



BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

BAW



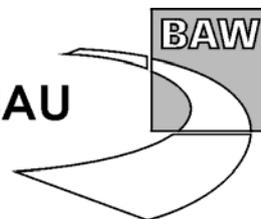
GUTACHTEN

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

**Gutachten
zu den ausbaubedingten Änderungen
der schiffserzeugten Belastung**

BAW-Nr A3955 03 10062

H.1 d



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

**Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten
Belastungen**

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

Auftrag vom: 03.02.2004

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 03 10062 – H.1d

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme I (K2)
Bearbeiter: Dr.-Ing. K. Uliczka
Dipl.-Ing. (FH) B. Kondziella

Hamburg, 4. September 2006

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



Zusammenfassung

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

Für das Planfeststellungsverfahren wurde die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg und der Hamburg Port Authority über das gemeinsame Projektbüro Fahrrinnenanpassung mit einer wasserbaulichen Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter beauftragt. Die BAW hatte u.a. die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen infolge einer weiteren Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung der Schiffsgrößen zu ermitteln und zu begutachten.

Das Untersuchungsprogramm umfasst Vergleichsbetrachtungen vor und nach der Fahrrinnenanpassung auf Basis theoretischer Ansätze und Erfahrungen aus Naturuntersuchungen für ausgewählte Schiffstypen hinsichtlich der Belastungsänderungen von Deckwerken und Deichen, Wattgebieten und natürlichen Ufern sowie von baulichen Anlagen. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden nach Stand von Technik und Wissenschaft Versuche in einem hydraulischen Modell eines ausgewählten Unterelbeabschnitts von km 641,6 bis km 643,2 vorgenommen, in dem u.a. Extremszenarien wie die Begegnung von großen Container- mit Massengutschiffen simuliert wurden.

Die ausbaubedingten Änderungen der lang- und kurzperiodischen schiffserzeugten Belastungen lassen sich auf der Basis von Untersuchungen in hydraulischen Modellen für ausgewählte extreme Szenarien geschwindigkeitsabhängig exakt nur für die gewählte Unterwassertopographie, hier den Unterelbeabschnitt Hamburger Yachthafen, bestimmen. Anhand von zusätzlichen Systemversuchen können Änderungen für andere Querschnitte qualitativ abgeschätzt werden, eine Quantifizierung der zukünftigen Maximalbelastung ist auch mit Hilfe der analysierten Naturmessungen nach dem Stand der Wissenschaft nicht möglich.

Für das Gesamtästuar sind die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen zwischen dem heutigen sowie dem zukünftigen Schiffsverkehr zu prognostizieren.

Die Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die breiteren, tiefgehenden Containerschiffe umfasst wirksame Querschnittsänderungen durch flächenhafte und/oder asymmetrische Vertiefungsmaßnahmen sowie Einengungen durch das Anlegen von Unterwasserablageungsflächen für Baggergut. Während durch Vertiefungsmaßnahmen örtlich annähernd eine Kompensation der zukünftigen Schiffsgröße möglich ist, bewirkt z.B. die Schiffsgrößenzunahme



me in Abschnitten, in denen die Wassertiefen schon heute ausreichend sind, höhere schiffserzeugte Wasserspiegelauslenkungen und Rückstromgeschwindigkeiten.

Bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten nehmen der Energieeintrag, damit gleichermaßen die Belastung der Wasserstraße durch Wellen und Strömung sowie deren ausbaubedingte Änderungen überproportional zu.

Die schiffserzeugte langperiodische Maximalbelastung der Wasserstraße, als Folge dieser dann auch die kurzperiodische Wellenbelastung, wird durch die größten Schiffseinheiten in Abhängigkeit ihrer Fahrgeschwindigkeiten erzeugt (vergl. Kapitel 4.2). Folglich werden als Bezugseinheiten für die Prognose ausbaubedingter Änderungen die heute größten, mit hoher Geschwindigkeit verkehrenden Containerschiffe der PPM43-Klasse (Breite $b = 42,8$ m) dem zukünftigen Bemessungsschiff PPM46 (Containerschiff mit $b = 46$ m) gegenübergestellt und deren geschwindigkeitsabhängige Belastungsgrößen verglichen. Des Weiteren werden die durch das Bemessungsschiff der letzten Fahrrinnenanpassung (PM32 $b = 32,3$ m) erzeugten Belastungsgrößen denen des PPM46 gegenübergestellt. In der Begegnungsstrecke Blankenese / Wedel wird auch das Massengutschiff MG58 mit $b = 58$ m als Aufkommer in die Bewertung mit einbezogen.

Entlang der Unter- und Außenelbe werden die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen überwiegend bei der Passage von außermittig und tideunabhängig verkehrenden Einzelschiffen betrachtet, da aufgrund möglicher Begegnungssituationen seewärts der Lühekurve im Wesentlichen die außermittige Fahrt des Einzelschiffs die auf der sicheren Seite liegende Belastung des jeweiligen Fahrrinnenrands bewirken wird.

Für den allgemeinen Schiffsverkehr mit geringeren Abmessungen und Tiefgängen (z.B. Feeder, Containerschiffe älterer Generationen, kleinere Massengutschiffe) werden sich aufgrund der Fahrrinnenanpassung an das größere und tiefergehende Bemessungsschiff keine wesentlichen Änderungen ergeben, wenn ein gleich bleibendes Fahrverhalten wie heute vorausgesetzt wird:

- In den Abschnitten, in denen keine Ausbaumaßnahmen stattfinden werden, wird eine gleich bleibende Belastung der Wasserstraße wie heute auftreten.
- In Abschnitten, in denen Querschnittserweiterungen vorgenommen werden, wird die Belastung zurückgehen, wenn die vorherige Geschwindigkeit beibehalten wird, da der Widerstand der Wasserstraße gegenüber dem Schiff abnimmt. Bei gleich bleibender Maschinenleistung (gleiche Propellerumdrehung) wird das Schiff etwas schneller fahren, aber kein größeres Wellenbild als heute erzeugen, da Schiffswiderstand, Schiffsgeschwindigkeit und Wellenbild direkt miteinander zusammenhängen.
- In den Abschnitten, in denen nur Querschnittseinengungen (Unterwasserablageflächen) vorgesehen sind, wird für die allgemeine Schifffahrt auch der Widerstand der Wasserstraße zunehmen, so dass sie bei gleich bleibender Ge-



schwindigkeit höhere schiffserzeugte Belastungen bewirken werden. Diese Belastungen werden aber deutlich unter den ausbaubedingten Änderungen durch das Bemessungsschiff liegen.

- In Abschnitten, in denen seitliche Querschnittseinengungen mit Fahrinnenaufweitungen zusammenfallen, bleibt der Gesamtwiderstand der Wasserstraße annähernd gleich. Dementsprechend wird die schiffserzeugte Belastung in etwa der heutigen entsprechen.

Für die charakteristischen Bereiche des Gesamtästuars werden folgende lokale ausbaubedingte Änderungen abgeschätzt:

Bereich I (Hamburger Hafen bis etwa Schwarztonnensand)

hier z.B. Begegnungsstrecke Blankenese/Wedel:

Begegnungsszenario PM32/PPM43 zu PPM46/PPM46 (Tnw):

Bei $v_S \approx 10$ kn durch Wasser gleich bleibende bis reduzierte Belastung am Nordufer, auch ohne Unterwasserablagerungsfläche deutliche Zunahme um etwa $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx +0,3$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,25$ m/s am südlichen Ufer.

Begegnungsszenario MG58/PM32 zu MG58/PPM46 (Thw):

Bei $v_S \approx 10$ kn durch Wasser annähernd gleich bleibende Belastung am Nordufer, am südlichen Ufer mit Unterwasserablagerungsfläche deutliche Zunahme um etwa $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx +0,25$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,2$ m/s, dort ohne Ablagerungsfläche etwas geringere Zunahmen.

Bereich II (Schwarztonnensand bis etwa Brunsbüttel)

hier z.B. Scheelenkuhlen bei Tnw:

Bemessungsschiffe PM32 zu PPM46:

Bei $v_S \approx 12$ kn durch Wasser ist mit Zunahmen von $+0,2$ m $< \Delta Z_A \approx \Delta H_P < +0,4$ m bzw. $\Delta v_R < +0,4$ m/s am nördlichen Ufer zu rechnen.

PPM-Containerschiffe PPM43 zu PPM46:

Bei $v_S \approx 12$ kn durch Wasser ist mit Zunahmen von $+0,1$ m $< \Delta Z_A \approx \Delta H_P < +0,2$ m bzw. $\Delta v_R < +0,2$ m/s am nördlichen Ufer zu rechnen. Am südlichen Ufer werden geringere Zunahmen um rund $\Delta Z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s erwartet.

Bereich III (Brunsbüttel bis zur See)

hier z.B. Altenbruch bei Tnw:

Bemessungsschiffe PM32 zu PPM46:

Bei der tideabhängig um $\Delta v_S \approx -2$ kn reduzierten und der tideunabhängigen Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn sind z.B. bei Aufkommern im Bereich Altenbruch



wegen des geringen Passierabstands zunehmende Belastungen von $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \leq +0,15$ m/s zu erwarten.

PPM-Containerschiffe PPM43 zu PPM46:

Die ausbaubedingten Belastungszunahmen durch die tideunabhängig verkehrende Containerschiffahrt werden im Bereich der Bühnenköpfe bei $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,1$ m bzw. $\Delta v_R < +0,1$ m/s liegen.

Für kurzperiodische Sekundärwellen ist in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit ($v_S > 14$ kn) und den Änderungen der langperiodischen Belastung (z.B.: $\Delta z_A \approx +0,2$ m) maximal von ausbaubedingten Änderungen von $\Delta H_S \approx +0,1$ m auszugehen.

Für das tideabhängig fahrende Bemessungsschiff der POST-PANMAX-Größe werden von der BAW - in Anlehnung an die nach [U8] von der Projektgruppe für die Bemessung des Tiefenlängsprofils angesetzte bereichsabhängige Schiffsgeschwindigkeit durch Wasser - folgende Fahrgeschwindigkeiten durchs Wasser aus wasserbaulicher Sicht als unkritisch angesehen:

- Seemannshöft bis etwa Hamburger Yachthafen $v_S < 10$ kn
- Hamburger Yachthafen bis etwa Glückstadt $v_S < 12$ kn
- Glückstadt bis etwa Brunsbüttel $v_S < 14$ kn
- Brunsbüttel bis See $v_S < 15$ kn.

Beim Vergleich des PPM46-Bemessungsschiffs ($t = 13,8$ m) mit den schon heute im Ist-Zustand tideunabhängig verkehrenden PPM43-Containerschiffen ($t = 12,8$ m) werden die langperiodischen, ausbaubedingten Änderungen nach der neuen Fahrrinnenanpassung bei Einhalten der für die Fahrrinntiefe angesetzten oberen Bemessungsgeschwindigkeiten zwischen $9 \text{ kn} < v_S < 12 \text{ kn}$ aus wasserbaulicher Sicht lokal unterschiedlich teils als unerheblich, teils als unkritisch angesehen.

Für exponiert liegende Abschnitte (z.B. Lühesand oder Scheelenkuhlen) sind aufgrund der deutlichen Belastungszunahmen sowohl für tideabhängige (MThw) als auch für tideunabhängige Fahrt (MTnw) u.a. die bisherigen Bemessungen für Bühnenköpfe oder schar liegende Deckwerke zu überprüfen.

Bei der zukünftigen Begegnung großer Containerschiffe (z.B. PPM46 / PPM46) werden für die Abschnitte entlang der Unterelbe, in denen bisher schon Begegnungen großer Containerschiffe zugelassen sind, folgende maximale geschwindigkeitsabhängige Belastungsänderungen - auf der sicheren Seite liegend - abgeschätzt:



- $v_S = 10 \text{ kn}$: $\Delta z_A \approx +0,1 \text{ m}$ mit $\Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$
- $v_S = 12 \text{ kn}$: $\Delta z_A \approx +0,2 \text{ m}$ mit $\Delta v_R \approx +0,35 \text{ m/s}$.

Wie schon im heutigen Zustand werden auch nach der neuen Fahrrinnenanpassung bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten ($v_S >$ obere Bemessungsgeschwindigkeit) bereichsweise überproportional erhöhte schiffserzeugte Belastungsänderungen auftreten. Als Maß für diese ausbaubedingten Änderungen der lokalen schiffserzeugten Belastungen ist in erster Linie der geschwindigkeitsabhängige Energieeintrag durch das Schiff zu bewerten.

Trotz höherer äußerer hydrodynamischer Belastung werden schiffserzeugte Schwingungen im Wasser- und Bodenkörper u.a. aus Motorvibration, Propellerumdrehung oder brechenden Sekundärwellen und deren Wirkung auf Deckwerke und Deiche gegenüber Verkehrslasten durch Fußgänger oder Landfahrzeuge weiterhin von deutlich untergeordneter Bedeutung sein.

Bei erhöhten Wasserständen am Deich (Sturmfluten) sind auch ausbaubedingt erhöhte, geschwindigkeitsabhängige schiffserzeugte Belastungen wegen des dann für die Schiffe deutlich größeren Querschnittsverhältnisses nachrangig gegenüber den dann ohnedies wirkenden Wasserstands- und Windwellenbelastungen.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	8
2	Unterlagen	9
3	Folgerungen aus den Erörterungsterminen nach § 5 UVPG	11
4	Schiffserzeugte Belastung	11
4.1	Allgemeine Bemerkungen	11
4.2	Definition der kennzeichnenden Größen	12
4.3	Bewertung möglicher Bearbeitungsmethoden	16
4.3.1	Empirische und analytische Berechnungsansätze	16
4.3.2	Numerische Berechnungsverfahren	17
4.3.3	Prognose auf Basis von Naturmessungen	20
4.3.4	Versuche im hydraulischen Maßstabsmodell	21
5	Methodisches Vorgehen	21
6	Erfassung des IST-Zustands der schiffserzeugten Belastungen	22
6.1	Ergebnisse von Messungen in der Natur	22
6.2	Statistische Analysen für den Ist-Zustand	26
6.3	Bewertung der Prognosen zur jüngsten Fahrrinnenanpassung	32
6.4	Beschreibung des Ist-Zustands und Wirkungsmechanismen	33
6.4.1	Charakteristische Belastungsbereiche	33
6.4.2	Deckwerke und Deiche	36
6.4.3	Wattgebiete und natürliche Ufer	36
6.4.4	Bauliche Anlagen	37
6.4.5	Sport- und Kleinschiffahrt	40
6.4.6	Marinearchäologische Kulturgüter	41
6.4.7	Fahrrinne und Unterwasserböschungen	41
6.4.8	Nebenflüsse und Nebenelben	42
7	Prognose der Änderungen im Abschnitt Hamburger Yachthafen	44
7.1	Vorbemerkungen	44
7.2	Das hydraulische Modell	45
7.2.1	Modellgesetze	45
7.2.2	Versuchseinrichtung	47
7.2.3	Bemessungsschiff und Schiffsvarianten	53
7.2.4	Untersuchungsvarianten für die Begegnungsstrecke	55



7.2.4.1	Schiffserzeugte Belastungen im Referenzgebiet	56
7.2.4.1.1	Begegnungen im Ist-Zustand	56
7.2.4.1.1.1	CONTAINERSCHIFFE PM32 / PPM 40 bei T _{hw}	56
7.2.4.1.1.2	CONTAINERSCHIFFE PM32 / PPM 40 bei T _{1/2w}	57
7.2.4.1.1.3	MASSENGUTSCHIFF MG 58 / CONTAINERSCHIFF PM 32 bei Thw	59
7.2.4.1.2	Zusammenfassende Bewertung der Belastungen im Ist-Zustand	63
7.2.4.2	Prognose ausbaubedingter Änderungen im Referenzgebiet	65
7.2.4.2.1	Ausbauvarianten	65
7.2.4.2.2	Belastungsänderungen bei den Ausbauvarianten 320m- und 385m-Trasse	68
7.2.4.2.2.1	MG58 / PM32 - Ist-Zustand zu MG58 / PPM46 - 385m-Trasse bei Thw	68
7.2.4.2.2.2	MG58 / PPM46 – 320m- und 385m-Trasse bei Thw	70
7.2.4.2.2.3	PM32/PPM40 - Ist-Zustand zu PPM46/PPM46 - 385m-Trasse bei T _{hw}	72
7.2.4.2.2.4	PPM40 / PPM46 - 320m- und 385m-Trasse bei T _{hw}	74
7.2.4.2.3	Bewertung ausbaubedingter Änderungen im Referenzgebiet	77
7.2.5	Systemversuche im hydraulischen Modell	80
8	Belastungsprognosen für das Gesamtästuar	85
8.1	Vorbemerkungen	85
8.2	Beurteilungskriterien	86
8.3	Hydraulisch wirksame bauliche Veränderungen	88
8.3.1	Hafen Hamburg bis Blankenese (km 620 bis km 634)	92
8.3.2	Blankenese bis Wedel (km 634 bis km 645)	94
8.3.3	Wedel bis Lühesand (km 645 bis km 648)	96
8.3.4	Lühesand bis Schwingemündung (km 648 bis km 655)	98
8.3.5	Schwingemündung bis Kollmar (km 655 bis km 668)	99
8.3.6	Kollmar bis Brokdorf (km 668 bis km 683)	100
8.3.7	Brokdorf bis Büttel (km 683 bis km 692)	103
8.3.8	Büttel bis Brunsbüttel (km 692 bis km 700)	106
8.3.9	Brunsbüttel bis Ostemündung (km 700 bis km 710)	107
8.3.10	Ostemündung bis Altenbruch (km 710 bis km 722)	110
8.3.11	Altenbruch bis Cuxhaven (km 722 bis km 730)	112
8.3.12	Cuxhaven bis Großer Vogelsand (km 730 bis km 756)	113
9	Belastungsprognosen nach Betroffenheiten	114
9.1	Vorbemerkung	114
9.2	Belastungsänderungen für Deckwerke und Deiche	114
9.3	Belastungsänderungen von Wattgebieten und natürlichen Ufern	116
9.4	Belastungsänderungen von baulichen Anlagen	117
9.5	Belastungsänderungen der Sport- und Kleinschiffahrt	117
9.6	Belastungsänderungen für marinearchäologischen Kulturgüter	118
9.7	Belastungsänderungen von Fahrrinne und Unterwasserböschungen	118
9.8	Belastungsänderungen der Nebenflüsse und Nebenelben	119



9.9	Häufigkeit schiffserzeugter Belastungen	119
10	Schlussfolgerungen zu den ausbaubedingten Änderungen	120
11	Literaturverzeichnis	122
12	Anlagen	126

Bildverzeichnis

Seite

Bild 1: Tideästuar Unter- und Außenelbe zwischen Geesthacht, Hamburger Hafen und See	9
Bild 2: Schiffswellen in unbeschränktem Fahrwasser (Draufsicht)	13
Bild 3: Seitliche Ansicht der Schiffswellensysteme	14
Bild 4: Resultierende schiffserzeugte Verdrängungsströmung (schematisch)	14
Bild 5: Darstellung des Teilquerschnitts einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussgrößen auf die schiffserzeugten Belastungen	15
Bild 6: Karte der Unter- und Außenelbe mit den Positionen ausgewählter Messstationen zur Erfassung schiffserzeugter Belastungen sowie mit der Fahrrinnenkilometrierung	22
Bild 7: Geschwindigkeitsband entlang der Unter- und Außenelbe von tideabhängigem ($32\text{ m} \leq b \leq 43\text{ m}$, $t > 12,8\text{ m}$; blau) und tideunabhängigem ($32\text{ m} \leq b \leq 43\text{ m}$, $10\text{ m} \leq t \leq 12,8\text{ m}$; rot) Verkehr (Auswertung 01.01.2006 – 30.04.2006)	31
Bild 8: Unterteilung des Untersuchungsgebiets Unter- und Außenelbe in Hinblick auf schiffserzeugte Belastungen (nach FÜHRBÖTER et al., 1988; BAW, 1996)	33
Bild 9: Querschnittsverhältnisse in Unter- und Außenelbe für die Passage zweier großer POST-PANMAX-Containerschiffe bei tideabhängiger Fahrt vom Januar 2004	34
Bild 10: Modell des POST-PANMAX-Containerschiffs PPM46 als Abgänger vor dem Messquerschnitt Osteinfahrt Hamburger Yachthafen bei T_{nw} ($t = 13,5\text{ m}$, $v_S \approx 12,5\text{ kn}$)	47
Bild 11: Georeferenziertes Luftbild des Untersuchungsbereichs mit Versuchsbecken (gelb) und maßstäblichen Modellgebiet (rot) mit Messquerschnitt und Fahrspuren (blau)	49
Bild 12: Unterwassertopografie des Modellabschnitts Hamburger Yachthafen mit den beidseitigen Übergangsbereichen (überhöhte Darstellung)	49
Bild 13: Modellabschnitt Unterelbe mit Fahrrinne (links), Hamburger Yachthafen (Hintergrund, rechts) und Außenbezirk Wedel des WSA Hamburg (vorn rechts) im Maßstab 1 : 40	50
Bild 14: Unterwassertopografie der Hafeneinfahrten zum Hamburger Yachthafen im Modellmaßstab 1:40	50
Bild 15: Positionen der Wasserstands- und Strömungsmesssysteme im Untersuchungsabschnitt Hamburger Yachthafen	52



Bild 16: Zwei Containerschiffe PPM46 bei der Begegnung im hydraulischen Modell (385m-Trasse; Tnw; $t = 13,8$ m; $v_S \approx 10$ kn)	54
Bild 17: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk im Untersuchungsabschnitt bei Begegnung des PM32 als Aufkommer mit dem PPM40 als Abgänger (Tnw, Ist-Zustand)	57
Bild 18: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk im Untersuchungsabschnitt bei Begegnung des PM32 als Aufkommer mit dem PPM40 als Abgänger bei Tidehalbwasser im Vergleich zu den Belastungen bei Tnw (Ist-Zustand)	59
Bild 19: Wasserspiegelauslenkungen im Elbeabschnitt Hamburger Yachthafen bei Begegnung des Massengutschiffs MG58 mit $v_S = 10,0$ kn ($t = 14,5$ m; Aufkommer) mit dem Containerschiff PM32 ($v_S = 12,2$ kn, $t = 12,8$ m; Abgänger) bei etwa Thw	60
Bild 20: Vergleich des Absunks bei Begegnung MG58 / PM32 und Einzelfahrt MG58	61
Bild 21: Resultierende Strömungsgeschwindigkeit in der Yachthafeneinfahrt bei Begegnung des MG58 mit $v_S = 10,0$ kn ($t = 14,5$ m, Aufkommer) mit dem PM32 ($v_S \approx 12$ kn, $t = 12,8$ m, Abgänger, \approx Thw) sowie geschwindigkeitsabhängige Fahrkurve	62
Bild 22: Unterwasserquerprofile des Ist-Zustands (blau) sowie der Ausbauvarianten 320 m-Trasse (rot) und 385 m-Trasse mit Ablagerungsfläche (grün) mit den hydrodynamisch wirksamen Flächenangaben vor der Yachthafeneinfahrt Ost	66
Bild 23: Luftbild des Untersuchungsabschnitts Begegnungsstrecke Wedel mit Kursachsen der Begegner im hydraulischen Modell für den Ist-Zustand (rot), bei der 320 m-Trasse (grün) sowie bei der 385 m-Trasse (weiß)	66
Bild 24: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk für Begegnungen von MG58 mit PM32 im Ist- Zustand und für die Begegnungen von MG58 und PPM46 bei der 385m-Trasse (Thw)	68
Bild 25: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk bei der Begegnung des MG58 mit dem PPM46 für die Varianten 320m- und 385m-Trasse (Thw) an ausgewählten Positionen	71
Bild 26: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk für Begegnungen von PM32 mit PPM40 im Ist-Zustand und für die Begegnungen von PPM40 mit PPM46 bei der 385m-Trasse (örtl. Tnw)	73
Bild 27: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk für Begegnungen von PPM40 mit PPM46 bei der 320m-Trasse und bei der 385m-Trasse (örtl. Tnw)	75
Bild 28: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk für Einzelfahrten des PM32 ($t = 12,8$ m), des PPM40 ($t = 12,8$ m u. $13,8$ m) und des PPM46 ($t = 13,8$ m) als Abgänger ($L =$ konstant; örtl. Tnw)	82
Bild 29: Querschnittsverhältnisse und Differenzen für den Ist-Zustand (PM32, PPM43) und den Ausbauzustand (PPM46) bei tideunabhängiger Fahrt ($MTnw_{1997-2001}$) entlang der Unter- und Außenelbe	89
Bild 30: Teilquerschnittsverhältnisse n_T und Differenzen in der Unter- und Außenelbe (Nordseite) für tideunabhängig abgehende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei $MTnw_{1997-2001}$	91
Bild 31 : Teilquerschnittsverhältnisse n_T und Differenzen in der Unter- und Außenelbe (Südseite) für tideunabhängig aufkommende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei $MTnw_{1997-2001}$	92

Bild 32: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Hafen Hamburg und Blankenese (km 620 bis km 634)	93
Bild 33: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Blankenese bis Wedel (km 634 bis km 645)	96
Bild 34: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Wedel bis Twielenfleth (km 645 bis km 651)	97
Bild 35: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Twielenfleth bis Kollmar (km 651 bis km 668)	99
Bild 36: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Kollmar bis Brokdorf (km 668 bis km 683)	101
Bild 37: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Brokdorf bis Büttel (km 683 bis km 692; ohne Übertiefenverfüllung St. Margarethen)	104
Bild 38: Querprofil der Unterelbe bei km 687 (Ablagerungsfläche Scheelenkuhlen; stark überhöht)	105
Bild 39: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Büttel bis Brunsbüttel (km 692 bis km 700)	107
Bild 40: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Brunsbüttel bis Ostemündung (km 700 bis km 710)	108
Bild 41: Querprofil der Unterelbe bei km 704 (Ablagerungsfläche Neufelder Sand; stark überhöht)	109
Bild 42: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Ostemündung bis Cuxhaven (km 710 bis km 730) mit der Unterwasserablagerungsfläche Medemrinne-Ost	111
Bild 43: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Cuxhaven bis Großer Vogelsand (km 730 bis km 756)	113
Bild 44: Grafische Darstellung der Prognose der ausbaubedingten Änderungen des Absunks (Maximalwerte) in der Unter- und Außenelbe bei Einzelpassagen großer PPM-Containerschiffe im Ausbauzustand bei MTn _W ¹⁹⁹⁷⁻²⁰⁰¹	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung von Maximalwerten schiffserzeugter Wellen aus Naturmessprogrammen zur wind- und schiffserzeugter Belastung an der Unter- und Außenelbe aus BAW (1996), ergänzt mit Messungen zwischen 2001 und 2005	25
Tabelle 2: Fahrgeschwindigkeiten über Grund von Tiefgängern über $t > 10$ m für das Jahr 2002 abschnittsweise getrennt für Aufkommer und Abgänger nach [U 9]	27
Tabelle 3: Vergleich der heutigen Bemessungsgeschwindigkeit über Grund mit AIS-Messungen im Bereich Wittenbergen, Hamburger Yachthafen und Lühemündung (große Containerschiffe $b \geq 32,3$ m, 01.04.05 – 08.06.05)	29



Tabelle 4: Vergleich der heutigen Bemessungsgeschwindigkeit über Grund mit AIS-Messungen im Bereich Wittenbergen, Hamburger Yachthafen und Lühemündung (PPM-Containerschiffe $b \geq 32,3$ m und $t \geq 13,5$ m, 01.04.05 – 08.06.05)	29
Tabelle 5: Basisdaten der im hydraulischen Modell simulierten Schiffseinheiten	53
Tabelle 6: Untersuchte Begegnungsszenarien im Ist-Zustand und im Ausbauzustand (Trassenvarianten 320m und 385m)	55
Tabelle 7: Zusammenstellung der Absunkereignisse im Ist-Zustand bei $v_S \approx 12$ kn (MG58: $v_S \approx 10$ kn)	63
Tabelle 8: Zusammenstellung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Yachthafeneinfahrt Ost für den Ist-Zustand bei $v_S \approx 12$ kn (MG58: $v_S \approx 10$ kn)	64
Tabelle 9: Zusammenstellung der Absunkwerte im Ist- bzw. Vergleichs-Zustand (schwarz) und der prognostizierten Differenzen für die Varianten 320m- bzw. 385m-Trasse (rot) bei $v_{S,CONT} = 12$ kn (MG58: $v_S \approx 10$ kn)	77
Tabelle 10: Zusammenstellung der Absunkereignisse im Ist-Zustand bei $v_{S,CONT} \approx 12$ kn (MG58: $v_S \approx 10$ kn) und der prognostizierten Differenzen für die Variante 385m-Trasse bei $v_{S,CONT} \approx 10$ kn (MG58: $v_S \approx 8$ kn)	79
Tabelle 11: Basisdaten der im hydraulischen Modell simulierten Schiffseinheiten für die Systemversuche sowie deren Querschnittsverhältnisse bei T_{nw}	80

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Zusammenstellung der untersuchten Begegnungsszenarien
----------	---



Symbolverzeichnis:

Zeichen	Begriff	Einheit
A	Querschnittsfläche der Wasserstraße	m ²
A _T	Teilquerschnittsfläche der Wasserstraße	m ²
A _S	Eingetauchter Hauptspantquerschnitt	m ²
b	Schiffsbreite in Hauptspantebene	m
B	Wasserspiegelbreite (Oberfläche)	m
B _S	Sohlbreite der Wasserstraße	m
c _B	Völligkeitsgrad der Verdrängung eines Schiffes	-
h	Wassertiefe	m
Fr _h	FROUDESche Tiefen-Zahl = $v_s / (g \cdot h)^{0,5}$ bez. auf Wassertiefe	-
Fr _l	FROUDESche Längen-Zahl = $v_s / (g \cdot l)^{0,5}$ bez. auf Schiffslänge	-
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
H	Wellenhöhe	m
H _P	Primärwellenhöhe	m
H _S	Sekundärwellenhöhe	m
k	Dämpfungsfaktor	-
l	Schiffslänge auf Wasserlinie	m
L	Passierabstand vom Ufer	m
m	Böschungsneigung 1:m	-
n	Querschnittsverhältnis A/A _S	-
n _T	Teilquerschnittsverhältnis A _T / 0,5 • A _S	-
Re	REYNOLDSzahl = $v_s \cdot l / \nu$	-
R _{T,K}	Gesamtwiderstand eines Schiffes im Kanal	-
s _B	Bugstau / Schwallwelle	m
t	Schiffstiefgang	m
T	Wellenperiode	s
v ₀	Grundströmung in der Wasserstraße	m/s
v _R	Rückstromgeschwindigkeit	m/s
v _{RES}	resultierende Strömungsgeschwindigkeit	m/s
v _S	Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser	kn
z _A	Absenk des Wasserspiegels	m
Δ	Differenzgröße	-
ν	Kinematische Zähigkeit	m ² /s

Anmerkung: kn = Knoten = Seemeilen pro Stunde = 1,852 km/h = 0,51 m/s.
 TEU = Containereinheit (20 Fuß-Container)



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

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

Für das Planfeststellungsverfahren wurde die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg und der Hamburg Port Authority über das gemeinsame Projektbüro Fahrrinnenanpassung (Schreiben vom 1.11.2004, Geschäftszeichen A;192-4;427.04) mit einer wasserbaulichen Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter beauftragt.

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

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

- **Tidedynamik und Salztransport**
Ermittlung der maßgebenden Kennwerte der Tidedynamik und des Salztransports auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Kennwerte.
- **Sturmfluten**
Ermittlung der heutigen Sturmflutverhältnisse auf der Basis einer hochauflösenden HN-Modellierung des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Scheitelwasserstände sowie des Verlaufs unterschiedlicher Sturmfluten.
- **Morphodynamik**
Beschreibung der heutigen Transportprozesse auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung des planerischen Ist-Zustandes (PIZ) sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Transportprozesse.
- **Schiffserzeugte Belastungen**
Beschreibung der heutigen schiffserzeugten Belastungen auf der Basis von Naturuntersuchungen und hydraulischen Modellversuchen und Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen (mündliche Beauftragung 03.02.2004).

Das vorliegende Gutachten behandelt ausschließlich die Untersuchungen zum Teilaspekt der **schiffserzeugten Belastungen**. In weiteren Gutachten der BAW werden die Teilaspekte Tidedynamik und Salztransport, Sturmfluten, sowie Transportprozesse und Morphodynamik behandelt.

Die Umweltverträglichkeitsuntersuchung sieht als Untersuchungsraum die Tideelbe vom Wehr Geesthacht (km 586) bis zur seeseitigen Ausbaugrenze bei Scharhörn (km 756, Tonne 7) vor. Für die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen wird die Seeschiffahrtsstraße Elbe stromab des Hamburger Hafens bei Altona (km 625) betrachtet (Bild 1).

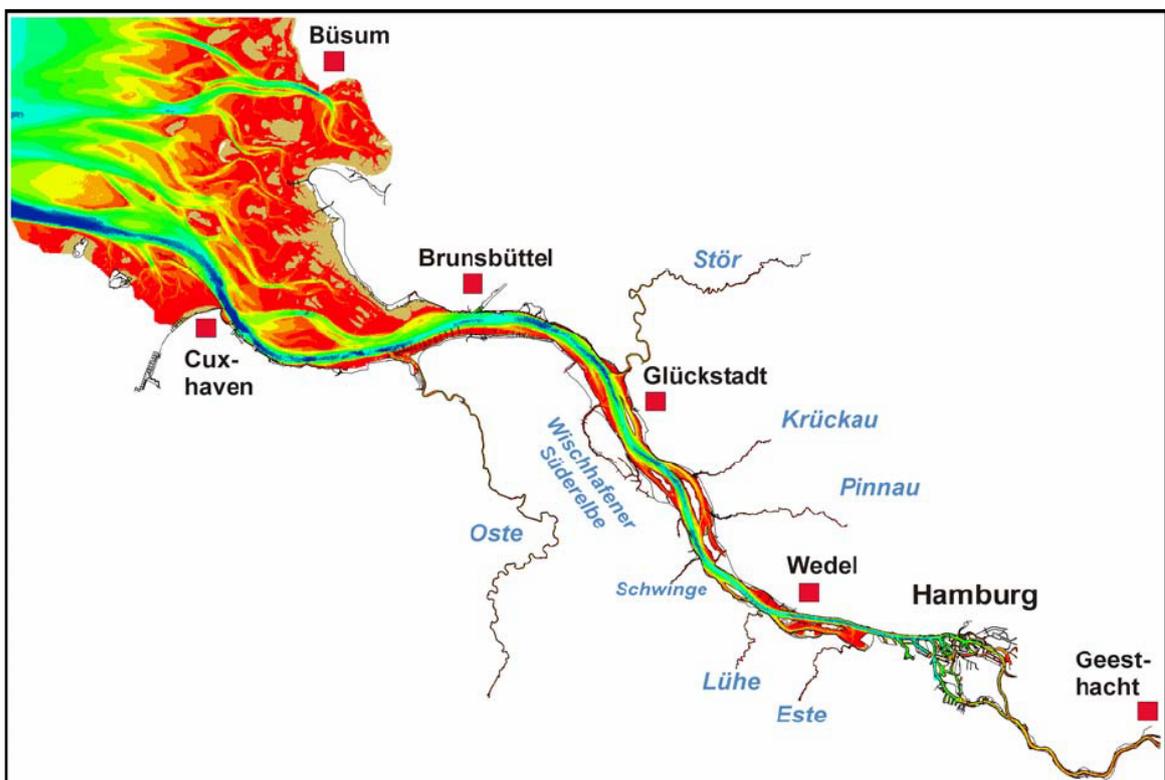


Bild 1: Tideästuar Unter- und Außenelbe zwischen Geesthacht, Hamburger Hafen und See

2 Unterlagen

Zur Projektbearbeitung und zum Aufbau des hydraulischen Modells standen der BAW das aktuelle Kartenwerk der Digitale Bundeswasserstraßenkarte (DBWK) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) sowie georefrenzierte Luftbilder zur Verfügung.

Des Weiteren konnte auf das Digitale Geländemodell (DGM) der Unter- und Außenelbe für die Machbarkeitsstudie der BAW (BAW, 2003) zurückgegriffen werden. Eigene Unterlagen aus Begehungen im Jahr 2004 vervollständigten die Datenbasis.



Folgende Unterlagen wurden u.a. verwendet:

- [U1] PG Voruntersuchung Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, Machbarkeitsstudie zur weiteren Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, Hamburg Feb. 2004
- [U2] Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, Untersuchungsrahmen der Umweltverträglichkeitsuntersuchung nach § 5 UVPG, 2005
- [U3] Projektgruppe Voruntersuchung weitere Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Begegnungsstrecke Tinsdal, Fahrspuren und Passierabstände für Planerischen Ist-Zustand, 18.02.2004
- [U4] Projektgruppe Voruntersuchung weitere Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Begegnungsstrecke Tinsdal, Fahrrinnenbreite, Böschungsneigungen und Ausbautiefen für 320m-Trasse, Schreiben vom 28.07.2004 und 13.08.2004
- [U5] Projektgruppe Voruntersuchung weitere Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Begegnungsstrecke Tinsdal, Fahrspuren und Passierabstände für 320m-Trasse, 11.08.2004
- [U6] Projektgruppe Voruntersuchung weitere Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Begegnungsstrecke Tinsdal, Fahrrinnenbreite, Ausbautiefen und Abmessungen Ablagerungsfläche Hanskalbsand für 385m-Trasse, Schreiben vom 03.12.2004
- [U7] Projektgruppe Voruntersuchung weitere Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe, Begegnungsstrecke Tinsdal, Fahrspuren und Passierabstände für 385m-Trasse, 07.12.2004
- [U8] Projektbüro Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe, Beschreibung des Vorhabens (Technische Planung), Planungsstand 28.04.2006
- [U9] Projektbüro Fahrrinnenanpassung, Statistische Analyse des Schiffsverkehrs auf der Unter- und Außenelbe, Juni 2005
- [U10] Untersuchung des zukünftigen seewärtigen Schiffsverkehrs der Außen- und Unterelbe (statistische Untersuchung), Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik (ISL), Bremen, Januar 2006



Des Weiteren wurden die Erfahrungen aus dem Gutachten der BAW zur „Anpassung der Fahrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastung – Schiffswellen und Strömungen“ (BAW, 1996) verarbeitet.

3 Folgerungen aus den Erörterungsterminen nach § 5 UVPG

Das Scoping-Verfahren gemäß § 5 des "Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung" (UVPG) führte hinsichtlich der zu ermittelnden und zu bewertenden ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen ([U2]) zur ergänzenden Festlegung des Untersuchungsrahmens:

- Betrachtung der Wechselwirkung von schiffsinduzierten Schwingungen und Seeschifffahrtstraße / Ufer / Deich
- Betrachtung von schiffswelleninduzierten Sieltorbewegungen

Auf die physikalischen Prozesse und Wirkungsmechanismen dieser schiffserzeugten Belastungen und deren ausbaubedingten Änderungen wird in den entsprechenden Abschnitten (u.a. Belastung von Deckwerken und Deichen, Belastung von baulichen Anlagen) eingegangen.

4 Schiffserzeugte Belastung

4.1 Allgemeine Bemerkungen

Hydrodynamische, instationäre Belastungen an den seitlichen Einfassungen von Wasserstraßen, seien es schiffbare Flüsse oder Kanäle, lassen sich als Wellen- und Strömungsbelastung definieren.

Unter Wellenbelastung sind die Auswirkungen von Wind- und Schiffswellen zu verstehen, bei der Strömung unterscheidet man natürliche Strömungsverhältnisse (u.a. Gefälleströmung oder/und winderzeugte Strömung) sowie anthropogen bedingte Strömungen wie z.B. schiffserzeugte Strömungen.

Die grundsätzlichen physikalischen Zusammenhänge der Wellen- und Strömungsverhältnisse um ein fahrendes Schiff wurden seit Anfang des letzten Jahrhunderts in verschiedensten Veröffentlichungen behandelt und mit Stand etwa 1996 im Gutachten der BAW zur jüngsten Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe aufgearbeitet (BAW, 1996).



Im Folgenden werden nochmals die physikalischen Grundlagen zusammengefasst sowie das jüngere Schrifttum aufgearbeitet.

4.2 Definition der kennzeichnenden Größen

Bei der Beschreibung der physikalischen Grundlagen und der Definition der kennzeichnenden Größen der schiffserzeugten Belastungen wird im wesentlichen auf die Aussagen des BAW-Gutachtens (1996) zurückgegriffen.

Bei der Fahrt eines Schiffes durch das Wasser treten infolge der durch das Schiff verursachten Verdrängungsströmung (BERNOULLI-Strömung) und der auftretenden Druck- und Wasserspiegeländerungen an Bug, Heck und Schiffslängsseite Wellensysteme unterschiedlicher Periode auf. Sie können auch als sichtbare Größe des Schiffswiderstands verstanden werden.

Die Schiffswellen- und Strömungssysteme sind gekennzeichnet durch

- die Schwallwelle als vorauslaufende Ablösung des Bugstaus,
- den Bugstau s_B direkt am Schiffskörper,
- den Absunk z_A seitlich am Schiff,
- die Heckwelle als Teil des durch den Absunk angeregten langperiodischen Primärwellensystems H_P ,
- die kurzperiodischen Sekundärwellen H_S
- Periode des Primärwellensystems T_{Hp} (soweit möglich)
- Sunkzeit T_{SU} (Bugstau bis Absunk)
- Stiegzeit T_{ST} (Absunk bis Primärwelle)
- Periode der Sekundärwellen T_{Hs}

sowie

- die Rückströmung v_R , mit ihren Komponenten in Abhängigkeit von Bugstau, Absunk, Heckwelle und Sekundärwellen.

Das Wellenbild eines Schiffes in unbeschränktem Fahrwasser ist als Draufsicht in Bild 2 skizziert.

Die Wasserspiegeländerungen in tiefen- und seitenbegrenztem Fahrwasser, wie sich das Wellenbild für einen Betrachter am Ufer darstellt, sind als Seitenansicht schematisch in Bild 3 erläutert. In ihrer zeitlichen Abfolge werden für einen am Ort stehenden Betrachter folgende Änderungen des Ruhewasserspiegels deutlich: Bugstau, Absunk als Differenz von Bugstau (oder Schwallwelle) und maximalem Wasserspiegelabfall, Primärwelle (als Heckwelle) sowie das die ausschwingende Primärwelle überlagernde Sekundärwellensystem.

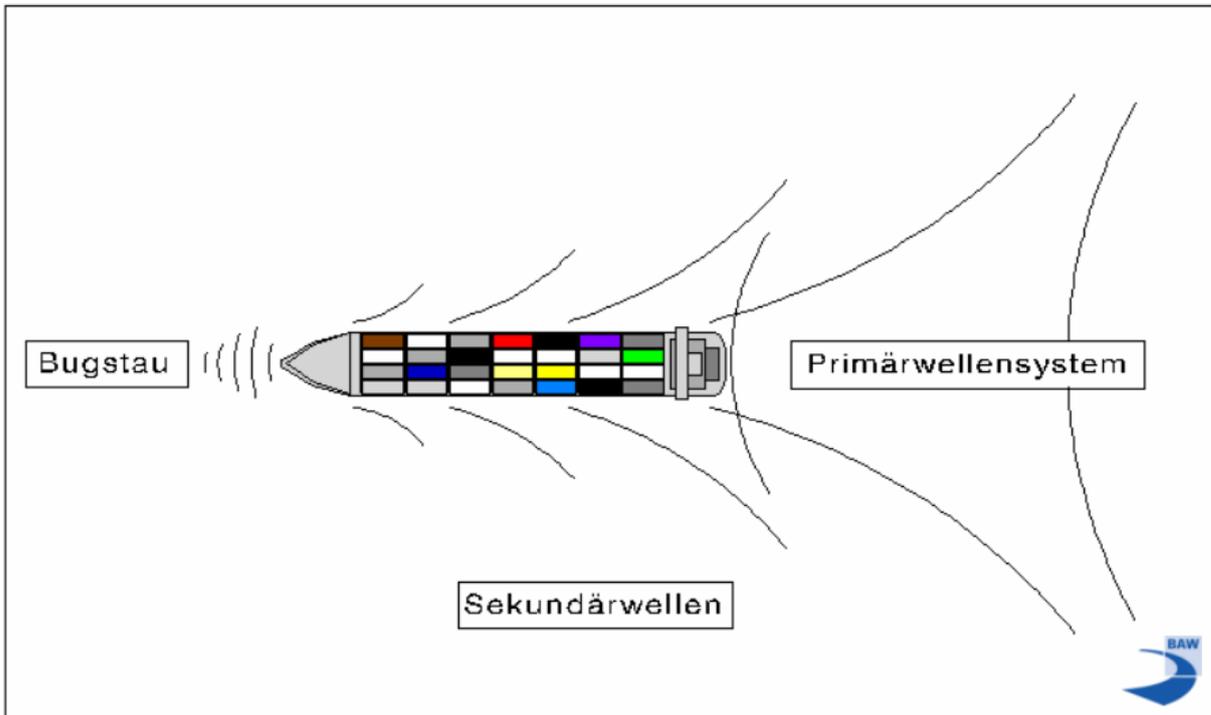


Bild 2: Schiffswellen in unbeschränktem Fahrwasser (Draufsicht)

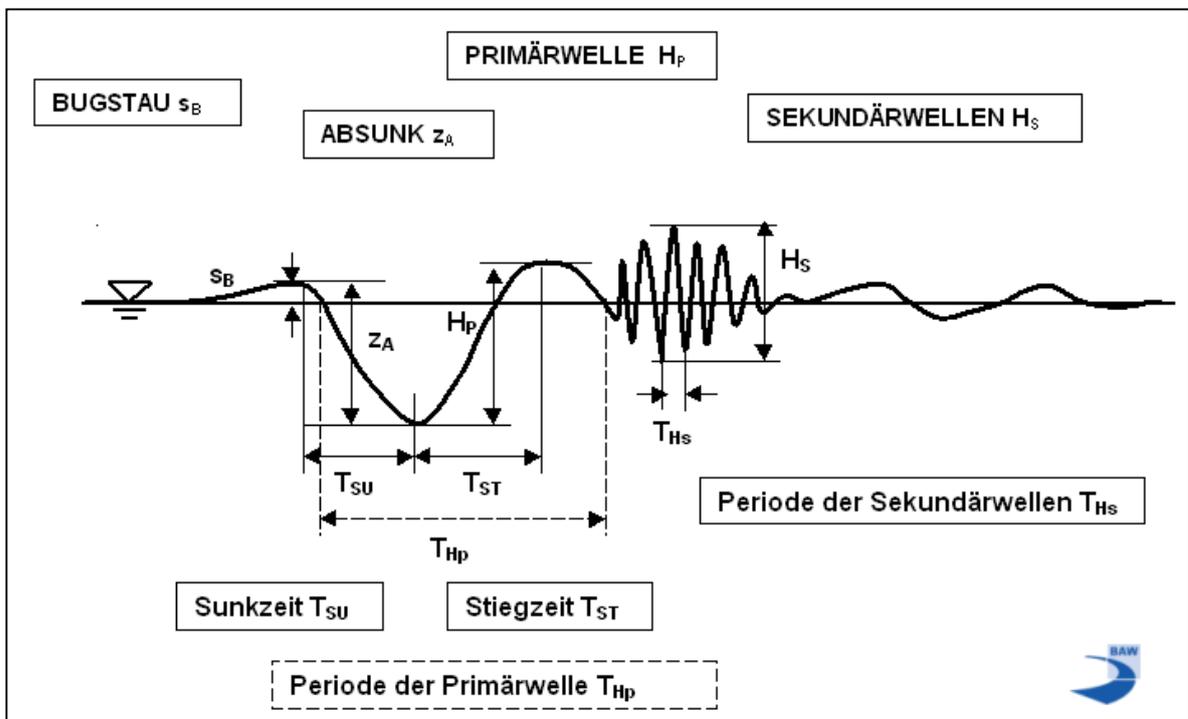


Bild 3: Seitliche Ansicht der Schiffswellensysteme

Die resultierende schiffserzeugte Verdrängungs-(Rück-)strömung ist schematisch in Bild 4 dargestellt. Ausgewählte Einflussgrößen sind in Bild 5 anhand des Querschnitts einer Wasserstraße in einer stark überhöhten Skizze zusammengestellt.

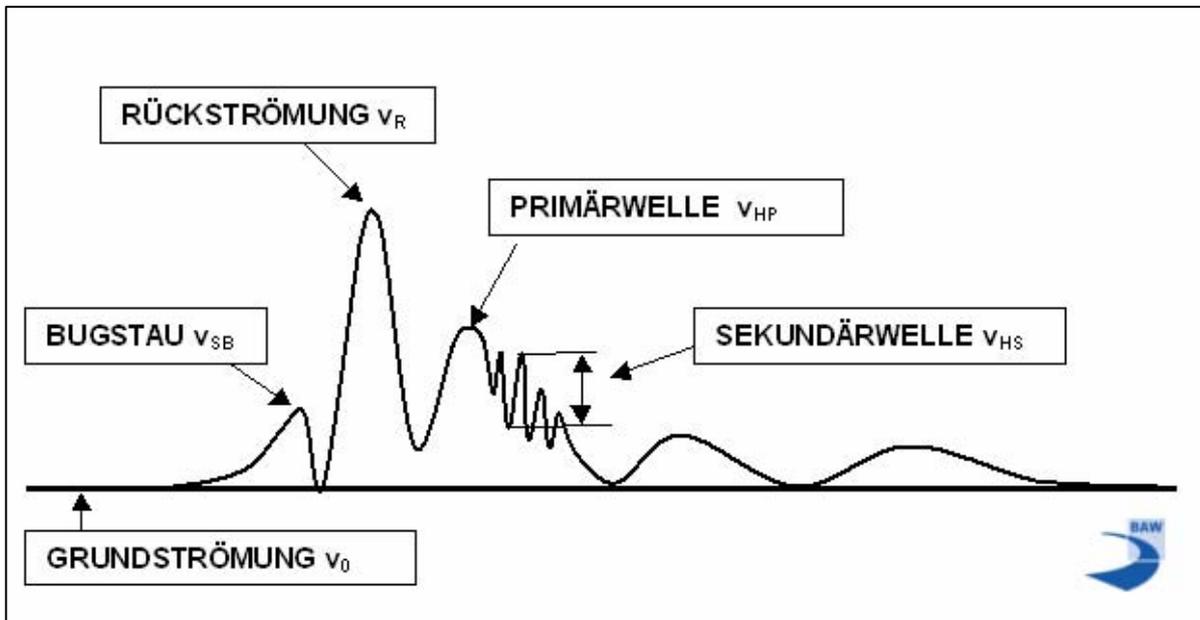


Bild 4: Resultierende schiffserzeugte Verdrängungsströmung (schematisch)

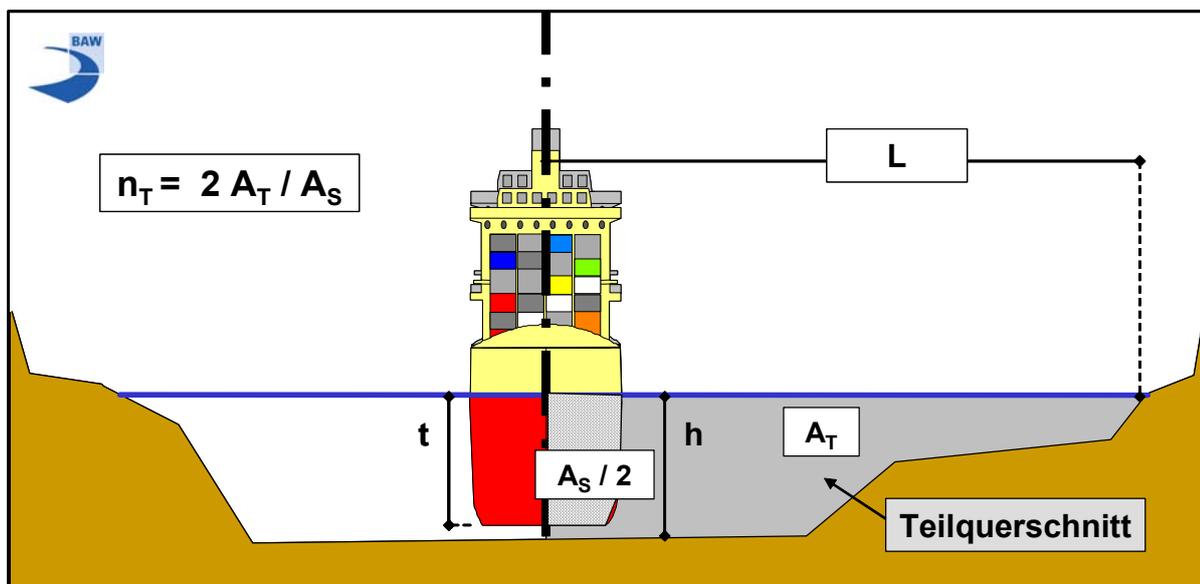


Bild 5: Darstellung des Teilquerschnitts einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussgrößen auf die schiffserzeugten Belastungen



Die kurzperiodischen Sekundärwellen entstehen - in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und besonders der Schiffsform - durch die unterschiedlichen Druckverteilungen an Bug, vorderer und hinterer Schulter sowie Heck; eine detaillierte Beschreibung und graphische Darstellung der verschiedenen Komponenten der Schiffswellen, der Einfluss der Schiffsform und ihre Überlagerungen sind bei SCHNEEKLUTH (1988) zu finden.

Die Größen der von fahrenden Schiffen erzeugten Wasserspiegelschwankungen und Strömungen sind eine Funktion

- von Schiffsgeschwindigkeit v_S und Passierabstand L
- der Schiffsabmessungen (Länge l , Breite b , Tiefgang t , eingetauchter Hauptspantquerschnitt A_S , Blockfaktor c_B)
- vom Gesamtwiderstand des Schiffes $R_{T,K}$, (Schiffsform)
- der Fahrwasserverhältnisse (Wasserspiegelbreite B , Sohlbreite B_S , Wassertiefe h , Querprofilform und -fläche A sowie Teilquerschnitt A_T , Uferform und Böschungsneigung 1:m)
- der Strömungsverhältnisse in der Wasserstraße v_0 (z.B. v_e oder v_f)
- sonstiger Einflüsse, wie z.B. Krümmungsradius D , Driftwinkel β , Antriebsart,
- Dichte des Wassers.

Anhand von Veröffentlichungen und eigener Untersuchungen haben sich als wesentliche Parameter für die schiffserzeugten Belastungen in inhomogenen Seeschiffahrtsstraßen

- die Schiffsgeschwindigkeit v_S ,
- der Passierabstand vom Ufer L ,
- das Teilquerschnittsverhältnis n_T als Funktion des Passierabstands L ($n_T = A_T / 0,5 A_S$) für die asymmetrische Belastung der Ufer und
- das Verhältnis von Gesamtwassertiefe zum Tiefgang h/t

herausgestellt.

In Abhängigkeit von Wassertiefe und Wellenlänge werden die schiffserzeugten Wellen - wie auch natürlicher Seegang - durch Sohlreibung, Umformungsprozesse wie Refraktion (Wellenbeugung), Strömungsrefraktion und Shoaling (Wellenaufsteilen), Teilreflexion sowie durch Wellenbrechen und die entsprechende Energiedissipation beeinflusst. Im Nahbereich von Bauwerken werden Umformungsprozesse wie Wellendiffraktion (Wellenbeugung) wirksam.



4.3 Bewertung möglicher Bearbeitungsmethoden

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

- Empirische und analytische Berechnungsmethoden
- Numerische Berechnungsverfahren
- Prognose auf Basis von Naturmessungen
- Versuche im hydraulischen Maßstabsmodell

Die Bearbeitungsmethoden werden im Folgenden nach dem heutigen Stand von Technik und Wissenschaft zusammengefasst.

4.3.1 Empirische und analytische Berechnungsansätze

Seit etwa 1913 liegen annähernd 20 Ansätze zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge von Absink, Rückstromgeschwindigkeit und Wellensystemen während einer Schiffspassage vor. Auf eine Auflistung und detaillierte Erläuterung dieser bekannten ingenieurwissenschaftlichen Berechnungsverfahren wird hier verzichtet.

Anhand dieser empirischen und analytischen Ansätze der „eindimensionalen Kanaltheorie“ zur Berechnung von Schiffswellen und Verdrängungsströmung lassen sich folgende Abhängigkeiten zusammenstellen:

- Absink: $z_A \propto v_S^k$ ($2 < k < 3,5$) und
 $z_A \propto n^m$ ($-1,5 < m < -1$)

- Rückströmung: $v_R \propto v_S$ und
 $v_R \propto n^{-1}$
(\propto = proportional)

Theoretisch hergeleitete oder empirisch entwickelte Berechnungsansätze können aufgrund der begrenzten Anzahl von gewählten physikalischen Parametern die Wechselwirkung zwischen Wasserstraße und Schiffspassage für zusammengesetzte unregelmäßige Profile nur unzureichend beschreiben.

Auch Bemessungsansätze, die für den Bereich der Binnenwasserstraßen hinreichend genaue Prognosen der schiffserzeugten Belastungen liefern (BAW, 2004), konnten für den Bereich der Seeschiffahrtsstraßen nur durch weitere - von den lokalen Verhältnissen abhängige - Parameter an die Messergebnisse aus Modellversuchen mit Seeschiffen angepasst werden.



Für eine quantitative Abschätzung der schiffserzeugten Belastung durch die seegängige Großschifffahrt auf den großen inhomogenen Seeschiffahrtsstraßen und besonders im Tidegebiet sind die bekannten empirischen und analytischen Berechnungsansätze nicht anwendbar. Eine abgesicherte rechnerische Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastung kann deswegen mit diesen Ansätzen nicht erfolgen.

4.3.2 Numerische Berechnungsverfahren

Im Rahmen der Gutachtenbearbeitung der BAW zur jüngsten Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe wurden in 1996 erste Berechnungen der schiffserzeugten Belastung beim NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA (NRC) mit dem numerischen Modell WAKE2D im Auftrag gegeben, um die Anwendungsreife des Modells für Fragestellungen der WSV, hier im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung, zu ermitteln (BAW, 1996). Weitere Berechnungen mit einem geringeren Gitterpunktstand (NRC, 1997) sowie eine Weiterentwicklung des numerischen Programms mit der Einbindung theoretischer Ansätze höherer Ordnung und Dispersionstermen für Tiefen-FROUDE-Zahlen von $Fr_h < 0.6$ in den numerischen Code von WAKE2D war von Seiten des NRC angestrebt, zeigten jedoch gerade bei den kurzperiodischen Wellen- und Strömungsbelastungen deutliche Abweichungen zur Messung (ULICZKA, 1998).

Die Recherche u.a. auf dem 5. SVA-Forum der SCHIFFBAU-VERSUCHSANSTALT POTSDAM mit Titel „Integration von CFD -Computational Fluid Dynamics- Methoden im Schiffsentwurf“ vom Oktober 1996 hinsichtlich numerischer Verfahren aus dem Fachgebiet des Schiffbaus, die in erster Linie zur Voroptimierung der Unterwasserschiffsform entwickelt wurden und dementsprechend für Tiefwasserbedingungen ausgelegt waren, verdeutlichte, dass bei der numerischen Simulation nur sehr vereinzelt Flachwasserbedingungen und inhomogene Querschnitte berücksichtigt werden.

Der Markt und auch das wirtschaftliche Interesse von Entwicklern bezüglich der numerischen Methode zur Berechnung schiffserzeugter Belastungen in seitlich begrenztem Flachwasser war deutlich begrenzt. Die weltweite Forschung und Entwicklung von numerischen Verfahren zur Simulation schiffserzeugter Belastungen soll an einigen Beispielen vorgestellt werden:

- Erste Modellrechnungen mit dem Verfahren SHALLOWTANK, eine Kopplung von Nah- und Fernfeldverfahren u.a. auf Basis der Laplace-Gleichungen, zeigten hinreichende Übereinstimmungen zwischen Rechnung und Messung, doch wurden weitere detaillierte Validierungsrechnungen für notwendig erachtet (CHEN / ULICZKA, 1999). Eine Weiterentwicklung des Verfahrens war derzeit nicht möglich.



- Ein zweidimensionales (2D) numerisches Verfahren zur Simulation der Passage von Binnenschiffen in inhomogenen Flusssystemen wurde vom US ARMY ENGINEER RESEARCH and DEVELOPMENT CENTER (USACE-ERDC) aus Vicksburg vorgestellt (STOCKSTILL / BERGER, 2001). Die Verdrängung des Schiffs wurde wie beim NRC-CHC als sich bewegendes Druckfeld in das Modell eingesteuert, um die Ausbreitung der langwelligen Anteile der schiffserzeugten Belastung (Wellen und Strömung) in verzweigten Flusssystemen zu berechnen. Die Wirkung von Seeschiffen sowie die Simulation der kurzperiodischen Belastungsanteile war nicht Thema der Veröffentlichung.
- Die Kopplung eines stationären 3D-Potential-Verfahrens für das Schiffsnahfeld (RAPID) mit einem 2D Wellenausbreitungsverfahren auf der Basis der BOUSSINESQ-Gleichungen (TRITON) bereitete im Übergangsbereich zwischen Nahfeld und Fernfeld vornehmlich bei den kurzperiodischen Belastungsanteilen Energiedissipationsprobleme aufgrund vorzunehmender Näherungslösungen beim BOUSSINESQ-Modell (DOORN et al., 2002).
- Ein Überblick zum Stand der Modellierung schiffserzeugter Belastungen findet sich bei MacDONALD in seiner Veröffentlichung „Numerical Modelling of Coupled Drawdown and Wake“ auf der CANADIAN COASTAL CONFERENCE 2003 in KINGSTON, Canada (MACDONALD, 2003). Verschiedene bekannte Verfahren wurden beschrieben (z.B. *MIKE 21 NSW* des DANISH HYDRAULICS INSTITUTE, DHI oder *HIVEL2D* des USACE oder *Wake2D* des NRC-CHC) und hinsichtlich ihrer Einschränkungen, der erforderlichen hohen Auflösung und des Rechenaufwands bewertet. Das von MacDONALD vorgestellte Verfahren SHIP-GENERATED HYDRODYNAMICS (SGH) beinhaltet zwar Wellenumformungsprozesse wie Shoaling, Refraktion, Diffraktion, Wellenbrechen u.a.m., muss aber aufgrund des rechtwinkligen Gitternetzes als Finite-Differenzen-Verfahren bei Besonderheiten des Unterwasserschiffs (z.B. Wulstbug bei Seeschiffen) mit Näherungsverfahren arbeiten.
- Die Simulation eines schiffserzeugten Strömungsfelds in inhomogenen Wasserstraßen in Zusammenarbeit mit der USACE, Vicksburg stellten NWOGU / DEMIRBILEK (2004) vor. Die Validierung erfolgte über eine größere Anzahl von Naturmessungen. Zur Approximation des Schiffs wurde die Schlankkörpertheorie eingesetzt, welche den Heckbereich und die Nachstromturbulenz nur näherungsweise beschreiben kann.
- Erste numerische Simulationen von Schiffsbegegnungen von CHEN et al. (2002) mit einer Chimera-RANS-Methode zeigen eine mögliche Entwicklungsrichtung auf, sind aufgrund der begrenzten Randbedingungen (u.a. ohne Propellerwirkung und Ruder) in Fachkreisen in der Diskussion und noch eindeutig dem Bereich der Forschung zuzuordnen.



Da von der BAW mittelfristig nicht beabsichtigt war, numerische Verfahren zur Simulation der Wechselwirkung Schiff / Wasserstraße selbst zu entwickeln, veranstaltete die BAW u.a. zur Sichtung und Wertung verschiedener numerischer Verfahren im April 2001 einen Workshop zum „Einsatz von CFD-Techniken zur Simulation der Interaktion Binnenschiff / Binnenwasserstraße“, bei dem Schiffbauversuchsanstalten, Vertreter von Schiffbauinstituten sowie von Entwicklungsbüros ihre numerischen Verfahren vorstellten.

- Der von der VERSUCHSANSTALT FÜR BINNENSCHIFFBAU e.V. (VBD), Duisburg, dem heutigen ENTWICKLUNGSZENTRUM FÜR SCHIFFSTECHNIK UND TRANSPORTSYSTEME e.V. (DST) vorgestellte numerische Ansatz sowie das Konzept der Verknüpfung von numerischen Verfahren aus dem Schiffbau mit Verfahren zur Berechnung von Wellenumformungsprozessen versprach Entwicklungspotential in Richtung der Ziele der BAW. Daraus entwickelte sich seit 2001 in Kooperation mit der DST ein F&E-Programm zur Weiterentwicklung, Verifikation und Validierung des numerischen Verfahrens *BEShiWa* (*Boussinesq Equations for Ship Waves*), das vorerst das Nahfeld auf Basis der Schlankkörpertheorie ermittelte und die Wellenumformungsprozesse mittels Flachwassergleichungen vom BOUSSINESQ-Typ simulierte (JIANG et al. 2002). Verschiedene Stufen der Weiterentwicklung zeigten u.a. die Erfordernis, aufgrund der Hinterschiffsform moderner Seeschiffe (u.a. eingetauchtes Spiegelheck) das Nahfeld mittels eines instationären Potentialverfahrens zu berechnen und mit dem Verfahren *BEShiWa* zu koppeln. Es zeigte sich, dass die Schwierigkeit bei der Simulation der Schiffswellen in Ästuargebieten für praktisch relevante Fälle, in denen die Schiffsgeschwindigkeiten relativ klein und Tiefen-FROUDE-Zahlen $Fr_h < 0,6$ waren, weniger in der ungenauen Modellierung der schiffsnahen Strömung, als vielmehr in der Wellenausbreitung kurzer Wellen in flachen Gebieten lag. Eine instationäre Berechnung des Innenfelds konnte aufgrund numerischer Schwierigkeiten bei der Adaption des Paneelnetzes auf der Schiffsoberfläche, hervorgerufen durch das dynamisch eintauchende Spiegelheck, bis jetzt nicht durchgeführt werden. Das DST wird die Verfahren weiterentwickeln, um diese Schwierigkeiten zu bewältigen (DST, 2004).
- Für bestimmte Fragestellungen der BAW wurde als weitere Richtung im Rahmen des F&E-Programms der BAW nach ersten Kontakten mit dem Institut für Schiffbau der Universität Hamburg (heute Arbeitsbereiche der TU Hamburg-Harburg) seit 1995 die Entwicklung numerischer RANSE-Verfahren (*Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations*) verfolgt. In Kooperation mit dem INSTITUTE OF COMPUTATIONAL CONTINUUM MECHANICS (ICCM), Hamburg erfolgten u.a. Berechnungen zur schiffsinduzierten Energiedissipation in einem Drei-Fluid-System von Schlick, Wasser und Luft (ICCM, 2000). Zur Berechnung wurde das Verfahren *COMET* (*Continuum Mechanics Engineering Tool*) eingesetzt, das eine vollkonservative Finite-Volumen-Methode, randangepasste, unstrukturierte Gitter und REYNOLDS-gemittelte Erhaltungsgleichungen in Integralform



verwendet. Die Weiterentwicklung des Verfahrens *COMET* mit einem Body-Motion-Module (AZCUETA, 2003) führte zu einer sehr guten Übereinstimmung der berechneten Schiffsdynamik (Squat, Trimm) mit Modellmessungen der BAW. Das Verfahren ist allerdings nach Einschätzung von AZCUETA u.a. aufgrund hoher numerischer Dissipation im Fernfeld derzeit nicht geeignet, umfangreiche Berechnungen von schiffsinduzierten Wellenausbreitungsprozessen in inhomogenen Seeschiffahrtsstraßen vorzunehmen.

Für Fragestellungen hinsichtlich der Ermittlung ausbaubedingter Änderungen schiffserzeugter Belastungen der Seeschiffahrtsstraßen, besonders für typische Schiffsgeschwindigkeiten tiefgehender Containerschiffe bei tideabhängiger Revierfahrt, ist die numerische Bearbeitung (z.B. mit WAKE2D oder BESHwa) auch heutzutage noch nicht als wissenschaftliche Methode gemäß anerkanntem Stand der Technik einzustufen.

4.3.3 Prognose auf Basis von Naturmessungen

Naturmessungen sind als Ergänzung zu systematischen Untersuchungen schiffserzeugter Belastungen unerlässlich, um nicht nur die Belastungen von „Bemessungsschiffen“, sondern die gesamte Bandbreite wind- und schiffserzeugter Wellen sowie Strömungen zu erfassen und zu analysieren. Naturmessungen erfordern einen sehr hohen technischen und zeitlichen Aufwand und es ist nur aufgrund längerer Messkampagnen (ca. 6 - 12 Wochen) eine statistisch hinreichende Anzahl von Ereignissen zu registrieren.

Umfangreiche Messungen der BAW in 1998 zur schiffserzeugten Belastung bei durchgängigem Verkehr am Nord-Ostsee-Kanal zeigten, dass selbst eine hohe Anzahl gemessener Schiffspassagen (ca. 530 Ereignisse in 3 Wochen) eine systematische Analyse - auch bei verschiedenster Klassierung - nicht zuließ. Selbst unter den „geschützten Kanalbedingungen“ variierten Parameter wie Tiefgang, Passierabstand, Schiffsform und -größe sowie Wetterbedingungen innerhalb einer Klasse zu stark, um allein daraus eindeutige physikalische Zusammenhänge ableiten zu können.

Naturmessungen können nur den tatsächlichen Ist-Zustand erfassen. Prognosen schiffserzeugter Belastungen sind auf der Basis von Naturmessungen nicht möglich.

4.3.4 Versuche im hydraulischen Maßstabsmodell

Untersuchungen im verkleinerten hydraulischen Maßstabsmodell nach den FROUDEschen Modellgesetzen und bei hohen REYNOLDS-Zahlen sind seit etwa einem Jahrhundert bei Modellversuchen, bei denen die Wirkung von Wellen als Belastungsgröße bestimmend ist, als Stand von Technik und Wissenschaft anerkannt (u.a.: BOLLRICH et al., 1989). Die Ver-



such-, Mess- und Analysetechnik sowie das interne Qualitätsmanagement haben sich in den letzten Jahren aufgrund rechnergesteuerter Verfahrensabläufe deutlich weiterentwickelt.

Abgesicherte, quantitative Prognosen der ausbaubedingten Änderungen von schiffserzeugten Belastungen im extremen Flachwasser von inhomogenen Wasserstraßen sind derzeit nur mit der Methode des hydraulischen Modellversuchs in einem fachlich hinreichenden Modellmaßstab gewährleistet.

5 Methodisches Vorgehen

Das Untersuchungsgebiet im Rahmen der weiteren Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe umfasst den Bereich zwischen dem Hafen Hamburg bis in die Außenelbe seewärts Scharhörn sowie die Nebenflüsse (Bild 1).

Bei der Auftragsbearbeitung wird folgendermaßen vorgegangen:

- Beschreibung des Ist-Zustands
 - Analyse von Naturmesskampagnen
 - Analyse der gebietsabhängigen Belastungsprozesse
 - Analyse der Wirkungsmechanismen

- Prognose maximaler ausbaubedingter Änderungen
 - Wahl der Prognosemethode
 - Wahl eines topographisch komplexen Untersuchungsabschnitts
 - Simulation verschiedener Untersuchungsvarianten im Modell
 - Bewertung für den gewählten Untersuchungsabschnitt
 - Systemversuche im hydraulischen Modell
 - Gebietsabhängige Bewertung für die Seeschiffahrtsstraße Elbe

6 Erfassung des IST-Zustands der schiffserzeugten Belastungen

6.1 Ergebnisse von Messungen in der Natur

Eine Zusammenstellung und Bewertung der Naturmessprogramme zur Erfassung schiffserzeugter Belastungen bis Ende der 80er Jahre wurde im Gutachten der BAW zur jüngsten Fahrrinnenanpassung vorgenommen (BAW, 1996).

Nach 1999 erfolgten bis 2005 in fünf Abschnitten der Unter- und Außenelbe Messungen schiffserzeugter Belastungen auf natürliche Ufer, Deckwerke, Hafenanlagen, Nebenarme und Deichsiele. Zur Übersicht sind die Messpositionen zusammen mit der Fahrrinnenkilometrierung in einer Karte der Unter- und Außenelbe zusammengestellt (Bild 6).

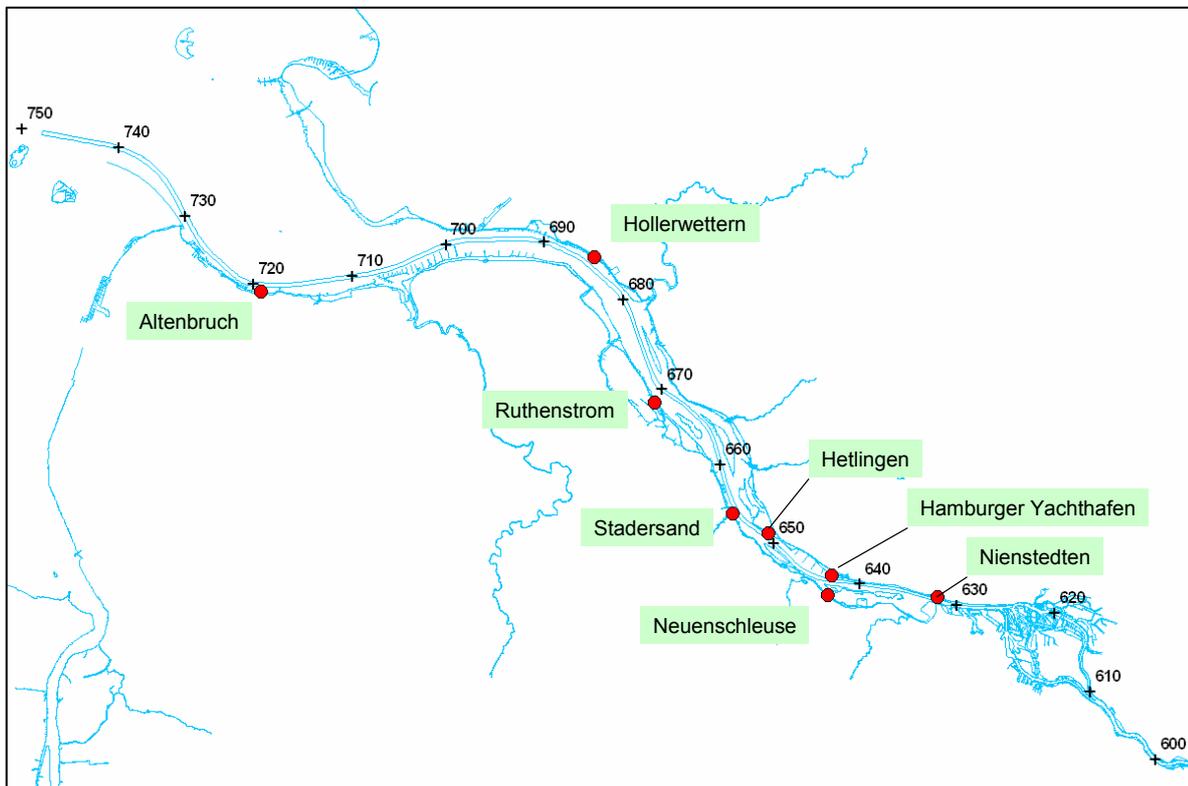


Bild 6: Karte der Unter- und Außenelbe mit den Positionen ausgewählter Messstationen zur Erfassung schiffserzeugter Belastungen sowie mit der Fahrrinnenkilometrierung

Die Messkampagnen sind im Folgenden entsprechend der Kilometrierung zusammengefasst:

- Aufgrund von Deckwerksverwerfungen im Bereich der Hamburger Delegationsstrecke beauftragte das Amt Strom- und Hafenbau der FHH das FRANZIUS-Institut, Hannover u.a. mit der Erfassung von wind- und schiffsinduzierten Wellen am Nordufer der Unterelbe



be bei Nienstedten (km 630 bis km 633). Zwischen Juni 2001 und Mai 2002 wurde ein maximaler Absunk von $z_A = 1,53$ m, eine maximale Primärwelle des selben Schiffs von $H_P = 1,62$ m und die höchsten Sekundärwellen mit $H_S = 0,35$ m gemessen (OHLE / ZIMMERMANN 2003). Der erfasste Maximalwert einer Schiffswelle wurde mit 1,97 m ($v_S \approx 18$ kn bei $l < 50$ m) angegeben. Diese hohe Wellenbelastung wurde vor allem auf erhöhte Schiffsgeschwindigkeiten zurückgeführt. Die maximalen Windwellen des Untersuchungszeitraums lagen bei $H = 0,5$ m bis 0,6 m.

- Da an den Einrichtungen des Sportboothafens Neuenschleuse in der Hahnöfer Nebenelbe Schäden durch auf der Unterelbe erzeugte Schiffswellen auftraten, wurden zur Beweissicherung von Mitte Juli bis Ende Oktober 2005 im Auftrag des WSA Hamburg vom INGENIEURBÜRO SCHMID, Kapsweyer an der Einfahrt des Sportboothafens langperiodische Schiffswellen erfasst und analysiert (INGENIEURBÜRO SCHMID, 2006). Der Sportboothafen liegt etwa 1,5 km südöstlich von der Mündung der Hahnöfer Nebenelbe in die Unterelbe ca. bei km 644. Die maximalen Absunk- und Primärwellenereignisse wurden mit $z_A = 0,43$ m und $H_P = 0,83$ m gemessen und waren in der Unterelbe von tideunabhängig verkehrenden PPM-Containerschiffen ($b = 40$ m) mit Tiefgängen zwischen $11 \text{ m} < t < 12 \text{ m}$ und Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser von $12 \text{ kn} < v_S < 14 \text{ kn}$ angeregt.
- Im Bereich stromab von Hamburg beobachtete die WSV eine Zunahme von Belastungen an Ufern, Deckwerken und baulichen Anlagen. Das WSA Hamburg beauftragte im Februar 2002 das INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, Hamburg, schiffserzeugte Wellen an der Unterelbe an den vier Positionen am
 - Anleger Einfahrtsbereich Hamburger Yachthafen (km 643,0) der
 - Radarplattform Hetlinger Schanze (km 650,6), dem
 - Schiffsanleger Stadersand (km 654,9) und im
 - Ruthenstrom am Anleger Hatecke-Werft (km 670,3)vorzunehmen. Die Messungen erfolgten nach dem „Starenkastenprinzip“ über jeweils rund 4 Messwochen zwischen April 2002 bis Mitte August 2002, um einen Anhalt für die Größenordnung der aktuellen Belastungen zu erhalten (INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, 2003).

Die gemessenen maximalen Wellenhöhen lagen bei

- $z_A = 0,23$ m, $H_P = 0,26$ m und $H_S = 0,30$ m im Hamburger Yachthafen,
- $z_A = 0,99$ m, $H_P = 1,09$ m und $H_S = 0,92$ m an der Radarplattform Hetlinger Schanze,
- $z_A = 0,63$ m, $H_P = 0,63$ m und $H_S = 0,88$ m am Schiffsanleger Stadersand und
- $z_A = 0,64$ m, $H_P = 0,71$ m im Ruthenstrom am Anleger Hatecke-Werft.



Da die Messstation im Ruthenstrom ca. 900 m vom Hauptstrom Elbe entfernt lag, waren die kurzperiodischen Sekundärwellen vernachlässigbar. Die mittlere Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser der Tagesmaxima des Absunks betrug:

- mittl. $v_S = 13,4$ kn bei km 643 (Hamburger Yachthafen),
- mittl. $v_S = 15,0$ kn bei km 650,6 (Radarplattform Hetlinger Schanze),
- mittl. $v_S = 13,9$ kn bei km 654,9 (Schiffsanleger Stadersand) und
- mittl. $v_S = 16,4$ kn bei km 670,3 (ca. Mündung Ruthenstrom).

Im Hamburger Yachthafen wurden rund 40 % der Tagesmaxima der Sekundärwellen durch die Schnellfähren verursacht, deren mittlere Geschwindigkeit etwa $v_S \approx 18,5$ kn ($v_{S,MAX} \approx 30$ kn) betrug.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die „Belastung aus Absunk und Primärwellenhöhe vor allem von Schiffen der PANMAX-Klasse und größeren verursacht“ wurde (INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, 2003).

- Zur Erfassung von schiffserzeugten Sieltorbewegungen am Deichsiel Hollerwettern stromab der Störmündung (ca. km 683) wurde vom WSA Hamburg das INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN beauftragt, neben den Sieltorbewegungen auch schiffserzeugte Wellen und Strömungen in Ufernähe und vor den Sieltoren zu messen. Während der Messkampagne von Mitte November bis Ende Dezember 2005 wurden die maximalen langperiodischen Wellenbelastungen am Ufer mit $z_A = 1,2$ m und $H_P = 1,4$ m von einem PPM-Containerschiff ($b = 40$ m) bei einer Schiffsgeschwindigkeit über Grund von etwa $v_{S,ÜG} \approx 18,3$ kn erzeugt. Die maximale Sekundärwellenhöhe am Ufer wurde mit $H_S = 1,1$ m angegeben (INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, 2006).
- Im Mai 2005 wurden im Auftrag des WSA Cuxhaven von der BAW im Rahmen der Erfassung schiffsinduzierte Schwingungen im Deich Pilotmessungen an der Unterelbe im Bereich des Altenbrucher Bogens (km 719,3) vorgenommen. Bei anschließenden Messungen schiffserzeugter Belastungen am gleichen Messquerschnitt im Herbst 2005 über einen Zeitraum von 12 Wochen wurden maximale Schiffswellenamplituden von $z_A = 0,49$ m, $H_P = 0,52$ m und $H_S = 1,43$ m registriert (BAW, 2006a).

Die Tabelle 1 gibt eine Zusammenstellung von Maximalwerten schiffserzeugter Wellen aus Naturmessprogrammen zur wind- und schiffserzeugter Belastung an der Unter- und Außenelbe aus BAW (1996) mit Ergänzungen aus jüngeren Messungen zwischen 2001 und 2005.

	km	Z _{A,MAX} [m]	H _{P,MAX} [m]	H _{S,MAX} [m]	Jahr
Nienstedten	632	1,53	1,97	-	2001
Schulau-Ufer	641	0,8	1,4	1,1	1989
Schulau-Hafen	641	0,4	0,5	1,0	1990
Yachthafen HH (innerhalb)	643	0,23	0,26	0,30	2002
YH Neuenschleuse (Hahnöfer Nebelbe)	644	0,43	0,83	-	2005
Lühe	645	0,55	0,58	0,9	1980-1983
Hetlinger Schanze	651	0,99	1,09	0,92	2002
Stadersand	655	0,63	0,63	0,88	2002
Ruthenstrom	670	0,64	0,71	-	2002
Krautsand	672	0,26	0,24	0,66	1980-1983
Hollerwettern	683	1,2	1,4	1,1	2005
Brunsbüttel	698	*(1)	*(1)	*(1)	1983-1984
Altenbruch	719	0,49*(3)	0,52*(3)	1,43*(3)	2005
Altenbruch	721	1,0	0,8	1,3	1988
Cuxhaven	726	*(2)	*(2)	<1,0	1988-1989
	729				

*(1) im Vergleich zu Windwellen zu vernachlässigen (FÜHRBÖTER et al., 1988)

*(2) zur örtlichen Windsee bei Starkwind nachrangig (NLW, 1989; bei BAW 1996)

*(3) >5.000 Ereignisse (Messzeit 84 Tage)

Tabelle 1: Zusammenstellung von Maximalwerten schiffserzeugter Wellen aus Naturmessprogrammen zur wind- und schiffserzeugter Belastung an der Unter- und Außenelbe aus BAW (1996), ergänzt mit Messungen zwischen 2001 und 2005

Die auch nach 2000 vorgenommenen Naturmessungen bestätigen im wesentlichen die zusammenfassende Abschätzungen von FÜHRBÖTER et al. (1988) zu der Größenordnung und den Charakteristika von Wind- und Schiffswellen auf Basis umfangreicher Naturmessungen entlang der Unterelbe zwischen 1980 bis 1984 (Zitat, FÜHRBÖTER et al., 1988; siehe auch BAW, 1996):



"...

1. Da sich die Schiffswellen umgekehrt proportional zum Querschnittsverhältnis verhalten, verringern sich die Absunkttiefen und Schiffswellenhöhen über den Verlauf der Unterelbe von Hamburg bis Cuxhaven.
2. Die Höhe der Primär- und Sekundärschiffswellen können über den Verlauf der Unterelbe gleiche Größenordnungen annehmen. Dabei nehmen die Primärwellenhöhen (einschl. Absunkttiefe) mit größer werdendem Querschnittsverhältnis ab und die Sekundärwellenhöhen zu.
3. Die Schiffsgeschwindigkeit ist neben dem Querschnittsverhältnis die wichtigste Einflussgröße auf die Größe der Schiffswellen. Dabei ist die Schiffsgeschwindigkeit die einzige Steuergröße, mit der die Höhe der Schiffswellen beeinflusst werden kann.
4. Seewärts von Brunsbüttel sind die Schiffswellen im Vergleich zu den Windwellen hinsichtlich der Höhe und Häufigkeit zu vernachlässigen.
5. Die Wirkung der Primär- und Sekundärwellen hinsichtlich der Ufersicherungen unterscheidet sich erheblich. Die Primärwellen wirken als langperiodische Wasserspiegelschwankungen ($1 < T < 3$ Minuten) über lange Zeiträume ($5 < D < 30$ Minuten). Die Sekundärwellen wirken hingegen als kurzperiodische dynamische Belastungen ($4 < T < 5$ s) auch nur über kurze Zeiträume ($2 < D < 4$ Minuten).
6. Die ausgewerteten Verfahren zur Ermittlung der Absunkttiefen und Schiffswellenhöhen berücksichtigen zwar die wichtigen Einflussgrößen wie Querschnittsverhältnis und Schiffsgeschwindigkeit, können aber für die Verhältnisse an der Unterelbe die variablen Randbedingungen (Passierabstand, Tideeinfluss, Bauart der Schiffe) nicht berücksichtigen.

..."

(Zitat Ende, FÜHRBÖTER et al., 1988)

Bei dieser allgemeinen Betrachtung der Unter- und Außenelbe sind exponiert liegende Lokationen (z.B. Abschnitt Altenbruch) vor allem bei außermittigem Verkehr ausgenommen.

6.2 Statistische Analysen für den Ist-Zustand

Die statistischen Analysen der Schiffspassagen auf der Unter- und Außenelbe beschränken sich auf die verkehrsbezogenen Angaben wie z.B. Schiffsgeschwindigkeit und behandeln die vorhandene Flottenstruktur.

Die Fahrgeschwindigkeiten von Tiefgängern über $t > 10$ m wurden exemplarisch für das Jahr 2002 vom Projektbüro Fahrrinnenanpassung [U 9] abschnittsweise getrennt für Aufkommer und Abgänger ausgewertet. Die Abschnittseinteilung mit entsprechender Kilometrierung lässt sich anhand Bild 6 verfolgen. Somit lassen sich in Tabelle 2 folgende – über den jeweiligen Abschnitt gemittelte - Schiffsgeschwindigkeiten über Grund zusammenstellen:

Alle Schiffe t > 10 m	Aufkommer		Abgänger	
	V _{S,MITT} [kn]	V _{S,MAX} [kn]	V _{S,MITT} [kn]	V _{S,MAX} [kn]
Wedel - Glückstadt (km 642 – 675)	12,3	17,1	12,8	18,9
Glückstadt - Brunsbüttel (km 675 - 698)	13,5	20,7	12,6	21,5
Mittelgrund bis Osteriff (km 705 - 735)	12,7	19,5	14,0	19,7
Nur Containerschiffe t > 10 m	Aufkommer		Abgänger	
	V _{S,MITT} [kn]	V _{S,MAX} [kn]	V _{S,MITT} [kn]	V _{S,MAX} [kn]
Wedel - Glückstadt (km 642 – 675)	12,8	17,1	13,1	18,9
Glückstadt - Brunsbüttel (km 675 - 698)	14,4	20,1	12,8	18,9
Mittelgrund bis Osteriff (km 705 - 735)	13,2	19,5	14,3	19,7

Tabelle 2: Fahrgeschwindigkeiten über Grund von Tiefgängern über t > 10 m für das Jahr 2002 abschnittsweise getrennt für Aufkommer und Abgänger nach [U 9]

Bei der Fahrt von tideabhängig verkehrenden Abgängern wurden für die jüngste Fahrrinnenanpassung für die Bemessung des neuen Tiefenlängsprofils folgende gebietsabhängige minimale und maximale Schiffsgeschwindigkeiten gegen Grund vorausgesetzt:

- Seemannshöft bis Schulau (km 641): $6 \text{ kn} \leq v_s \leq 10 \text{ kn}$
- Hamburger Yachthafen bis Glückstadt (km 675): $8 \text{ kn} \leq v_s \leq 12 \text{ kn}$
- Glückstadt bis Brunsbüttel (km 698): $10 \text{ kn} \leq v_s \leq 14 \text{ kn}$
- Ab Brunsbüttel : $11 \text{ kn} \leq v_s \leq 17 \text{ kn}$

Die für die Bemessung des tideabhängigen Verkehrs gewählten Geschwindigkeitsbereiche der jüngsten Fahrrinnenanpassung decken die gemessenen mittleren Schiffsgeschwindigkeiten der Tiefgänger mit t > 10 m nach den Auswertungen des Projektbüros [U9] im Rahmen der Standardabweichungen ($1,6 \text{ kn} < \sigma_{v_s, \text{MESS}} < 2,8 \text{ kn}$) im wesentlichen ab.

Zur Abschätzung der lokalen Schiffsgeschwindigkeit und des Passierabstands im Nahbereich Wedels erfasste und analysierte die BAW beispielsweise für rund 2 Monate (01.04.05 – 08.06.05) die AIS-Daten (**A**utomatic **I**dentification **S**ystem) annähernd aller pflichtgemäß mit Transpondern ausgestatteten Schiffseinheiten (Bruttoregisterzahl BRZ > 300, etwa > Binnenschiff). Die lokalen Schiffsgeschwindigkeiten wurden in der Querschnitten Anleger Wittenbergen (km 637,9), östliche Einfahrt Hamburger Yachthafen (km 642,5) sowie Anleger Lühe (km 645,2) ermittelt.



Die minimalen, mittleren und maximalen Schiffsgeschwindigkeiten (über Grund) für den Analysezeitraum 01. April 2005 bis 08. Juni 2005 von allen Schiffseinheiten mit Längen über $l > 100$ m (Aufkommer und Abgänger; ohne Personenschnellfähren) betragen:

- Anleger Wittenbergen (km 627,9): $1,0 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 12,0 \text{ kn} < 21,3 \text{ kn}$
- Hamburger Yachthafen (km 642,5): $3,9 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 13,0 \text{ kn} < 19,7 \text{ kn}$
- Anleger Lühe (km 645,2): $5,1 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 13,7 \text{ kn} < 20,1 \text{ kn}$

Werden nur die großen Containerschiffe mit Breiten von $b \geq 32,3$ m ausgewählt, ergeben sich folgende Geschwindigkeitsbereiche über Grund:

- Anleger Wittenbergen (km 627,9): $5,7 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 11,0 \text{ kn} < 15,1 \text{ kn}$
- Hamburger Yachthafen (km 642,5): $4,1 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 11,5 \text{ kn} < 15,9 \text{ kn}$
- Anleger Lühe (km 645,2): $5,1 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 12,4 \text{ kn} < 17,0 \text{ kn}$

Werden nur die großen Containerschiffe mit Breiten von $b \geq 32,3$ m und Tiefgängen $t \geq 13,5$ m ausgewählt, für die die derzeitige Fahrrinne bemessen wurde, ergeben sich folgende Geschwindigkeitsbereiche über Grund:

- Anleger Wittenbergen (km 627,9): $7,1 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 10,2 \text{ kn} < 13,6 \text{ kn}$
- Hamburger Yachthafen (km 642,5): $6,8 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 10,7 \text{ kn} < 13,9 \text{ kn}$
- Anleger Lühe (km 645,2): $8,7 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 12,2 \text{ kn} < 14,3 \text{ kn}$

Bei einer Selektion von Feederschiffen mit Längen bis $l \leq 200$ m wurden folgende Schiffsgeschwindigkeiten über Grund registriert:

- Anleger Wittenbergen (km 627,9): $1,9 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 13,3 \text{ kn} < 21,3 \text{ kn}$
- Hamburger Yachthafen (km 642,5): $5,0 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 14,0 \text{ kn} < 19,3 \text{ kn}$
- Anleger Lühe (km 645,2): $5,3 \text{ kn} < v_{S,MITT} = 13,7 \text{ kn} < 17,9 \text{ kn}$

Die Personenschnellfähren fahren im Mittel mit Geschwindigkeiten über Grund von etwa $v_{S,MITT} \approx 19 \text{ kn}$ (Anleger Wittenbergen, $v_{S,MAX} \approx 27 \text{ kn}$), $v_{S,MITT} \approx 24 \text{ kn}$ (Hamburger Yachthafen, $v_{S,MAX} \approx 37 \text{ kn}$) und $v_{S,MITT} \approx 34 \text{ kn}$ (Anleger Lühe, $v_{S,MAX} \approx 39 \text{ kn}$).

Die Klassifizierung der Schiffspassagen in PANMAX- und POST-PANMAX-Containerschiffe sowie in Feeder-Schiffe verdeutlicht, dass die höchsten Geschwindigkeiten über Grund nicht von den großen Containerschiffen, sondern vom Feederverkehr gefahren werden.

Die folgende Tabelle 3 fasst die o.a. statistischen Betrachtungen für große Containerschiffe ($b \geq 32,3$ m, ca. 470 Passagen) im Nahbereich des Yachthafens Hamburg zusammen und stellt die maximalen heutigen Bemessungsgeschwindigkeiten über Grund den gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten über Grund (mittlere und maximale) gegenüber.

	Bemessung	AIS-Messung		Standardabw.
	max. $v_{S,BEMESS}$ [kn]	mitt. $v_{S,MITT}$ [kn]	max. $v_{S,MAX}$ [kn]	$\sigma_{v_{S,AIS}}$ [kn]
bis km 641	10			
km 627,9		11,0	15,1	1,8
ab km 641	12			
km 642,5		11,5	15,9	1,7
km 645,2		12,4	17,0	1,8

Tabelle 3: Vergleich der heutigen Bemessungsgeschwindigkeit über Grund mit AIS-Messungen im Bereich Wittenbergen, Hamburger Yachthafen und Lühemündung (große Containerschiffe $b \geq 32,3$ m, 01.04.05 – 08.06.05)

Die maximalen Fahrgeschwindigkeiten über Grund zwischen km 627 und km 645 bei Fahrzeugen mit $b \geq 32,3$ m liegen deutlich über den Geschwindigkeitsbereichen, die vom TDV für die Bemessung der heutigen Fahrrinnentiefe gewählt wurden. Die vom TDV angesetzten maximalen Geschwindigkeitsgrenzen decken annähernd die mittleren gemessenen Fahrgeschwindigkeiten von PM- und PPM-Containerschiffen ab.

Die Tabelle 4 fasst die o.a. statistischen Betrachtungen für tideabhängig verkehrende große Containerschiffe ($b \geq 32,3$ m und $t > 13,5$ m, ca. 14 Passagen) im Nahbereich des Yachthafens Hamburg zusammen und stellt die maximalen heutigen Bemessungsgeschwindigkeiten über Grund den gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten über Grund (mittlere und maximale) gegenüber. Werden tideabhängig verkehrende, tiefgehende PPM-Containerschiffe ($b \geq 32,3$ m und $t \geq 13,5$ m) selektiert (Tabelle 4), decken die für die heutige Fahrrinnenbemessung angesetzten maximalen Geschwindigkeitsbereiche in etwa die mittleren gemessenen Fahrgeschwindigkeiten ab. Die maximalen Schiffsgeschwindigkeiten über Grund der tiefgehenden, tideabhängigen PPM-Containerschiffe liegen deutlich über den heutigen Bemessungsgeschwindigkeiten.

	Bemessung	AIS-Messung		Standardabw.
	max. $v_{S,BEMESS}$ [kn]	mitt. $v_{S,MITT}$ [kn]	max. $v_{S,MAX}$ [kn]	$\sigma_{v_{S,AIS}}$ [kn]
bis km 641	10			
km 627,9		10,2	13,6	2,0
ab km 641	12			
km 642,5		10,7	13,9	1,8
km 645,2		12,2	14,3	1,6

Tabelle 4: Vergleich der heutigen Bemessungsgeschwindigkeit über Grund mit AIS-Messungen im Bereich Wittenbergen, Hamburger Yachthafen und Lühemündung (PPM-Containerschiffe $b \geq 32,3$ m und $t \geq 13,5$ m, 01.04.05 – 08.06.05)



Zusätzlich zu den Auswertungen für die Einzelpositionen Anleger Wittenbergen, Hamburger Yachthafen und Anleger Lühe (Empfangsstation Hamburg-Rissen der BAW-DH) wurde eine Analyse der AIS-Daten entlang der gesamten Unter- und Außenelbe vorgenommen. Die Daten wurden von den AIS-Empfangsstationen in Hamburg-Rissen (querab ca. km 639) und am Oberfeuer Altenbruch (querab ca. km 722) erfasst und deckten die Elbe vom Hamburger Hafen (ca. km 620) bis über Großer Vogelsand (ca. km 745) hinaus incl. eines Überlappungsbereichs ab.

Beispielhaft für den Analysezeitraum vom 01.01.2006 bis 30.04.2006 wurden die Positionsmeldungen und Schiffsgeschwindigkeiten über Grund von tiefgehenden PM- und PPM-Fahrzeugen für tideabhängigen ($t > 12,8$ m) und tideunabhängigen ($10 \text{ m} \leq t \leq 12,8$ m) Verkehr selektiert und in Bild 7 zusammengestellt. Durch die Eingrenzung der Schiffsbreiten zwischen $32 \text{ m} \leq b \leq 43 \text{ m}$ wurden im wesentlichen große Containerschiffe, aber auch vereinzelt Massengutschiffe erfasst.

Die Positionsdaten der selektierten Schiffe im GAUSS-KRÜGER-Koordinatensystem (GKK, 3. Streifen; Bild 7, unten) zeigen als Umhüllende die Fahrrinne der Elbe. Die Grafik ist ergänzt mit den Empfangsstationen und weiteren Ortsangaben. Wird eine Position auf der Elbe auf die darüber liegenden Grafiken vertikal projiziert, verdeutlicht die Umhüllende der AIS-SOG¹-Signale das Geschwindigkeitsband über Grund entlang der Elbe für die selektierten tideabhängig (Bild 7 oben; ca. 130 Schiffe) bzw. tide-unabhängig verkehrenden Schiffsklassen (Bild 7 mittig; ca. 850 Schiffe).

Die lokalen maximalen und minimalen Geschwindigkeiten über Grund dieser Klassen lassen sich damit entlang der Elbe ablesen, Geschwindigkeitsminima sind u.a dem Lotsenwechsel vor Brunsbüttel zuzuordnen (GKK, Rechtswert ca. 3 510 000). Schiffsgeschwindigkeiten von $v_{s,MAX} > 20$ kn ü.G. sind für tideunabhängigen Verkehr ($10 \text{ m} \leq t \leq 12,8$ m) stromab von Stade (ca. km 655; GKK Rechtswert ca. 3 533 000) keine Seltenheit.

Die Maximalwerte der AIS-Geschwindigkeitsanalyse von 2006 liegen teilweise deutlich über den Werten von 2002 (nach [U9]), da sie als augenblickliche, satellitengestützte und nicht über räumliche Abschnitte gemittelte Schiffsgeschwindigkeiten wie in [U9] erfasst wurden.

Auf Basis der in diesem Kapitel analysierten Schiffsgeschwindigkeiten kann abgeleitet werden, dass schon heute bei der Überschreitung der Bemessungsgeschwindigkeiten auch durch große, tiefgehende Containerschiffe hohe schiffserzeugte Belastungen entlang der Unter- und Außenelbe auftreten müssen, wie sie anhand von Messungen in der Natur belegt werden können (u.a. INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, 2006; vergl. Tabelle 1).

¹ SOG : **s**peed **o**ver **g**round = Geschwindigkeit über Grund

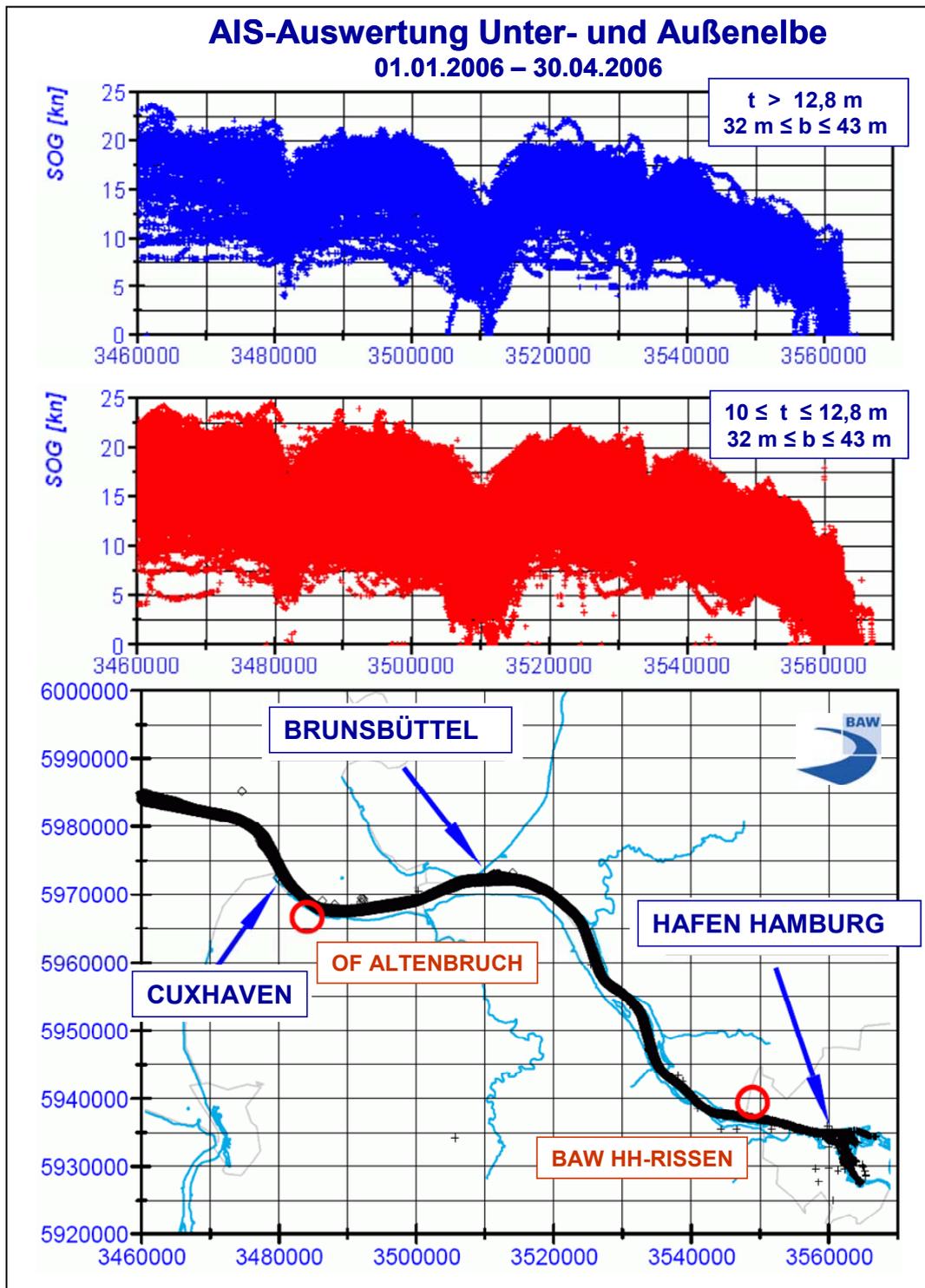


Bild 7: Geschwindigkeitsband entlang der Unter- und Außenelbe von tideabhängigem ($32 \text{ m} \leq b \leq 43 \text{ m}$, $t > 12,8 \text{ m}$; blau) und tideunabhängigem ($32 \text{ m} \leq b \leq 43 \text{ m}$, $10 \text{ m} \leq t \leq 12,8 \text{ m}$; rot) Verkehr (Auswertung 01.01.2006 – 30.04.2006)



6.3 Bewertung der Prognosen zur jüngsten Fahrrinnenanpassung

Das Gutachten der BAW zu den ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen der Unter- und Außenelbe zur jüngsten Fahrrinnenanpassung, die 1999 abgeschlossen wurde (BAW, 1996) kam u.a. zu folgenden Schlussfolgerungen:

„Wie schon im IST-Zustand werden auch im AUSBAU-Zustand bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten ($v_S > 12$ kn) bereichsweise überproportional erhöhte schiffserzeugte Belastungen auftreten.

Als Maß für ausbaubedingte, tiefgangsabhängige Änderungen der lokalen schiffserzeugten Belastung ist in erster Linie der geschwindigkeitsabhängige Energieeintrag durch das Schiff zu bewerten.

Die vom TDV für die Tiefenlängsprofilbemessung angesetzten bereichsabhängigen maximalen Schiffsgeschwindigkeiten gegen Wasser werden hinsichtlich der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung als unkritisch angesehen. Örtlich sind bei Schiffsgeschwindigkeiten deutlich über $v_S \approx 12$ kn (z.B. oberhalb der Ostermündung bei Aufkommern; etwa km 705 bis km 708) Zunahmen der Belastungen zu erwarten.“

Zitat: BAW, 1996

Die Prognosen der BAW hinsichtlich einer zu erwartenden höheren schiffserzeugten Belastung der Wasserstraße bei Schiffsgeschwindigkeiten von deutlich über $v_S \approx 12$ kn werden u.a. anhand der Messungen in der Natur bestätigt.

6.4 Beschreibung des Ist-Zustands und Wirkungsmechanismen

6.4.1 Charakteristische Belastungsbereiche

Zur Beschreibung des Ist-Zustands der schiffserzeugten Belastungen der Unter- und Außenelbe kann auf die vorgestellten Naturmessungen zurückgegriffen werden. Auf Basis der Systembeschreibungen von FÜHRBÖTER et al. (1988; siehe auch BAW, 1996) lässt sich durch Einbeziehung der jüngeren Naturmessungen und der statistischen Analysen eine Übersicht der auftretenden Belastungen im Ist-Zustand erstellen.

Nach FÜHRBÖTER et al. (1988) hat sich eine Unterteilung der Unter- und Außenelbe nach Bereichen wirksam werdender Schiffswellenbelastung auf Basis obiger Untersuchungen als sinnvoll erwiesen:

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

Diese Bereiche sind in einer Karte der Unter- und Außenelbe (Bild 8) gekennzeichnet.

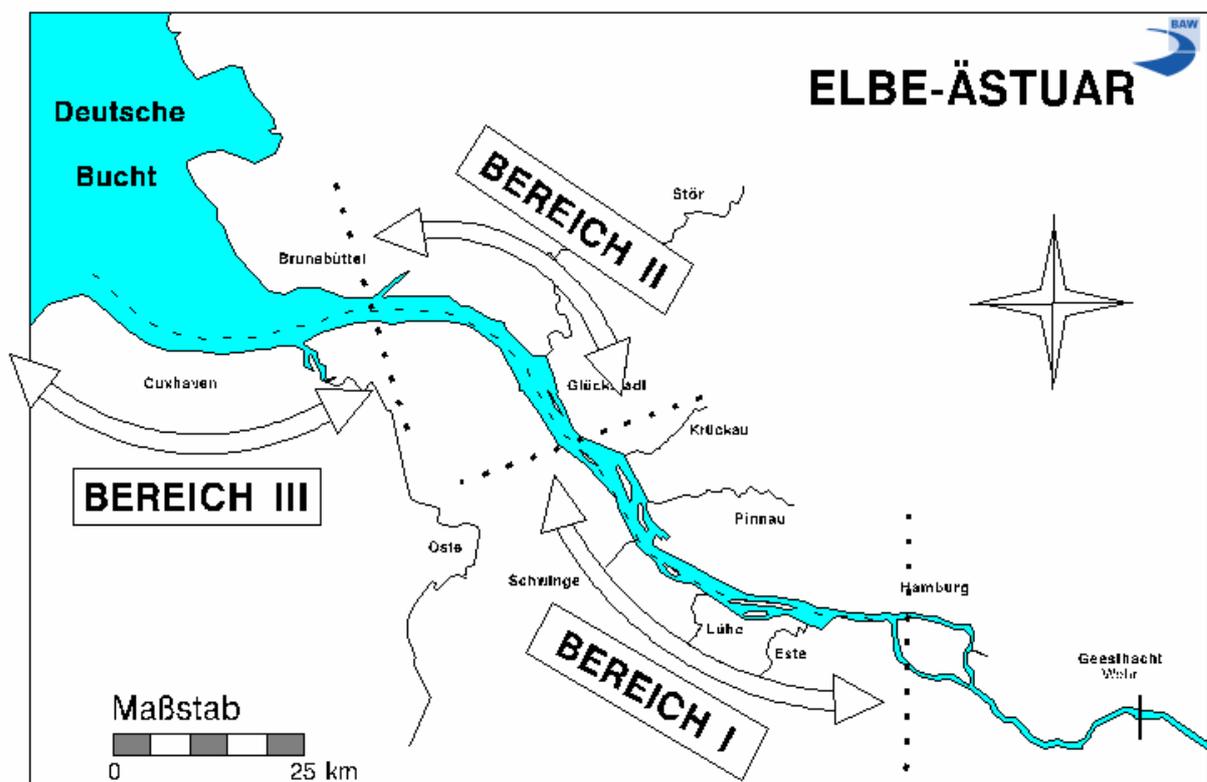


Bild 8: Unterteilung des Untersuchungsgebiets Unter- und Außenelbe in Hinblick auf schiffserzeugte Belastungen (nach FÜHRBÖTER et al., 1988; BAW, 1996)

Zur Verdeutlichung der Belastungsänderungen entlang der Unter- und Außenelbe wurden die Querschnittsverhältnisse n für u.a. heute verkehrende große POST-PANMAX-Containerschiffe (CMS BERLIN EXPRESS am 01.02.2004, Länge $l = 320,4$ m, Breite $b = 42,8$ m, aktueller mittlerer Tiefgang $t_m = 12,6$ m sowie CMS MING COSMOS am 22.02.2004, $l = 280$ m, $b = 40,0$ m, $t_m = 13,2$ m) bei tideabhängiger Fahrt ermittelt (Bild 9). Die berechneten n -Verhältnisse basierten auf der Unterwassertopographie von 2001 und der Verkehrssicherungspeilung der Fahrrinne vom Januar 2004.

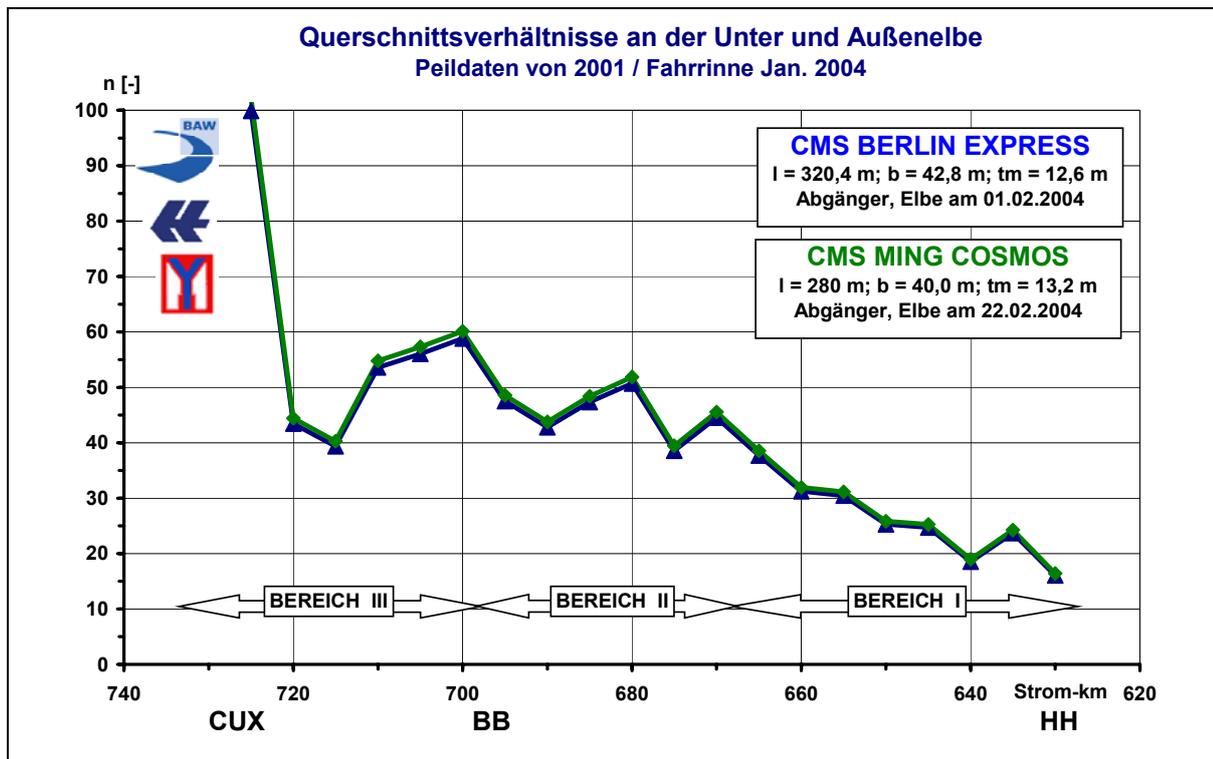


Bild 9: Querschnittsverhältnisse in Unter- und Außenelbe für die Passage zweier großer POST-PANMAX-Containerschiffe bei tideabhängiger Fahrt vom Januar 2004

Bereich I

Im Bereich Hamburger Hafen bis etwa Schwarztonnensand (km 620 – km 666) können die langperiodischen Belastungen (Absunk und Primärwelle) in Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit zumindest gleiche Größenordnungen wie die kurzperiodische Sekundärwellen erreichen. FÜHRBÖTER et al. (1988) rechnet diesen Abschnitt zum tiefen- und seitenbegrenzten Fahrwasser (Kanalfahrt). Für die o.a. tideabhängig fahrenden POST-PANMAX-Containerschiffe wurden die Querschnittsverhältnisse zu $15 < n < 35$ berechnet (Bild 9).

Für Bereich I sind im Ist-Zustand bei Passagen der Handelsschiffahrt im Allgemeinen langperiodische Belastungen zwischen $z_A \approx H_P \approx 0,5$ m bis 1,1 m sowie kurzperiodische Wellen bis $H_S \approx 1,0$ m zu erwarten (vergl. Tabelle 1).



Bereich II

Im Bereich II von etwa Schwarztonnensand bis Brunsbüttel (km 666 bis km 698) nimmt der Querschnitt der Elbe deutlich zu, so dass die Verhältniszahl n für die o.a. POST-PANMAX-Schiffe Werte zwischen $40 < n < 60$ erreicht (Bild 9). Eine eindeutige Dominanz einer Belastungsart ist nicht mehr festzustellen. Für große Containerschiffe ist dieser Unterelbeabschnitt nach FÜHRBÖTER et al. (1988) dem Übergangsbereich zum seitlich unbeschränkten Fahrwasser (Flachwasser) zuzuordnen. Für heutige große, tiefgehende PPM-Containerschiffe gelten aufgrund der im Querschnitt teils ausgeprägten Fahrrinne allerdings noch annähernd „Kanalbedingungen“ wie im Bereich I.

In der *Fahrrinne* werden in erster Linie die Sohle und die Rinnenböschungen durch die Rückströmung sowie die Druckverteilung am Schiff belastet. Die Belastung der Rinnenränder ist entsprechend geringer, wenn der hydraulisch wirksame Unterschied zwischen Rinne und natürlicher Topographie weniger erkennbar ist. Die Sohlbelastung unter den tideabhängig verkehrenden großen Schiffseinheiten bleibt – wie im Bereich I – wegen der weiterhin geringen Kieflfreiheit hoch.

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 maßgebend wird.

Die langperiodischen Absunk- und Primärwellenbelastungen im Bereich II können im Maximum bis zu $z_A \approx 1,2$ m bzw. $H_P \approx 1,4$ m erreichen, somit etwa in der gleichen Größenordnung wie die kurzperiodischen Belastungen $H_S \approx 1,1$ m liegen (z.B. km 683, Messungen bei Hollerwettern; Tabelle 1).

Bereich III

Ab Brunsbüttel (ab km 698) weitet sich der Fahrwasserquerschnitt teilweise auf. Eine generelle Zuordnung von Schiffspassage und Wellenereignis ist nur bedingt möglich, da schon bei „Normalwetterlagen“ schiffserzeugte Belastungen durch das "Rauschen" der Windwellenereignisse überlagert werden können. Extreme Einzelereignisse sind dagegen im kurzperiodischen Wellenspektrum erfassbar. Die n -Verhältnisse für die Passagen der o.a. POST-PANMAX-Containerschiffe berechnen sich auf Werte über $n = 50$ (Bild 9), gehen aber auf Höhe Medemgrund (km 713 – km 720) noch einmal zurück auf $n \approx 40$.

Im Bereich III werden langperiodische Belastungen bei größeren Passierabständen zum Ufer im Allgemeinen vernachlässigbar sein, wobei aufgrund der höheren Schiffsgeschwindigkeiten kurzperiodische Wellenamplituden von etwa $H_S < 1,0$ m auftreten können.

Lokal begrenzte höhere Einzelereignisse sind zwischen Osteriff und Altenbruch (km 705 – km 722) möglich, da hier u.a. der geringe Passierabstand zum südlichen Ufer der Elbe wirk-



sam wird. Hier sind derzeit z.B. vor Altenbruch lang- und kurzperiodische Belastungen bis zu $z_A \approx H_P \approx 0,5$ m bzw. $H_S \approx 1,4$ m zu erwarten (Messungen Altenbruch, BAW, 2006a).

Bei den zugrunde gelegten Randbedingungen sind für heute verkehrende POST-PANMAX-Containerschiffe seitlich unbeschränkte Flachwasserbedingungen erst seewärts des Untersuchungsgebiets bei Querschnittsverhältnissen von $n > 100$ zu erwarten, so dass bis etwa seewärts von Scharhorn von einer Wechselwirkung zwischen den großen Seeschiffen und den seitlichen Fahrwasserbegrenzungen (z.B. Leitwerke, Sände) auszugehen ist.

6.4.2 Deckwerke und Deiche

Deckwerke und scharliegende Deichfüße an Seeschiffahrtsstraßen (Neigung etwa 1:2 bis 1:4) können zum einen durch schiffserzeugte kurzperiodische, brechende Sekundärwellen ($T \approx 4$ s), zum anderen durch einen Porenwasserüberdruck im Deckwerks- oder Deichfußkörper beim langperiodischen Absink ($T \approx 1$ bis 3 min) belastet werden. Sind einerseits u.a. Druckschlag und hohe Turbulenz maßgebend, ist andererseits die Ufersicherung durch Abheben oder Abgleiten, ggf. durch das Ausspülen von Feinmaterial, gefährdet.

Schiffserzeugte Schwingungen im Wasser- und Bodenkörper u.a. aus Motorvibration, Propellerumdrehung oder brechenden Sekundärwellen und deren Wirkung auf Deckwerke und Deiche sind gegenüber Verkehrslasten durch Fußgänger oder Landfahrzeuge von deutlich untergeordneter Bedeutung (IMS, 2004; BAW, 2006a).

Bei erhöhten Wasserständen am Deich (z.B. Sturmfluten) sind schiffserzeugte Belastungen wegen des dann für die Schiffe deutlich höheren Querschnittsverhältnisses nachrangig gegenüber ohnedies wirkenden Wasserstands- und Windwellenbelastungen.

6.4.3 Wattgebiete und natürliche Ufer

Die Neigung von natürlichen, unbefestigten Ufern hängt im wesentlichen von dem anstehenden Bodenmaterial ab und kann je nach Korngröße und Kornzusammensetzung bei wellenbelasteten Stränden Werte zwischen 1:5 (Grobsand) bis 1:100 (Feinsand) und flacher erreichen. Die schiffserzeugte Belastung flacher natürlicher Ufer ist abhängig von der Böschungsneigung und geprägt durch das Brechen der Wellen, den Wellenauflauf und Wellenablauf, wobei die kurzperiodischen Sekundärwellen ihre Energie als Sturzbrecher in begrenzten - wasserstandsabhängigen - "Streifen" mit hoher Turbulenz abgeben, die langperiodischen Primärwellen z.B. als Reflexionsbrecher oder - in Abhängigkeit des Wasserstands - als Schwallbrecher die Energie über eine breite Uferzone auf dem Vorstrand über Strömungsenergie umwandeln. Während des Absinkvorgangs kann der momentane Porenwasserüberdruck im Boden zur "Auflockerung" des sohnah anstehenden (rolligen, kurzzeitig



spannungsfrei gelagerten) Materials führen, so dass der sohlnahe Sedimenttransport infolge der zeitgleichen Verdrängungsströmung zusätzlich begünstigt wird. Diese "bodendynamischen" Vorgänge sind sowohl an Uferböschungen als auch im Sohlbereich feststellbar.

Auf den noch flacheren Wattgebieten ist in erster Linie - abhängig vom Tidewasserstand - bei *größerer Überdeckungshöhe* (z.B. Thw) der Auf- und Ablaufschwall der langperiodischen Schiffswellen (Strömungsbelastung) maßgebend. Zur Verdeutlichung der absinkbedingten Vorgänge auf Wattgebieten wurden von der BAW 1995 die schiffserzeugten Vorgänge im hydraulischen Modell untersucht und die oberflächennahe Strömung zur Zeit der Passage eines PANMAX-Containerschiffs visualisiert (BAW, 1996). Während Richtung und Weg nur in geringem Maße von der Wassertiefe abhingen, war der Betrag der Geschwindigkeit eng mit dem aktuellen Wasserstand, d.h. bei der Passage des Schiffes mit dem momentan erzeugten Wasserspiegelgefälle, verknüpft. Die Sekundärwellen wandeln ihre Energie u.a. als Schaumkronenbrecher durch Turbulenzeintrag in den Wasserkörper um.

Bei nur *geringer Überdeckung* des Watts brechen die kurzperiodischen Wellen im Bereich der Wattkante. Je nach Tidewasserstand, Schiffsgröße, Schiffsgeschwindigkeit und u.a.m. kann das Wasser während des Absunks bis zum Trockenfallen des gesamten Wattgebiets abströmen. Nach Passage des Schiffes läuft die Heckwelle je nach Neigung des Unterwasserstrands bei entsprechend hohen Energieumwandlungsprozessen als Sturz- oder Reflexionsbrecher auf das Watt auf. Die kurzperiodischen Sekundärwellen können in Abhängigkeit des Passierabstands die lange Primärwelle überlagern und dem Wellenbrechen weitere Energie zuführen.

Bei *Wasserständen unterhalb des Wattniveaus* wird die Watt- bzw. Fahrrinnenkante durch schiffserzeugte Wellen und Rückstromgeschwindigkeiten in gleicher Weise wie steilere natürliche Ufer belastet (BAW, 1996).

Flache Buhnenfelder mit Niveauhöhen um Tidehalbwasser unterliegen gleichen Belastungen wie Wattflächen, wobei zusätzlich die Reflexionseigenschaften der Buhnenkörper das Maß von Überlagerungseffekten bestimmen.

6.4.4 Bauliche Anlagen

Unter baulichen Anlagen sind in der Unter- und Außenelbe im Wesentlichen feste Anleger und Kaianlagen, Siele und Sturmflutsperrwerke sowie angeschlossene Hafenbecken zu verstehen.

Feste Anleger und Kaianlagen mit senkrechten Unterwasseranlagen sind wie senkrechte Wellenbrecher hinsichtlich ihrer Belastung in Abhängigkeit der Wellenhöhe und Wellenperiode zu betrachten. Die ankommende Welle wird nahezu vollständig reflektiert. Die Orbital-



strömung der reflektierten Welle kann zu Erosion am Fußpunkt der Anlagen führen, soweit nicht der Schraubenstrahl beim An- und Ablegen der Schiffe für die Standfestigkeit der Anlagen maßgebend ist. Ist der Unterwasserbereich in geböschter oder aufgelöster und geböschter Bauweise (z.B. Wellenkammern) erstellt, sind als schiffserzeugte Belastungen Werte wie für Deckwerke (s.o.) anzunehmen.

Große schwimmende Anleger und Pontons werden in ihren Führungselementen im wesentlichen durch schiffserzeugte langperiodische Wellen sowie die Verdrängungsströmung belastet. Der Grad der Belastung ist u.a. abhängig vom Abstand und der Lage zur Fahrrinne und entspricht in etwa der schiffserzeugten Belastung vertäuter Schiffe an Kaianlagen. Die Befestigungselemente von kleineren schwimmenden Anlegern (z.B. in Sportboothäfen) können als Funktion von Pontonlänge zu Wellenlänge auch von kurzperiodischen Sekundärwellen belastet werden, insoweit die konstruktive Gestaltung der Hafenzufahrt oder die hafeninterne Ufergestaltung eine entsprechende Wellenunruhe zulassen.

Bei der Belastungsermittlung von Vertäuungssystemen von an Kaianlagen liegenden großen Schiffseinheiten gehen deren "Angriffsfläche" und der Hauptspantquerschnitt des Vorbeifahrers etwa linear in Berechnungsansätze ein. Die Passiergeschwindigkeit ist etwa quadratisch, der Passierabstand als Funktion höherer Potenz anzusetzen (HAFFKE, 1986). Diese Aussagen betreffen Kanalfahrtbedingungen mit Passierabständen von im Mittel 100 m zum Liegeplatz. Es ist davon auszugehen, dass für vertäute große Schiffe kurzperiodische Belastungen durch Sekundärwellen aufgrund ihrer Eigenfrequenz nicht wirksam werden, dagegen schiffserzeugte langperiodische Anteile in Abhängigkeit beider Schiffslängen (Festlieger und Vorbeifahrer) auf die Trossen wirken. Die Trossenkräfte sind wiederum abhängig von der Amplitude des Absunks.

Auf die mechanisch beweglichen Anlagen von Entwässerungsbauwerken (Sielen) und Sturmflutsperrwerken wirkt die instationäre Wasserdruckdifferenz infolge Bugstau, Absunk und Primärwelle, also die langperiodischen Wasserspiegelschwankungen, sowie die durch das Wasserspiegelgefälle einsetzende Strömung in Bauwerksachse. Ein Problem stellt das Schlagen von Sieltoren und von nicht exakt fixierten Sperrtoren dar (vergl. KUNZ, 1977a). Die Belastungen der Anlagen sind abhängig von den Binnen- und Außenwasserständen sowie von der Amplitude der langperiodischen schiffserzeugten Wasserspiegeländerungen. Die Wirkzusammenhänge beschreibt KUNZ (1977a) wie folgt (Auszug):

*„Beim Schlagen der Sieltore muß unterschieden werden zwischen den Zuständen „Tor zu“ und „Tor auf“. ...
... Für das Torschlagen sind die Zeiträume bei nahezu ausgeglichenen Binnen- und Außenwasserständen besonders kritisch, da weder große statische oder kinematische Kräfte einer Bewegung des Sieltores entgegenwirken. ...*



... Beim Zuschlagen der Sieltore wirkt zunächst am geöffneten Tor nur ein Strömungsdruck infolge der von außen nach innen gerichteten Strömung. Mit zunehmender Verkleinerung des Öffnungswinkels entsteht ein Aufstau vor dem Sieltor; die Angriffsfläche für den kinetischen als auch für den statischen Kraftanteil vergrößert sich. Ab einer bestimmten Stellung (...) des Tores nimmt der auf das Tor wirkende Strömungsdruck mit sich weiter schließendem Tor ab; der statische Kraftanteil hingegen erhöht sich zunehmend. Wird unterstellt, dass die Schwallwelle ihren Höchstwert nicht vor dem Zuschlagen des Tores erreicht hat, so weisen die am Tor wirkenden Kräfte ihr Maximum zum Zeitpunkt des Torzuschlagens auf. Das Tor schlägt mit voller Geschwindigkeit an.“

(aus KUNZ, 1977a; Zitat Ende)

Neuere Untersuchungen zur schiffserzeugten Belastung von Sieltoren aufgrund der heutigen, optimierten Unterwasserschiffsformen von Massengut- und Containerschiffen sowie infolge der heute üblichen Schiffsgeschwindigkeiten wurden sowohl für die Unterweser (Siel Käseburg) als auch die Unterelbe (Deichsiel Hollerwettern) vorgenommen.

Die abschließenden Auswertungen der Belastung der Stemmtore am Siel Käseburg (Unterweser) weisen darauf hin, dass vor allem schnell fahrende General Cargo-Schiffe ($v_{S,ÜG} \approx 12$ kn) mit Längen um rund $l \approx 200$ m ($b \approx 30$ m, $7 \text{ m} < t < 9$ m) vor dem Sielbauwerk hohe langperiodische Wellen bis zu $H_P \approx 1,2$ m mit maximalen Torkantenbeschleunigungen bis etwa $a \approx 0,7 \text{ m/s}^2$ verursachen (Winkelbeschleunigung etwa $-15^\circ/\text{s}^2$; Butterworthfilter 4. Ordnung, Grenzfrequenz $f_{GR} = 0,2$ Hz). Infolge geschlossener Hubtore zur Wasserhaltung in den Sieltiefs bei geringem Niederschlag treten über sehr lange Zeiträume die von KUNZ (1977a) beschriebenen labilen Bedingungen mit ausgeglichenem Wasserstand beidseits der Stemmtore auf, was entsprechend eine deutliche Zunahme der Häufigkeit des Schlagens der Sieltore zur Folge hat. Sieltorbelastungen durch das voll abgeladene Bemessungsschiff des 9m-Ausbaus (Unterweser bis Bremen: Massengutschiff, $l = 185$ m, $b = 32,3$ m, $t = 10,7$ m, $n_{MThw} \approx 18$) traten nicht auf (IMS, 2006).

Die Messungen am Deichsiel Hollerwettern verzeichneten nach ersten Auswertungen direkt vor dem Deichsiel maximale langperiodische Wellenbelastungen bis zu $H_P = 2,6$ m überwiegend infolge von Passagen großer Schiffe (PPM-Containerschiffe) bei hohen Fahrgeschwindigkeiten (bis $v_{S,ÜG} = 21$ kn). Gemessen wurden maximale Torkantenbeschleunigungen von $a \approx 3,5 \text{ m/s}^2$ (Winkelbeschleunigung etwa $-110^\circ/\text{s}^2$; gleitendes Mittel $\pm 0,05$ s). Beim Einsatz gleicher Filterkriterien an Unterweser und Unterelbe ergab sich am Deichsiel Hollerwettern eine vergleichbare maximale Torkantenbeschleunigung von $a \approx 1,2 \text{ m/s}^2$ (Winkelbeschleunigung etwa $-28,5^\circ/\text{s}^2$; INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, 2006). Die unterschiedlichen Belastungen der Siele an Weser und Elbe ergeben sich - aufgrund der ungleichen Schiffsgrößen und Schiffsgeschwindigkeiten - aus den verschiedenen Wellenhöhen sowie dem zeitlichen Ablauf der Absunk- und Primärwelle.



Bei an Wasserstraßen angeschlossenen Hafenbecken wirken die kurzperiodischen Sekundärwellen wie winderzeugter Seegang, der sich entsprechend den Wellenausbreitungs- und -umformungsprozessen (Diffraktion, Reflexion u.a.) verhält und dessen Amplitude im Hafenbecken durch dessen konstruktive Ausbildung beeinflusst wird. Einen wesentlichen Einfluss auf die Wellenamplituden der langperiodischen Anteile der Schiffswellen in den Hafenbecken (oder auch Sielaußentiefs) haben die Beckengröße, die Öffnungsbreite und die Beckenform (KUNZ, 1977b). Die in der Wasserstraße erzeugte Ausgangswellenhöhe wirkt sich in der Hafenanlage nach KUNZ (1977b) geringer aus bei größeren Becken, bei deutlich kleineren Öffnungsbreiten sowie bei einer breiteren Beckenform gegenüber langgestreckten Becken. Ungünstige Bedingungen zum Beispiel in langgestreckten Außentiefs können wiederum zu vergrößerten Schiffswellen an den Sieltoren führen (KUNZ, 1977b).

Das Resonanzverhalten von langperiodischen schiffserzeugten Wellen analysierte FITTSCHEN (INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, 2002) an einem Beispiel im Hamburger Yachthafen (km 643) im Vergleich zur Unterelbe bei Hetlingen (km 650,6). Während in der Unterelbe eine Halbierung der Primärwellenschwingungen bereits nach 10 bis 12 Minuten gemessen wurde, reduziert sich die durch die Zufahrt eintretende langperiodische Schiffswelle infolge hafeninterner Resonanz im Yachthafen erst nach etwa 30 Minuten um etwa 50 % (Resonanzperiode der Tagesmaxima ca. 120 Sekunden).

Bauliche Anlagen wie Leitdämme und Buhnen sind in ihrer Belastung wie Deckwerke (siehe Kapitel 6.3.2) zu betrachten.

6.4.5 Sport- und Kleinschiffahrt

Das Maß der Beeinflussung der Sicherheit und Leichtigkeit der Sport- und Kleinschiffahrt durch Passagen großer Schiffseinheiten ergibt sich im wesentlichen aus dem Passierabstand und dem Verhältnis der Länge der Schiffswellen zur Länge der Sportschiffe oder der kleinen Fahrzeuge (z.B. Fischereifahrzeuge).

Die kurzperiodischen Sekundärwellen beeinflussen eher die Sportschiffahrt und kurze Fahrzeuge (u.a. Rollen, Stampfen). Hohe Sekundärwellen ($H_s > 0,5$ m), die zudem bei einer Ausbreitung gegen die Strömung aufgestellt werden, sind dadurch noch "störender" für Kleinfahrzeuge von 5 m bis 10 m Länge. Die langperiodischen Wasserspiegeländerungen wirken sich mehr bei Fahrzeugen wie z.B. Binnenschiffen (u.a. Querkomponente der Verdrängungsströmung) aus.

Als ein weiterer Parameter für den Grad der Beeinflussung ist in Zusammenhang mit der Amplitude des Absunks die reduzierte Kielfreiheit der außerhalb der Fahrrinne verkehrenden



Sport- und Kleinschiffahrt und deren durch die geringere Kielfreiheit möglicherweise beeinträchtigte Manövrierbarkeit zu berücksichtigen.

Die schiffserzeugte Rückstromgeschwindigkeit im Nahbereich von z.B. großen Containerschiffen ist bei Schiffsbegegnung für jede Art kleiner Fahrzeuge als Beeinträchtigung der Navigationsfähigkeit (plötzliche Reduzierung der Fahrt durchs Wasser, Sogeffekt) zu werten.

Des Weiteren werden durch die schiffserzeugte Rückströmung kurzzeitig die Ankerkräfte von z.B. Fischereifahrzeugen (Hamenkutter) oder Schiffen auf Reede erhöht.

6.4.6 Marinearchäologische Kulturgüter

Sind im Bereich der Unter- und Außenelbe marinearchäologische Kulturgüter vorhanden, sind diese im wesentlichen durch die schiffserzeugten langperiodischen Belastungen (Absenk, Primärwelle, Verdrängungsströmung) betroffen. In flacheren Seitenbereichen des Ästuars können auch kurzperiodische Sekundärwellen durch ihre Orbitalströmung wirksam werden. Das Maß der Belastung ist u.a. abhängig vom Abstand zur Fahrrinne und von der Schiffsgeschwindigkeit des Durchgangsverkehrs.

6.4.7 Fahrrinne und Unterwasserböschungen

Die tiefe Fahrrinne eines Ästuars wird maßgeblich durch die schiffserzeugte Rückstromgeschwindigkeit belastet, die bei der Passage großer Schiffseinheiten bei mittlerem Wasserstand, n -Verhältnissen von $20 < n < 30$ (vergl. Bild 9), an den Fahrrinnenrändern Werte bis etwa $v_R = 2$ m/s (bei $v_S \approx 15$ kn) erreichen kann. Die maximale Tidenströmung beträgt, z.B. vor der Lühemündung, etwa $v_{f,MAX} \approx 1,5$ m/s (etwa 2 h nach T_{nw} ; BAW, 1996).

Ein Containerschiff der IV. Generation (PANMAX mit $t = 12,8$ m) bewirkt derzeit bei Lühe beispielsweise als Abgänger gegen die Tidewelle und einer Schiffsgeschwindigkeit von etwa $v_S = 15$ kn gegen Wasser (etwa $v_S = 12$ kn ü. Grund) durch die Überlagerung beider Effekte ($v_f \sim 1,5$ m/s + $v_R \sim 1,5$ m/s) maximale Strömungsgeschwindigkeiten bis zu $v = 3$ m/s an der nordöstlichen Fahrrinnenböschung (BAW, 1996).

Die Auswirkungen der vertikalen Verteilung der Verdrängungsströmung zwischen Seeschiff und Sohle, des Schraubenstrahls und des Nachstromfelds hinsichtlich der Transportprozesse in der Fahrrinne wird aufgrund von Erfahrungen anhand von Naturmessungen am Nord-Ostseekanal (NOK) auf der Basis von 78 Einzelmessungen (BAW, 1999) wie folgt beurteilt:

- Die Beschleunigung und Verzögerung der vom Schiff verdrängten Wassermassen erfolgt nahezu gleichmäßig über die Vertikale zwischen Schiff und Sohle.



- Zur Ermittlung von Transportkapazitäten ist bei einem geringeren Wassertiefen-Tiefgangsverhältnis von etwa $h/t < 1,8$ von einem annähernd vertikal homogenen Rückstromgeschwindigkeitsfeld zwischen Schiff und Sohle auszugehen.
- Aussagen hinsichtlich der instationären zeitabhängigen Turbulenzentwicklung und deren vertikale Verteilung sowie deren Auswirkungen auf die vertikale Sedimentkonzentration sind aus den bisherigen Messungen u.a. wegen der verwendeten Erfassungsfrequenz nicht abzuleiten.
- Bei der Fahrt eines Schiffs – bei Außerachtlassung von Manövriervorgängen, insbesondere Beschleunigungen - sind Schraubenstrahl und Nachstromfeld hinsichtlich der Belastung der Fahrrinnensohle und bezüglich der schiffserzeugten Transportprozesse im Vergleich zum Einfluss der Rückstromgeschwindigkeit von untergeordneter Bedeutung. Die vertikale und horizontale Verteilung des Nachstromfelds ist sehr inhomogen und von Makroturbulenzen geprägt.

Untersuchungen zur Spannungsreduzierung im Korngerüst an Unterwasserböschungen von Wasserstraßen infolge des schiffserzeugten Absunks wurden bei der BAW u.a. an Binnenwasserstraßen vorgenommen. Das Maß der Reduzierung des sohnahen Porenwasserdrucks bei Schiffspassagen auf die Sedimenttransportprozesse im Tideästuar ist bisher nicht bekannt. Messungen an der Seeschiffahrtsstraße NOK haben gezeigt, dass die absunkbedingten Porenwasserüberdrücke zu einer scheinbaren Verminderung des Bodeneigengewichts führen, und dass damit der Transportbeginn des Sohl- und Böschungsmaterials herabgesetzt werden kann. Dieser Einfluss wirkt sich bei schwachbindigen Böden stärker als bei rolligen Böden aus, da die Einzelkörner wegen ihres kleineren Durchmessers leichter sind und da sie größere Porenwasserüberdrücke aufgrund der geringeren Durchlässigkeit entwickeln. Dadurch sind ihre bei „natürlich entwickelter“ Böschungsneigung anfänglich im Ruhezustand vorhandenen Sicherheitsreserven verhältnismäßig schnell ausgeschöpft. Des Weiteren zeigten die geotechnischen Messungen am NOK, dass allein auf Grundlage der bisherigen Kenntnisse aus dem Binnenbereich die Standsicherheit von Unterwasserböschungen deutlich unterschätzt wird, da der für die Berechnung anzusetzende Luftporenanteil im Boden mit der Wassertiefe abnimmt und dementsprechend der mögliche Porenwasserüberdruck und dessen Einfluss auf die Böschungsstandsicherheit geringer wird (BAW, 1999).

6.4.8 Nebenflüsse und Nebanelben

Zur Belastung der Nebenflüsse und Nebanelben wurden von der BAW (BAW, 1996) am Beispiel des Elbeästuars Aussagen hergeleitet, die im folgenden zusammengefasst werden:

Die Ausbreitung schiffserzeugter Wellen flussauf wurde am Beispiel der Lühe verdeutlicht:



- Die Energie kurzperiodischer Sekundärwellen wird infolge von Flusskrümmungen (Reflexion) sowie durch die Absorption der unregelmäßigen Uferzonen (Refraktion, Wellenbrechen) auf einer Strecke mehrerer Wellenlängen bis zur Unwirksamkeit abgemindert.
- Langperiodische schiffserzeugte Wellen können bei Thw auf der Tidehochwasserwelle deutlich weiter stromauf verfolgt werden konnten, da der höhere Wasserstand infolge geringerer Reibung eine günstigere Energieausbreitung der Schiffswelle ermöglichte.
- Langperiodische Wellen waren bei Tnw nach etwa 3 km stark abgemindert, da zum einen das ablaufende Wasser der Wellenfortschrittsrichtung der Schiffswellen durch Strömungsenergie entgegenwirkte und zum anderen der niedrige Wasserstand die Sohlreibung erhöhte.
- Nach etwa 9,5 km traten noch maximal 20 % der Ausgangswellenhöhe auf (Dämpfungsfaktor $k = 0,2$).

Anhand von weiteren Messungen am Ruthenstrom zeigte sich insbesondere bei niedrigen Tidewasserständen aufgrund der absinkbedingten Sogströmung sowie der Sohlreibung eine sehr starke Umformung der schiffserzeugten Primärwelle. Die langperiodische Welle lief in den Ruthenstrom bei hoher Energiedissipation und Fortschrittsgeschwindigkeit als Bore (brechende Schwallwelle) mit einer sehr steilen Wellenhöhe von etwa $H_p \approx 0,4$ m in den flachen Nebenarm der Untereibe ein (INGENIEURBÜRO DIPL.-ING. FITTSCHEN, 2002).

Diese physikalischen Vorgänge in den Nebenflüssen können prinzipiell auch in zur Haupttrinne exponiert liegenden schmalen Nebenelben (z.B. Dwarsloch) und in längeren Sielaußentiefs (z.B. Freiburger Hafentief) ablaufen.



7 Prognose der Änderungen im Abschnitt Hamburger Yachthafen

7.1 Vorbemerkungen

Eine gesicherte, quantitative Prognose ausbaubedingter Änderungen schiffserzeugter Belastungen in unregelmäßigen Wasserstraßenprofilen ist - wie in Kapitel 4.3 dargelegt - derzeit nur auf Basis von hydraulischen Modellversuchen möglich. In dem hydraulischen Modell sind möglichst alle diejenigen Parameter zu untersuchen, die ausbaubedingte schiffserzeugte Belastungsänderungen zur Folge haben können.

Allgemein ausgedrückt kann sich die Belastung einer Seeschiffahrtsstraße ändern:

- bei einer Veränderung der Wellen- und Strömungserzeugung am Schiff:
 - durch eine Änderung des Stromquerschnitts (z.B. Vertiefung, Kurvenaufweitung, Querschnittseinengung)
 - durch eine Änderung der Schiffsgeschwindigkeit (z.B. verringerter Widerstand bei gleichem Tiefgang und bei gleicher Maschinenleistung)
 - durch einen veränderten Tiefgang der Schiffe (z.B. größere Abladetiefe für jetzt schon verkehrende Schiffe)
 - durch Fahrt bei anderen Wasserständen und Strömungen (z.B. bei gleichem Tiefgang des vorher tideabhängigen, jetzt tideunabhängigen Verkehrs)
 - durch eine andere Flottenstruktur (z.B. größere Schiffseinheiten, größere Feeder-schiffe)
- bei einer veränderten Wellenausbreitung im System:
 - durch eine Änderung der Fahrrinnenränder und -steilheit (z.B. Kurvenaufweitung incl. Böschungsneigung, Abflachung)
 - durch Änderung der Tidedynamik (z.B. Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserstände).

Basis für die abschnittsweise Beurteilung von einerseits möglichen und andererseits örtlich wirksamen ausbaubedingten, tiefgangsabhängigen Änderungen in Elbeästuar sind Untersuchungen lokaler Bedingungen in einem hydraulischen Maßstabsmodell.



7.2 Das hydraulische Modell

7.2.1 Modellgesetze

Die Naturähnlichkeit eines hydraulischen Modells zur Simulation von Schwerewellen ist gewährleistet, wenn im Modell und in der Natur die gleichen relativen Anteile von Massen- und Schwerekräften wirken (FROUDEsches Modellgesetz; vergl. auch BAW, 1996).

Dieses Verhältnis wird im Schiffbau durch die dimensionslose FROUDEsche Zahl Fr_l , hier das Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zur Wurzel aus der Schiffslänge und Erdbeschleunigung, ausgedrückt:

$$Fr_l = v_s / (l \cdot g)^{0,5}$$

mit Fr_l : FROUDE-Zahl
 v_s : Schiffsgeschwindigkeit
 l : Schiffslänge zw. d. Loten
 g : Erdbeschleunigung

Bei den aktuellen Untersuchungen zur schiffserzeugten Belastung im Bereich Hamburger Yachthafen betrug die FROUDEsche Zahl

$$Fr_l = 0,05 \text{ bis } 0,12$$

(Massengutschiff MG58 mit $v_s = 5$ kn bis Containerschiff PPM46 mit $v_s = 13,5$ kn).

Bei seegehenden Handelsschiffen beträgt die FROUDEsche Zahl in tiefen, seitlich unbegrenztem Wasser etwa $Fr_l \approx 0,15$ bis $0,32$, wobei mit annähernd $Fr_l = 0,3$ die obere Grenze des optimalen und somit noch wirtschaftlichen Bereichs der Schiffsgeschwindigkeit erreicht wird (SCHNEEKLUTH, 1988).

Die REYNOLDSzahl Re als Ausdruck der Ähnlichkeit der turbulenten Strömungsprozesse von Modell und Natur, beschrieben durch das Verhältnis von Schiffsgeschwindigkeit und Schiffslänge zur Zähigkeit des Wassers, kann in Natur und Modell bei gewählter FROUDEscher Ähnlichkeit nicht übereinstimmen:

$$Re = v_s \cdot l / \nu$$

mit Re : REYNOLDSzahl
 v_s : Schiffsgeschwindigkeit
 l : Schiffslänge zw. d. Loten
 ν : Kinematische Zähigkeit



Die REYNOLDSzahlen betragen bei den Modellversuchen Hamburger Yachthafen

$$Re = 2,8 \cdot 10^6 \text{ bis } 8,5 \cdot 10^6$$

(Massengutschiff MG58 mit $v_S = 5$ kn bis Containerschiff PPM46 mit $v_S = 13,5$ kn).

Als unterer Grenzwert zur Laminarströmung im Modell wird u.a. im Schiffbau eine REYNOLDSzahl von $Re < 5 \cdot 10^5$ angegeben (u.a. SCHNEEKLUTH, 1988).

Für Modellversuche im Schiffbau zur Ermittlung von Schiffswiderstand und Propulsion bei maximaler Geschwindigkeit sind REYNOLDSzahlen zwischen $Re \approx 10^6$ und 10^7 im Modell, bei Werten von $Re \approx 10^8$ bis 10^9 in der Natur, üblich.

Die Naturähnlichkeit der Schiffswellenentstehung und der Wellenausbreitung im hydraulischen Modell ist mit dem bei der BAW gewählten Maßstab von 1:40 hinsichtlich der hydrodynamischen Ähnlichkeitsbedingungen (Modellwassertiefen $h > 5$ cm, Modellwellenperioden $T > 0,7$ s) für die langperiodischen Primärwellen sehr gut erfüllt. Die hydrodynamischen Ähnlichkeitsbedingungen für ausgeprägte kurzperiodische Sekundärwellen (Modellperiode $T > 0,4$ s), die gleichfalls über den geforderten Mindestausgangswellenhöhen am Modellschiff von $H > 2$ cm lagen (KOHLHASE / DETTE, 1984), ist für den Querschnitt Hamburger Yachthafen, erst ab Schiffsgeschwindigkeiten von deutlich über $v_S > 13$ kn gegeben. Diese Geschwindigkeiten wurden im hydraulischen Modell nur vom Bemessungsschiff PPM46 erreicht. Bild 10 zeigt die Passage eines Modellschiffs in hydraulischen Modell 1:40 des Unterelbeabschnitts Hamburger Yachthafen.

Die vorstehend erläuterten Grundlagen der Ähnlichkeitsmechanik zeigen, dass die hydrodynamischen Grenzbedingungen bei der Simulation von Schiffspassagen und Ausbreitungsvorgängen mit dem gewählten Maßstab 1:40 erfüllt sind und somit die Prognosefähigkeit der Untersuchungen sichergestellt ist.

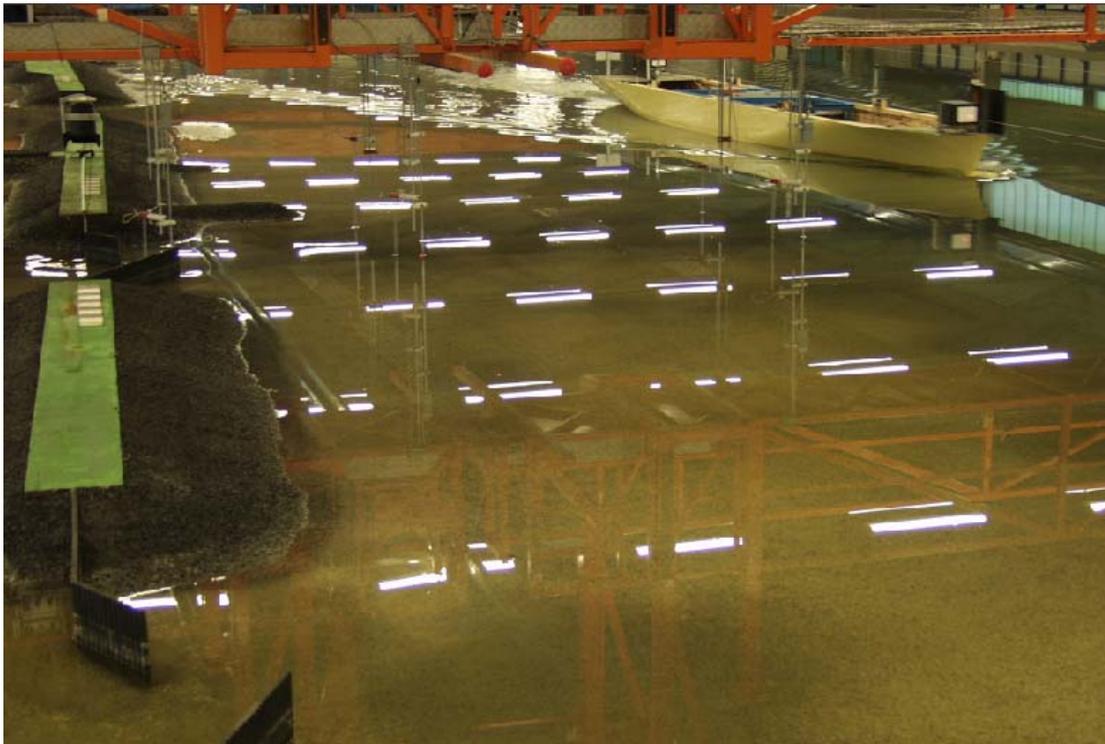


Bild 10: Modell des POST-PANMAX-Containerschiffs PPM46 als Abgänger vor dem Messquerschnitt Osteinfahrt Hamburger Yachthafen bei T_{nw} ($t = 13,5$ m, $v_S \approx 12,5$ kn)

7.2.2 Versuchseinrichtung

Als Untersuchungsabschnitt wurde das komplexe System der Unterelbe im Bereich Hamburger Yachthafen etwa zwischen km 641,6 und km 643,2 gewählt, das als Teil der Begegnungsstrecke der Bemessungsschiffe vorgesehen ist und für das folgende Randbedingungen und Betroffenheiten gegeben sind:

- am südlichen Ufer, Insel Hanskalbsand:
 - Natürliches Ufer mit geringer Böschungsneigung (Wellenrefraktion)
 - Potentielle Fahrrinnenverbreiterung (veränderter Passierabstand)
 - Potentielle Ablagerungsfläche (Querschnittseinengung)
 - Flachwasser (Refraktion, Shoaling, Wellenbelastung)
 - Steiler Fahrrinnenrand (Teilreflexion)

- am nördlichen Ufer, Hamburger Yachthafen:
 - Hafeneinfahrten (Belastung des Bauwerks, Reflexion)
 - Angeschlossene Hafenbereiche (Wellendiffraktion, -refraktion, Resonanz)
 - Begegnungsstrecke (geringer Passierabstand)
 - Deckwerke (Reflexion, Belastung)



- Bühnenfelder (Refraktion, Shoaling, Reflexion)
- Steiler Fahrrinnenrand (Teilreflexion)

Die georeferenzierte Luftaufnahme (Bild 11) zeigt das Untersuchungsgebiet, die Abmessungen des Versuchsbeckens sowie das maßstäblich erstellte Modellgebiet (rote Umrandung).

Die Abmessungen des Versuchsbeckens betragen ca. 100 m x 35 m bei einer möglichen Wassertiefe von etwa 0,75 m. Das Versuchsbecken beinhaltet eine maßstäblich modellierte Fläche von etwa 40 m x 35 m mit Übergangsbereichen von beidseitig jeweils etwa 14 m, in denen der Fahrrinnenquerschnitt vereinfacht abgebildet wurde.

Die Unterwassertopografie des Ist-Zustands basiert auf den Peildaten von 2002 (BAW, 2003), die durch Angaben aus der Digitalen Bundeswasserstraßenkarte (DBWK) der WSV ergänzt sowie anhand gezielter örtlicher Begehungen aktualisiert wurden. Tiefen- und Breitenangaben zu den jeweiligen Ausbauzuständen wurden analog der im hydrodynamisch-numerischen (HN)-Modell untersuchten Varianten der Unterelbe in das hydraulische Modell eingearbeitet.

Die Hafengebiete, Flachwasserbereiche und die Unterwasserböschungen wurden in einem Flächenraster von im Mittel etwa 40 m x 40 m maßstäblich abgesteckt. Die Fahrrinnensohle wurde zur Nachbildung von Sohlstrukturen in Längsrichtung detailliert in 25 m Punkten mit Profiblechen (Abstand 32 m) abgesteckt. Die Einfahrtsbereiche des Yachthafens wurden desgleichen mit Querprofilen im Abstand von etwa 20 m modelliert, um den maßgeblichen Energieeintrag in das Hafenbecken zu gewährleisten (Maße jeweils Naturwerte).

Die untenstehenden Grafiken und Fotoaufnahmen verdeutlichen die Unterwassertopografie des gesamten Modellabschnitts mit Beschleunigungs- und Stoppstrecken (Bild 12), die Hafenbecken (Bild 13) sowie die detailliert modellierten Hafeneinfahrten (Bild 14) im Maßstab 1 : 40. Auf die Nachbildung von Befestigungsdalben, Schwimmstege und Sport- sowie Behördenschiffe wurde verzichtet, da sie als „Dämpfungselemente“ die schiffserzeugte Belastung reduzieren.

Die Versuche im hydraulischen Modell wurden ohne Tideströmung vorgenommen; alle Geschwindigkeitsangaben (Schiffsgeschwindigkeit und schiffserzeugte Strömungsgeschwindigkeit) sind auf diesen Zustand bezogen. Zum Einfluss der Strömung auf die schiffserzeugten Belastungen wird auf die Ergebnisse der Untersuchungen zur jüngsten Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe verwiesen (BAW, 1996).



Bild 13: Modellabschnitt Unterelbe mit Fahrrinne (links), Hamburger Yachthafen (Hintergrund, rechts) und Außenbezirk Wedel des WSA Hamburg (vorn rechts) im Maßstab 1 : 40

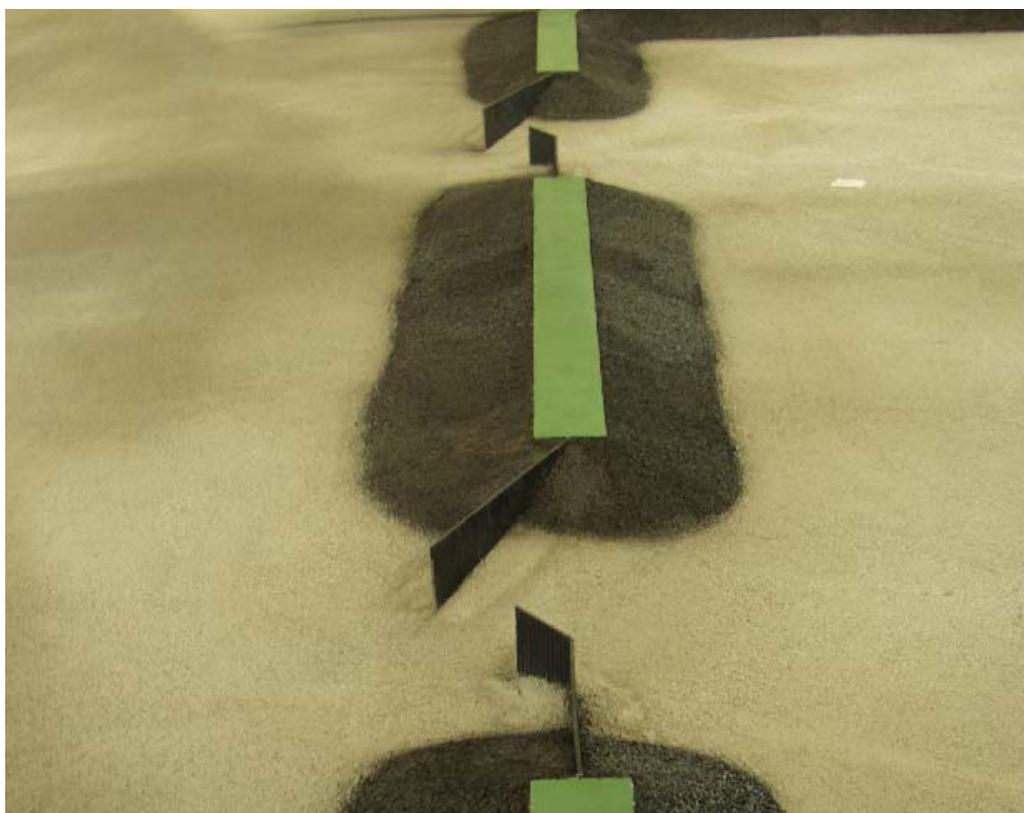


Bild 14: Unterwassertopografie der Hafeneinfahrten zum Hamburger Yachthafen im Modellmaßstab 1:40



Die Änderungen der schiffserzeugten Belastungen einer Wasserstraße, die sich aus dem Ausbau ergeben können, werden im Vergleich zur schon heute bestehenden Belastung im Ist-Zustand im hydraulischen Modell für Extremsituationen untersucht, um eventuelle Veränderungen deutlich als "auf der sicheren Seite liegend" herauszustellen. Als "Extremsituation" sind hier Passagen mit maximalem Tiefgang, geringem Fahrabstand zur Fahrrinnenkante (nur erforderlicher Seitenabstand), höchst möglichen Geschwindigkeiten, großen Schiffseinheiten sowie geringen Wassertiefen bzw. geringer Kielfreiheit (Under Keel Clearance, UKC) definiert worden.

Die Umrechnung der Naturwerte erfolgte gemäß den Modellgesetzen nach FROUDE; die Ergebnisse der Versuche im Modell wurden entsprechend transformiert und in Naturgrößen angegeben.

Ein morphologischer Nachlauf, d.h. die mögliche natürliche Anpassung der Unterwassertopographie (u.a. Abflachung an den Fahrrinnenrändern) an die geänderten hydraulischen Bedingungen, wurde bei diesen Untersuchungen nicht angesetzt, da diese Prozesse ggf. über einen längeren Zeitraum stattfinden, wogegen die tiefgehenden Schiffe (tideunabhängig in Frischwasser $t = 13,8$ m) sofort nach der Ausbaumaßnahme fahren können. Des Weiteren wurde im hydraulischen Modell die Sollsohle (ohne Ansatz von Baggertoleranz und Vorratsbaggerungen) eingebaut. Da die vorgegebene Sollsohle für das Verhältnis Schiff - Wasserstraße als ungünstigster Querschnitt (A/A_S) anzunehmen ist, sind die prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen somit immer als „auf der sicheren Seite liegend“ vor Beginn neuer Unterhaltungsbaggerungen zu erwarten.

Für die verschiedenen Schiffsmodelle wurden geschwindigkeitsabhängige Werte für den Absenk z_A , die Primärwelle H_P , die Sekundärwellen H_S sowie die Rückstromgeschwindigkeit v_R gemessen. Die Positionen der Messgeräte im Referenzgebiet sind in Bild 15 eingetragen. In der Elbe wurden zwei Pegelreihen angeordnet, um bei nicht exakter Begegnung im Messquerschnitt die Abweichungen bewerten zu können; Stichproben zeigten sehr geringe Abweichungen im Rahmen der Messgenauigkeit der Sonden.

Folgende Messsysteme wurden für die Erfassung der schiffserzeugten Belastung sowie der Schiffsgeschwindigkeit eingesetzt:

- Wasserspiegelauslenkung (24 Sonden):
 - Wave Meter DHI 102E mit Wave Gauge DHI 202/60
Danish Hydraulic Institut, DK
Messbereich: $\pm 12,5$ cm (Modellmaßstab)

- Strömung (7 Sonden):
 - Electromagnetic Flow Meter 2D-Type "E",
Delft Hydraulics, NL
Messbereich: ± 100 cm/s (Modellmaßstab)

- Schiffsgeschwindigkeit (redundante Systeme):
 - Lasergeometrisches System
Punktmessung im Messquerschnitt
Genauigkeit des Systems: $< 0,1$ kn (Natur)
 - Laserentfernungsmessgerät ELD P 10
LASE Industrielle Lasertechnik
Messgenauigkeit $< 0,5$ % , hier $< 0,1$ kn (Natur)

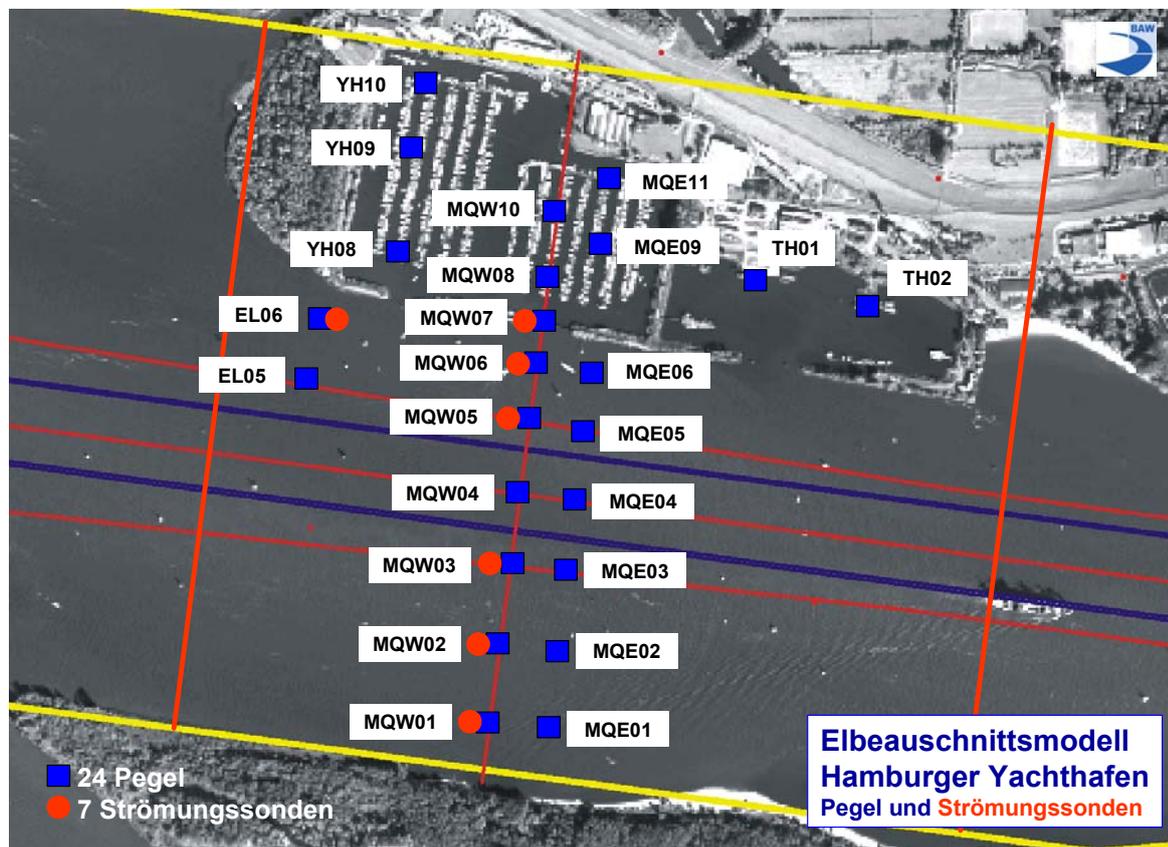


Bild 15: Positionen der Wasserstands- und Strömungsmesssysteme im Untersuchungsabschnitt Hamburger Yachthafen

Da die schiffserzeugten Wasserspiegelauslenkungen und Rückstromgeschwindigkeiten gegen den ruhenden Wasserspiegel gemessen werden - also Relativmessungen vorgenommen werden -, sind systematische Messgeräteungenauigkeiten minimiert.

Aufgrund von Fehlerbetrachtungen für die gesamte Messkette wird bei der Angabe von Wasserspiegelauslenkungen bzw. Strömungsgeschwindigkeiten von einer verfahrensbedingten Standardabweichung von $\sigma < 0,05$ m bzw. $< 0,05$ m/s für die auf den Naturzustand bezogenen Ergebniswerte ausgegangen. Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse im hydraulischen Modell für langperiodische Belastungen ist als sehr gut einzustufen. Obige Angaben basieren u.a. auf einer Serie von Fahrversuchen bei gleich bleibenden Parametern (BAW, 1996).

7.2.3 Bemessungsschiff und Schiffsvarianten

Als Bemessungsschiff wurde ein Containerschiff der POST-PANMAX-Größe mit einer Ladungskapazität von etwa 9.000 TEU² festgelegt, dessen wesentliche Daten zusammen mit den möglichen Begegnern in Tabelle 5 aufgeführt sind (siehe auch Anlage 1).

Name	Typ	Länge zw.d.L.	Breite	Tiefgänge	$c_B = f(t, \dots)$ *
	-	m	m	m	-
PM32	Containerschiff	280	32,3	12,8 / 13,5	0,684 / 0,694
PPM40	Containerschiff	320	40	12,7 / 13,5 / 13,8	0,723 / 0,729 / 0,732
PPM46	Containerschiff Bemessungsschiff	331	46	13,5 / 14,5	0,571 / 0,584
MG58	Massengutschiff	333	58	14,5 / 15,5	0,800 / 0,805

* c_B = tiefgangsabhängiger Blockfaktor = Verdrängungsvolumen / Länge x Breite x Tiefgang

Tabelle 5: Basisdaten der im hydraulischen Modell simulierten Schiffseinheiten

Die Modellschiffe fahren als funkferngeschaltete Selbstfahrer (Propellerantrieb), deren seitlicher Freiheitsgrad durch ein Führungsseil eingeschränkt, dessen vertikale Bewegung aber ermöglicht wurde (Bild 16). Die Auswirkungen der dynamischen Stabilität (hier: Krängung) sind zu vernachlässigen, da im Modell ein "harter" Trimm zur Minimierung von zufallsabhängigen äußeren Einflüssen auf die Schiffsbewegung, dementsprechend auch auf die schiffserzeugte Belastung, vorgenommen wurde.

Im untersuchten Geschwindigkeitsbereich von rund $v_S \approx 5$ kn bis etwa $v_S \approx 13,5$ kn wurden zur Redundanz der Ergebnisse die wasserstands-, schiffs- und tiefgangsabhängigen Fahrkurven zweifach, die schiffstechnisch und querschnittsabhängig möglichen Maximalgeschwindigkeiten dreimal durchfahren.

² TEU = **T**wenty foot **E**quivalent **U**nit = Standardtransportbehälter von 20 Fuß Länge = $l \cdot b \cdot h = 6,06 \text{ m} \cdot 2,44 \text{ m} \cdot 2,59 \text{ m}$

Die tiefgangsabhängigen Blockfaktoren c_B der Modellschiffe entsprechen in etwa den Werten der auf der Unterelbe verkehrenden Fahrzeuge. Zukünftige große Containerschiffe wie das Bemessungsschiff werden mit c_B -Werten um oder unter $c_B \leq 0,6$ konstruiert werden, um trotz größerer Ladekapazität und größeren äußeren Abmessungen zum einen durch größere Maschinenleistungen und zum anderen durch ein hydrodynamisch optimiertes Unterwasserschiff die von den Bauherren geforderten hohen Tiefwassergeschwindigkeiten von rund $v_S \approx 25$ kn gewährleisten zu können.

Die Passierabstände zur östlichen Einfahrt des Yachthafens Hamburg lagen je nach Untersuchungsvariante für Abgänger zwischen 231 m und 282 m und für Aufkommer zwischen 393 m und 506 m (siehe auch Anlage 1).



Bild 16: Zwei Containerschiffe PPM46 bei der Begegnung im hydraulischen Modell (385m-Trasse; T_{nw} ; $t = 13,8$ m; $v_S \approx 10$ kn)

Die Wasserstände der verschiedenen Begegnungsszenarien wurden anhand der im HN-Modell verwendeten Daten des Ist-Zustands als Mittelwerte des Simulationszeitraums (08.05.2002 – 06.06.2002; BAW, 2006b) festgelegt:

- örtl. mittleres T_{nw} am Pegel Schulau: -1,62 mNN
- 1h15 nach mittlerem T_{nw} am Pegel Schulau: -0,62 mNN (ca. $T_{1/2w}$)
- 1h30 vor mittlerem T_{nw} am Pegel Schulau: 1,28 mNN

Diese Wasserstände wurden auch für die Ausbauvarianten beibehalten, da für den Bereich Hamburger Yachthafen nur geringe ausbaubedingte Wasserstandsänderungen im Bereich der Messgenauigkeit des hydraulischen Modells zu erwarten sind (BAW, 2006b). Des Weiteren ist die Anzahl der Variablen zwischen den Versuchsvarianten gering zu halten, um bei

der Beurteilung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung eine möglichst deutliche Zuordnung vornehmen zu können.

7.2.4 Untersuchungsvarianten für die Begegnungsstrecke

Bei der Begegnung von Schiffen entstehen durch die Überlagerung der jeweils erzeugten langperiodischen Wellensysteme schiffserzeugte Wellenbelastungen, die über denen der Einzelfahrer liegen und somit die höchste Wellenbelastung für eine Begegnungsstrecke bedeuten. Deshalb wird in diesem Gutachten auf die Präsentation und Bewertung von - im Vorfeld der Begegnungsversuche erforderlichen - Einzelfahrten verzichtet. Die Begegnungen großer Schiffseinheiten für den Ist-Zustand und die Ausbauvarianten wurden anhand der folgender Szenarien simuliert (Tabelle 6 und Anlage 1), da bei diesen Begegnungsszenarien die jeweils höchsten schiffserzeugten Belastungen bei entsprechendem örtlichen Tidehoch- bzw. Tideniedrigwasser zu erwarten waren:

Variante	Begegnungsfall	Tiefgänge	Tidephase
Ist-Zustand	PM32 Aufkommer / PPM40 Abgänger	12,8 / 12,7	örtl. Tnw
	PM32 Aufkommer / PPM40 Abgänger	12,8 / 13,8	1h15 n. örtl. Tnw
	MG58 Aufkommer / PM32 Abgänger	14,5 / 12,8	1h30 v. örtl. Thw
320m-Trasse	PPM40 Aufkommer / PPM46 Abgänger	13,5 / 13,5	örtl. Tnw
	MG58 Aufkommer / PM32 Abgänger	15,5 / 13,5	1h30 v. örtl. Thw
	MG58 Aufkommer / PPM46 Abgänger	15,5 / 14,5	1h30 v. örtl. Thw
385m-Trasse	PPM40 Aufkommer / PPM46 Abgänger	13,8 / 13,8	örtl. Tnw
	PPM46 Aufkommer / PPM46 Abgänger	13,8 / 13,8	örtl. Tnw
	MG58 Aufkommer / PPM46 Abgänger	15,5 / 14,5	1h30 v. örtl. Thw

Tabelle 6: Untersuchte Begegnungsszenarien im Ist-Zustand und im Ausbauzustand (Trassenvarianten 320m und 385m)

Im folgenden Kapitel werden die verschiedenen Begegnungs-Szenarien des Ist-Zustands mit den Ausbau-Varianten der 320m- und 385m-Trasse (incl. Ablagerungsfläche) verglichen und hinsichtlich der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Begegnungsstrecke bewertet.



7.2.4.1 Schiffserzeugte Belastungen im Referenzgebiet

7.2.4.1.1 Begegnungen im Ist-Zustand

7.2.4.1.1.1 CONTAINERSCHIFFE PM32 / PPM 40 bei T_{nw}

Bei der Begegnungssituation eines PM-Containerschiffs (PM32) als Aufkommer ($t = 12,8$ m, $L_{YH} = 401$ m) mit einem PPM-Containerschiff (PPM40) als Abgänger ($t = 12,7$ m, $L_{YH} = 231$ m) direkt vor der Osteinfahrt des Hamburger Yachthafens ergibt sich bei örtl. T_{nw} durch die Addition der Hauptspantquerschnitte beider Schiffe im Ist-Zustand ein rechnerisches Querschnittsverhältnis von $n = 9,7$ (Einzelschiffe PM32: $n \approx 22$, PPM40: $n \approx 18$).

Die geschwindigkeitsabhängige schiffserzeugte Wellenbelastung durch die mit gleicher Geschwindigkeit fahrenden Containerschiffe wird am Beispiel des Absunks an ausgewählten Positionen des Messquerschnitts ersichtlich (Bild 17):

- Bei der Begegnung des Containerschiffes PPM40 als Abgänger mit dem PM32 als Aufkommer folgt z.B. bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn ein Absunk von rund $z_A \approx 0,7$ m am südlichen Ufer und von rund $z_A \approx 0,9$ m in der Yachthafeneinfahrt, während die Belastung bei $v_S = 10$ kn nur rund $z_A \approx 0,3$ m am südlichen Ufer und etwa $z_A \approx 0,5$ m direkt in der Yachthafeneinfahrt beträgt.
- Im Yachthafen liegen die Wasserspiegeländerungen in den hinteren Hafenbereichen bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_S = 10$ kn maximal bei etwa $z_A \approx 0,3$ m und bei $v_S = 12$ kn etwa bei $z_A \approx 0,4$ m. Die vom Fahrwasser eingetragene geschwindigkeitsabhängige Wellenenergie regt hafeninterne Schwingungen an, wobei ein erhöhter Energieeintrag durch höhere externe Schiffswellen eher linear als exponentiell in die internen Schwingungsamplituden im Hafen eingeht. Zum Beispiel steigt die hafeninterne Welle im westlichen Hafenbereich (Bild 17: hellgrüne Kurve) bei einer Verdopplung der Begegnungsgeschwindigkeit von $v_S = 6$ kn auf $v_S = 12$ kn von etwa $z_A \approx 0,2$ m auf rund $z_A \approx 0,4$ m an (Faktor 2), während z.B. an der nördlichen Fahrrinnenkante (Bild 17: rote Kurve) die Absunkwerte von ebenfalls etwa $z_A \approx 0,2$ m ungedämpft deutlich überproportional auf rund $z_A \approx 1,1$ m (Faktor 5,5) zunehmen.

Die Sekundärwellen erreichen bei einer extremen Begegnungsgeschwindigkeit der Containerschiffe ($v_S \approx 13,5$ kn) an der nördlichen Unterwasserböschung Maximalwerte von rund $H_S \approx 1,6$ m. Bei einer Begegnungsgeschwindigkeit von lediglich $v_S = 12$ kn sind nur Sekundärwellenhöhen von etwa $H_S < 0,2$ m zu erwarten.

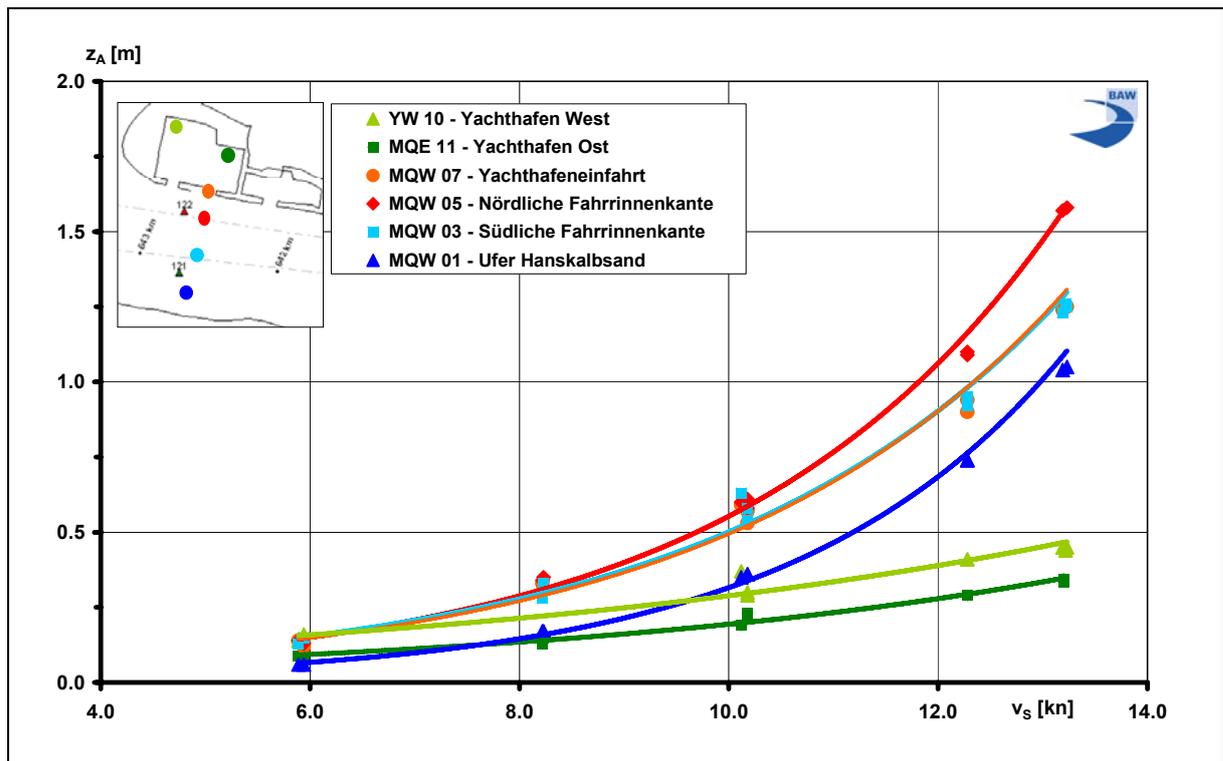


Bild 17: Geschwindigkeitsabhängiger Absink im Untersuchungsabschnitt bei Begegnung des PM32 als Aufkommer mit dem PPM40 als Abgänger (T_{nw}, Ist-Zustand)

Mit folgenden geschwindigkeitsabhängigen, schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten ist bei der Begegnung dieser großen Containerschiffe im Ist-Zustand (T_{nw}) zu rechnen:

- Ufer Hanskalbsand: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R < 0,2 \text{ m/s}$; $v_S \approx 13,5 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,8 \text{ m/s}$.
- Südl. Fahrrienenkante: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,3 \text{ m/s}$; $v_S \approx 13,5 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,5 \text{ m/s}$.
- Nördl. Fahrrienenkante: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,7 \text{ m/s}$; $v_S \approx 13,5 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 1,4 \text{ m/s}$.
- Nördl. Böschung: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,7 \text{ m/s}$; $v_S \approx 13,5 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 2,0 \text{ m/s}$.
- Yachthafeneinfahrt: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_{AUS} \approx 1,5 \text{ m/s}$; $v_S \approx 13,5 \text{ kn} \Rightarrow v_{AUS} \approx 1,7 \text{ m/s}$.

In Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit und lokaler Bedingungen wird das Maximum der schiffserzeugten Strömung durch die Rückströmung oder durch die Primärwellenströmung bewirkt.

7.2.4.1.1.2 CONTAINERSCHIFFE PM32 / PPM 40 bei T_{1/2w}

Um möglicherweise ungünstige Wasserstandsbedingungen für die Belastung des Yachthafens oder ungünstige wasserstandsabhängige Resonanzerscheinungen im Hafen selbst ausschließen zu können, wurde eine Versuchsserie bei etwa mittleren Tidewasserbedingungen (rund örtl. T_{1/2w} = -0,62 mNN) gefahren.



Bei der Begegnung des PM32-Containerschiffs als Aufkommer ($t = 12,8$ m, $L_{YH} = 401$ m) mit dem PPM40-Containerschiff als Abgänger ($t = 13,8$ m, $L_{YH} = 231$ m) direkt vor der Osteinfahrt des Yachthafens Hamburg ergibt sich bei $T\frac{1}{2}w$ im Ist-Zustand ein rechnerisches Querschnittsverhältnis von $n = 10,1$ (Einzelschiffe PM32: $n \approx 24$, PPM40: $n \approx 18$).

Die geschwindigkeitsabhängige schiffserzeugte Wellenbelastung wird am Beispiel des Absunks an ausgewählten Positionen des Messquerschnitts ersichtlich (Bild 18):

- Generell sind im gesamten Untersuchungsabschnitt geringere Belastungen als bei Tnw zu erwarten, auch wenn der PPM40 bei $T\frac{1}{2}w$ mit höherer Abladung ($\Delta t = +1,1$ m) fährt.
- Die höchsten Belastungen z.B. bei $v_S \approx 12$ kn mit $z_A \approx 0,8$ m sind an der nördlichen Fahrrinnenkante zu erwarten, da der PPM40 als Abgänger dieses Ufer mit geringem Abstand passiert, wobei schon ab Schiffsgeschwindigkeiten über $v_S \approx 10$ kn wiederum ein deutlich überproportionaler Anstieg festzustellen ist.
- Im westlichen Yachthafen steigt die Belastung im Gegensatz zur Fahrrinne fast linear an und es treten trotz sehr hohem Absunk vor der Einfahrt bei $v_S \approx 12$ kn im hinteren Hafen nur Absunkwerte von rund $z_A \approx 0,3$ m auf.

Die geringere langperiodische Belastung des Untersuchungsabschnitts bei der Begegnung der Containerschiffe bei Tidehalbwasser im Vergleich zu Passagen bei Tideniedrigwasser ist gleichermaßen anhand des Primärwellensystems und bei den Sekundärwellen ($H_{S,MAX} \approx 0,4$ m bei $v_S \approx 13,4$ Kn, nördliche Unterwasserböschung) festzustellen.

Die schiffsinduzierten Strömungen liegen in der Unterelbe aufgrund des größeren, verfügbaren Wasserstraßenquerschnitts in der gleichen Größenordnung oder leicht unter den Werten der Begegnung bei Tnw . In der Yachthafeneinfahrt allerdings muss aufgrund der zeitlichen Überlagerung von Absunkwelle, Wasserspiegelgefälle sowie Füllgrad des Hafenbeckens bei Begegnungsgeschwindigkeiten über $v_S > 8$ kn gegenüber den Tnw -Versuchen mit einer Zunahme des schiffsinduzierten Ausstroms um etwa $\Delta v_{AUS} \approx +0,2$ m/s bis auf rund $v_{AUS} \approx 2,0$ m/s ($v_S \approx 12$ kn) gerechnet werden.

Hinsichtlich der schiffsinduzierten Wellenbelastung ist festzuhalten, dass sowohl in der Fahrrinne als auch im Hamburger Yachthafen Begegnungen großer Containerschiffe bei etwa Tidehalbwasser - trotz höherem Abladetiefgang des PPM40 - zu keinen ungünstigeren schiffserzeugten Belastungen als unter Tideniedrigwasserbedingungen führen.

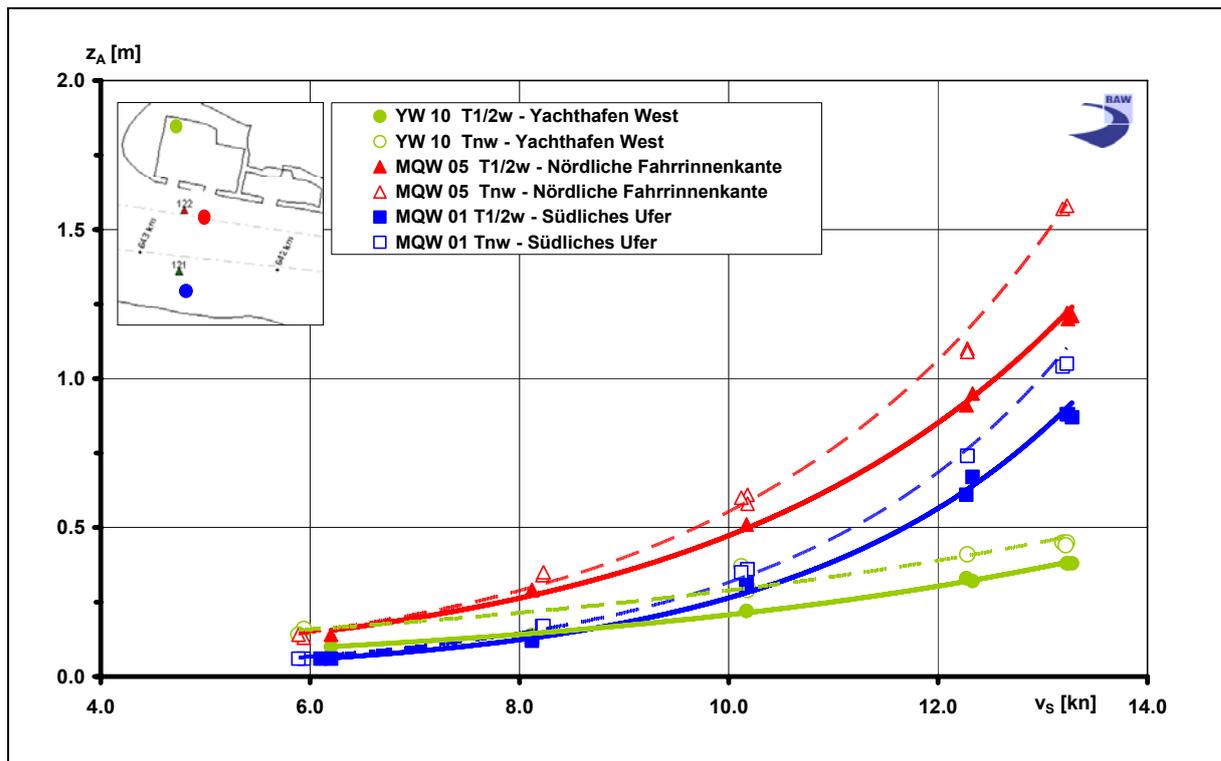


Bild 18: Geschwindigkeitsabhängiger Absink im Untersuchungsabschnitt bei Begegnung des PM32 als Aufkommer mit dem PPM40 als Abgänger bei Tidehalbwasser im Vergleich zu den Belastungen bei Tnw (Ist-Zustand)

7.2.4.1.1.3 MASSENGUTSCHIFF MG 58 / CONTAINERSCHIFF PM 32 bei Thw

Die derzeit zugelassenen maximale „Begegnungsbreite“ im Untersuchungsquerschnitt ($b_1 + b_2$) beträgt 90 m, so dass sich hier maximal z.B. Schiffe mit einer summierten Breite von z.B. $b = 58$ m und $b = 32$ m begegnen dürfen. Bei einer derartig großen Querschnittseinstengung waren die höchsten langperiodischen Belastungen bei etwa Thw zu erwarten, so dass dies im hydraulischen Modell simuliert wurde.

Das Massengutschiff MG58 ($l = 333$ m, $b = 58$ m) kann mit einem Tiefgang von $t = 14,5$ m den Hamburger Hafen nur bei annähernd Tidehochwasser „auf“ der Tidewelle anlaufen, weshalb die Begegnung mit dem Containerschiff PM32 ($t = 12,8$ m) vor dem Hamburger Yachthafen dementsprechend auf etwa 1 Stunde 30 Minuten vor örtlichem Thw (+1,28 mNN) festgelegt wurde. Im Ist-Zustand berechnet sich das Querschnittsverhältnis zu $n = 9,2$ (Einzelschiffe MG58: $n \approx 14$, PM32: $n \approx 28$).

Die Zeitreihen der Wasserspiegelschwankungen im Untersuchungsabschnitt (Bild 19) zeigen die Überlagerung der Wellensysteme direkt im Messquerschnitt, während im Tonnenhof und vor allem an der Position westlich des Yachthafens die zeitliche Abfolge der Passagen des Aufkommers und des Abgängers sowie ihre unterschiedliche Wirkung aufgrund des unter-

schiedlichen Passierabstands, des Hauptspantquerschnitts und der Geschwindigkeit ($\Delta v_s \approx 2 \text{ kn}$) deutlich wird.

Die langperiodischen Schwingungen im Yachthafen werden durch die Überlagerung der Wellen im Messquerschnitt mit zusätzlichem zeitlich versetztem Energieeintrag durch die Wellensysteme vor der Westeinfahrt geprägt (Bild 19, obere Reihe).

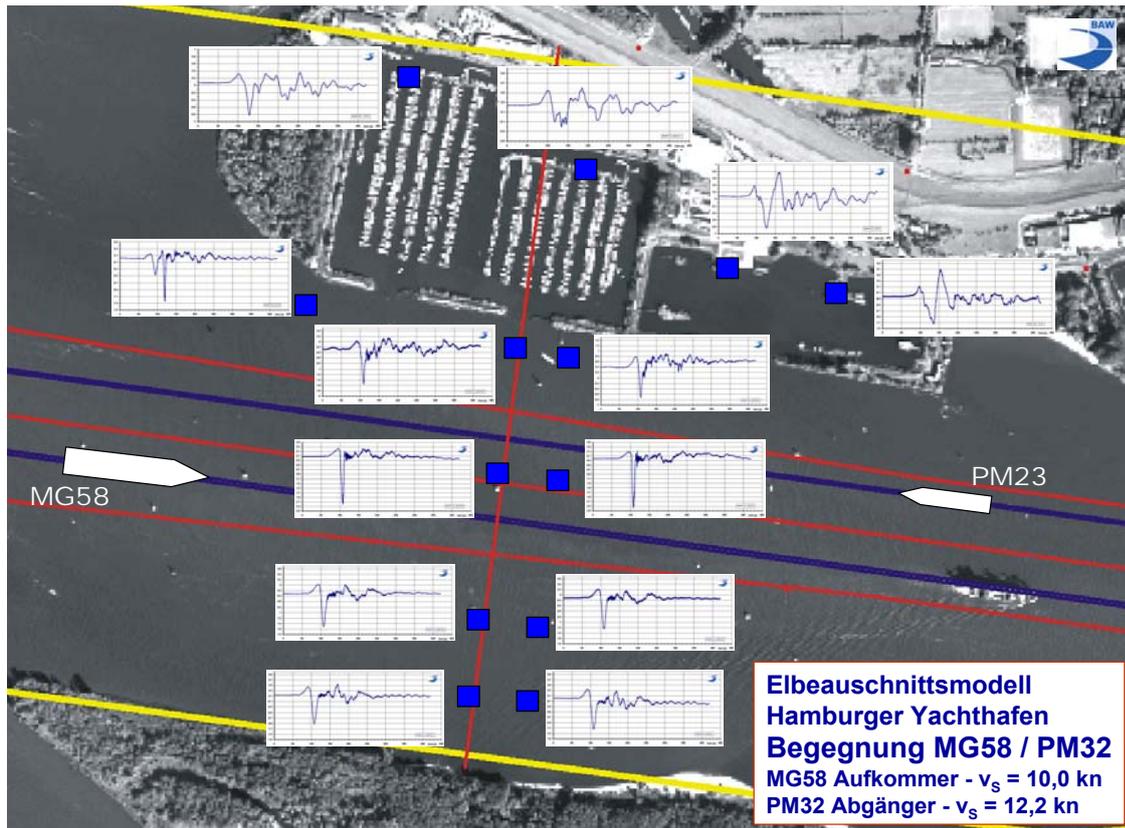


Bild 19: Wasserspiegelauslenkungen im Elbeabschnitt Hamburger Yachthafen bei Begegnung des Massengutschiffs MG58 mit $v_s = 10,0 \text{ kn}$ ($t = 14,5 \text{ m}$; Aufkommer) mit dem Containerschiff PM32 ($v_s = 12,2 \text{ kn}$, $t = 12,8 \text{ m}$; Abgänger) bei etwa Thw

Die Zunahme der langperiodischen schiffserzeugten Belastungen bei der Begegnung großer Schiffseinheiten im Vergleich zu deren Einzelfahrt wird am Beispiel der Begegnung des MG58 als Aufkommer mit dem PM32 als Abgänger anhand der geschwindigkeitsabhängigen Fahrkurven für ausgewählte Positionen in Bild 20 verdeutlicht (Begegnung: gefüllte Zeichen, durchgehende Linien; Einzelfahrt MG58: offene Zeichen, gestrichelte Linien):

- Wie zu erwarten liegen die maximalen Wellenbelastungen und auch die maximalen Erhöhungen bei der Begegnung im Nahbereich des Schiffs, also in der Fahrrinne (rote Kurven). Hier addiert sich der Absenk des MG58 um den Wert des PM32 und erhöht sich um Werte zwischen $\approx 50 \% < \Delta z_A < \approx 60 \%$ gegenüber der Einzelpassage

des MG58 ($6 \text{ kn} < v_S < 11 \text{ kn}$). Bei einer Begegnungsgeschwindigkeit des MG58 von $v_{S, \text{MG58}} = 10 \text{ kn}$ ($v_{S, \text{PM32}} \approx 12 \text{ kn}$) werden z.B. Absunkwerte in Fahrrinnenmitte von etwa $z_A \approx 0,9 \text{ m}$ erreicht.

- Am Ufer der Insel Hanskalbsand (blaue Kurven) liegen die Belastungszunahmen bei der Begegnung prozentual etwa in der gleichen Größenordnung wie in Fahrrinnenmitte, u.a. durch Energiedissipationseffekte sind hier andererseits bei der Begegnung mit $v_{S, \text{MG58}} = 10 \text{ kn}$ ($v_{S, \text{PM32}} \approx 12 \text{ kn}$) nur langperiodische Wellenamplituden von rund $z_A \approx 0,5 \text{ m}$ zu erwarten.
- Für die Darstellung der heute schon möglichen Belastung im Yachthafen wurde als Beispiel die Messposition MQE 11 im östlichen Hafenbereich gewählt (grüne Kurven). Der Anstieg der Belastung bei Schiffsbegegnungen verläuft annähernd parallel zur Belastung bei Einzelfahrt, wobei wiederum ein Versatz von etwa +50 % bis +60 % zu erwarten ist. Die bei einer Schiffsbegegnung angeregten Schwingungen erreichen bei $v_{S, \text{MG58}} = 10 \text{ kn}$ ($v_{S, \text{PM32}} \approx 12 \text{ kn}$) maximale langperiodische Amplituden von rund $z_A \approx 0,3 \text{ m}$.

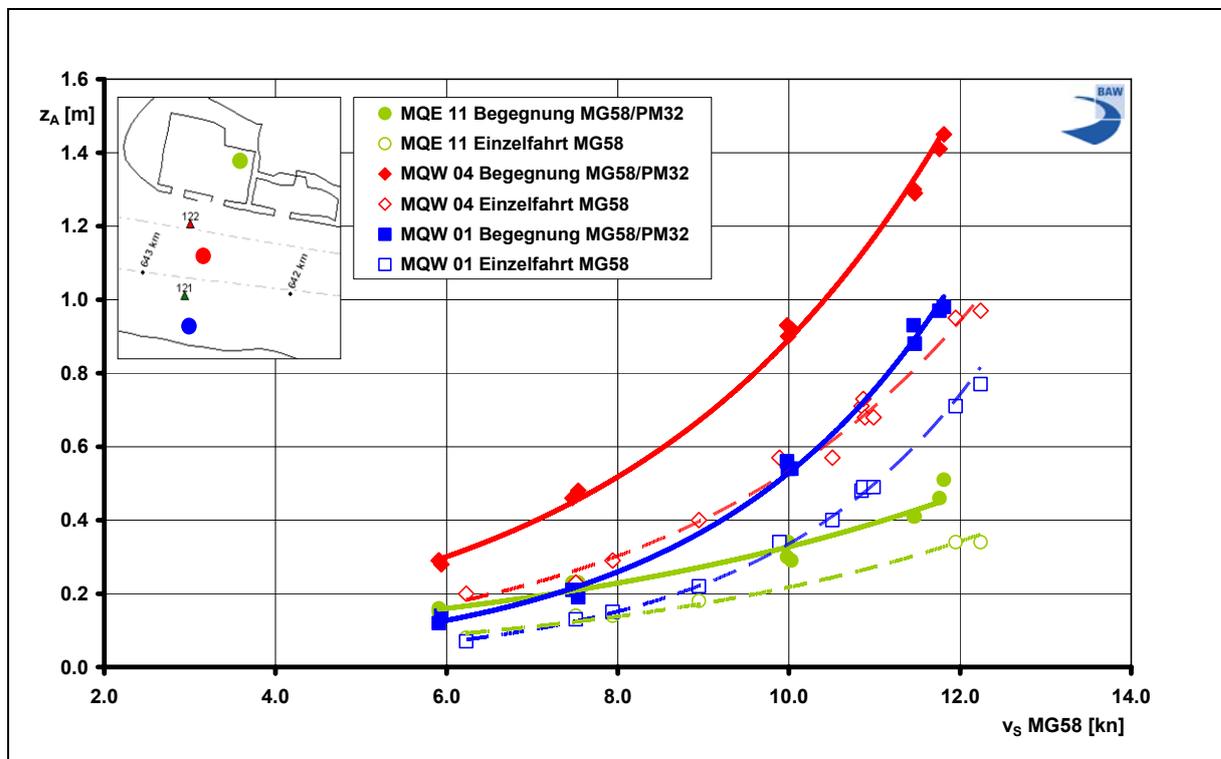


Bild 20: Vergleich des Absunks bei Begegnung MG58 / PM32 und Einzelfahrt MG58

Die Sekundärwellenbelastung der Unterelbe bei der Begegnung des Massengutschiffs mit dem Containerschiff PM32 liegt bei maximal $H_S \approx 0,4$ m in der Fahrrinne zwischen den Begegnern ($v_S = 13,5$ kn) und ist damit für Vergleichszwecke aufgrund der Grenzbedingungen für Wellenausbreitungsprozesse in hydraulischen Modellen ($H_{S,Modell} > 2$ cm) nur bedingt verwendbar.

Die Strömungsbelastung der östlichen Yachthafeneinfahrt bei der Begegnung des MG58 mit dem PM32 wird für eine Schiffsgeschwindigkeit des MG58 von $v_S = 10$ kn in Bild 21 anschaulich. Der Wechsel von Einstrom und Ausstrom hat mit $v_{MAX} \approx 2,2$ m/s sein Maximum während des Absunkvorgangs (Ausstromgeschwindigkeit: $v_{S,AUS}$). Die angeregten hafenin-ternen Schwingungen erzeugen in Wechselwirkung mit der Elbe in der Zufahrt über annähernd 30 Minuten abklingende Strömungsamplituden zwischen $1,2$ m/s $> v > 0,6$ m/s.

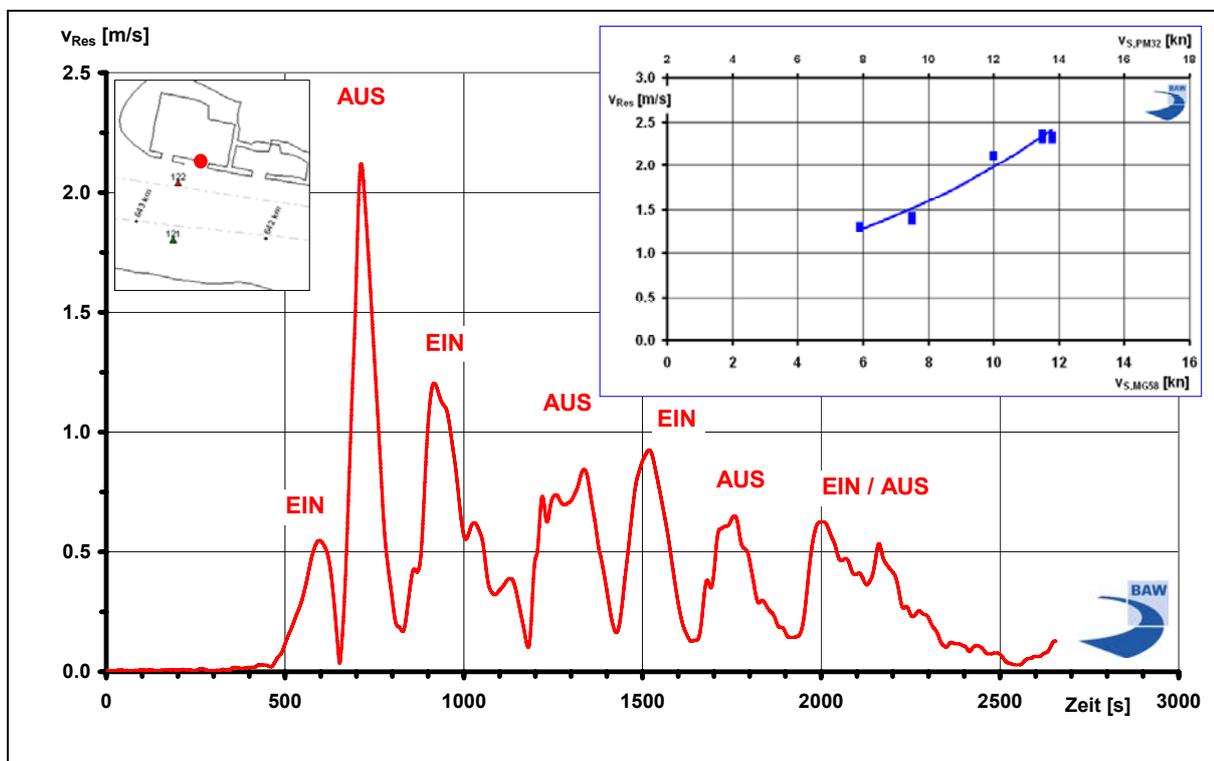


Bild 21: Resultierende Strömungsgeschwindigkeit in der Yachthafeneinfahrt bei Begegnung des MG58 mit $v_S = 10,0$ kn ($t = 14,5$ m, Aufkommer) mit dem PM32 ($v_S \approx 12$ kn, $t = 12,8$ m, Abgänger, $\approx Thw$) sowie geschwindigkeitsabhängige Fahrkurve

Anhand der in Bild 21 eingeblendeten Fahrkurve wird deutlich, dass selbst Begegnungsgeschwindigkeiten des MG58 von rund $v_{S, MG58} = 6$ Kn (untere Achse; $v_{S, PM32} \approx 8$ Kn obere Achse) direkt in der Einfahrt noch Strömungsamplituden von annähernd $v_{MAX} \approx 1,3$ m/s ($\approx 2,5$ kn) bewirken können, mit denen die Sportschiffahrt schon im Ist-Zustand zu rechnen hat.



In der Unterelbe treten bei der Begegnung MG58 und PM32 folgende schiffserzeugte Strömungsgeschwindigkeiten auf (v_S des MG58):

- Ufer Hanskalbsand: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,3 \text{ m/s}$; $v_S \approx 12 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,3 \text{ m/s}$.
- Südl. Fahrrinnenkante: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,8 \text{ m/s}$; $v_S \approx 12 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 1,1 \text{ m/s}$.
- Nördl. Fahrrinnenkante: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,4 \text{ m/s}$; $v_S \approx 12 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,6 \text{ m/s}$.
- Nördl. Böschungen: $v_S \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,5 \text{ m/s}$; $v_S \approx 12 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 0,8 \text{ m/s}$.
- Yachthafeneinfahrt: $v_{S,AUS} \approx 10 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 1,5 \text{ m/s}$; $v_{S,AUS} \approx 12 \text{ kn} \Rightarrow v_R \approx 2,0 \text{ m/s}$.

Die Strömung auf der nördlichen Unterwasserböschung direkt im Messquerschnitt ist noch signifikant in Betrag und Richtung durch die Füll- und Entleerungsvorgänge in der Yachthafeneinfahrt beeinflusst.

7.2.4.1.2 Zusammenfassende Bewertung der Belastungen im Ist-Zustand

Die wesentlichen bestimmenden Parameter der schiffserzeugten Belastung werden für das Referenzgebiet Hamburger Yachthafen im Ist-Zustand anhand folgender Szenarien bestätigt:

- Die höchsten Wellenbelastungen sind bei örtlichem T_{nw} festzustellen (geringe Querschnittsfläche A der Wasserstraße).
- Die höchsten Wellenbelastungen treten bei größeren Abgängern auf (großer Hauptspantquerschnitt A_S).
- Die höchsten Wellenbelastungen resultieren aus einem geringen Passierabstand (Abgänger, geringes Teilquerschnittsverhältnis $n_T = A_T / 0,5 A_S = f(L, \dots)$).

Wird z.B. die obere Grenze der Bemessungsgeschwindigkeit des TDV von 1996 von $v_S = 12 \text{ kn}$ für den Untersuchungsabschnitt Hamburger Yachthafen als maßgebliche Schiffsgeschwindigkeit für die heutige Belastung bei Begegnungsverkehr angenommen, werden im Ist-Zustand folgende Absunkereignisse registriert (Tabelle 7):

z_A bei $v_S \approx 12 \text{ kn}$	Südliches Ufer	Fahrrinnenmitte	Nördliches Ufer Yachthafeneinfahrt	Yachthafen West
	z_A [m]	z_A [m]	z_A [m]	z_A [m]
MG58/PM32, Thw *	0,55	0,9	0,6	0,35
PM32/PPM40, $T_{1/2w}$	0,55	0,9	0,9	0,3
PM32/PPM40, T_{nw}	0,65	1,0	0,8	0,4

* PM32 $v_S \approx 12 \text{ kn}$, MG58 $v_S \approx 10 \text{ kn}$

Tabelle 7: Zusammenstellung der Absunkereignisse im Ist-Zustand bei $v_S \approx 12 \text{ kn}$ (MG58: $v_S \approx 10 \text{ kn}$)



Neben der Wellenbelastung sind die Ausstrom- und Einstrombedingungen in den Yachthafeneinfahrten für die betroffenen Hafenbetreiber hinsichtlich der Strömungsbelastung der Wellenschutzbauwerke, aber auch aus Sicherheitsgründen für die Sportboote relevant. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Yachthafeneinfahrt Ost bei $v_S \approx 12$ kn sind für den Ist-Zustand in Tabelle 8 zusammengestellt:

v_{YH} bei $v_S \approx 12$ kn	Yachthafeneinfahrt Ost
	v_{YH} [m/s]
MG58/PM32, Thw *	2,0
PM32/PPM40, T $\frac{1}{2}$ w	2,0
PM32/PPM40, Tnw	1,7

* PM32 $v_S \approx 12$ kn , MG58 $v_S \approx 10$ kn

Tabelle 8: Zusammenstellung der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Yachthafeneinfahrt Ost für den Ist-Zustand bei $v_S \approx 12$ kn (MG58: $v_S \approx 10$ kn)

Die schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten in den Yachthafeneinfahrten während der „Wirkzeit“ einer Schiffspassage können in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit schon heute für kleinere Sportboote (z.B. Jollen) zu einer deutlichen Reduzierung des sicheren Manövrierens in der Yachthafeneinfahrt führen.

Die heute verkehrenden großen Container- und Massengutschiffe können als Einzelschiffe, und noch wesentlicher bei Begegnungen, bei der vom TDV festgelegten oberen Bemessungsgeschwindigkeit vor dem Hamburger Yachthafen ($v_S = 12$ kn) hohe langperiodische Wellen und Strömungsgeschwindigkeiten verursachen.

7.2.4.2 Prognose ausbaubedingter Änderungen im Referenzgebiet

7.2.4.2.1 Ausbauvarianten

Die geometrischen Änderungen der Ausbauvarianten im Untersuchungsabschnitt Begegnungstrecke zeigt die Grafik in Bild 22 im Querprofil.

Für die Variante 320 m-Trasse wurde die Fahrrinne vor der westlichen Yachthafenzufahrt auf eine Sohlage von -17,3 mNN gelegt und von rund 265 m Richtung Süden auf 320 m verbreitert. Die neue südliche Fahrrinnenböschung wurde mit einer Neigung von 1 : 10 eingebaut und an die natürliche Sohle angeschlossen. Des Weiteren wurde im nordwestlichen Bereich des Untersuchungsabschnitts die Fahrrinne an den zukünftigen Übergangsbereich zur Lühekurve angepasst. Die im Messquerschnitt vor dem Yachthafen zur Verfügung stehende wirksame Wasserstraßenquerschnittsfläche vergrößerte sich gegenüber dem Ist-Zustand von rund $A_{\text{IST}} \approx 9740 \text{ m}^2$ um etwa $\Delta A \approx +200 \text{ m}^2$ auf etwa $A_{320} \approx 9940 \text{ m}^2$ (Bezug ± 0 mNN). Durch die Verbreiterung der Fahrrinne verschob sich die Verkehrsspur der Aufkommer und Abgänger entsprechend nach Süden, so dass die Passierabstände zu den Yachthafeneinfahrten zunehmen, zum südlichen Ufer Hanskalbsand abnehmen werden.

In Bild 22 sind die Unterwasserquerprofile des Ist-Zustands (blau) sowie der Ausbauvarianten 320 m-Trasse (rot) und 385 m-Trasse mit Ablagerungsfläche (grün) mit dem hydrodynamisch wirksamen Bereich vor der Yachthafeneinfahrt Ost aufgetragen. Die auf dem Sohlniveau von -17,3 mNN vorgenommene zusätzliche Verbreiterung der Fahrrinne wiederum nach Süden um rund 65 m wird hinsichtlich des hydrodynamisch zur Verfügung stehenden Querschnitts im Systemversuch um die Ablagerungsfläche Hanskalbsand (Niveau auf -4,4 mNN) wiederum reduziert. Die Böschungsneigung der Ablagerungsfläche wurde mit 1 : 3 eingebaut und fixiert. Gegenüber den Abmessungen der 320 m-Trasse verringert sich die Querschnittsfläche um annähernd $\Delta A \approx -100 \text{ m}^2$ auf etwa $A_{320} \approx 9840 \text{ m}^2$ (Bezug ± 0 mNN).

Die Einbeziehung der Ablagerungsfläche in den Untersuchungsquerschnitt wurde gewählt, da zum Zeitpunkt der Untersuchungen die Umsetzung der Maßnahme noch nicht entschieden war. Unabhängig der Durchführung dieser Baumaßnahme liegen somit die Untersuchungsergebnisse auf der sicheren Seite, da die zusätzliche Einengung des Messquerschnitts zu einer Vergrößerung der schiffserzeugten Belastung führt. Diese Querschnittseinengung durch die Ablagerungsfläche Hanskalbsand beträgt im Messquerschnitt mit etwa $\Delta A \approx -370 \text{ m}^2$ etwa 4 % der Gesamtquerschnittsfläche von rund $A \approx 10.200 \text{ m}^2$ (385 m-Trasse ohne Ablagerungsfläche, Bezug ± 0 mNN).

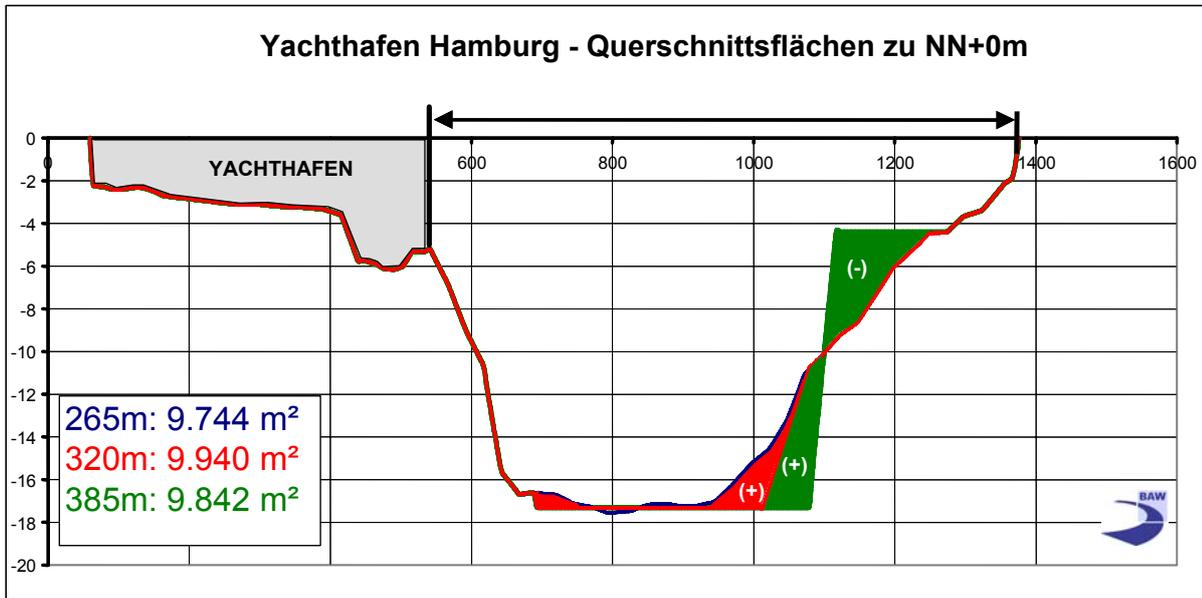


Bild 22: Unterwasserquerprofile des Ist-Zustands (blau) sowie der Ausbauvarianten 320 m-Trasse (rot) und 385 m-Trasse mit Ablagerungsfläche (grün) mit den hydrodynamisch wirksamen Flächenangaben vor der Yachthafeneinfahrt Ost

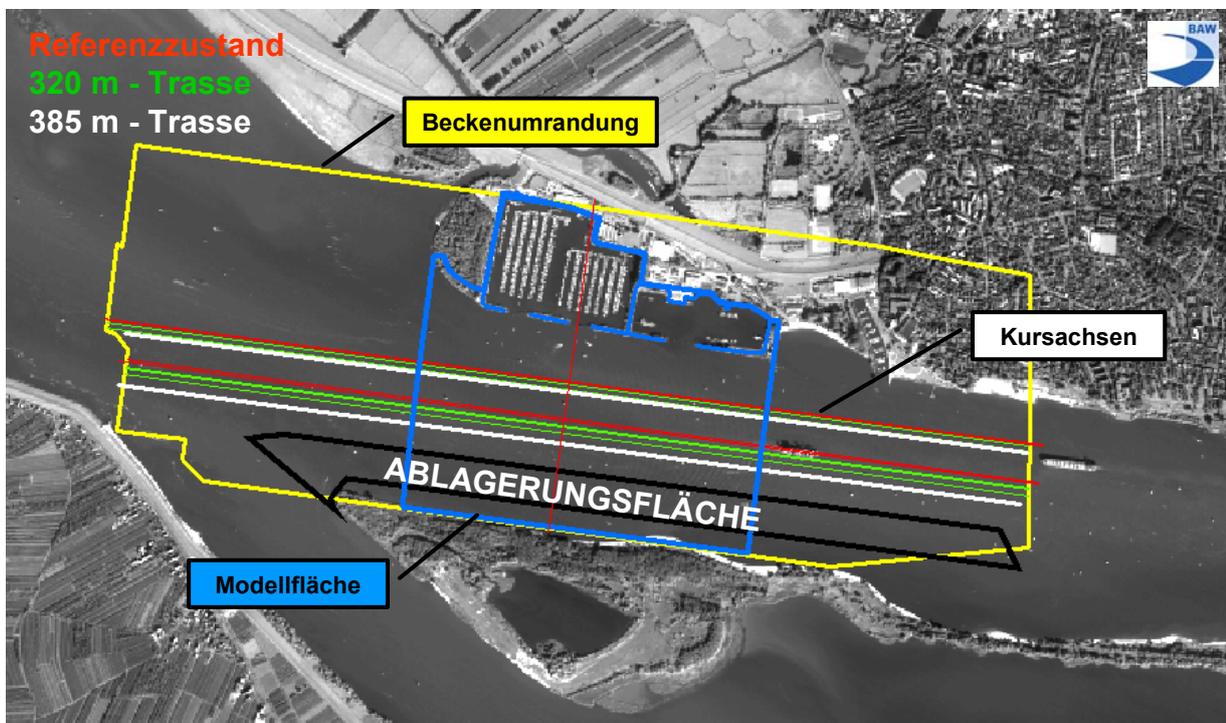


Bild 23: Luftbild des Untersuchungsabschnitts Begegnungstrecke Wedel mit Kursachsen der Begegner im hydraulischen Modell für den Ist-Zustand (rot), bei der 320 m-Trasse (grün) sowie bei der 385 m-Trasse (weiß)



Zur Verdeutlichung der Verschiebung der Radarlinie (RaL) und der Verkehrsspuren in Zusammenhang mit der Verbreiterung der Fahrrinne in Richtung Süden sind die Kursachsen der Begegner im hydraulischen Modell für den Ist-Zustand (rot), für die 320 m-Trasse (grün; $\Delta RaL_{SUED} \approx +34$ m) sowie für die 385 m-Trasse (weiß; $\Delta RaL_{SUED} \approx +67$ m) in das Luftbild des Untersuchungsabschnitts eingetragen (Bild 23). Die Passierabstände zur Yachthafeneinfahrt Ost vergrößern sich bis zu rund $\Delta L_{AB} \approx 45$ m für die Abgänger sowie bis zu etwa $\Delta L_{AUF} \approx 110$ m für die aufkommende Schifffahrt, wenn diese nur mit dem jeweils vorgeschriebenen Sicherheitsabstand zur Fahrrinnenkante verkehren (vergl. Anlage 1).

Die Prognosen der schiffserzeugten Belastungen infolge zukünftig zulässiger Schiffsbegegnungen für die gewählten Ausbauvarianten werden in den folgenden Abschnitten jeweils mit den Ergebnissen des Ist-Zustands aufgetragen, um die ausbaubedingten Änderungen für diesen Untersuchungsabschnitt zu dokumentieren und zu bewerten.

7.2.4.2.2 Belastungsänderungen bei den Ausbauvarianten 320m- und 385m-Trasse

7.2.4.2.2.1 MG58 / PM32 - Ist-Zustand zu MG58 / PPM46 - 385m-Trasse bei Thw

Die Passagen der derzeit zugelassenen Begegnungen des MG58 mit dem PM32 im Untersuchungsabschnitt Hamburger Yachthafen mit einer Gesamtbreite von $b_{GES} = 90$ m werden den zukünftig zugelassenen Begegnern MG58 und PPM46 mit $b_{GES} = 104$ m gegenübergestellt. In Bild 24 sind die jeweiligen Fahrkurven der größten zugelassenen Begegner der jüngsten und der zukünftigen Fahrrinnenanpassung zusammengestellt. Die Begegnungsgeschwindigkeit des Massengutschiffs lag jeweils $\Delta v_s \approx -2$ Kn unter der des jeweiligen Containerschiffs.

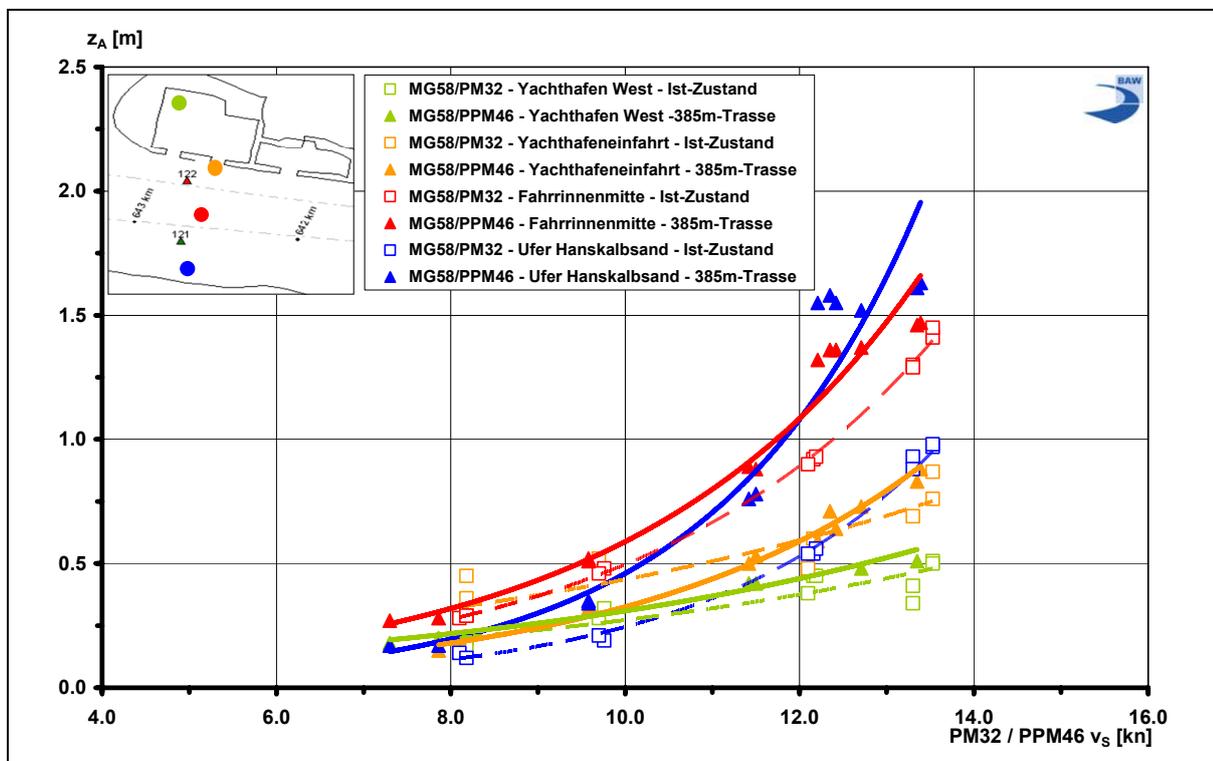


Bild 24: Geschwindigkeitsabhängiger Absink für Begegnungen von MG58 mit PM32 im Ist-Zustand und für die Begegnungen von MG58 und PPM46 bei der 385m-Trasse (Thw)

Ausgehend von dem heute zulässigen maximalen Begegnungsverkehr im Abschnitt Hamburger Yachthafen und den zukünftig zugelassenen Begegnungen wird folgende Änderung der Wellenbelastung prognostiziert:

- Am Ufer Hanskalbsand verdoppelt sich die Absunkwelle um etwa $\Delta z_A \approx +0,25$ m auf rund $z_A \approx 0,45$ m ($v_{S,CONT} = 10$ kn) bzw. um annähernd $\Delta z_A \approx +0,55$ m auf rund $z_A \approx 1,1$ m ($v_{S,CONT} = 12$ kn).
- In Fahrrinnenmitte wird bei einem deutlich geringeren Querschnittsverhältnis ($n_{IST} = 9,2$; $n_{385} = 7,0$) die langperiodische Belastung um etwa $\Delta z_A \approx +0,1$ m auf rund $z_A \approx 0,6$ m ($v_{S,CONT} = 10$ kn) bzw. um annähernd $\Delta z_A \approx +0,2$ m auf rund $z_A \approx 1,1$ m ($v_{S,CONT} = 12$ kn) ansteigen.
- In der Yachthafeneinfahrt ist bei geringen Geschwindigkeiten mit einer Abnahme der langperiodischen Wellenbelastung um etwa $\Delta z_A \approx -0,1$ m auf rund $z_A \approx 0,3$ m zu rechnen, während bei Schiffsgeschwindigkeiten von $v_{S,CONT} = 12$ kn eine gleich bleibende Belastung von rund $z_A \approx 0,6$ m zu erwartet ist.
- Im Yachthafen selbst (Beispiel: Yachthafen West) werden aufgrund der äußeren Anregung die langperiodischen maximalen Wellenbelastungen geringfügig um Werte unter $\Delta z_A < 0,1$ m auf rund $z_A \approx 0,3$ m ($v_{S,CONT} = 10$ kn) bzw. auf annähernd $z_A \approx 0,45$ m ($v_{S,CONT} = 12$ kn) zunehmen.

Die Sekundärwellenbelastung wird am Ufer Hanskalbsand und in der Fahrrinne tendenziell zunehmen, bleibt aber unter den o.a. Grenzbedingungen und wird nicht weiter betrachtet.

Im Vergleich der Begegnungssituationen im Ist-Zustand und bei der 385m-Trasse werden sich die schiffserzeugten Strömungsbedingungen bei Thw wie folgt ändern (v_S der Containerschiffe):

- Ufer Hanskalbsand: $v_{S,CONT} = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,2$ m/s auf $v_R \approx 0,4$ m/s
 $v_{S,CONT} = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,5$ m/s auf $v_R \approx 0,8$ m/s
- Südl. Fahrrinnenkante: $v_{S,CONT} = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,2$ m/s auf $v_R \approx 0,7$ m/s
 $v_{S,CONT} = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,4$ m/s auf $v_R \approx 1,1$ m/s
- Nördl. Fahrrinnenkante: $v_{S,CONT} = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1$ m/s auf $v_R \approx 0,4$ m/s
 $v_{S,CONT} = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1$ m/s auf $v_R \approx 0,5$ m/s
- Nördl. Böschung: $v_{S,CONT} = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1$ m/s auf $v_R \approx 0,5$ m/s
 $v_{S,CONT} = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1$ m/s auf $v_R \approx 0,7$ m/s
- Yachthafeneinfahrt: $v_{S,CONT} = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,3$ m/s auf $v_{AUS} \approx 1,8$ m/s
 $v_{S,CONT} = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,3$ m/s auf $v_{AUS} \approx 2,3$ m/s

Die Strömungserhöhungen am südlichen Uferabschnitt sind im wesentlichen durch die Querschnittseinengung der Ablagerungsfläche bewirkt. Ohne Ablagerungsfläche werden im südlichen Uferbereich geringere Strömungszunahmen erwartet, die aber aufgrund des geringeren Passierabstands des MG58 über den Werten der Passagen MG58 / PM32 im Ist-Zustand liegen werden. Die o.a. Werte liegen damit auf der sicheren Seite.



Am nördlichen Uferabschnitt werden infolge des größeren Passierabstands geringere Strömungserhöhungen auftreten als in dem südlichen Unterelbeabschnitt.

In der Yachthafeneinfahrt muss schon bei Schiffsgeschwindigkeiten von $v_{S,CONT} = 10$ kn mit einer deutlichen Erhöhung der Ausstromgeschwindigkeit zwischen den Spundwänden gerechnet werden, da – gleich bleibende Schiffsgeschwindigkeit vorausgesetzt - das um etwa $\Delta l \approx 50$ m längere Containerschiff PPM46 eine stärkere Gefälleströmung zwischen dem Absunk am Schiff und dem Wasserstand im Yachthafen ermöglicht.

7.2.4.2.2.2 MG58 / PPM46 – 320m- und 385m-Trasse bei Thw

Als Vergleich der Ausbauvarianten wurde die Begegnung des Bemessungsschiffs PPM46 ($t = 14,5$ m) als Abgänger mit dem aufkommenden Massengutschiff MG58 ($t = 15,5$ m) bei den Varianten 320m-Trasse und 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche bei Hochwasser (+1,28 mNN) untersucht, um die Wirkung der Verbreiterung auf die schiffserzeugten Belastungen bewerten zu können. Die Passierabstände zur Yachthafeneinfahrt betragen bei der 320m-Trasse $L_{YH} = 267$ m (PPM46) und $L_{YH} = 429$ m (MG58) und bei der 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche $L_{YH} = 282$ m (PPM46) und $L_{YH} = 506$ m (MG58) bei dem jeweiligen Querschnittsverhältnis von $n = 7$.

Die langperiodische Absunkbelastung für die Varianten 320m-Trasse (Quadrate) und 385m-Trasse (Dreiecke) ist in Bild 25 für das Ufer Hanskalbsand (blau), die Fahrrinnenmitte (rot), die Yachthafeneinfahrt (gelb) sowie den Yachthafen West (grün) aufgetragen. Die Passiergeschwindigkeit des Massengutschiffs lag jeweils $\Delta v_S \approx -2$ kn unter der des Containerschiffs.

Als Ergebnis ist im Vergleich der Varianten 320m- und 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche festzuhalten:

- Am Ufer Hanskalbsand verdoppelt sich die Absunkwelle bei der 385m-Trasse um etwa $\Delta z_A \approx +0,25$ m auf rund $z_A \approx 0,5$ m ($v_{S,PPM46} = 10$ kn) bzw. um annähernd $\Delta z_A \approx +0,6$ m auf rund $z_A \approx 1,1$ m ($v_{S,PPM46} = 12$ kn). Bei der Überlagerung der jeweiligen Absunkwellen ist für das südliche Ufer das durch das Massengutschiff bestimmte Teilquerschnittsverhältnis maßgebend, das bei Einrechnung der Ablagerungsfläche nur $n_T = 5$ beträgt.
- Zwischen den Begegnern in Fahrrinnenmitte bleibt trotz eines leicht geringeren Querschnittsverhältnisses ($n_{320} = 7,02$; $n_{385} = 6,95$) die langperiodische Belastung bis zu Begegnungsgeschwindigkeiten von $v_{S,PPM46} = 12$ kn ($z_A \approx 1,0$ m) in etwa gleich, da der Passierabstand untereinander von $L_{S,320} = 160$ m auf $L_{S,385} = 225$ m ansteigt.

- In der Yachthafeneinfahrt ist bei geringen Geschwindigkeiten $v_{S,PPM46} < 10$ kn mit einer gleich bleibenden langperiodischen Wellenbelastung zu rechnen, während bei Schiffsgeschwindigkeiten von $v_{S,PPM46} = 12$ kn eine Zunahme um etwa $\Delta z_A \approx +0,1$ m auf rund $z_A \approx 0,6$ m zu erwartet ist. Bei der Überlagerung der jeweiligen Absunkwellen ist für das nördliche Ufer der größere Passierabstand des PPM46 zum Yachthafen ($\Delta L_{YH} = +15$ m) maßgebend; die Ablagerungsfläche wird nicht wirksam.
- Im Yachthafen selbst (Beispiel: Yachthafen West) bleibt die Belastung bei beiden Ausbauvarianten annähernd gleich.

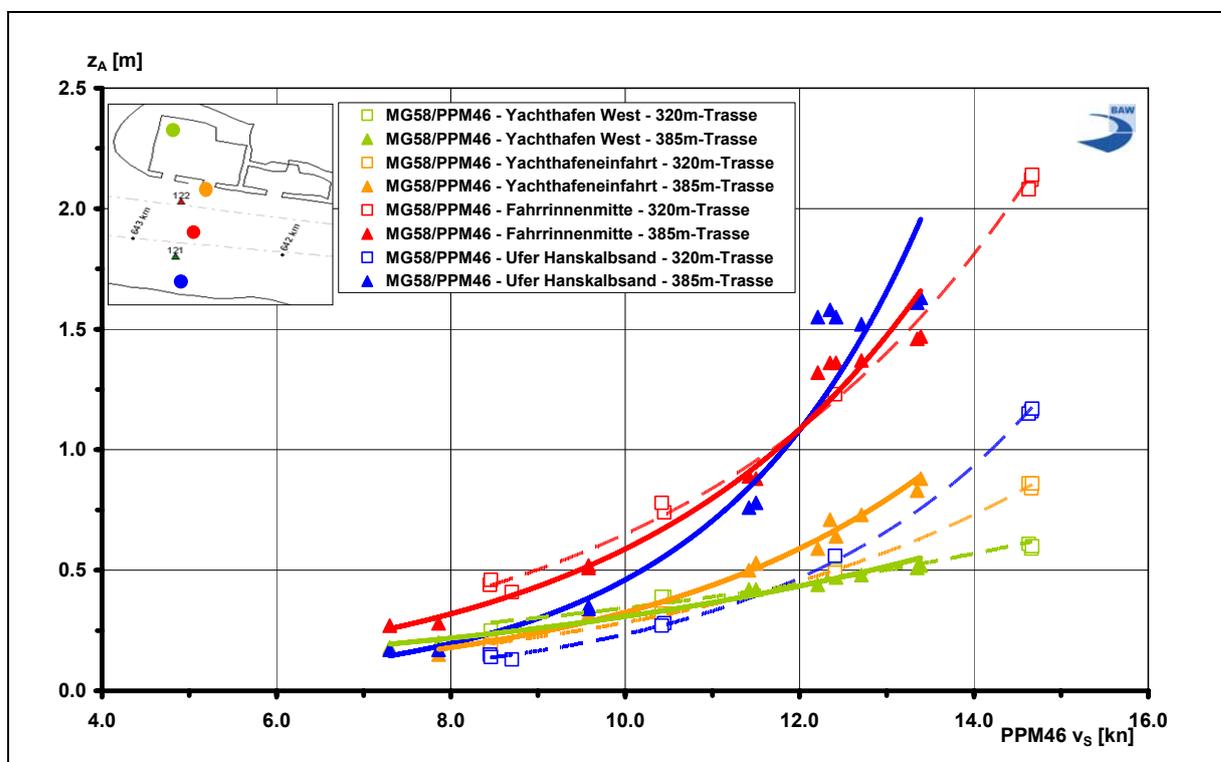


Bild 25: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk bei der Begegnung des MG58 mit dem PPM46 für die Varianten 320m- und 385m-Trasse (Thw) an ausgewählten Positionen

Bei der Sekundärwellenbelastung wird bei der Variante 385m-Trasse tendenziell mit höheren Werten am Ufer Hanskalbsand, in Fahrrinnenmitte und vor der Yachthafeneinfahrt zu rechnen sein, wobei erst ab Schiffsgeschwindigkeiten von über $v_{S,PPM46} > 13$ kn die Grenzbedingungen im Nahbereich des Schiffs von $H_{S,MODELL} > 2$ cm ($H_{S,NATUR} > 0,8$ m) erreicht werden. Im Yachthafen selbst werden bezüglich der Sekundärwellen keine Veränderungen eintreten.

Im Vergleich zur Variante 320m-Trasse werden sich für die 385m-Trasse die schiffserzeugten Strömungsbedingungen bei der Begegnung MG58 / PPM46 wie folgt ändern:



- Ufer Hanskalbsand: $v_{S,PPM46} = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,4 \text{ m/s}$
 $v_{S,PPM46} = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,5 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,8 \text{ m/s}$
- Südl. Fahrrinnenkante: $v_{S,PPM46} = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,7 \text{ m/s}$
 $v_{S,PPM46} = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,45 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,1 \text{ m/s}$
- Nördl. Fahrrinnenkante: $v_{S,PPM46} = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,35 \text{ m/s}$
 $v_{S,PPM46} = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,5 \text{ m/s}$
- Nördl. Böschung: $v_{S,PPM46} = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx \pm 0,0 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,45 \text{ m/s}$
 $v_{S,PPM46} = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,7 \text{ m/s}$
- Yachthafeneinfahrt: $v_{S,PPM46} = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx \pm 0,0 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 1,7 \text{ m/s}$
 $v_{S,PPM46} = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 2,2 \text{ m/s}$

Die Zusammenstellung der variantenabhängigen Strömungsänderungen im Messquerschnitt verdeutlicht, dass im südlichen Querschnittsbereich aufgrund des geringeren Passierabstands und der Querschnittseinengung durch die Ablagerungsfläche mit einer starken Belastungserhöhung gerechnet werden muss. Im nördlichen Abschnitt und in der Yachthafeneinfahrt bleibt die Strömungsbelastung trotz des etwas größeren Passierabstands annähernd gleich.

7.2.4.2.2.3 PM32/PPM40 - Ist-Zustand zu PPM46/PPM46 - 385m-Trasse bei Tnw

Da im Ist-Zustand die maximale Wellenbelastung bei Passagen während Tideniedrigwasser gemessen wurde, sind desgleichen Versuchsserien mit der Begegnung sehr großer Containerschiffe bei örtl. Tnw gefahren worden. Als Vergleich mit dem Ist-Zustand (Begegnung PM32 / PPM40; $t = 12,8 \text{ m} / 12,7 \text{ m}$) wurde die Begegnung zweier Bemessungsschiffe PPM46 ($t = 13,8 \text{ m}$) bei der Variante 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche aufgetragen (Bild 26). Die Passierabstände zur Yachthafeneinfahrt betragen im Ist-Zustand $L_{YH} = 231 \text{ m}$ (PPM40) und $L_{YH} = 401 \text{ m}$ (PM32) und bei der 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche $L_{YH} = 282 \text{ m}$ (PPM46) und $L_{YH} = 506 \text{ m}$ (PPM46) bei den jeweiligen Querschnittsverhältnis von $n = 10$ im Ist-Zustand und $n = 7,5$ bei der 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche.

Die langperiodische Absinkbelastung für die Begegnungsvarianten im Ist-Zustand (Quadrate) und 385m-Trasse (Dreiecke) ist in Bild 26 für das Ufer Hanskalbsand (blau), die Fahrrinnenmitte (rot), die Yachthafeneinfahrt (gelb) sowie den Yachthafen West (grün) aufgetragen. Als Ergebnis des Vergleichs der Absinkwerte infolge der Begegnung von Containerschiffen im Ist-Zustand (PM32/PPM40) und bei der 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche (PPM46/PPM46) bei örtl. Tnw ist festzuhalten:

- Am Ufer Hanskalbsand (blaue Kurven) erhöht sich die Absinkwelle um etwa $\Delta z_A \approx +0,4 \text{ m}$ auf rund $z_A \approx 0,8 \text{ m}$ ($v_{S,PPM46} = 10 \text{ kn}$) bzw. um annähernd $\Delta z_A \approx +0,6 \text{ m}$ auf rund $z_A \approx 1,3 \text{ m}$ ($v_{S,PPM46} = 12 \text{ kn}$). Bei der Überlagerung der je-

weiligen Absunkwellen ist für das südliche Ufer vor allem der geringere Passierabstand mit $\Delta L \approx -100$ m, aber auch das deutlich größere Containerschiff mit einer Breitendifferenz von $\Delta b \approx +14$ m ($\Delta t = +1$ m) maßgebend.

- Zwischen den Begegnern in Fahrrinnenmitte (rote Kurven) ist wegen des geringeren Querschnittsverhältnisses von $\Delta n = -2,5 = -25\%$ ($n_{IST} = 10$; $n_{385} = 7,5$) eine Erhöhung der langperiodischen Belastung auch schon bei Begegnungsgeschwindigkeiten von $v_S = 10$ kn ($\Delta z_A \approx +0,1$ m) zu erwarten, obwohl der Passierabstand zwischen den Containerschiffen um etwa +50 m ansteigt (bei $v_S = 12$ kn wird $\Delta z_A \approx +0,2$ m).

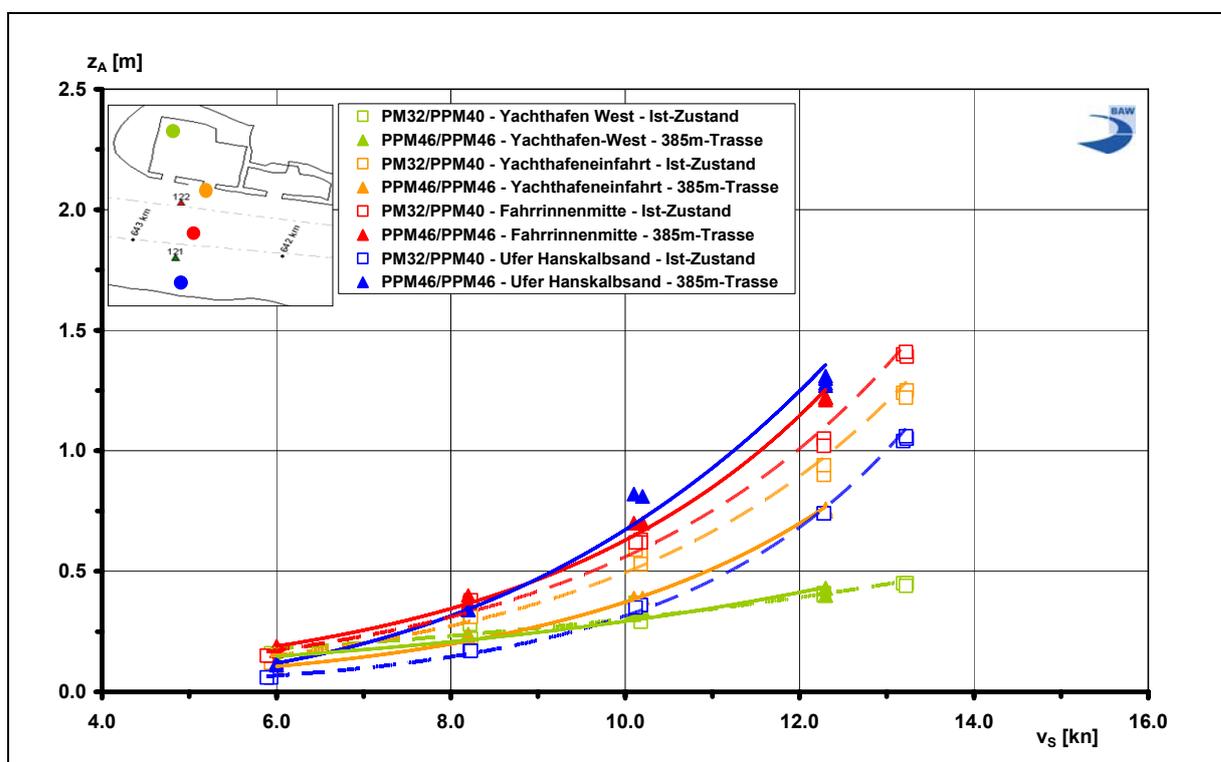


Bild 26: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk für Begegnungen von PM32 mit PPM40 im Ist-Zustand und für die Begegnungen von PPM46 und PPM46 bei der 385m-Trasse (örtl. Tnw)

- In der Yachthafeneinfahrt (orange Kurven) ist generell mit geringeren langperiodischen Wellenbelastungen zu rechnen, da der Passierabstand des PPM46 gegenüber dem heutigen Zustand (PPM40) um rund $\Delta L_{YH} \approx +50$ m zunimmt. Bei einer Begegnungsgeschwindigkeit von $v_S = 10$ kn ist mit einer Abnahme der langperiodischen Wellenbelastung um etwa $\Delta z_A \approx -0,1$ m zu rechnen, während bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn ein Rückgang um rund $\Delta z_A \approx -0,2$ m zu verzeichnen sein wird.



- Im Yachthafen selbst (Beispiel: Yachthafen West; grüne Kurven) bleibt die Belastung - trotz geringeren Energieeintrags von außen - aufgrund der internen Beckenschwingungen gleich.

Im Vergleich der Begegnungen großer Containerschiffe bei Tnw im Ist-Zustand und bei der 385m-Trasse werden sich die schiffserzeugten Strömungsbedingungen wie folgt ändern:

- Ufer Hanskalbsand: $v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,3 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,4 \text{ m/s}$
 $v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,25 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,45 \text{ m/s}$
- Südl. Fahrrinnenkante: $v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,5 \text{ m/s}$
 $v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,35 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,7 \text{ m/s}$
- Nördl. Fahrrinnenkante: $v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx -0,2 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,5 \text{ m/s}$
 $v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx -0,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,8 \text{ m/s}$
- Nördl. Böschung: $v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx \pm 0,0 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,7 \text{ m/s}$
 $v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,3 \text{ m/s}$
- Yachthafeneinfahrt: $v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx -0,1 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 1,4 \text{ m/s}$
 $v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 1,8 \text{ m/s}$

Die Zusammenstellung der variantenabhängigen Strömungsänderungen im Messquerschnitt verdeutlicht, dass im südlichen Querschnittsbereich aufgrund des geringeren Passierabstands und der Querschnittseinengung durch die Ablagerungsfläche mit einer starken Belastungserhöhung gerechnet werden muss. An der nördlichen Fahrrinnenkante wird aufgrund des größeren Passierabstands die Strömungsbelastung zurückgehen. Die schiffserzeugte Strömung auf der Böschung ist von der Absinkströmung aus der Yachthafeneinfahrt beeinflusst. In Abhängigkeit der Passiergeschwindigkeit der Schiffe wird eine gleich bleibende ($v_S = 10 \text{ kn}$) oder zunehmende ($v_S = 12 \text{ kn}$) Strömungsbelastung prognostiziert.

7.2.4.2.2.4 PPM40 / PPM46 - 320m- und 385m-Trasse bei Tnw

Um die Unterschiede der Ausbauvarianten 320m- und 385m-Trasse (incl. Ablagerungsfläche) für Tideniedrigwasserpässagen herauszuarbeiten, wurden in der nächsten Grafik jeweils die geschwindigkeitsabhängigen Begegnungsszenarien der großen Containerschiffe, PPM40 als Aufkommer und PPM46 als Abgänger, aufgetragen (Bild 27).

Bei der 320m-Trasse betragen die Passierabstände zur Yachthafeneinfahrt $L_{YH} = 267 \text{ m}$ (PPM46) und $L_{YH} = 458 \text{ m}$ (PPM40) bei einem Querschnittsverhältnis von $n_{320} = 7,8$ (jeweils $t = 13,5 \text{ m}$). Bei der Begegnung der gleichen Containerschiffe (jetzt jeweils $t = 13,8 \text{ m}$) in der 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche betragen die Passierabstände $L_{YH} = 282 \text{ m}$ (PPM46) und $L_{YH} = 506 \text{ m}$ (PPM40) und das Querschnittsverhältnis erhöhte sich leicht auf $n = 8,0$. Der Passierabstand zur Yachthafeneinfahrt vergrößerte sich bei der

385m-Trasse lediglich um $\Delta L_{YH,PPM46} = +15$ m für den Abgänger, aber um etwa $\Delta L_{YH,PPM40} \approx +50$ m für den Aufkommer.

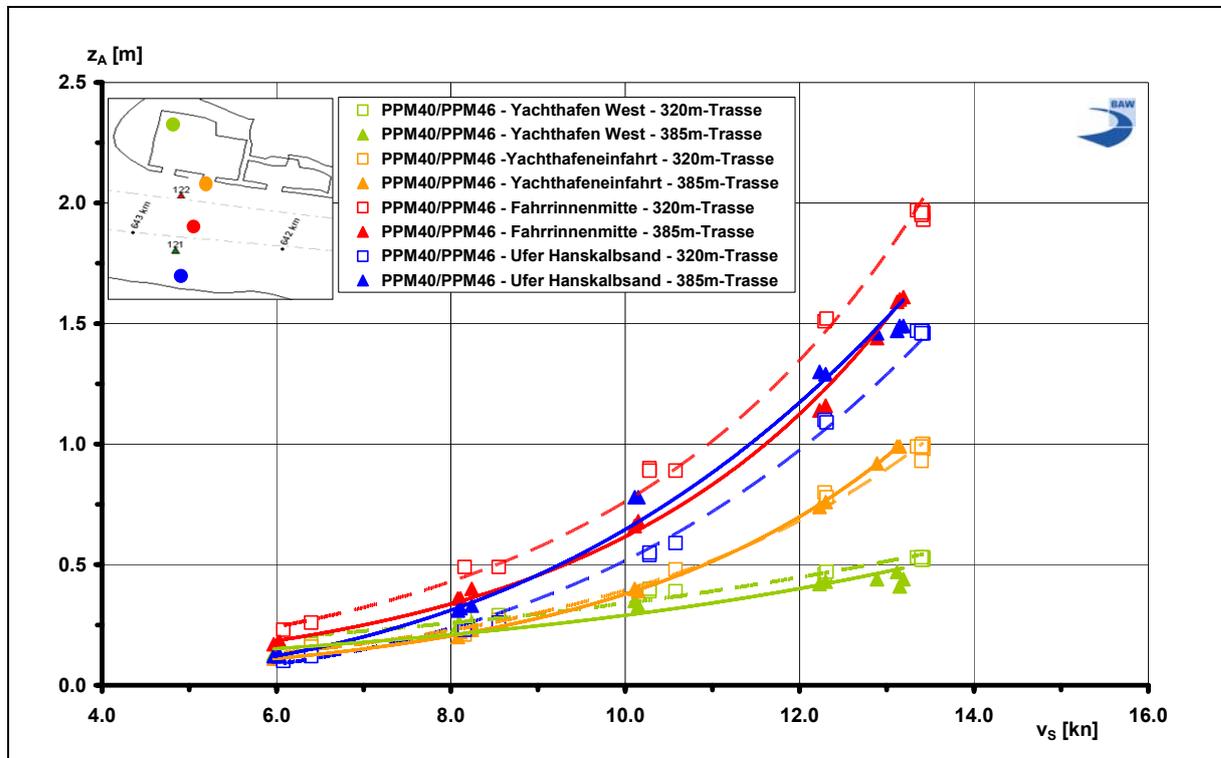


Bild 27: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk für Begegnungen von PPM40 mit PPM46 bei der 320m-Trasse und bei der 385m-Trasse (örtl. Tnw)

Beim Vergleich der Absunkwerte für die Begegnung der ausgewählten Containerschiffe (PPM40/PPM46) bei der 320m- und 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche bei örtl. Tnw ist festzuhalten:

- Am Ufer Hanskalbsand (blaue Kurven) erhöht sich die Absunkwelle um etwa $\Delta z_A \approx +0,2$ m auf rund $z_A \approx 0,7$ m ($v_{S,PPM46} = 10$ kn) bzw. um annähernd $\Delta z_A \approx +0,25$ m auf rund $z_A \approx 1,2$ m ($v_{S,PPM46} = 12$ kn). Bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten über $v_S > 12$ kn wird die Sohlreibung der auf -4,4 mNN horizontal eingebauten Unterwasserablagefläche aufgrund der geringen Wasserüberdeckung bei Tnw ($h \approx 2,8$ m abzüglich Absunk) stärker wirksam. Die Absunkwerte auf der Ablagerungsfläche zeigen keine weitere überproportionale Zunahme wie in der Fahrrinne, sondern sinken nicht über Werte von etwa $z_A \approx 1,5$ m ab.
- In Fahrrinnenmitte (rote Kurven) ist wegen des etwa gleich bleibenden Querschnittsverhältnisses von $n \approx 8$, aber einem größeren Abstand zwischen den Begegnern von +30 m eine Verringerung der Wellenbelastung um etwa $\Delta z_A \approx -0,1$ m bei $v_S = 10$ kn und rund $\Delta z_A \approx -0,2$ m bei $v_S = 12$ kn zu erwarten.



- In der Yachthafeneinfahrt (orange Kurven) ist sowohl bei $v_S = 10$ kn als auch bei $v_S = 12$ kn von einer gleich bleibenden langperiodischen Wellenbelastungen auszugehen, da der Passierabstand des Abgängers (PPM46) gegenüber der 320m-Trasse um rund $\Delta L_{YH,PPM4} \approx +15$ m zunimmt. Bei höheren Begegnungsgeschwindigkeiten von deutlich über $v_S > 12$ kn ist tendenziell mit einer Zunahme der Wellenbelastung zu rechnen.
- Im Yachthafen selbst (grüne Kurven) ist beim Vergleich der Ausbauvarianten ein leichter Rückgang der Amplitude der internen Beckenschwingungen bei der 385m-Trasse festzustellen.

Beim Vergleich der Ausbauvarianten untereinander (320m- zu 385m-Trasse) sind bei den Begegnungen großer Containerschiffe bei Tnw (PPM40 / PPM46) folgende Änderungen der schiffserzeugten Strömungsbedingungen festzustellen:

- Ufer Hanskalbsand: $v_S = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,45$ m/s auf $v_R \approx 0,8$ m/s
 $v_S = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +1,0$ m/s auf $v_R \approx 1,5$ m/s
- Südl. Fahrrinnenkante: $v_S = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx -0,15$ m/s auf $v_R \approx 0,45$ m/s
 $v_S = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx -0,1$ m/s auf $v_R \approx 0,65$ m/s
- Nördl. Fahrrinnenkante: $v_S = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx \pm 0,0$ m/s auf $v_R \approx 0,5$ m/s
 $v_S = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1$ m/s auf $v_R \approx 0,5$ m/s
- Nördl. Böschung: $v_S = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx \pm 0,0$ m/s auf $v_R \approx 0,7$ m/s
 $v_S = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1$ m/s auf $v_R \approx 1,3$ m/s
- Yachthafeneinfahrt: $v_S = 10$ kn $\Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx \pm 0,0$ m/s auf $v_{AUS} \approx 1,5$ m/s
 $v_S = 12$ kn $\Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,1$ m/s auf $v_{AUS} \approx 1,9$ m/s

Die starken Veränderungen der schiffserzeugten Rückströmung am Ufer Hanskalbsand hängen direkt mit der auf -4,4mNN eingebauten Ablagerungsfläche bei der Variante 385m-Trasse zusammen: Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten sind auf die im Vergleich zur 320m-Trasse geringe Wasserüberdeckung auf der Ablagerungsfläche und des somit stark eingeschränkten Strömungsquerschnitt zurückzuführen. Wird die im Modell eingebaute Ablagerungsfläche in der endgültigen Ausbauvariante nicht umgesetzt, werden am Ufer Hanskalbsand Strömungsamplituden etwa in der Größenordnung der südlichen Fahrrinnenkante zu erwarten sein. An der südlichen Fahrrinnenkante liegt die schiffsinduzierte Rückströmung bei der 385m-Trasse leicht unter den Werten der 320m-Trasse.

Die Strömungsänderungen am nördlichen Ufer und in der Yachthafeneinfahrt zeigen, dass aufgrund des größeren Passierabstands bei der breiteren Begegnungsstrecke die Strömungsbelastungen bei $v_S = 10$ kn annähernd gleich sind, aber bei $v_S = 12$ kn die höhere Verdrängungsströmung nicht mehr durch den Passierabstand kompensiert wird.

7.2.4.2.3 Bewertung ausbaubedingter Änderungen im Referenzgebiet

Die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen für das Referenzgebiet betreffen den Begegnungsverkehr beim Vergleich des Ist-Zustands mit den Ausbauvarianten 320m-Trasse sowie 385m-Trasse.

Zur Übersichtlichkeit sind die Absunkwerte im Ist-Zustand (schwarz) und die prognostizierten Differenzen zu den Varianten 320m- und 385m-Trasse (rot) für die derzeitige Bemessungsgeschwindigkeit im Untersuchungsabschnitt Hamburger Yachthafen ($v_{S,CONT} = 12 \text{ Kn}$) tabellarisch zusammengestellt (Tabelle 9).

z_A und Δz_A bei $v_{S,CONT} \approx 12 \text{ kn}$	Südliches Ufer			Fahrrinnenmitte			Nördliches Ufer Yachthafeneinfahrt			Yachthafen West		
	$z_{A,IST}$ [m]	Δ_{320} [m]	Δ_{385} [m]	$z_{A,IST}$ [m]	Δ_{320} [m]	Δ_{385} [m]	$z_{A,IST}$ [m]	Δ_{320} [m]	Δ_{385} [m]	$z_{A,IST}$ [m]	Δ_{320} [m]	Δ_{385} [m]
PM32/PPM40 - PPM40/PPM46 Tnw	0,7	+0,2	+0,5	1,0	+0,3	+0,2	0,9	-0,2	-0,2	0,4	±0	±0
PM32/PPM40 - PPM46/PPM46 Tnw	0,7		+0,6	1,0		+0,2	0,9		-0,2	0,4		±0
PPM40/PPM46 - PPM40/PPM46 Tnw		$z_{A,320}$ 1,0	+0,2		$z_{A,320}$ 1,3	-0,1		$z_{A,320}$ 0,7	±0		$z_{A,320}$ 0,4	-0,05
PPM40/PPM46 - PPM46/PPM46 Tnw		$z_{A,320}$ 1,0	+0,3		$z_{A,320}$ 1,3	-0,1		$z_{A,320}$ 0,7	±0		$z_{A,320}$ 0,4	±0
MG58/PM32 - MG58/PPM46 Thw *	0,5	±0	+0,6	0,9	+0,2	+0,2	0,6	-0,1	±0	0,4	+0,05	+0,05

* PM32 $v_S \approx 12 \text{ kn}$, MG58 $v_S \approx 10 \text{ Kn}$

Tabelle 9: Zusammenstellung der Absunkwerte im Ist- bzw. Vergleichs-Zustand (schwarz) und der prognostizierten Differenzen für die Varianten 320m- bzw. 385m-Trasse (rot) bei $v_{S,CONT} = 12 \text{ kn}$ (MG58: $v_S \approx 10 \text{ kn}$)

Die in Tabelle 9 zusammengestellten Ergebnisse und ausbaubedingten Änderungen im Referenzgebiet bei Bezug auf die Bemessungsgeschwindigkeit $v_{S,CONT} = 12 \text{ Kn}$ verdeutlichen, dass die höchsten langperiodischen, schiffserzeugten Wellenbelastungen bei Begegnungsverkehr schon im Ist-Zustand und auch zukünftig bei tideunabhängigen Verkehr während Tideniedrigwasser auftreten werden.



Die maximale Strömungsbelastung in der Yachthafeneinfahrt wird – gleich bleibende Schiffsgeschwindigkeit vorausgesetzt - zukünftig weiter zunehmen und ist - wie schon im Ist-Zustand - vor allem aufgrund der zunehmenden Schiffslänge ($\Delta l > +50$ m) und der daraus folgenden ausgeprägteren Gefälleströmung bei Tideniedrigwasser zu erwarten.

Die Bewertung der Belastungsänderungen für das Referenzgebiet infolge der größeren und tiefer gehenden Containerschiffe, deren Begegnungen untereinander sowie deren Begegnungen mit einem großen Massengutschiff lässt sich wie folgt zusammenfassen ($v_s = \text{konstant}$):

- Eine deutliche Belastungszunahme ist am südlichen Uferabschnitt durch die Erweiterung der Fahrrinne nach Süden und eine dementsprechende Verschiebung der Radarlinie nach Süden zum Ufer Hanskalbsand hin zu erwarten.
- Infolge des größeren Passierabstands ist am nördlichen Ufer trotz größerer, tiefergehender Schiffe mit annähernd gleichen Wellenbelastungen wie im Ist-Zustand zu rechnen.
- Für den Yachthafen werden annähernd gleiche Wellenbelastungen wie im Ist-Zustand prognostiziert, da die anregende Energie am nördlichen Ufer etwa gleich bleibt.
- Die zukünftig längeren und breiteren Schiffe verursachen bei gleicher Schiffsgeschwindigkeit in den Yachthafenzufahrten eine Zunahme der resultierenden Strömung, da sich – u.a. aufgrund der längeren Absinkzeit - eine stärkere Gefälleströmung zwischen dem Absink am Schiff und dem Hafenwasserstand einstellen wird.
- Die maximale Wellenbelastung am nördlichen Uferabschnitt wird bei Tideniedrigwasser auftreten, wobei diese Belastung in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit leicht niedriger als heute ausfallen wird.

Die örtlichen ausbaubedingten Belastungsänderungen werden geringer ausfallen, wenn die lokale Bemessungsgeschwindigkeit im Untersuchungsabschnitt Hamburger Yachthafen z.B. auf $v_{s, \text{CONT}} = 10$ kn reduziert wird. Demzufolge wären im Referenzgebiet bei der 385m-Trasse z.B. bei der Begegnung Massengutschiff MG58 / Containerschiff PPM46 im Vergleich zum Ist-Zustand (MG58 / PM32) folgende - durchgehend abnehmende - Wellenbelastungen zu erwarten (Tabelle 10):

z _A und Δz _A bei Δv _S ≈ -2 kn	Südliches Ufer		Fahrrinnenmitte		Nördliches Ufer Yachthafeneinfahrt		Yachthafen West	
	z _{A,IST} [m]	z _{A,385} [m]	z _{A,IST} [m]	z _{A,385} [m]	z _{A,IST} [m]	z _{A,385} [m]	z _{A,IST} [m]	z _{A,385} [m]
MG58/PM32 v _{S,CONT} ≈ 12 kn* Thw	0,55		0,9		0,6		0,35	
MG58/PPM46 v _{S,CONT} ≈ 10 kn** Thw		0,5 (Δz _A = -0,05)		0,6 (Δz _A = -0,3)		0,35 (Δz _A = -0,2)		0,3 (Δz _A = -0,05)

* MG58 v_S ≈ 10 kn **MG58 v_S ≈ 8 Kn

Tabelle 10: Zusammenstellung der Absunkereignisse im Ist-Zustand bei v_{S,CONT} ≈ 12 kn (MG58: v_S ≈ 10 kn) und der prognostizierten Differenzen für die Variante 385m-Trasse bei v_{S,CONT} ≈ 10 kn (MG58: v_S ≈ 8 kn)

Die maximale Strömung in der Yachthafeneinfahrt wird dann bei der Begegnung dieser tideabhängig verkehrenden sehr großen Schiffseinheiten (MG58/PPM46; v_{S,CONT} ≈ 10 kn) bei annähernd v_{R,YH} ≈ 1,8 m/s (Δv_{R,YH} ≈ -0,2 m/s) liegen.

Bei der Begegnung von großen tideunabhängig verkehrenden Containerschiffen (PPM40/PPM46 oder PPM46/PPM46) sind bei einer Passagegeschwindigkeit von v_S = 10 kn in der Yachthafeneinfahrt etwa gleich bleibende Strömungswerte wie schon heute (z.B. PM32/PPM40) von etwa v_{R,YH} ≈ 1,4 m/s bis 1,5 m/s zu erwarten.

Durch die Messungen wird bestätigt, dass im Referenzgebiet neben dem Passierabstand zum Ufer im wesentlichen die Schiffsgeschwindigkeit das Maß der schiffserzeugten Belastungen bestimmt und die Belastungen durch eben diesen Parameter deutlich beeinflusst werden können, soweit die nautischen Erfordernisse dies zulassen. Diese Erkenntnis ist aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten allgemeingültig und kann auf das gesamte Revier übertragen werden.



7.2.5 Systemversuche im hydraulischen Modell

Zur Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen im Gesamtästuar wurden im hydraulischen Modell Systemversuche vorgenommen, die für Abschnitte der Seeschiffahrtsstraße ohne erforderliche Vertiefungsmaßnahmen gelten können und deren Ergebnisse für Vertiefungsabschnitte auf der sichern Seite liegen werden. Bei diesen Systemversuchen wurden sowohl die Unterwassertopografie, der Wasserstand (Tnw) als auch der Passierabstand (Abgänger) konstant gehalten. Lediglich die Schiffsgrößen und die Tiefgänge wurden variiert. Somit stehen für Vergleichszwecke ausgewählte Schiffe mit folgenden Passagen (Tabelle 11) zur Verfügung:

Name	Typ	Länge zw.d.L.	Breite b	Tiefgang t	$c_B = f(t, \dots)$ *	n	n_T NORD
	-	m	m	m	-	-	-
PM32	Containerschiff	280	32,3	12,8	0,684	23	11
PPM40	Containerschiff	320	40	12,8	0,724	19	9
PPM40	Containerschiff	320	40	13,8	0,732	17	8,5
PPM46	Containerschiff Bemessungsschiff	331	46	13,8	0,575	15	8

* c_B = tiefgangsabhängiger Blockfaktor = Verdrängungsvolumen / Länge x Breite x Tiefgang

Tabelle 11: Basisdaten der im hydraulischen Modell simulierten Schiffseinheiten für die Systemversuche sowie deren Querschnittsverhältnisse bei Tnw

Die Systemversuche wurden bei Tideniedrigwasser mit tideunabhängig, außermittig verkehrenden Containerschiffen vorgenommen, da während der Vorversuche bei diesen Randbedingungen die maximale langperiodische Wellenbelastung ermittelt wurde.

Für den Vergleich der Bemessungsschiffe der jüngsten und zukünftigen Fahrrinnenanpassung werden dem PM32 (t = 12,8 m) das PPM46 (t = 13,8 m) gegenübergestellt. Da heute schon Containerschiffe wie das PPM40 die Elbe befahren, werden zum Vergleich von Ist-Zustand und Ausbauzustand die Messungen für das PPM40 (t = 12,8 m) und für das PPM46 (t = 13,8 m) herangezogen. Den Einfluss des größeren Tiefgangs eines heute und zukünftig verkehrenden Containerschiffs zeigt der Vergleich des PPM40 mit t = 12,8 m bzw. t = 13,8 m Tiefgang.

Die Ergebnisse der Systemversuche sind für die Positionen nördliche Fahrrinnenkante, Fahrrinnenmitte und südliche Fahrrinnenkante als Fahrkurven in Bild 28 zusammengestellt.

In Fahrrinnenmitte und an den jeweiligen Fahrrinnenrändern werden folgende Änderung der Wellenbelastung infolge der Schiffsgrößenentwicklung (Breite und Tiefgang) prognostiziert:

- Da die Containerschiffe als Abgänger außermittig nahe der nördlichen Fahrrinnenkante fahren, treten hier auch die höchsten Wellen und Strömungsbelastungen auf. An der nördlichen Fahrrinnenkante (Bild 28; obere Grafik) ist beim Vergleich PM32 zu PPM46 ($\Delta n = -8$; $\Delta n_T \approx -3$) eine Zunahme der Absunkwelle um etwa $\Delta z_A \approx +0,2$ m auf rund $z_A \approx 0,5$ m ($v_S = 10$ kn) bzw. um annähernd $\Delta z_A \approx +0,4$ m auf rund $z_A \approx 0,9$ m ($v_S = 12$ kn) sowie um etwa $\Delta z_A \approx +0,5$ m auf rund $z_A \approx 1,2$ m ($v_S = 13$ kn; extrapoliert) zu erwarten. Erwartungsgemäß werden die Differenzen zwischen dem PPM40 und PPM46 infolge einer halbierten Differenz des Querschnittverhältnisses von $\Delta n = -4$ ($\Delta n_T \approx -1$) geringer ausfallen und etwa $\Delta z_A \approx +0,05$ m ($v_S = 10$ kn) bzw. $\Delta z_A \approx +0,15$ m ($v_S = 12$ kn) sowie rund $\Delta z_A \approx +0,15$ m ($v_S = 13$ kn; extrapoliert) betragen. Die Tiefgangserhöhung für das PPM40 um $\Delta t = +1,0$ m führt aufgrund der nur kleinen Änderungen der n-Verhältnisse ($\Delta n = -2$; $\Delta n_T = -0,5$) zu einer deutlich niedrigeren Wellenhöhenzunahme durch dieses Schiff: $\Delta z_A < +0,05$ m ($v_S = 10$ kn); $\Delta z_A \approx +0,05$ m ($v_S = 12$ kn); $\Delta z_A < +0,1$ m ($v_S = 13$ kn).
- In Fahrrinnenmitte (Bild 28; mittlere Grafik) zeigen sich deutliche Unterschiede in der Absunkbelastung vor allem beim Vergleich PM32 und PPM46: Zunahme um etwa $\Delta z_A \approx +0,2$ m auf rund $z_A \approx 0,4$ m ($v_S = 10$ kn), um annähernd $\Delta z_A \approx +0,3$ m auf rund $z_A \approx 0,65$ m ($v_S = 12$ kn) sowie um etwa $\Delta z_A \approx +0,4$ m auf rund $z_A \approx 0,9$ m ($v_S = 13$ kn; extrapoliert). Zwischen PPM40 und PPM46 betragen die Absunkzunahmen jeweils $\Delta z_A \approx +0,05$ m ($v_S = 10$ kn), $\Delta z_A \approx +0,1$ m ($v_S = 12$ kn) und $\Delta z_A \approx +0,2$ m ($v_S = 13$ kn; extrapoliert). Bei der Tiefgangserhöhung des PPM40 wird der Absunkwert nur bei Schiffsgeschwindigkeiten über $v_S > 11$ kn um $\Delta z_A \approx +0,05$ m ($v_S = 12$ kn) bzw. $\Delta z_A \approx +0,1$ m ($v_S = 13$ kn) ansteigen.
- An der südlichen Fahrrinnenkante (Bild 28; untere Grafik) werden Belastungsänderungen nur im Vergleich des PM32 und PPM46 zu verzeichnen sein. Aufgrund des großen Passierabstands von annähernd $L \approx 300$ m werden die Absunkamplituden bei $v_S = 10$ kn um $\Delta z_A \approx +0,1$ m, bei $v_S = 12$ kn um $\Delta z_A \approx +0,15$ m und bei etwa $v_S \approx 13$ kn um $\Delta z_A \approx +0,2$ m steigen. Beim Vergleich von PPM40 und PPM46 sowie dem PPM40 mit verschiedenen Tiefgängen werden die langperiodischen Wellenbelastungen geschwindigkeitsunabhängig um Werte von $\Delta z_A \leq +0,05$ m zunehmen.

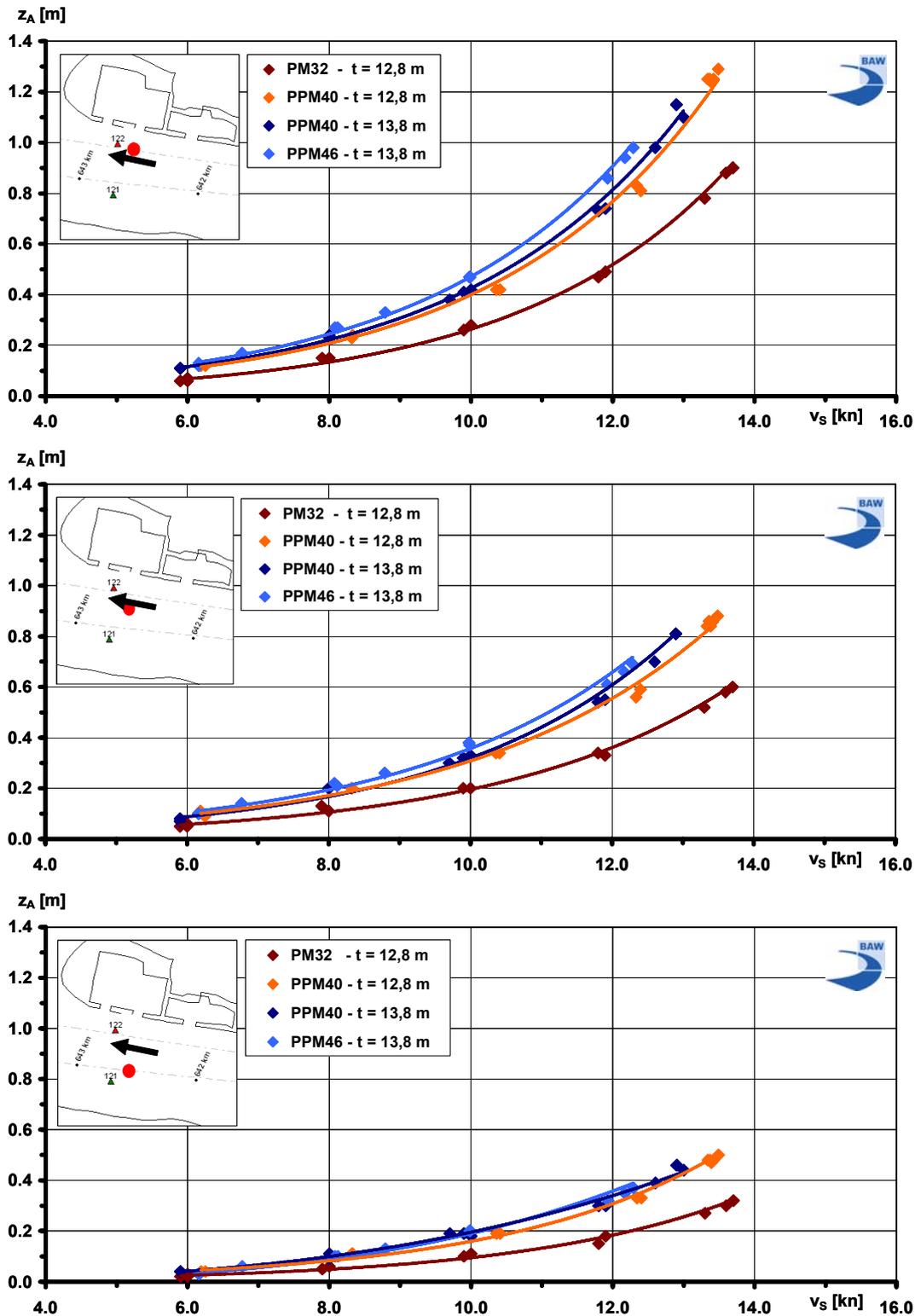


Bild 28: Geschwindigkeitsabhängiger Absenk für Einzelfahrten des PM32 (t = 12,8 m), des PPM40 (t = 12,8 m u. 13,8 m) und des PPM46 (t = 13,8 m) als Abgänger (L = konstant; örtl. Tnw)



Bei dem Vergleich des heute und zukünftig möglichen tideunabhängigen Verkehrs, d.h. hier von Passagen des PM32 ($t = 12,8$ m) und des PPM46 ($t = 13,8$ m) sowie von Fahrten des PPM40 ($t = 12,8$ m) und des PPM46 ($t = 13,8$ m) werden sich die schiffserzeugten Strömungsbedingungen an ausgewählten Positionen wie folgt ändern:

➤ Südl. Fahrrinnenkante:

PM32 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,2 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,25 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,3 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,5 \text{ m/s}$
PPM40 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,05 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,2 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx \pm 0,0 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,25 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,05 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,5 \text{ m/s}$

➤ Fahrrinnenmitte:

PM32 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,15 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,4 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,25 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,6 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,6 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,0 \text{ m/s}$
PPM40 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,05 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,4 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,05 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,6 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx \pm 0,0 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,0 \text{ m/s}$

➤ Nördl. Fahrrinnenkante:

PM32 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,35 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,8 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,45 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,1 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +1,1 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,9 \text{ m/s}$
PPM40 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,8 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx +0,15 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,1 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_R \approx \pm 0,05 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 1,9 \text{ m/s}$

➤ Yachthafeneinfahrt:

PM32 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,3 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 1,0 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,5 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 1,4 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,95 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 2,0 \text{ m/s}$
PPM40 zu PPM46	$v_S = 10 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx \pm 0,0 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 1,0 \text{ m/s}$
	$v_S = 12 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx \pm 0,0 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 1,4 \text{ m/s}$
	$v_S = 13 \text{ kn} \Rightarrow \Delta v_{AUS} \approx +0,2 \text{ m/s}$ auf $v_{AUS} \approx 2,0 \text{ m/s}$



Die Strömungserhöhungen sind in der Fahrrinne infolge der außermittigen Fahrt der Containerschiffe dementsprechend ungleichmäßig verteilt:

- Da die Schiffe als Abgänger auf der nördlichen Fahrrinnenseite verkehren, zeigt sich der Einfluss des größeren südlichen Teilquerschnitts in der Abnahme der Verdrängungsströmung in Richtung Fahrrinnenmitte und südlicher Fahrrinnenkante. Treten beim Vergleich der Bemessungsschiffe (PM32 u. PPM46) noch hohe geschwindigkeitsabhängige Differenzen auf, liegen die Änderungen zwischen den PPM-Containerschiffen PPM40 und PPM46 in der Größenordnung der Messgenauigkeit des hydraulischen Modells.
- Aufgrund des geringeren Passierabstands zur nördlichen Fahrrinnenkante ist hier mit den höchsten Belastungen und auch Belastungszunahmen zu rechnen, wobei die ausbaubedingten Änderungen entsprechend der Größendifferenzen der Schiffe unterschiedlich groß ausfallen.

In Hafenbeckeneinfahrten nahe der Fahrrinne wie der Yachthafeneinfahrt muss schon bei Schiffsgeschwindigkeiten von $v_s = 10$ kn mit einer deutlichen Erhöhung der Ausstromgeschwindigkeit gerechnet werden, da - gleich bleibende Schiffsgeschwindigkeit vorausgesetzt - das gegenüber dem PM32 um etwa $\Delta l \approx +50$ m längere und um $\Delta b \approx +14$ m breitere Containerschiff PPM46 eine größere und länger andauernde Wasserspiegeldifferenz zwischen dem Absenk am Schiff und dem Wasserstand im Yachthafen - und daraus folgend eine stärkere Gefälleströmung - bewirkt. Beim Vergleich des schon heute verkehrenden PPM40 zu dem Bemessungsschiff PPM46 ($\Delta l \approx +30$ m; $\Delta b = +3$ m) wird eine Strömungszunahme nur bei Schiffsgeschwindigkeiten über $v_s > 12$ kn erwartet.

Die Maximalwerte der erreichbaren, tiefgangsabhängigen Schiffsgeschwindigkeit zeigten besonders beim PPM40 und beim PPM46 das Erreichen der jeweiligen querschnittsbedingten Leistungsgrenze der Schiffsantriebe in seitlich begrenztem Flachwasser, so dass keine weiteren Geschwindigkeits- und Belastungssteigerungen als dargestellt möglich waren.

Generell ist festzuhalten, dass die Differenzen der schiffserzeugten Belastungen bei der Gegenüberstellung der Bemessungsschiffe PM32 und PPM46 erheblich größer ausfallen als beim Vergleich der heute schon verkehrenden PPM-Containerschiffe PPM40 und PPM46, da auch die entsprechenden Differenzen in Länge und Breite ($\Delta \Delta l \approx 40$ m; $\Delta \Delta b \approx 8$ m) deutliche Unterschiede aufzeigen.



8 Belastungsprognosen für das Gesamtästuar

8.1 Vorbemerkungen

Für das Gesamtästuar sind die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen zwischen dem heutigen sowie dem zukünftigen Schiffsverkehr zu prognostizieren. Die schiffserzeugte langperiodische Maximalbelastung der Wasserstraße, als Folge dieser dann auch die kurzperiodische Wellenbelastung, wird durch die größten Schiffseinheiten in Abhängigkeit ihrer Fahrgeschwindigkeiten erzeugt (vergl. Kapitel 4.2). Folglich werden als Bezugseinheiten für die Prognose ausbaubedingter Änderungen die heute größten, mit hoher Geschwindigkeit verkehrenden Containerschiffe der PPM43-Klasse (Breite $b = 42,8$ m) dem zukünftigen Bemessungsschiff PPM46 (Containerschiff mit $b = 46$ m) gegenübergestellt und deren geschwindigkeitsabhängige Belastungsgrößen verglichen. Des Weiteren werden die durch das Bemessungsschiff der letzten Fahrrinnenanpassung (PM32 $b = 32,3$ m) erzeugten Belastungsgrößen denen des PPM46 gegenübergestellt.

Für den allgemeinen Schiffsverkehr mit geringeren Abmessungen und Tiefgängen (z.B. Feeder, Containerschiffe älterer Generationen, kleinere Massengutschiffe) werden sich aufgrund der Fahrrinnenanpassung an das größere und tiefergehende Bemessungsschiff keine wesentlichen Änderungen ergeben, wenn ein gleich bleibendes Fahrverhalten wie heute vorausgesetzt wird:

- In den Abschnitten, in denen keine Ausbaumaßnahmen stattfinden werden, wird eine gleich bleibende Belastung der Wasserstraße wie heute auftreten.
- In Abschnitten, in denen Querschnittserweiterungen vorgenommen werden, wird die Belastung zurückgehen, wenn die vorherige Geschwindigkeit beibehalten wird, da der Widerstand der Wasserstraße gegenüber dem Schiff abnimmt. Bei gleich bleibender Maschinenleistung (gleiche Propellerumdrehung) wird das Schiff etwas schneller fahren, aber kein größeres Wellenbild als heute erzeugen, da Schiffswiderstand, Schiffsgeschwindigkeit und Wellenbild direkt miteinander zusammenhängen.
- In den Abschnitten, in denen nur Querschnittseinengungen (Unterwasserablageflächen) vorgesehen sind, wird für die allgemeine Schifffahrt auch der Widerstand der Wasserstraße zunehmen, so dass sie bei gleich bleibender Geschwindigkeit höhere schiffserzeugte Belastungen bewirken werden. Diese Belastungen werden aber deutlich unter den ausbaubedingten Änderungen durch das Bemessungsschiff liegen.
- In Abschnitten, in denen seitliche Querschnittseinengungen mit Fahrrinnenaufweitungen zusammenfallen, bleibt der Gesamtwiderstand der Wasserstraße annähernd gleich. Dementsprechend wird die schiffserzeugte Belastung in etwa der heutigen entsprechen.



8.2 Beurteilungskriterien

Bei der Beschreibung des methodischen Vorgehens (Kapitel 5) wurde vorgestellt, dass die Erkenntnisse aus der Referenzstrecke benutzt werden, um Prognosen für die übrigen Abschnitte der Unter- und Außenelbe zu erarbeiten.

Auf die möglichen ausbaubedingten Belastungsänderungen in einer Seeschiffahrtsstraße wurde in Kapitel 7.1 eingegangen. Im Detail werden als Grundlage für die qualitative Beurteilung des Gesamtästuars die Ergebnisse aus den Systemversuchen herangezogen, da durch die dort untersuchten Schiffseinheiten wegen ihrer Abmessungen und des größten zulässigen Tiefgangs die maximalen langperiodischen Belastungsänderungen zu erwarten sind. Es werden die ausbaubedingten Änderungen der Wellen und der Verdrängungsströmung für das Bemessungsschiff durch die Änderung der Schiffsgrößen (PM32 bzw. PPM40 zu PPM46) sowie durch örtliche Querschnittsaufweitungen (Vertiefungen) oder durch Profileinengungen (Unterwasserablagerungsflächen) abgeschätzt.

Wie erwähnt, werden entlang der Unter- und Außenelbe die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen überwiegend bei der Passage von außermittig und tideunabhängig verkehrenden Einzelschiffen betrachtet. Durch eine Vergrößerung der Regelbreite der Fahrrinne von der Lühekurve (ca. km 644) bis zur Störkurve (ca. km 682) um $\Delta B_S = +20$ m soll nach [U2], [U8] im Rahmen bestehender Vorschriften auch in diesen Abschnitten eine Begegnung der Bemessungsschiffe (PPM46) untereinander mit addierten Schiffsbreiten bis 92 m ermöglicht werden. Diese jeweils lokal begrenzte Belastungsänderung der Seeschiffahrtsstraße durch die dann vor der Begegnung erforderliche außermittige Fahrt wird durch die Betrachtung der jeweiligen Teilquerschnittsverhältnisse abgedeckt.

Während sich bei einer Schiffsbegegnung die Wasserspiegelabsenkungen aufgrund des doppelten Schiffsquerschnitts vergrößern, wirkt die schiffserzeugte Verdrängungsströmung jeweils entgegengesetzt und reduziert somit die Strömungsbelastung im Gesamtquerschnitt.

Bei der zukünftigen Begegnung großer Containerschiffe (z.B. PPM46 / PPM46) werden für die Abschnitte entlang der Unterelbe, in denen bisher schon Begegnungen großer Containerschiffe zugelassen sind, folgende maximale geschwindigkeitsabhängige Belastungsänderungen - auf der sicheren Seite liegend - abgeschätzt:

- $v_S = 10$ kn: $\Delta z_A \approx +0,1$ m mit $\Delta v_R \approx +0,2$ m/s
- $v_S = 12$ kn: $\Delta z_A \approx +0,2$ m mit $\Delta v_R \approx +0,35$ m/s.

Die Ausbreitung der am Schiffsrumpf erzeugten Wasserspiegelauslenkungen wird aufgrund der inhomogenen Tideströmungen im Gewässerquerschnitt u.a. auch durch Strömungsrefraktion beeinflusst. Tendenziell wird durch die ausbaubedingten Änderungen der Tideströmungen auch die Strömungsrefraktion der Schiffswellen verändert. Allerdings ist der Einfluss



auf das Gesamtmaß der Änderungen schiffserzeugter Belastungen aus wasserbaulicher Sicht unbedeutend.

Für die Abschätzung der ausbaubedingten Belastungsänderungen werden die Schiffsgeschwindigkeiten grundsätzlich als Fahrt durchs Wasser, nicht als Fahrt über Grund betrachtet, da die Fahrt durchs Wasser das Maß des Energieeintrags in einem Wasserstraßenquerschnitt und damit dessen schiffserzeugte Belastungen bestimmt.

Bei der Fahrt von tideabhängig verkehrenden Abgängern wurden nach [U8] für die Bemessung des neuen Tiefenlängsprofils folgende gebietsabhängige minimale und maximale Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser vorausgesetzt:

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

Bei der Fahrt von tideunabhängig verkehrenden Fahrzeugen wurde nach [U8] für die Bemessung des Tiefenlängsprofils folgende gebietsabhängige maximale Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser zu Grunde gelegt:

- Ab Altenwerder (km 619,0): $v_S = 9 \text{ kn}$
- Ab Lühort (km 645,5): $v_S = 10 \text{ kn}$
- Ab Brokdorf (km 685,0): $v_S = 12 \text{ kn}$

Der Einfluss möglicher ausbaubedingter Änderungen der Wasserstände auf die schiffserzeugte Belastungen kann vernachlässigt werden, weil die Wassertiefen sich nur um maximal $\Delta h \approx +0,3\%$ ändern (BAW, 2006).

Da die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen bei den Systemversuchen im hydraulischen Modell u.a. anhand der Containerschiffe PPM40 und PPM46 herausgearbeitet wurden, werden die Prognosen der Änderungen zwischen einem auch schon heute verkehrenden Containerschiff der Breite $b \approx 43 \text{ m}$ (z.B. HAMBURG-EXPRESS-Klasse von HAPAG-LLOYD mit $b = 42,8 \text{ m}$, hier: PPM43, $\Delta b \approx +3 \text{ m}$ zu PPM40) und dem Bemessungsschiff PPM46 wegen der geringeren Breitendifferenz auf der sicheren Seite liegen ($\Delta b_{\text{PPM46-PPM43}} \approx +3 \text{ m}$ statt $\Delta b_{\text{PPM46-PPM40}} \approx +6 \text{ m}$). Eine lineare Interpolation zwischen den Belastungswerten durch PPM40 und PPM46 ist aufgrund nichtlinearer physikalischer Prozesse nicht zulässig.



8.3 Hydraulisch wirksame bauliche Veränderungen

Grundlage der Beurteilung der einzelnen lokalen und/oder regionalen Maßnahmen im Unter- und Außenelberegime bildet die Beschreibung des Vorhabens (Technische Planung) des Projektbüros Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe beim WSA Hamburg [U8] mit Planungsstand vom 28. April 2006.

Die im folgenden Textteil angegebenen Tiefenkoten der Baumaßnahmen beziehen sich auf die Sollsohlenlage ohne Ansatz einer Baggertoleranz ($\Delta h = +0,2$ m) und ohne Randüberbaggerung ($\Delta B_S = +5$ m), da die vorgegebene Sollsohle für das Verhältnis Schiff - Wasserstraße als ungünstigster Querschnitt (A/A_S) anzunehmen ist. Die prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen sind somit immer als „auf der sichern Seite liegend“ jeweils vor Beginn neuer Unterhaltungsbaggerungen zu erwarten.

Als Bezugswasserstand für die Berechnungen der Querschnittsverhältnisse n wurde das jeweilige 5-Jahresmittel bei $MT_{nw_{1997-2001}}$ gewählt. Die sich dabei ergebenden Querschnittsverhältnisse bei tideunabhängiger Fahrt entlang der Unter- und Außenelbe sind für die Containerschiffe PM32 sowie PPM43 ($t = 12,8$ m) im Ist-Zustand und für das Bemessungsschiff PPM46 ($t = 13,8$ m) im Ausbauzustand aufgetragen (Bild 29).

Bei der Ermittlung des Fahrwasserquerschnitts A ($n = A / A_S$) wurde nur der hydraulisch wirksame Wasserstraßenquerschnitt berücksichtigt, d.h. flachere Seitenbereiche (z.B. Neufelder Sand) sowie durch flache Sände oder durch Platen hydraulisch getrennte Wattgebiete und Rinnen (z.B. Brammer Bank, Medemrinne) wurden nicht in die Querschnittsflächenberechnung einbezogen.

Die Grafik der Querschnittsverhältnisse und Differenzen (PM32 - PPM46 und PPM43 - PPM46; Bild 29) verdeutlicht, dass bei T_{nw} -Bedingungen entlang der Unterelbe von beispielsweise Nienstedten (km 630) bis etwa zur Ostemündung (km 710) eine annähernd stetige Zunahme des Querschnitts gegeben ist. Die Steigung der n -Kurven hängt allerdings in starkem Maße von der Schiffsgröße ab, so dass der Unterschied der Bemessungsschiffe PM32 und PPM46 besonders an den n -Differenzen zwischen km 630 und km 710 anschaulich wird ($PM32_{630-710}: \Delta n \approx 44$ entspricht $0,55$ n/km; $PPM46_{630-710} \Delta n \approx 29$ entspricht $0,36$ n/km). Für auch schon heute verkehrende PPM43-Containerschiffe ergibt sich eine Zunahme zwischen km 630 und km 710 um etwa $\Delta n \approx 33$ ($0,41$ n/km).

Die zukünftig flachere Steigung der n -Kurven in Bild 29 entlang der Unterelbe zeigt, dass sich demnächst die schiffserzeugten Belastungen in den äußeren Bereichen schon bei alleiniger Betrachtung der Querschnittsverhältnisse ohne Berücksichtigung der Bemessungsgeschwindigkeiten den Verhältnissen in den inneren Unterelbeabschnitten annähern werden.

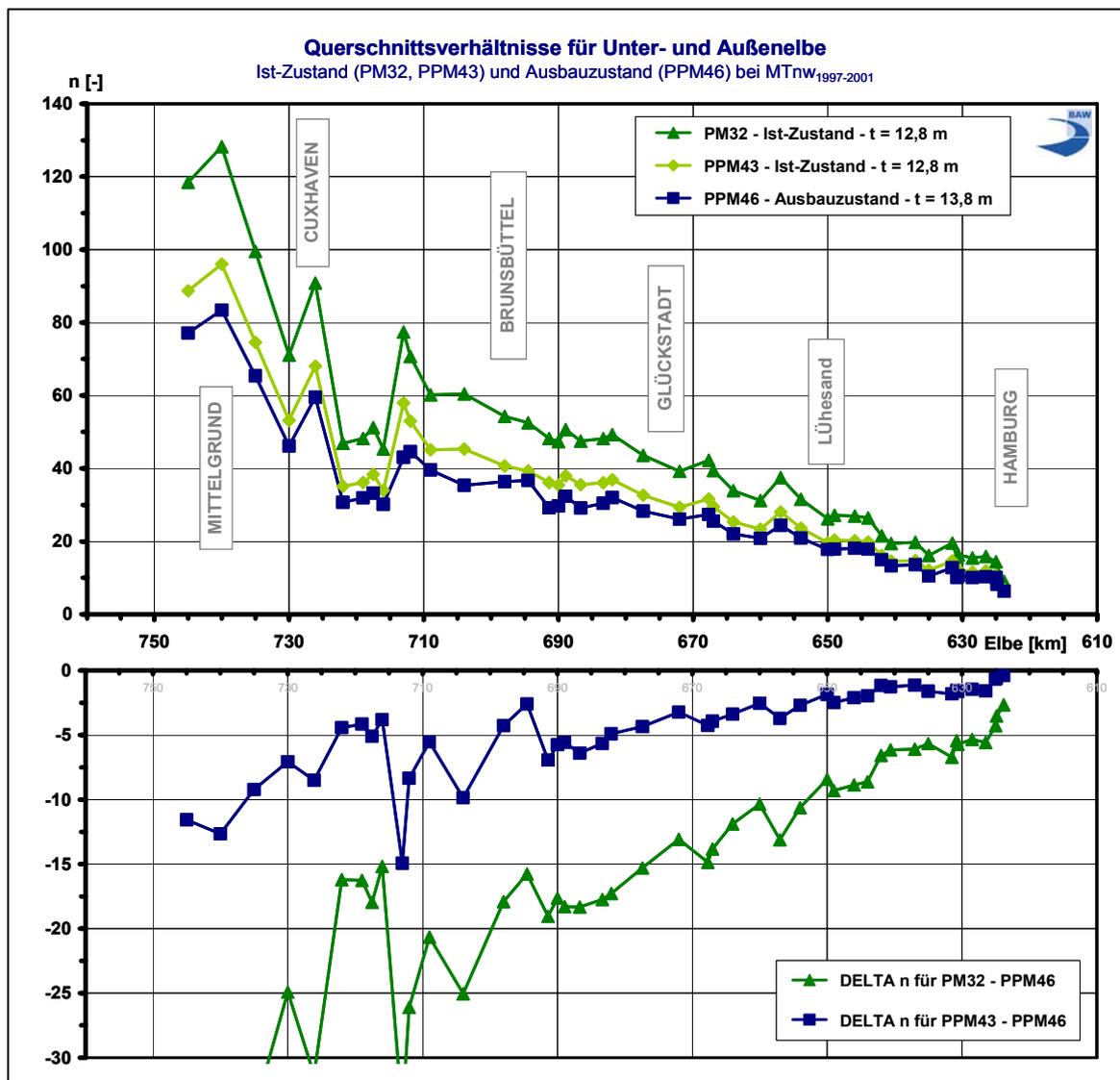


Bild 29: Querschnittsverhältnisse und Differenzen für den Ist-Zustand (PM32, PPM43) und den Ausbauzustand (PPM46) bei tideunabhängiger Fahrt (MTnw₁₉₉₇₋₂₀₀₁) entlang der Unter- und Außenelbe

Ein Einbruch der Querschnittsverhältnisse zeigt sich im Bereich des Medemgrunds (ca. km 715 bis km 725), was sich entsprechend auf die schiffserzeugten Belastungen und deren ausbaubedingte Änderungen in diesem Abschnitt auswirken wird.

Zusätzlich zu den Querschnittsverhältnissen längs der Unter- und Außenelbe wurden die Teilquerschnittsverhältnisse n_T für außermittig verkehrende Abgänger und Aufkommer berechnet, indem als Extremszenario für das entsprechende Schiff nur die jeweilige Schiffsbreite b als Seitenabstand zur Fahrrinnenkante angenommen wurde. Dies kann bei jeder Begegnungssituation großer Fahrzeuge entlang der Unterelbe auftreten. Die n_T -Daten sowie die Differenzen zwischen PM32 – PPM46 und PPM43 - PPM46 sind beispielhaft jeweils für



die Steuerbordseite für Abgänger in Bild 30 und für Aufkommer in Bild 31 aufgetragen (tideunabhängiger Verkehr, $MT_{nw_{1997-2001}}$).

Für die grafische Darstellung wurden die berechneten Teilquerschnittsverhältnisse bei Tide-niedrigwasser gewählt, da die n_T -Werte für tideunabhängige Fahrt (MT_{nw}) grundsätzlich unter denen bei M_{Thw} liegen und somit ungünstigere Verhältnisse beschreiben. Die Teilquerschnittsverhältnisse der Abgänger bzw. Aufkommer bei MT_{nw} deuten neben den Informationen aus dem Querschnittsverhältnis n (vergl. Bild 29) auf kritische Abschnitte der Unterelbe, in denen der geringe Passierabstand bei außermittiger Fahrt z.B. bei Scheelenkuhlen, am Medemgrund (Bild 30) oder am Lühesand bzw. am Osteriff (Bild 31) schon heute zu hohen Belastungen aus dem Schiffsverkehr führen kann.

Aufgrund des - als Sicherheitsabstand zur Fahrrinnenkante - gewählten Seitenabstands von einer Schiffsbreite ($L_{PM32} = 32$ m; $L_{PPM43} = 43$ m; $L_{PPM46} = 46$ m) wird die Breitenzunahme des PPM46 geometrisch nahezu kompensiert, so dass die Differenzen zwischen den n_T -Werten für die PPM-Containerschiffe (PPM43 = orange; PPM46 = rot) teils nur gering sind, aber lokal in starkem Maße auch von den Ausbaumaßnahmen (Fahrrinnenvertiefungen bzw. Unterwasserablagerungsflächen) bestimmt werden. Bei der Fahrt der Schiffe ist neben der geometrischen Betrachtung von Schiff und Wasserstraße zudem die mitwirkende hydrodynamische Masse des jeweiligen Schiffs mit einem Faktor zwischen etwa 1,3 und etwa 2,0 zu berücksichtigen, so dass trotz annähernd gleicher n_T -Werte höhere Belastungen für Passagen des PPM46 zu erwarten sind.

Besonders deutlich wird der Einfluss von den vorgesehenen Unterwasserablagerungsflächen am Beispiel des Neufelder Watts beim Vergleich der Teilquerschnittsverhältnisse für Abgänger, wenn auch diese auf relativ hohem Wertenniveau liegen (Bild 30). Für das auslaufende Bemessungsschiff PPM46 reduzieren sich die Verhältnisse bei T_{nw} um $\Delta n_T \approx -36$ (PM32 zu PPM46; -46 %) bzw. $\Delta n_T \approx -17$ (PPM43 zu PPM46; -30 %), so dass entsprechende Auswirkungen auf die schiffserzeugten Belastungen die Folge sein werden.

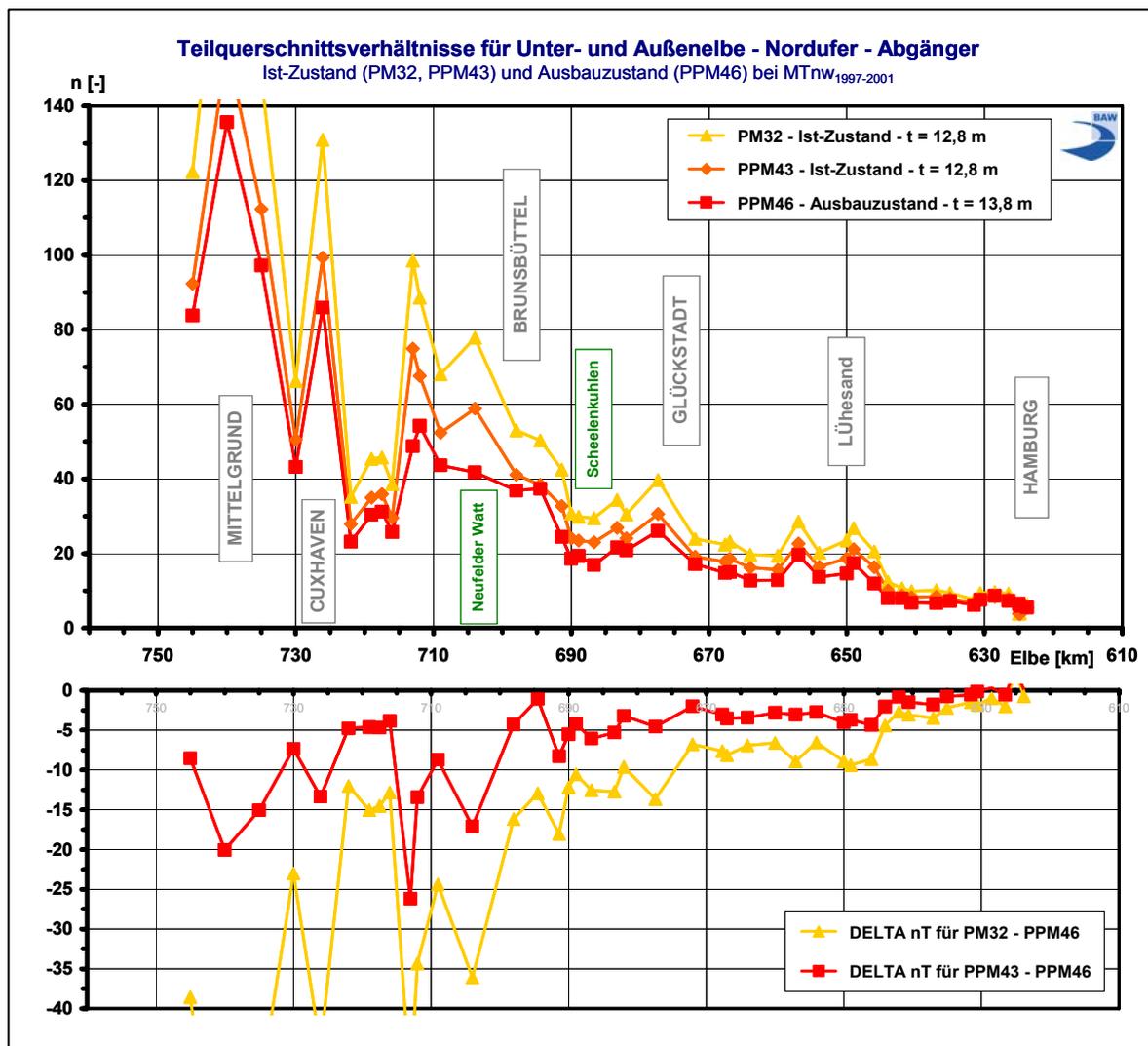


Bild 30: Teilquerschnittsverhältnisse n_T und Differenzen in der Unter- und Außenelbe (Nordseite) für tideunabhängig abgehende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei MTnw₁₉₉₇₋₂₀₀₁

Die auf der Südseite geringen Teilquerschnittsverhältnisse (Bild 31) für aufkommende, tideunabhängig verkehrende Containerschiffe zwischen Cuxhaven (ca. km 730) und Lühesand (km 650) liegen auf einer Länge von rund 80 km zukünftig bei Werten unter $n_T < 30$, örtlich sogar unter $n_T < 20$ und verdeutlichen die durchgehend geringen seitlichen Querschnittsflächen steuerbords bei außermittigem Verkehr. Ab der Begegnungsstrecke stromauf des Hamburger Yachthafens (ca. km 643) sind für das zukünftige Bemessungsschiff Teilquerschnittsverhältnisse von $n_T < 10$ die Regel.

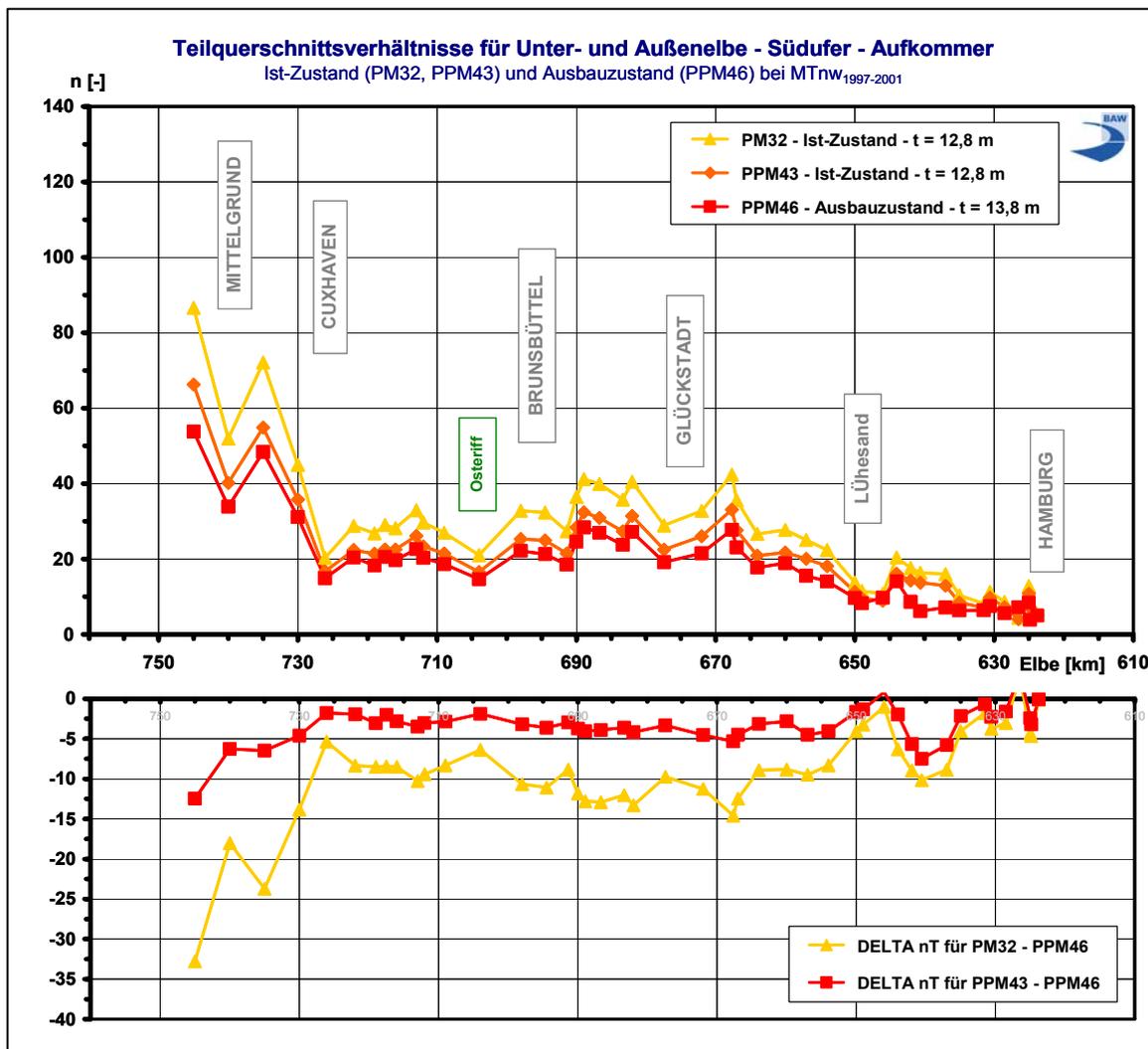


Bild 31 : Teilquerschnittsverhältnisse n_T und Differenzen in der Unter- und Außenelbe (Südseite) für tideunabhängig aufkommende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei MTnw₁₉₉₇₋₂₀₀₁

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

Im Hafenbereich zwischen den Containerterminals Altenwerder (CTA) und Tollerort (TCT) bis zur Köhlbrandmündung bei etwa km 625 sind für die Herstellung der Ausbautiefe auf -17,4 mNN in der Fahrrinne flächenhafte Baggerungen sowie Böschungaufweitungen erforderlich (Bild 32).

Die Bemessungsgeschwindigkeit für diesen Abschnitt bis Seemannshöft (km 629) wurde nach [U8] auf $5 \text{ kn} < v_s < 7 \text{ kn}$ (tideunabhängig $v_s = 9 \text{ kn}$) festgelegt. Die Querschnittsverhältnisse für das tideunabhängig fahrende Bemessungsschiff PPM46 (t = 13,8 m; Bezug

MTnw₁₉₉₇₋₂₀₀₁) liegen im Köhlbrand (km 624S) mit $n \approx 6,3$ bzw. in der Norderelbe (km 625N) mit $n \approx 8,2$ etwa in der gleichen Größenordnung der Werte der heutigen größten Containerschiffe (PPM43 mit $t = 12,8$ m: $n \approx 6,7$ bzw. $n \approx 8,8$).

Die Containerschiffe legen mit Schlepperhilfe ab, erreichen jedoch im Hafengebiete noch keine Fahrgeschwindigkeiten, bei denen eindeutige Änderungen der stark geschwindigkeitsabhängigen Belastungen zu erwarten sind, da die Schiffsgrößenzunahme teilweise durch die vorgesehenen geometrischen Systemveränderungen kompensiert werden (km 623,8S: $\Delta n \approx -0,4$ für PPM43 zu PPM46). Im Köhlbrand sind - vor allem bei Tnw – die extrem engen Kanalbedingungen hinsichtlich der geschwindigkeitsabhängigen, langperiodischen, schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen zu berücksichtigen.

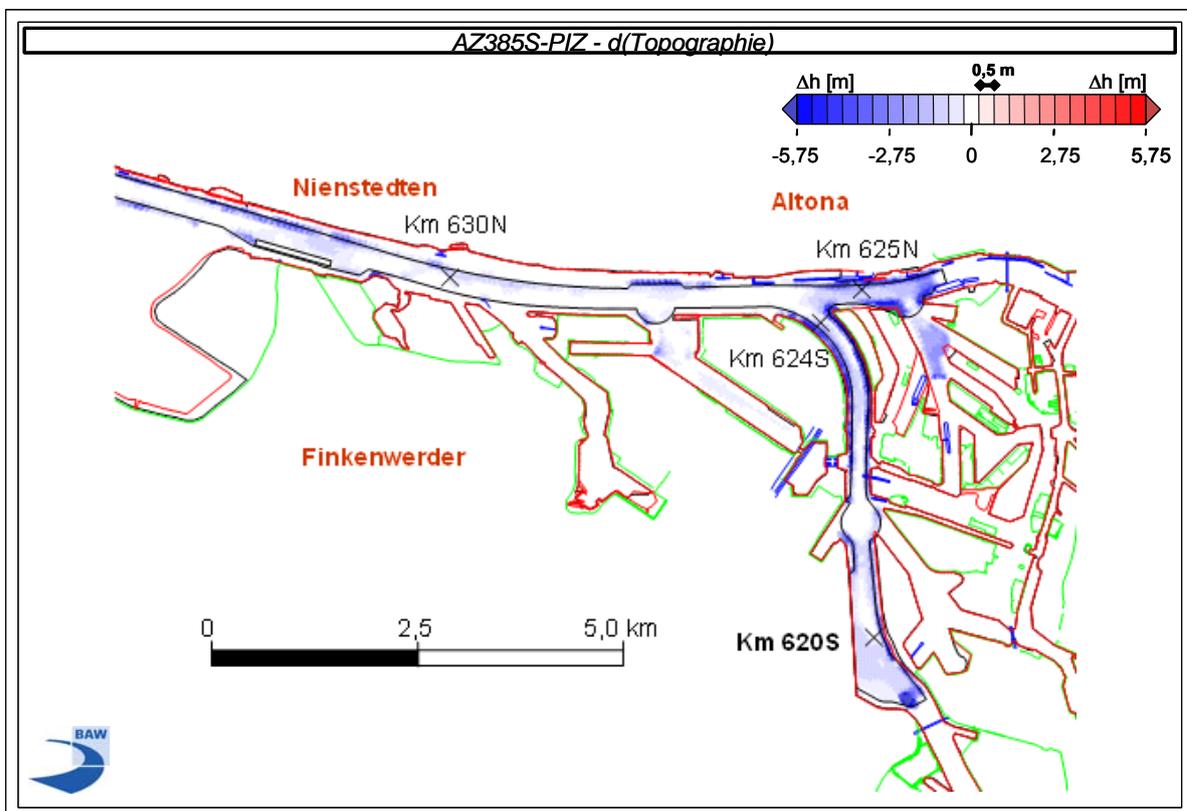


Bild 32: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Hafen Hamburg und Blankenese (km 620 bis km 634)

Im Bereich des Autobahn-Elbtunnels (km 626 bis km 627) beträgt die Solltiefe -16,70mNN, ab km 627 ist ein Sohlniveau von -17,3mNN vorgesehen. Stromab dieses Abschnitts sind vereinzelte asymmetrische flächenhafte Vertiefungen erforderlich, die aber bei den hier üblicherweise noch geringen Fahrgeschwindigkeiten der Containerschiffe keine messbaren Belastungsänderungen zur Folge haben werden ($\Delta z_A \approx \Delta H_P < 0,05$ m).



Nach dem Lotsenwechsel auf Höhe Seemannshöft (km 629) nehmen die großen Containerschiffe Fahrt auf. Zur Bemessung des Tiefenlängsprofils wurden ab km 629 Schiffsgeschwindigkeiten von $8 \text{ kn} < v_S < 10 \text{ kn}$ (tideunabhängig $v_S = 9 \text{ kn}$) zugrunde gelegt. Bis km 634 sind (ab km 632 aufgrund der Fahrrinnenverbreiterung um $\Delta B_S = +20 \text{ m}$) flächenhaft und hauptsächlich am nördlichen Ufer vor Nienstedten Fahrrinnenvertiefungen vorgesehen. Die Querschnittsverhältnisse für das Bemessungsschiff PPM46 ($t = 13,8 \text{ m}$; Bezug MTnw₁₉₉₇₋₂₀₀₁) werden etwa bei $n \approx 10,1$ bis $12,8$ liegen.

Bei Schiffsgeschwindigkeiten bis zur Obergrenze der lokalen Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 10 \text{ kn}$ ist aufgrund der Querschnittsaufweitungen auch bei Fahrt der deutlich größeren Containerschiffe mit einer geringen Zunahme ($\Delta Z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05 \text{ m}$) der schiffserzeugten Belastung zu rechnen (PPM43 zu PPM46: $\Delta n \approx -1,5$, ca. -13 %). Beim Vergleich der Bemessungsschiffe werden die Belastungsdifferenzen mit Werten bis zu $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \leq 0,1 \text{ m}$ höher ausfallen ($\Delta v_R \leq +0,1 \text{ m/s}$; PM32 zu PPM46: $\Delta n \approx -6$, ca. -35 %).

8.3.2 Blankenese bis Wedel (km 634 bis km 645)

Die Erstellung der Sollsohle auf $-17,30 \text{ mNN}$ sowie die Verbreiterung der Fahrrinne in der Begegnungsstrecke erfordert seitliche Vertiefungen an der nördlichen Fahrrinnenkante sowie durch die Verlegung der Fahrrinnenachse nach Süden Abgrabungen am südlichen Ufer (Bild 33). Die Obergrenze der Bemessungsgeschwindigkeit beträgt bis km 643 $v_S = 10 \text{ kn}$, ab km 643 $v_S = 12 \text{ kn}$ (tideunabhängig $v_S = 9 \text{ kn}$). Für diesen Abschnitt kann auf die Ergebnisse aus dem hydraulischen Modell zurückgegriffen werden (Kapitel 7.2.4.1).

Im Bereich der Ufervorspülungen Wittenbergen von km 636 bis km 638 ist die Auffüllung der Bühnenfelder sowie des Strands vorgesehen ([U8]; Bild 33). Das nördliche Teilquerschnittsverhältnis wird von heute rund $n_T \approx 10,2$ (PM32) bzw. ca. $n_T \approx 8,5$ (PPM43) auf etwa $n_T \approx 6,7$ (PPM46) reduziert. Die Vorspülungen werden mit $\Delta A_T \approx 300 \text{ m}^2$ ober- und unterhalb von MTnw hydraulisch wirksam, so dass diese bei Einhalten der Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 10 \text{ kn}$ zu einer Belastungserhöhung des nördlichen Uferstreifens, das heißt, der Vorspülung selbst sowie der Bühnenköpfe führen wird ($\Delta Z_A \approx \Delta H_P \leq 0,05 \text{ m}$; $\Delta v_R \leq +0,1 \text{ m/s}$).

In den Abschnitten der Begegnungsstrecke, in denen keine oder nur geringe Vertiefungen notwendig sind, wird sich die langperiodische Belastung bei der tideabhängigen Begegnung des MG58 mit dem PPM46 bei Thw am nördlichen Ufer annähernd gleich - mit Tendenz zu einer leichten Verringerung - einstellen, während am südlichen Ufer aufgrund der Erweiterung der Fahrrinne nach Süden mit einer Verdopplung der Belastung auf Werte zwischen $0,4 \text{ m} < z_A \approx H_P < 0,5 \text{ m}$ ($\Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$ auf $v_R \approx 0,4 \text{ m/s}$) zu rechnen sein wird (Vergleichswerte von Begegnung MG58 mit PM32; Bild 25, $v_S = 10 \text{ kn}$). Vor dem Hamburger Yachthafen



(km 641 bis km 643) wurde gegenüber der jüngsten Fahrrinnenanpassung die Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn über Grund auf $v_S = 10$ kn durchs Wasser reduziert, so dass in diesem Abschnitt der Begegnungstrecke bei MThw die maximalen Strömungsbelastungen bei der Begegnung der größten Schiffseinheiten (MG58 / PPM46) am nördlichen Ufer abnehmen und am südlichen Ufer annähernd gleich bleiben werden (vergl. Tabelle 10).

Bei der tideunabhängigen Begegnung großer Containerschiffe ist bei der Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 9$ kn durch Wasser gegenüber bisher $v_S = 12$ kn über Grund in der Fahrrinne mit einer annähernd gleich bleibenden langperiodischen Wellenbelastung von rund $Z_A \approx H_P \approx 0,5$ m zu rechnen, obwohl bei Tnw das Gesamtquerschnittsverhältnis bei Begegnungssituationen PM32/PPM40 im Ist-Zustand von $n \approx 10$ und PPM40/PPM46 bei der 385m-Trasse incl. Ablagerungsfläche auf $n = 8$ (PPM46/PPM46: $n = 7,5$) zurückgeht. Bei reduzierter Schiffsgeschwindigkeit ($\Delta v_S = -3$ kn) ist am Ufer Hanskalbsand eine Abnahme von etwa $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx -0,2$ m zu erwarten, während am nördlichen Ufer sogar eine Verringerung der schiffserzeugten Belastungen um etwa $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx -0,3$ m prognostiziert wird (vergl. Kapitel 7.2.4 u. Bild 26). Ohne Verwirklichung der im Modell untersuchten Ablagerungsfläche Hanskalbsand (vergl. Kapitel 7.2.4.2.1) werden sich die n-Verhältnisse um einen Betrag von rund $\Delta n < 0,5$ erhöhen, so dass auf der Südseite bei $v_S = 9$ kn eine weitere leichte Belastungsabnahme erwartet werden kann, im Gesamtquerschnitt aber kaum zusätzliche Belastungsreduzierungen feststellbar sein werden.

In dem Abschnitt km 636 bis km 638,9, in dem bisher keine Begegnung großer Containerschiffe zugelassen war, der aber zukünftig Teil der Begegnungstrecke sein wird, sind dann zu der Belastungsänderung durch ein Einzelschiff (z.B. PPM46) zusätzlich folgende kurzzeitig wirkende, maximale geschwindigkeitsabhängige Belastungsänderungen aus der Begegnungssituation - auf der sicheren Seite liegend - zu erwarten:

- | | | | |
|------------------|-----------------------------|-----|--------------------------------|
| ➤ $v_S = 10$ kn: | $\Delta Z_A \approx +0,1$ m | mit | $\Delta v_R \approx -0,25$ m/s |
| ➤ $v_S = 12$ kn: | $\Delta Z_A \approx +0,2$ m | mit | $\Delta v_R \approx -0,4$ m/s |

Im Übergangsbereich von der Begegnungstrecke ab km 643 bis etwa km 645 sind Abtragungen in der Fahrrinne bis lokal $\Delta h \approx -2,0$ m vorgesehen. Die Ufervorspülung Wisch (Lühe) an der Mündung zur Hahnöfer Nebenelbe wird sich nur unwesentlich auf die Änderungen der schiffserzeugten Belastungen des südlichen Ufers auswirken, da sie hauptsächlich in der Nebenelbe hydraulisch wirksam wird.

Da im Extremfall die großen Containerschiffe als Abgänger nach einer Begegnung noch außermittig fahren und zudem ihre Fahrt beschleunigen (Bemessungsgeschwindigkeit ab hier $v_S = 12$ kn) sind am nördlichen Ufer trotz der örtlichen Ausbaumaßnahmen und bei außermittig verkehrenden Aufkommern vor allem südlich der Fahrrinne und an der Mündung der Hahnöfer Nebenelbe Belastungszunahmen von $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx +0,1$ m (PPM43 zu PPM46) bzw. von $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx +0,4$ m (PM32 zu PPM46) zu erwarten (Bild 28). Änderungen der

schiffserzeugten Strömungsbelastungen werden aufgrund des zunehmenden Unterwasserquerschnitts in diesem Abschnitt bei $\Delta v_R \leq +0,1$ m/s (PPM43 zu PPM46) bzw. $\Delta v_R \approx +0,4$ m/s (PM32 zu PPM46) liegen (vergl. Kapitel 7.2.5).

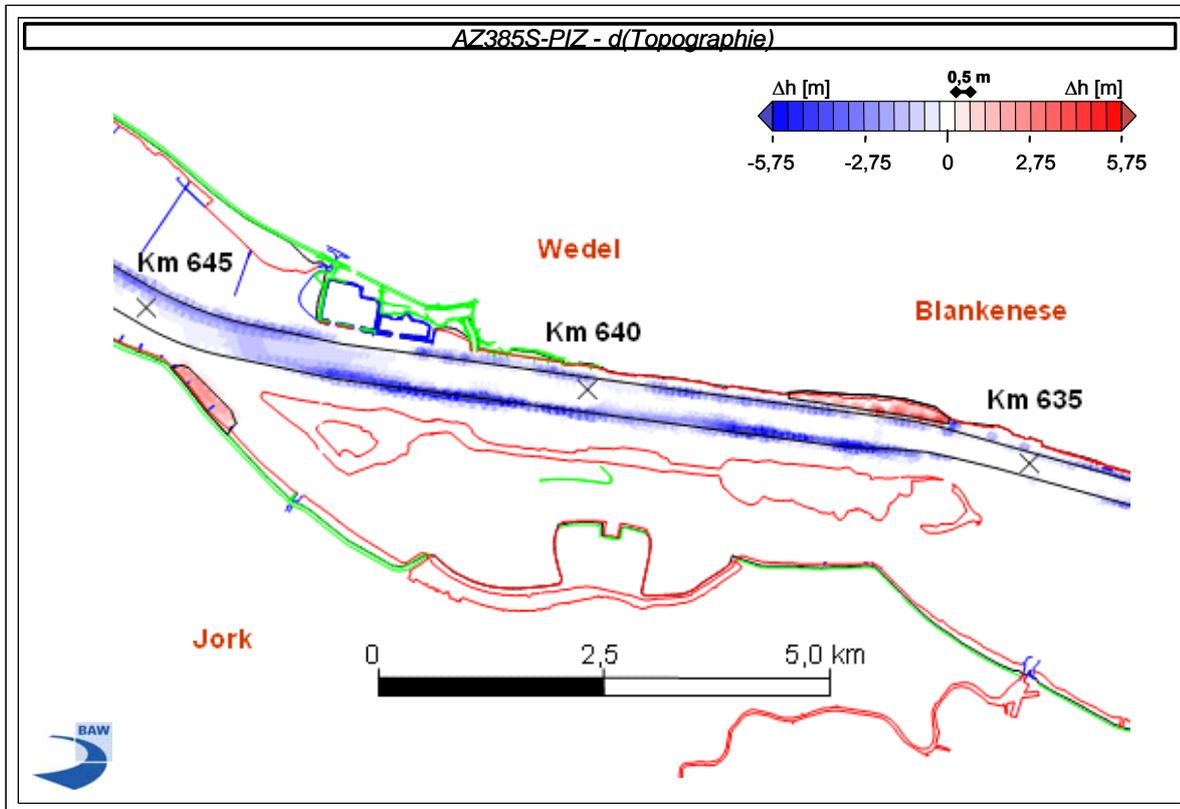


Bild 33: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Blankenese bis Wedel (km 634 bis km 645)

8.3.3 Wedel bis Lühesand (km 645 bis km 648)

Stromab von Wedel ab der Lühekurve (km 644) bis zur Störkurve (km 680) wird die bisherige Regelbreite der Fahrrinne von $B_S = 300$ m auf $B_S = 320$ m vergrößert, um Begegnungsverkehr von Bemessungsschiffen (PPM46) zulassen zu können ([U2], [U8]). Für den Bereich der Lühemündung / Fährmannssander Watt ist eine Aufweitung der Innenkrümmung vorgesehen (Bild 34).

Bei mittig in der Fahrrinne verkehrender Großschifffahrt mit $v_S = 12$ kn werden die schiffserzeugten Wellen und Rückströmungen nur geringe höhere Belastungen im Vergleich zum Ist-Zustand für das nördlich gelegene Süßwasserwattgebiet ergeben (PPM43 zu PPM46: $\Delta h \approx -2$; $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s).

Bei außermittiger Fahrt eines voll abgeladenen auslaufenden Containerschiffs, d.h. mit einem Passierabstand von einer Schiffsbreite von der Fahrrinnenkante, reduziert sich das

hydraulisch wirksame, nördliche Teilquerschnittsverhältnis (d.h. ohne Bühnenfelder) bei T_{nw} von $n_{T,IST,PPM43} \approx 16$ auf rund $n_{T,AUS,PPM46} \approx 12$. Trotz der nördlichen Querschnittsaufweitung um rund $\Delta A_{AUS} \approx +200 \text{ m}^2$ (km 646), aber einem reduzierten Passierabstand zu den Bühnenköpfen ist am Fahrrinnenrand auch bei moderaten Schiffsgeschwindigkeiten von $v_S \approx 12 \text{ kn}$ (Bemessungsgeschwindigkeit; tideunabhängig $v_S = 10 \text{ kn}$) mit einer Belastungszunahme von $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1 \text{ m}$ bzw. $\Delta v_R \leq +0,1 \text{ m/s}$ zu rechnen (PPM43 zu PPM46:). Werden Passagen der beiden Bemessungsschiffe PM32 und PPM46 bei T_{nw} gegenübergestellt (km 646: $\Delta n \approx -9$) sind bei $v_S = 12 \text{ kn}$ an der nördlichen Fahrrinnekante trotz der Querschnittsaufweitung Änderungen der langperiodischen Belastungen von etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +0,2 \text{ m}$ bzw. $\Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$ zu erwarten ($\Delta n_T \approx -9$; ca. -40 %).

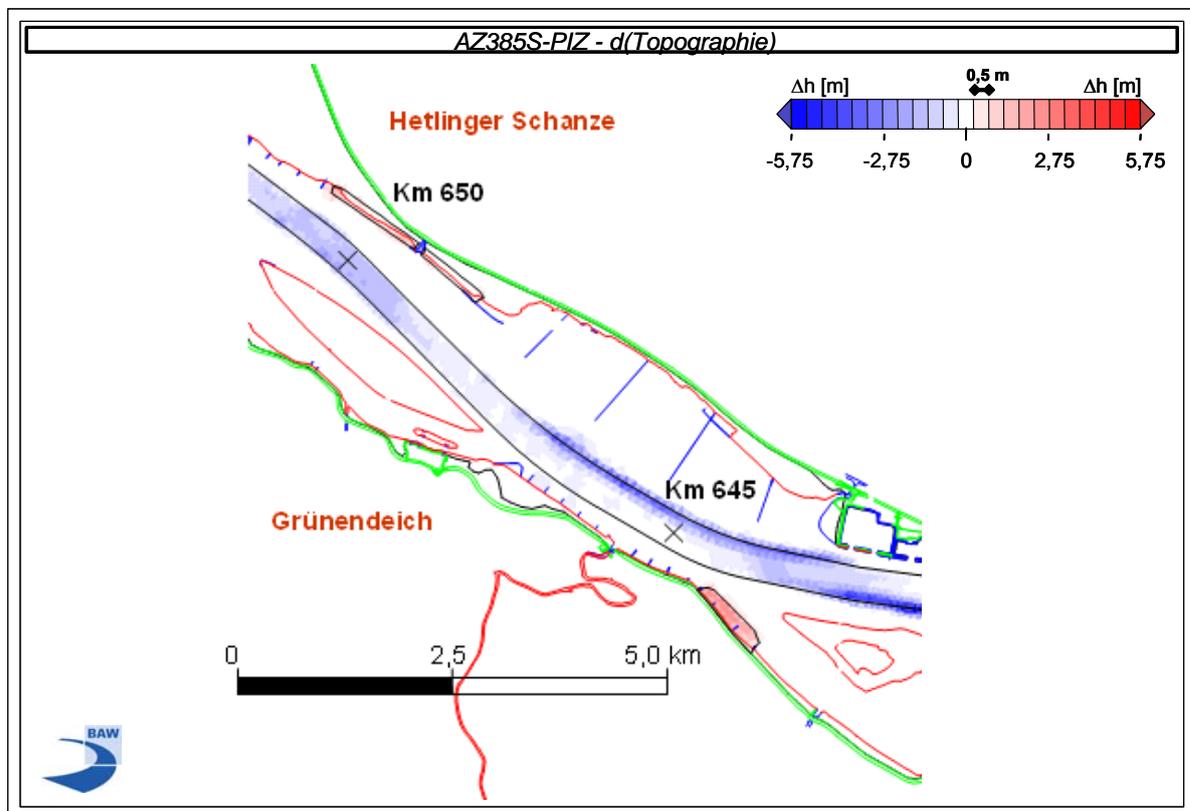


Bild 34: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Wedel bis Twielenfleth (km 645 bis km 651)

Die Teilquerschnittsverhältnisse für außermittig fahrende Aufkommer vor der Lühemündung liegen mit z.B. $n_{T,PPM46} \approx 8$ in der gleichen Größenordnung wie für Abgänger vor dem Hamburger Yachthafen. Am südlichen Uferabschnitt vor dem Anleger Lühe sind aufgrund geringer Abstände zwischen Fahrrinne und Ufer ($L_{MIN} \approx 220 \text{ m}$) und nur geringen Abtragungen in der Fahrrinne bei aufkommenden großen Bemessungsschiffen und Schiffsgeschwindigkeiten von etwa $v_S \approx 12 \text{ kn}$ Belastungsänderungen in einer Größenordnung von $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1 \text{ m}$ bzw. $+0,1 \text{ m/s} < \Delta v_R < +0,2 \text{ m/s}$ zu erwarten (PPM43 zu PPM46: $\Delta n_T \approx -1$; vergl. Bild 28).



Werden die Bemessungsschiffe PM32 und PPM46 gegenübergestellt (km 646: $\Delta n \approx -9$), ist bei $v_S = 12$ kn mit Änderungen der langperiodischen Belastungen von etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +0,3$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,4$ m/s zu rechnen ($\Delta n_T \approx -1$).

8.3.4 Lühesand bis Schwingemündung (km 648 bis km 655)

Auf dem Streckenabschnitt zwischen Lühesand und Schwingemündung sind in der Fahrrinne durchgehend großflächige Abtragungen zwischen $1 \text{ m} < \Delta h < 2 \text{ m}$ erforderlich, um die Sollssole von -17,3 mNN zu gewährleisten (Bild 34 u. Bild 35).

Die Ufervorspülung Hetlingen von etwa km 648 bis ca. km 651 ist nur oberhalb von MTnw vorgesehen und hat aufgrund ihrer Abmessungen keinen nennenswerten Einfluss auf die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen.

Die Querschnittszunahme des Bemessungsschiffs wird für mittig fahrende Fahrzeuge durch die Fahrrinnenvertiefungen teilweise kompensiert (T_{nw} ; $n_{IST,PPM43} \approx 20$; $n_{AUS,PPM46} \approx 18$), so dass zukünftig bei $v_S = 12$ kn mit einem Anstieg der schiffserzeugten Belastung in der Größenordnung von $z_A \approx H_P < +0,05$ m bzw. etwa $\Delta v_R < +0,05$ m/s gerechnet werden muss. Da zwischen den Bemessungsschiffen PM32 und PPM46 das Querschnittsverhältnis um etwa $\Delta n \approx -8$ abnimmt (ca. -30 %), sind Differenzen von etwa $z_A \approx H_P \approx +0,1$ m bzw. etwa $\Delta v_R \approx +0,1$ m/s zu erwarten.

Außermittiger - abgehender wie aufkommender - Verkehr großer Containerschiffe (damit auch Begegnungen großer Containerschiffe PM32/PPM40 bzw. PPM46/PPM46) sollte in diesem Abschnitt aufgrund des sehr geringen Passierabstands der Fahrrinne zu den Deckwerken auf Lühesand sowie zu den Bühnen und Deckwerken bei Juellsand ($L \approx 200$ m; $8 < n_T < 11$) vermieden werden, da schon bei Passagen als Einzelschiff (PM32 zu PPM46) mit der Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn die schiffserzeugten Wellenbelastungen überproportional bis zu $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +0,4$ m zunehmen und die Primärwellen die Bühnen und Deckwerke als Schwall- und Rollbrecher ($H_{P,PPM46} \approx 0,9$ m bei $v_S \approx 12$ kn) belasten werden (vergl. Bild 28). Als Wellenzunahme durch das Einzelschiff (PPM43 zu PPM46) sind bei $v_S = 12$ kn rund $\Delta z_A \approx H_P \approx +0,2$ m zu erwarten. Im Vergleich zukünftiger Begegnungen mit heute möglichen Begegnungen von PPM-Containerschiffen werden an diesen exponiert liegenden Ufern Wellenhöhenzunahmen von annähernd $\Delta z_A \approx H_P \approx +0,2$ m ($v_S = 12$ kn) auftreten.

8.3.5 Schwingemündung bis Kollmar (km 655 bis km 668)

Ab etwa Schwingemündung auf Höhe Auberg und Bishorster Sand bis zur südlichen Mündung der Pagensander Nebenelbe sind keine hydraulisch wirksamen Baggerungen zur Herstellung der geplanten Solltiefe von -17,3 mNN erforderlich. Ab etwa km 658 stromab Elbehafen Bützfleth werden in der Fahrrinne flächenhafte Abtragungen bis $\Delta h \approx 1,5$ m notwendig. Bis km 668 sind nur noch lokal bei etwa km 666 Fahrrinnenvertiefungen vorgesehen (Bild 35). Die Querschnittsverhältnisse bei Tnw liegen diesem Abschnitt zwischen $n > 23$ bis $n < 32$ im Ist-Zustand (PPM43) und $n > 21$ bis $n < 27$ im Ausbauzustand (PPM46).

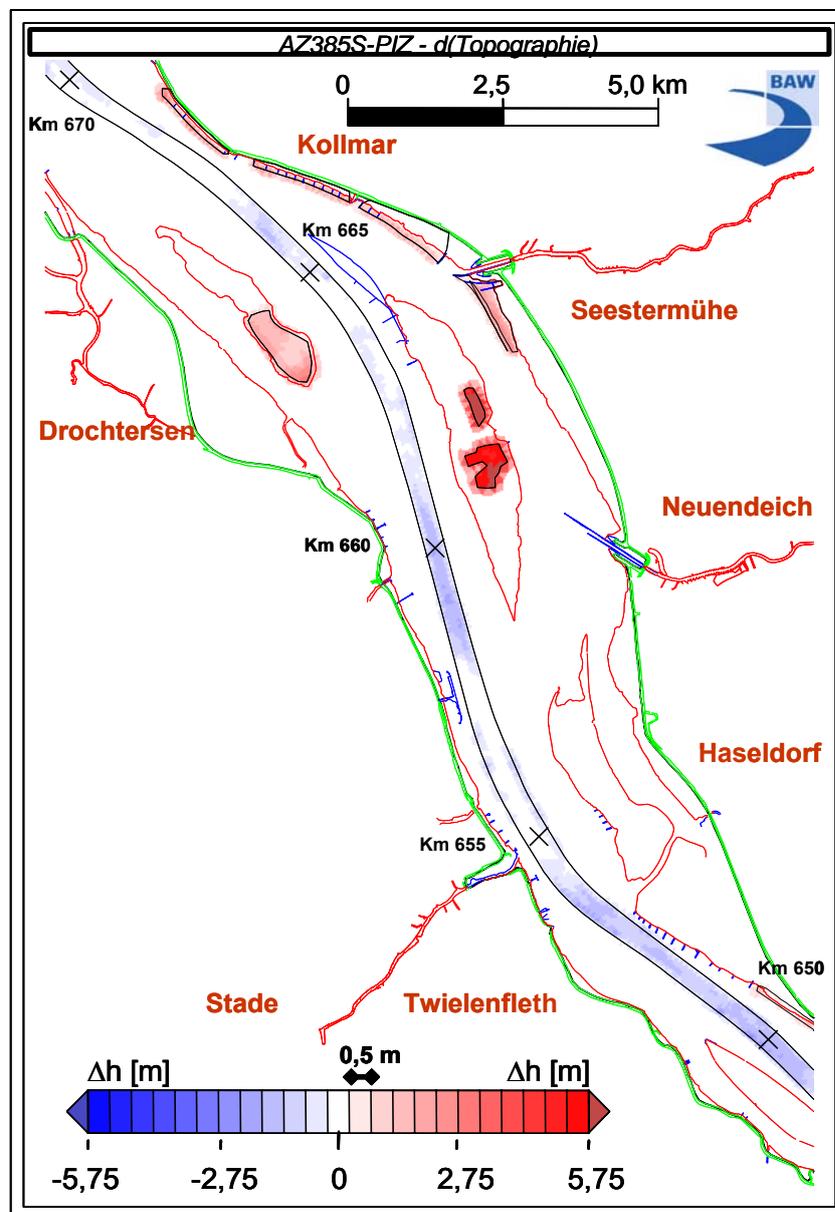


Bild 35: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Twielenfleth bis Kollmar (km 651 bis km 668)



Während im Bereich der Vertiefungen bei Bützfleth / Grauerort annähernd eine Kompensation der Größenzunahme des Bemessungsschiffs bei mittiger Fahrt ($n_{IST,PPM43} = 23$; $n_{AUS,PPM46} = 21$) zu erwarten ist, ist in den nicht zu vertiefenden Abschnitten an den Ufern und Deckwerken von Stadersand, Pagensand und Schwarztonnensand bei Fahrgeschwindigkeiten mit der Bemessungsgeschwindigkeit ($v_S = 12$ kn; tideunabhängig $v_S = 10$ kn) mit höheren schiffserzeugten Belastungen um Werte von $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,1$ m/s (PPM43 zu PPM46) sowie bis zu $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,05$ m bzw. $\Delta v_R \leq +0,1$ m/s (PM32 zu PPM46) zu rechnen, da hier die Querschnittsverhältnisse um etwa -13 % (PPM43 zu PPM46) bzw. um ca. -35 % (PM32 zu PPM46) abnehmen werden.

Bei außermittigem Verkehr ist in den nicht zu vertiefenden Abschnitten mit schiffserzeugten Belastungszunahmen bis zu etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \leq +0,2$ m/s ($v_S = 10$ kn) zu rechnen, da für Abgänger zum Nordufer hin z.B. bei Steindeich (ca. km 667 – km 668) das n_T -Verhältnis aufgrund des geringen Fahrrinnenabstands von rund $L_{km667} \approx 350$ m deutlich abnimmt (T_{nw} ; $n_{T,IST,PM32} = 23$; $n_{T,IST,PPM43} = 19$; $n_{T,AUS,PPM46} = 15$; $\Delta n_T \approx -8$ bzw. -4 ; entspricht -35 % bzw. -19 %). Gleiche Belastungszunahmen ergeben sich aufgrund gleichwertiger Änderungen der Querschnittsverhältnisse für tideunabhängige Aufkommer am südlichen Ufer z.B. auf Höhe Schwarztonnensand und Stadersand ($v_S = 10$ kn).

Infolge Wellenrefraktion in den Flachwasserbereichen und Wellendiffraktion an der nördlichen Spitze des Leitdamms Pagensand werden die langperiodischen Schiffswellen, wenn auch mit leicht abgeminderter Amplitude, in die Nebenelben z.B. in Richtung Kollmar oder hinter Schwarztonnensand einlaufen.

8.3.6 Kollmar bis Brokdorf (km 668 bis km 683)

Im Abschnitt Steindeich / Bielenberg und südlich bis zur Mündung des Ruthenstroms (km 670) sind aufgrund ausreichender Wassertiefen keine Baggermaßnahmen erforderlich. Die Fahrrinne im Untereelbeabschnitt Krautsand / Rhinplatte wird im Mittel um etwa $\Delta h \approx 0,8$ m ($\Delta h_{MAX} \approx 1$ m) flächenhaft auf einer Länge von annähernd 6 km vertieft (Bild 36). Ab der Nordspitze Rhinplatte bis Brokdorf (km 683) sind keine Vertiefungsmaßnahmen erforderlich, da hier natürliche Wassertiefen von im Mittel +19 mNN vorliegen. Die Fahrrinnenbreite vergrößert sich von zukünftig $B_S = 320$ m stromab der Störkurve auf die schon heute vorgehaltenen Sohlbreite von $B_S = 400$ m.

Die Ufervorspülungen Kollmar / Steindeich / Bielenberg sind im wesentlichen in Höhenlagen oberhalb von MT_{nw} vorgesehen und werden aufgrund ihrer Abmessungen die Querschnittsverhältnisse nur in geringem Maß beeinflussen, andererseits werden sie selbst durch die schiffserzeugten Wellen und Strömungen wie auch durch deren Änderungen belastet. Des weiteren ist am nordöstlichen Rand der Glückstädter Nebenelbe vom Fährhafen bis zur

Störmündung oberhalb von ca. MTnw in einem Abstand von rund 1.000 m von der Fahrrinne eine Ablagerungsfläche mit einer Breite von etwa 500 m und einer Mächtigkeit im Mittel 2 m vorgesehen. Diese Ablagerungsfläche wie auch die geplante Ufervorspülung unterhalb der Störmündung km 676 bis km 681,5, die zudem hinter einem vorhandenen Leitdamm liegt, wird zu keinen messbaren Änderungen der schiffserzeugten Belastung führen.

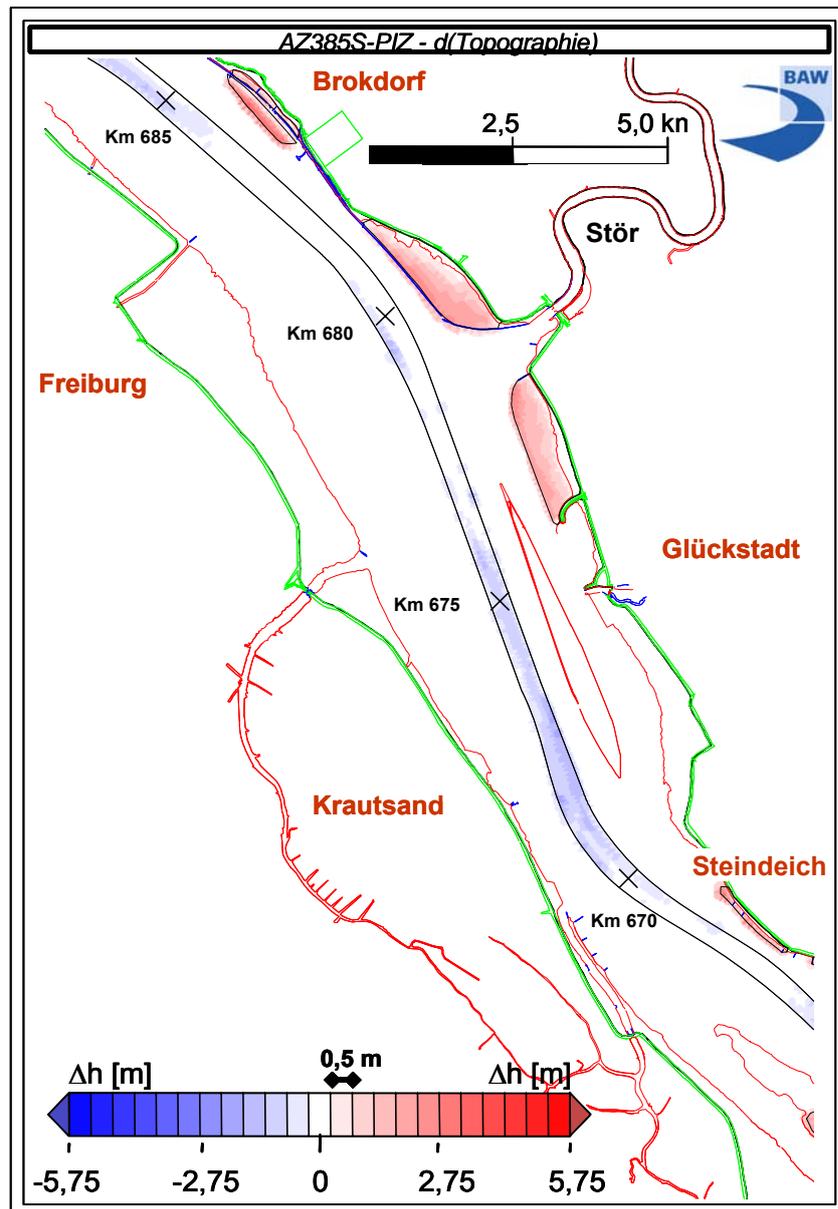


Bild 36: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Kollmar bis Brokdorf (km 668 bis km 683)

Die Bemessungsgeschwindigkeit zur Ermittlung der erforderlichen Fahrrinntiefe wurde ab Rhinplatte (km 675) bis Brunsbüttel (km 698) auf $10 \text{ kn} < v_s < 14 \text{ kn}$ (ab Brokdorf tideunabhängig $v_s = 12 \text{ kn}$) festgelegt.



In der Vertiefungsstrecke (z.B. km 672) ist keine vollkommene Kompensation der hydromechanischen Wirkung der größeren Containerschiffe durch die Rinnenvertiefung möglich, da sich das Querschnittsverhältnis um etwa $\Delta n \approx -3$ (ca. -11 %) verringert ($n_{\text{IST,PPM43}} \approx 29$; $n_{\text{AUS,PPM46}} \approx 26$). Beim Vergleich PM32 und PPM46 wird die Querschnittsverringering mit $\Delta n \approx -13$ (ca. -33 %) besonders deutlich. Die Belastungszunahmen werden bei einer Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn (tideunabhängig $v_S = 10$ kn) bei einem um etwa 40 % größeren Querschnitt im Vergleich zum Referenzgebiet Hamburger Yachthafen bei annähernd $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,05$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,05$ m/s (PPM43 zu PPM46) liegen. Die Differenzen der Belastung zwischen den Bemessungsschiffen (PM32 zu PPM46) werden auf Werte von etwa $0,1 \text{ m} < \Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,2$ m bzw. $\Delta v_R < +0,2$ m/s prognostiziert.

Die an den Fahrrinnenrändern prognostizierten, langperiodischen Wellenbelastungen werden sich annähernd ungedämpft z.B. in den Ruthenstrom (ca. km 670) fortsetzen und bei überhöhten Schiffsgeschwindigkeiten die Maximalwerte der Naturmessungen von 2002 überschreiten (vergl. Kapitel 6.1).

In nicht zu vertiefenden Abschnitten zwischen Störmündung und Brokdorf, in denen die tideabhängige Bemessungsgeschwindigkeit auf $v_S = 12$ kn (tideunabhängig weiterhin $v_S = 10$ kn) festgelegt ist, sind an den Fahrrinnenkanten Belastungszunahmen in der gleichen Größenordnung von $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,05$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,05$ m/s (PPM43 zu PPM46) bzw. $0,1 \text{ m} < \Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,2$ m bzw. $\Delta v_R < +0,2$ m/s (PM32 zu PPM46) zu erwarten, da hier die Teilquerschnittsverhältnisse desgleichen um etwa $\Delta n_T \approx -3$ bzw. $\Delta n_T \approx -9$ (z.B. Hollerwettern) sowie um $\Delta n_T \approx -4$ bzw. $\Delta n_T \approx -13$ (z.B. Höhe Allwörder Außendeichsgelände) abnehmen. Landwärts der Fahrrinne unterliegen die Schiffswellen in Abhängigkeit des Wasserstands Wellenumformungsprozessen (Refraktion, Shoaling, Wellenbrechen) bis sie die Vorlandkanten erreichen. Ausbaubedingt höhere Schiffswellen unterliegen ebenso den entsprechenden Umformungs- und Energiedissipationsprozessen, so dass die Belastungszunahmen im Flachwasserbereich gedämpft sind. Auf den Wattgebieten werden schiffsinduzierte Strömungen nur infolge von geänderten Wellenbedingungen auftreten.

Im Freiburger Hafenpriel werden - wie schon heute - aufgrund der Wathöhen nur bei Wasserständen oberhalb Tidemittelwasser schiffserzeugte Belastungen zu erwarten sein, deren ausbaubedingte Änderungen bei Thw deutlich unter den für Tnw prognostizierten Werten liegen werden ($\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m). Im Priel selbst wird eine Dämpfung der Eingangssignale infolge Reflexion und Energiedissipation bis zum Erreichen des Sperrwerks erfolgen, wobei – wie im Ruthenstrom gemessen – hier bei höheren Tidewasserständen aufgrund der absinkbedingten Sogströmung sowie der Sohlreibung eine sehr starke Umformung der schiffserzeugten Primärwelle erfolgen kann, so dass die langperiodische Welle bei hoher Energiedissipation und Fortschrittsgeschwindigkeit als Bore (brechende Schwallwelle) in den Hafenpriel einlaufen kann. Die ausbaubedingte Zunahme dieser Welle wird entlang des



Priels entsprechend der Gesamtwelle gedämpft. Schiffsinduzierte Strömungsänderungen erfolgen im Priel nur aufgrund geänderter Wellenbedingungen.

Die prognostizierten, ausbaubedingt höheren schiffserzeugten Wellenbelastungen am Nordufer z.B. bei km 682 werden in Abhängigkeit des Tidewasserstands nach Wellenumformungsprozessen (Teilreflexion, Wellenrefraktion, Shoaling) an Deichsielen wie z.B. bei Hollerwettern auftreten und in der Zeit von annähernd ausgeglichenen Binnen- und Außenwasserständen (um MTnw) zu entsprechend häufigeren Sieltorbewegungen bis hin zum „Schlagen“ der Tore führen.

8.3.7 Brokdorf bis Büttel (km 683 bis km 692)

Zwischen Brokdorf und Büttel sind zur Herstellung der neuen Sollsohle von -17,3 mNN nur im Abschnitt Scheelenkuhlen (km 684 bis ca. km 687) geringe asymmetrische Systemveränderungen in der südlichen Fahrrinnenhälfte erforderlich. Neue Ablagerungsflächen sind am nördlichen Ufer bei Brokdorf und St. Margarethen vorgesehen (Bild 37), die vorhandene Ablagerungsfläche Scheelenkuhlen wird aufgefüllt.

Die Ablagerungsflächen werden im wesentlichen unterhalb von MTnw hydraulisch wirksam, was zu einer entsprechenden Belastungserhöhung des nördlichen Uferstreifens, das heißt, auch der Ablagerungsfläche selbst, führen wird.

Im Abschnitt der Ablagerungsflächen Brokdorf ist keine Fahrrinnenvertiefung erforderlich, so dass diese Querschnittsreduzierung zusammen mit der Schiffsgrößenentwicklung bei MTnw eine Verringerung der nördlichen Teilquerschnittsverhältnisse um etwa $\Delta n_T \approx -5$ (-20 %; PPM43 zu PPM46) bzw. $\Delta n_T \approx -13$ (-37 %; PM32 zu PPM46) zur Folge hat. Damit ist bei der hier angesetzten Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 14$ kn, aber einem deutlich größerem Teilquerschnittsverhältnis 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 bzw. $\Delta v_R \approx +0,1$ m/s (PPM43 zu PPM46) zu erwarten (PM32 zu PPM46: $0,1 \text{ m} < \Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,2$ m bzw. $\Delta v_R \leq +0,2$ m/s).

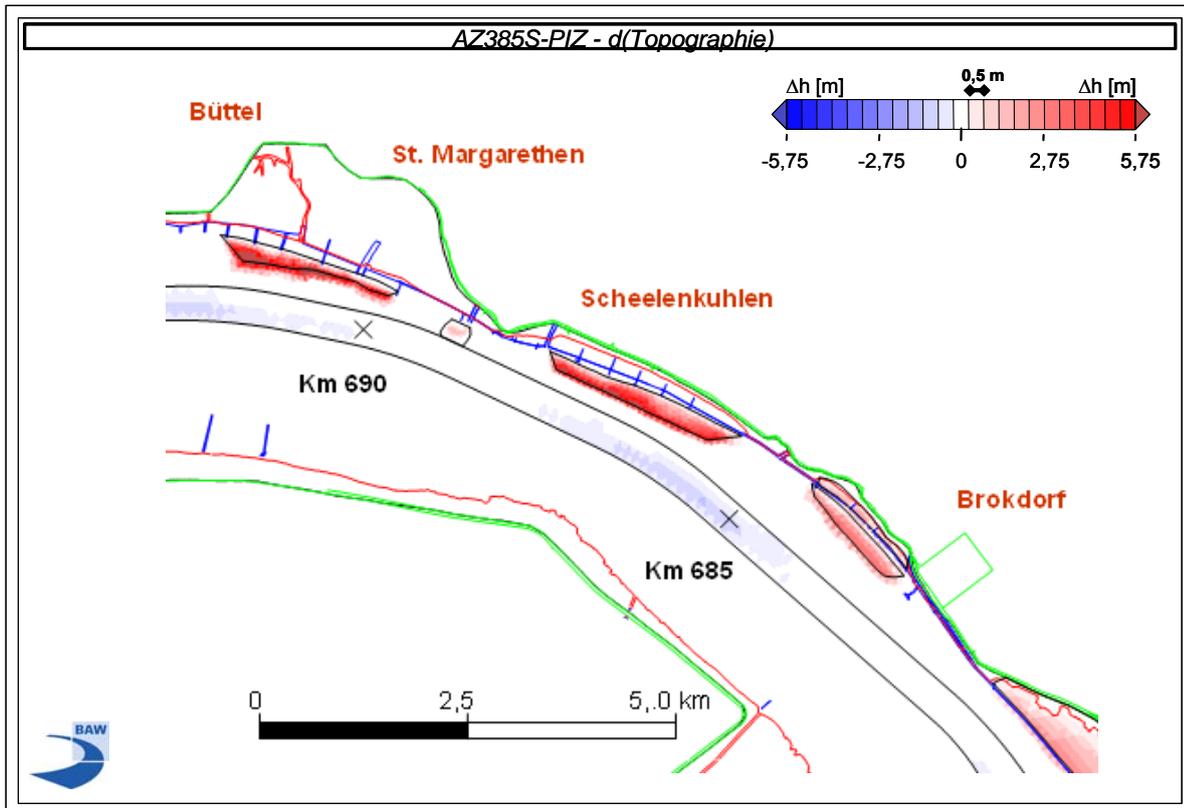


Bild 37: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Brokdorf bis Büttel (km 683 bis km 692; ohne Übertiefenverfüllung St. Margarethen)

Im Bereich der Ablagerungsflächen Scheelenkuhlen und St. Margarethen am Nordufer zwischen rd. km 685 und km 687 bzw. ca. km 690 und km 691,5 werden die Teilquerschnittsverhältnisse im Mittel um Werte von $\Delta n_T \approx -6$ (ca. -25 %; PPM43 zu PPM46) bzw. $\Delta n_T \approx -12$ (rd. -42 %; PM32 zu PPM46) reduziert (Bild 38). Bei den lokalen Bemessungsgeschwindigkeiten (tideabhängig $v_S = 14$ kn; tideunabhängig $v_S = 12$ kn) werden die schiffserzeugten Wellen und Strömungen an der nördlichen Fahrrinnenkante um eine Größenordnung von $+0,1 \text{ m} < \Delta Z_A \approx \Delta H_P < +0,2 \text{ m}$ bzw. $\Delta v_R \approx +0,2 \text{ m/s}$ ansteigen (PPM43 zu PPM46). Beim Vergleich der Bemessungsschiffe PM32 und PPM46 sind doppelt so hohe Zunahmen zu erwarten.

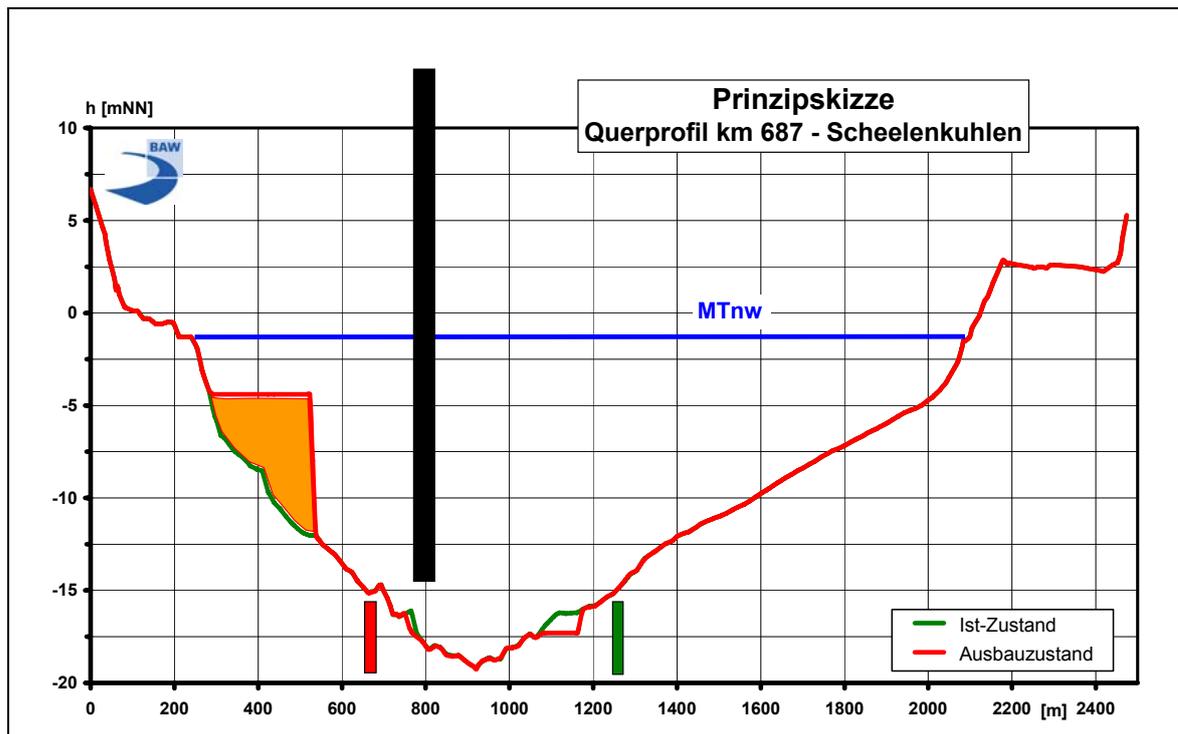


Bild 38: Querprofil der Unterelbe bei km 687 (Ablagerungsfläche Scheelenkuhlen; stark überhöht)

Die Wirkung von Unterwasserbermen auf die schiffserzeugte Belastungen wurden von der BAW u.a. am Beispiel von Aufkommern im Lühequerschnitt ermittelt ($n_T \approx 14$; $L \approx 220$ m; BAW, 1997). Bei einer Unterwasserberme am Lüher Ufer ($\Delta n_T \approx -3$) wurden vor dem Anleger Lühe infolge der Querschnittseinengung geschwindigkeitsabhängige Zunahmen von $\Delta z_A \approx +0,3$ m ($v_S = 12$ kn) bis zu $\Delta z_A \approx +0,8$ m ($v_S = 15$ kn) ermittelt. Im Bereich der Berme wurde eine annähernde Verdopplung der schiffserzeugten Rückstromgeschwindigkeit bis zu $v_R \approx 0,9$ m/s ($v_S = 12$ kn) bzw. bis zu $v_R \approx 2,2$ m/s ($v_S = 15$ kn) gemessen. Die BAW stellte dazu fest, dass

„die hohen schiffserzeugten Belastungen bei der Verwendung von Sanden als Baumaterial über eine notwendige Sicherung der Bermenböschung 1:4 zur Fahrrinne hinaus zusätzliche Sicherungsmaßnahmen der Bermenoberfläche (filterstabile Abdeckung z.B. durch Schüttsteine)“

erfordern (BAW, 1997).

Da die zukünftigen Teilquerschnittsverhältnisse im Bereich der Ablagerungsflächen Scheelenkuhlen und St. Margarethen für das außermittig verkehrende Bemessungsschiff aufgrund des annähernd übereinstimmenden Passierabstands ($L \approx 250 - 300$ m) etwa in der gleichen Größenordnung liegen werden ($n_T \approx 17 - 19$), sind die Prognosen für die schiffserzeugten Belastungen dieses Abschnitts durch die damaligen Ergebnisse abgesichert.



Die vorgesehene Übertiefenverfüllung am nördlichen Fahrrinnenrand zwischen km 688,8 und km 689,1 auf ein zukünftiges Höhenniveau von -21 mNN mit einer mittleren Breite von 200 m führt zwar zu einer lokalen Querschnittsreduzierung von etwa $\Delta n \approx -9$ ($n_{\text{IST,PPM40}} \approx 41$; $n_{\text{AUS,PPM46}} \approx 32$), wird aber aufgrund ihrer begrenzten Ausdehnung einen nur geringen, kaum messbaren Einfluss auf die örtlichen schiffserzeugten Belastungen haben.

8.3.8 Büttel bis Brunsbüttel (km 692 bis km 700)

Im Bereich des Elbehafens Brunsbüttel zwischen km 692 und km 698 werden Abgrabungen in der Fahrrinne bis zu etwa $\Delta h \approx 1$ m notwendig, um für die durchgehende Schifffahrt die ab hier tiefere Sollsole von -17,3 mNN auf -17,7 mNN zu gewährleisten (Bild 39). Des Weiteren sind lokal Vertiefungsmaßnahmen nördlich der Fahrrinne bis zu $\Delta h \approx 2$ m vorgesehen. Die hydraulisch wirksamen Querschnitte bei MTnw führen für die großen Containerschiffe im Ist-Zustand mit $t_{\text{PPM43}} = 12,8$ m zu Querschnittsverhältnissen von etwa $n_{\text{IST,PPM43}} \approx 40$ und im Ausbauzustand mit $t_{\text{PPM46}} = 13,8$ m zu $n_{\text{AUS,PPM46}} \approx 37$.

Die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen durch die Großschifffahrt (PPM43 zu PPM46) werden an der nördlichen Fahrrinnenkante bei den reduzierten Teilquerschnittsverhältnissen von rund $\Delta n_T \approx -1$ bis -4 (-3 % bis -10 %), auch bei der Annahme einer nicht reduzierten Schiffsgeschwindigkeit beim Lotsenwechsel, etwa $\Delta Z_A \approx \Delta H_P < +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,1$ m/s (tideunabhängig, $v_S = 12$ kn) betragen. Die Teilquerschnittsverhältnisse auf der südlichen Fahrrinnenseite liegen bei MTnw zukünftig bei rund $n_T \approx 22$ und reduzieren sich mit $\Delta n_T \approx -3,5$ (ca. -13 %) etwas stärker als auf der nördlichen Seite, so dass hier bei $v_S = 12$ kn mit leicht größeren Zunahmen von $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,15$ m/s zu rechnen sein wird.

Beim Vergleich der Bemessungsschiffe PM32 zum PPM46 werden die schiffserzeugten Wellen und Strömungen bei $v_S = 12$ kn (tideunabhängig) an der nördlichen Fahrrinnenkante (z.B. km 698) um Werte zwischen $+0,1$ m $< \Delta Z_A \approx \Delta H_P < +0,2$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,2$ m/s ansteigen, da sich das Teilquerschnittsverhältnis um etwa $\Delta n_T \approx -16$ (ca. -30 %) ändern wird. Am südlichen Ufer werden die Belastungen etwa in der gleichen Größenordnung wie am Nordufer liegen, weil hier mit einer prozentualen Querschnittsreduzierung von ca. -33 % ($\Delta n_T \approx -11$; PM32 zu PPM46) zu rechnen ist.

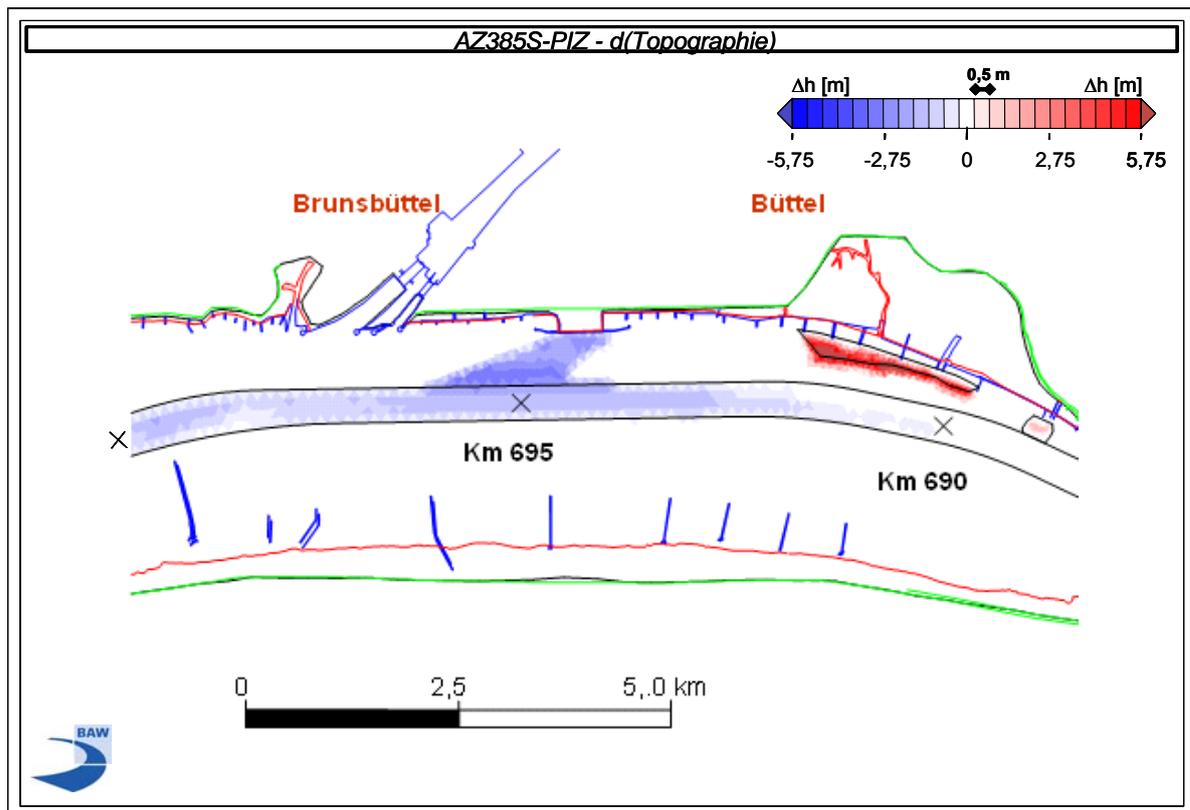


Bild 39: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Büttel bis Brunsbüttel (km 692 bis km 700)

8.3.9 Brunsbüttel bis Ostemündung (km 700 bis km 710)

Im Bereich der Neufelder Reede sind zur Herstellung der Sollsohle (linear zunehmend von etwa -17,7 mNN bei km 698 bis auf -18,4 mNN etwa bei km 713) zwischen km 700 und annähernd km 705 flächige Fahrrinnenvertiefungen bis zu $\Delta h \approx 1,5$ m erforderlich. Des Weiteren ist auf einer Länge von ca. 6 km nördlich der Neufelder Reede eine Ablagerungsfläche von im Mittel -7 mNN bis zu einer Höhenkote von etwa -4 mNN vorgesehen, die bei km 704 Abmessungen von einer Breite bis zu 1.100 m und eine maximale Mächtigkeit von annähernd 5 m erreicht (Bild 40 und Bild 41). Damit verringert sich das Querschnittsverhältnis bei MTnw von $n_{IST,PPM43} \approx 45$ auf etwa $n_{AUS,PPM46} \approx 35$ ($\Delta n = -10$; ca. -22 %). Die hydraulische Wirkung der Querschnittseinengung ($\Delta A \approx -3.000 \text{ m}^2$) sowie der größeren Schiffsabmessungen (PPM43/PPM46: $\Delta A_S \approx +83 \text{ m}^2$) werden durch die vorgesehene Fahrrinnenvertiefung ($\Delta A_{MAX} \approx +600 \text{ m}^2$) nur teilweise kompensiert. Entsprechend stark reduziert sich das nördliche Teilquerschnittsverhältnis für außermittig fahrende Abgänger (ca. km 704) um etwa $\Delta n_T \approx -17$ (PPM43 zu PPM46; ca. -30 %) bzw. um $\Delta n_T \approx -36$ (PM32 zu PPM46; ca. -46 %; vergl. Bild 30). Die Teilquerschnittsverhältnisse für außermittige Aufkommer zum Südufer sowie zum Osteriff verringern sich in geringerem Maß aber auf niedrigerem Niveau um Wer-

te um $\Delta n_T \approx -2$ bis -3 (PPM43 zu PPM46; ca. -11 bis -13 %) bzw. um $\Delta n_T \approx -6$ bis -8 (PM32 zu PPM46; ca. -30 bis -31 %), so dass auch hier hohe relative Verhältniszahlen zum Tragen kommen (vergl. Bild 31).

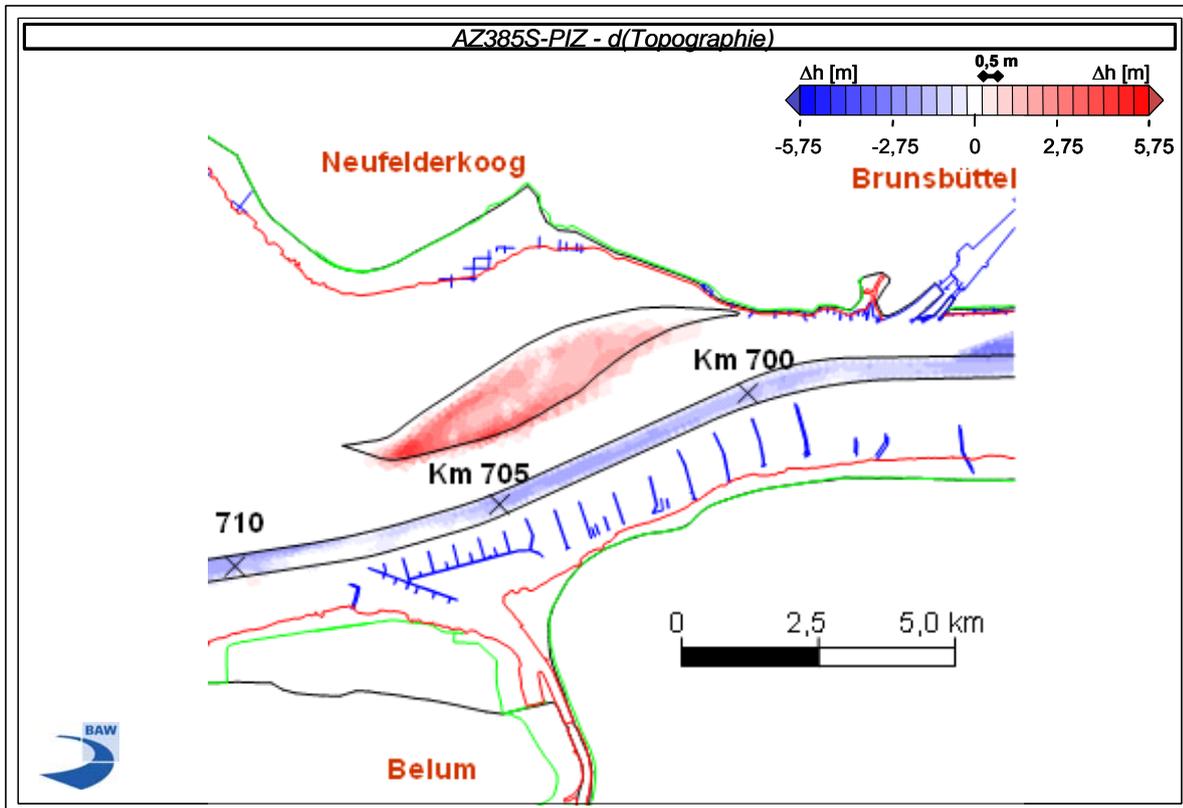


Bild 40: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Brunsbüttel bis Ostemündung (km 700 bis km 710)

Die zur Fahrrinnenbemessung festgelegte obere Bemessungsgeschwindigkeit beträgt etwa ab Brunsbüttel (km 698) $v_S = 15$ kn durchs Wasser und wurde damit gegenüber der Bemessungsgeschwindigkeit der jüngsten Fahrrinnenanpassung von $v_S = 17$ kn über Grund um $\Delta v_S = -2$ kn zurückgenommen, wobei der Differenzwert exakt nur für die Fahrt bei Stauwasserbedingungen zutrifft. Bei Fahrt mit der Tide bleibt die Fahrt durchs Wasser etwa gleich den heutigen Bedingungen, gegen die Tide reduziert sich die Schiffsgeschwindigkeit über Grund zukünftig bis zu annähernd $v_{S,u.G.} \approx 13$ kn (Annahme: Tideströmung $v_{0,MAX} \approx 2$ kn).

Für bei T_{nw} auslaufende große Containerschiffe (z.B. PPM43, $t = 12,8$ m zu PPM46, $t = 13,8$ m) reduziert sich das Teilquerschnittsverhältnis auf Seite des Neufelder Sands durch die Ablagerungsfläche, die rund 20 % des verfügbaren Verdrängungsquerschnitts ausmacht, was aber infolge des großen Passierabstands von $L \approx 2.300$ m zu keiner messbaren Belastungszunahme der Wattkanten des Neufelder Watts führen wird (Bild 41). Bei zusätzlicher Berücksichtigung der neuen oberen Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 15$ kn wird dieser

gegenüber der jüngsten Fahrrinnenanpassung reduzierte maßgebliche Parameter v_S trotz der relativ hohen Querschnittsreduzierung auch die schiffserzeugte Wellen- und Strömungsbelastung auf der Unterwasserablagerungsfläche selbst (Böschung $L \approx 1.000$ m) nicht erosionswirksam ansteigen lassen ($\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s sowohl PM32 zu PPM46 als auch PPM43 zu PPM46).

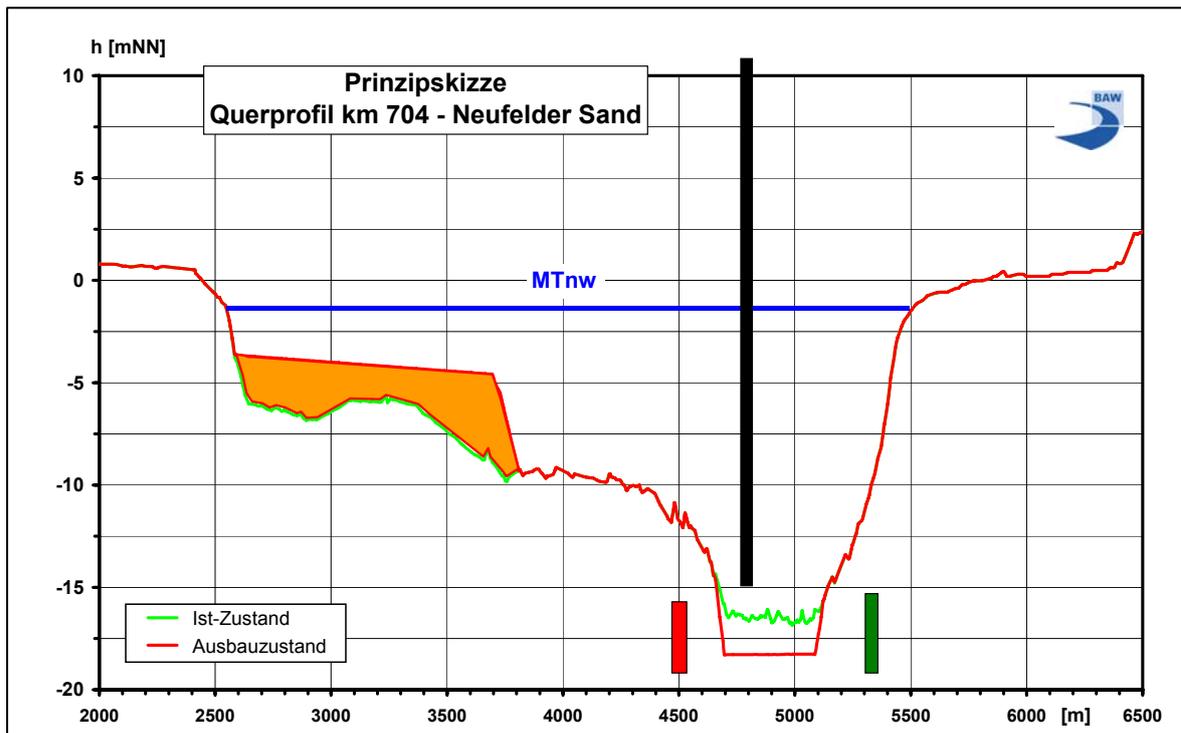


Bild 41: Querprofil der Unterelbe bei km 704 (Ablagerungsfläche Neufelder Sand; stark überhöht)

Wie auch schon im Gutachten der jüngsten Fahrrinnenanpassung festgestellt wurde (BAW, 1996) ist mit einer höheren Belastung der Bühnenköpfe auf der südlichen Fahrwasserseite u.a. direkt stromauf der Oste-Mündung (km 705 bis km 708) zu rechnen. Der Passierabstand kann bei Aufkommern im Extremfall bei einem Fahrabstand von etwa einer Schiffsbreite von der Fahrrinnenkante Werte von $L = 250$ m unterschreiten, so dass aufgrund der reduzierten Teilquerschnittsverhältnisse bei dem zukünftigen, tideunabhängigem Verkehr Zunahmen der Wellen- und Rückstrombelastung an den Bühnenköpfen z.B. bei $v_S = 12$ kn von etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,1$ m/s (PPM43 zu PPM46) zu erwarten sind. Bei der Gegenüberstellung der Bemessungsschiffe PM32 und PPM46 verdoppeln sich die Zunahmen.

Die schiffserzeugten Belastungen durch das Bemessungsschiff z.B. am Osteriff werden bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten überproportional zunehmen und verstärkt auf Unterwasserböschungen und Vorstrandflächen wirken, wobei das Einhalten der vorgesehenen Bemessungsgeschwindigkeit durch die Großschifffahrt bei etwa T_{hw} (tideabhängig $v_S = 15$ kn)



eine annähernd gleich bleibende Wellen- und Strömungsbelastung wie heute zur Folge haben wird.

8.3.10 Ostemündung bis Altenbruch (km 710 bis km 722)

Stromab der Ostemündung (km 710) bis etwa Altenbruch (km 622) sind bis auf den Kolk bei Glameyer Stack flächenhafte Abgrabungen bis etwa 1,5 m erforderlich (Sollsohle zwischen -18,1 mNN bis -18,3 mNN; Bild 42). Der Abstand der Fahrrinne zur südlichen Wattkante beträgt hier bei T_{nw} etwa $L \approx 500$ m, zum nördlichen Wattgebiet etwa $L \approx 500$ bis 600 m. Auf Höhe der Medemrinne (km 713) betragen die Querschnittsverhältnisse bei T_{nw} $n_{IST,PM32} \approx 77$, $n_{IST,PPM43} \approx 58$ und $n_{AUS,PPM46} \approx 43$, am Querschnitt der Messstation LZ3 (ca. km 719) rund $n_{IST,PM32} \approx 48$, $n_{IST,PPM43} \approx 36$ und $n_{AUS,PPM46} \approx 32$.

Entscheidend für die schiffserzeugte Belastungen durch die Großschifffahrt und die ausbaubedingte Änderungen sind die geringen Teilquerschnittsverhältnisse zum Südufer mit rund $n_T \approx 20$ sowie zum Medemgrund mit $20 < n_T < 30$ (Bild 30 und Bild 31).

Für die aufkommenden, tideunabhängig verkehrenden großen Containerschiffe wird sich z.B. trotz Fahrrinnenvertiefung im Vergleich zum Ist-Zustand (PPM43, $t = 12,8$ m, T_{nw}) das Teilquerschnittsverhältnis zum Südufer hin um etwa $\Delta n_T \approx -2$ bis -3 auf $n_T \approx 18$ bis 23 reduzieren (PPM46, $t = 13,8$ m, T_{nw}), wobei auch bei Einhalten der Bemessungsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn (tideunabhängig) eine schiffserzeugte Belastungserhöhung von $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,1$ m bzw. $\Delta v_R < +0,1$ m/s erwartet wird. Im Vergleich zum PM32 wird die schiffserzeugte Belastung mit $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,15$ m/s ($\Delta n_T \approx -8$ bis -10 ; ca. -29 bis -31 %) zunehmen.

In der Medemrinne Ost sind Querschnittseinengungen vorgesehen, die sich aber aufgrund der Abmessungen und des großen Abstands zur Fahrrinne ($L > 1.000$ m) nicht auf die schiffserzeugten Belastungen auswirken werden.

Am südlichen Rand des Medemgrunds sind nur geringe Belastungszunahmen durch die tideunabhängige Schifffahrt von etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s zu erwarten.

Die großen Wassertiefen des Kolks im Bereich Glameyer Stack (ca. km 717,4) machen sich hinsichtlich des Schiffswiderstands, somit auch hinsichtlich der schiffserzeugten Belastung, bemerkbar, wie anhand von Messungen in der Natur bei der Reaktion großer Containerschiffe (höhere Schiffsgeschwindigkeit ohne Drehzahlerhöhung) nachgewiesen werden konnte. Damit werden sich die größeren Schiffsabmessungen im Vergleich zum Ist-Zustand desgleichen auf die Belastung der Ufersicherungen auswirken, wenn aus nautischer Sicht Schiffs-

geschwindigkeiten oberhalb der angesetzten Bemessungsgeschwindigkeit (tideabhängig: $v_S = 15$ kn; tideunabhängig: $v_S = 12$ kn) notwendig werden, zumal der Passierabstand eines außermittigen Aufkommers zum Bühnenkopf nur etwa $L \approx 200$ m betragen kann (incl. Sicherheitsabstand zur Fahrrinnenkante).

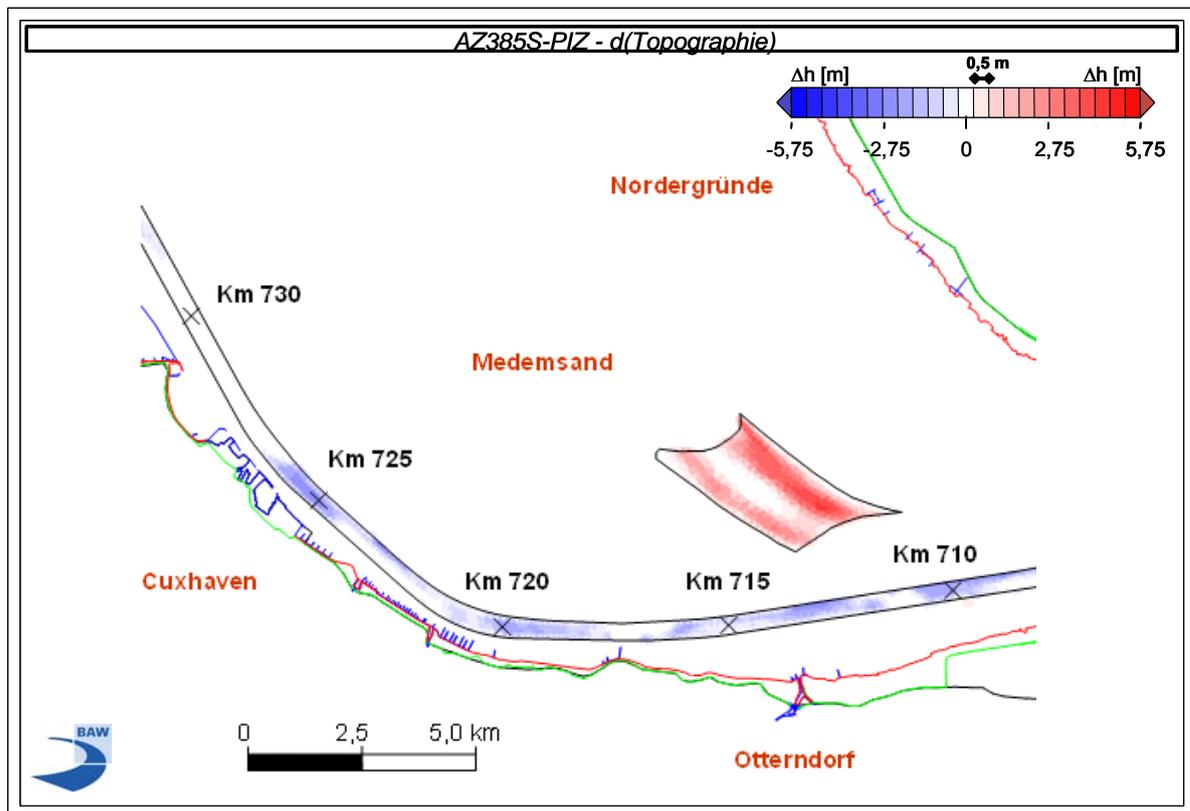


Bild 42: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Ostemündung bis Cuxhaven (km 710 bis km 730) mit der Unterwasserablagungsfläche Medemrinne-Ost

Die flächenhaften Vertiefungen bis maximal $\Delta h \approx 1,5$ m im Altenbrucher Bogen zwischen km 718 und km 721 und an der nördlichen Fahrrinnenseite ab km 722 werden die hydromechanische Wirkung der deutlich größeren Schiffsabmessungen nicht kompensieren (Bild 42). Eine höhere Belastung des Unterwasserstrands sowie der Ufersicherungen durch außermittig aufkommende Schifffahrt ist deshalb trotz des Passierabstands zum Deckwerk von $L > 400$ m aufgrund des überproportionalen Einflusses der Schiffsgeschwindigkeit auf die Belastung zu erwarten. Nur eine Geschwindigkeitsreduzierung, bei der Bemessungsgeschwindigkeit für tideabhängigen Verkehr vorgesehen, kann deshalb eine annähernd gleich bleibende Belastung der Unterwasserböschungen, des Unterwasserstrands sowie der Deckwerke gewährleisten. Die hier zu erwartenden Belastungszunahmen bei MTnw werden bei etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s (PPM43 zu PPM46) bzw. bei rund



$\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,05$ m bzw. $\Delta v_R \leq +0,1$ m/s (PM32 zu PPM46; tideunabhängig: $v_S = 12$ kn) liegen.

Aufgrund des geringen Abstands der Fahrrinne zu den Buhnen bei Altenbruch ($L \approx 250$ m bis 300 m zwischen km 720,5 bis km 722) und des somit geringen Teilquerschnittsverhältnisses werden die größeren Fahrzeuge Belastungserhöhungen von $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,1$ m bzw. $\Delta v_R < +0,1$ m/s (PPM43 zu PPM46) sowie von $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,15$ m/s (PM32 zu PPM46; tideunabhängig: $v_S = 12$ kn) bewirken. Wird bei tideabhängigem Verkehr die Reduzierung der tideabhängigen Bemessungsgeschwindigkeit um $\Delta v_S = -2$ kn berücksichtigt, werden die schiffserzeugten Belastungen durch Passagen des Bemessungsschiffs etwa in der gleichen Größenordnung wie schon heute liegen.

8.3.11 Altenbruch bis Cuxhaven (km 722 bis km 730)

Zwischen Altenbruch ab km 722 und Kugelbake Cuxhaven (km 730) sind teils asymmetrische Abgrabungen am nordöstlichen Fahrrinnenrand (ca. 1 km) und flächenhafte Vertiefungen in der Fahrrinne bis rund $\Delta h \approx 2$ m auf ca. 1 km vor den Hafenanlagen erforderlich, um die Sollsohle auf etwa -18,7 mNN herzustellen (Bild 42). Das Gesamtquerschnittsverhältnis (z.B. km 726,1) reduziert sich trotz lokaler asymmetrischer Vertiefung nur durch die Schiffsgrößenzunahme von $n_{IST,PM32} \approx 91$ und $n_{IST,PPM43} \approx 68$ auf etwa $n_{AUS,PPM46} \approx 60$.

Die südliche „grüne“ Fahrrinnenkante liegt mit etwa $L \approx 250$ m sehr nah an den Kaianlagen, so dass ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen aufgrund der Schiffsgrößenentwicklung trotz großer Gesamtquerschnittsverhältnisse zu erwarten sind. Die Teilquerschnittsverhältnisse bei MTnw betragen trotz der Abgrabungen vor Cuxhaven für aufkommende große Containerschiffe $n_{T,IST,PM32} \approx 20$ und $n_{T,IST,PPM43} \approx 17$ bzw. $n_{T,AUS,PPM46} \approx 15$ ($\Delta n_T \approx -5$ bzw. -2), so dass Passagen des PPM46 als Aufkommer bei einem angenommenen Fahrabstand von $L \approx 300$ m (Sicherheitsabstand ca. eine Schiffsbreite) und einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_S = 12$ kn (tideunabhängig) ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen von etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,1$ m bzw. $\Delta v_R < +0,1$ m/s (zu PPM43) sowie $\Delta z_A \approx \Delta H_P \leq +0,1$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,15$ m/s (zu PM32) zur Folge haben werden.

Wird bei tideabhängigem Verkehr die Reduzierung der tideabhängigen Bemessungsgeschwindigkeit um $\Delta v_S = -2$ kn berücksichtigt, werden die schiffserzeugten Belastungen durch Passagen des Bemessungsschiffs etwa in der gleichen Größenordnung wie schon heute liegen.

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

Von Cuxhaven bis zu Außenelbe auf Höhe Großer Vogelsand (Bild 43) sind flächenhaft auf etwa 3 km zwischen km 734 bis km 737 sowie teilweise an der nördlichen Fahrrinnenkante bei etwa km 741 bis km 745 Vertiefungen um annähernd $\Delta h \approx 1$ m bis auf die Sollsole von -19,0 mNN notwendig, um der Containerschiffahrt mit einem Süßwassertiefgang bis zu $t = 14,8$ m ein tideabhängiges Auslaufen aus dem Hamburger Hafen zu ermöglichen, da diese Schiffe nordwestlich von Cuxhaven dann auf das nachfolgende Tideniedrigwasser treffen werden.

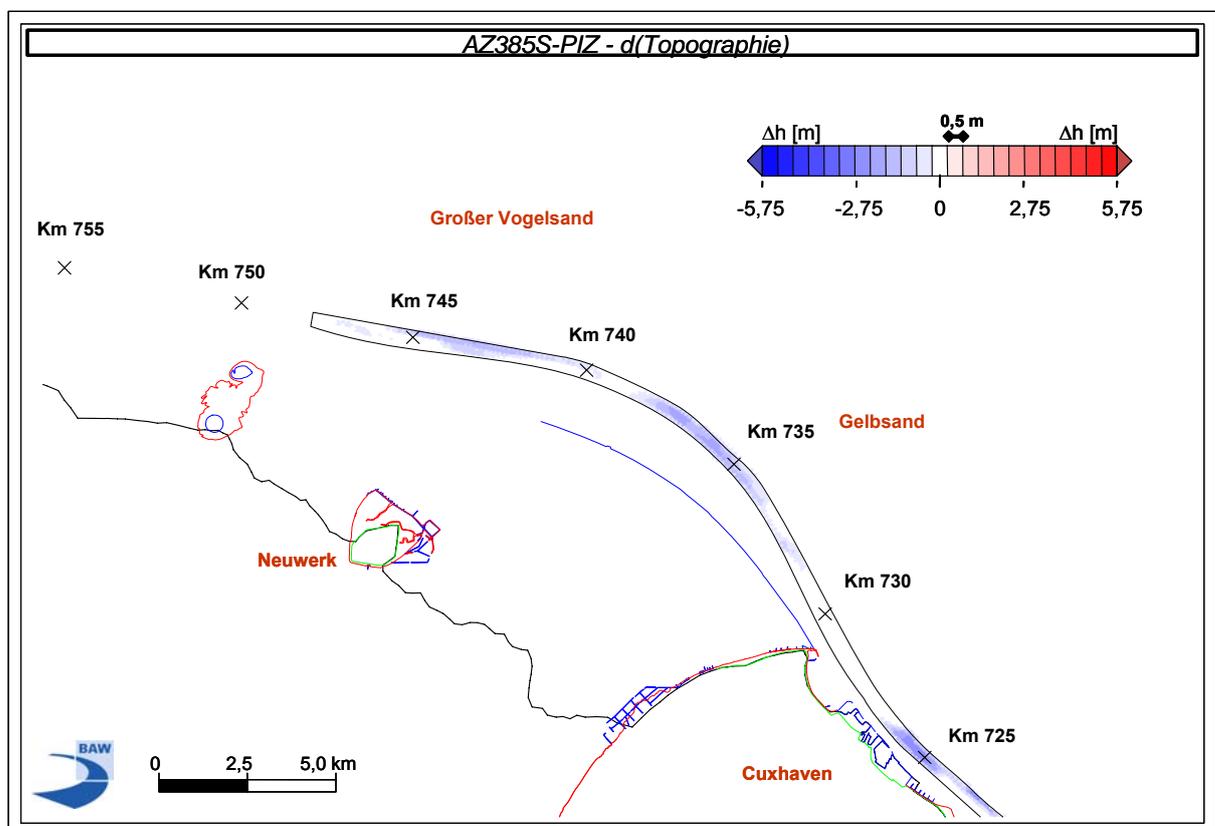


Bild 43: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Bereich zwischen Cuxhaven bis Großer Vogelsand (km 730 bis km 756)

Die Querschnittsverhältnisse (Bild 29) liegen für das PPM46 bei T_{nw} z.B. auf Höhe Steilsand / Spitzsand (km 730) etwa bei Werten von $n \approx 46$ ($\Delta n_{PPM43, PPM46} \approx -7$; ca. -13 %), so dass hier nur beim Vergleich der Bemessungsschiffe PM32 und PPM46 mit höheren Belastungen z.B. des südwestlichen Leitwerks aufgrund der Abnahmen der Teilquerschnittsverhältnisse zu rechnen ist ($\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s; PM32 zu PPM46; $v_S = 12$ kn; $\Delta n_{T, PM32, PPM46} \approx -14$, ca. 30%). Beim Vergleich des Bemessungsschiffs PPM46 mit dem schon



heute verkehrenden PPM43 werden die Belastungsänderungen aufgrund der schon hohen Teilquerschnittsverhältnisse von $n_T > 30$ (MTnw, $v_S = 12$ kn) ebenso unter $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s liegen.

Weiter stromab steigen die Querschnittsverhältnisse bei MTnw auf Werte deutlich über $n > 65$ (km 735; $n_T > 30$) an (z.B. km 740: $n_{IST,PM32} \approx 128$; $n_{IST,PPM43} \approx 96$; $n_{AUS,PPM46} \approx 83$), so dass eine ausbaubedingte Differenz auch von z.B. $\Delta n_{PPM43,PPM46} \approx -13$ (ca. -13 %) selbst in den Abschnitten, in denen keine Vertiefungen erforderlich sind, kaum messbare Auswirkungen auf die schiffserzeugten Belastungen der Fahrrinnenböschungen, Sände und Watten haben wird. Bei den tideunabhängig verkehrenden Bemessungsschiffen werden aufgrund von noch relativ hohen Abnahmen $\Delta n_{PM32,PPM46} \approx -45$ (ca. -35 %) Belastungserhöhungen von $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s ($v_S = 12$ kn) zu erwarten sein.

Zwischen Cuxhaven und See wird die Reduzierung der Bemessungsgeschwindigkeit um etwa $\Delta v_S = -2$ kn auf $v_S = 15$ kn bei tideabhängigem Verkehr zu einer etwa gleich bleibenden schiffserzeugten Belastung bei Passagen des Bemessungsschiffs PPM46 ($t = 14,5$ m) auch im Vergleich mit dem voll abgeladenen PM32 ($t = 13,5$ m; $v_S = 17$ kn) führen.

9 Belastungsprognosen nach Betroffenheiten

9.1 Vorbemerkung

Neben den Prognosen der lokalen ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen werden darüber hinaus ausgewählte Betroffenheiten besonders behandelt. Für diese Belastungsprognosen werden nur die Differenzen des heute schon verkehrenden Containerschiffs PPM43 zu dem Bemessungsschiff PPM46 zugrunde gelegt.

9.2 Belastungsänderungen für Deckwerke und Deiche

Belastungsbereich I (Hamburger Hafen km 620 bis Schwarztonnensand km 666)

Im Bereich I von Hamburg bis etwa Pagensand-Nord ist – u.a. abhängig vom Passierabstand - mit einer höheren Belastung der Deckwerke und scharliegender Deichfüße durch langperiodische Ereignisse wie Absunk z_A , Primärwelle H_P und Rückstromgeschwindigkeit v_R zu rechnen. Wenn die lokale Bemessungsgeschwindigkeit von z.B. $v_S = 10$ kn bzw. 12 kn gegen Wasser (tideabhängiger Verkehr) überschritten wird, werden die Belastungen überproportional zunehmen.



Belastungsbereich II (Schwarztonnensand km 666 bis etwa Brunsbüttel km 698)

Für den Bereich II von etwa Schwarztonnensand bis Brunsbüttel ist für Schiffsgeschwindigkeiten $v_S > 12$ kn (tideunabhängig $v_S > 10$ kn) für die Deckwerksstabilität neben dem langperiodischen Belastungsanteil auch die Belastung durch kurzperiodische Wellen wirksam. Mit lokal ausbaubedingte Zunahmen wird aufgrund der zukünftigen Schiffsgrößen auch bei Einhaltung der festgelegten Bemessungsgeschwindigkeiten (tideabhängig: $10 \text{ kn} < v_S < 14 \text{ kn}$; tideunabhängig: $10 \text{ kn} < v_S < 12 \text{ kn}$) in Abhängigkeit des Passierabstands zu rechnen sein. Diesbezüglich ist die bisherige Bemessung von Deckwerken und Ufersicherungen (u.a. auch Buhnen) zu überprüfen.

Belastungsbereich III (Brunsbüttel ab km 698 bis zur See)

Zunahmen der Deckwerks- und Deichfußbelastungen werden im Bereich III, etwa von Brunsbüttel bis Großer Vogelsand, in einzelnen exponiert liegenden Abschnitten vor allem am südlichen Ufer durch erhöhte lang- und kurzperiodische Wellen auftreten, wobei die Größenordnung wesentlich durch die Schiffsgeschwindigkeit und den Passierabstand bestimmt wird. Die ausbaubedingten Änderungen werden bei Einhaltung den neu definierten Bemessungsgeschwindigkeiten (tideabhängig: $11 \text{ kn} < v_S < 15 \text{ kn}$; tideunabhängig: $v_S \leq 12 \text{ kn}$) zwischen heute und zukünftig verkehrenden PPM-Containerschiffen nur gering sein.

Für alle Bereiche ist anzumerken:

Da entlang der gesamten Unter- und Außenelbe Begegnungsverkehr zugelassen wird, ist dementsprechend von schiffserzeugten Belastungen durch außermittigen Verkehr und einem Begegnungszuschlag auszugehen, um bei einer Belastungsprognose auf der sicheren Seite zu liegen.

Trotz höherer äußerer hydrodynamischer Belastung werden schiffserzeugte Schwingungen im Wasser- und Bodenkörper u.a. aus Motorvibration, Propellerumdrehung oder brechende Sekundärwellen und deren Wirkung auf Deckwerke und Deiche gegenüber Verkehrslasten durch Fußgänger oder Landfahrzeuge weiterhin von deutlich untergeordneter Bedeutung sein (Grundlage: BAW, 2006a).

Bei erhöhten Wasserständen am Deich (Sturmfluten) sind auch ausbaubedingt erhöhte, geschwindigkeitsabhängige schiffserzeugte Belastungen wegen des dann für die Schiffe deutlich größeren Querschnittsverhältnisses nachrangig gegenüber den dann ohnedies wirkenden Wasserstands- und Windwellenbelastungen.



9.3 Belastungsänderungen von Wattgebieten und natürlichen Ufern

Belastungsbereich I (Hamburger Hafen km 620 bis Schwarztonnensand km 666)

Im Bereich der Delegationsstrecke bis Tinsdal, vor allem bei Schiffsbegegnungen, ist mit geringen Querschnittsverhältnissen von Wasserstraße / Schiff zu rechnen, so dass hinsichtlich der Uferbelastung - wie vorgesehen - eine maximale Schiffsgeschwindigkeit von $v_S \leq 10$ kn empfohlen wird. Bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten werden die Ufer sowie vorgesehene Strandvorspülungen (z.B. Wittenbergen oder Wisch) überproportional belastet, so dass dann mit verstärkten Erosionsprozessen gerechnet werden muss.

Schiffserzeugte Belastungszunahmen der natürlichen Ufer durch große Containerschiffe sind im Bereich I stromab von Wedel bis etwa Pagensand-Nord ab Schiffsgeschwindigkeiten über $v_S > 12$ kn (tideunabhängig $v_S > 10$ kn) gegen Wasser zu erwarten. Lokale Querschnittseingengungen im Uferbereich können darüber hinaus eine Erhöhung der Belastungen auf dem vorgelagerten Unterwasserstrand bewirken und sind in ihrer Größenordnung nur örtlich differenziert abzuschätzen. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ist - wie schon heute - eine überproportionale Zunahme der Belastung der natürlichen Ufer und Süßwasserwatten, dementsprechend Uferabbrüche und Stranderosion, zu erwarten.

Belastungsbereich II (Schwarztonnensand km 666 bis etwa Brunsbüttel km 698)

Zwischen etwa Schwarztonnensand und Brunsbüttel ist vor allem in den Abschnitten der optionalen Sandvorspülungen mit einer stärkeren Belastung des vorgelagerten Unterwasserstrands zu rechnen. Bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten über $v_S > 12$ kn (tideunabhängig $v_S > 10$ kn) durch Wasser sind Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen - damit verbundenen Uferabbrüche und Stranderosion - zu erwarten.

Belastungsbereich III (Brunsbüttel ab km 698 bis zur See)

Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastung werden auf der nördlichen Fahrrinnenseite für die Watten und natürlichen Ufer seewärts Brunsbüttel aufgrund der großen Querschnitte nicht in messbarer Größe eintreten, d.h. die Wasserspiegel- und Strömungsänderungen bleiben überwiegend unter $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$ m bzw. $\Delta v_R < +0,05$ m/s.

In einzelnen exponiert liegenden Abschnitten des Südufers werden erhöhte lang- und kurzperiodische Wellen auftreten, wobei die Größenordnung wesentlich durch die Schiffsgeschwindigkeit und den Passierabstand bestimmt wird. Die ausbaubedingten Änderungen und somit die Auswirkungen auf natürliche Ufer und vorgelagerte Unterwasserstrände werden bei Einhaltung den neuen festgelegten Bemessungsgeschwindigkeiten (tideabhängig: $11 \text{ kn} < v_S < 15 \text{ kn}$; tideunabhängig: $v_S \leq 12 \text{ kn}$) in einer Größenordnung von etwa $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,1$ m bzw. $\Delta v_R < +0,1$ m/s liegen.



Bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten der großen tiefgehenden Containerschiffe deutlich über $v_S > 15$ kn sind Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen - damit verbunden Uferabbrüche und Stranderosion - zu erwarten. Dies trifft auch für den tideunabhängigen, die Fahrrinntiefe voll ausnutzenden Verkehr bei Schiffsgeschwindigkeiten über $v_S > 12$ kn zu.

9.4 Belastungsänderungen von baulichen Anlagen

Die Untersuchungen mit großen Schiffseinheiten in der Begegnungstrecke Hamburger Yachthafen haben gezeigt, dass bei Schiffsgeschwindigkeiten im Rahmen der neu festgelegten, bereichsweise zurückgenommenen Bemessungsgeschwindigkeiten teils keine, teils nur geringe schiffserzeugte Belastungsänderungen zu erwarten sind. Deutliche Belastungszunahmen treten bereichsweise erst bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten des tideabhängigen Verkehrs von $v_S > 10$ kn (z.B. Schiffsanleger Schulau), $v_S > 12$ kn (z.B. Yachthafen Hetlingen), $v_S > 14$ kn (z.B. Außentief Hollerwettern) bzw. $v_S > 15$ kn (z.B. Außentief Altenbruch) in Abhängigkeit des vorhandenen Wasserstraßenquerschnitts und des Passierabstands zum Ufer auf. Bei tideunabhängig verkehrenden großen Containerschiffen werden ebenso höhere schiffserzeugte Belastungen zu erwarten sein, wenn die entsprechende Bemessungsgeschwindigkeit durch Wasser deutlich überschritten wird (ab Altenwerder $v_S > 9$ kn, ab Lühort $v_S > 10$ kn, ab Brokdorf $v_S > 12$ kn). Dies gilt auch für am Strom gelegene bauliche Anlagen wie u.a. Stromkajen, Yachthäfen, Sieltore und Sperrwerke.

9.5 Belastungsänderungen der Sport- und Kleinschiffahrt

Die Unter- und Außenelbe wird intensiv von der Sport- und Kleinschiffahrt genutzt. Neben Freizeitsportaktivitäten (Paddeln, Motorbootfahren und Segeln mit Jollen und Dickschiffen) wird Stellnetzfisherei mit kleinen offenen Booten, Hamenfang mit verankerten Hamenkuttern sowie im Elbemündungsgebiet Kutterfisherei mit Baumkurren betrieben.

Die langperiodischen Wellen (Absunk und Primärwellen) und zugehörige Rückstromgeschwindigkeiten wirken sich in erster Linie auf vor Anker liegende Fahrzeuge sowie vertäute Fahrzeuge u.a. in Yachthäfen aus. Während die Schwall- und Sunkerscheinungen insbesondere bei ungünstigen Hafengeometrien, z.B. Schulauer Hafen, schon heute zu erheblichen Belastungen führen, wird die auf der Elbe in Fahrt befindliche Kleinschiffahrt durch die langperiodischen Wellen und die Rückströmung kaum beeinflusst.

Kleinfahrzeuge mit Längen zwischen $l = 4$ m und $l = 12$ m sind in erster Linie den kurzperiodischen Sekundärwellen ausgesetzt. Insbesondere durch sehr steile Sekundärwellen mit Höhen von $H_S > 0,8$ m (wenn sie gegen die Strömung laufen oder sich im Flachwasserbereich aufsteilen), kann schon heute eine Gefährdung für kleine offene, wenig seegangstaugliche Boote erfolgen. Wie die vorstehend erläuterten Untersuchungen gezeigt haben, entstehen derart hohe



Sekundärwellen bei Schiffen mit großem Tiefgang nur bei sehr hohen Schiffsgeschwindigkeiten (v_s deutlich über 12 kn durch Wasser). Da die Sekundärwellen als Folge der Druckunterschiede "am Schiffsrumpf" entstehen, sind sie stark von der Form und damit von der hydrodynamischen Optimierung des Schiffskörpers abhängig (BAW, 1996).

Die Größenordnung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastung in allen drei Bereichen der Seeschiffahrtstraße werden bei Einhaltung der neuen, bereichsabhängigen Bemessungsgeschwindigkeiten für die Sport- und Kleinschiffahrt nicht wahrnehmbar sein.

9.6 Belastungsänderungen für marinearchäologischen Kulturgüter

Soweit archäologische Denkmäler in den Bereichen I bis III unter Wasser vorkommen, werden in erster Linie die geschwindigkeitsabhängigen Änderungen der langperiodischen Anteile der schiffserzeugten Belastungen (Absenk, Primärwellen und Rückstromgeschwindigkeit) wirksam werden. Die ausbaubedingten Änderungen und somit die Auswirkungen auf marinearchäologische Kulturgüter werden bei Einhaltung der neuen, bereichsweise festgelegten Bemessungsgeschwindigkeiten (tideabhängig bzw. tideunabhängig) nur gering sein.

9.7 Belastungsänderungen von Fahrrinne und Unterwasserböschungen

Die Belastungsänderungen in der Fahrrinne betreffen im Bereich I und Bereich II teilweise auch die Unterwasserböschungen, ab der Störmündung bei einer Fahrrinnenbreite von $B_s = 400$ m sind bei mittlerer Fahrt die ausbaubedingten Änderungen direkt von dem zwischen Schiffsboden und Sohle zur Verfügung stehenden Querschnitt abhängig. Bei außermittiger Fahrt und Begegnungsverkehr großer Schiffseinheiten sind auch über Brunsbüttel und Cuxhaven hinaus die Unterwasserböschungen durch die ausbaubedingten Änderungen betroffen.

In der gesamten Unter- und Außenelbe bleiben bei voll abgeladenen Schiffseinheiten und Einhaltung der neuen Bemessungsgeschwindigkeit die Strömungsbelastungen an der Sohle in allen zu vertiefenden Abschnitten nahezu gleich. In Bereichen, in denen nicht vertieft werden muß, wird örtlich aufgrund der größeren Schiffsabmessungen (Breite und Tiefgang) die Sohlbelastung in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit ansteigen. Die zu erwartende Sohlbelastung aus Druck- und Strömungswechseln sowie deren ausbaubedingte Änderungen entsprechen in etwa den Beträgen direkt am Schiffskörper.



9.8 Belastungsänderungen der Nebenflüsse und Nebanelben

In den Nebenflüssen und Nebanelben wird in erster Linie der langperiodische Anteil der ausbaubedingten Änderungen wirksam. Diese schiffserzeugten Belastungsänderungen werden analog den schon heute die Nebenflüsse flussauf laufenden Absunkereignissen gedämpft. In Abhängigkeit der Lage und des Abstands der Nebenflussmündungen zur Hauptrinne (u.a. Lühe, Dwarsloch und Schwinge), sind wirksame geschwindigkeitsabhängige Änderungen an den Einmündungen, also auch in den Nebenflüssen bzw. Nebanelben, zu erwarten.

9.9 Häufigkeit schiffserzeugter Belastungen

Entsprechend der Flottenentwicklung und der damit einhergehenden Zunahme der großen Containerschiffe auf den Weltmeeren sowie der Steigerung des Containerumschlags im Hamburger Hafen ist mit einer entsprechenden Häufigkeitszunahme der heutigen schiffserzeugten Belastung sowie der ausbaubedingten Änderungen zu rechnen. Detaillierte statistische Untersuchungen und Prognosen des Instituts für Seeverkehrswirtschaft und Logistik (ISL) aus Bremen sind in [U10] zusammengestellt.

Für Kaianlagen, Deckwerke, Bühnen und Leitwerke, die für die heutige schiffserzeugte Belastung hinreichend bemessen sind, wird eine Häufigkeitszunahme der Belastung keine wesentlichen Auswirkungen haben. Aufgrund von über den Bemessungsannahmen liegenden Einzelereignissen, die Anfangsschäden an den baulichen Anlagen bewirken können, kann dann eine Häufigkeitszunahme der Bemessungsbelastung zu weiteren Schäden bis hin zum Versagen des Bauwerks führen. Bei heute bereits beschädigten Anlagen kann eine Häufigkeitszunahme eine Schadenserweiterung und ggf. ein früheres Versagen bewirken.

Natürliche Ufer, Wattgebiete, Platen und Sände werden bei einer Häufigkeitszunahme von Schiffspassagen in Abhängigkeit der strömungs- und wellenerzeugten Transportprozesse belastet. Bereiche, in denen schon heute schiffserzeugte Erosionsvorgänge in starkem Maß die morphologische Entwicklung bestimmen, werden bei einer Häufigkeitszunahme der Schiffspassagen entsprechend häufiger durch Erosionsprozesse und Umlagerungen beaufschlagt werden. In Bereichen der Unter- und Außenelbe, in denen tide- und seegangsinduzierte Transportprozesse das Schwebstoff- und Sedimentregime sowie die morphologische Entwicklung prägen, wird eine Häufigkeitszunahme der Schiffsbewegungen in der Fahrrinne von untergeordneter Bedeutung sein.



10 Schlussfolgerungen zu den ausbaubedingten Änderungen

Die ausbaubedingten Änderungen der lang- und kurzperiodischen schiffserzeugten Belastungen lassen sich auf der Basis von Untersuchungen in hydraulischen Modellen für ausgewählte extreme Szenarien geschwindigkeitsabhängig exakt nur für die gewählte Unterwassertopographie bestimmen. Anhand von zusätzlichen Systemversuchen können Änderungen für andere Querschnitte in ihrer Größenordnung abgeschätzt werden, eine exakte Quantifizierung der zukünftigen Maximalbelastung ist auch mit Hilfe der analysierten Naturmessungen nach dem Stand der Wissenschaft nicht möglich.

Das Untersuchungsprogramm umfasst Vergleichsbetrachtungen vor und nach der Fahrrinnenanpassung auf Basis theoretischer Ansätze und Erfahrungen aus Naturuntersuchungen für ausgewählte Schiffstypen hinsichtlich der Belastungsänderungen von Deckwerken und Deichen, Wattgebieten und natürlichen Ufern sowie von baulichen Anlagen. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden Versuche in einem hydraulischen Modell eines ausgewählten Unterelbeabschnitts, der Begegnungsstrecke Hamburger Yachthafen, vorgenommen, in dem u.a. Extremszenarien wie die Begegnung von großen Container- mit Massengutschiffen simuliert wurden.

Beim Vergleich des PPM46-Bemessungsschiffs ($t = 13,8$ m) mit den schon heute im Ist-Zustand tideunabhängig verkehrenden PPM43-Containerschiffen ($t = 12,8$ m) werden die langperiodischen, ausbaubedingten Änderungen nach der neuen Fahrrinnenanpassung bei Einhalten der für die Fahrrinntiefe angesetzten oberen Bemessungsgeschwindigkeiten zwischen $9 \text{ kn} < v_s < 12 \text{ kn}$ lokal unterschiedlich bis etwa $\Delta z_A < +0,2$ m liegen (Δz_A siehe Bild 44). Bei den kurzperiodischen Sekundärwellen ist in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit ($v_s > 14 \text{ kn}$) und den Änderungen der langperiodischen Belastung (z.B.: $\Delta z_A \approx +0,2$ m) maximal von ausbaubedingten Änderungen von $\Delta H_s \approx +0,1$ m auszugehen.

Begegnungssituationen sowohl von großen, tideunabhängig verkehrenden Containerschiffen entlang der Unter- und Außenelbe als auch von Massengutschiffen mit Containerschiffen in der Begegnungsstrecke Wedel/Blankenese bei MThw können in Abhängigkeit des Passierabstands sowie der Schiffsgeschwindigkeit zu höheren schiffserzeugten Belastungen führen als in Bild 44 zusammengestellt.

Wie schon im heutigen Zustand werden auch nach der neuen Fahrrinnenanpassung bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten ($v_s >$ obere Bemessungsgeschwindigkeit) bereichsweise überproportional erhöhte schiffserzeugte Belastungen auftreten. Als Maß für diese ausbaubedingten Änderungen der lokalen schiffserzeugten Belastungen ist in erster Linie der geschwindigkeitsabhängige Energieeintrag durch das Schiff zu bewerten.

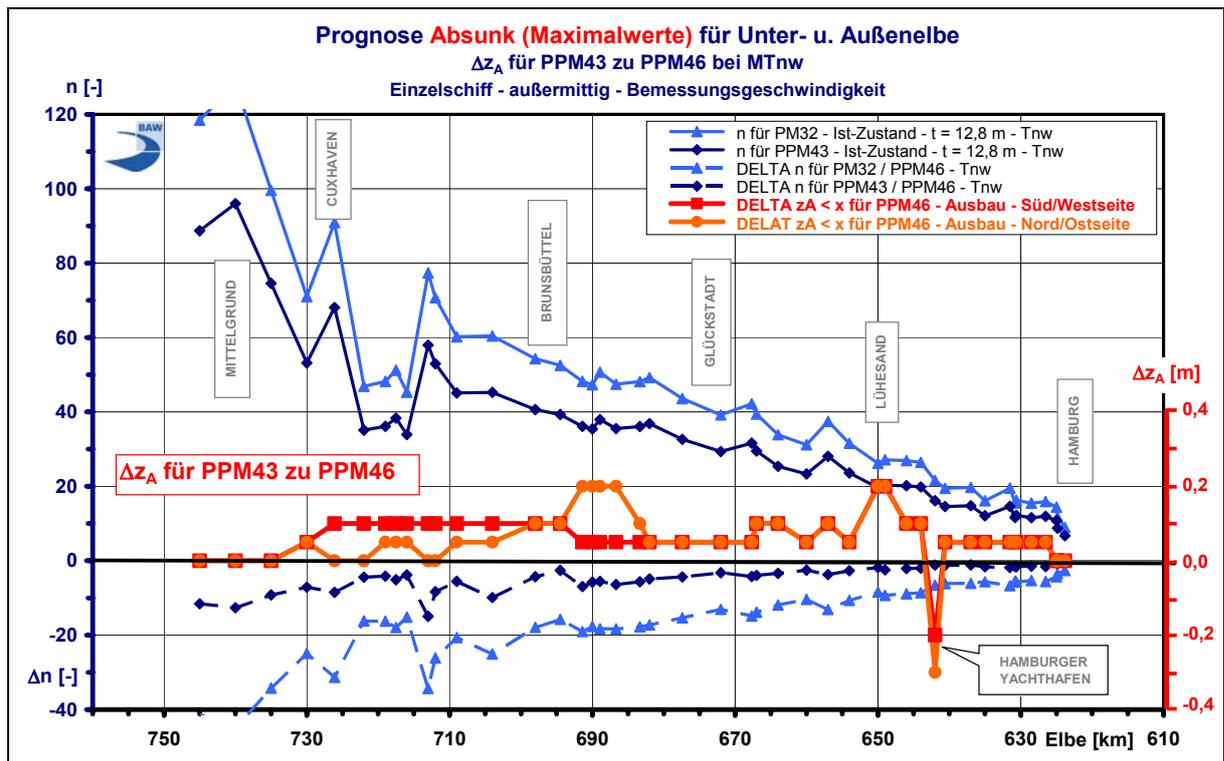


Bild 44: Grafische Darstellung der Prognose der ausbaubedingten Änderungen des Absunks (Maximalwerte) in der Unter- und Außenelbe bei Einzelpassagen großer PPM-Containerschiffe im Ausbauzustand bei MTnw₁₉₉₇₋₂₀₀₁

Die vom Projektbüro Fahrrinnenanpassung für die Tiefenlängsprofilbemessung angesetzten bereichsabhängigen maximalen Bemessungsgeschwindigkeiten gegen Wasser werden hinsichtlich der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung aus wasserbaulicher Sicht als unkritisch angesehen. Örtlich sind bei Schiffsgeschwindigkeiten über den Bemessungsgeschwindigkeiten überproportionale Zunahmen der Belastungen zu erwarten.

Hamburg, den 4. September 2006
 Bundesanstalt für Wasserbau

Im Auftrag

Bearbeiter

gez. Rahlf

gez. Uliczka

BDir Dipl.-Ing. H. Rahlf

Dr.-Ing. K. Uliczka



11 Literaturverzeichnis

- Azcueta, R. On the dynamic response of very large container vessels in extremely shallow water by means of RANSE simulations, Hamburg 2003 (*unveröffentlicht*)
- BAW Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastung – Schiffswellen und Strömungen,
BAW Nr. 95 52 3422 / 95 52 3423, Hamburg 1996
Digital:
<http://www.cux.wsd-nord.de/htm/zustimm.asp>
dann folgende Links:
[UVU-Datenbank](#)
[Band I Hydromechanik](#)
[Texte](#)
[Schiffserzeugte Belastung \(PDF-Dokument 11,7 MB\)](#)
- BAW Untersuchungen zur Änderung der geschwindigkeitsabhängigen schiffserzeugten Belastung von Seewasserstraßen durch Strombaumaßnahmen,
BAW-JAP.-Nr. 4742, Hamburg, 1997 (*unveröffentlicht*)
- BAW Erosionsverhalten von Böschungen am NOK – Bewertung und Empfehlungen anhand von Messungen im hydraulischen Modell und in der Natur,
BAW Nr. 98 51 3750 / 97 52 3449, Hamburg 1999 (*unveröffentlicht*)
- BAW Machbarkeit einer weiteren Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe, Ergänzung Variante 4.4 unter Berücksichtigung des Verbringungskonzeptes, Hamburg 2003
- BAW Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen,
Mitteilungsblatt der BAW Nr. 87, Karlsruhe 2004



- BAW Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtstraße,
Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2004, BAW-
Projekt 8149, Karlsruhe 2005a (*unveröffentlicht*)
- BAW Weitere Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe,
Bericht zu den schiffsinduzierten Schwingungen im Deich,
Naturmessungen an der Untereelbe im Altenbrucher Bogen,
BAW Nr. A3955 03 10062, Hamburg 2006a
- BAW Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die
Containerschiffahrt, Gutachten zur ausbaubedingten Ände-
rung von Hydrodynamik und Salztransport, BAW Nr.
A39550310062, Hamburg 2006b
- Bollrich, G.
und Autorenkollektiv Technische Hydromechanik, Band 2,
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1989
- Chen, H-C.
Lin, W-M.
Hwang, W-Y. Validation and application of Chimera RANS method for ship-
ship interaction in shallow water and restricted waterway,
24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan
2002
- Chen, X-N.
Uliczka, K. On ships in natural waterways
Proceedings of Intern. Conference on Coastal Ships and
Inland Waterways, The Royal Institution of Naval Architects,
London 1999
- Doorn, N.
Groeneweg, J.
Weiler, O.
Borsboom, M. Numerical modeling of ship-induced wave propagation, Pro-
ceedings of the 28th ICCE, Vol. 1, S. 689-701, Cardiff, Wales
2002
- DST Validierungsrechnungen mittels einer interaktiven Kopplung
zwischen BESHiWa im Fernfeld und UNOPAM im Nahfeld,
Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme
e.V., Bericht Nr. 1755, Duisburg 2004 (*unveröffentlicht*)
- Führböter, A.
Dette, H.H., Jensen, J.
Kotzbauer, U., Oelerich, J. Wind- und Schiffswellenvorhersage für ausgewählte Abschnitte
der Untereelbe, Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU
Braunschweig, Bericht Nr. 649, Braunschweig, 1988



- Haffke, C.B. Zur hydrodynamischen Belastung vertäuter Schiffe durch passierende Schiffe
Mitteilungen Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 93, 1986
- ICCM Bericht über Berechnung der Strömung in einem Drei-Fluid-System (Schlamm, Wasser, Luft),
ICCM Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH, Hamburg 2000 (*unveröffentlicht*)
- IMS Gutachten zur Deichverformung im Bereich des Hadelner Deich- und Uferverbandes – Untersuchung der Standsicherheit im Bereich Altenbruch und Glameyer Stack, Nr. 9073-01, Hamburg 2004 (*unveröffentlicht*)
- IMS Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung der Unterweser, Gutachten zur Erfassung des Ist-Zustandes schiffserzeugter Belastungen der Unterweser, Nr. 9013-02, Hamburg 2006 (*unveröffentlicht*)
- Ingenieurbüro Wellenmessungen an der Unterelbe – Schiffswellenmessungen, Hamburg 2003 (*unveröffentlicht*)
Dipl.-Ing. Fittschen
- Ingenieurbüro Schiffserzeugte Belastungen am Deichsiel Hollerwettern, Hamburg 2006 (*unveröffentlicht*)
Dipl.-Ing. Fittschen
- Ingenieurbüro Schmid Bericht zu den Schiffswellenmessungen im Jachthafen Neuen-
schleuse, Kapsweyer 2006 (*unveröffentlicht*)
- Jiang, T. Wash waves generated by ships moving on fairways of varying
Henn, R. topography,
Sharma, S.D. 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan
2002
- Kohlhase, S. Modelle für wellenerzeugte Vorgänge
Dette, H.H. In: Wasserbauliches Versuchswesen, Hrsg. Kobus, DVWK-
Schriften, Heft 39, Verlag Paul Parey, Hamburg / Berlin 1984



- Kunz, H. Die Wirkung von Schiffswellen auf Entwässerungsbauwerke an Tideflüssen, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der TU Hannover, Heft 46, Hannover 1977a
- Kunz, H. Schiffsschwall und Sunk in seitlich einer Wasserstraße angeordneten Becken, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der TU Hannover, Heft 46, Hannover 1977b
- MacDonald, N.J. Numerical Modelling of coupled drawdown and wake, Proceedings Canadian Coastal Conference, Kingston, Canada 2003
- NRC Ship Wave Simulation with WAKE2D, National Research Council, Canadian Hydraulic Centre, Ottawa, Canada, 1997
- Nwogu, O.G.
Demirbilek, Z. Numerical Modeling of ship-induced currents in confined waterways, Book of Abstracts, 29th ICCE, Lissabon, Portugal 2004
- Ohle, N.
Zimmermann, C. Untersuchung zu den Ursachen von Deckwerksverwerfungen am Nordufer der Elbe, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft-Nr.: 89, Hannover 2003
- Schneekluth, H. Hydromechanik zum Schiffsentwurf. 3. Auflage, Koehlers Verlagsgesellschaft, Herford, 1988
- Stockstill, R.L.
Berger, R.C. Simulating barage drawdown and currents in channels and backwater areas, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.127, No. 5, 2001
- Uliczka, K. Zur Wechselwirkung von Seeschiff und Seewasserstraße / Interaction between sea-going ship and estuary fairway, Tagungsband XXIX. Internationaler Schifffahrtskongress in Den Haag, PIANC-AIPCN, Bonn 1998



12 Anlagen

Anlage 1: Zusammenstellung der untersuchten Begegnungsszenarien

	Variante	Richtung	Tiefgang t [m]	Passierabstand Yachthaufen L _{YH} [m]	Wasser- stand h [mNN]	Querschnitts- verhältnis n [-]
PM32 / PPM40	Ist	Auf / Ab	12,8 / 12,7	401 / 231	-1,62	9,7
PM32 / PPM40	Ist	Auf / Ab	12,8 / 13,8	401 / 231	-0,62	10,1
MG58 / PM32	Ist	Auf / Ab	14,5 / 12,8	393 / 237	+1,28	9,2
PPM40 / PPM46	320m	Auf / Ab	13,5 / 13,5	458 / 267	-1,62	7,8
MG58 / PM32	320m	Auf / Ab	15,5 / 13,5	429 / 246	+1,28	8,2
MG58 / PPM46	320m	Auf / Ab	15,5 / 14,5	429 / 267	+1,28	7,0
PPM40 / PPM46	385m	Auf / Ab	13,8 / 13,8	506 / 282	-1,62	8,0
PPM46 / PPM46	385m	Auf / Ab	13,8 / 13,8	506 / 282	-1,62	7,5
MG58 / PPM46	385m	Auf / Ab	15,5 / 14,5	506 / 282	+1,28	7,0