



**BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU**

Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

**BAW**



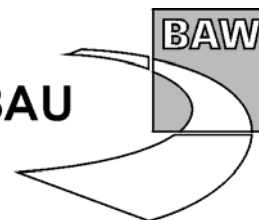
**GUTACHTEN**

**Fahrrinnenanpassung der Außenweser  
an die Entwicklungen im Schiffsverkehr  
sowie Tiefenanpassung der  
hafenbezogenen Wendestelle**

**Summationswirkung der Anpassungen  
von Unter- und Außenweser**

**Gutachten  
zur ausbaubedingten Änderung  
schiffserzeugter Belastungen**





**Fahrrinnenanpassung der Außenweser  
an die Entwicklungen  
im Schiffsverkehr sowie Tiefenanpassung der  
hafenbezogenen Wendestelle**

**Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und  
Außenweser**

**Gutachten  
zur ausbaubedingten Änderung  
schiffserzeugter Belastungen**

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven  
Wasser- und Schifffahrtsamt Bremen  
bremenports GmbH & Co. KG

Auftrag vom: 03.05.2004, Az.: 2/231.2/WAP 07/1

Auftrags-Nr.: BAW-Nr.: 5.02.10048.00 - 3

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

Hamburg, den 31. 03. 2006

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





## Zusammenfassung

Die Freie Hansestadt Bremen hat im Jahr 2000 eine Anpassung der Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr beim Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) beantragt. Das BMVBW nahm den Antrag an und beauftragte die ihm nachgeordnete Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) – vertreten durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest (WSD NW) – mit der Durchführung der im Rahmen der Bundesverkehrswegeplan-Methodik notwendigen Untersuchungen.

Zur Vorbereitung der Planfeststellung des Ausbaus nach dem Wasserstraßengesetz (WaStrG) beauftragte die WSD NW – vertreten durch die Projektgruppe Weseranpassung (PG WAP) – die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) neben weiteren Gutachten die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen infolge der Fahrrinnenanpassung der Außenweser an die Entwicklung im Schiffsverkehr zu untersuchen und zu bewerten.

Für die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen wurde die Seeschifffahrtsstraße Außenweser vom Hafen Bremerhaven (km 65) bis zur See (etwa km 120) betrachtet. Des Weiteren sind die Auswirkungen der schiffserzeugten Belastungen auf das Gesamtästuar ab Bremen (km 0) auch bei gleichzeitigem Ausbau der Unterweser bewertet worden.

Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen (Wellen und Strömung) sind quantitativ exakt nur auf der Basis von Untersuchungen in hydraulischen Modellen für ausgewählte Szenarien in einem ausgewählten Unterwasserquerschnitt zu prognostizieren. Anhand von zusätzlichen Systemversuchen können Änderungen für andere Querschnitte und Wasserstraßen qualitativ abgeschätzt werden, eine Quantifizierung zukünftiger Maximalbelastungen ist nach dem Stand der Wissenschaft auch mit Hilfe von Naturmessungen nicht möglich.

Das Untersuchungsprogramm umfasste Vergleichsbetrachtungen vor und nach der Fahrrinnenanpassung auf der Basis der Erfahrungen der Naturuntersuchungen im Rahmen der Beweissicherung des SKN-14m-Ausbaus (BAW, 2003) u.a. hinsichtlich der Belastungsänderungen von Deckwerken und Deichen, Wattgebieten und natürlichen Ufern sowie von baulichen Anlagen. Zur Absicherung der Prognosen wurden Ergebnisse aus Versuchen in einem hydraulischen Modell eines ausgewählten Unterelbeabschnitts, der Begegnungsstrecke Hamburger Yachthafen, herangezogen, in dem u.a. Passagen von großen PANMAX- (PM) und POST-PANMAX-Containerschiffen (PPM) simuliert wurden.

Beim Vergleich des PPM46-Bemessungsschiffs ( $b = 46$  m) mit den schon heute im Ist-Zustand verkehrenden PPM43-Containerschiffen ( $b = 43$  m) werden die langperiodischen, ausbaubedingten Änderungen nach der neuen Fahrrinnenanpassung bei Schiffsgeschwin-

---



digkeiten bis etwa  $v_S \approx 14$  kn unter  $\Delta z_A < +0,1$  m (Absunk) bzw.  $\Delta v_R < +0,1$  m/s (Rückströmung) und damit in der Größenordnung der beweisgesicherten Änderungen zum SKN-14m-Ausbau liegen. Bei den kurzperiodischen Sekundärwellen ist von ausbaubedingten Änderungen wie beim SKN-14m-Ausbau von  $\Delta H_S \approx +0,1$  m auszugehen.

Die für die Tiefenlängsprofilbemessung angesetzten bereichsabhängigen Bemessungsgeschwindigkeiten über Grund werden hinsichtlich der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in einer Seeschiffahrtsstraße als unkritisch angesehen.

Bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten ( $v_S >$  Bemessungsgeschwindigkeit) werden 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.

Für die Überlagerungsvariante (Ausbau von Außen- und Unterweser) ist festzustellen, dass durch die zukünftige Schifffahrt auf der Unterweser keine messbaren ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen seewärts der Containerkajen Bremerhaven erwartet werden, da die Querschnittsverhältnisse der Massengutschiffe der Unterweser (z.B. MG32) in der Außenweser u.a. aufgrund der geringeren Breite und des geringeren Tiefgangs deutlich über den n-Verhältnissen der schon heute verkehrenden PPM-Containerschiffe liegen.

## Inhaltsverzeichnis

## Seite

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	6
2	Unterlagen	8
3	Folgerungen aus den Erörterungsterminen nach § 5 UVPG	8
4	Schiffserzeugte Belastung	9
4.1	Allgemeine Bemerkungen	9
4.2	Definition der kennzeichnenden Größen	9
4.3	Bewertung möglicher Bearbeitungsmethoden	13
4.3.1	Empirische und analytische Berechnungsansätze	13
4.3.2	Numerische Berechnungsverfahren	14
4.3.3	Prognose auf Basis von Naturmessungen	17
4.3.4	Versuche im hydraulischen Maßstabsmodell	18
5	Methodisches Vorgehen	18
6	Erfassung des IST-Zustands der schiffserzeugten Belastungen	19
6.1	Bisherige Messprogramme in der Natur	19
6.2	Bewertung der Beweissicherung zum SKN-14m-Ausbau	20
6.3	Beschreibung des Ist-Zustands und Wirkungsmechanismen	21
6.3.1	Charakteristische Belastungsbereiche	21
6.3.2	Deckwerke und Deiche	25
6.3.3	Wattgebiete und natürliche Ufer	26
6.3.4	Bauliche Anlagen	27
6.3.5	Sport- und Kleinschiffahrt	29
6.3.6	Marine archäologische Kulturgüter	30
6.3.7	Fahrinne und Unterwasserböschungen	30
6.3.8	Nebenrinnen und Priele	31
7	Prognosedaten zur Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen	32
7.1	Vorbemerkungen	32
7.2	Das hydraulische Modell	33
7.3	Datenbasis und Datenanalyse	36
7.3.1	Vergleich PANMAX- und POST-PANMAX-Containerschiff	36
7.3.2	Vergleich zweier POST-PANMAX-Containerschiffe	38



8	Gebietsabhängige Bewertung für die Seeschiffahrtsstraße Außenweser	39
8.1	Einschränkung der Beurteilungskriterien	39
8.2	Hydraulisch wirksame bauliche Veränderungen	41
8.2.1	Hafenbereich Bremerhaven (km 67 bis km 74)	45
8.2.2	Belastungsänderungen der Vorlandflächen bei Tettens	46
8.2.3	Hafen Bremerhaven bis Wremer Tief (km 74 bis km 79)	47
8.2.4	Belastungsänderungen im Wremer Tief	48
8.2.5	Wremer Tief bis Robbennordsteert (km 79 bis km 91)	49
8.2.6	Belastungsänderungen bei Fedderwardsiel / Burhave	51
8.2.7	Robbennordsteert bis Dwarsgat (km 91 bis km 98)	52
8.2.8	Belastungsänderungen an der Wurster Küste	53
8.2.9	Dwarsgat bis Oldoogplate (km 98 bis km 110)	53
8.2.10	Oldoogplate bis See (ab km 110)	56
8.3	Belastungsänderungen für Leitwerke, Deckwerke und Deiche	57
8.4	Belastungsänderungen von Wattgebieten und natürlichen Ufern	58
8.5	Belastungsänderungen von baulichen Anlagen	59
8.6	Belastungsänderungen der Sport- und Kleinschiffahrt	59
8.7	Belastungsänderungen für marinearchäologische Kulturgüter	60
8.8	Belastungsänderungen von Fahrrinne und Unterwasserböschungen	60
8.9	Belastungsänderungen der Nebenrinnen und Priele	61
8.10	Änderung der Häufigkeit schiffserzeugter Belastungen	61
9	Bewertung der schiffserzeugten Belastung aufgrund der Unterweseranpassung (Überlagerungsvariante)	62
10	Schlussfolgerungen zu den ausbaubedingten Änderungen der Außenweser	62
11	Literaturverzeichnis	65
12	Anlagen	69
12.1	Anlage I	69
12.2	Anlage II	70
12.3	Anlage III	71
12.4	Anlage IV	72

## Bildverzeichnis

## Seite

Bild 1: Untersuchungsbereich zur Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Außenweser km 65 bis etwa km 130 (nach Scoping-Unterlage PG WAP, 2004; [U1])	7
Bild 2: Schiffswellen in unbeschränktem Fahrwasser (Draufsicht)	10
Bild 3: Seitliche Ansicht der Schiffswellensysteme	11
Bild 4: Resultierende schiffserzeugte Verdrängungsströmung (schematisch)	11
Bild 5: Darstellung des Teilquerschnitts einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussgrößen auf die schiffserzeugten Belastungen	12
Bild 6: Schiffserzeugte Belastung im Messquerschnitt an St. 1-1 (fahrrinnennah), St. 1-2 (Wattfläche) und St. 1-3 (ufernah) im Messzeitraum 2001 als Unterschreitungshäufigkeit in [%] für den Absunk $z_A$ (oben), die Primärwellen $H_P$ (Mitte) und die Sekundärwellen $H_S$ (unten; aus IM+P, 2002)	22
Bild 7: Unterteilung des Untersuchungsgebiets Außenweser in Hinblick auf schiffserzeugte Belastungen	23
Bild 8: Querschnittsverhältnisse in der Außenweser am Beispiel der Passage eines PANMAX-Containerschiffs (PM 32, $b = 32$ m, $t = 13,5$ m) und eines POST-PANMAX-Containerschiffs (PPM 43, $b = 43$ m, $t = 14,5$ m) bei $MThw_{2000-2004}$	24
Bild 9: Georeferenziertes Luftbild des Untersuchungsbereichs der Untereibe mit Versuchsbecken (gelb) und maßstäblichen Modellgebiet (rot) mit Messquerschnitt und Fahrspuren (blau)	34
Bild 10: Containerschiff PPM40 bei Fahrt im hydraulischen Modell	36
Bild 11: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk an der Fahrrinnenkante und am Ufer für Passagen des PM32 ( $t = 13,5$ m) sowie des PPM46 ( $t = 14,5$ m) bei ca. örtl. Thw (mit Beispiel für Fahrrinnenkante)	37
Bild 12: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk an der Fahrrinnenkante für Passagen des PPM40 im Ist-Zustand ( $t = 12,7$ m) sowie des PPM46 im Ausbauzustand ( $t = 13,5$ m) bei ca. örtl. Tnw	39
Bild 13: Querschnittsverhältnisse in der Außenweser für verschiedene Schiffstypen und Schiffstiefgänge im Ist- und Ausbauzustand bei $MThw_{2000-2004}$	42
Bild 14: Querschnittsverhältnisse in der Außenweser für verschiedene Schiffstypen und Schiffstiefgänge im Ist- und Ausbauzustand bei $MTnw_{2000-2004}$	42
Bild 15: Teilquerschnittsverhältnisse $n_T$ in der Außenweser (Ostseite) für abgehende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei $MTnw_{2000-2004}$	43
Bild 16: Teilquerschnittsverhältnisse $n_T$ in der Außenweser (Westseite) für aufkommende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei $MTnw_{2000-2004}$	44
Bild 17: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Hafenbereich Bremerhaven (km 67 bis km 74) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse	46
Bild 18: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Hafenbereich Bremerhaven und Wremer Tief (km 74 bis km 79) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse	48



Bild 19: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Wremer Tief und Robbenordsteert (km 74 bis km 91) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse	50
Bild 20: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Robbenordsteert und Dwarsgat (km 91 bis km 98) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse	53
Bild 21: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Dwarsgat und Oldoogplate (km 98 bis km 110) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse	55
Bild 22: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Oldoogplate und See (ab km 110) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse	56
Bild 23: Grafische Darstellung der Prognose der ausbaubedingten Änderungen des Absunks (Maximalwerte) in der Außenweser bei Passagen großer PPM-Containerschiffe im Ausbauzustand bei MThw <sub>2000-2004</sub>	63

## Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Basisdaten der für die Prognose im Modell eingesetzten Schiffseinheiten	35
--	----

## Anlagenverzeichnis

### Anlage I:

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

Vergleich PPM-Containerschiff mit PPM-Bemessungsschiff –  $v_S = 12$  kn

### Anlage II:

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

Vergleich PPM-Containerschiff mit PPM-Bemessungsschiff –  $v_S = 14$  kn

### Anlage III:

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

Vergleich PM-Containerschiff mit PPM-Bemessungsschiff –  $v_S = 12$  kn

### Anlage IV:

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

Vergleich PM-Containerschiff mit PPM-Bemessungsschiff –  $v_S = 14$  kn

## Symbolverzeichnis:

Zeichen	Begriff	Einheit
a	Beschleunigung (z.B. von Sieltoren)	m/s <sup>2</sup>
A	Querschnittsfläche der Wasserstraße	m <sup>2</sup>
A <sub>T</sub>	Teilquerschnittsfläche der Wasserstraße	m <sup>2</sup>
A <sub>S</sub>	Eingetauchter Hauptspantquerschnitt	m <sup>2</sup>
b	Schiffsbreite in Hauptspantebene	m
B	Wasserspiegelbreite (Oberfläche)	m
B <sub>S</sub>	Sohlbreite der Wasserstraße	m
c <sub>B</sub>	Völligkeitsgrad der Verdrängung eines Schiffes	-
Fr <sub>h</sub>	FROUDEsche Tiefen-Zahl = $v_s / (g \cdot h)^{0,5}$ bez. auf Wassertiefe	-
Fr <sub>l</sub>	FROUDEsche Längen-Zahl = $v_s / (g \cdot l)^{0,5}$ bez. auf Schiffslänge	-
g	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
h	Wassertiefe	m
H	Wellenhöhe	m
H <sub>P</sub>	Primärwellenhöhe	m
H <sub>S</sub>	Sekundärwellenhöhe	m
k	Dämpfungsfaktor	-
l	Schiffslänge auf Wasserlinie	m
L	Passierabstand vom Ufer	m
m	Böschungsneigung 1:m	-
n	Querschnittsverhältnis A/A <sub>S</sub>	-
n <sub>T</sub>	Teilquerschnittsverhältnis = $A_T / 0,5 \cdot A_S$	-
Re	REYNOLDSzahl = $v_s \cdot l / \nu$	-
R <sub>T,K</sub>	Gesamtwiderstand eines Schiffes im Kanal	-
s <sub>B</sub>	Bugstau / Schwallwelle	m
t	Schiffstiefgang	m
T	Wellenperiode	s
v <sub>0</sub>	Grundströmung in der Wasserstraße	m/s
v <sub>R</sub>	Rückstromgeschwindigkeit	m/s
v <sub>RES</sub>	resultierende Strömungsgeschwindigkeit	m/s
v <sub>S,üG</sub>	Schiffsgeschwindigkeit über Grund	kn
v <sub>S,dW</sub>	Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser	kn
Z <sub>A</sub>	Absenk des Wasserspiegels	m
Δ	Differenzgröße	-
ν	Kinematische Zähigkeit	m <sup>2</sup> /s

Anmerkung: kn = Knoten = Seemeilen pro Stunde = 1,852 km/h = 0,51 m/s.  
 TEU = Containereinheit (20 Fuß-Container)  
 tdw = tons dead weight = Tragfähigkeit von Schiffen



## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Wasser- und Schifffahrtsämter Bremen und Bremerhaven, vertreten durch die Projektgruppe Weseranpassung (PG WAP), planen die **Fahrrinnenanpassung der Außenweser** an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie die Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle vor Bremerhaven. Für das Planfeststellungsverfahren ist im Auftrag der Projektgruppe Weseranpassung und bremenports (Schreiben vom 03.05.2004, Geschäftszeichen 2/231.2/WAP 07/1) von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) eine wasserbauliche Systemanalyse mit dem Ziel einer detaillierten Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der abiotischen Systemparameter zu erstellen. Aufgrund gleichzeitiger Planungen zu einer weiteren Anpassung der Fahrrinne der Unterweser ist in den Untersuchungen der BAW auch die Summationswirkung (Überlagerung) aller geplanten Anpassungsmaßnahmen in Unter- und Außenweser darzustellen.

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

- **Tidedynamik und Salztransport**

Ermittlung der maßgebenden Kennwerten zur Tidedynamik und Salztransport auf der Basis einer hochauflösenden 3D HN-Modellierung eines Vergleichszustandes sowie Ermittlung der ausbaubedingten Auswirkungen auf die Kennwerte.

- **Sturmfluten**

Ermittlung der heutigen Sturmflutverhältnisse auf der Basis einer hochauflösenden HN-Modellierung eines Vergleichszustandes 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 eines Vergleichszustandes 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.

- **Grundwasser**

Beschreibung der heutigen Grundwasserverhältnisse und Ermittlung ausbaubedingter Änderungen auf der Basis bestehender Erkenntnisse und wasserbaulichen Systemstudien einer geohydraulischen Modellierung.

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

Für die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen wird die Seeschiff-fahrtsstraße Außenweser stromab des Hafens Bremerhaven (km 68) bis zur See (etwa km 120) betrachtet (Bild 1). Des Weiteren sind die Auswirkungen der schiffserzeugten Be-lastung auf das Gesamtästuar ab Bremen (km 0) auch bei gleichzeitigem Ausbau der Unter-weser zu bewerten.

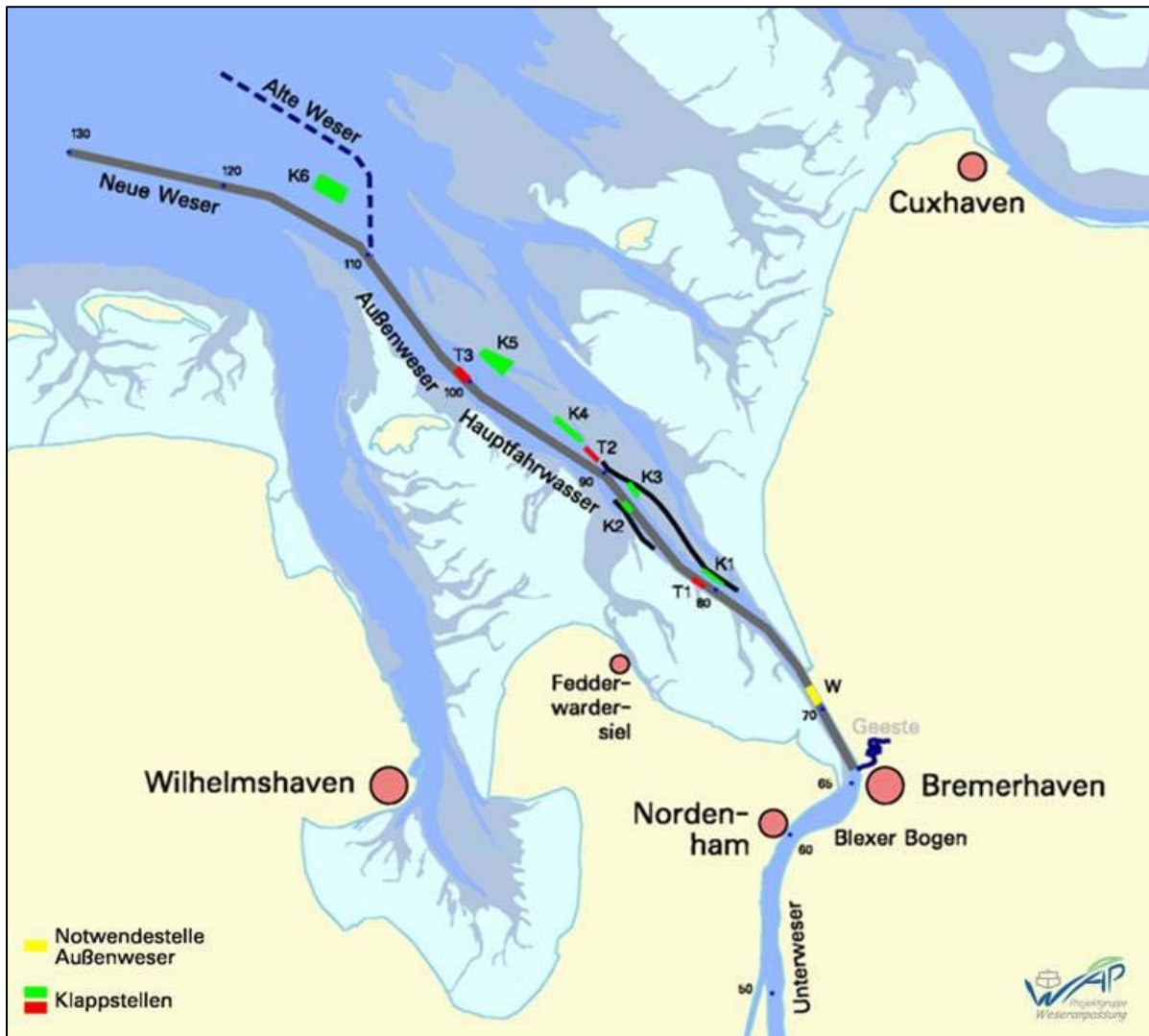


Bild 1: Untersuchungsbereich zur Ermittlung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Außenweser km 65 bis etwa km 130 (nach Scoping-Unterlage PG WAP, 2004; [U1])



## 2 Unterlagen

Zur Projektbearbeitung standen der BAW die u.a. folgende Unterlagen zur Verfügung:

- [U1] Projektgruppe Weseranpassung, Unterlagen zum Scoping-Termin, Fahrri-  
nenanpassung der Außenweser an die Entwicklung im Schiffsverkehr, Bre-  
merhaven, im Oktober 2004
- [U2] Projektgruppe Weseranpassung, Teil B Außenweser Erläuterungsbericht zum  
Plan für die Anpassung der Bundeswasserstraße Außenweser von Weserki-  
lometer 65 bis Weserkilometer 130
- [U3] PLANCO Consulting GmbH, Nutzen-Kosten-Untersuchung für eine Fahrwas-  
seranpassung der Außenweser an die Anforderungen der Großcontainer-  
schifffahrt, Essen, 2003
- [U4] Untersuchungen zur Verteilung von Geschwindigkeiten großer Container-  
schiffe in der Außenweser mittels Radardaten, Gewässerkundlicher Bericht  
2003 – 7, WSA Bremerhaven, August 2003

Des weiteren wurden u.a. die Erfahrungen aus den Gutachten der BAW zum „Ausbau der Außenweser auf SKN-14m – Seegangs- und Schiffswellenuntersuchungen in der Außenweser vor der Wurster Küste“ (BAW, 1994), zur „Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastung – Schiffswellen und Strömungen“ (BAW, 1996) sowie zur „Beweissicherung SKN-14m-Ausbau der Außenweser – Ausbaubedingte Änderungen der Belastung durch Schiffswellen“ (BAW, 2003) verwertet.

## 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 ([U1] Schutzgut Wasser, Unterpunkt 8.6.1 Oberflächengewässer) zu ergänzenden Betrachtungen:

- Wechselwirkungen zwischen Seeschiff und Seeschifffahrtsstraße mit Wattgebieten, Deckwerken und Deichen.

Auf die physikalischen Prozesse und Wirkketten dieser schiffserzeugten Belastungen und deren ausbaubedingten Änderungen wird in den entsprechenden Abschnitten (u.a. Belastung von Deckwerken und Deichen) 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 zahlreichen Veröffentlichungen behandelt und mit Stand etwa 1996 im Gutachten der BAW zur jüngsten Fahrrinnenanpassung 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 Absenk  $z_A$  seitlich am Schiff,
- die Heckwelle als Teil des durch den Absenk angeregten langperiodischen Primärwellensystems  $H_P$ ,
- die kurzperiodischen Sekundärwellen  $H_S$ ,

- die Periode des Primärwellensystems  $T_{Hp}$  (soweit möglich),
- die Sunkzeit  $T_{SU}$  (Bugstau bis Absunk),
- die Stiegzeit  $T_{ST}$  (Absunk bis Primärwelle),
- die 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, der am Ufer steht, 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.

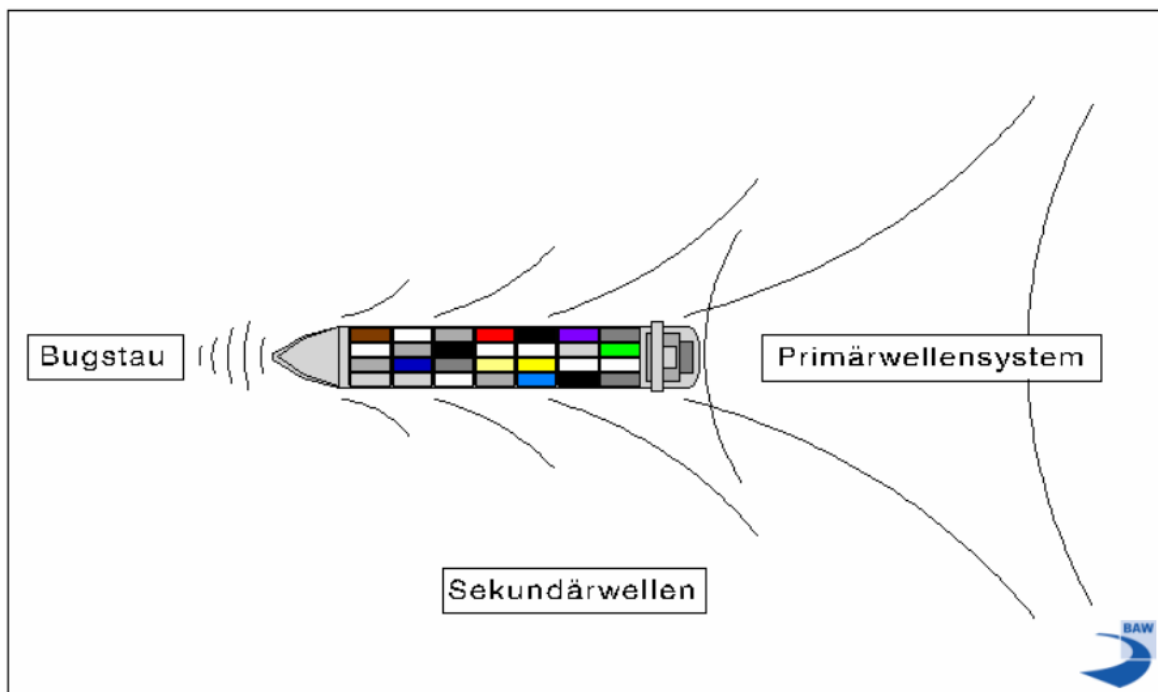


Bild 2: Schiffswellen in unbeschränktem Fahrwasser (Draufsicht)

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.

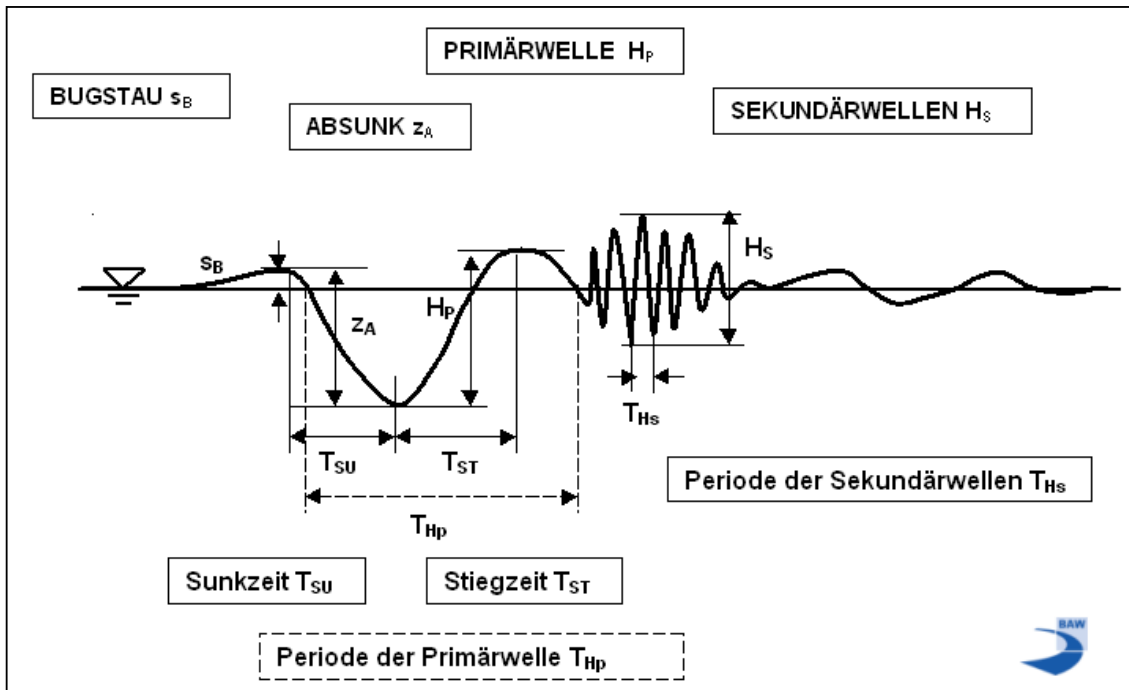


Bild 3: Seitliche Ansicht der Schiffswellensysteme

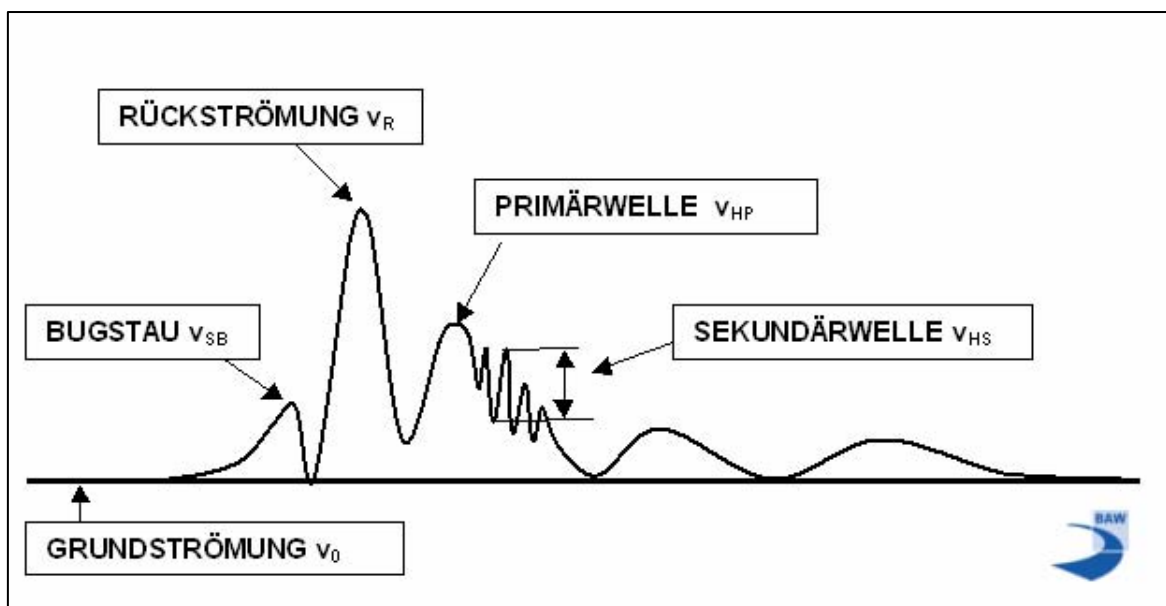


Bild 4: Resultierende schiffserzeugte Verdrängungsströmung (schematisch)

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.

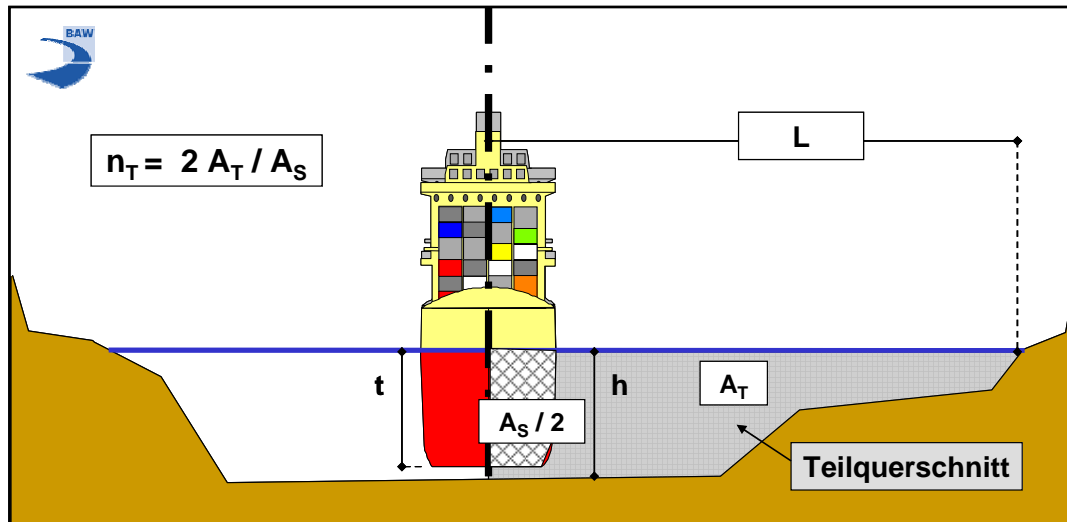


Bild 5: Darstellung des Teilquerschnitts einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussgrößen auf die schiffserzeugten Belastungen

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  $v_i$ ),
- sonstiger Einflüsse, wie z.B. Krümmungsradius  $D$ , Driftwinkel  $\beta$ , 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

Als mögliche 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 Absunk, Rückstromgeschwindigkeit und Wellensystemen während einer Schiffspassage vor. Auf eine Auflistung und detaillierte Erläuterung dieser bekannten ingenieurwissenschaftlichen Berechnungsverfahren wurde verzichtet.

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

- Absunk:  $Z_A \propto v_S^k$  ( $2 < k < 3,5$ ) 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 zwi-



schen 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 jüngere Messergebnisse aus Modellversuchen mit Seeschiffen angepasst werden.

**Für eine quantitative Abschätzung der schiffserzeugten Belastung durch die seegängige Großschiffahrt 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 Fahrrinnenanpassung 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 Gitterpunktabstand (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.

Hiermit war der Markt und auch das wirtschaftliche Interesse von Entwicklern bezüglich der numerischen Methode zur Berechnung schiffserzeugter Belastungen in seitlich begrenztem Flachwasser 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, einer 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 ein 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 Einbeziehung 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 Approxima-



tion 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 Nahfelds 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 Ent-



wicklung 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 Energie-dissipation 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 sind nur aufgrund längerer Messkampagnen (ca. 6 - 12 Wochen) eine statistisch hinreichende Anzahl von Ereignissen zu registrieren.

Umfangreiche Messungen der BAW im Jahr 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 Klassifizierung - nicht zuließ (BAW, 1999). 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 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 Versuchs-, 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 Maßstab gewährleistet.**

### **5 Methodisches Vorgehen**

Das Untersuchungsgebiet im Rahmen der weiteren Fahrrinnenanpassung der Außenweser umfasst den Bereich zwischen Strom-km 65 (Hafenbereich Bremerhaven) und etwa Strom-km 120 (Höhe Wangerooger Plate) sowie die Nebenrinnen.

Bei der Auftragsbearbeitung wird folgendermaßen vorgegangen:

- Beschreibung des Ist-Zustands
  - Analyse von Naturmesskampagnen
  - Analyse gebietsabhängiger Belastungsprozesse
  
- Prognose ausbaubedingter Änderungen
  - Untersuchungen im hydraulischen Modell
  - Gebietsabhängige Bewertung für die Seeschiffahrtsstraße Außenweser

## 6 Erfassung des IST-Zustands der schiffserzeugten Belastungen

### 6.1 Bisherige Messprogramme in der Natur

Folgende Messkampagnen zur Erfassung von Schiffswellen in der Außenweser stehen für die Analyse des Ist-Zustands zur Verfügung:

- Im Rahmen der Untersuchungen für den geplanten SKN-14m-Ausbau der Außenweser wurden bei Imsum (ca. km 75) Messungen von Schiffswellen über einen Zeitraum von etwa 3 Monaten (Juli bis September 1992) vorgenommen. Die langperiodischen Maximalbelastungen etwa am Fahrrinnenrand betragen  $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,5$  m, die kurzperiodischen, fahrrinnennahen Maximalbelastungen wurden mit  $H_{S,MAX} \approx 1,3$  m angegeben (BAW, 1994). Die gemessenen Größtwerte an den ufernahen Messpositionen betragen für die langperiodische Wellenbelastung  $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,3$  m und für die kurzperiodischen Wellen  $H_{S,MAX} \approx 0,7$  m. Die Belastung der Wurster Küste durch das primäre Schiffswellensystem ( $z_A$  und  $H_P$ ) großer Schiffe bei gleich bleibender Fahrgeschwindigkeit wurde als „von untergeordneter Bedeutung“ bewertet. Aufgrund einer Prognose des Schiffsverkehrs bis zum Jahr 2010 wurde eine Zunahme der Sekundärwellenbelastung ( $H_S$ ) prognostiziert. Diese Zunahme der Häufigkeit von Sekundärwellen wurde einer Zunahme der Seegangbelastung bei Windstärken  $> 6$  Bft aus dem Richtungssektor SW bis NW um jährlich 2 Std. (+0,4 %) gleichgesetzt.
- Nach dem SKN-14m-Ausbau wurden im Jahr 2001 in einem der Querprofile von 1992 Schiffswellen als Beweissicherungsmessungen über ca. 14 Wochen (August bis November 2001) registriert und ausgewertet. Die langperiodischen Maximalbelastungen nahezu am Fahrrinnenrand betragen  $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,6$  m, die kurzperiodischen, fahrrinnennahen Maximalbelastungen wurden mit  $H_{S,MAX} \approx 1,3$  m angegeben. Die gemessenen Größtwerte an der ufernahen Messposition betragen für die langperiodische Wellenbelastung  $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,3$  m und für die kurzperiodischen Wellen  $H_{S,MAX} \approx 0,7$  m (BAW, 2003). Die gemessenen schiffserzeugten Wellenbelastungen im Messzeitraum 2001 sind im Kapitel 6.3 (Beschreibung des Ist-Zustands) als Unterschreitungshäufigkeit in [%] in Bild 6 zusammengestellt (aus IM+P, 2002).



## 6.2 Bewertung der Beweissicherung zum SKN-14m-Ausbau

Vergleichende Analysen der beiden o.a. Messkampagnen im Rahmen der Beweissicherung vor und nach dem SKN-14m-Ausbau durch die BAW führten zu den Ergebnissen (Zitat: BAW, 2003):

*„Die Auswertung der Messungen ergab folgende Belastungsänderungen:*

- *„Die langperiodische Belastung (Absunk und Primärwelle) hat bei Betrachtung der jeweiligen 30 höchsten Ereignisse der beiden Messkampagnen im Mittel in einer Größenordnung von etwa  $\Delta Z_{A,MITT} \approx +0,1$  m zugenommen.*
- *Die kurzperiodischen Sekundärwellen haben bei Betrachtung der jeweiligen 30 höchsten Ereignisse der beiden Messkampagnen im Mittel in einer Größenordnung von etwa  $\Delta H_{S,MITT} \approx +0,1$  m zugenommen.*

*Diese Zunahmen beziehen sich jedoch nur auf die jeweiligen höchsten Schiffswellen.“*

(Ende Zitat)

In der Bewertung der Beweissicherung wurde von der BAW des Weiteren festgehalten (Zitat: BAW, 2003):

*„Insgesamt kann in der Bewertung der Ergebnisse der Schluss gezogen werden, dass sich trotz der Zunahme der schiffserzeugten Wellenbelastung keine nachhaltigen Auswirkungen auf die Ufererosion der Wurster Küste ergeben.“*

(Ende Zitat)

Die Prognosen der BAW in 1994 hinsichtlich der schiffserzeugten Wellenbelastung konnten durch die Beweissicherungsmessungen in 2001 tendenziell bestätigt werden (Zitat: BAW, 2003):

*„Die untere Grenze der Prognosen des Gutachtens der BAW von 1994, das u.a. von einer zusätzlichen Belastungsdauer durch schiffserzeugte äquivalente Wellen von  $t_{2010} \approx 1$  h bis 2 h bei Vervierfachung der Passagen großer Containerschiffe (> 50.000 BRT) ausging (BAW, 1994), wurde durch die Messungen und Berechnungen auf Basis der Daten von 2001 belegt. Die für 2010 prognostizierte Steigerung der jährlich zu erwartenden äquivalenten Wellenbelastung um etwa +0,4 % wurde mit +0,1 % in 2001 tendenziell bestätigt.“*

(Ende Zitat)

## 6.3 Beschreibung des Ist-Zustands und Wirkungsmechanismen

### 6.3.1 Charakteristische Belastungsbereiche

Zur Beschreibung des Ist-Zustands der schiffserzeugten Wellenbelastungen der gesamten Außenweser kann auf die vorgestellten Naturmessungen zurückgegriffen werden.

Die annähernd zeitnahe Messkampagne in 2001 bei Imsum wird als hinreichende Beschreibung des Ist-Zustands für die gesamte Seeschiffahrtsstraße Außenweser gewertet,

- da aufgrund des geringen wirksamen Wasserstraßenquerschnitts bei Imsum die annähernd geringsten Querschnittsverhältnisse Wasserstraße / Schiff berechnet werden,
- im Messquerschnitt Imsum 2001 auch Schiffsgeschwindigkeiten erreicht werden, die im gesamten Revier gefahren (u.a. [U4]) werden und die deutlich über der Bemessungsgeschwindigkeit der gesamten Seeschiffahrtsstraße liegen,
- und somit die Ergebnisse dieser Messungen u.a. aufgrund der geringen Querschnittsverhältnisse auch für andere Querschnitte stromab auf der sicheren Seite liegen.

Damit ist vor den erst nach 2002 vorgenommenen Ausbaumaßnahmen im Nahbereich des Messquerschnitts Imsum (Containerterminal Bremerhaven CT 4) von dem im Folgenden dargestellten Belastungszustand durch Schiffswellen auszugehen. Die schiffserzeugten Wellenbelastungen im Messquerschnitt Imsum an Stationen St.1-1 (fahrrippennah), St. 1-2 (Wattfläche) und St. 1-3 (ufernah) im Messzeitraum 2001 sind als Unterschreitungshäufigkeit in [%] für den Absenk  $z_A$  (oben), die Primärwellen  $H_P$  (Mitte) und die Sekundärwellen  $H_S$  (unten; aus IM+P, 2002) in Bild 6 zusammengestellt (aus IM+P, 2002).

Seit der Baumaßnahme für die neue Containerkaje CT 4 ist aufgrund der Grundregeln für das Verhalten im Verkehr (§3 (1) SeeSchStrO) mit einer deutlichen Reduzierung der Schiffsgeschwindigkeit im zukünftigen Hafenbereich zu rechnen. Stromab der Kaje (etwa ab km 74) nehmen die Schiffe Fahrt auf. Nach zwei Kilometern ist im Lotsenwechselbereich (km 76 – km 77) die maximale Versetzgeschwindigkeit von ca.  $v_S \approx 9$  kn durchs Wasser einzuhalten. Als Folge dieser neuen Gegebenheiten ist schon heute von einem eindeutigen Rückgang der Wellenbelastung im Bereich des Messquerschnitts Imsum im Vergleich zu den Messungen von 2001 auszugehen.

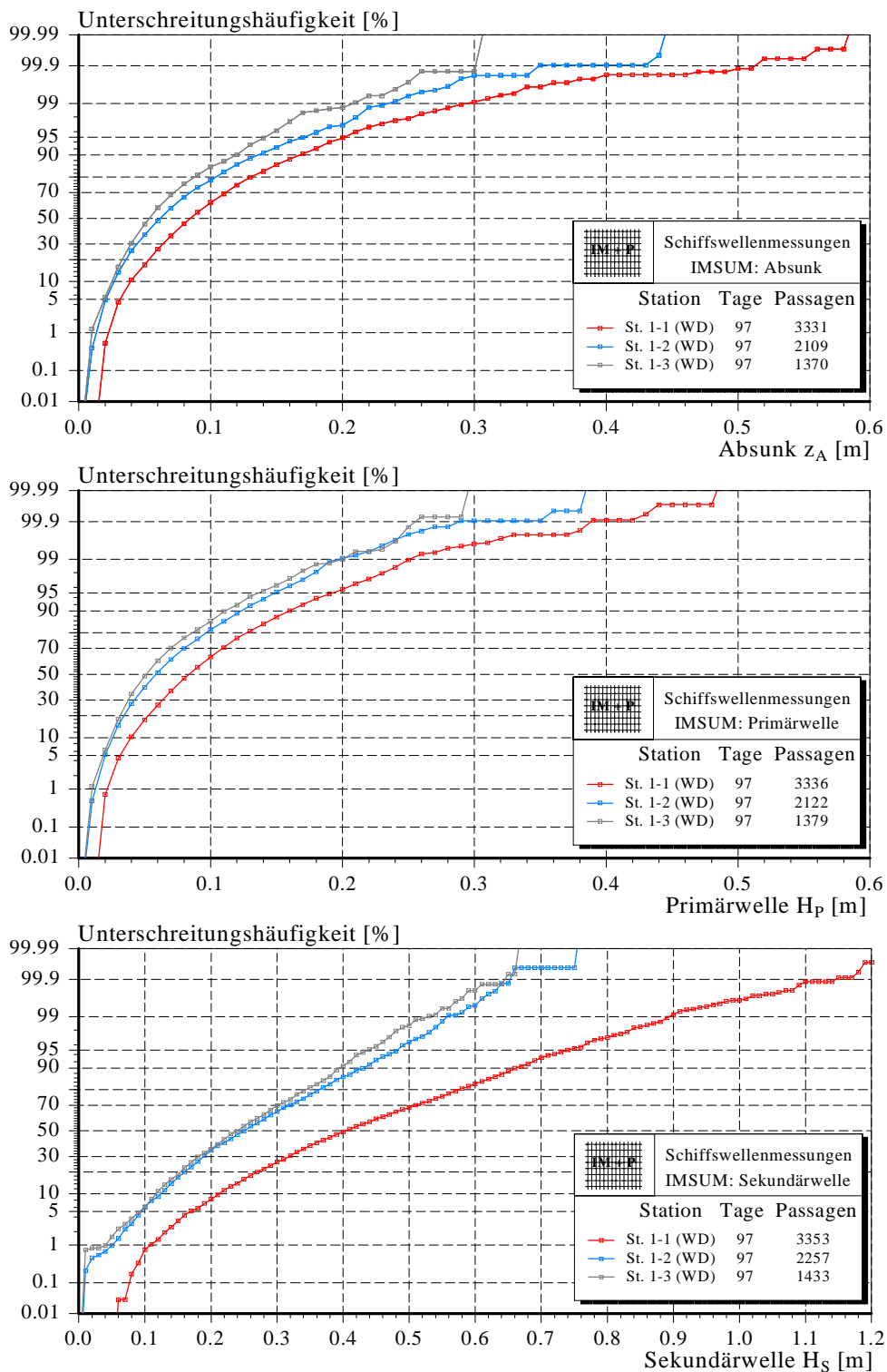


Bild 6: Schiffs erzeugte Belastung im Messquerschnitt an St. 1-1 (fahrrinnennah), St. 1-2 (Wattfläche) und St. 1-3 (ufernah) im Messzeitraum 2001 als Unterschreitungshäufigkeit in [%] für den Absink  $z_A$  (oben), die Primärwellen  $H_P$  (Mitte) und die Sekundärwellen  $H_S$  (unten; aus IM+P, 2002)

Eine Unterteilung der Außenweser nach Bereichen wirksam werdender Schiffswellenbelastung kann wie folgt vorgenommen werden:

- I.) Hafenbereich Bremerhaven (km 68 – km 74)
- II.) Imsum bis etwa Robbennordsteert (km 74 – km 91)
- III.) Robbennordsteert bis zur See (ab km 91) .

Diese Bereiche sind in einer Karte der Außenweser (Bild 7) gekennzeichnet.

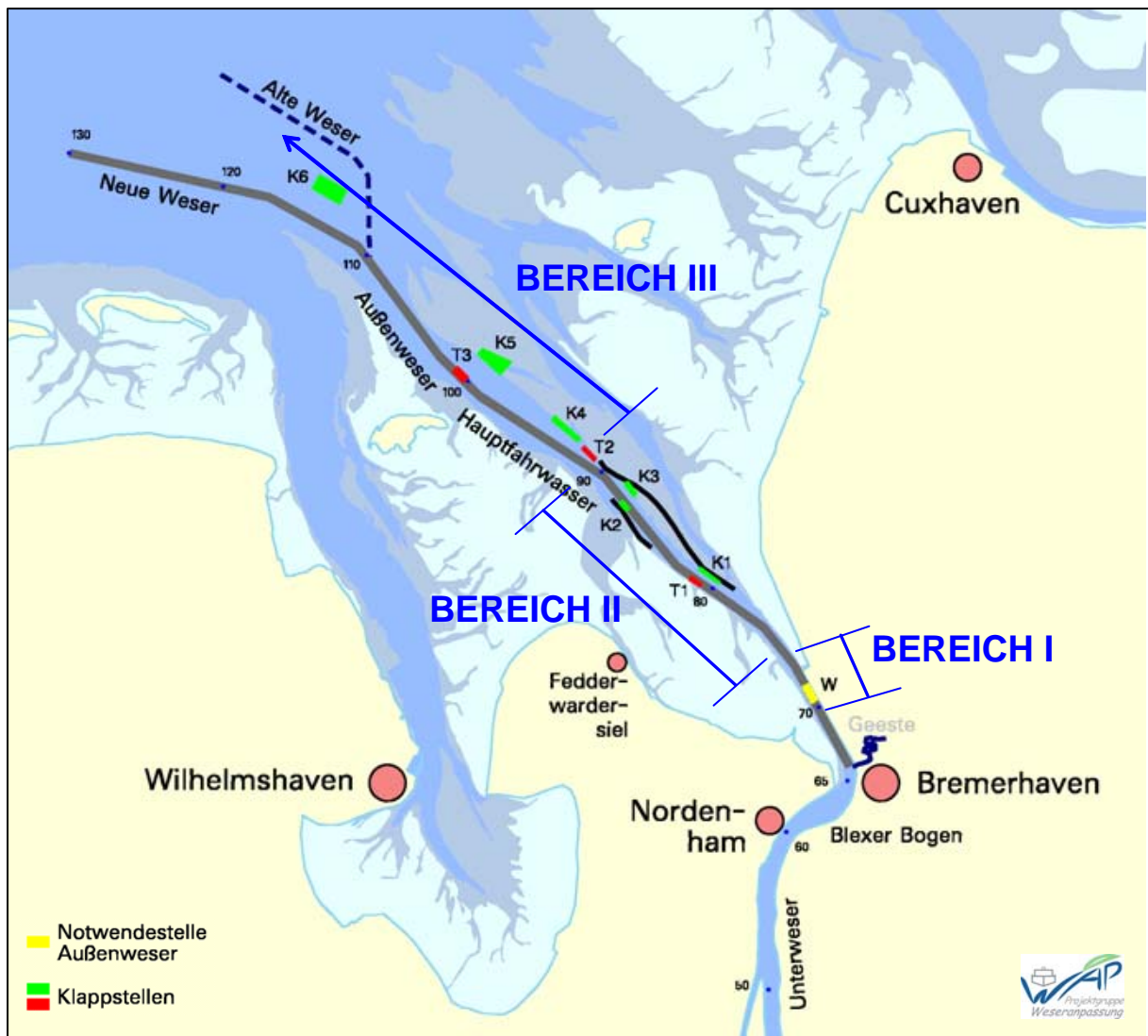


Bild 7: Unterteilung des Untersuchungsgebiets Außenweser in Hinblick auf schiffserzeugte Belastungen

Die Belastungsbereiche der Außenweser werden desgleichen anhand der Auftragungen des Querschnittverhältnisses  $n$  zweier Containerschiffe bei  $MThw_{2000-2004}$  längs der Fahrrinne deutlich (Bild 8, PM32 : PANMAX-Containerschiff,  $b = 32$  m,  $t = 13,5$  m; PPM 43: POST-PANMAX-Containerschiff,  $b = 43$  m,  $t = 14,5$  m).

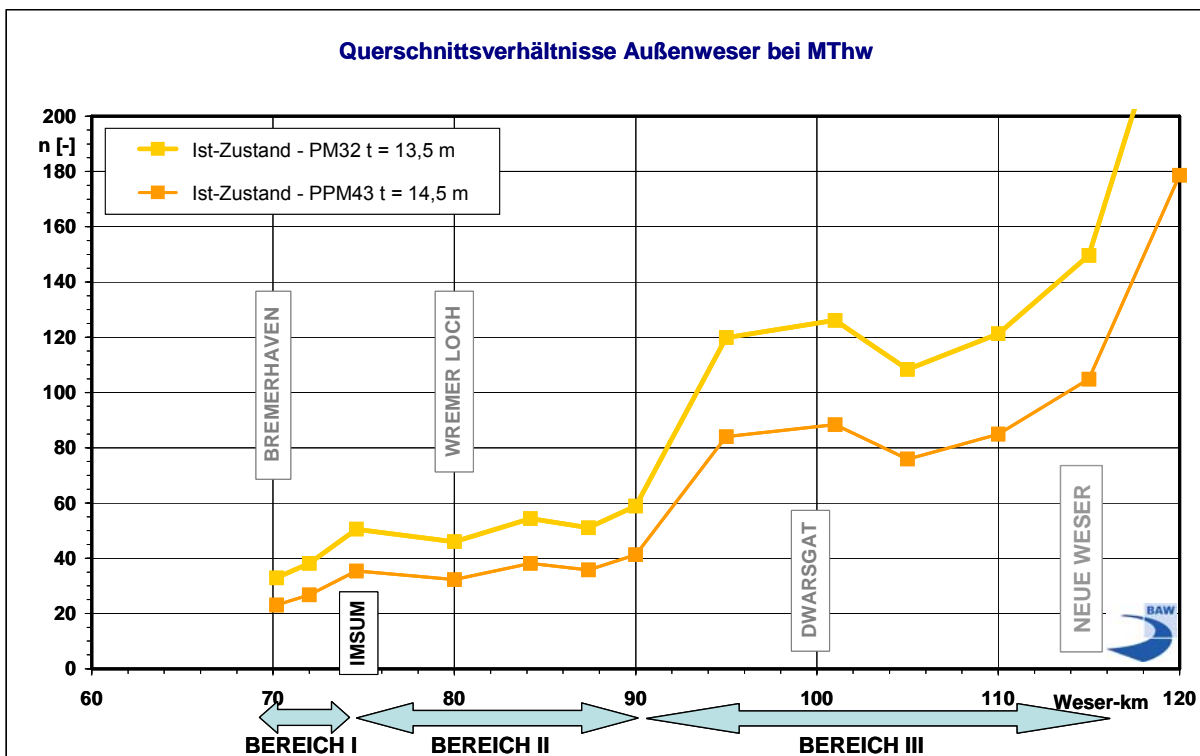


Bild 8: Querschnittsverhältnisse in der Außenweser am Beispiel der Passage eines PANMAX-Containerschiffs (PM 32, b = 32 m, t = 13,5 m) und eines POST-PANMAX-Containerschiffs (PPM 43, b = 43 m, t = 14,5 m) bei MThw<sub>2000-2004</sub>

Im **Belastungsbereich I** der Containerterminals Bremerhaven (km 68 bis km 74) ist davon auszugehen, dass nach den Grundregeln für das Verhalten im Verkehr (§3 (1) SeeSchStrO) mit Schiffsgeschwindigkeiten gefahren wird, so dass „*kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.*“ Dementsprechend sind hier wegen der kleinen Querschnittsverhältnisse von etwa  $n \leq 30$  für z.B. das in Bild 8 aufgeführte POST-PANMAX-Containerschiff im Wesentlichen die langperiodischen Absunk- und Primärwellen feststellbar. Die Amplituden der kurzperiodischen Sekundärwellen liegen aufgrund der reduzierten Schiffsgeschwindigkeiten maximal in der Größenordnung der langperiodischen Wellen.

Der **Belastungsbereich II** von Imsum bis etwa Robbenordsteert (km 74 – km 91) ist dem tiefen- und seitenbegrenzten Fahrwasser mit Querschnittsverhältnissen für z.B. große Containerschiffe zwischen  $30 < n < 60$  zuzuordnen. In diesem Bereich ergibt sich keine eindeutige Dominanz einer Belastungsart. Vergleichbar zur Unterelbe wäre für große Containerschiffe dieser Außenweserabschnitt nach FÜHRBÖTER et al. (1988) dem Übergangsbereich zum seitlich unbeschränkten Fahrwasser (Flachwasser) zuzuordnen, wobei in der Außenweser die Querschnittsverhältnisse zwischen km 80 und km 90 durch die Leitdämme Robbenplate und Langlütjen bestimmt sind.



In der *Fahrrinne* werden in erster Linie die Sohle und die Rinnenböschungen durch die Rückströmung sowie die Druckverteilung am Schiff belastet. Die Größenordnung der Belastung der Rinnenränder ist entsprechend geringer, je weniger der hydraulisch wirksame Unterschied zwischen Rinne und natürlicher Topographie erkennbar ist, was für diesen Abschnitt der Außenweser im Bereich der Leitdämme allerdings nur bedingt zutrifft. Die Sohlbelastung unter den tideabhängig verkehrenden großen Schiffseinheiten bleibt – im Vergleich mit Bereich I - wegen der weiterhin geringen Kieffreiheit hoch.

Die Belastungen der *Flachwasserbereiche*, Watten und Sande (z.B. Wurster Watt, Große Plate) werden deutlich durch den größer werdenden Gesamtquerschnitt geprägt, wobei dann der Abstand der Fahrrinne zum Ufer für die Wellenhöhe maßgebend ist.

Die langperiodischen Absunk- und Primärwellenbelastungen im Bereich II der Außenweser können fahrrinnennah im Maximum Werte bis zu  $z_A \approx H_P \approx 0,6$  m erreichen, die kurzperiodischen Wellenbelastungen sind in einer Größenordnung bis zu maximal  $H_S \leq 1,3$  m anzusetzen, wie u.a. die Messungen in 2001 im Querschnitt Imsum belegen (Bild 6).

In **Belastungsbereich III** von Robbennordsteert bis zur See (ab km 91) weitet sich der Fahrwasserquerschnitt deutlich 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 im kurzperiodischen Wellenspektrum erfassbar. Die n-Verhältnisse für die Passagen der o.a. PANMAX- und POST-PANMAX-Containerschiffe berechnen sich auf Werte über  $n \geq 80$  (Bild 8).

Im Bereich III werden im Ist-Zustand i.a. die langperiodischen Belastungen gering sein und die kurzperiodischen Wellen mit Amplituden von  $H_S < 1,0$  m auftreten. Lokal begrenzte höhere Einzelereignisse sind etwa auf Höhe des Leuchtturms Tegeler Plate (etwa km 105) möglich, da hier u.a. ein geringerer Passierabstand zu den nordwestlichen Ausläufern der Tegeler Plate wirksam wird.

Seitlich unbeschränkte Flachwasserbedingungen sind für heute verkehrende POST-PANMAX-Containerschiffe erst seewärts der Oldoogplate bei Querschnittsverhältnissen von  $n > 100$  - seewärts etwa km 115 - gegeben.

### 6.3.2 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 Absunk ( $T \approx 1$  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, 2006b).

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

### **6.3.3 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 (BAW, 1996). 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 Absunkvorgangs kann der momentane Porenwasserüberdruck im Boden zur "Auflockerung" des sohnah anstehenden (rolligen, kurzzeitig spannungsfrei gelagerten) Materials führen, so dass der sohnah Sedimenttransport infolge der zeitgleichen Verdrängungsströmung zusätzlich begünstigt wird. Diese "bodendynamischen" Vorgänge sind sowohl an Uferböschungen als auch im Sohlbereich feststellbar (u.a. SCHULZ/KÖHLER, 1986).

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 absunkbedingten 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 abhängen, 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. Auf den überdeckten Bereichen des Wattgebiets treten zu Beginn des Ab-sunks hohe Strömungsgeschwindigkeiten durch das ablaufende Wasser auf. Je nach Tide-wasserstand, Schiffgröße, Schiffsgeschwindigkeit u.a.m. kann das Wasser bis zum Tro-ckenfallen des gesamten Wattgebiets abströmen. Nach Passage des Schiffs läuft die Heck-welle je nach Neigung des Unterwasserstrands bei entsprechend hohen Energieumwand-lungsprozessen als Sturz- oder Reflexionsbrecher auf das Watt auf. Die kurzperiodischen Sekundärwellen können in Abhängigkeit des Passierabstands die lange Primärwelle überla-gern 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 na-türliche Ufer belastet (BAW, 1996).

Flache Buhnenfelder mit Niveauhöhen um Tidehalbwasser unterliegen gleichen Belastun-gen wie Wattflächen, wobei zusätzlich die Reflexionseigenschaften der Buhnenkörper die Größe von Überlagerungseffekten bestimmen.

### 6.3.4 Bauliche Anlagen

Unter baulichen Anlagen sind in der Außenweser im Wesentlichen die Containerkajen von Bremerhaven sowie Entwässerungsbauwerke (z.B. Weddewarder Siel), Leitdämme und Buhnen zu verstehen.

Feste Anleger und Kaianlagen mit senkrechten Unterwasserkonstruktionen sind wie senk-rechte Wellenbrecher hinsichtlich ihrer Belastung in Abhängigkeit der Wellenhöhe und Wel-lenperiode zu betrachten. Die ankommende Welle wird nahezu vollständig reflektiert. Die Orbitalströmung der reflektierten Wellen 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 schiffserzeugte Belastungen wie für Deckwerke (s.o.) anzunehmen.

Bei der Belastungsermittlung von Vertäuungssystemen von an Kaianlagen liegenden großen Schiffseinheiten ist deren "Angriffsfläche" und der Hauptspantquerschnitt des Vorbeifahrers etwa linear anzunehmen. Die Passiergeschwindigkeit ist etwa quadratisch, der Passierab-stand 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 schiffserzeug-te 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) 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, 1977). Die Belastungen der Anlagen sind abhängig von den Binnen- und Außenwasserständen sowie von der Amplitude der langperiodischen schiffserzeugten Wasserspiegeländerungen. Die Wirkzusammenhänge beschreibt KUNZ (1977) 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, 1977; Zitat Ende)

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

Erste Analysen der Belastung der Stemmtore am Siel Käseburg weisen darauf hin, dass vor allem schnell fahrende General Cargo-Schiffe ( $v_{S,UG} \approx 12$  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. Sieltorbelastungen durch das voll abgeladene, heutige Bemessungsschiff (Unterweser bis Bremen: Massengutschiff,  $l = 185$  m,  $b = 32,2$  m,  $t = 10,7$  m,  $n_{MThw} \approx 18$ ) traten nicht auf (IMS, 2006).



Im Mündungsbereich des Wedderwarder Sieltiefs (ca. km 74) werden für das heute nach Brake fahrende Massengutschiff mit  $t = 11,9$  m zum einen Querschnittsverhältnisse bei MThw von  $n > 50$  ermittelt, zum anderen werden hier direkt am nördlichen Hafenende auch von den Containerschiffen noch geringe Schiffsgeschwindigkeiten gefahren, so dass am Wedderwarder Siel weder von den voll abgeladenen Massengutschiffen noch von heute verkehrenden großen Containerschiffen hohe Belastungen des Bauwerks auftreten.

Abschließende Ergebnisse der Messungen am Siel Hollerwettern (Untereibe) liegen derzeit noch nicht vor.

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

### **6.3.5 Sport- und Kleinschiffahrt**

Das Maß der Beeinflussung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs für die 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 am und außerhalb des Fahrrinnenrands 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.



### 6.3.6 Marine archäologische Kulturgüter

Sind im Bereich der Außenweser marinearchäologische Kulturgüter vorhanden, sind diese im Fahrwasser im Wesentlichen durch die schiffserzeugten langperiodischen Belastungen (Absunk, Primärwelle, Verdrängungsströmung) betroffen. In flacheren Seitenbereichen des Ästuars wie z.B. auf dem Imsumer Watt (Mittelalterliche Siedlungsbefunde) 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.

### 6.3.7 Fahrrinne und Unterwasserböschungen

Die tiefe Fahrrinne eines Ästuars wird maßgeblich durch die schiffserzeugte Rückstromgeschwindigkeit belastet, die bei der Passage großer Schiffseinheiten bei Tideniedrigwasserständen, also  $n$ -Verhältnissen für große Containerschiffe von  $20 < n < 40$  im Bereich II (etwa km 74 bis km 90), an den Fahrrinnenrändern in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit Rückstromwerte etwa in der Größenordnung der maximalen Tideströmung ( $v_{MAX} \approx 1,2 - 1,5$  m/s) erreichen kann. Somit kann bei Fahrt gegen die Tide für die Dauer der maximalen Rückstromgeschwindigkeit in der Fahrrinne eine schiffserzeugte, kurzzeitige Verdopplung der lokalen, tidebedingten Strömungsgeschwindigkeit eintreten.

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 ab 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 nicht abzuleiten.
- Bei der Fahrt eines Schiffs sind Schraubenstrahl und Nachstromfeld hinsichtlich der Belastung der Fahrrinnensohle und der schiffserzeugten Transportprozesse im Vergleich zur Rückstromgeschwindigkeit von untergeordneter Bedeutung. Die vertikale und horizontale Verteilung des Nachstromfelds ist sehr inhomogen und von Makroturbulenzen geprägt.

Hinsichtlich der Transportprozesse in der Fahrrinne und an den Unterwasserböschungen ist - bei Ausklammern von Manövriervorgängen, insbesondere von Beschleunigungen - die

Wirkung von Schraubenstrahl und Nachstromfeld gegenüber der Belastung durch die Rückstromgeschwindigkeit als nachrangig zu werten (BAW, 1999).

Zur Spannungsreduzierung im Korngerüst an Unterwasserböschungen von Wasserstraßen infolge des schiffserzeugten Absunks wurden Untersuchungen bei der BAW u.a. an Binnenwasserstraßen vorgenommen. Das Maß der Reduzierung des sohnnahen 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).

### 6.3.8 Nebenrinnen und Priele

Zur Belastung der Nebenrinnen und Priele wurden von der BAW (BAW, 1996) am Beispiel des Elbeästuars Aussagen hergeleitet, die auf des Weserästuar übertragen werden können und im Folgenden zusammengefasst werden:

- Die Ausbreitung schiffserzeugter Wellen in Nebenrinnen und Prielen wird am Beispiel der Lühe (Nebenfluss der Untereibe) 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, da der höhere Wasserstand infolge geringerer Reibung eine günstigere Energieausbreitung der Schiffswelle ermöglicht.
  - Langperiodische Wellen waren bei Tnw nach etwa 3 km stark abgemindert, da zum einen das ablaufende Wasser der Wellenfortschrittsrichtung der Schiffswellen durch Strömungsenergie entgegenwirkte sowie 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 (Unternelbe) 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 Unternelbe ein (FITTSCHEIN, 2003).

Diese physikalischen Vorgänge in den Nebenflüssen der Unternelbe können prinzipiell auch in zur Haupttrinne exponiert liegenden Außentiefs, schmalen Nebenrinnen und Prielen der Außenweser wie z.B. dem Wedderwarder Tief, dem Wremer Tief oder dem Fedderwarder Priel ablaufen.

## **7 Prognosedaten zur Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen**

### **7.1 Vorbemerkungen**

Zur Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung der Außenweser wurde auf Prognosedaten zurückgegriffen, die im Rahmen von Untersuchungen zur Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe in einem hydraulischen Modell ermittelt wurden. Diese können im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen als belastbare Grundlage für die Prognose angesehen werden.

Voraussetzung für die Auswahl der für die Außenweser relevanten Versuchsserien aus der Vielzahl der im hydraulischen Modell untersuchten Passagen waren folgende Randbedingungen:

- Das Teilquerschnittsverhältnis  $n_T$  zu den maßgeblichen Messpositionen bestimmt aufgrund der minimalen UKC die Belastung, das Gesamtquerschnittsverhältnis  $n$  ist von untergeordneter Bedeutung.
- Die zu vergleichenden Schiffseinheiten sind auch für die Außenweser maßgebend.
- Die untersuchten Schiffsgeschwindigkeiten sind annähernd mit den Fahrgeschwindigkeiten auf der Außenweser zu vergleichen.

## 7.2 Das hydraulische Modell

Für die gutachterliche Bewertung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung bei einer weiteren Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt wurden bei der BAW Untersuchungen in einem hydraulischen Ausschnittsmodell vorgenommen (BAW, 2006c). Als Untersuchungsabschnitt wurde das komplexe System der Unterelbe im Bereich Hamburger Yachthafen etwa zwischen km 641,6 und km 643,2 gewählt. Im Folgenden erfolgt eine Kurzbeschreibung der Modelluntersuchungen, insoweit sie als Hintergrundwissen für die daraus abgeleitete Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Außenweser von Bedeutung sind.

Eine georeferenzierte Luftaufnahme (Bild 9) zeigt das Untersuchungsgebiet der Unterelbe, 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 beinhaltete eine im Maßstab 1 : 40 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, die mit Angaben aus der Digitalen Bundeswasserstraßenkarte (DBWK) der WSV ergänzt und in geometrischen Details durch örtliche Begehungen aktualisiert wurden.

Die Versuche im hydraulischen Modell wurden ohne Tidenströmung 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 Fahrrinnenanpassung des Elbeästuars verwiesen (BAW, 1996).

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 als „auf der sicheren Seite liegend“ herauszuarbeiten. Als "Extremsituation" sind hier Passagen mit maximalem Tiefgang, geringem Fahrabstand zur Fahrrinnenkante (nur erforderlicher Seitenabstand), maximal 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.

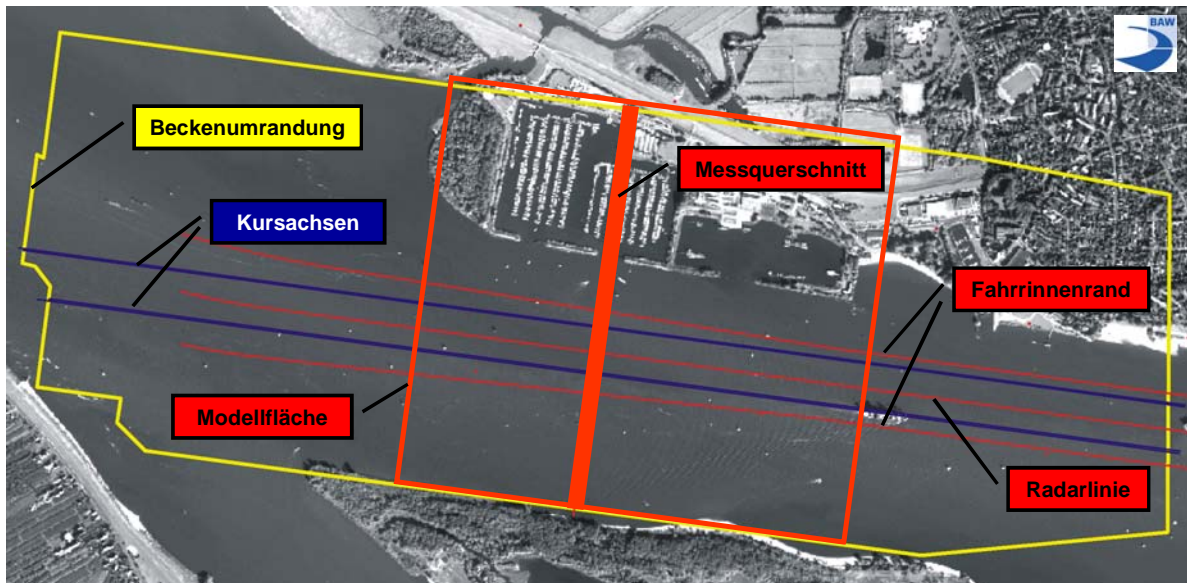


Bild 9: Georeferenziertes Luftbild des Untersuchungsereichs der Unterelbe mit Versuchsbecken (gelb) und maßstäblichen Modellgebiet (rot) mit Messquerschnitt und Fahrspuren (blau)

Als Messsysteme für die Erfassung der schiffserzeugten Belastung sowie der Schiffsgeschwindigkeit wurden handelsübliche Systeme zum einen von europäischen Wasserbauinstituten (Danish Hydraulic Institut, DK, Delft Hydraulics, NL) sowie aus der Lasertechnik (z.B. LASE Industrielle Lasertechnik) eingesetzt. Da die schiffserzeugten Wasserspiegelauslenkungen und Rückstromgeschwindigkeiten gegen den ruhenden Wasserspiegel gemessen werden - also Relativmessungen vorgenommen werden - , sind systematische Messgerätenauigkeiten 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).

Als Bemessungsschiff der Elbe wurde wie für die Außenweser ein Containerschiff der POST-PANMAX-Größe mit einer Ladungskapazität von etwa 9.000 TEU (hier: PPM46) festgelegt, dessen wesentliche Daten zusammen mit denen von den Vergleichsschiffen in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Name	Typ	Länge	Breite	Tiefgänge	$c_B = f(t, \dots)$ *
------	-----	-------	--------	-----------	-----------------------

		zw.d.L.		(untersucht)	
	-	m	m	m	-
<b>PM32</b>	Containerschiff	280	32,2	13,5	0,694
<b>PPM40</b>	Containerschiff	320	40	12,7	0,723
<b>PPM46</b>	Containerschiff Bemessungsschiff	331	46	13,5 / 14,5	0,571 / 0,584

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

Tabelle 1: Basisdaten der für die Prognose im Modell eingesetzten Schiffseinheiten

Die Modellschiffe (vergl. Bild 10) führen als funkferngeschaltete Selbstfahrer (Propellerantrieb), deren seitlicher Freiheitsgrad durch ein Führungsseil eingeschränkt, dessen vertikale Bewegung aber ermöglicht wurde. 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.

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

Die Wasserstände der verschiedenen Versuchs-Szenarien wurden anhand der im HN-Modell der Unter- und Außenelbe verwendeten Daten des Ist-Zustands als Mittelwerte des Simulationszeitraums (08.05.2002 – 06.06.2002) festgelegt:

- örtl. mittleres Tnw am Pegel Schulau: NN-1,62 m
- 1h30 vor mittlerem Thw am Pegel Schulau: NN+1,28 m

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 waren (BAW, 2003). 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.



Bild 10: Containerschiff PPM40 bei Fahrt im hydraulischen Modell

Die im Modell gemessenen teils nur geringen Sekundärwellenhöhen können aus Gründen der Modellähnlichkeit (Grenzbedingung: Ausgangswelle am Schiff  $H_{S,MODELL} > 0,02 \text{ m}$ ) nicht zu Vergleichsbetrachtungen herangezogen werden (u.a. Bollrich et al., 1989).

### 7.3 Datenbasis und Datenanalyse

Aus der Vielzahl der Versuchsvarianten, die für die Fragestellungen an der Unter- und Außenelbe von Relevanz waren, wurden diejenigen Versuchsserien ausgewählt, die für eine Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen der Außenweser von Bedeutung sind.

#### 7.3.1 Vergleich PANMAX- und POST-PANMAX-Containerschiff

Anhand der grafischen Auftragung der Messwerte des langperiodischen Absunks  $z_A$  in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit  $v_S$  für ausgewählte Messpositionen an der Fahrrinnenkante und am Uferstreifen wird die Belastung einer Wasserstraße infolge von tideabhängigen Passagen eines PANMAX- (PM32) und eines POST-PANMAX-Containerschiffs (PPM46, Bemessungsschiff) bei annähernd örtlichem Thw verglichen (Bild 11). Als Beispiel wurde in

dieser Grafik das Vorgehen zur Ermittlung der ausbaubedingten Änderungen für eine Schiffsgeschwindigkeit von  $v_s = 12$  kn mit Pfeilen markiert. Die untersuchten Passierabstände zu den Pegeln liegen annähernd in der gleichen Größenordnung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass Änderungen in der Belastung im wesentlichen auf die ausbaubedingten Änderungen durch die veränderten Schiffparameter (Breite, Tiefgang) zurückzuführen sind.

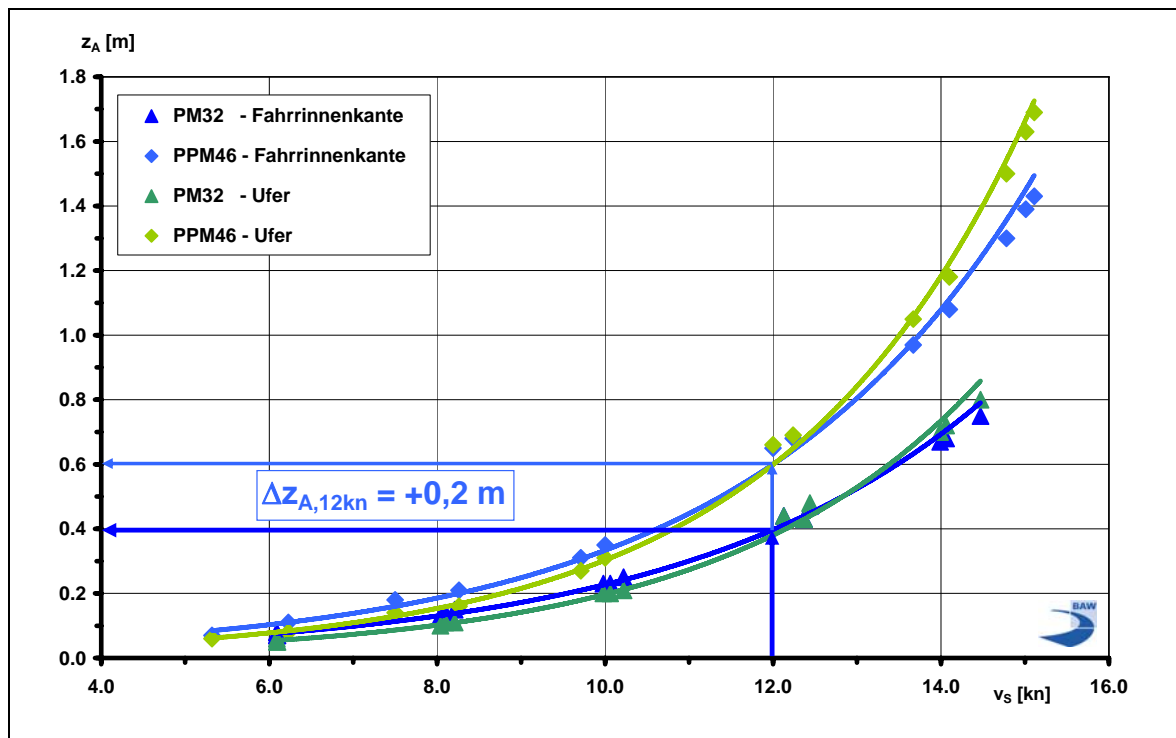


Bild 11: Geschwindigkeitsabhängiger Absenk an der Fahrrinnenkante und am Ufer für Passagen des PM32 ( $t = 13,5$  m) sowie des PPM46 ( $t = 14,5$  m) bei ca. örtl. Thw (mit Beispiel für Fahrrinnenkante)

Die Schiffparameter und geometrischen Randbedingungen bei örtl. Thw in der Übersicht:

- PM32:  $t = 13,5$  m     $L_{\text{UFER}} \approx 250$  m     $n \approx 25,3$      $n_T \approx 15$
- PPM46:  $t = 14,5$  m     $L_{\text{UFER}} \approx 270$  m     $n \approx 16,5$      $n_T \approx 11$

Analysen dieser tideabhängigen Fahrten des PM32 ( $t = 13,5$  m) im Vergleich zu denen des PPM46 ( $t = 14,5$  m) – jeweils als Abgänger bei ca. Thw – haben gezeigt, dass der größere Passierabstand des PPM46 ( $\Delta L \approx +20$  m;  $L_{\text{PPM46,UFER}} \approx 270$  m) die hydromechanische Wirkung der deutlich größeren Schiffsabmessungen ( $\Delta l = +51$  m;  $\Delta b = 13,8$  m;  $\Delta t = +1,0$  m;  $\Delta A_S/2 \approx +114$  m<sup>2</sup>) nicht ausgleichen kann und somit der Einfluss des Teilquerschnittsverhältnisses ( $n_{T,320,PM32} = 15$ ;  $n_{T,320,PPM46} = 11$ ;  $\Delta n_T = -4$ ) aufgrund nichtlinearer physikalischer Zusammenhänge hinsichtlich der Wellenbelastung überproportional wirksam wird. Die langperiodische Belastung an der Fahrrinnenkante und am Ufer steigt durch Fahrten des PPM46 gegenüber Passagen des PM32 bei Schiffsgeschwindigkeiten von  $v_s = 10$  kn um rund



$\Delta z_A \approx +0,1$  m auf etwa  $z_A \approx 0,3$  m und bei  $v_S = 12$  kn um rund  $\Delta z_A \approx +0,2$  m auf etwa  $z_A \approx 0,6$  m an (vergl. Beispiel Bild 11).

Die Änderungen der schiffserzeugten Verdrängungsströmung sind um  $\Delta v_R < +0,1$  m/s auf etwa  $v_{R,PPM46} \approx 0,4$  m/s ( $v_S = 10$  kn) bzw.  $\Delta v_R \approx +0,2$  m/s auf etwa  $v_{R,PPM46} \approx 0,6$  m/s ( $v_S = 12$  kn) zu erwarten. Bei höheren Geschwindigkeiten steigt die schiffserzeugte Rückstrombelastung überproportional um rund  $\Delta v_R \approx +0,5$  m/s auf Werte von z.B.  $v_{R,PPM46} \approx 1,1$  m/s ( $v_S = 14$  kn) an.

Anhand dieser Analysegrößen lassen sich für die Außenweser (z.B. Abschnitte ohne Vertiefung!) bei annähernd vergleichbaren Teilquerschnittsverhältnissen sowie etwa gleichen Differenzen der Teilquerschnittsverhältnisse die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen abschätzen. Für Abschnitte der Außenweser mit größeren Teilquerschnittsverhältnissen werden die Prognosen auf der sicheren Seite liegen.

### 7.3.2 Vergleich zweier POST-PANMAX-Containerschiffe

Das schon im Ist-Zustand verkehrende POST-PANMAX-Containerschiff PPM40 wird im Folgenden mit dem zukünftig verkehrenden Bemessungsschiff PPM46 im Ausbauzustand verglichen. Dies ist für die gewählte Messposition möglich, da bei sehr tiefgehenden Schiffen das Teilquerschnittsverhältnis  $n_T$  zur Seite der Messposition hin für deren Belastungsänderungen entscheidend ist. Die Fahrten als tideunabhängige Abgänger erfolgten bei etwa örtlichem  $T_{nw}$  unter den Randbedingungen:

- PPM40:  $t = 12,7$  m     $L_{MESS} \approx 80$  m     $n \approx 17,5$      $n_T \approx 7,9$
- PPM46:  $t = 13,5$  m     $L_{MESS} \approx 110$  m     $n \approx 14,6$      $n_T \approx 8,3$

Die Vergleichsergebnisse dieser Passagen sind für eine ausgewählte Messposition annähernd an der Fahrinnenkante in Bild 12 aufgetragen. Die langperiodischen Wellenbelastungen durch beide Schiffe liegen bei einer Schiffsgeschwindigkeit von etwa  $v_S = 10$  kn u.a. aufgrund der geringen Differenz des Teilquerschnittsverhältnisses von  $\Delta n_T < +0,5$  ( $\Delta L_{MESS} \approx +30$  m;  $\Delta h \approx +1$  m;  $\Delta A_S/2 \approx +55$  m<sup>2</sup>) jeweils bei etwa  $z_A = 0,5$  m. Erst ab höheren Schiffsgeschwindigkeiten über  $v_S > 12$  kn ist mit einer höheren Belastung durch das Bemessungsschiff zu rechnen ( $\Delta z_A \approx +0,1$  m bei  $v_S \approx 13$  kn; Bild 12), da hier dann die Vertiefungsmaßnahmen und der größere Passierabstand die überproportional ansteigende Wirkung der größeren Schiffsabmessungen nicht mehr kompensieren können.

Die gemessenen Differenzen der schiffserzeugten Verdrängungsströmung direkt an der Fahrinnenkante liegen annähernd unabhängig von der Schiffsgeschwindigkeit bei:

- $\Delta v_R < -0,1$  m/s bei etwa  $v_{R,PPM46} \approx 0,8$  m/s ( $v_S = 10$  kn)
- $\Delta v_R < -0,1$  m/s bei etwa  $v_{R,PPM46} \approx 1,2$  m/s ( $v_S = 12$  kn)

- rund  $\Delta v_R \approx -0,1$  m/s bei rund  $v_{R,PPM46} \approx 1,5$  m/s ( $v_S = 13$  kn).

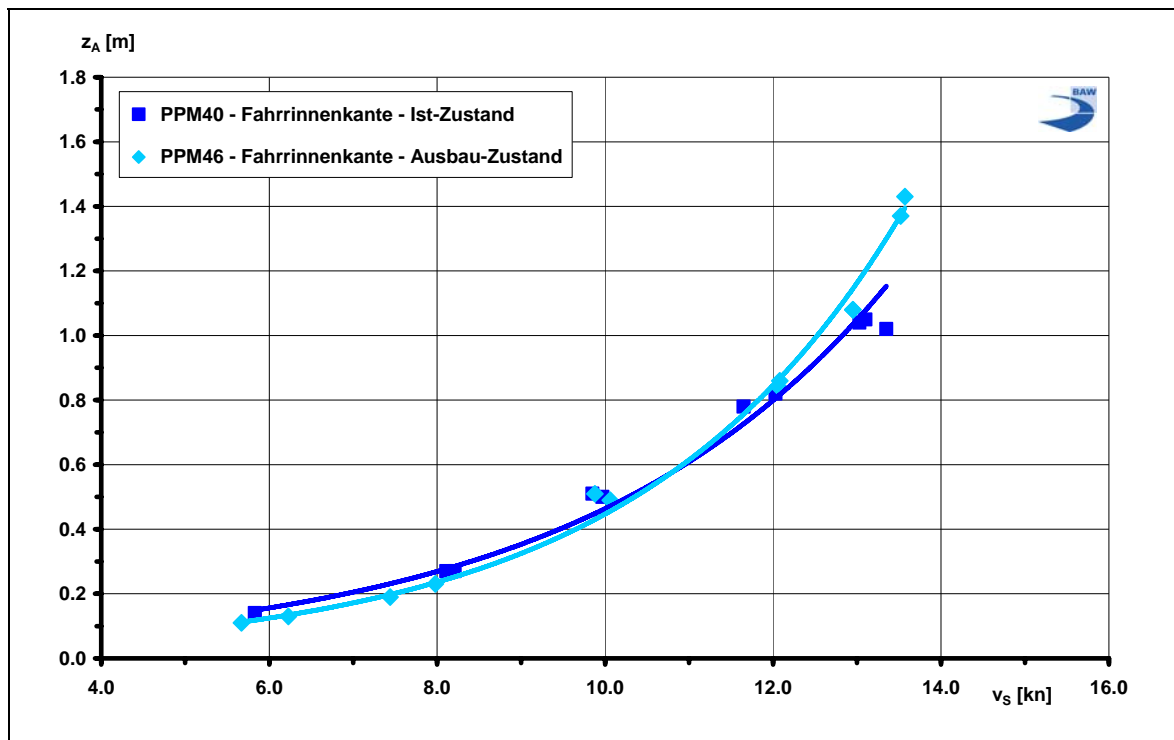


Bild 12: Geschwindigkeitsabhängiger Absink an der Fahrrinnenkante für Passagen des PPM40 im Ist-Zustand ( $t = 12,7$  m) sowie des PPM46 im Ausbauzustand ( $t = 13,5$  m) bei ca. örtl. Tnw

Anhand der Analysegrößen von Passagen der beiden POST-PANMAX-Containerschiffe lassen sich für die Außenweser (z.B. Abschnitte mit Vertiefung!) bei annähernd vergleichbaren Teilquerschnittsverhältnissen sowie etwa gleichen Differenzen der Teilquerschnittsverhältnisse zukünftige Größenordnungen der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen vor und nach dem Ausbau abschätzen (vergl. Bild 15 und Bild 16).

Für Abschnitte der Außenweser mit größeren Teilquerschnittsverhältnissen werden die Prognosen auf der sicheren Seite liegen.

## 8 Gebietsabhängige Bewertung für die Seeschiffahrtsstraße Außenweser

### 8.1 Einschränkung der Beurteilungskriterien

Bei der Beschreibung des methodischen Vorgehens (Kapitel 5) wurde vorgestellt, dass auf Basis der Ergebnisse der Messungen des Ist-Zustands in der Natur (BAW, 2003) und der Simulation im hydraulischen Modell für das Referenzgebiet der Untereibe (BAW, 2006c) die



gebietsabhängige Bewertung für die gesamte Seeschiffahrtsstraße der Außenweser prognostiziert wird. Es werden die ausbaubedingten Änderungen der Wellen und Verdrängungsströmung am Schiff durch größere Schiffsabmessungen und teilweise örtliche Querschnittsänderungen abgeschätzt, die auch für die Beurteilung der Belastung der Fahrrinnenböschungen auf der sicheren Seite liegen werden.

Auswirkungen auf die Uferbelastung aufgrund von z.B. geänderten Böschungsneigungen an den Fahrrinnenkanten unterliegen örtlichen Wellenausbreitungsprozessen (u.a. Refraktion, Shoaling) die infolge der Abhängigkeit der Wellenparameter (u.a. Wellenlänge) eine Übertragung der Bedingungen aus dem hydraulischen Modell auf das Gesamtästuar sehr stark komplizieren und den Aufwand für eine exakte quantitative Abschätzung nicht rechtfertigen.

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. Von der Projektgruppe wurden allerdings die Bemessungsgeschwindigkeiten immer als Fahrt über Grund angegeben (gemäß Tidefahrplan), so dass diese in dem Gutachten an den entsprechenden Stellen demgemäß als Fahrt über Grund zitiert werden.

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 (BAW, 2006d) auch die Strömungsrefraktion der Schiffswellen verändert. Allerdings ist der Einfluss auf das Gesamtmaß der Änderungen schiffserzeugter Belastungen aus wasserbaulicher Sicht unbedeutend.

Der Einfluss möglicher ausbaubedingter Änderungen der Wasserstände der Außenweser auf die schiffserzeugten Belastungen ist bei einem Vergleich zu den tatsächlichen Fahrrinntiefen nur sehr gering ( $\Delta h < 0,1\%$ ), in der Wirkung auf schiffserzeugte Belastungen nicht quantifizierbar und aus wasserbaulicher Sicht unbedeutend.

Da die im Modell gemessenen teils nur geringen Sekundärwellenhöhen aus Gründen der Modellähnlichkeit (Grenzbedingung: Ausgangswelle am Schiff  $H_{S,MODELL} > 0,02$  m) nicht zu Vergleichsbetrachtungen herangezogen werden können (u.a. Bollrich et al., 1989), ist eine Prognose ausbaubedingten Änderungen der Sekundärwellen aus den Modellergebnissen folglich auch nicht möglich. Auf der sicheren Seite liegend wird empfohlen, die Größenordnung der bei den Beweissicherungsmessungen bei Imsum an der fahrrinnennahen Messposition St. 1-1 gemessenen Änderungen der Sekundärwellenhöhen nach dem letzten Fahrrinenausbau generell auch für die zukünftigen Änderungen in der gesamten Fahrrinne der Außenweser mit im Mittel  $\Delta H_{S,MITT} \approx +0,1$  m anzusetzen (BAW, 2003; vergl. Kapitel 6.2).

## 8.2 Hydraulisch wirksame bauliche Veränderungen

Grundlage der Beurteilung der einzelnen lokalen und regionalen Maßnahmen in der Außenweser bildet der Erläuterungsbericht mit der Beschreibung des Vorhabens nach [U2] der Projektgruppe Weseranpassung mit Stand vom Februar 2006.

Die im folgenden Textteil angegebenen Tiefenkoten der Baumaßnahmen beziehen sich auf die bis zur Solltiefe abzutragenden Mächtigkeiten ohne die Einbeziehung der Baggertoleranz, von Vorratsbaggerungen oder morphologischem Nachlauf. 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.

Als Bezugswasserstand für die Berechnungen der Querschnittsverhältnisse  $n$  (Bild 13 und Bild 14) wurde das jeweilige 5-Jahresmittel  $M_{Thw_{2000-2004}}$  bzw.  $M_{Tnw_{2000-2004}}$  gewählt. Zusätzlich zu den für die Außenweser tiefgangsrelevanten Containerschiffen wurden die Querschnittsverhältnisse für die maßgeblichen Massengutschiffe, die heute und zukünftig auf der Unterweser bis zum Hafen Brake verkehren, für tideunabhängige ( $M_{Thw}$ ; Bild 13) und tideabhängige ( $M_{Tnw}$ ; Bild 14) Fahrt aufgetragen.

Bei der Ermittlung des Fahrwasserquerschnitts  $A$  ( $n = A / A_S$ ) wurde nur der hydraulisch wirksame Wasserstraßenquerschnitt berücksichtigt, indem flachere Seitenbereiche (z.B. der Langlütjensand), durch flache Sände abgetrennte Priele (z.B. Dwarsgat) sowie durch Leitwerke hydraulisch getrennte Wattgebiete und Rinnen (z.B. Wurster Arm) nicht in die Querschnittsflächenberechnung einbezogen wurden.

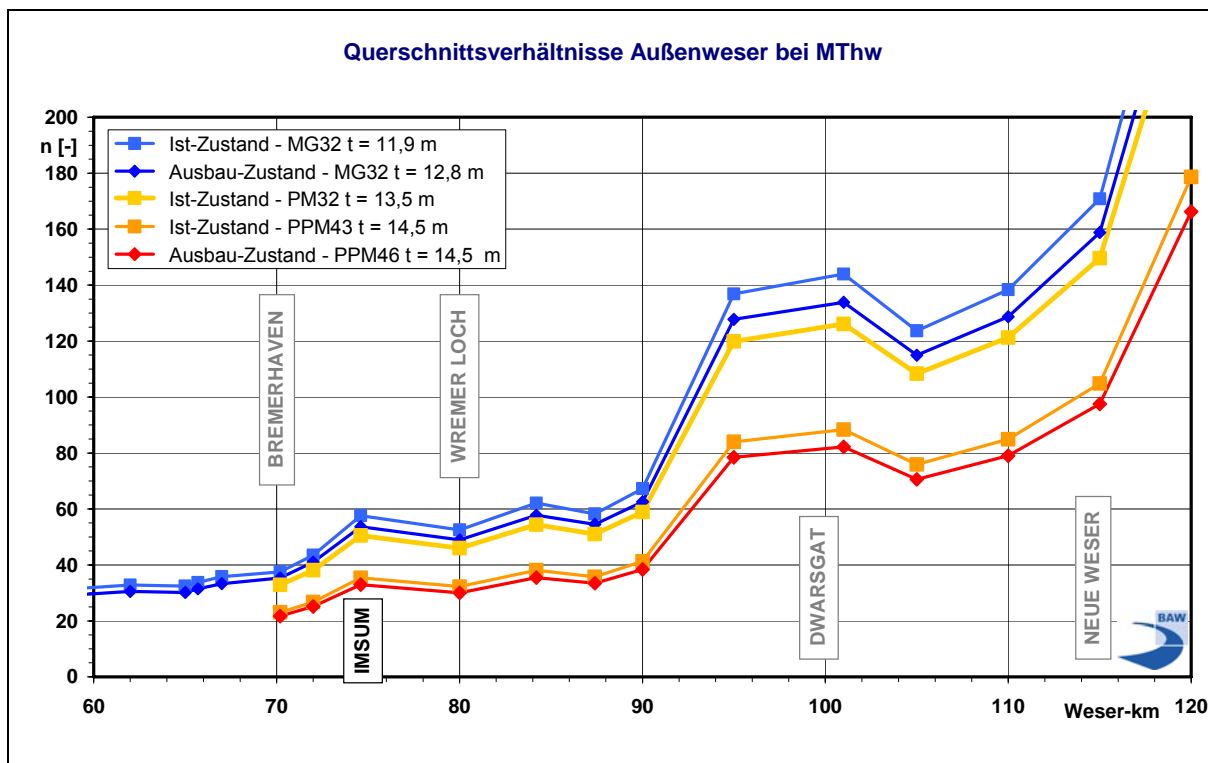


Bild 13: Querschnittsverhältnisse in der Außenweser für verschiedene Schiffstypen und Schiffstiefgänge im Ist- und Ausbauzustand bei MThw<sub>2000-2004</sub>

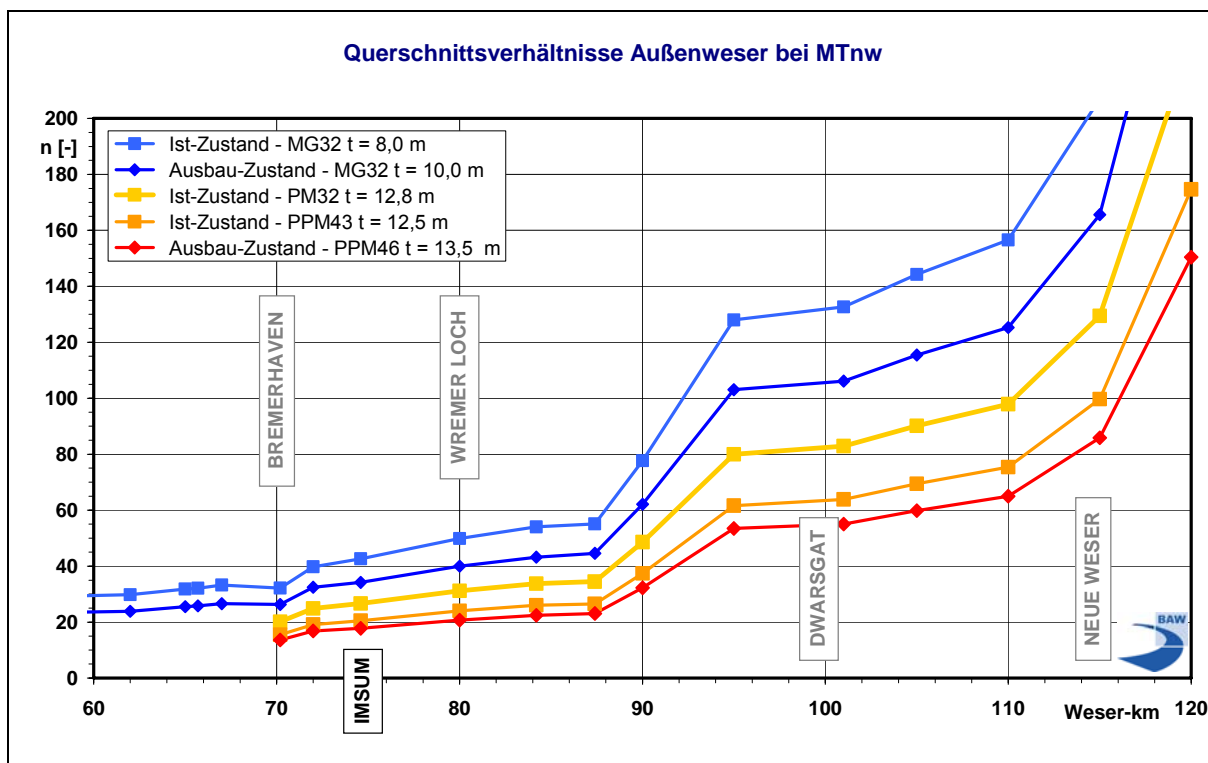


Bild 14: Querschnittsverhältnisse in der Außenweser für verschiedene Schiffstypen und Schiffstiefgänge im Ist- und Ausbauzustand bei MTnw<sub>2000-2004</sub>

Die Grafiken bei MThw und MTnw verdeutlichen, dass im Ausbauzustand entlang der Außenweser bis etwa Robbennordsteert (km 90) trotz lokaler Fahrrinnenvertiefungen nicht nur für das zukünftige Bemessungsschiff, sondern auch für schon heute verkehrende, zukünftig tiefergehende PPM-Containerschiffe durchgehend mit geringeren Querschnittsverhältnissen zu rechnen ist. Ab km 90 werden die Fahrwasserbedingungen günstiger, dennoch ist bis zur Oldoogplate (ca. km 110) für die PPM-Containerschiffe auch bei Tidehochwasser mit tiefen- und seitenbegrenztem Fahrwasser zu rechnen.

Zusätzlich zu den Querschnittsverhältnissen längs der Außenweser 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. Die  $n_T$ -Daten jeweils für die Steuerbordseite sind beispielhaft für Abgänger in Bild 15 und für Aufkommer in Bild 16 aufgetragen (tideunabhängiger Verkehr, MTnw).

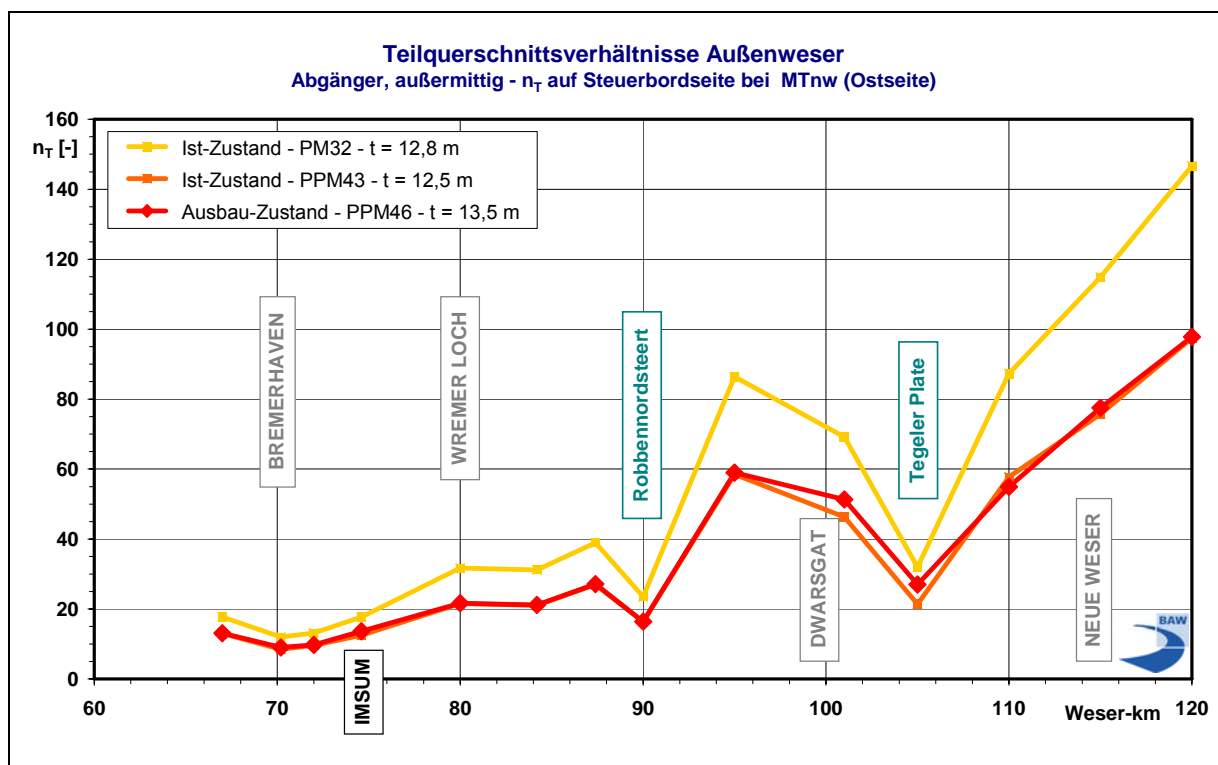


Bild 15: Teilquerschnittsverhältnisse  $n_T$  in der Außenweser (Ostseite) für abgehende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei MTnw<sub>2000-2004</sub>

Für die grafische Darstellung wurden die berechneten Teilquerschnittsverhältnisse bei Tideniedrigwasser gewählt, da die  $n_T$ -Werte für tideunabhängige Fahrt (MTnw) grundsätzlich unter denen bei MThw liegen und somit ungünstigere Verhältnisse beschreiben. Die Teilquerschnittsverhältnisse der Abgänger bzw. Aufkommer bei MTnw zeigen neben den Informationen aus dem Querschnittsverhältnis  $n$  (vergl. Bild 13 und Bild 14) kritische Abschnitte der Außenweser auf, in denen der geringe Passierabstand bei außermittiger Fahrt z.B. am

Robbennordsteert, an der Tegeler Plate (Bild 15) oder am Langlütjennordsteert (Bild 16) schon heute zu hohen Belastungen aus dem Schiffsverkehr führen kann.

Aufgrund des - als Sicherheitsabstand zur Fahrrinnenkante - gewählten Seitenabstands von einer Schiffsbreite ( $L_{PP43} = 43 \text{ m}$ ;  $L_{PP46} = 46 \text{ m}$ ) wird die Breitenzunahme des PPM46 geometrisch nahezu kompensiert, so dass die  $n_T$ -Werte für die PPM-Containerschiffe (PPM43 = orange; PPM46 = rot) annähernd identisch sind. Bei der Fahrt von Schiffen ist allerdings zudem die mitwirkende hydrodynamische Masse des jeweiligen Schiffs mit zu berücksichtigen, so dass trotz annähernd gleicher  $n_T$ -Werte geringfügig höhere Belastungen für Passagen des PPM46 zu erwarten sind. Zwischen km 99 und km 110 wirkt sich die Fahrrinnenverschwenkung auf die Teilquerschnittsverhältnisse derart aus, dass jeweils steuerbords die zukünftigen  $n_T$ -Werte bei PPM-Abgängern größer (Bild 15), bei Aufkommern geringer (Bild 16) werden, was sich entsprechend auf die schiffserzeugten Belastungen auswirken wird.

Die Differenzen der Teilquerschnittsverhältnisse zwischen PPM46 und dem PAN-MAX-Containerschiff (PM32 = gold; Bild 15 und Bild 16) weisen bei außermittiger Fahrt für die gesamte Außenweser - trotz des geringeren Passierabstands des PM32 ( $L_{PM32} = 32 \text{ m}$ ;  $\Delta L_{PM32/PPM46} = -14 \text{ m}$ ) - auf vergleichsweise höhere Belastungen durch Passagen der PPM-Containerschiffe hin.

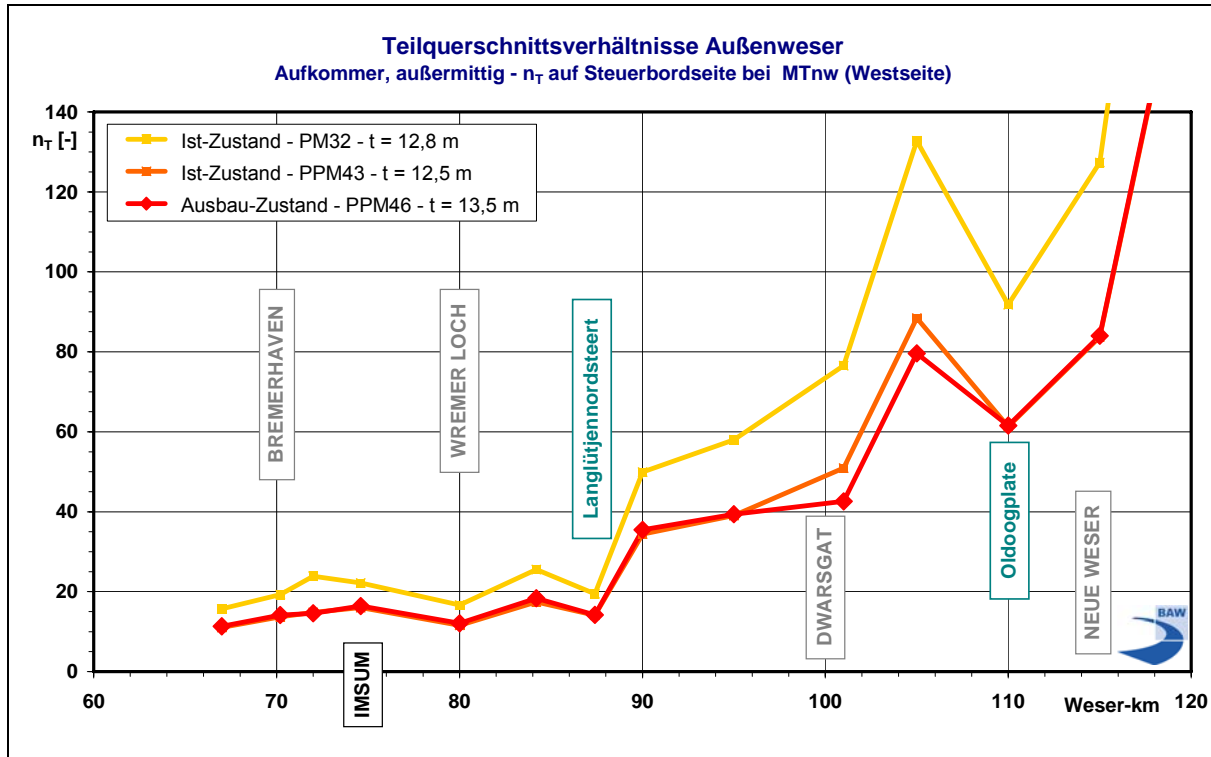


Bild 16: Teilquerschnittsverhältnisse  $n_T$  in der Außenweser (Westseite) für aufkommende große Containerschiffe im Ist- und Ausbauzustand bei  $MTnw_{2000-2004}$



Die geringen Teilquerschnittsverhältnisse zwischen Hafen Bremerhaven und Robbenordsteert (ca. km 74 bis km 90; Bereich II) mit Werten partiell deutlich unter  $n_T < 20$  zeigen zudem, dass die Randbedingungen für den tideunabhängigen Verkehr der Außenweser teilweise denen vor dem Hamburger Yachthafen nahe kommen, und somit auf Basis der im Unterelbmodell ermittelten Belastungen die ausbaubedingten Änderungen für diesen Bereich der Außenweser auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden können.

Die Anlagen I bis IV zeigen die gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser als Vergleich eines PPM43-Containerschiffs mit dem PPM46-Bemessungsschiff ( $v_S = 12$  kn und  $14$  kn) sowie als Vergleich eines PM32-Containerschiffs mit dem PPM46-Bemessungsschiff ( $v_S = 12$  kn und  $14$  kn) für tideunabhängige und tideabhängige Fahrt. In den folgenden Unterkapiteln werden diese dort tabellarisch zusammengestellten Prognosen detaillierter behandelt.

### 8.2.1 Hafbereich Bremerhaven (km 67 bis km 74)

Im Bereich der Hafenanlagen Bremerhaven zwischen km 67 und etwa km 74 sind zur Herstellung der Sohlage auf etwa NN -17,1 m im wesentlichen Vertiefungen bis etwa km 70 und in der vorgesehenen erweiterten hafenbezogenen Wendestelle bis etwa km 73,5 vorgesehen. In der Fahrrinne zwischen etwa km 70 und km 74 sind nur lokal geringe Sohlvertiefungen im Dezimeterbereich erforderlich (Bild 17).

Gemäß den Grundregeln für das Verhalten im Verkehr (§3 (1) SeeSchStrO) ist gerade im Hafbereich zu erwarten, dass auch von der durchgehenden Unterweserschiffahrt mit Schiffsgeschwindigkeiten gefahren wird, so dass *„kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird.“*

Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen sind aufgrund des Hafensbetriebs mit vorgesehenen Reviertgeschwindigkeiten für die Fahrrinnenbemessung von maximal  $v_{S,\ddot{u}G} = 5$  kn bzw.  $8$  kn nicht zu erwarten. Die Absunkwerte durch große Containerschiffe werden aufgrund der Vertiefungen sowie der Wendestelle maximal bei etwa  $z_A < 0,3$  m liegen (vergl. Bild 12). Da zudem gegenüber dem Ist-Zustand ( $v_{S,\ddot{u}G} = 10$  kn) die Bemessungsgeschwindigkeit um  $\Delta v_{S,\ddot{u}G} = -5$  kn bis  $-2$  kn auf  $v_{S,\ddot{u}G} = 5$  kn bzw.  $8$  kn zurückgenommen wird, ist auch bei den sehr geringen Querschnittsverhältnissen des Bemessungsschiffs ( $n < 15$  bei MTnw; Bild 14) mit keinen Zunahmen der schiffserzeugten Belastung zu rechnen.

Die Querschnittsverhältnisse für die Massengutschiffe der Unterweser ( $t_{MAX} = 11,9$  m bis Brake) liegen derzeit mit  $n > 30$  (MThw und MTnw; Bild 13 bzw. Bild 14) deutlich über den Werten der heutigen PPM-Containerschiffahrt. Des weiteren müssen die aufkommenden Fahrzeuge ihre Fahrgeschwindigkeit schon im nördlichen Hafbereich deutlich reduzieren,

da im südlichen Hafenabschnitt die Lotsenübernahme für die Unterweser erfolgt, so dass durch diese Fahrzeuge keine ausbaubedingten Zunahmen der schiffserzeugten Belastung zu erwarten sind.

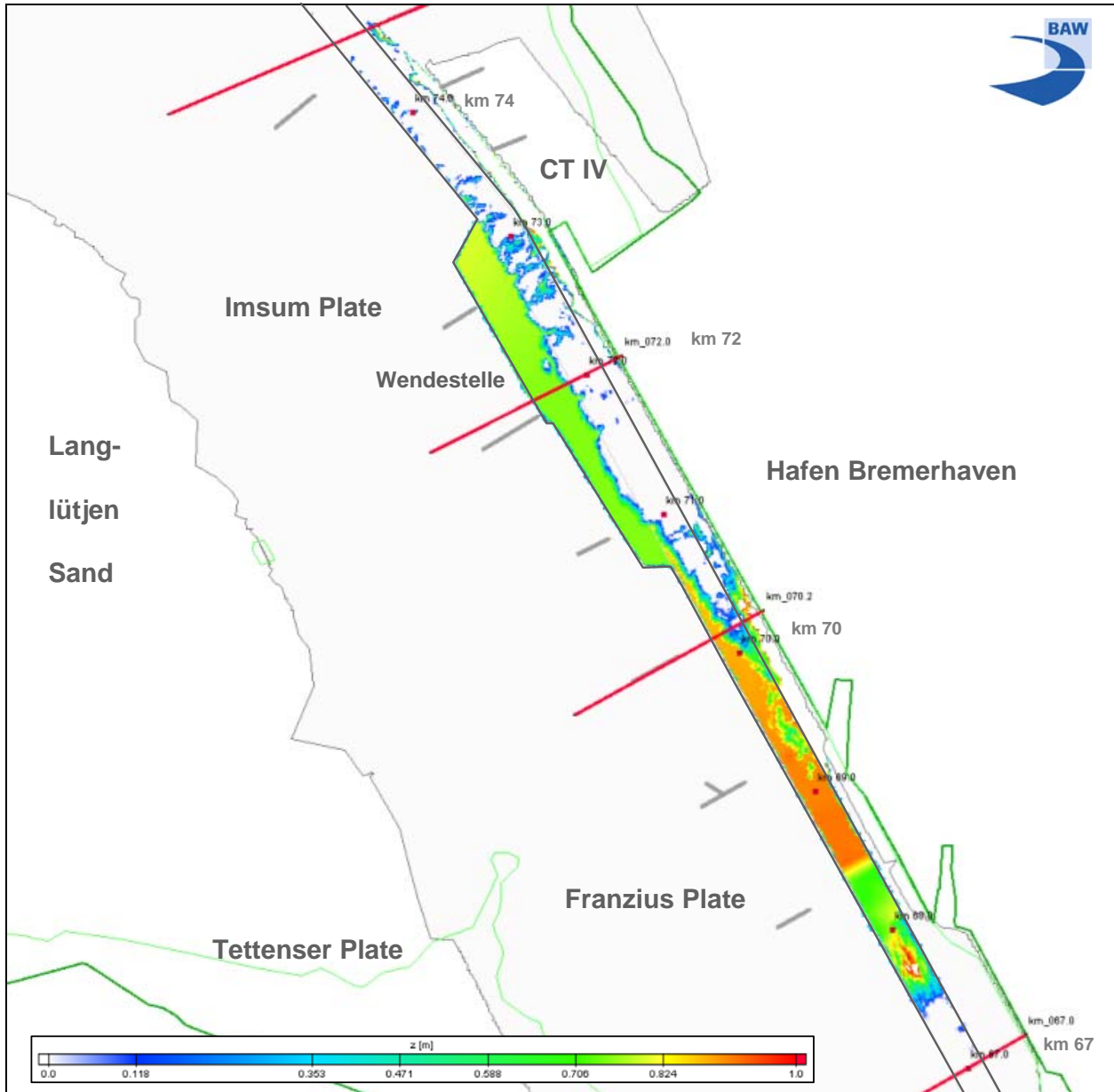


Bild 17: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen im Hafenbereich Bremerhaven (km 67 bis km 74) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse

### 8.2.2 Belastungsänderungen der Vorlandflächen bei Tettens

Da in der Fahrrinne der Außenweser keine ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen aufgrund des Hafenbetriebs prognostiziert werden, können desgleichen auf

der Blecher und Tettenser Plate (Bild 17), an den Vorlandkanten und wasserstandsabhängig auf den Vorlandflächen bei Butjadingen keine ausbaubedingten Änderungen der Belastungen auftreten.

### 8.2.3 Hafen Bremerhaven bis Wremer Tief (km 74 bis km 79)

Zur Erstellung der zukünftigen Tiefenlage der Fahrrinnensohle von rund NN-17,3 m zwischen dem Hafen Bremerhaven und dem Wremer Tief (km 74 bis ca. km 79) sind zwischen km 76 und ca. km 77,8 sowie auf einer Strecke von rund 1 km ab etwa km 79,4 teils großflächige, teils asymmetrische Baggerungen von im Mittel etwa  $\Delta h \approx 0,5$  m, lokal bis annähernd  $\Delta h \approx 0,9$  m erforderlich (Bild 18).

Die derzeit von großen Containerschiffen gefahrene mittlere Schiffsgeschwindigkeit liegt in diesem Abschnitt zwischen  $12 \text{ kn} < v_{S,\text{ÜG}} < 13 \text{ kn}$  (nach [U4]). Die zukünftige Bemessungsgeschwindigkeit wurde um rund  $\Delta v_{S,\text{ÜG}} = -2 \text{ kn}$  auf  $v_S = 8 \text{ kn}$  bzw.  $11 \text{ kn}$  zurückgenommen.

Die heutigen Querschnittsverhältnisse für ein PPM-Containerschiff (z.B. PPM43) liegen bei tideabhängiger Fahrt in diesem Abschnitt etwa bei  $n \approx 35 - 41$  (MThw;  $n \approx 21 - 37$  bei MTnw) und zukünftig für das Bemessungsschiff im Mittel mit  $\Delta n \approx -3$  (MThw;  $\Delta n \approx -4$  bei MTnw) etwa 10 % geringer (Bild 13 und Bild 14).

Bei tideabhängiger oder tideunabhängiger Fahrt des Bemessungsschiffs bei geringer UKC mit der für die Tiefenbemessung vorgesehenen Schiffsgeschwindigkeit von  $v_S = 8 \text{ kn}$  bis  $11 \text{ kn}$  ist mit keinen messbaren ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen zu rechnen. Bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten ist davon auszugehen, dass infolge der reduzierten Querschnittsverhältnisse für das PPM46 im Vergleich mit den heutigen PPM-Containerschiffen die langperiodischen Wellenbelastungen sowie die schiffserzeugte Verdrängungsströmung in der Fahrrinne um etwa  $\Delta z_A < +0,05 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,05 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 12 \text{ kn}$ ) bzw.  $\Delta z_A < +0,1 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 14 \text{ kn}$ ) sowohl bei MThw als auch bei MTnw zunehmen werden (vergl. Bild 12).

Wird dem Vergleich der zukünftigen schiffserzeugten Belastung das PAN-MAX-Containerschiff PM32 zu Grunde gelegt, werden sich die Querschnittsverhältnisse deutlich um  $\Delta n \approx -15$  bei MThw und  $\Delta n \approx -8$  bei MTnw verringern (Bild 13 und Bild 14). Dies wird sich entsprechend auf die ausbaubedingten Änderungen mit deutlichen Zunahmen um etwa  $\Delta z_A < +0,2 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,2 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 12 \text{ kn}$ ) bzw.  $\Delta z_A < +0,4 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,4 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 14 \text{ kn}$ ) bei MThw und MTnw auswirken (vergl. Bild 11).

Zwischen km 76 und km 77 sind aufgrund der für die Lotsenwechselstrecke festgelegten Maximalgeschwindigkeit von  $v_S < 9 \text{ kn}$  direkt im Wechselbereich keine ausbaubedingten Änderungen zu erwarten. Keine messbaren Änderungen werden ebenso in den zu vertiefen-

den Bereichen auftreten, da hier die Größen- und Tiefgangszunahme des Bemessungsschiffs annähernd infolge der geometrischen Querschnittsaufweitung kompensiert wird.

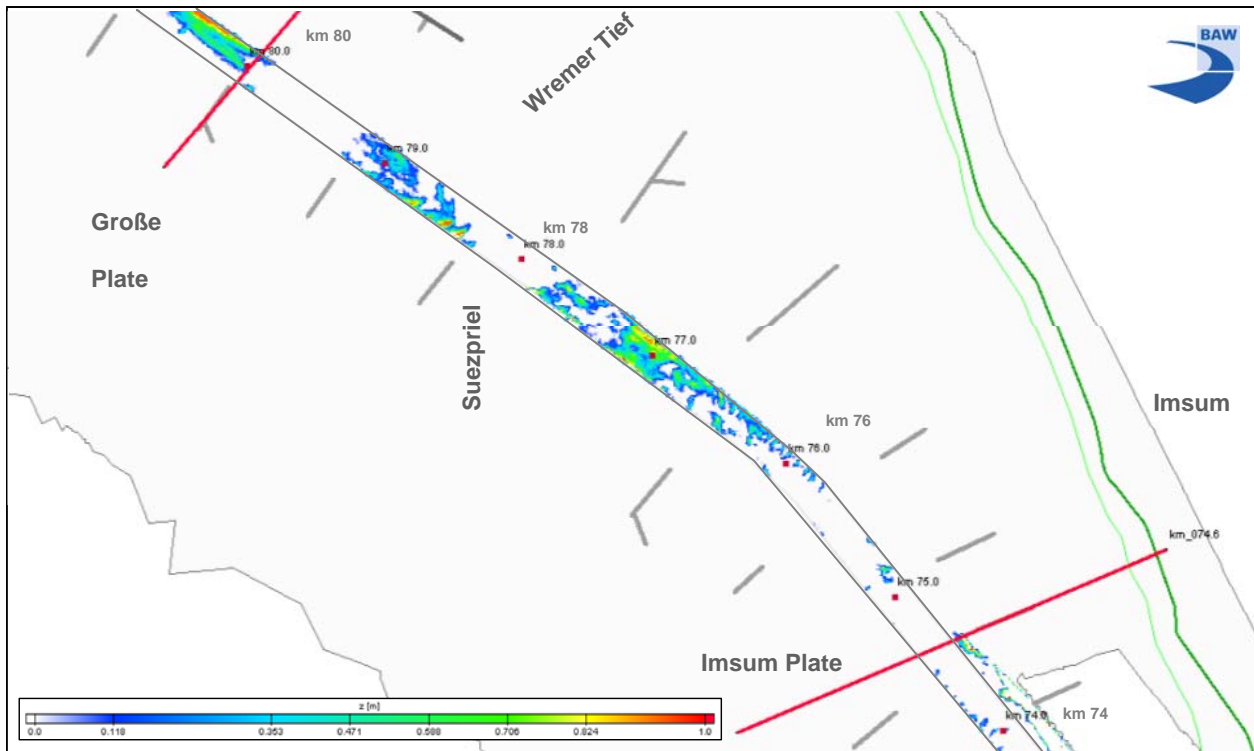


Bild 18: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Hafengebireich Bremerhaven und Wremer Tief (km 74 bis km 79) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse

## 8.2.4 Belastungsänderungen im Wremer Tief

Die ausbaubedingten schiffserzeugten Belastungsänderungen an der Mündung des Wremer Tiefs (Bild 18) entsprechen etwa den prognostizierten, geschwindigkeitsabhängigen Werten in der Fahrrinne bei km 79 (vergl. Kapitel 8.2.3):

- Vergleich PPM43 / PPM 46:
  - $\Delta z_A < +0,05$  m und  $\Delta v_R < +0,05$  m/s ( $v_S \approx 12$  kn)
  - $\Delta z_A < +0,1$  m und  $\Delta v_R < +0,1$  m/s ( $v_S \approx 14$  kn).
- Vergleich PM32 / PPM46:
  - $\Delta z_A < +0,2$  m und  $\Delta v_R < +0,2$  m/s ( $v_S \approx 12$  kn)
  - $\Delta z_A < +0,4$  m und  $\Delta v_R < +0,4$  m/s ( $v_S \approx 14$  kn).

Die langperiodischen ausbaubedingten Wellen werden sich in Abhängigkeit der Wasserstands- und Strömungsbedingungen im ca. 3 km langen Wremer Tief ausbreiten, so dass

- wie in Kapitel 6.3.8 beschrieben - infolge von u.a. Reflexion und Energiedissipation bis zum Wremer Siel eine Dämpfung der Eingangssignale erfolgen wird. Im Tief selbst kann - wie am Ruthenstrom (Untereibe) gemessen - insbesondere bei niedrigen Tidewasserständen aufgrund der absinkbedingten Sogströmung sowie der Sohlreibung eine sehr starke Umformung der schiffserzeugten Primärwelle erfolgen, so dass die langperiodische Welle bei hoher Energiedissipation und Fortschrittsgeschwindigkeit als Bore (brechende Schwallwelle) in das Wremer Tief einlaufen wird. Die ausbaubedingte Zunahme dieser Welle wird entlang des Tiefs entsprechend der Gesamtwelle gedämpft. Schiffsinduzierte Strömungsänderungen erfolgen nur aufgrund geänderter Wellenbedingungen.

Am Wremer Siel werden die Belastungszunahmen beim Vergleich der heute verkehrenden PPM43 mit dem Bemessungsschiff PPM46 unabhängig von der Passagegeschwindigkeit auf Werte unter  $\Delta z_A \approx H_P < +0,05$  m abgeklungen sein. Die Differenz der Wellenbelastung beim Vergleich von Fahrten des PM32 und des PPM 46 wird auf etwa  $\Delta z_A \approx H_P < +0,1$  m ( $v_S \approx 12$  kn) bzw.  $\Delta z_A \approx H_P < +0,2$  m ( $v_S \approx 14$  kn) abgeschätzt.

### **8.2.5 Wremer Tief bis Robbennordsteert (km 79 bis km 91)**

Zwischen den Leitbauwerken Robbensüdsteert und Robbennordsteert (ca. km 79 bis km 91) werden zur Gewährleistung der Sollsohle auf etwa NN-17,6 m sowohl im Bereich km 81 vornehmlich asymmetrische Eingriffe auf der Nordseite bis zu rund  $\Delta h \approx 0,8$  m als auch flächenhafte Vertiefungsmaßnahmen zwischen km 87 und rund km 89,5 bis zu annähernd  $\Delta h \approx 1,0$  m notwendig (Bild 19).

Die derzeit von großen Containerschiffen mit Tiefgängen über  $t \geq 10$  m gefahrene mittlere Schiffsgeschwindigkeit liegt in diesem Abschnitt zwischen  $13 \text{ kn} < v_{S,\ddot{u}G} < 14 \text{ kn}$  (nach [U4]). Die Bemessungsgeschwindigkeit für die neue Fahrrinntiefe wurde zwischen km 80 und km 90 von heute  $v_{S,\ddot{u}G} = 13,5$  kn abgestuft um  $\Delta v_{S,\ddot{u}G} = -2,5$  kn bzw. 0,5 kn bis auf  $v_{S,\ddot{u}G} = 11$  kn bzw. 13 kn zurückgenommen.

Die heutigen Querschnittsverhältnisse zwischen den Leitdämmen liegen z.B. für das Containerschiff PPM43 bei tideabhängiger Fahrt in diesem wie im vorherigen Abschnitt etwa bei  $n \approx 35 - 41$  (MThw;  $n \approx 21 - 37$  bei MTnw) und zukünftig für das Bemessungsschiff im Mittel mit  $\Delta n \approx -3$  (MThw;  $\Delta n \approx -4$  bei MTnw ) etwa 10 % geringer (Bild 13 und Bild 14). Die Teilquerschnittsverhältnisse  $n_T$  zeigen, dass für außermittig verkehrende Aufkommer etwa bei Langlütjennordsteert (ca. km 87; Bild 16) und für außermittig fahrende Abgänger auf Höhe Robbennordsteert (ca. km 90; Bild 15) auch zukünftig mit hohen schiffserzeugten Belastungen zu rechnen ist.

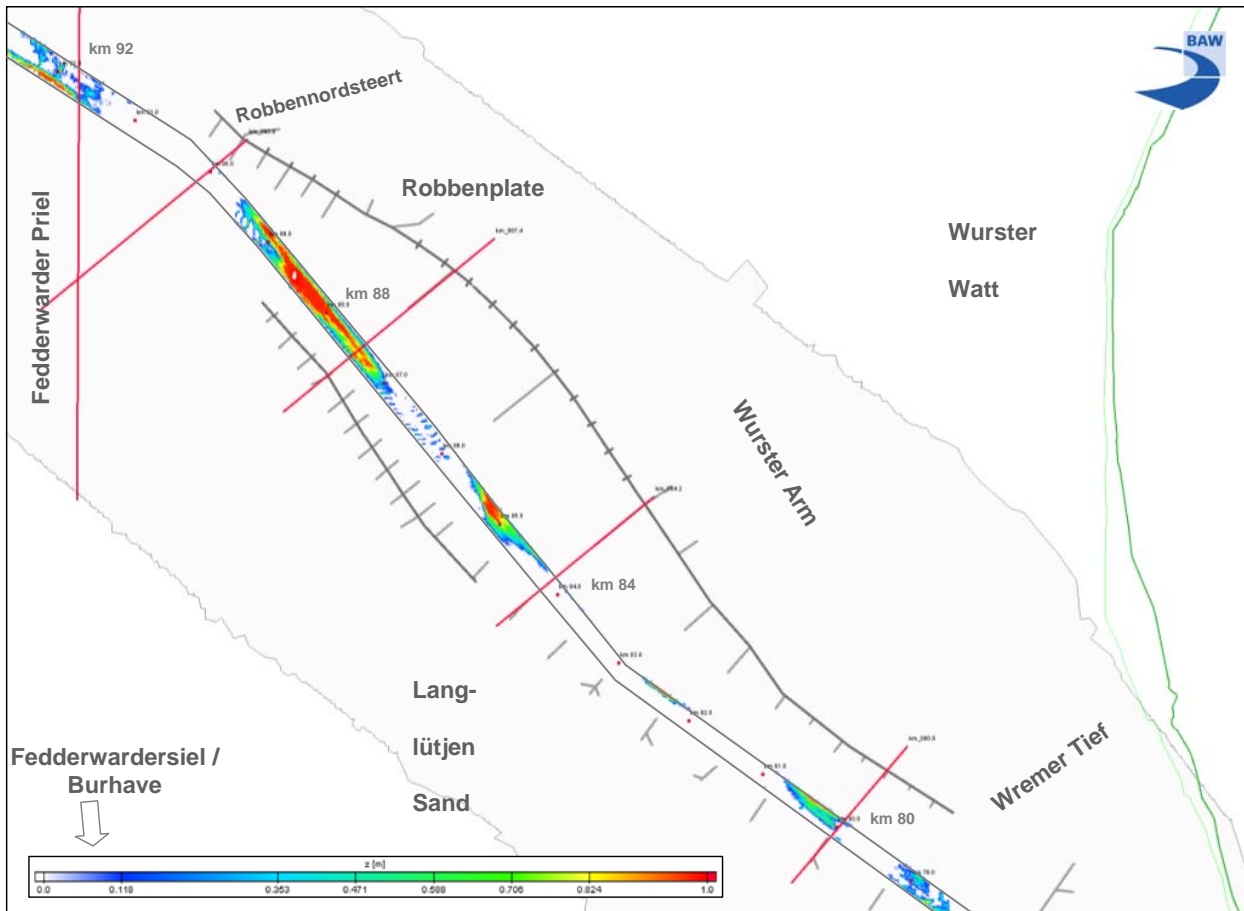


Bild 19: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Wremer Tief und Robbenordsteert (km 74 bis km 91) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse

Bei Schiffsgeschwindigkeiten über der jeweiligen Bemessungsgeschwindigkeit ist auch zwischen den Leitdämmen davon auszugehen, dass infolge der reduzierten Querschnittsverhältnisse für das PPM46 im Vergleich mit den heutigen PPM-Containerschiffen die langperiodischen Wellenbelastungen sowie die schiffserzeugte Verdrängungsströmung in der Fahrinne um etwa  $\Delta z_A < +0,05$  m und  $\Delta v_R < +0,05$  m/s ( $v_S \approx 12$  kn) bzw.  $\Delta z_A < +0,1$  m und  $\Delta v_R < +0,1$  m/s ( $v_S \approx 14$  kn) sowohl bei MThw als auch bei MTnw zunehmen werden (vergl. Bild 12). Kaum messbare Änderungen werden in den wirksam zu vertiefenden Bereichen zwischen km 88 bis km 89 auftreten, da hier die Größen- und Tiefgangszunahme des Bemessungsschiffs gegenüber den heute verkehrenden PPM-Schiffen infolge der geometrischen Querschnittsaufweitung annähernd kompensiert wird.

Beim Vergleich des Bemessungsschiffs mit dem PANMAX-Containerschiff PM32 verringern sich die Querschnittsverhältnisse deutlich um  $\Delta n \approx -15$  bei MThw und  $\Delta n \approx -8$  bei MTnw (Bild 13 und Bild 14). Dies wird sich entsprechend auf die ausbaubedingten Änderungen mit deutlichen Zunahmen um etwa  $\Delta z_A < +0,2$  m und  $\Delta v_R < +0,2$  m/s ( $v_S \approx 12$  kn) bzw.  $\Delta z_A < +0,4$  m und  $\Delta v_R < +0,4$  m/s ( $v_S \approx 14$  kn) bei MThw und MTnw auswirken (vergl. Bild 11). Bei dieser

Gegenüberstellung sind auch in den Vertiefungsabschnitten - wenn auch geringere - Belastungszunahmen zu erwarten.

## 8.2.6 Belastungsänderungen bei Fedderwardersiel / Burhave

Die ausbaubedingten schiffserzeugten Belastungsänderungen an der Mündung des Fedderwarder Priels (Bild 19) entsprechen etwa den prognostizierten, geschwindigkeitsabhängigen Werten in der Fahrrinne bei km 90 (vergl. Kapitel 8.2.5):

- Vergleich PPM43 / PPM 46:
  - $\Delta z_A < +0,05$  m und  $\Delta v_R < +0,05$  m/s ( $v_S \approx 12$  kn)
  - $\Delta z_A < +0,1$  m und  $\Delta v_R < +0,1$  m/s ( $v_S \approx 14$  kn).
- Vergleich PM32 / PPM46:
  - $\Delta z_A < +0,2$  m und  $\Delta v_R < +0,2$  m/s ( $v_S \approx 12$  kn)
  - $\Delta z_A < +0,4$  m und  $\Delta v_R < +0,4$  m/s ( $v_S \approx 14$  kn).

Die langperiodischen ausbaubedingten Wellen werden sich in Abhängigkeit der Wasserstands- und Strömungsbedingungen im ca. 10 km langen Fedderwarder Priel ausbreiten, so dass - wie in Kapitel 6.3.8 beschrieben - infolge von u.a. Reflexion und Energiedissipation bis zum Fedderwardersiel und Burhave eine Dämpfung der Eingangssignale mit einem Faktor von etwa 0,2 erfolgen wird. Im Mündungsbereich des Fedderwarder Priels kann insbesondere bei niedrigen Tidewasserständen aufgrund der absinkbedingten Sogströmung sowie der Sohlreibung eine sehr starke Umformung und Aufsteilung der schiffserzeugten Primärwelle erfolgen. Die ausbaubedingte Zunahme dieser Welle wird entlang des Priels entsprechend der Gesamtwelle gedämpft. Schiffsinduzierte Strömungsänderungen erfolgen nur aufgrund geänderter Wellenbedingungen.

Bei Fedderwardersiel / Burhave (Bild 19) werden die Belastungszunahmen beim Vergleich der heute verkehrenden PPM43 mit dem Bemessungsschiff PPM46 unabhängig von der Passagegeschwindigkeit auf Werte deutlich unter  $\Delta z_A \approx H_P < +0,05$  m abgeklungen sein. Die Differenz der Wellenbelastung beim Vergleich von Fahrten des PM32 und des PPM 46 wird bei  $v_S \approx 12$  kn auf ebenfalls unter  $\Delta z_A \approx H_P < +0,1$  m bzw. bei  $v_S \approx 14$  kn auf Werte von deutlich unter  $\Delta z_A \approx H_P < +0,1$  m abgeschätzt.

An den Vorlandkanten und wasserstandsabhängig auf den Vorlandflächen bei Langwarden, nordwestlich von Fedderwardersiel, werden aufgrund weiterer Energiedissipation auf den vorgelagerten Flächen keine ausbaubedingten Änderungen der Belastungen messbar sein.



## 8.2.7 Robbennordsteert bis Dwarsgat (km 91 bis km 98)

In der Fahrrinne zwischen Robbennordstert und etwa Dwarsgat sind auf Höhe Kaiserbalje asymmetrische Vertiefungen an der südlichen Fahrinnenkante auf etwa einem Kilometer bis etwa  $\Delta h \approx 1,0$  m, und im Wesentlichen ab km 93 bis annähernd km 97 großflächige Baggerungen bis zu  $\Delta h \approx 1,0$  m notwendig, um die Fahrinnensohle auf NN-17,65 m herzustellen. Dabei werden seewärts km 95 - beginnend am südlichen Fahrinnenrand und ab km 96,5 auf voller Fahrinnenbreite - die über die Sollsohle hinausragenden Transportkörperkuppen bis um rund  $\Delta h \approx 0,5$  m abgeflacht (Bild 20).

Nach [U4] liegen die derzeit von großen Containerschiffen mit Tiefgängen über  $t \geq 10$  m gefahrenen mittleren Schiffsgeschwindigkeiten in diesem Abschnitt zwischen  $14 \text{ kn} < v_{S,\ddot{u}G} < 15 \text{ kn}$ . Für die Bemessung der neuen Fahrinnentiefe wurde hier die Schiffsgeschwindigkeit von  $v_{S,\ddot{u}G} = 15 \text{ Kn}$  um  $\Delta v_{S,\ddot{u}G} = -1,5 \text{ kn}$  bis auf  $v_{S,\ddot{u}G} = 13,5 \text{ kn}$  heruntersetzt.

Seewärts der Leitdämme nehmen die Querschnittsverhältnisse für heutige PPM-Containerschiffe um das 2-fache auf Werte von  $n \approx 84$  bei MThw bzw. von etwa  $n \approx 62$  bei MTnw zu. Bei Fahrten des Bemessungsschiffs verringert sich in diesem Abschnitt das n-Verhältnis im Mittel mit  $\Delta n \approx -5$  (MThw;  $\Delta n \approx -9$  bei MTnw ) um etwa 6 % bzw. 15 % (Bild 13 und Bild 14).

Bei Schiffsgeschwindigkeiten des PPM46 zwischen  $12 \text{ kn} < v_S < 14 \text{ kn}$  im Vergleich mit den heutigen PPM-Containerschiffen werden infolge der reduzierten Querschnittsverhältnisse die langperiodischen Wellenbelastungen sowie die schiffserzeugte Verdrängungsströmung in der Fahrrinne um etwa  $\Delta z_A < +0,05 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,05 \text{ m/s}$  (MThw) bzw.  $\Delta z_A < +0,1 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$  (MTnw) zunehmen. Auf Höhe km 92 werden infolge der asymmetrischen Baggermaßnahmen die o.a. ausbaubedingte Änderungen eher die östliche Fahrinnenseite belasten, so dass im Bereich der Kaiserbalje höhere Belastungen kaum messbar sein werden. Geringere Änderungen werden in dem zu vertiefenden Fahrinnenabschnitt zwischen km 94 bis km 96 auftreten, da hier die Auswirkungen der Größen- und Tiefgangszunahme des Bemessungsschiffs gegenüber den heute verkehrenden PPM-Schiffen durch die geometrischen Querschnittsaufweitung des Fahrwassers zumindest teilweise aufgehoben wird.

Bei dem Vergleich des Bemessungsschiffs mit dem PANMAX-Containerschiff PM32 vermindern sich die Querschnittsverhältnisse deutlich um  $\Delta n \approx -36$  (ca. 30 %) bei MThw und um etwa  $\Delta n \approx -27$  (ca. 34 %) bei MTnw (Bild 13 und Bild 14). Dies wird sich bei den dennoch verbleibenden hohen n-Werte von  $n \approx 79$  bei MThw bzw.  $n \approx 53$  bei MTnw auf die ausbaubedingten Änderungen mit Zunahmen der schiffserzeugten Belastung um etwa  $\Delta z_A < +0,1 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 12 \text{ kn}$ ) bzw.  $\Delta z_A < +0,2 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,2 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 14 \text{ kn}$ ) bei MThw und MTnw auswirken (vergl. Bild 11). Bei dieser Gegenüberstellung sind auch in den Vertiefungsabschnitten - wenn auch geringere - Belastungszunahmen zu erwarten.

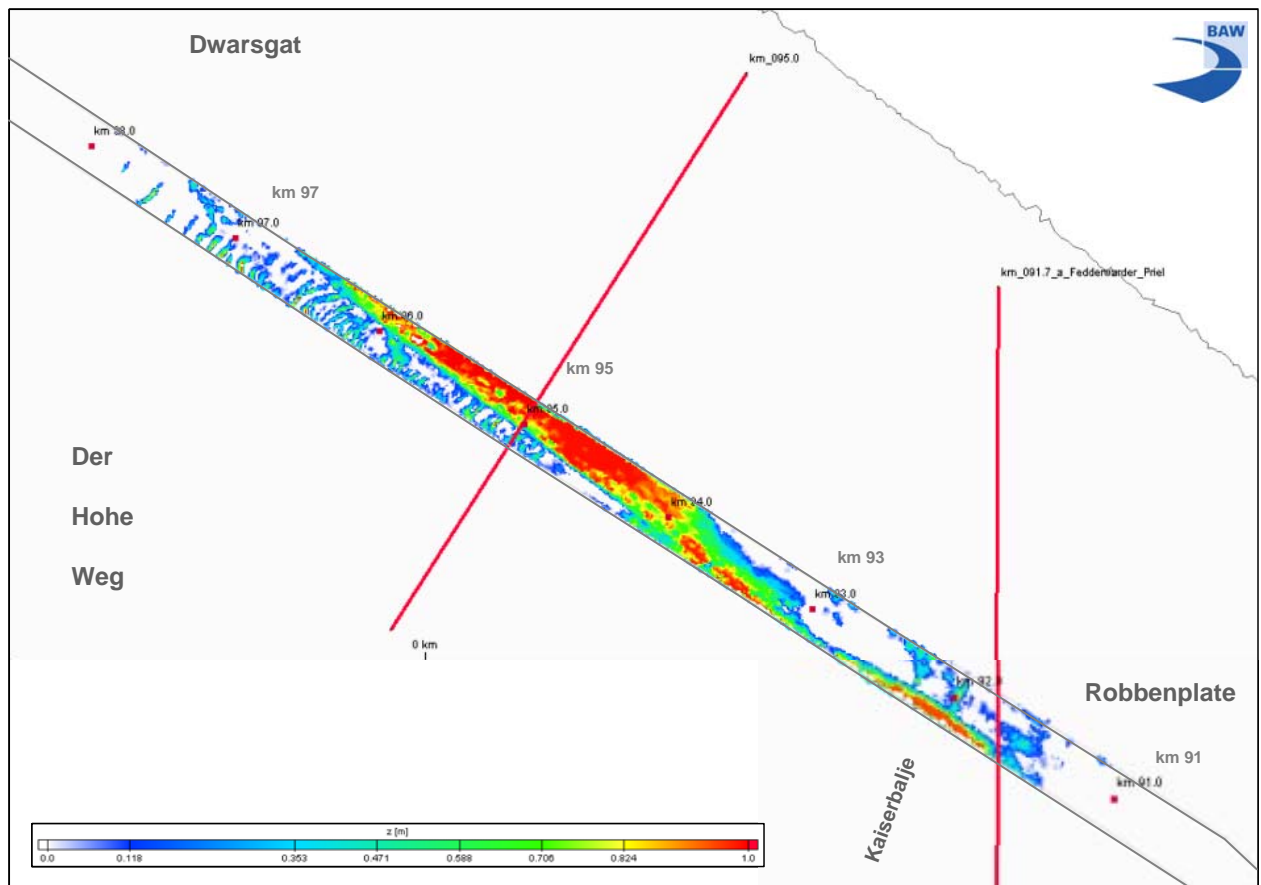


Bild 20: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Robbenordsteert und Dwarsgat (km 91 bis km 98) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse

### 8.2.8 Belastungsänderungen an der Wurster Küste

Die Erholungsschwerpunkte an der Wurster Küste (Bild 19) wie u.a. die Vorländer in dem Abschnitt zwischen Dorum-Neufeld und Arensch sind aufgrund des großen Abstands zur Fahrrinne der Außenweser durch ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen nicht betroffen, da sowohl die schiffserzeugten Belastungen als auch die abgeschätzten Belastungszunahmen in der Fahrrinne infolge von u.a. Reflexion und Energiedissipation voll abgeklungen sind.

### 8.2.9 Dwarsgat bis Oldoogplate (km 98 bis km 110)

Zwischen km 98 und km 101 sind aufgrund der ausreichenden Tiefenlage der Sohle keine Vertiefungsmaßnahmen erforderlich (Bild 21). Da ab km 99 die Fahrinnenbreite von derzeit  $B_S = 300$  m auf  $B_S = 380$  m vergrößert wird und die Tiefe aufgrund einer Westverschwenkung der Fahrrinne zwischen km 99 und km 110 um bis zu etwa 240 m für die vorgesehene



Sollsohle annähernd ausreicht, sind zwischen Dwarsgat (km 101) und Oldoogplate (ca. km 107) zum Teil nur an den Fahrrinnenrändern streifenförmige, teils lediglich in Fahrrinnenmitte punktuelle Baggermaßnahmen bis zu Mächtigkeiten von  $\Delta h \approx 0,5$  m erforderlich. Ab km 107 werden zur Herstellung der zukünftigen Tiefenlage der Fahrrinnensohle flächige Vertiefungen bis zu etwa  $\Delta h \approx 0,5$  m erforderlich, die bis annähernd km 109 am nordostwärtigen Fahrrinnenrand auslaufen. Seewärts bei etwa km 110 sind nur lokal Kuppenabbaggerungen ebenfalls bis etwa  $\Delta h \approx 0,5$  m notwendig (Bild 21).

Nach den Untersuchungen des WSA Bremerhaven [U4] liegen die derzeit von großen Containerschiffen ( $l \geq 200$ m) mit Tiefgängen über  $t \geq 10$  m gefahrenen mittleren Schiffsgeschwindigkeiten zwischen Dwarsgat und Oldoogplate zwischen  $15 \text{ kn} < v_{S,\ddot{u}G} < 16 \text{ kn}$ . Für die Bemessung der neuen Fahrrinntiefe wurden von der Projektgruppe im Übergang der Verkehrszonen (bei km 99) Schiffsgeschwindigkeiten von  $v_{S,\ddot{u}G} = 13,5 \text{ Kn}$  und ab Oldoogplate (ca. km 107) von  $v_{S,\ddot{u}G} = 14 \text{ Kn}$  festgelegt, was einer Reduzierung der Bemessungsgeschwindigkeiten von  $\Delta v_{S,\ddot{u}G} = -2,5 \text{ kn}$  bzw.  $\Delta v_{S,\ddot{u}G} = -1 \text{ kn}$  entspricht.

Die minimalen Querschnittsverhältnisse liegen für schon heute verkehrende Containerschiffe (z.B. PPM43) bei tideabhängiger Fahrt in diesem Abschnitt etwa bei  $n \approx 76 - 88$  (MThw) und bei tideunabhängiger Fahrt bei etwa  $n \approx 64 - 75$  (MTnw). Für das Bemessungsschiff (PPM46) werden die  $n$ -Verhältnisse - trotz der Fahrrinnenverbreiterung, aber wegen der dafür nur geringen geometrischen Eingriffe - zukünftig im Mittel mit  $n \approx 71 - 82$  (MThw) um  $\Delta n \approx -6$  bzw. mit  $n \approx 55 - 65$  (MTnw) um  $\Delta n \approx -10$  etwa 8 % bzw. 14 % geringer ausfallen (Bild 13 und Bild 14).

Bei Passagen zukünftiger Containerschiffe mit der festgelegten Bemessungsgeschwindigkeit ist davon auszugehen, dass infolge der reduzierten, aber weiterhin hohen Querschnittsverhältnisse für das PPM46 im Vergleich mit den heutigen PPM-Containerschiffen die langperiodischen Wellenbelastungen sowie die schiffserzeugte Verdrängungsströmung in der Fahrrinne lediglich um etwa  $\Delta z_A < +0,05 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,05 \text{ m/s}$  (MThw;  $v_S \approx 14 \text{ kn}$ ) bzw.  $\Delta z_A < +0,1 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$  (MTnw;  $v_S \approx 14 \text{ kn}$ ) zunehmen werden (vergl. Bild 12). Die hydraulische Wirkung der Größen- und Tiefgangszunahme des Bemessungsschiffs gegenüber den heute verkehrenden PPM-Schiffen wird durch die geringen geometrischen Querschnittsaufweitungen nur örtlich begrenzt (z.B. ca. km 108) am nordöstlichen Fahrrinnenrand ausgeglichen.

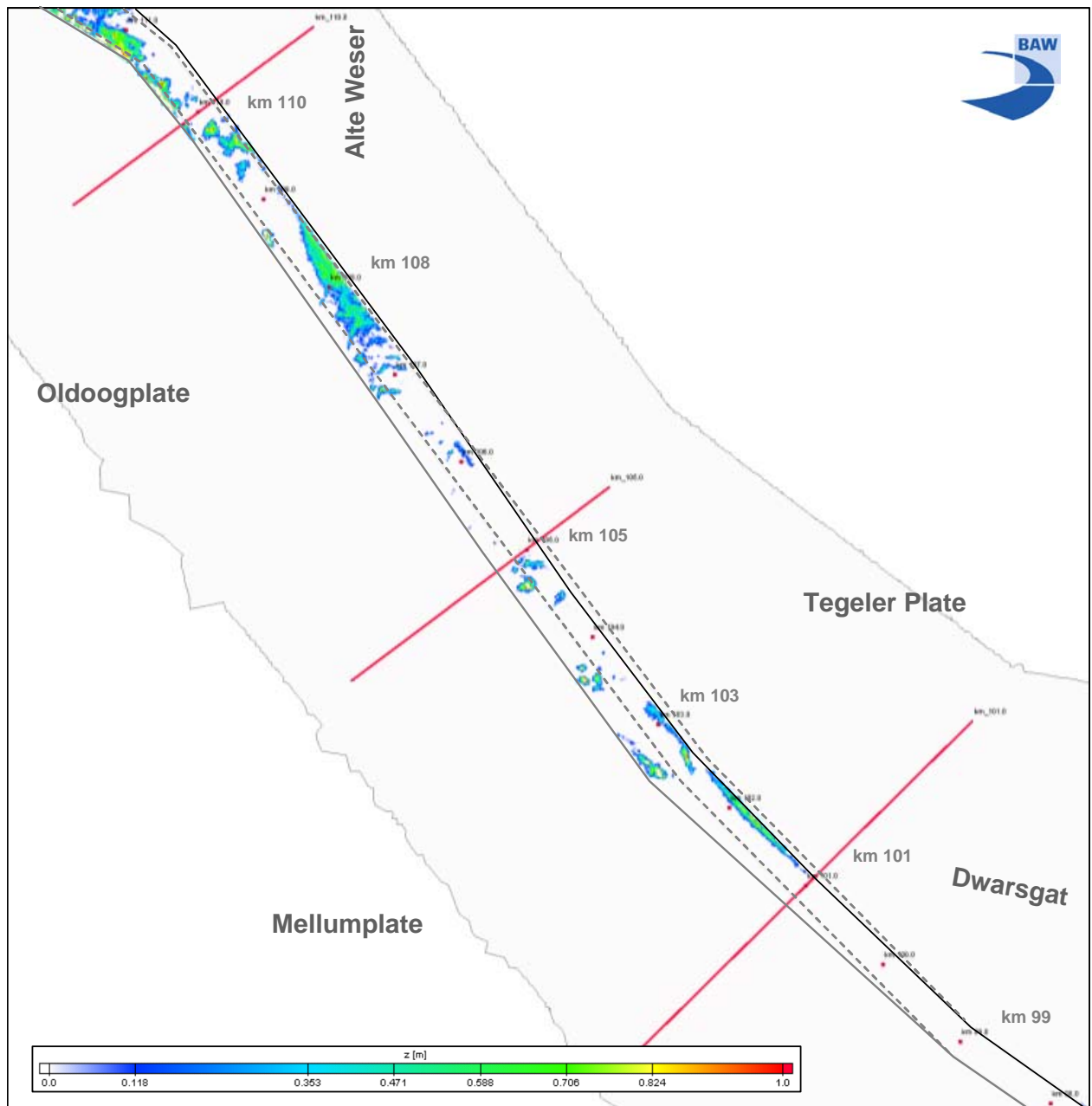


Bild 21: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Dwarsgat und Oldoogplate (km 98 bis km 110) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse

Beim Vergleich des Bemessungsschiffs mit dem PANMAX-Containerschiff PM32 verringern sich die Querschnittsverhältnisse deutlich um  $\Delta n \approx -30$  bei MThw und  $\Delta n \approx -24$  bei MTnw (Bild 13 und Bild 14). Dies wird sich bei Passagen mit der Bemessungsgeschwindigkeit von  $v_S \approx 14$  kn entsprechend auf die ausbaubedingten Änderungen mit deutlichen Zunahmen um etwa  $\Delta z_A < +0,2$  m und  $\Delta v_R < +0,2$  m/s bei MThw und MTnw auswirken (vergl. Bild 11). Bei dieser Gegenüberstellung sind auch in den nur örtlich vorgesehenen Baggerabschnitten - wenn auch nur geringere - Belastungszunahmen zu erwarten.

## 8.2.10 Oldoogplate bis See (ab km 110)

Seewwärts km 110 sind hauptsächlich Kuppenabflachungen von Transportkörpern bis zu etwa  $\Delta h \approx 0,5$  m vorgesehen, um die Sollsohle von ca. NN -17,6 m (abnehmend auf rund NN -17,3 m) zu garantieren. Nur in der Innenkrümmung bei km 111 sowie im Bereich bei km 111 bis etwas über km 112 werden in Fahrrinnenmitte großflächige Vertiefungsmaßnahmen von im Mittel  $\Delta h \approx 0,5$  m mit lokalen Eingriffen bis  $\Delta h \approx 0,8$  m erforderlich (Bild 22).

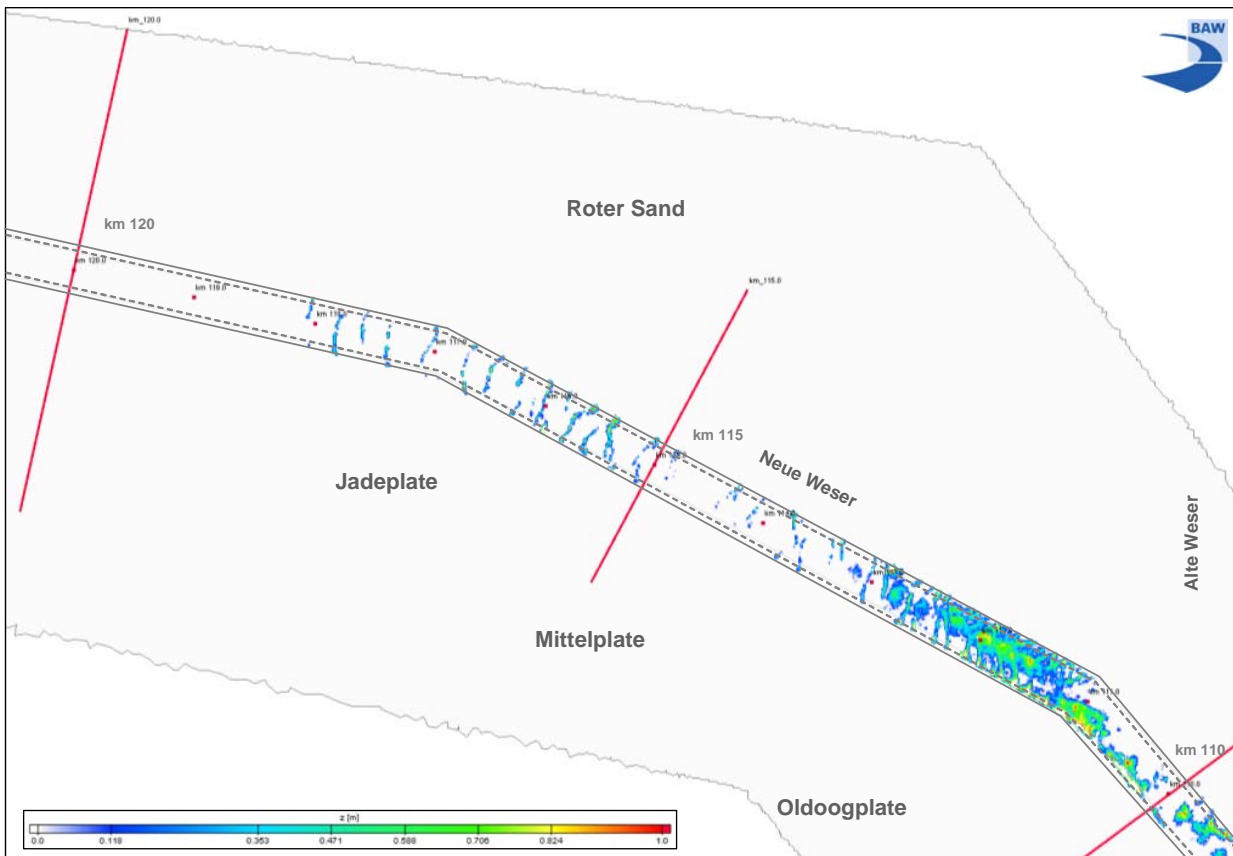


Bild 22: Vertiefungsmaß für die Betrachtung schiffserzeugter Belastungen zwischen Oldoogplate und See (ab km 110) mit Querprofilinien zur Ermittlung der n-Verhältnisse

Nach [U4] liegen die derzeit von großen Containerschiffen gefahrenen mittleren Schiffsgeschwindigkeiten in der Neuen Weser über  $v_{S,\ddot{U}G} > 16$  kn. Für die Bemessung der neuen Fahrrinntiefe wurde von der Projektgruppe eine Schiffsgeschwindigkeit von  $v_{S,\ddot{U}G} = 14$  Kn festgelegt ( $\Delta v_{S,\ddot{U}G} = -1$  kn).

Die minimalen Querschnittsverhältnisse liegen für schon heute verkehrende Containerschiffe (z.B. PPM43) bei tideabhängiger und bei tideunabhängiger Fahrt deutlich über  $n > 80$  und seewwärts zunehmend über  $n > 100$ . Für das Bemessungsschiff (PPM46) werden die

n-Verhältnisse wegen der nur geringen geometrischen Eingriffe um etwa  $\Delta n \approx -7$  (MThw) bzw. um  $\Delta n \approx -14$  (MTnw) geringer ausfallen, aber weiterhin deutlich über  $n > 80$  liegen (Bild 13 und Bild 14).

Wegen der reduzierten, aber weiterhin hohen Querschnittsverhältnisse für das PPM46 im Vergleich mit den heutigen PPM-Containerschiffen werden die langperiodischen Wellenbelastungen sowie die schiffserzeugte Verdrängungsströmung in der Fahrrinne bei MThw sowie MTnw kaum messbar um Werte unter etwa  $\Delta z_A < +0,05$  m und  $\Delta v_R < +0,05$  m/s ( $v_S \approx 14$  kn) zunehmen (vergl. Bild 12). Die Größen- und Tiefgangszunahme des Bemessungsschiffs gegenüber den heute verkehrenden PPM-Schiffen wird infolge der geringen geometrischen Querschnittsaufweitungen kaum kompensiert.

Beim Vergleich des Bemessungsschiffs mit dem PANMAX-Containerschiff PM32 verringern sich die Querschnittsverhältnisse deutlicher um etwa  $\Delta n \approx -43$  bei MThw und  $\Delta n \approx -37$  bei MTnw (Bild 13 und Bild 14). Dies wird sich bei Passagen mit der Bemessungsgeschwindigkeit von  $v_S \approx 14$  kn entsprechend auf die ausbaubedingten Änderungen mit Zunahmen um etwa  $\Delta z_A < +0,1$  m und  $\Delta v_R < +0,1$  m/s bei MThw und MTnw auswirken (vergl. Bild 11). Bei dieser Gegenüberstellung sind auch in den örtlich vorgesehenen Baggerabschnitten z.B. seewärts km 111 Belastungszunahmen in gleicher Größenordnung zu erwarten, da die bedeutende Schiffsgrößenzunahme nicht durch die lokalen Querschnittsaufweitungen ausgeglichen wird.

### **8.3 Belastungsänderungen für Leitwerke, Deckwerke und Deiche**

#### Belastungsbereich I (Hafenbereich Bremerhaven km 65 bis km 74)

Für Deckwerke und scharliegende Deichfüße im Bereich I (z.B. Promenade Bremerhaven stromauf km 68) ist mit keiner höheren ausbaubedingten Belastung durch langperiodische Ereignisse wie Absink  $z_A$ , Primärwelle  $H_P$  und Rückstromgeschwindigkeit  $v_R$  zu rechnen, da das Bemessungsschiff erst ab km 68 verkehrt.

#### Belastungsbereich II (Imsum km 74 bis etwa Robbennordsteert km 90)

Für den Bereich II von Imsum bis Robbennordsteert ist für Schiffsgeschwindigkeiten deutlich über der Bemessungsgeschwindigkeit von  $11 \text{ kn} < v_S < 13 \text{ kn}$  für die Deckwerksstabilität neben dem langperiodischen Belastungsanteil auch die Belastung durch kurzperiodische Wellen wirksam. Mit lokal erhöhten ausbaubedingten Änderungen im Bereich der Leitwerke wird aufgrund der zukünftigen Schiffsgrößen auch bei Einhaltung der festgelegten Bemessungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Passierabstands zu rechnen sein (vergl. Kapitel 8.2.3 und Kapitel 8.2.5).



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

#### Belastungsbereich III (Robbennordsteert ab km 90 bis zur See)

Aufgrund des großen Abstands der Fahrrinne zur Küstenlinie und der Energiedissipation auf den vorgelagerten Wattflächen und Sänden werden aufgrund von Schiffspassagen im Bereich III weder schiffserzeugte Belastungen noch ausbaubedingte Änderungen an den Deckwerken und Deichen der Wurster Küste auftreten.

### **8.4 Belastungsänderungen von Wattgebieten und natürlichen Ufern**

#### Belastungsbereich I (Hafenbereich Bremerhaven km 65 bis km 74)

Im Bereich der Stromkajen Bremerhaven ist mit keiner höheren ausbaubedingten Belastung der westlich gelegenen Wattflächen und Sände durch langperiodische Ereignisse wie Absunk  $z_A$ , Primärwelle  $H_P$  und Rückstromgeschwindigkeit  $v_R$  zu rechnen, da aufgrund des Hafenbetriebs auch von der durchgehenden Schifffahrt (Lotsenwechsel) nur mit reduzierten Reviergeschwindigkeiten von unter  $v_S < 9$  kn gefahren wird (vergl. Kapitel 8.2.1).

Bei deutlich höheren Fahrgeschwindigkeiten von z.B. Feederschiffen sind - wie schon heute - unabhängig vom Ausbau überproportional höhere Belastungen der Sände und Watten der Franzius- und Imsumplate zu erwarten. In Abschnitten des Bereichs I, in denen schon heute Erosion auftritt, wird deshalb auch zukünftig - unabhängig vom Ausbau - mit Ufererosion zu rechnen sein.

#### Belastungsbereich II (Hafen Bremerhaven km 74 bis etwa Robbennordsteert km 90)

Zwischen etwa Hafen Bremerhaven bis etwa Robbennordsteert sind bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten deutlich über der örtlichen Bemessungsgeschwindigkeit von  $11 \text{ kn} < v_{S,ÜG} < 13 \text{ kn}$  ausbaubedingte Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen, wie in Kapitel 8.2.3 und Kapitel 8.2.5 zusammengestellt, zu erwarten. Dementsprechend werden die Belastungen der Sände und Watten im Vergleich zu schon heute verkehrenden PPM-Containerschiffen geschwindigkeitsabhängig unter  $\Delta z_A < +0,05 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,05 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 12 \text{ kn}$ ) bzw.  $\Delta z_A < +0,1 \text{ m}$  und  $\Delta v_R < +0,1 \text{ m/s}$  ( $v_S \approx 14 \text{ kn}$ ) sowohl bei MThw als auch bei MTnw zunehmen. In exponiert zur Fahrrinne liegenden – auch schon heute zur Erosion neigenden - ungeschützten Bereichen werden damit weiterhin Wattkantenabbrüche sowie Ufererosion verbunden sein.



### Belastungsbereich III (Robbennordsteert ab km 90 bis zur See )

Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastung werden für die Watten, Platen und Sände seewärts von Robbennordsteert aufgrund der großen Querschnittsverhältnisse in einer kaum messbaren Größe eintreten, d.h. die Wasserspiegeländerungen und Strömungszunahmen bleiben zum Teil deutlich unter  $\Delta z_A < +0,1$  m und  $\Delta v_R < +0,1$  m/s.

In einzelnen exponiert liegenden Abschnitten - wie z.B. trotz Fahrrinnenverschwenkung an den Nordwestausläufern der Tegeler Plate - werden leicht erhöhte lang- und kurzperiodische Wellen auftreten, wobei die Größenordnung wesentlich durch die Schiffsgeschwindigkeit und den Passierabstand bestimmt wird. Bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten der großen tiefgehenden Containerschiffe deutlich über der Bemessungsgeschwindigkeit von  $v_{S,\ddot{u}G} = 14$  kn sind dort auch bei MThw Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen - damit verbunden Kantenabbrüche und Erosion der Platen und Sände - zu erwarten. Dies trifft auch für den teilabgeladenen, tideunabhängigen Verkehr bei Tideniedrigwasser zu.

## **8.5 Belastungsänderungen von baulichen Anlagen**

Ausbaubedingte Belastungszunahmen im Bereich der Bremerhavener Stromkajen werden aufgrund der im Hafenbetrieb gefahrenen Schiffsgeschwindigkeiten nicht auftreten. Da unmittelbar seewärts der Containerkaje CT 4 an der zukünftigen Mündung des Weddewardener Tiefs / Grauwallkanals in die Weser erst die Beschleunigungsphase der Bemessungsschiffe beginnt, werden auch keine ausbaubedingten Änderungen für die neue Sielanlage Weddewardener / Grauwallkanal durch langperiodische Absunk- oder Primärwellen erwartet. Hinsichtlich der Belastungsänderungen für Bühnen und Leitwerke im Belastungsbereich II wird auf das Unterkapitel 8.3 verwiesen.

## **8.6 Belastungsänderungen der Sport- und Kleinschifffahrt**

Die Außenweser wird u.a. auch von der Sport- und Kleinschifffahrt genutzt. Neben Freizeitsportaktivitäten (Motorbootfahren und Segeln mit Dickschiffen) wird Stellnetzfischerei mit kleinen offenen Booten, Hamenfang mit verankerten Hamenkuttern sowie Kutterfischerei mit Baumkurren (u.a. Garnelenfischerei) betrieben.

Die langperiodischen Wellen (Absunk und Primärwellen) und zugehörige Rückstromgeschwindigkeiten wirken sich in der Außenweser in erster Linie auf vor Anker liegende Fahrzeuge aus. Die auf der Außenweser in Fahrt befindliche Kleinschifffahrt wird durch die Zunahme der langperiodischen Wellen und der 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 eine Gefährdung für kleine offene, wenig seegangstaugliche Boote erfolgen. Derart hohe Sekundärwellen bei Schiffen mit großem Tiefgang entstehen nur bei sehr hohen Schiffsgeschwindigkeiten ( $v_S$  deutlich über 12 kn durch Wasser). Da die Sekundärwellen als Folge der langperiodischen Druckunterschiede "am Schiffsrumpf" entstehen, sind sie sowohl von der zukünftigen Form und damit von der hydrodynamischen Optimierung des Schiffskörpers als auch von den ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen Druckverhältnisse am Schiff abhängig. Die ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen Wellen werden infolge der prognostizierten ausbaubedingten langperiodischen Belastungsänderungen ( $\Delta z_A < +0,1$  m) nur gering ausfallen.

Für die Sport- und Kleinschiffahrt werden - bei Einhaltung der vorgesehenen neuen, bereichsabhängigen Bemessungsgeschwindigkeiten durch die zukünftige Containerschiffahrt - die prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastung in allen drei Bereichen der Seeschiffahrtstraße nicht wahrnehmbar sein.

## **8.7 Belastungsänderungen für marinearchäologische Kulturgüter**

Soweit archäologische Denkmäler wie z.B. historische Wracks in den Bereichen I bis III im Fahrwasser vorkommen, werden in erster Linie die geschwindigkeitsabhängigen Änderungen der langperiodischen Anteile der schiffserzeugten Belastungen (Absunk, Primärwellen und Rückstromgeschwindigkeit) wirksam werden. Die ausbaubedingten Änderungen und somit die Auswirkungen auf marinearchäologische Kulturgüter wie z.B. die mittelalterlichen Siedlungsbefunde bei Imsum werden bei Einhaltung der neuen, bereichsweise festgelegten Bemessungsgeschwindigkeiten nur gering sein.

## **8.8 Belastungsänderungen von Fahrrinne und Unterwasserböschungen**

Die Belastungsänderungen in der Fahrrinne betreffen im Bereich I und Bereich II noch teilweise die Unterwasserböschungen, ab etwa km 99 bei einer Fahrrinnenbreite von  $B_S = 380$  m sind bei mittiger Fahrt die ausbaubedingten Änderungen direkt von dem zwischen Schiffsboden und Sohle zur Verfügung stehenden Querschnitt abhängig. Bei außermittiger Fahrt und Begegnungsverkehr großer Schiffseinheiten in der Außenweser sind auch über km 100 hinaus die Unterwasserböschungen durch die ausbaubedingten Änderungen betroffen.

In der gesamten Außenweser werden bei voll abgeladenen PPM-Schiffseinheiten und Einhaltung der neuen Bemessungsgeschwindigkeit die Strömungsbelastungen an der Sohle in annähernd allen zu vertiefenden Abschnitten nur geringfügig, teils deutlich unter  $\Delta v_R < +0,1$  m/s zunehmen. In Bereichen, in denen nicht vertieft werden muss, wird örtlich

aufgrund der größeren Schiffsabmessungen (Breite und Tiefgang) die Sohl- und Böschungsbelastung in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit um  $\Delta v_R < +0,1$  m/s ansteigen.

## **8.9 Belastungsänderungen der Nebenrinnen und Priele**

In den Nebenrinnen und Priele wird in erster Linie der langperiodische Anteil der ausbaubedingten Änderungen wirksam. Diese schiffserzeugten Belastungsänderungen werden analog den schon heute in die Nebenrinnen und Priele einlaufenden Absunkereignissen gedämpft. In Abhängigkeit der Lage und des Abstands der Mündungen zur Hauptrinne (z.B. Wremer Tief oder Fedderwarder Priel), sind wirksame geschwindigkeitsabhängige Änderungen an den Einmündungen, und gedämpft auch in den Nebenrinnen bzw. Priele, zu erwarten (vergl. Kapitel 8.2.4 und 8.2.6).

## **8.10 Änderung der Häufigkeit schiffserzeugter Belastungen**

Zur Bewertung der Häufigkeitsänderung der schiffserzeugten Belastung und deren ausbaubedingte Änderungen nach dem Ausbau der Außenweser sind die voraussichtlichen Veränderungen der Flottenstruktur nach [U3] zu berücksichtigen.

Es wird vorausgesetzt, dass die nach PLANCO [U3] prognostizierten prozentualen Entwicklungen der Weltcontainerflotte bis zum Jahr 2015 auf die Anlaufhäufigkeit von Bremerhaven umgerechnet werden können. Somit ist damit zu rechnen, dass die heute schon verkehrende PPM-Containerschiffahrt (80.000 tdw bis 99.999 tdw, ca. 6.400 TEU bis ca. 7.500 TEU) etwa 18 % pro Jahr häufiger die Außenweser passieren wird. Für Containerschiffe mit mehr als 100.000 tdw (> 8.000 TEU) wie z.B. das Bemessungsschiff werden Zuwachsraten bis rund 20 % pro Jahr erwartet.

Entsprechend der Häufigkeitszunahme der großen Containerschiffe auf den Weltmeeren ist desgleichen mit einer entsprechenden Häufigkeitszunahme der heutigen schiffserzeugten Belastung sowie der ausbaubedingten Änderungen zu rechnen.

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



und dem schon bei einem Einzelereignis erreichten Mobilisierungsgrad belastet. Abschnitte, 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 Abschnitten der Außenweser, 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.

## **9 Bewertung der schiffserzeugten Belastung aufgrund der Unterweseranpassung (Überlagerungsvariante)**

Die Querschnittsverhältnisse für die maßgeblichen Massengutschiffe, die heute und zukünftig auf der Unterweser bis zum Hafen Brake verkehren, wurden für die Außenweser für tideunabhängige (MThw; Bild 13) und tideabhängige (MTnw; Bild 14) Fahrt zusammen mit den n-Verhältnissen für die Containerschiffahrt aufgetragen.

Da die Querschnittsverhältnisse der o.a. Massengutschiffe der Unterweser (MG32) maximal in der gleichen Größenordnung der Werte der PANMAX-Containerschiffe (PM32) und deutlich über den n-Verhältnissen der schon heute verkehrenden POST-PANMAX-Containerschiffe (PPM43) liegen, werden keine messbaren ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Außenweser ab km 74 durch die zukünftige Schifffahrt auf der Unterweser erwartet, zumal die Motorisierung dieser Massengutschiffe mit lediglich 65.000 tdw bei  $t = 12,8$  m auf geringere Schiffsgeschwindigkeiten als die der Containerschiffe ausgelegt ist. Zwischen km 65 und km 68 ist mit einer Belastungszunahme unter  $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +0,05$  m bzw.  $\Delta v_R < +0,05$  m/s durch die Massengutschiffe der Unterweser zu rechnen (BAW, 2006a), wobei im anschließenden Hafenbereich ab km 68 bis km 74 aufgrund reduzierter Schiffsgeschwindigkeiten keine Zunahme erwartet wird.

## **10 Schlussfolgerungen zu den ausbaubedingten Änderungen der Außenweser**

Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen (Wellen und Strömung) sind quantitativ exakt nur auf der Basis von Untersuchungen in hydraulischen Modellen für ausgewählte Szenarien in einem ausgewählten Unterwasserquerschnitt zu prognostizieren. Anhand von zusätzlichen Systemversuchen können Änderungen für andere Querschnitte und Wasserstraßen qualitativ abgeschätzt werden, eine Quantifizierung zukünftiger Maximalbelastungen ist nach dem Stand der Wissenschaft auch mit Hilfe von Naturmessungen nicht möglich.

Für eine Abschätzung der ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Wellen und Strömungsbelastungen in der Außenweser wird auf ausgewählte Ergebnisse eines hydraulischen Modells der Untereibe für PM- und PPM-Containerschiffe zurückgegriffen.

Beim Vergleich des PPM46-Bemessungsschiffs mit den schon heute im Ist-Zustand verkehrenden PPM43-Containerschiffen werden die langperiodischen, ausbaubedingten Änderungen nach der neuen Fahrrinnenanpassung bei Schiffsgeschwindigkeiten bis etwa  $v_S \approx 14$  kn unter  $\Delta z_A < +0,1$  m bzw.  $\Delta v_R < +0,1$  m/s und damit in der Größenordnung der beweisgesicherten Änderungen zum SKN-14m-Ausbau liegen ( $\Delta z_A$  siehe Bild 23; vergl. Kapitel 6.2). Bei den kurzperiodischen Sekundärwellen ist von ausbaubedingten Änderungen wie beim SKN-14m-Ausbau von  $\Delta H_S \approx +0,1$  m auszugehen.

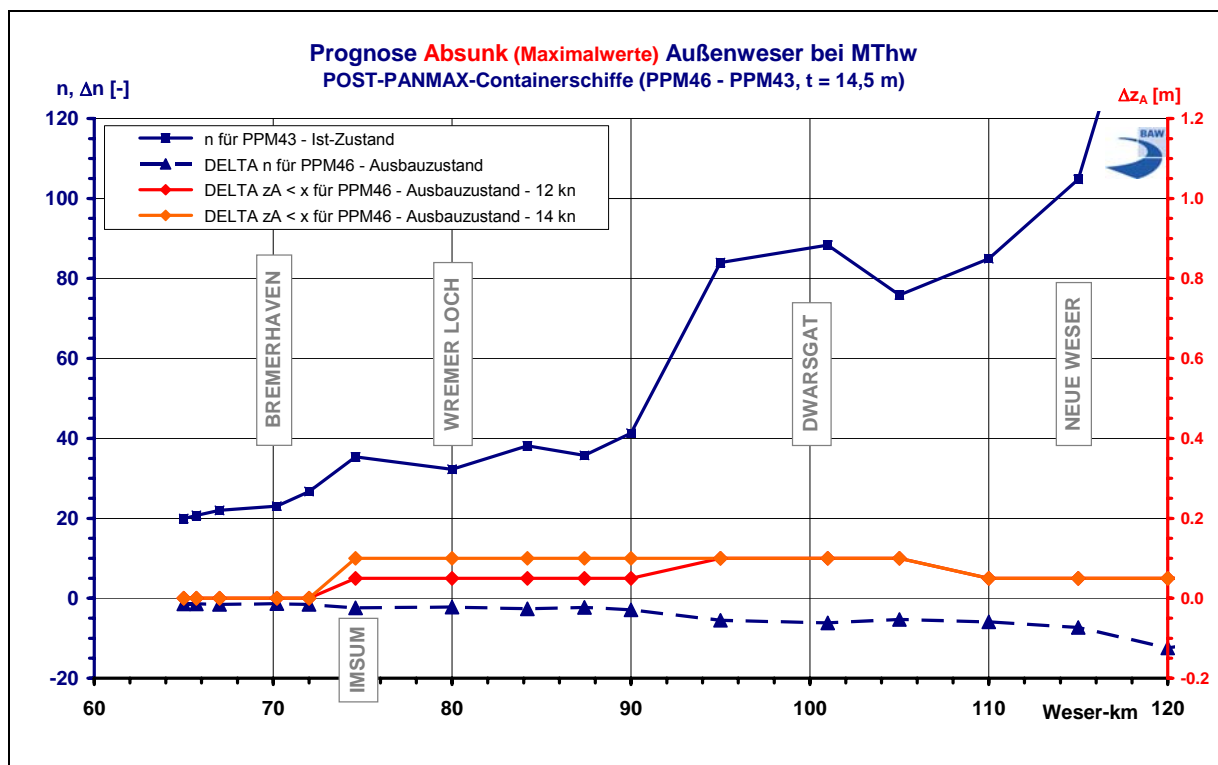


Bild 23: Grafische Darstellung der Prognose der ausbaubedingten Änderungen des Absunks (Maximalwerte) in der Außenweser bei Passagen großer PPM-Containerschiffe im Ausbauzustand bei MThw<sub>2000-2004</sub>

Die für die Tiefenlängsprofilbemessung angesetzten bereichsabhängigen Bemessungsgeschwindigkeiten über Grund werden hinsichtlich der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in einer Seeschiffahrtsstraße als unkritisch angesehen.



Bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten ( $v_S > \text{Bemessungsgeschwindigkeit}$ ) werden 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.

Für die Überlagerungsvariante (Ausbau von Außen- und Unterweser) ist festzustellen, dass durch die zukünftige Schifffahrt auf der Unterweser keine messbaren ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen seewärts der Containerkajen Bremerhaven erwartet werden, da die Querschnittsverhältnisse der Massengutschiffe der Unterweser (z.B. MG32) in der Außenweser u.a. aufgrund der geringeren Breite und des geringeren Tiefgangs deutlich über den n-Verhältnissen der schon heute verkehrenden PPM-Containerschiffe liegen.

Hamburg, den 31. 03. 2006  
Bundesanstalt für Wasserbau

Im Auftrag

Bearbeiter

gez.  
BDir Dipl.-Ing. H. Rahlf

gez.  
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 Ausbau der Außenweser auf SKN-14m – Seegangs- und Schiffswellenuntersuchungen in der Außenweser vor der Wurst-ter Küste, BAW Nr. 92 53 3381, Hamburg 1994
- BAW Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Ermittlung und Bewertung ausbaubeding-ter Änderungen der schiffserzeugten Belastung – Schiffswellen und Strömungen,  
BAW Nr. 95 52 3422 / 95 52 3423, Hamburg 1996  
Digital:  
<http://www.cux.wsd-nord.de/hm/zustimm.asp>  
dann folgende Links:  
[UVU-Datenbank - Band I Hydromechanik - Texte](#)  
[Schiffserzeugte Belastung \(PDF-Dokument 11,7 MB\)](#)
- BAW Erosionsverhalten von Böschungen am NOK – Bewertung und Empfehlungen anhand von Messungen im hydraulischen Mo-dell und in der Natur, BAW Nr. 98 51 3750 / 97 52 3449,  
Hamburg 1999 (*unveröffentlicht*)
- BAW Gutachten zur Beweissicherung SKN -14m-Ausbau der Au-ßenweser – Ausbaubedingte Änderungen der Belastung durch Schiffswellen,  
BAW Nr. 9253 3381 / 01.502.10012.00, Hamburg 2003
- BAW Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsiche-rungen an Binnenwasserstraßen,  
Mitteilungsblatt der BAW Nr. 87, Karlsruhe 2004
- BAW Fahrrinnenanpassung der Unterweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr, Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und Außenweser, Gutachten zur ausbaubedingten Änderung schiffserzeugter Belastungen  
BAW Nr. 5.02.10048.00 – 4, Hamburg 2006a



- BAW Weitere Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe, Bericht zu den schiffsinduzierten Schwingungen im Deich, Naturmessungen an der Unterelbe im Altenbrucher Bogen, Hamburg 2006b (*unveröffentlicht*)
- BAW Weitere Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugte Belastungen, BAW Nr. 5.03.10062.00, Hamburg 2006c (*in Vorbereitung*)
- BAW Fahrinnenanpassung Unterweser und Außenweser an die Entwicklungen im Schiffsverkehr sowie Tiefenanpassung der hafenbezogenen Wendestelle – Summationswirkung der Anpassungen von Unter- und Außenweser – Gutachten zu Tidedynamik und Salztransport.  
BAW-Nr. 5.02.10048.00–1, Hamburg 2006d
- 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,  
24<sup>th</sup> 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, Proceedings of the 28<sup>th</sup> 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 Unterelbe  
Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig,  
Bericht Nr. 649, Braunschweig, 1988
- ICCM
- Bericht über Berechnung der Strömung in einem Drei-Fluid-System (Schlamm, Wasser, Luft),  
ICCM Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH,  
Hamburg 2000 (*unveröffentlicht*)
- IM+P
- Schiffswellenmessungen in der Außenweser – Beweissicherung, Messbericht des Ingenieurbüro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner GbR, Oldenburg, 2002 (*unveröffentlicht*)
- IMS  
Ingenieurgesellschaft
- Gutachten zur Deichverformung im Bereich des Hadelner Deich- und Uferverbandes – Untersuchung der Standsicherheit im Bereich Altenbruch und Glameyer Stack, Nr. 9073-01, Hamburg 2004
- IMS  
Ingenieurgesellschaft
- Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung der Unterweser, Nr. 9013-02, Hamburg 2006 (*unveröffentlicht*)
- Fittschen, Th.
- Wellenmessungen an der Unterelbe – Schiffswellenmessungen, Hamburg 2003 (*unveröffentlicht*)
- Jiang, T.  
Henn, R.  
Sharma, S.D.
- Wash waves generated by ships moving on fairways of varying topography,  
24<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan 2002
- Haffke, C.B.
- Zur hydrodynamischen Belastung vertäuer Schiffe durch passierende Schiffe  
Mitteilungen Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, Heft 93, 1986
- Kunz, H.
- Die Wirkung von Schiffswellen auf Entwässerungsbauwerke an Tideflüssen, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der TU Hannover, Heft 46, Hannover 1977



- 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, Ot-  
tawa, Canada, 1997
- Nwogu, O.G.  
Demirbilek, Z. Numerical Modeling of ship-induced currents in confined wa-  
terways,  
Book of Abstracts and Proceedings, 29<sup>th</sup> ICCE, Lissabon,  
Portugal 2004
- Schneekluth, H. Hydromechanik zum Schiffsentwurf.  
3. Auflage, Koehlers Verlagsgesellschaft, Herford, 1988
- Schulz, H.  
Köhler, H.-J. Bemessung von Deckwerken unter Berücksichtigung von Geo-  
textilien, Third International Conference on Geotextiles, Wien,  
Österreich, 1986
- 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

### 12.1 Anlage I

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

MThw - Tideabhängiger Verkehr -  $v_S = 12 \text{ Kn}$

Vergleich PPM43:  $t = 14,5 \text{ m}$   $b = 43 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 14,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

MTnw - Tideunabhängiger Verkehr -  $v_S = 12 \text{ Kn}$

Vergleich PPM43:  $t = 12,5 \text{ m}$   $b = 43 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 13,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

<b>Bremerhaven (km 68/74)</b>	-	-	-	<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>ca. km 76 / km 77</b>	<b>Lotenwechsel =&gt; <math>v_S &lt; 9 \text{ Kn}</math></b>			<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>km 74 bis km 90</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 35-41</b>	<b><math>\Delta n = -3</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 21-37</b>	<b><math>\Delta n = -4</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
<b>Wremertief</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 32</b>	<b><math>\Delta n = -2</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 80 + ca. 3 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 24</b>	<b><math>\Delta n = -3</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
<b>Fedderwardsiel / Burhave</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 41</b>	<b><math>\Delta n = -3</math></b>	<b><math>\Delta z_A = 0 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 92 + ca. 10 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 37</b>	<b><math>\Delta n = -5</math></b>	<b><math>\Delta z_A = 0 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 94 bis km 110</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 76-88</b>	<b><math>\Delta n = -10</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 62-75</b>	<b><math>\Delta n = -4</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 110 bis See</b>	<b>MThw</b>	<b>n &gt; 105</b>	<b><math>\Delta n = -7</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n &gt; 100</b>	<b><math>\Delta n = -14</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
<b>Teilweise Kompensation der Tiefen- und Breitenzunahme des Bemessungsschiffs</b>					
<b>durch Vertiefungen in der Fahrrinne um 0,8 m bis rd. 1,2 m (z.B. km 87- 89; km 92 - 93; km 108; km 110 - 113)</b>					
<b>=&gt; in Vertiefungsabschnitten ist keine Belastungszunahme zu erwarten!</b>					



## 12.2 Anlage II

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

MThw - Tideabhängiger Verkehr -  $v_S = 14 \text{ Kn}$

Vergleich PPM43:  $t = 14,5 \text{ m}$   $b = 43 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 14,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

MTnw - Tideunabhängiger Verkehr -  $v_S = 14 \text{ Kn}$

Vergleich PPM43:  $t = 12,5 \text{ m}$   $b = 43 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 13,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

<b>Bremerhaven (km 68/74)</b>	-	-	-	<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>ca. km 76 / km 77</b>	<b>Lotsenwechsel <math>\Rightarrow v_S &lt; 9 \text{ Kn}</math></b>			<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>km 74 bis km 90</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 35-41</b>	<b><math>\Delta n = -3</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 21-37</b>	<b><math>\Delta n = -4</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
<b>Wremertief</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 32</b>	<b><math>\Delta n = -2</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 80 + ca. 3 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 24</b>	<b><math>\Delta n = -3</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
<b>Fedderwardsiel / Burhave</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 41</b>	<b><math>\Delta n = -3</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 92 + ca. 10 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 37</b>	<b><math>\Delta n = -5</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 94 bis km 110</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 76-88</b>	<b><math>\Delta n = -10</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 62-75</b>	<b><math>\Delta n = -4</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 110 bis See</b>	<b>MThw</b>	<b>n &gt; 105</b>	<b><math>\Delta n = -7</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n &gt; 100</b>	<b><math>\Delta n = -14</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
<b>Teilweise Kompensation der Tiefen- und Breitenzunahme des Bemessungsschiffs</b>					
<b>durch Vertiefungen in der Fahrrinne um 0,8 m bis rd. 1,2 m (z.B. km 87- 89; km 92 - 93; km 108; km 110 - 113)</b>					
<b><math>\Rightarrow</math> in Vertiefungsabschnitten ist keine messbare Belastungszunahme zu erwarten!</b>					



## 12.3 Anlage III

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

MThw - Tideabhängiger Verkehr -  $v_S = 12 \text{ Kn}$

Vergleich PM32:  $t = 13,5 \text{ m}$   $b = 32,2 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 14,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

MTnw - Tideunabhängiger Verkehr -  $v_S = 12 \text{ Kn}$

Vergleich PM32:  $t = 12,8 \text{ m}$   $b = 32,2 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 13,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

<b>Bremerhaven (km 68/74)</b>	-	-	-	<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>ca. km 76 / km 77</b>	<b>Lotenwechsel =&gt; <math>v_S &lt; 9 \text{ Kn}</math></b>			<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>km 74 bis km 90</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 47-55</b>	<b><math>\Delta n = -15</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,2 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,2 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 25-33</b>	<b><math>\Delta n = -8</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,2 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,2 \text{ m/s}</math></b>
<b>Wremertief</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 43</b>	<b><math>\Delta n = -13</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 80 + ca. 3 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 30</b>	<b><math>\Delta n = -9</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
<b>Fedderwardsiel / Burhave</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 55</b>	<b><math>\Delta n = -16</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 92 + ca. 10 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 46</b>	<b><math>\Delta n = -14</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,05 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R = 0 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 94 bis km 110</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 100-117</b>	<b><math>\Delta n = -30</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 76-91</b>	<b><math>\Delta n = -24</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 110 bis See</b>	<b>MThw</b>	<b>n &gt; 140</b>	<b><math>\Delta n = -43</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n &gt; 123</b>	<b><math>\Delta n = -37</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
<b>Nur bedingt erfolgt eine Kompensation der Tiefgangs- und Breitenzunahme des Bemessungsschiffs durch Vertiefungen in der Fahrrinne um 0,8 m bis rd. 1,2 m (z.B. km 87- 89; km 92 - 93; km 108; km 110 - 113) =&gt; auch in Vertiefungsabschnitten ist eine Belastungszunahme zu erwarten!</b>					



## 12.4 Anlage IV

Gebietsbezogene Zusammenstellung der prognostizierten ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, langperiodischen Belastungen der Außenweser:

MThw - Tideabhängiger Verkehr -  $v_S = 14 \text{ Kn}$

Vergleich PM32:  $t = 13,5 \text{ m}$   $b = 32,2 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 14,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

MTnw - Tideunabhängiger Verkehr -  $v_S = 14 \text{ Kn}$

Vergleich PM32:  $t = 12,8 \text{ m}$   $b = 32,2 \text{ m}$  mit Bemessungsschiff PPM46:  $t = 13,5 \text{ m}$   $b = 46 \text{ m}$

<b>Bremerhaven (km 68/74)</b>	-	-	-	<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>ca. km 76 / km 77</b>	<b>Lotsenwechsel <math>\Rightarrow v_S &lt; 9 \text{ Kn}</math></b>			<b>keine Auswirkungen</b>	
<b>km 74 bis km 90</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 47-55</b>	<b><math>\Delta n = -15</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,4 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,4 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 25-33</b>	<b><math>\Delta n = -8</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,4 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,4 \text{ m/s}</math></b>
<b>Wremertief</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 43</b>	<b><math>\Delta n = -13</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,2 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 80 + ca. 3 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 30</b>	<b><math>\Delta n = -9</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
<b>Fedderwardsiel / Burhave</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 55</b>	<b><math>\Delta n = -16</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
(W-km 92 + ca. 10 km querab)	<b>MTnw</b>	<b>n = 46</b>	<b><math>\Delta n = -14</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,05 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 94 bis km 110</b>	<b>MThw</b>	<b>n = 100-117</b>	<b><math>\Delta n = -30</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,2 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,2 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n = 76-91</b>	<b><math>\Delta n = -24</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,2 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,2 \text{ m/s}</math></b>
<b>km 110 bis See</b>	<b>MThw</b>	<b>n &gt; 140</b>	<b><math>\Delta n = -43</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
	<b>MTnw</b>	<b>n &gt; 123</b>	<b><math>\Delta n = -37</math></b>	<b><math>\Delta z_A &lt; +0,1 \text{ m}</math></b>	<b><math>\Delta v_R &lt; +0,1 \text{ m/s}</math></b>
<b>Nur bedingt erfolgt eine Kompensation der Tiefgangs- und Breitenzunahme des Bemessungsschiffs durch Vertiefungen in der Fahrrinne um 0,8 m bis rd. 1,2 m (z.B. km 87- 89; km 92 - 93; km 108; km 110 - 113) <math>\Rightarrow</math> auch in Vertiefungsabschnitten ist eine Belastungszunahme zu erwarten!</b>					