deren Nettotransportmengen noch im Lühebogen nach stromauf ebenfalls zunehmen. Diese Zunahmen verschwinden auf Höhe des Hafens Schulau. Insgesamt kann aus den relativ komplexen Nettotransportströmen der

Schwebstofffracht geschlossen werden, dass sich in der Begegnungsstrecke, insbesondere oberhalb des Hafens Schulau, ein verstärktes Sedimentationspotential, unter anderem auch für Weichsedimente, ergeben wird. Dieses Sedimentationspotential wird eine weitere Zunahme des Stromauftransports von Sedimenten in das Hamburger Hafengebiet hinein verhindern.

#### Hamburger Hafen bis Bunthäuser Spitze

Das Gebiet des Hamburger Hafens ist nicht von einer natürlichen morphologischen Entwicklung gekennzeichnet. Der Abschnitt zwischen Teufelsbrück bis nach St. Pauli in der Norderelbe und bis zur Köhlbrandbrücke in der Süderelbe ist stark durch den Schiffsverkehr und die regelmäßige Unterhaltung der Hafenzufahrten geprägt. In den übrigen Gewässerabschnitten der Süderelbe und Norderelbe bis zur Bunthäuser Spitze werden ausbaubedingt die Geschiebefrachten schwach intensiviert. Ursache ist hier die moderate Zunahme des Tidehubs. Auch nach der vorangegangenen Fahrrinnenanpassung haben sich in diesen oberen Abschnitten von Süder- und Norderelbe geringfügige Erosionen ergeben.

#### Bunthäuser Spitze bis Wehr Geesthacht

Die verschiedenen Indikatoren des Sedimenttransportes zeigen in diesem Abschnitt keine ausbaubedingte Veränderung.

#### Morphologische Veränderungen in den Nebnelben

Wie bereits in dem vorangegangenen Abschnitt zum Schwebstofftransport dargestellt, nehmen im gesamten Elbabschnitt von der Rhinplate bis Lühesand die mittleren Schwebstoffkonzentrationen zu. Um den Grad der Zunahme auf die Nebnelben besser abzuschätzen, werden an den unter- und oberstromigen Enden der Nebnelbe Querprofile gesetzt, über denen die vom Flut- und Ebbestrom transportierten Suspensionsmengen bilanziert werden können. Aus der Veränderung dieser bilanzierten Mengen kann abgeschätzt werden, wie sich der Eintrag suspendierter Sedimente in die Nebnelben ausbaubedingt verändert:

- Glückstädter Nebnelbe: keine Veränderung
- Nebnelbe am Schwarztonnensand: Zunahme um ca. 6 %
- Pagensander Nebnelbe: Zunahme um ca. 5 %
- Lühesander Süderelbe: Zunahme um ca. 2 %
- Hahnöfer Nebnelbe: Abnahme um ca. - 10 %.

Die BAW weist ausdrücklich darauf hin, dass dieser Abschätzung das Szenario mit dem häufigen und niedrigem Oberwasserzufluss von 350 m<sup>3</sup>/s zugrunde liegt. Die mit diesem Szenario zu berechnenden Transportmengen dürfen deswegen nur im Rahmen einer Worst-Case-Betrachtung auf das Jahr hochgerechnet werden, weil mit steigenden Oberflächenabflüssen der Nettostromauftransport von Sedimenten abnimmt.

### Unterhaltungsbaggerung in der Fahrrinne

In Abschnitt 1.9 der Unterlage H.1c wird die Wirkung des Ausbau zusammenfassend auf die zu erwartenden Unterhaltungsbaggerungen betrachtet. Dabei weist die BAW einschränkend darauf hin, dass eine exakte Berechnung aufgrund der Variabilität der natürlichen Verhältnisse nicht möglich ist. Um dennoch einen quantitativen Anhaltspunkt zu erhalten, setzt die BAW die vorgenommene relative Veränderungsanalyse ins Verhältnis zu den im Jahre 2003 bis 2005 aufgetretenen Unterhaltungsbaggermengen, die im Mittel 11,3 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr betragen. Diese Menge wird als Bezugsbaggermenge bezeichnet. Es ergeben sich die folgenden Veränderungen:

- Im Ist-Zustand wurden in dem Baggerabschnitt Wedel und Wedeler Au ca. 20 % der Bezugsbaggermenge gebaggert. Aus der relativen Veränderungsanalyse wurde ermittelt, dass diese Menge um 50 % zunehmen wird. Die ausbaubedingte Zunahme beträgt also ca. 10 %, bezogen auf die Bezugsbaggermenge.
- Im Ist-Zustand entfallen etwa 3 % der Bezugsbaggermenge auf die Unterhaltungsbaggerungen im Bereich Rhinplate. Ausbaubedingt wird sich diese Menge verdoppeln, so dass mit insgesamt ca. 6 % der Bezugsbaggermenge zu rechnen ist.
- Im Altenbrucher Bogen wird es aufgrund der längerfristigen morphologischen Anpassungsprozesse an den südlichen Flanken des Medemgrundes zu Veränderungen kommen, die aufgrund der Vielschichtigkeit der Einflüsse nur grob abgeschätzt werden können. Es wird mit einer Zunahme von ca. 3 % bezogen auf die Bezugsbaggermenge gerechnet.
- In den vertieften Abschnitten der Fahrrinnen und in den Abschnitten, in denen die Strömungen in der Fahrrinne deutlich zunehmen, ist nach dem Ausbau ein verstärktes Eintreiben von Sedimenten an den Böschungsrändern zu erwarten. Diese Zunahme wird mit ebenfalls etwa 3 % bezogen auf die Bezugsbaggermenge eingeschätzt.

### **2.6.3 Zusammenfassung**

Zusammenfassend stellt die BAW folgende wesentlichen Ergebnisse der morphologischen Prognose für mögliche ausbaubedingte Veränderungen heraus:

- Die Maßnahme verändert nicht die Feststofftransportprozesse westlich vom Großen Vogelsand. An der Westküste von Schleswig-Holstein zwischen dem Bullenloch im Süden und dem Trischendamm im Norden ergeben sich nur tendenzielle (geringe, nicht messbare) Veränderungen der Zunahme der flutstromorientierten Transporte in den Wattströmen. Im niedersächsischen Nationalpark und im Hamburgischen Nationalpark sind keine Veränderungen zu verzeichnen.
- 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 gerichteten Nettotransporte suspendierter Sedimente um ca. 10 % verstärkt. Das resultierende Transportband reicht nach oberstrom 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 ist zu berücksichtigen, dass der im Flutstromrichtung orientierte Nettotransport suspendierter Sedimente erst mit Oberwasserzuflüssen

unterhalb von 750 m<sup>3</sup>/s Bedeutung gewinnt. Die genannte Steigerung von 10 % ist deshalb bei großen Oberwasserzuflüssen nicht gegeben. Die bisher zwischen Schulau und dem Köhlbrandbogen mit dem Flutstrom dominierenden Transporte werden abgeschwächt.

- Bezüglich einer Veränderung der Unterhaltungsbaggerung wird auf die oben dargestellte Zusammenfassung verwiesen.
- Fortschreitende Erosionsstrecken werden sich aufgrund der verhältnismäßig geringen Zunahme des Tidehubs ausbaubedingt nicht einstellen. 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. Durch die Vertiefung der Fahrrinne und durch das Strombauwerk in der Medemrinne wird es in der Hauptrinne zu langfristigen morphologischen Anpassungsprozessen kommen. Die extreme Dynamik der Medemrinne wird abgeschwächt. Es wird aber erwartet, dass die durch das Strombauwerk eingebrachte Dämpfung der Tidedynamik von Außen- und Untereibe langfristig erhalten bleibt.
- Im Prielsystem der Außenelbe wird es nicht zu beschleunigten Verschlickungen oder Versandungen kommen.
- Die oberhalb der Rhinplate eintretende Intensivierung der mit dem Flutstrom stromauf vordringenden Sedimente hat auch Auswirkungen auf die Nebeneiben und Seitenbereiche der Hauptrinne. Es wird ausbaubedingt zu einer Zunahme des Eintrages schllickiger Sedimente in die Nebeneiben kommen. Die Zunahme des Nettotransportes nach stromauf ist in den Nebeneiben jedoch geringer als in der Hauptrinne. In der Hahnöfer Nebeneibe wird eine signifikante Entlastung der bestehenden Sedimentation eintreten.

## **2.7 Auswirkungen des Vorhabens auf Schiffswellen**

Die Auswirkungen des Vorhabens auf die ausbaubedingten Änderungen der Schiffswellen sind im Gutachten der BAW in der Unterlage H.1d dargestellt.

### **2.7.1 Methodische Vorgehensweise**

Zur Prognose der ausbaubedingten Änderungen von schiffserzeugten Belastungen kommen folgende Bearbeitungsmethoden in Betracht:

- Empirische und analytische Berechnungsmethoden
- Numerische Berechnungsverfahren
- Prognose auf Basis von Naturmessungen
- Versuche mit hydraulischen (wasserbaulichen) Maßstabsmodellen.

Es gibt eine Reihe von theoretisch hergeleiteten oder empirisch entwickelten Berechnungsansätzen, die unter der Voraussetzung einfacher, geometrisch regelmäßiger Berandungen der Schifffahrtsstraßen eingesetzt werden können. Weil aber das Tideästuar der Elbe eine äußerst inhomogene geometrische Berandung aufweist, können die bekannten empirischen analytischen Berechnungsansätze nicht für eine Abschät-

zung der schiffserzeugten Belastung der seegängigen Großschifffahrt herangezogen werden.

Die BAW verfolgt ferner die wissenschaftliche Debatte über die verschiedenen existierenden numerischen Berechnungsverfahren und testet die Möglichkeit ihrer Anwendung zur Prognose der ausbaubedingten Veränderungen von Schiffswellen in der Seeschifffahrtsstraße Elbe. Sie kommt zu dem Ergebnis, dass alle Modellverfahren, insbesondere wegen der typischen Schiffsgeschwindigkeiten tiefgehender Containerschiffe bei tideabhängiger Revierfahrt, auch heute noch nicht als wissenschaftliche Methode gemäß dem anerkannten Stand der Technik einzustufen sind und deswegen für die Prognose der ausbaubedingten Veränderungen keine hinreichenden Erkenntnisgewinne bieten.

Die BAW betrachtet Naturmessungen als unverzichtbares Werkzeug zur Untersuchung von Schiffswellen und Seegangsbelastung im Ist-Zustand. Sie hat umfangreiche Messkampagnen entlang der Seewasserstraße Elbe und an anderen Stellen durchgeführt. Selbst Messungen unter den als sehr regelmäßig zu bezeichnenden geometrischen Randbedingungen am Nord-Ostsee-Kanal zeigen aber, dass eine systematische Analyse der Abhängigkeiten der Schiffswellen von Parametern wie z. B. Tiefgang, Passierabstand, Schiffsform und Größe sowie Wetterbedingungen nicht möglich ist. Eindeutige physikalische Zusammenhänge können aus den Naturmessungen nicht abgeleitet werden. Sie eignen sich also nur zur Erfassung des Ist-Zustandes und können nicht für eine Veränderungsprognose herangezogen werden.

Die Untersuchung von Schiffswellen in verkleinerten hydraulischen Maßstabsmodellen nach den FROUDE'schen Modellgesetzen werden seit etwa einem Jahrhundert durchgeführt und gelten als anerkannter Stand von Technik und Wissenschaft für diese Fragestellung. Daher gründet die BAW ihre Prognose im Wesentlichen auf solche Modellversuche, weil nur diese eine abgesicherte quantitative Vorhersage der ausbaubedingten Veränderung von schiffserzeugten Belastungen im extremem Flachwasser von inhomogenen Wasserstraßen ermöglichen.

Aus verschiedenen Gründen ist es nicht möglich, das gesamte Tideästuar der Elbe in einem für die Untersuchung der ausbaubedingter Änderungen der Schiffswellen geeigneten Modellmaßstab nachzubilden. Deswegen konzentriert sich die BAW auf einen Untersuchungsabschnitt, der topographisch komplexe Randbedingungen enthält und für den die Auswirkungen mit diesem Ausschnittsmodell exakt prognostiziert werden können. Durch ergänzende Systemversuche ist die BAW in der Lage, die Erkenntnisse aus dem hydraulischen Ausschnittsmodell auf das gesamte Gebiet der Seeschifffahrtsstraße Elbe zu übertragen.

Für das hydraulische Ausschnittsmodell wurde ein Abschnitt bei Wedel zwischen km 641,6 und km 643,2 gewählt (Hamburger Yachthafen). Für den gewählten Modellmaßstab 1 : 40 weist die BAW nach, dass er geeignet ist, die relevanten strömungsmechanischen Prozesse unter Berücksichtigung der Gesetze der Ähnlichkeitsmechanik wiederzugeben (Unterlage H.1d, Abschnitt 7.2.1). Die Prognosefähigkeit des Modells für den Untersuchungsabschnitt ist damit sichergestellt. Eine ausführliche Beschreibung mit der Versuchseinrichtung und der eingesetzten Messtechnik enthält der Abschnitt 7.2.2 der Unterlage H.1d.

Für die Untersuchung werden verschiedene Schiffstypen verwandt, die in Tabelle 5 der Unterlage H.1d aufgeführt sind. Hier ist auf das sog. Bemessungsschiff hinzuweisen, welches aus einem Postpanmax-Containerschiff mit einer Länge von 331 m, einer Breite von 46 m und Tiefgängen variierend zwischen 14,5 und 13,5 m besteht. Neben kleineren Containerschiffen wird weiterhin auch ein Massengutschiff der Untersuchung zugrunde gelegt, welches als Aufkommer auf der Flutwelle reitend mit einem Tiefgang von 14,5 m bis 15,5 m den Hamburger Hafen erreichen kann. Dieses Schiff hat mit 333 m Länge und 58 m Breite die größten Abmessungen aller betrachteten Schiffe.

Grundsätzlich konzentrieren sich die Untersuchungen auf die Situation bei Tideniedrigwasser, weil dann das Verhältnis von Schiffsquerschnitt zu Gewässerquerschnitt minimal wird und so die maximalen Schiffswellenbelastungen zu erwarten sind. Wegen der Tideabhängigkeit der auf der Elbe verkehrenden großen Massengutschiffe und großen Containerschiffe werden durch die BAW auch weitere Szenarien, insbesondere auch Begegnungen zwischen diesen Schiffen, bei höheren Wasserständen untersucht, um den Besonderheiten der tideabhängigen Fahrpläne Rechnung zu tragen. Die Modellergebnisse sind in Unterlage H.1d in Abschnitt 7.2.4 dokumentiert. Sie enthalten eine Untersuchung des Ist-Zustandes (sog. Referenzzustand) und Untersuchungen verschiedener Ausbaustände. Durch die Verschiedenartigkeit der Ausbaustände, der verschiedenen Bemessungsschiffe und ihrer Begegnungen erhält die BAW grundsätzliche Erkenntnisse über das Systemverhalten der Seewasserstraße bezüglich der Schiffswellenbelastungen. Weiterhin werden mit diesem hydraulischen Modell Systemversuche durchgeführt, die in Abschnitt 7.2.5 beschrieben sind. Diese konzentrieren sich auf den Vergleich von Einzelpassagen außermittig verkehrender Containerschiffe bei Tideniedrigwasser und dienen so dem Erkenntnisgewinn für die Prognose vergleichbarer Verhältnisse in anderen Teilen des Ästuars.

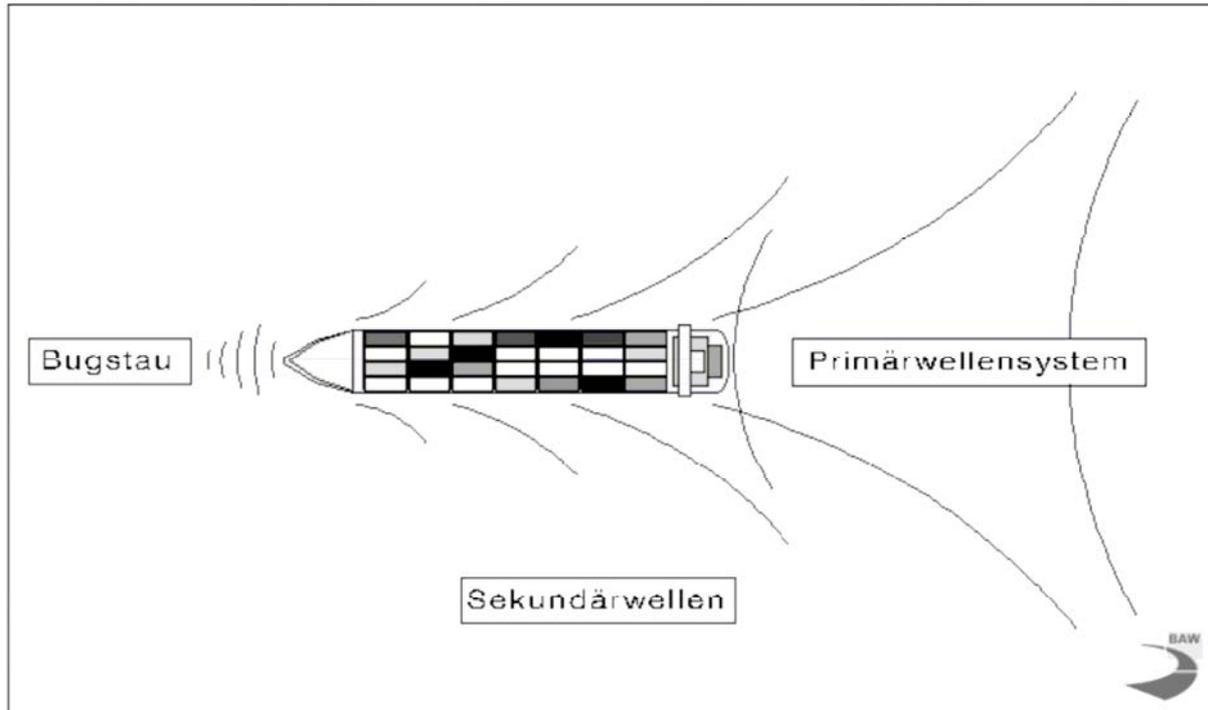
Auf eine Darstellung der konkreten Versuchsergebnisse kann im Rahmen dieser Zusammenfassung verzichtet werden, weil die Ergebnisse in die nachfolgend dargestellte Prognose für die einzelnen Abschnitte der Elbe eingeflossen sind.

### **2.7.2 Schiffswellensituation im Ist-Zustand**

Die grundsätzlichen physikalischen Zusammenhänge der Wellen- und Strömungsverhältnisse um ein fahrendes Schiff werden in der Unterlage H.1d in Abschnitt 4 beschrieben. Aus dieser umfassenden Darstellung sind die folgenden kennzeichnenden Größen für die Schiffswellenbelastung im Elbästuar herauszugreifen.

Ein Schiffswellensystem ist gekennzeichnet durch ein langperiodisches (Größenordnung Minuten) Primärwellensystem und ein kurzperiodisches (Größenordnung Sekunden) Sekundärwellensystem (siehe Abbildung 2.7-1). Von den dargestellten Kenngrößen dieser Wellensysteme sind besonders der Absenk  $z_A$  und die Sekundärwellen für  $H_S$  herauszugreifen. Die Primärwellenhöhe  $H_P$  ist oft von gleicher Größenordnung wie der Absenk  $z_A$ , so dass in der Regel eine gesonderte Betrachtung entfallen kann. Die zu den Wellensystemen gehörigen Perioden verändern sich entsprechend der Wellenhöhe, d.h. die Wellensteilheit der Schiffswellensysteme bleibt näherungsweise

konstant. Die Betrachtung des Ist-Zustandes und der ausbaubedingten Veränderungen konzentriert sich daher auf den Absenk  $z_A$  und die Sekundärwellenhöhe  $H_S$ .



**Abbildung 2.7-1: Schiffswellen in unbeschränktem Fahrwasser (Unterlage H.1d)**

Als gesondertes Phänomen kann die sich um das Schiff herum entwickelnde Rückströmung  $v_R$  betrachtet werden, deren grundsätzliche Abhängigkeit von der Schiffspassage sowie Unterschiedlichkeit von der Grundströmung in Bild 4 der Unterlage H.1d dargestellt ist. Auch diese Größe kann einer ausbaubedingten Veränderung unterliegen und ist kennzeichnend für die Belastungen der Seeschiffahrtsstraße.

Ein entscheidender Einflussfaktor für die Größenordnung der schiffserzeugten Belastungen ist das Querschnittsverhältnis zwischen dem Schiffsquerschnitt und dem Querschnitt der Wasserstraße, das oft auch als sog. n-Verhältnis bezeichnet wird (siehe Bild 5 der Unterlage H.1d). Wegen der Unregelmäßigkeit der Berandung in der Seeschiffahrtsstraße Elbe wird dieses n-Verhältnis in Teilquerschnitte zerlegt, um den unterschiedlichen Abstand zu den Ufern besser berücksichtigen zu können.

Als wesentliche Parameter für die schiffserzeugten Belastungen in inhomogenen Seeschiffahrtsstraßen stellt die BAW die folgenden Kennzeichen heraus:

- die Schiffsgeschwindigkeit  $v_S$ ,
- den Passierabstand vom Ufer  $L$ ,
- das Teilquerschnittsverhältnis  $n_T$  als Funktion des Passierabstandes  $L$  für die asymmetrische Belastung der Ufer und
- das Verhältnis von Gesamtwassertiefe zu Tiefgang des Schiffes.

Zur Erfassung des Ist-Zustandes der schiffserzeugten Belastungen der Seeschiffahrtsstraße Elbe wurden in der Vergangenheit zahlreiche Naturmessungen durchgeführt, die in Unterlage H.1d in Abschnitt 6 dargestellt sind. Die Tabelle 1 der Unterla-

ge H.1d enthält eine Zusammenstellung der Maximalwerte schiffserzeugter Wellen aus diesen Naturmessungen. Allerdings ist hier ein Rückschluss auf die, das jeweilige Maximalereignis verursachende, Schiffspassage nicht möglich. Weil insbesondere die Schiffsgeschwindigkeit ein ganz entscheidender Faktor für die tatsächlich auftretende Schiffswellenbelastung ist, hat die BAW Messungen der Schiffsgeschwindigkeiten ausgewertet und in Abschnitt 6.2 der Unterlage H.1d dargestellt. Die im folgenden wiedergegebene Prognose legt die für die Planung des Ausbaus vorgesehenen Schiffsgeschwindigkeiten (siehe Unterlage B.2) zu Grunde.

Für die Betrachtung der Schiffswellenbelastung im Ist-Zustand empfiehlt sich eine Einteilung des Elbästuars in drei Abschnitte:

- I. Hamburger Hafen bis etwa Schwarztonnensand (Elbe-km 620 bis 666)
- II. Schwarztonnensand bis etwa Brunsbüttel (Elbe-km 666 bis 698)
- III. Brunsbüttel bis zur See (ab Elbe 698).

Die verschiedenen Abschnitte ergeben sich aus dem Anwachsen der Querschnittsverhältnisse, die im Hamburger Hafen beginnend nach seewärts deutlich zunehmen und damit die Größenordnungen der schiffserzeugten Belastung reduzieren.

Die folgenden kennzeichnenden Schiffswellenbelastungen im Ist-Zustand können für die verschiedenen Bereiche formuliert werden.

- **Bereich I**

In diesem Abschnitt können die langperiodischen Belastungen (Absunk und Primärwelle) in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit zumindest gleiche Größenordnungen wie die kurzperiodischen Sekundärwellen erreichen. Dieser Abschnitt wird zum tiefen- und seitenbegrenzten Fahrwasser gerechnet (Analogie Kanalfahrt). Für Post-Panmax Containerschiffe liegen die Querschnittsverhältnisse zwischen 15 und 35. Die langperiodischen Belastungen im Ist-Zustand ( $z_A$ ,  $H_P$ ) liegen in diesem Abschnitt bei etwa 0,5 m und können bis zu 1,1 m erreichen. Für die kurzperiodischen Sekundärwellen  $H_S$  wird eine Größenordnung von 1 m erwartet.

- **Bereich II**

In diesem Abschnitt nehmen die Querschnittsverhältnisse deutlich zu. Sie erreichen für Post-Panmax-Schiffe Werte zwischen 40 und 60. Eine eindeutige Dominanz einer Belastungsart (entweder Primär- oder Sekundärwelle) ist nicht mehr festzustellen. Dieser Abschnitt ist durch den sog. Übergangsbereich zum seitlich unbeschränkten Fahrwasser gekennzeichnet. Die Belastungen der Flachwasserbereiche der Watten- und der Uferzonen werden deutlich durch den größeren Gesamtquerschnitt geprägt, wobei dann der Abstand der Fahrrinne zum Ufer für die Wellenhöhe sowie die Strömungsbelastung maßgeblich wird. Der langperiodische Absunk und die Primärwellenhöhe können in diesem Bereich im Maximum bis zu  $z_A \approx 1,2$  m bzw.  $H_P \approx 1,4$  m erreichen. Sie liegen damit etwa in der gleichen Größenordnung wie die kurzperiodische Belastung, die bei  $H_S \approx 1,1$  m liegt.

- **Bereich III**

Ab Brunsbüttel (Elbe-km 698) weitet sich der Fahrwasserquerschnitt teilweise auf. Die n-Verhältnisse für die Passagen der Post-Panmax-Containerschiffe berechnen sich auf Werte über  $n \approx 50$ . Eine generelle Zuordnung von Schiffspassage und Wellenereignis ist nur bedingt möglich, da schon bei Normalwetterlagen die schiffser-

zeugten Belastungen durch die winderzeugten Wellenereignisse überlagert werden können. In diesem Abschnitt werden langperiodische Belastungen bei größeren Passierabständen zum Ufer im allgemeinen vernachlässigbar sein. Wegen der höheren Schiffsgeschwindigkeiten können aber kurzperiodische Wellenamplituden von etwa  $H_S \leq 1,0$  m auftreten. Lokal begrenzte höhere Einzelereignisse sind zwischen dem Osteriff und Altenbruch (Elbe-km 705 bis 722) möglich, da hier u.a. der geringe Passierabstand zum südlichen Ufer der Elbe wirksam wird. Hier sind zur Zeit, z. B. im Bereich von Altenbruch, eine langperiodische Belastungen von  $z_A \approx HP \approx 0,5$  m zu erwarten. Die Sekundärwellenhöhe liegt hier bei  $H_S = 1,4$  m.

Bei den zu Grunde gelegten Randbedingungen sind im Bereich III für die heute verkehrenden Post-Panmax-Containerschiffe seitlich unbeschränkte Flachwasserbedingungen erst seewärts des Untersuchungsgebietes bei Querschnittsverhältnissen von  $n > 100$  zu erwarten, so dass bis etwa seewärts von Scharhörn von einer Wechselwirkung zwischen den großen Seeschiffen und den seitlichen Fahrwasserbegrenzungen (z. B. Leitwerke, -wände) auszugehen ist.

### 2.7.3 Ausbaubedingte Veränderungen

Die Prognose der Schiffswellenbelastungsveränderungen geht von einem Vergleich zwischen heute verkehrenden Containerschiffen der „Post-Panmax-43-m-Klasse“ (Breite  $B = 42,8$  m) aus. Diesem wird das zukünftige Bemessungsschiff Post-Panmax 46 (mit  $B = 46,0$  m) gegenüber gestellt. Als ergänzende Information enthält die Prognose auch einen Vergleich zu dem Bemessungsschiff der vorangegangenen Fahrrinnenanpassung, dem Panmax-Schiff 32 (mit einer Schiffsbreite von  $32,3$  m).

Für den allgemeinen Schiffsverkehr mit geringeren Abmessungen und Tiefgängen, wie z. B. Feedern und Containerschiffen älterer Generationen oder kleineren Massengutschiffen, werden sich aufgrund der Fahrrinnenanpassung an das größere und tiefer gehende Bemessungsschiff, keine wesentlichen Änderungen ergeben, wenn ein gleich bleibendes Fahrverhalten wie heute vorausgesetzt wird:

- In Abschnitten, in denen keine Ausbaumaßnahmen stattfinden werden, wird eine gleich bleibende Belastung der Wasserstraße auftreten.
- In Abschnitten, in denen Querschnittsaufweitungen vorgenommen werden, wird die Belastung zurückgehen, da der Widerstand der Wasserstraße gegenüber dem Schiff abnimmt (das  $n$ -Verhältnis wird größer).
- In Abschnitten, in denen nur Querschnittseinengungen (z. B. bei Unterwasserablagerungsflächen) vorgesehen sind, wird für die allgemeine Schifffahrt auch der Widerstand der Wasserstraßen zunehmen, so dass bei gleichbleibender Geschwindigkeit höhere schiffserzeugte Belastungen bewirkt werden. Diese Belastungen werden aber deutlich unter den ausbaubedingten Veränderungen liegen, die durch das Bemessungsschiff verursacht werden.
- In Abschnitten, in denen seitliche Querschnittseinengungen mit Fahrrinnenaufweitungen zusammen fallen, bleibt der Gesamtwiderstand der Wasserstraße annähernd gleich. Dementsprechend wird die schiffserzeugte Belastung etwa der heutigen entsprechen.

Die Prognose der ausbaubedingten Änderungen der Schiffswellenbelastungen werden im folgenden für das außermittig und tideunabhängig verkehrende Einzelschiff gegeben. Weil in dem Abschnitt der Seeschiffahrtsstraße von der Lühekurve bis zur Störkurve durch Erhöhung der Fahrrinnenbreite auch eine Begegnung der Bemessungsschiffe (PPM 46) möglich werden soll, prognostiziert die BAW die ausbaubedingten Veränderungen auf die Wasserspiegelabsenkung bei Begegnungen. Bei Begegnung großer Containerschiffe, z. B. PPM 46 mit PPM 46 im Vergleich zum heutigen Zustand (z. B. Begegnung PPM 43 mit PPM 43) werden die folgenden Zunahmen der Schiffswellenbelastung prognostiziert:

- **Bei Schiffsgeschwindigkeiten von 10 kn**

Zunahme des Absunkes  $z_A \approx +0,1$  m mit einer Zunahme der Rückströmungsgeschwindigkeit  $v_R \approx +0,2$  m/s

- **Bei Schiffsgeschwindigkeiten von 12 kn**

Zunahme des Absunkes  $z_A \approx +0,2$  m mit einer Zunahme der Rückströmungsgeschwindigkeit  $v_R \approx +0,35$  m/s.

Die Prognose der Veränderung schiffswellenerzeugter Belastungen beruht auf der in der Unterlage B.2 dargestellten Schiffsgeschwindigkeit durch Wasser, die entlang der Seeschiffahrtsstraße Elbe wie folgt differenziert ist:

- **Tideabhängig verkehrende Abgänger:**

bis Seemannshöft (Elbe-km 629)	$5 \text{ kn} \leq v_S \leq 7 \text{ kn}$
Seemannshöft bis Hamburger Yachthafen (Elbe-km 643)	$8 \text{ kn} \leq v_S \leq 10 \text{ kn}$
Hamburger Yachthafen bis Glückstadt (Elbe-km 675)	$8 \text{ kn} \leq v_S \leq 12 \text{ kn}$
Glückstadt bis Brunsbüttel (Elbe-km 698)	$10 \text{ kn} \leq v_S \leq 14 \text{ kn}$
ab Brunsbüttel	$11 \text{ kn} \leq v_S \leq 15 \text{ kn}$

- **Für die Fahrt von tideunabhängig verkehrenden Fahrzeugen werden die folgenden Schiffsgeschwindigkeiten angesetzt**

ab Altenwerder (Elbe-km 619)	$v_S = 9 \text{ kn}$
ab Lühort (Elbe-km 645,5)	$v_S = 10 \text{ kn}$
ab Brokdorf (Elbe-km 685)	$v_S = 12 \text{ kn}$ .

In Abschnitt 8.3 der Unterlage H.1d wird untersucht, wie sich der geplante Ausbau des Schifffahrtsweges auf die n-Verhältnisse der verschiedenen Schiffstypen auswirkt. Dies ist in Bild 29 dargestellt. Die Reduktion der n-Verhältnisse ist in der Außenelbe am größten und liegt für das PPM 46 bei etwa -10, sie nimmt nach oberstrom ab auf Werte zwischen 0 und -5. In der Darstellung der n-Verhältnisse in Bild 29 lässt sich auch der Medemgrund zwischen Elbe-km 715 und km 725 erkennen, welcher zu den lokal in diesem Abschnitt am südlichen Ufer der Fahrrinne auftretenden Schiffswellenbelastungen führt.

#### Hafen Hamburg bis Blankenese (km 620 bis km 634)

Bedingt durch den geplanten Ausbau werden sich in dem Abschnitt des Köhlbrandes und der Norderelbe bis etwa Seemannshöft die Querschnittsverhältnisse im Vergleich des heutigen größten Containerschiffs mit dem Bemessungsschiff nicht nennenswert verändern. Der Köhlbrand selbst ist dem Hafenbereich zuzurechnen. Die Schiffsge-

schwindigkeiten liegen hier so niedrig, dass keine signifikante Veränderung der schiffsgeschwindigkeitsabhängigen Schiffswellenbelastung zu erwarten ist.

Nach dem Lotsenwechsel auf Höhe Seemannshöft nehmen die Schiffe Fahrt auf. Wegen der deutlichen Querschnittsaufweitungen im Fahrrinnenabschnitt bis Blankenese ist auch bei Fahrt der deutlich größeren Containerschiffe nur mit einer sehr geringen Zunahme ( $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05 \text{ m}$ ) der schiffserzeugten Belastung zu ändern. Im Vergleich von PPM 46 und PPM 43 verringert sich das n-Verhältnis lediglich um etwa 13 %.

#### Blankenese bis Wedel (km 634 bis km 645)

Im Bereich der Uferspülung Wittenbergen wird das nördliche Teilquerschnittsverhältnis im Vergleich von PPM 33 zu PPM 46 von 8,5 auf 6,7 reduziert. Dadurch kommt es zu einer Belastungserhöhung des nördlichen Uferstreifens, die in der Größenordnung von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05 \text{ m}$  liegt. Die Rückströmungsgeschwindigkeit  $\Delta v_R$  nimmt um  $\leq 0,1 \text{ m/s}$  zu.

Im Abschnitt der Begegnungstrecke, in dem keine oder nur geringe Vertiefungen notwendig sind, wird sich die langperiodische Belastung bei der tideabhängigen Begegnung des großen Massengutschiffes mit dem Bemessungsschiff bei Tidehochwasser am nördlichen Ufer annähernd gleich, mit einer Tendenz zur leichten Verringerung einstellen. Durch die Verlagerung der Fahrrinne nach Süden wird am südlichen Ufer eine Verdopplung der Belastung der Werte zwischen  $0,4 \text{ m} < z_A \approx H_P < 0,5 \text{ m}$  eintreten. Auch die Rückströmungsgeschwindigkeit wird um  $0,2 \text{ m/s}$  auf  $0,4 \text{ m/s}$  zunehmen.

Vor dem Hamburger Yachthafen wird die Bemessungsgeschwindigkeit von 12 kn auf 10 kn durchs Wasser reduziert, so dass in diesem Abschnitt bei Tidehochwasser die Begegnung des großen Massengutschiffs mit dem Bemessungsschiff am nördlichen Ufer geringere Schiffswellenbelastungen verursachen und am südlichen Ufer die Schiffswellenbelastung annähernd gleich bleiben wird. Bei tideunabhängiger Begegnung großer Containerschiffe wird die Schiffsgeschwindigkeit von bisher 12 kn über Grund auf 9 kn durch Wasser reduziert, wodurch in der Fahrrinne die langperiodische Schiffswellenbelastung gleich bleibt, obwohl sich bei Tideniedrigwasser das Gesamtquerschnittsverhältnis von 10 auf etwa 7,5 reduziert. Wegen der reduzierten Schiffsgeschwindigkeit ist bei diesem Ereignisszenario am südlichen Ufer des Hanskalbsands eine Abnahme der Primärwelle um  $0,4 \text{ m} < z_A \approx H_P < 0,5 \text{ m}$  zu erwarten. Diese Verringerung beträgt am nördlichen Ufer sogar  $0,3 \text{ m}$ .

Im Teilabschnitt der Begegnungstrecke bei Wittenbergen (Elbe-km 636 bis km 638,9) war bisher keine Begegnung großer Containerschiffe zugelassen. Weil dieser Abschnitt aber zukünftig Teil der Begegnungstrecke sein wird, ergeben sich hier zusätzlich zur Belastungsänderung durch das Einzelschiff folgende kurzzeitig wirkende maximale geschwindigkeitsabhängige Belastungsänderungen für die Begegnungssituation: Bei Schiffsgeschwindigkeiten von 10 kn ein  $\Delta z_A \approx +0,1 \text{ m}$  und bei Schiffsgeschwindigkeit von 12 kn ein  $\Delta z_A \approx +0,2 \text{ m}$ .

Im Abschnitt unterhalb der Begegnungsstrecke kommt es vor allem südlich der Fahr-  
rinne und an der Mündung der Hahnöfer Nebanelbe zu Belastungszunahmen von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx 0,1$  m, die der Beschleunigung der Schiffe auf die hier zugelassenen  
Schiffsgeschwindigkeit von 12 kn zuzuschreiben sind.

#### Wedel bis Lühesand (km 645 bis km 648)

In diesem Abschnitt wird durch den geplanten Ausbau die Regelbreite von 300 m auf  
320 m erhöht. Gleichzeitig ist im Bereich von Lühemündung / Fährmannssander Watt  
eine Aufweitung der Innenkrümmung vorgesehen. Deswegen wird die mittig in der  
Fahrrinne verkehrende Großschifffahrt im Vergleich zum Ist-Zustand auch mit einer  
Schiffsgeschwindigkeit von 12 kn nur geringere höhere Belastungen des Fährmanns-  
sander Watts verursachen ( $z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05$  m). Bei außermittiger Fahrt eines voll ab-  
geladenen auslaufenden Containerschiffe erhöht sich diese Belastung für das Ufer am  
Fährmannssander Watt wegen des reduzierten Passierabstandes auf  
 $z_A \approx \Delta H_P \leq 0,1$  m.

Aufkommende Bemessungsschiffe verursachen in der Nähe des Anlegers Lühe am  
südlichen Uferabschnitt wegen des geringen Abstandes zwischen der Fahrrinne und  
dem Ufer Belastungszunahmen in einer Größenordnung von  $z_A \approx \Delta H_P \leq 0,1$  m.

#### Lühesand bis Schwingemündung (km 648 bis km 655)

Die Querschnittszunahme des Bemessungsschiffes für mittig fahrende Fahrzeuge  
wird durch die Vertiefung der Fahrrinne in diesem Abschnitt teilweise kompensiert. Bei  
Tideniedrigwasser sinkt das n-Verhältnis von 20 auf 18. Die schiffserzeugten Belas-  
tungen des Bemessungsschiffes werden deswegen nur in einer Größenordnung von  
 $z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05$  m zunehmen.

Außermittig abgehender Verkehr verursacht wegen des sehr geringen Passierabstan-  
des der Fahrrinne zu den Deckwerken bei Juellssand und außermittig aufkommender  
Verkehr wegen des geringen Passierabstandes zu den Deckwerken auf Lühesand  
deutlich größere Veränderungen der Zunahme schiffserzeugter Wellenbelastungen,  
die mit  $z_A \approx \Delta H_P \approx 0,2$  m prognostiziert werden. Sofern Begegnungen in diesem Ab-  
schnitt stattfinden, werden auch diese im Vergleich zu den heute möglichen Begeg-  
nungen Schiffswellenzunahmen von  $z_A \approx \Delta H_P \approx 0,2$  m verursachen.

#### Schwingemündung bis Kolmar (km 655 bis km 668)

Im Abschnitt bei Bützfleth/Grauerort wird die Größenzunahme des Bemessungsschif-  
fes bei mittiger Fahrt annähernd durch die Fahrinnenvertiefung kompensiert. Eine Er-  
höhung der Schiffswellenbelastung ist hier nicht zu erwarten. In anderen Abschnitten,  
wie den Ufern und Deckwerken von Stadersand, Pagensand und Schwarztonnensand  
nehmen die schiffserzeugten Belastungen um Werte von  $z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05$  m zu, da  
hier die Querschnittsverhältnisse um ca. 13 % im Vergleich von PPM 43 zu PPM 46  
abnehmen werden. Bei außermittigem Verkehr ist in diesen Abschnitten mit einer Be-  
lastungszunahme von etwa  $z_A \approx \Delta H_P \leq 0,1$  m zu rechnen.

### Kollmar bis Brokdorf (km 668 bis km 683)

In diesem Abschnitt stehen die zu erwartenden Veränderungen der Schiffswellenbelastung im deutlichen Zusammenhang mit den unterschiedlichen, ausbaubedingten Querschnittsveränderungen. Keine Querschnittsvergrößerungen sind in dem Abschnitt zwischen Kollmar und der Mündung des Ruthenstroms notwendig, weil hier die bestehende Hauptrinne eine ausreichende Wassertiefe aufweist. In der Fahrrinne im Abschnitt Krautsand / Rhinplate ist auf einer Länge von 6 km im Mittel eine Vertiefung um 0,8 m erforderlich. Nördlich der Nordspitze der Rhinplate bis Brokdorf sind keine Vertiefungsmaßnahmen vorgesehen. Ferner vergrößert sich die Fahrrinne stromab der Störkurve von dem zukünftig vorgesehen 320 m Breite auf heute schon vorgehaltene Breite von 400 m.

In den vertieften Strecken des Abschnitts Kollmar bis Brokdorf tritt keine vollständige Kompensation der hydromechanischen Wirkungen des Bemessungsschiffes durch die Rinnenvertiefung ein. Das Querschnittsverhältnis wird hier um etwa 11 % verringert. Die Belastungszunahmen werden annähernd bei  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq + 0,05$  m liegen. Die an den Fahrrinnenrändern prognostizierten langperiodischen Wellenbelastungen werden sich annähernd ungedämpft in den Ruthenstrom fortsetzen.

In den nicht zu vertiefenden Abschnitten zwischen der Störmündung und Brokdorf werden an den Fahrrinnenrändern Belastungszunahmen in der Größenordnung von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq + 0,05$  m auftreten, da hier die Querschnittsverhältnisse um Werte von 3 - 9 abnehmen werden. Auf den in diesem Gebiet vorhandenen Flachwassergebieten unterliegen die Schiffswellen in Abhängigkeit von dem Wasserstand Umformungsprozessen (z. B. Refraktion, Schoaling und Wellenbrechen), bevor sie die Vorlandkanten erreichen. Dies führt auch dazu, dass die ausbaubedingte Erhöhung der Schiffswellen durch diese Energiedissipationsprozesse gedämpft wird.

Im Freiburger Hafentriel werden - wie schon heute - aufgrund der Wathöhen oberhalb Tidemittelwasser schiffserzeugte Belastungen zu erwarten sein, deren ausbaubedingte Änderungen wegen der höheren Wasserstände deutlich unter den oben für Tideniedrigwasser prognostizierten Werten liegen werden. Im Triel selbst wird eine Dämpfung des Eingangssignales infolge Reflektion und Energiedissipation bis zum Erreichen des Sperrwerkes erfolgen. Wie beim Ruthenstrom können bei höheren Tidewasserständen aufgrund der absinkbedingten Sogströmungen sowie der Sohlreibung starke Umformungen der schiffserzeugten Primärwelle erfolgen, so dass die langperiodische Welle bei hoher Energiedissipation und Fortschrittsgeschwindigkeit als sog. Bore (brechende Schwallwelle) in den Hafentriel einlaufen kann. Diese Verhältnisse bestehen bereits heute. Die ausbaubedingte Zunahme dieser Welle wird entlang des Triels entsprechend der Gesamtwelle gedämpft.

Die am Nordufer prognostizierten ausbaubedingten höheren schiffserzeugten Belastungen (z. B. bei km 682, Hollerwettern) werden in Abhängigkeit von den Tidewasserständen nach Wellenumformungsprozessen an den Sielen auftreten und in der Zeit von annähernd ausgeglichenem Binnen- und Außenwasserstand zu entsprechend häufigen Sieltorbewegungen einschließlich des bekannten Phänomens des Schlagens der Tore führen.

### Brokdorf bis Büttel (km 683 bis km 692)

Im Abschnitt der Ablagerungsflächen bei Brokdorf ist zwar keine Fahrrinnenvertiefung erforderlich, aber in Folge der Ablagerungsflächen reduziert sich der nördliche Teilquerschnitt um etwa 20 %. Damit ist bei der hier anzusetzenden Schiffsbemessungsgeschwindigkeit von 14 kn aufgrund der deutlich größeren Teilquerschnittsverhältnissen als vor dem Hamburger Yachthafen (Faktor 2,7) eine Belastungszunahme an der nördlichen Fahrrinnenkante von etwa  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$  m zu erwarten. Für das Nordufer im Bereich der Ablagerungsflächen Scheelenkuhlen und St. Margarethen (Elbe-km 685 bis km 687 und km 690 bis km 691,5) werden die Teilquerschnittsverhältnisse im Mittel um ca. 25 % reduziert. Unter Berücksichtigung der lokalen Schiffsbemessungsgeschwindigkeiten werden die schiffserzeugten Wellen an der nördlichen Fahrrinnenkante um eine Größenordnung von  $+0,1$  m  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,2$  m ansteigen.

### Büttel bis Brunsbüttel (km 692 bis km 700)

Die ausbaubedingten Änderungen schiffserzeugter Belastungen werden an der nördlichen Fahrrinnenkante bei den dort reduzierten Teilquerschnittsverhältnissen von etwa  $\Delta n = -3$  bis  $-10$  % in der Größenordnung von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$  m liegen. Die Teilquerschnittsverhältnisse auf der südlichen Fahrrinnenseite reduzieren sich mit ca. 13 % etwas stärker als auf der nördlichen Seite, so dass hier mit einer leicht größeren Zunahme der Schiffswellenbelastung von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$  m zu rechnen sein wird.

### Brunsbüttel mit Ostemündung (km 700 bis km 710)

In diesem Abschnitt werden durch den Ausbau deutliche Querschnittsveränderungen in Form der Vertiefung der Fahrrinne und der Anlage der Unterwasserablagerungsfläche am Neufelder Sand vorgenommen. Dadurch reduziert sich das nördliche Teilquerschnittsverhältnis für außermittig fahrende Abgänger um etwa 30 %, so wie das Teilquerschnittsverhältnis außermittiger Aufkommer zum Südufer sowie zum Osteriff um 11 bis 13 %. Die mit dem Ausbau in diesem Abschnitt vorgesehene Schiffsbemessungsgeschwindigkeit beträgt unterhalb von Brunsbüttel 15 kn durch Wasser und wurde damit gegenüber der Bemessungsgeschwindigkeit der vorangegangenen Fahrrinnenanpassung von 17 kn über Grund reduziert, wobei hier die Unterschiede zwischen Fahrt durch Wasser und Fahrt über Grund zu berücksichtigen sind. Wegen des großen Passierabstandes von 2.300 m zu den Wattkanten des Neufelder Watts kommt es zu keiner messbaren Belastungszunahme der Schiffswellen in diesem Abschnitt. Der Passierabstand zum Südufer ist für außermittig verkehrende Aufkommer mit etwa 250 m gering. Die Schiffswellenbelastung wird deswegen hier um  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx 0,1$  m zunehmen. An den Bühnenköpfen macht sich auch eine erhöhte Rückströmungsgeschwindigkeit von  $\Delta v_R \approx 0,1$  m/s bemerkbar. Bei Tidehochwasser wird das Einhalten der vorgesehenen Bemessungsgeschwindigkeit wegen der Schiffsgeschwindigkeitsreduktion im Vergleich zum Ist-Zustand eine etwa gleich bleibende Wellen- und Strömungsbelastung auf der Unterwasserböschung und den Vorstrandflächen in diesem Abschnitt bewirken.

### Ostemündung bis Altenbruch (km 710 bis km 722)

Entscheidend für die schiffserzeugten Belastungen und deren ausbaubedingte Änderung in diesem Abschnitt sind die geringen Teilquerschnittsverhältnissen zum Südufer mit rund 20 sowie zum Medemgrund mit rund 20 - 30. Für das aufkommende tideunabhängig verkehrende Bemessungsschiff wird sich trotz der deutlichen Fahrrinnenvertiefung im Vergleich zum Ist-Zustand eine Reduzierung des Teilquerschnittsverhältnisses um - 2 bis - 3 ergeben, wodurch trotz der Reduktion der Schiffsbemessungsgeschwindigkeit auf 12 kn bei tideunabhängiger Fahrt eine schiffserzeugte Belastungserhöhung von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,1$  m erwartet wird. Auf der anderen Seite am südlichen Rand des Medemgrund fallen die Belastungszunahme bei tideunabhängig verkehrenden auslaufenden Schiffen mit  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05$  m geringer aus. Weiter unterhalb im Altenbrucher Boden zwischen km 718 und km 721 und an der nördlichen Fahrrinnenseite ab km 722 reduziert sich die Zunahme der Schiffswellenbelastung auf Werte von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05$  m. Die Buhnen bei Altenbruch hingegen (km 721 bis km 722) werden aufgrund der geringeren Passierabstände zur Fahrrinne höhere Belastungserhöhungen von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,1$  m erfahren. Die Reduktion der Bemessungsgeschwindigkeit bei tideabhängigem Verkehr wird dazu führen, dass die schiffserzeugten Belastungen aufgrund dieses Verkehrs durch Passagen des Bemessungsschiffes in der gleichen Größenordnung wie heute liegen werden.

### Altenbruch bis Cuxhaven (km 722 bis km 730)

In diesem Abschnitt sind Vertiefungen erforderlich, die jedoch eine Reduktion der Teilquerschnittsverhältnisse, insbesondere zum südlichen Fahrrinnenrand nicht verhindern. Der geringe Passierabstand zu den Kaianlagen wird dazu führen, dass das Bemessungsschiff als Aufkommer bei tideunabhängiger Fahrt ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastung von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,1$  m im Bereich der Hafenanlagen verursachen wird. Die Reduktion der Schiffsbemessungsgeschwindigkeit tideabhängiger Fahrzeuge wird dazu führen, dass sich die schiffserzeugten Belastungen dieses Verkehrs im Vergleich zum Ist-Zustand nicht verändern werden.

### Cuxhaven bis Großer Vogelsand (km 730 bis km 756)

Auch für Steilsand-Spitzsand (km 730) werden trotz der hier schon vorhandenen großzügigen Querschnittsverhältnisse noch geringe Belastungsänderungen von  $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05$  m erwartet. Weiter stromab steigen die Querschnittsverhältnisse deutlich über  $n > 65$  an, so dass sich insgesamt keine messbaren Auswirkungen der schiffserzeugten Belastungen auf die Fahrrinnenböschungen, Sände und Watten ergeben werden.

## **2.7.4 Schlussfolgerung**

In Abschnitt 10 der Unterlage H.1d wird die Prognose der ausbaubedingten Veränderungen und der Schiffswellenbelastungen zusammengefasst. Beim Vergleich des PPM 46-Bemessungsschiffes (Tiefgang 13,8 m) mit dem heute schon im Ist-Zustand verkehrenden PPM 43-Containerschiff (Tiefgang 12,8 m) werden die langperiodischen ausbaubedingten Änderungen unter Einhaltung der für die beantragte Fahrrinnenan-

passung vorgesehenen Schiffsbemessungsgeschwindigkeiten lokal unterschiedliche Belastungserhöhungen bis  $\Delta z_A \leq 0,02$  m erbringen. In Bild 44 der Unterlage H.1d ist die zu erwartende Zunahme des Absunkes über den Längsschnitt der Seeschiffahrtsstraße aufgetragen.

Die kurzperiodischen Sekundärwellen verändern sich, in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit und den Änderungen der langperiodischen Belastungen, um max.  $\Delta H_S \approx 0,1$  m. Begegnungssituationen sowohl von großen tideunabhängig verkehrenden Containerschiffen entlang der Unter- und Außenelbe als auch von Massengutschiffen mit Containerschiffen in der Begegnungsstrecke Wedel - Blankenese bei mittlerem Tidehochwasser, können in Abhängigkeit von dem Passierabstand sowie der Schiffsgeschwindigkeit zu höheren schiffserzeugten Belastungen führen als in Bild 44 zusammengestellt. Der Maximalwert der Änderung übersteigt aber auch hier nicht  $\Delta z_A \approx \leq 0,2$  m.

## 2.8 Auswirkungen des Vorhabens auf den Seegang

Die mit den Vorhaben verbundenen möglichen Auswirkungen auf die Seegangsverhältnisse im Untersuchungsgebiet der Tideelbe werden von der BAW in Anlage 3 der Unterlage H.1c beschrieben.

### 2.8.1 Modellverfahren

Zur Bestimmung der ausbaubedingten Veränderungen des Seegangs in der Unter- und Außenelbe wird das numerische Verfahren Unk (K-Modell) eingesetzt. Um die Wechselwirkung des Seegangs mit der Gezeitendynamik und den daraus resultierenden Strömungen und Wasserstandsverhältnissen berücksichtigen zu können, wird dieses Modell mit dem hydronumerischen Modell UnTRIM gekoppelt. Eine kurze Beschreibung dieser numerischen Verfahren enthalten die Abschnitte 2.2.1 und 2.5.1.

Bezüglich der maßgeblichen meteorologischen Szenarien für den Seegang in der Unter- und Außenelbe können die beiden folgenden Situationen charakterisiert werden:

1. Die lokalen Windverhältnisse (Wind, Wasserstand und Strömung) in der Elbe bestimmen das lokale Seegangsklima.
2. Das Geschehen in der Nordsee (z. B. durch Starkwindereignisse) beeinflusst maßgeblich das lokale Seegangsklima in der Elbe.

Um den Einfluss der geplanten Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe auf das Seegangsklima für diese unterschiedlichen Szenarien untersuchen zu können, wird das Modellgebiet in zwei unterschiedliche Teile aufgeteilt. Mit einem Seegangsmodell für die Elbe wird das Seegangsklima untersucht, welches durch die lokalen Einflüsse bestimmt ist. Gebiete, in denen das lokale Seegangsklima abhängig ist vom Geschehen in der Nordsee, werden mit einem Seegangsmodell der Deutschen Bucht untersucht.

Das Seegangsmodell der Deutschen Bucht reicht von Nordwesten bei Helgoland bis nach Südosten bei Brunsbüttel (Bild 3-1 der Anlage 3 zur Unterlage H.1c). Unter An-

satz der Randbedingungen für die Sturmflut 1994 werden mit diesem Modell Simulationen durchgeführt. Bezüglich der Randbedingungen für den Wind werden über 6 Stunden gemittelte Windfelder eingesetzt.

Anhand von Naturmessungen, die in den Bildern 3-3 bis 3-5 der Anlage 3 zur Unterlage H.1c dargestellt sind, weist die BAW nach, dass das Modell die Prozesse der Seegangsentwicklung und –umformung naturähnlich nachbildet.

Für das Teilmodell Elbe werden meteorologische Situationen betrachtet, in denen der Seegang nicht durch aus der Nordsee kommende Einflüsse überprägt wird. Dieses Modell reicht im Westen von der Bake A bis nach Südosten bei Finkenwerder und ist in Bild 3-10 der Anlage 3 zur Unterlage H.1c dargestellt.

Für die Untersuchung der ausbaubedingten Veränderung des lokalen Seegangs werden zwei Zeiträume aus dem Mai 2002 mit nahezu zeitlich gleich bleibenden Windverhältnissen ausgewählt. Der erste Zeitraum vom 14.5.2002, 6.00 Uhr, bis 16.5.2002, 0 Uhr, ist geprägt durch Windgeschwindigkeiten zwischen 3 m/s und 18 m/s, die aus dem Südwest-Sektor kommen. Im zweiten Zeitraum vom 20.5.2002, 0 Uhr, bis zum 23.5.2002, 0 Uhr, kommen diese aus dem Südost-Sektor und die Windgeschwindigkeiten liegen zwischen 4 m/s und 16 m/s. Die beiden genannten Zeiträume sind Teile des Gesamtzeitraumes Mai 2002, der für die Randwerte der Modellsimulation Tidedynamik zugrunde gelegt wird.

## 2.8.2 Modellergebnisse

### Nordseemodell

Die signifikanten Wellenhöhen für das beschriebene meteorologische Szenario Sturmflut 1994 sind in Bild 110 der Anlage 1 zur Unterlage H.1c dargestellt. Die ausbaubedingten Veränderungen enthält das zugehörige Bild 111. Zusammenfassend ergeben sich folgende Änderungen der maximalen signifikanten Wellenhöhen:

- Im Altenbrucher Bogen, bei Elbe-km 720, betragen die Zunahmen < 0,05 m,
- im Bereich der Medemmündung (Elbe-km 710 bis 720) sind die Abnahmen kleiner als 0,05 m,
- im westlichen Teil der Ostemündung bei Elbe-km 710 bis 705 sind die Zunahmen kleiner als 0,1 m,
- zwischen Neufeld und Brunsbüttel stromauf von Elbe-km 705 liegen die Abnahmen etwa bei 0,05 m und
- im Bereich der Unterwasserablagerungsfläche Medemrinne und der Unterwasserablagerungsfläche in Neufeld treten lokale Zu- und Abnahmen der signifikanten Wellenhöhen von etwa 0,05 m auf.

### Das Seegangmodell der Elbe:

Mit dem meteorologischen Szenario Wind aus dem Südwest-Sektor werden signifikante Wellen größer als 0,5 m vom seeseitigen Rand des Modells bis Schwarztönensand (Elbe-km 665) berechnet (siehe Anlagenband 1 zur Unterlage H.1c, Bilder 112, 114, 116 und 118). In den zugehörigen Bildern 113, 115, 117 und 119 sind

die folgenden ausbaubedingten Änderungen der maximalen signifikanten Wellenhöhe bei diesem meteorologischen Szenario zu erkennen:

- Im Bereich der Ostemündung bei Elbe-km 705 bis 725 ergeben sich Zunahmen bis 0,05 m,
- über der Unterwasserablagerungsfläche Neufeld können Abnahmen bis 0,1 m auftreten,
- im Umfeld der Unterwasserablagerungsfläche Medemrinne und der Medemrinne selbst liegen die Zu- und Abnahmen bei 0,05 m,
- in der Fahrrinne bei Brunsbüttel sind die Zunahmen kleiner als 0,05 m,
- in der Uferzone zwischen Brunsbüttel und Scheelenkuhlen liegen die Abnahmen unter 0,1 m,
- vor den Unterwasserablagerungsflächen der Störmündung können Zunahmen bis zu 0,1 m auftreten,
- in der Pagensander Nebanelbe, der Nebanelbe hinter Schwarztonnensand, der Lühesander Süderelbe und Hahnöfer Nebanelbe betragen die Zu- und Abnahmen bis 0,05 m und
- vor der Uferverspülung Wittenbergen beträgt die Abnahme bis 0,05 m.

Die mit dem meteorologischen Szenario Wind aus dem Südostsektor berechneten signifikanten Wellen  $> 0,5$  m werden in den Bildern 120, 122, 124, 126 der Anlage 1 zur Unterlage H.1c dargestellt. Die zugehörigen Veränderungen (Bilder 121, 123, 125 und 127) liegen in den folgenden Größenordnungen:

- Zu- und Abnahmen unter 0,05 m im Umfeld der Unterwasserablagerungsflächen Medemrinne und Neufeld
- Abnahmen  $< 0,05$  m in der Uferzone von St. Margarethen bis Scheelenkuhlen
- Zunahmen  $< 0,05$  m in der Fahrrinne bei Scheelenkuhlen
- Abnahmen bis über 0,1 m in der Störmündung
- Zunahmen bis über 0,1 m an der Südspitze der Rhinplate
- Abnahmen bis über 0,1 m bei der Uferverspülung Kolmar
- Abnahmen von 0,05 m in der Pagensander Nebanelbe.

Zusammenfassend kommt die BAW zu dem Ergebnis, dass durch die geplante Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, bedingt durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Seegang, Topographie und Strömung, deutlich differenziert sowie ereignisabhängig in der Tendenz sowohl Zu- als auch Abnahmen der Wellenhöhen des Seegangs entstehen werden. Die maximalen ausbaubedingten Änderungen der Wellenhöhe liegen dem Betrag bis über 0,1 m. Die Peak-Perioden ändern sich entsprechend dem Betrag bis über 0,1 s.