

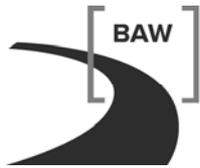


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Vertiefung der Außenems bis Emden
Prognose der
ausbaubedingten Änderungen
der schiffserzeugten Belastungen

A39550210121





Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Vertiefung der Außenems bis Emden
Prognose der
ausbaubedingten Änderungen
der schiffserzeugten Belastungen**

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Emden
Am Eisenbahndock 3
26725 Emden

Auftrag vom: 01.04.2009

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39550210121

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme I [K2]
Bearbeiter: Dr.-Ing. K. Uliczka
PA D. Carstens

Hamburg, im August 2012

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

Zusammenfassung

Im Rahmen der Planungen für eine Vertiefung der Außenems bis Emden beauftragte das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Emden, Projektgruppe Projektsteuerung Tideems, die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im April 2009, neben weiteren umfangreichen Untersuchungen zur Ermittlung der Auswirkungen der Fahrrinnenvertiefung, die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen infolge der Vertiefung unter Berücksichtigung der zukünftigen Schiffstiefgänge zu ermitteln und zu begutachten.

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 , Völligkeitsgrad c_B),
- vom Gesamtwiderstand des Schiffes $R_{T,K}$, (Schiffsform),
- der Fahrwasserverhältnisse (Wasserspiegelbreite B , Sohlbreite B_S , Wassertiefe h , Querprofilform und -fläche A sowie Teilquerschnitt A_T , Uferform und Böschungsneigung 1:m),
- der Strömungsverhältnisse in der Wasserstraße v_0 (z.B. v_e oder v_f),
- sonstiger Einflüsse, wie z.B. Krümmungsradius, Driftwinkel, 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 ($n_T = A_T / 0,5 \cdot A_S$) 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.

Zur Beschreibung der heutigen Verhältnisse erfolgten im September / Oktober 2009 annähernd synoptische Messungen in charakteristischen Abschnitten der Außenems über einen repräsentativen Messzeitraum von rund 8 Wochen, so dass sowohl die Belastungen im engen Emdener Fahrwasser (Lokation A; Ems-km 44,6), am östlichen Ufer vom Paapsand / Hund (hier allgemein: Paapsand; Lokation B; Ems-km 61,2) als auch im breiten Fahrwasser vor Borkum (Lokation C; Ems-km 87,0) erfasst wurden.

Die mittlere Unterschreitungswahrscheinlichkeit (< 50%), die 95 % Unterschreitungswahrscheinlichkeit und das Maximum aller gemessenen schiffserzeugten Wellen an den Lokationen A Emden Fahrwasser (1.327 Ereignisse), B Paapsand (1.804 Ereignisse) und C Borkum (1.403 Ereignisse; für H_S: 759 Ereignisse) sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

| Alle Fahrzeuge | Ems | Absunk _{IST} | | | Primärwelle _{IST} | | | Sekundärwelle _{IST} | | |
|----------------|------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | | Z _A (50%) [m] | Z _A (95%) [m] | Z _{A,MAX} [m] | H _P (50%) [m] | H _P (95%) [m] | H _{P,MAX} [m] | H _S (50%) [m] | H _S (95%) [m] | H _{S,MAX} [m] |
| A | 44,6 | < 0,05 | < 0,2 | 0,64 | < 0,05 | < 0,2 | 0,57 | < 0,30 | < 0,6 | 1,04 |
| B | 61,2 | < 0,05 | < 0,1 | 0,38 | < 0,05 | < 0,1 | 0,45 | < 0,35 | < 0,7 | 1,23 |
| C | 87,0 | < 0,05 | < 0,1 | 0,65 | < 0,05 | < 0,1 | 0,71 | < 0,42 | < 0,65 | 1,30 |

Nur für Passagen von heute schon tiefgangsrelevanten Fahrzeugen mit t > 7,5 m wurden folgende Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Schiffswellenbelastungen an den Lokationen A Emden Fahrwasser (46 Ereignisse), B Paapsand (57 Ereignisse) und C Borkum (49 Ereignisse; für H_S: 27 Ereignisse) ermittelt:

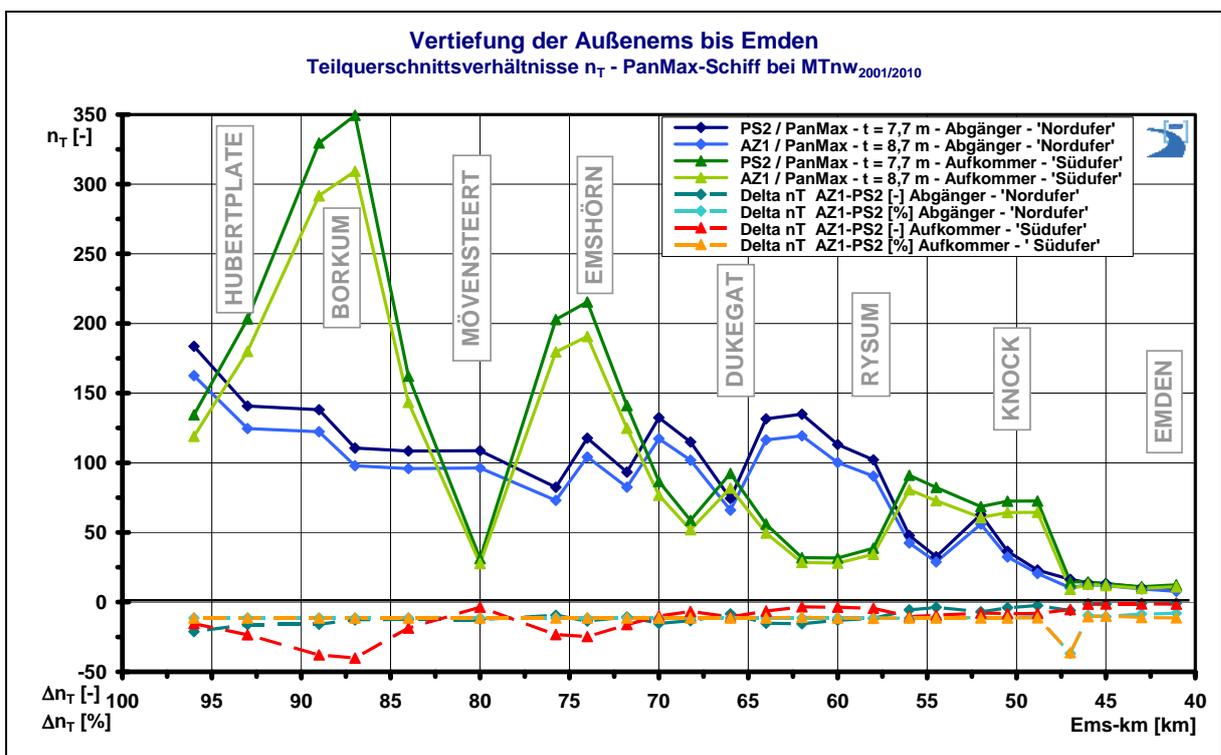
| Fahrzeuge t > 7,5 m | Ems | Absunk _{IST} | | | Primärwelle _{IST} | | | Sekundärwelle _{IST} | | |
|------------------------|------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | | Z _A (50%) [m] | Z _A (95%) [m] | Z _{A,MAX} [m] | H _P (50%) [m] | H _P (95%) [m] | H _{P,MAX} [m] | H _S (50%) [m] | H _S (95%) [m] | H _{S,MAX} [m] |
| A | 44,6 | < 0,22 | < 0,5 | 0,50 | < 0,21 | < 0,45 | 0,48 | < 0,30 | < 0,55 | 0,68 |
| B | 61,2 | < 0,13 | < 0,3 | 0,32 | < 0,12 | < 0,30 | 0,31 | < 0,53 | < 0,92 | 1,05 |
| C | 87,0 | < 0,06 | < 0,1 | 0,12 | < 0,05 | < 0,1 | 0,13 | < 0,43 | < 0,80 | 0,90 |

Die Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen der Außenems bis Emden aufgrund von Fahrrinnenvertiefungen, Tiefgangszunahme großer Fahrzeuge sowie Tidefahrplanänderungen für bemessungsrelevante Schiffe erfolgte auf Grundlage von ausgewählten Beurteilungskriterien für die charakteristischen Abschnitte Emden Fahrwasser, Innerer Ästuartrichter und Äußerer Ästuartrichter:

- Analyse des Ist-Zustands anhand von Naturmesskampagnen (Messungen 2009)
- Analyse von Parameterstudien mit revierspezifischer Bewertung (Hydraulisches Maßstabsmodell 1:40)
- Betrachtung der lokalen baulichen Veränderungen (vorgesehenes Vertiefungsmaß)
- Analyse der veränderten (Teil-)Querschnittsverhältnisse („Nordufer“ / „Südufer“)
- Berücksichtigung der örtlichen Schiffsgeschwindigkeiten ($v_{S,dW}$, gemessen)
- Maximale Tiefgangszunahme der Schiffe bei gleichbleibender Flottenstruktur (tideabhängiger und tideunabhängiger Verkehr)

Diese Einzelkriterien wurden fachlich gewichtet und mit einander verknüpft auf Basis eines umfangreichen, fachwissenschaftlichen Expertenwissens und hinsichtlich möglicher Belastungsänderungen bewertet. Die maßgeblichen Kriterien hinsichtlich der ausbaubedingten Änderung der Belastungsgrößen waren die veränderten Teilquerschnittsverhältnisse unter Berücksichtigung der örtlichen Schiffsgeschwindigkeit (Kontinuität vorausgesetzt) auf Grundlage des erfassten Ist-Zustands in der Außenems. Die Parameterstudien ermöglichten eine revierspezifische Quantifizierung der erwarteten Belastungsänderungen unter Zugrundelegung der maximal möglichen Tiefgangszunahme.

Potentielle Betroffenheiten durch ausbaubedingte Änderungen des schifffserzeugten Belastungen wurden anhand der Analyse der Teilquerschnittsverhältnisse z.B. bei MTnw (folgende Grafik) sowohl für Streckenabschnitte (z.B. Paapsand, südöstlicher Mövensteert) als auch für einzelne Orte (z.B. Strombaumaßnahme Emders Fahrwasser, Werkshafen bei Eemshaven) verdeutlicht.

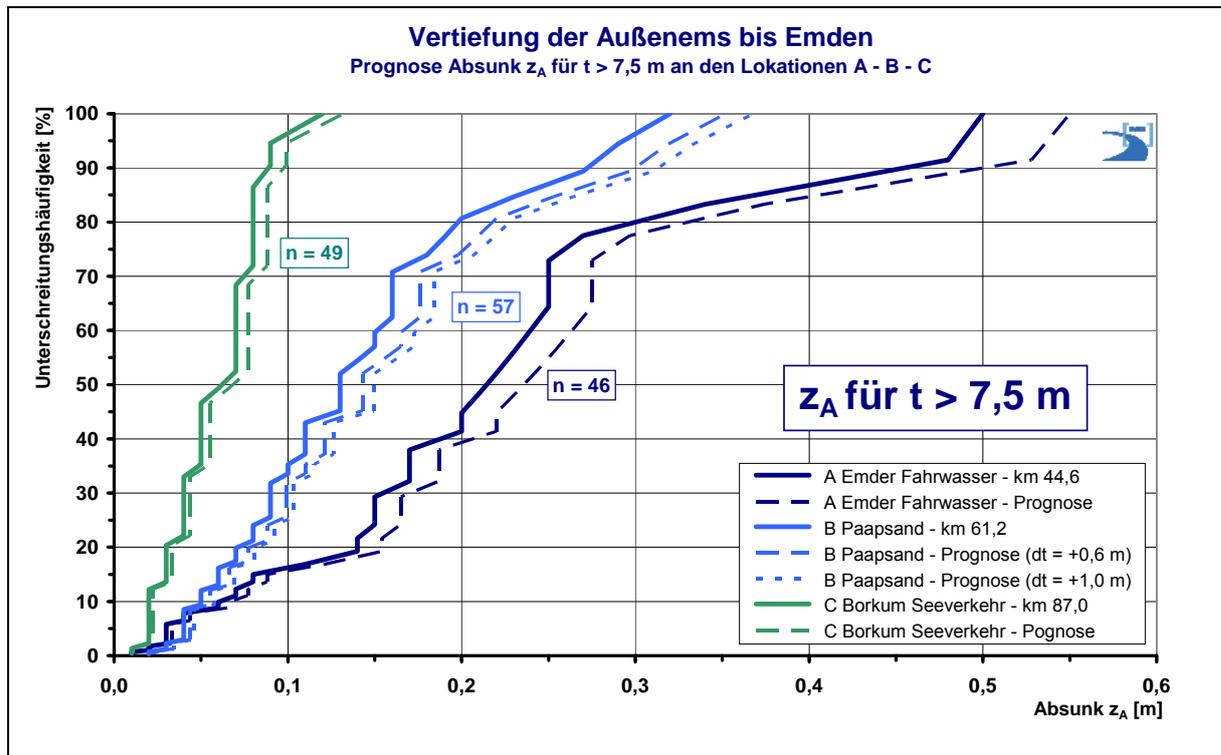


Zusammenfassend werden für die allgemeine Schifffahrt folgende ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen erwartet:

- Abschnitt Emders Fahrwasser (ca. km 40 bis km 48):
 - Keine Zunahme in Abschnitten mit deutlichen Vertiefungen in der Fahrrinne, geringe Belastungserhöhung in nicht zu vertiefenden Strecken beidseitig von ca. maximal $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +10\%$ sowie $\Delta v_R \approx +10\%$.
 - Im Bereich der Strombaumaßnahme (Buhnen 6 und 7) maximale örtlich begrenzte Zunahmen von rund $\Delta z_{A,MAX} \approx \Delta H_{P,MAX} \approx +15\%$ bis $+20\%$ sowie am Bauwerkskopf maximal $\Delta v_{R,MAX} \approx +60\%$.
- Innerer Ästuartrichter (ca. km 49 bis km 68):
 - Belastungszunahme um rund $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +10\%$ bei tideabhängigem Verkehr bei etwa MThw und um maximal ca. $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +15\%$ bei tideunabhängigen Verkehr bei etwa MTnw.
 - Erstrangig betroffene Strecken sind Knockster Watt und Rysumer Ufer („Nordufer“) sowie Paapsand („Südufer“).
 - Keine Belastungszunahme am Schöpfwerk Knockster Tief, Zunahme wird erwartet im Werkshafen bei Eemshaven.
- Äußerer Ästuartrichter (ca. km 70 bis km 100):
 - Maximale tideunabhängige Erhöhung um $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +10\%$ sowie $\Delta v_R \approx +10\%$, da keine Vertiefungen der Fahrrinne erforderlich.
 - Örtliche Belastungszunahme um $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +15\%$ sowie $\Delta v_R \approx +15\%$ am südöstlichen Mövensteert wegen geringen Abstands zur Fahrrinne.
- Prozentuale Zunahme der kurzperiodischen Sekundärwellenbelastung abschnittsabhängig in der Größenordnung der jeweiligen langperiodischen Wellenbelastung.

Ausgehend davon, dass die Vertiefung der Außenems bis Emden in erster Linie Auswirkungen auf die Abladetiefe der tiefgangsrelevanten Schiffe mit $t > 7,5$ m hat, eine Tiefgangserhöhung von $\Delta t = +1,0$ m für tideunabhängigen sowie $\Delta t = +0,6$ m und eine Erweiterung des Tidefensters für tideabhängigen Verkehr ermöglicht, wurden diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer heutigen Belastungsgrößen und Schiffsgeschwindigkeiten gesondert betrachtet.

Die separate Prognose der schiffserzeugten Belastungszunahme nach der Ausbaumaßnahme für diese Tiefgänger wurde für die Abschnitte Emders Fahrwasser (A), Paapsand (B) und Borkum Seeverkehr (C) auf Grundlage der Unterschreitungshäufigkeiten des Absunks dargestellt. Die zu erwartenden prognostizierten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten basieren auf den vorab abgeleiteten abschnittsweisen prozentualen Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen.



Die Häufigkeit von schiffserzeugten Wellenereignissen durch die tiefgangsrelevanten Fahrzeuge, damit auch der prognostizierte höhere Belastungsanteil durch diese Schiffe, liegt auf Grundlage der Messungen in der Natur bei etwa 3 % aller repräsentativen Wellenereignisse, die für die gesamte derzeit verkehrende Schiffsflotte gemessen wurde. Eine überproportionale Zunahme von Passagen großer Fahrzeugtransportschiffe ist prognostiziert.

Trotz des geringen Anteils der schiffserzeugten Belastung durch die tiefgangsrelevanten Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m ist davon auszugehen, dass die - auf den prozentualen Zunahmen der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten basierenden - Absolutwerte zukünftig als maßgebliche langperiodische schiffserzeugte Belastung zur Bewertung der Betroffenen zu verwenden sind, sofern sie über den Prognosewerten der Gesamtheit aller Fahrzeuge liegen.

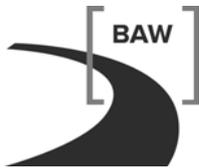
Die prognostizierten Unterschreitungshäufigkeiten infolge der ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Wellen wurden abschnittsweite (ohne Sonderfälle) für alle Fahrzeuge und gesondert für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m in den folgenden beiden Tabellen zusammengestellt:

| Alle Fahrzeuge | | Prognose Absunk $z_A \approx H_P$ | | |
|---|--------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| Prognose für Abschnitt | Ems-km | $z_A \approx H_P$ (50%) [m] | $z_A \approx H_P$ (95%) [m] | $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,05 | < 0,25 | 0,7 |
| Paapsand B $\Delta t = +0,6$ m (+10 %) | ca. 49 - 68 | < 0,05 | < 0,15 | < 0,45 |
| Paapsand B $\Delta t = +1,0$ m (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,05 | < 0,15 | 0,5 |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,05 | < 0,1 | < 0,8 |

| Fahrzeuge $t > 7,5$ m | | Prognose Absunk $z_A \approx H_P$ | | |
|--|--------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| Prognose für Abschnitt | Ems-km | $z_A \approx H_P$ (50%) [m] | $z_A \approx H_P$ (95%) [m] | $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,3 | < 0,6 | $\approx 0,6$ |
| Paapsand B $\Delta t = +0,6$ m (+10 %) | ca. 49 - 68 | < 0,2 | < 0,4 | $\approx 0,4$ |
| Paapsand B $\Delta t = +1,0$ m (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,2 | < 0,4 | $\approx 0,4$ |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,1 | < 0,1 | $\approx 0,1$ |

Die prognostizierten Unterschreitungshäufigkeiten infolge der ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen schiffserzeugten Wellen wurden abschnittsweite (ohne Sonderfälle) insgesamt für alle Fahrzeuge und gesondert für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m in den folgenden beiden Tabellen zusammengestellt:

| Alle Fahrzeuge | | Prognose Sekundärwelle H_S | | |
|-------------------------------|--------------|--|--------------------|--------------------|
| Prognose für Abschnitt | Ems-km | H_S (50%) [m] | H_S (95%) [m] | $H_{S,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,3 | < 0,7 | $\approx 1,2$ |
| Paapsand B (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,4 | < 0,8 | $\approx 1,5$ |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,5 | < 0,7 | $\approx 1,5$ |



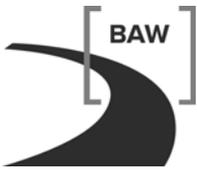
| Fahrzeuge $t > 7,5$ m Prognose für Abschnitt | Ems-km | Prognose Sekundärwelle H_S | | |
|--|--------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | H_S (50%) [m] | H_S (95%) [m] | $H_{S,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,35 | < 0,6 | ≈ 0,75 |
| Paapsand B (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,6 | < 1,0 | ≈ 1,2 |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,5 | < 0,7 | ≈ 1,0 |

Die maßgeblichen Kriterien hinsichtlich der abschnittswisen Prognose der ausbaubedingten Änderung der Belastungsgrößen waren die veränderten Teilquerschnittsverhältnisse unter Berücksichtigung der örtlichen Schiffsgeschwindigkeit.

Die schiffserzeugte Belastung der Außenems bis Emden sowie deren ausbaubedingten Änderungen sind als relativ gering und hinsichtlich der Standsicherheit der Strombauwerke als technisch unbedenklich zu bewerten.

Die prognostizierten Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen können durch eine Verkehrsregelung deutlich reduziert werden, wenn das vom Träger des Vorhabens für den Ausbau verwendete charakteristische Geschwindigkeitsprofil für alle (Verdränger-) Fahrzeuge der Handelsschifffahrt als Richtgeschwindigkeit (hier: v_S durchs Wasser) festgelegt wird.

| Inhaltsverzeichnis | | Seite |
|---------------------------|---|--------------|
| 1 | Veranlassung und Aufgabenstellung | 1 |
| 2 | Unterlagen | 2 |
| 3 | Schiffserzeugte Belastungen | 3 |
| 3.1 | Allgemeine Bemerkungen | 3 |
| 3.2 | Definition der kennzeichnenden Größen | 4 |
| 3.3 | Bearbeitungsmethoden | 7 |
| 3.3.1 | Empirische und analytische Berechnungsansätze | 7 |
| 3.3.2 | Numerische Berechnungsverfahren | 7 |
| 3.3.3 | Prognose auf Basis von Naturmessungen | 8 |
| 3.3.4 | Systemversuche im hydraulischen Maßstabsmodell | 8 |
| 4 | Methodisches Vorgehen | 9 |
| 5 | Beschreibung des Ist-Zustands | 10 |
| 5.1 | Charakteristische Querschnittsverhältnisse | 10 |
| 5.2 | Messungen in der Natur | 11 |
| 5.3 | Bewertung des Ist-Zustands | 19 |
| 5.4 | Beschreibung der Wirkungsmechanismen | 21 |
| 5.4.1 | Deckwerke und Deiche | 21 |
| 5.4.2 | Wattgebiete, Sände und natürliche Ufer | 22 |
| 5.4.3 | Bauliche Anlagen | 24 |
| 5.4.4 | Sport- und Kleinschiffahrt | 25 |
| 5.4.5 | Marine archäologische Kulturgüter | 26 |
| 5.4.6 | Fahrinne und Unterwasserböschungen | 26 |
| 5.4.7 | Nebenrinnen und Priele | 28 |
| 6 | Systemversuche im hydraulischen Modell | 29 |
| 6.1 | Allgemeine Vorbemerkungen | 29 |
| 6.2 | Hydraulisches Maßstabsmodell | 30 |
| 6.2.1 | Modellgesetze | 30 |
| 6.2.2 | Versuchseinrichtung | 31 |
| 6.2.3 | Untersuchte Schiffstypen | 34 |
| 6.3 | Systemversuche | 35 |
| 6.3.1 | Tiefgangszunahme mit Vertiefung | 35 |
| 6.3.2 | Belastungen bei tideabhängiger und tideunabhängiger Fahrt | 38 |
| 6.3.3 | Tiefgangszunahme ohne Vertiefung | 40 |



| | | |
|-------|---|----|
| 6.3.4 | Einfluss der Völligkeit | 42 |
| 6.3.5 | Einfluss von Wasserstand und Under-Keel-Clearance | 44 |
| 7 | Prognose der Vorhabensauswirkungen | 46 |
| 7.1.1 | Beurteilungskriterien | 46 |
| 7.1.2 | Hydraulisch wirksame bauliche Veränderungen | 47 |
| 7.1.3 | Änderungen der (Teil-)Querschnittsverhältnisse | 48 |
| 7.1.4 | Prognose Abschnitt Emden Fahrwasser bis Leitdamm Seedeich | 56 |
| 7.1.5 | Prognose Abschnitt Knockster Watt bis Dukegat | 58 |
| 7.1.6 | Prognose Abschnitt Emshörn bis Nordsee | 60 |
| 7.1.7 | Prognose für tiefgangsrelevante Fahrzeuge $t > 7,5$ m | 62 |
| 7.1.8 | Prognose zur ausbaubedingten Änderung der Sekundärwellenbelastung | 64 |
| 7.1.9 | Bewertung nach potentiellen Betroffenheiten | 66 |
| 8 | Ausbaubedingte Änderungen - Tabellarische Zusammenstellung | 68 |
| 9 | Schlussfolgerungen und Empfehlungen | 70 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 71 |

Bildverzeichnis

Seite

| | |
|---|----|
| Bild 1: Betrachtungsraum für die Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Außenems (nach [U2]) | 2 |
| Bild 2: Seitliche Ansicht der Schiffswellensysteme | 5 |
| Bild 3: Resultierende schiffserzeugte Verdrängungsströmung (schematisch) | 5 |
| Bild 4: Darstellung des Teilquerschnitts einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussgrößen auf die schiffserzeugten Belastungen | 6 |
| Bild 5: Querschnittsverhältnisse eines PanMax-Schiffs bei Tidehochwasser (MThw, $t = 10,9$ m) und bei Tideniedrigwasser (MTnw, $t = 7,7$ m) | 10 |
| Bild 6: Revierübersicht mit Messlokationen zur Erfassung der schiffserzeugten Belastungen (aus [U3]) | 12 |
| Bild 7: Unterschreitungshäufigkeiten des Absunks z_A in den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3]) | 13 |
| Bild 8: Unterschreitungshäufigkeiten der Primärwelle H_P in den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3]) | 13 |
| Bild 9: Unterschreitungshäufigkeiten der Sekundärwelle H_S in den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3]) | 14 |
| Bild 10: Unterschreitungshäufigkeiten der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_{S,dW}$ für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m an den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3]) | 16 |
| Bild 11: Unterschreitungshäufigkeiten des Absunks z_A für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m an den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3]) | 17 |
| Bild 12: Querschnittsverhältnisse und charakteristisches Geschwindigkeitsprofil über Grund (nach [U1]) eines PanMax-Schiffs bei Tidehochwasser (MThw, $t = 10,9$ m) und bei Tideniedrigwasser (MTnw, $t = 7,7$ m) | 19 |
| Bild 13: Potentielle Betroffenheiten hinsichtlich schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen (nach [U6]) | 23 |
| Bild 14: Schematische Darstellung der Randbedingungen der Systemversuche im hydraulischen Modell der BAW-DH (z.B. Böschungsneigung 1:6 links bzw. 1:10 rechts) | 32 |
| Bild 15: Autotransporter ($c_B = 0,6$) und langperiodische Wasserspiegelauslenkung an einer 1:6 geneigten Böschung im Modellwellenbecken der BAW (Maßstab 1:40, $v_S \approx 11,6$ kn) | 33 |
| Bild 16: Systemversuche zu Absunk, Primärwelle und Rückstromgeschwindigkeit bei Vertiefung und Tiefgangszunahme unter Tideniedrigwasserbedingungen (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$) | 36 |
| Bild 17: Systemversuche zu Absunk, Primärwelle und Rückstromgeschwindigkeit bei Vertiefung und Tiefgangszunahme unter Tidehochwasserbedingungen (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$) | 37 |
| Bild 18: Vergleich von Systemversuchen zu Absunk und Rückstromgeschwindigkeit bei tideabhängiger und tideunabhängiger Fahrt (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$) | 39 |

| | |
|--|----|
| Bild 19: Systemversuche zu Absunk und Rückstromgeschwindigkeit bei stufenweiser Tiefgangszunahme (PanMax-Schiff $c_B = 0,8$) | 41 |
| Bild 20: Systemversuche zu Absunk und Rückstromgeschwindigkeit zum Vergleich der Völligkeit (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$ u. $0,8$) | 43 |
| Bild 21: Systemversuche zum Einfluss der UKC auf Absunk und Rückstromgeschwindigkeit (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$) | 44 |
| Bild 22: Längsschnitt der derzeitigen und geplanten Wassertiefen der Seeschiffahrtsstraße Außenems bis Emden in Fahrrinnenachse (Detail nach [U4]) | 47 |
| Bild 23: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff entlang der Außenems (PS2 und AZ1) bei $MT_{nw2001/2010}$ | 49 |
| Bild 24: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff entlang der Außenems (PS2 und AZ1) bei $MThw_{2001/2010}$ | 50 |
| Bild 25: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff zwischen Emden und Emshörn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei $MT_{nw2001/2010}$ | 51 |
| Bild 26: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff zwischen Emden und Emshörn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei $MThw_{2001/2010}$ | 52 |
| Bild 27: Ausbaubedingte Änderungen der Teilquerschnittsverhältnisse ‚Nordufer‘ und ‚Südufer‘ für <u>tideunabhängige</u> PanMax-Schiffe zwischen Emden und Emshörn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei $MT_{nw2001/2010}$ | 53 |
| Bild 28: Ausbaubedingte Änderungen der Teilquerschnittsverhältnisse ‚Nordufer‘ und ‚Südufer‘ für <u>tideabhängige</u> PanMax-Schiffe zwischen Emden und Emshörn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei $MThw_{2001/2010}$ | 54 |
| Bild 29: Ausbaubedingte Änderungen der Teilquerschnittsverhältnisse ‚Nordufer‘ und ‚Südufer‘ für <u>tideunabhängige</u> PanMax-Schiffe zwischen Emden und Nordsee sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei $MT_{nw2001/2010}$ | 55 |
| Bild 30: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des ausbaubedingten schiffserzeugten Absunks im Abschnitt Emden Fahrwasser bis Leitdamm Seedeich | 56 |
| Bild 31: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des ausbaubedingten schiffserzeugten Absunks im Abschnitt Knockster Watt bis Dukegat | 59 |
| Bild 32: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des ausbaubedingten schiffserzeugten Absunks im Abschnitt Emshörn bis Nordsee | 61 |
| Bild 33: Prognose der Unterschreitungshäufigkeiten des ausbaubedingten Absunks z_A für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m an den Lokationen A Emden Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum | 63 |
| Bild 34: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, kurzperiodischen Sekundärwellen für alle Fahrzeuge entlang der Außenems | 65 |

| Tabellenverzeichnis | Seite |
|---|--------------|
| Tabelle 1: Zusammenstellung der gemessenen schiffserzeugten Belastungen durch Absunk, Primär- und Sekundärwellen entlang der Außenems (nach [U3]) | 15 |
| Tabelle 2: Zusammenstellung der gemessenen schiffserzeugten Belastungen durch Absunk, Primär- und Sekundärwellen für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m entlang der Außenems (Bearbeitet nach [U3]) | 18 |
| Tabelle 3: Zusammenstellung der <u>mittleren</u> schiffserzeugten Strömungsbelastungen v_R , v_{HP} und v_{HS} der 25 höchsten Schiffswellenereignisse an den Lokationen Emden Fahrwasser, Paapsand und Borkum (aus [U3]) | 18 |
| Tabelle 4: Basisdaten der untersuchten Schiffstypen | 34 |
| Tabelle 5: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittswisen ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Wellen (alle Fahrzeuge; ohne Sonderfälle) | 68 |
| Tabelle 6: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittswisen ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Wellen (Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m; ohne Sonderfälle) | 68 |
| Tabelle 7: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittswisen ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen schiffserzeugten Wellen (alle Fahrzeuge; ohne Sonderfälle) | 69 |
| Tabelle 8: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittswisen ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen schiffserzeugten Wellen (Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m; ohne Sonderfälle) | 69 |

Symbolverzeichnis:

| Zeichen | Begriff | Einheit |
|-------------------|--|-----------------------|
| A | Querschnittsfläche der Wasserstraße | m ² |
| A _T | Teilquerschnittsfläche der Wasserstraße | m ² |
| A _S | Eingetauchter Hauptspantquerschnitt | m ² |
| b | Schiffsbreite in Hauptspantebene | m |
| B | Wasserspiegelbreite (Oberfläche) | m |
| B _S | Sohlbreite der Wasserstraße | m |
| c _B | Völligkeitsgrad der Verdrängung eines Schiffes | - |
| Fr _h | FROUDEsche Tiefen-Zahl = $v_s / (g \cdot h)^{0,5}$ | bez. auf Wassertiefe |
| Fr _l | FROUDEsche Längen-Zahl = $v_s / (g \cdot l)^{0,5}$ | bez. auf Schiffslänge |
| g | Erdbeschleunigung | m/s ² |
| h | Wassertiefe | m |
| H | Wellenhöhe | m |
| H _P | Primärwellenhöhe | m |
| H _S | Sekundärwellenhöhe | m |
| H _{1/3} | Signifikante Seegangswellenhöhe | m |
| l | Schiffslänge auf Wasserlinie | m |
| L | Passierabstand vom Ufer | m |
| m | Böschungsneigung 1:m | - |
| n | Querschnittsverhältnis A/A _S | - |
| n _T | Teilquerschnittsverhältnis = $A_T / 0,5 \cdot A_S$ | - |
| P(x) | Unterschreitungshäufigkeit | % |
| Re | REYNOLDSzahl = $v_s \cdot l / \nu$ | - |
| R _{T,K} | Gesamtwiderstand eines Schiffes im Kanal | - |
| s _B | Bugstau / Schwallwelle | m |
| t | Schiffstiefgang | m |
| T | Wellenperiode | s |
| UKC | Under-Keel-Clearance = Kiefreiheit | m |
| v ₀ | Grundströmung in der Wasserstraße | m/s |
| v _R | Rückstromgeschwindigkeit | m/s |
| v _{RES} | resultierende Strömungsgeschwindigkeit | m/s |
| v _{S,üG} | Schiffsgeschwindigkeit über Grund * | m/s bzw. kn |
| v _{S,dW} | Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser * | m/s bzw. kn |
| Z _A | Absenk des Wasserspiegels | m |
| Δ | Differenzgröße | |
| ν | Kinematische Zähigkeit | m ² /s |

* kn = Knoten = Seemeile pro Stunde = 1,852 km/h = 0,51 m/s.

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der Hafen Emden kann auf eine sehr positiv verlaufende Umschlagsentwicklung insbesondere beim Umschlag von Massen- und Stückgut (Fahrzeuge und Zellulose) verweisen. In seiner Prognose für das Jahr 2025 geht PLANCO von einem Gesamtumschlag von rd.6,5 Mio. t aus. Analog hierzu lässt auch die Entwicklung der Schiffsgrößen auf der Außenems speziell im RoRo- und im Bulkverkehr ein kontinuierliches Wachstum erkennen. Nur ein Teil dieser Schiffe kann gegenwärtig tideunabhängig verkehren. Nach PLANCO ist die Zahl der tideabhängigen Fahrten von 182 in 2002 auf 323 in 2006 kontinuierlich angestiegen und hat sich damit innerhalb von vier Jahren nahezu verdoppelt. Das Land Niedersachsen und die Emdener Hafenwirtschaft streben daher eine Vergrößerung der Fahrwassertiefe für die Schifffahrt zum Emdener Hafen um mindestens einen Meter an und sind gegenüber dem BMVBS bereits am 26.02.2002 entsprechend initiativ geworden. Im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung nach den Grundsätzen und Kriterien der Bundesverkehrswegeplanung wurden zwischen 2006 und 2007 Ausbaualternativen auf der Grundlage nautischer, technischer, hydraulischer, wirtschaftlicher und ökologischer Anforderungen, Erfahrungen und Erkenntnisse mit abschließendem Vorschlag einer Vorzugs- bzw. Zielvariante erarbeitet. Im Ergebnis ist eine Vertiefung der Außenems um bis zu einen Meter in der ganzheitlichen Betrachtung verkehrlich begründet (nach [U4]).

Im Rahmen der Planungen für eine Vertiefung der Außenems bis Emden beauftragte das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Emden, Projektgruppe Projektsteuerung Tideems, die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im April 2009, neben weiteren umfangreichen Untersuchungen zur Ermittlung der Auswirkungen der Fahrrinnenvertiefung, die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen infolge der Vertiefung unter Berücksichtigung der zukünftigen Schiffstiefgänge zu ermitteln und zu begutachten.

Für eine Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen wird gemäß [U2] im Zusammenhang mit der Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) die Seeschifffahrtsstraße Außenems stromab der Hafeneinfahrt Emden (km 40,8) bis zur Nordsee (etwa km 100) betrachtet (Bild 1; Karte 10 aus [U2]).

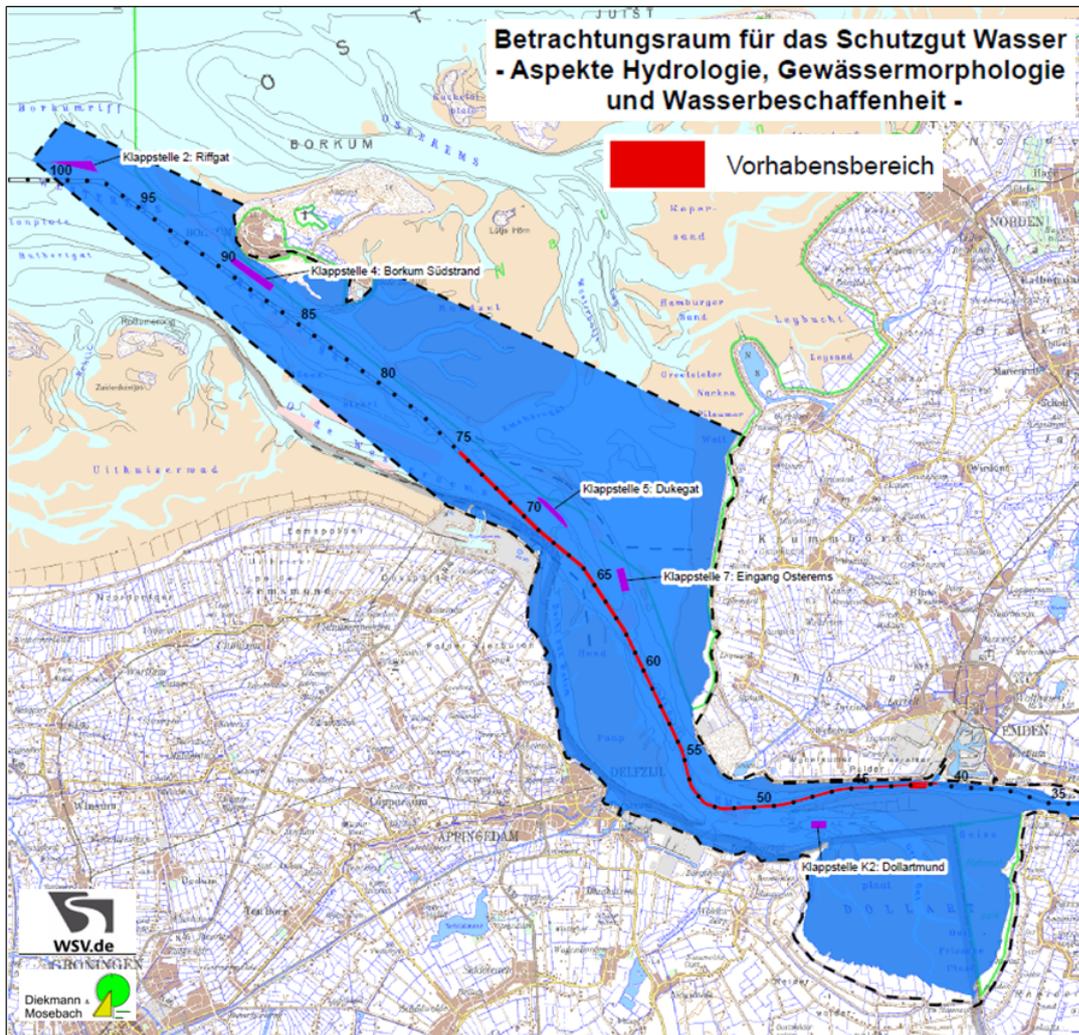


Bild 1: Betrachtungsraum für die Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Außenems (nach [U2])

Das vorliegende Gutachten behandelt ausschließlich die Untersuchungen zum Teilaspekt der schiffserzeugten Belastungen. In weiteren Gutachten der BAW werden u.a. die Teilaspekte Hydrodynamik, Transport und Seegang (BAW, 2012a) sowie Sturmfluten (BAW, 2012b) behandelt.

2 Unterlagen

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

- [U1] Vertiefung der Außenems bis Emden, Machbarkeitsuntersuchung für das Vorhaben, Projektgruppe Machbarkeitsuntersuchung zum Ausbau der Außenems Aurich, Februar 2008

- [U2] Vertiefung der Außenems bis Emden, Unterlage zum Scoping-Termin nach § 5 UVPG, WSA Emden, Projektgruppe Projektsteuerung Tideems Emden, im Oktober 2008
- [U3] Vertiefung der Außenems, Schiffserzeugte Wellen- und Strömungsbelastungen, Gutachten zur Erfassung des Ist-Zustandes, IMS Ingenieurgesellschaft, Bericht Nr. 90141-02 / 30.04.2010, Hamburg, 2010
- [U4] Vertiefung der Außenems bis Emden - Projektbeschreibung für das Vorhaben, WSD Nordwest / WSA Emden, Aktualisierung Juli 2012
- [U5] Wasserstände für Pegel im Bezirk des WSA Emden WSA Emden, Januar 2011
- [U6] Empfindliche Bereiche hinsichtlich schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen, IMS Ingenieurgesellschaft Hamburg, Juni 2010
- [U7] Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße - Einfluss einer lokalen Einingung um ca. 23 % – Systemversuche, Präsentation der BAW Hamburg, Juli 2011
- [U8] Aktualisierung der Nutzen-Kosten-Untersuchung einer Vertiefung der Außenems aus dem Jahre 2007, PLANCO Consulting GmbH, Essen 2012

3 Schiffserzeugte Belastungen

3.1 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. Tideströmung 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 im Gutachten der BAW zur geplanten Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe aufgearbeitet (BAW, 2006).

Die physikalischen Grundlagen werden im Folgenden nochmals zusammenfassend dargestellt.

3.2 Definition der kennzeichnenden Größen

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 in inhomogenen Seeschiffahrtstraßen sind gekennzeichnet durch

- den Bugstau s_B direkt am Schiffskörper,
- den Absunk z_A seitlich am Schiff,
- die Heckwelle H_P (auch Primärwelle) als Teil des durch den Absunk angeregten langperiodischen Primärwellensystems,
- 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 in Wechselwirkung zum Absunk,
- die durch die Heckwelle H_P verursachte Schwellströmung v_{HP} .

Die Wasserspiegeländerungen in tiefen- und seitenbegrenztem Fahrwasser, wie sich das Wellenbild für einen Betrachter darstellt, der am Ufer steht, sind als Längsschnitt schematisch in Bild 2 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.

Die resultierende schiffserzeugte Verdrängungs-(Rück-)strömung v_R ist mit weiteren Komponenten der schiffswelleninduzierten Strömungen v_{HP} und v_{HS} schematisch in Bild 3 dargestellt. Ausgewählte Einflussgrößen sowie die Grundlagen für die Berechnung des Teilquerschnittsverhältnisses n_T sind in Bild 4 anhand des Querschnitts einer Wasserstraße in einer stark überhöhten Skizze zusammengestellt.

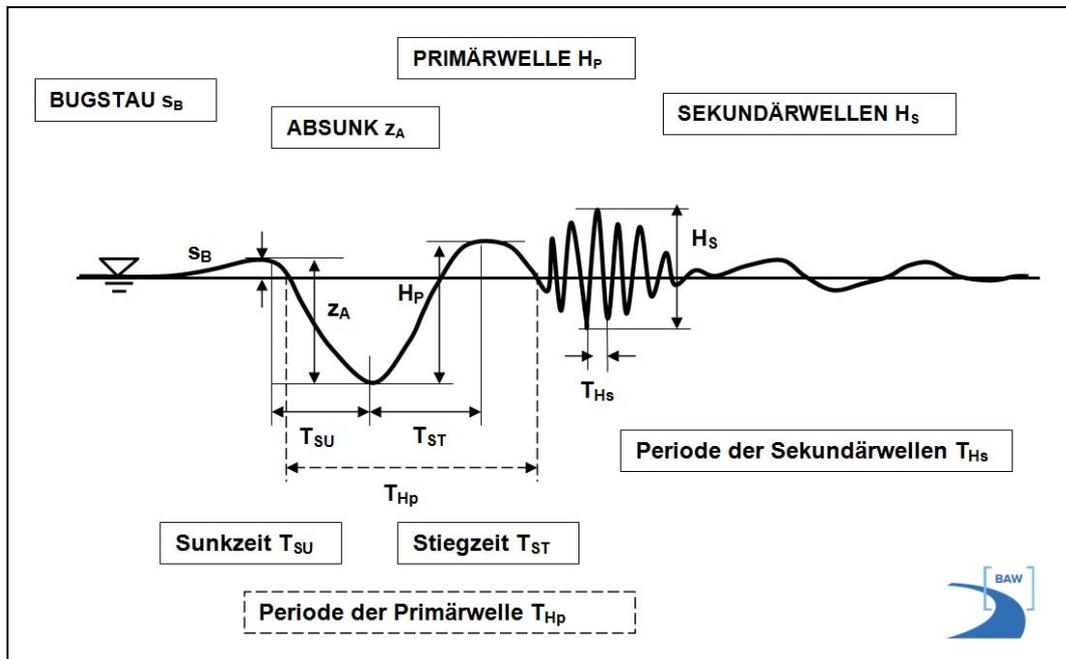


Bild 2: Seitliche Ansicht der Schiffswellensysteme

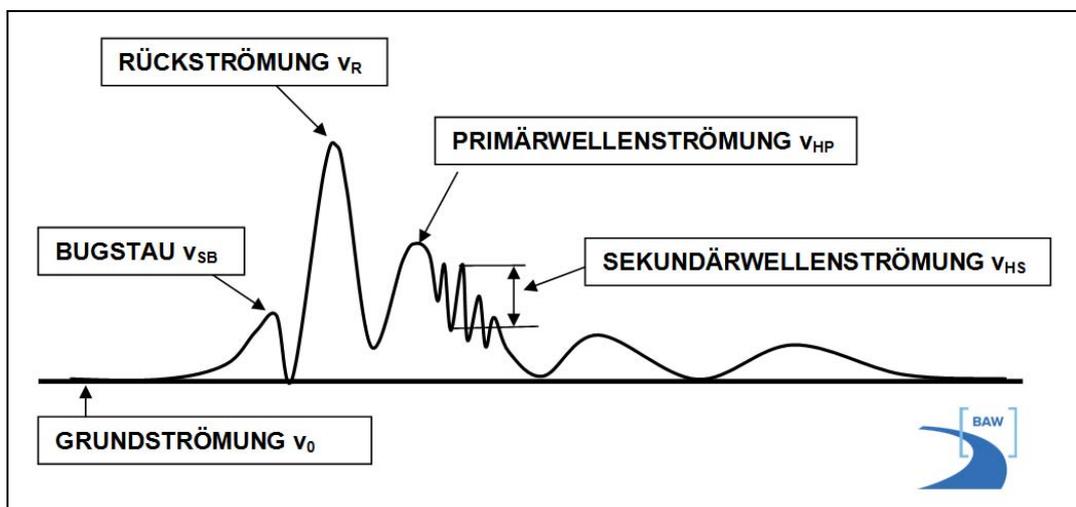


Bild 3: Resultierende schiffserzeugte Verdrängungsströmung (schematisch)

Die kurzperiodischen Sekundärwellen entstehen - in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und besonders der Schiffsförm - 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 Schiffsförm und ihre Überlagerungen sind u.a. bei SCHNEEKLUTH (1988) zu finden.

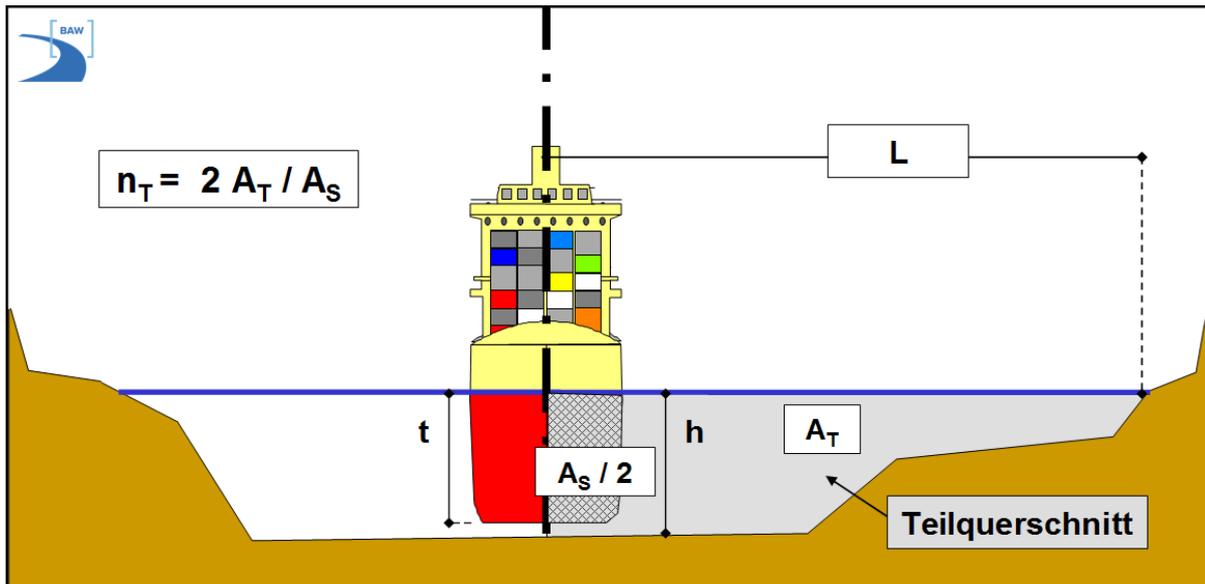


Bild 4: Darstellung des Teilquerschnitts einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussgrößen auf die schiffserzeugten Belastungen

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 , Völligkeitsgrad c_B),
- vom Gesamtwiderstand des Schiffes $R_{T,K}$, (Schiffsform),
- der Fahrwasserverhältnisse (Wasserspiegelbreite B , Sohlbreite B_S , Wassertiefe h , Querprofilform und -fläche A sowie Teilquerschnitt A_T , Uferform und Böschungsneigung 1:m),
- der Strömungsverhältnisse in der Wasserstraße v_0 (z.B. v_e oder v_f),
- sonstiger Einflüsse, wie z.B. Krümmungsradius, Driftwinkel, 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 ($n_T = A_T / 0,5 \cdot A_S$) 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 (Wel-

lenbeugung), Strömungsrefraktion und Shoaling (Wellenaufsteilen), Teilreflexion sowie durch Wellenbrechen und die entsprechende Energiedissipation beeinflusst. Im Lee von Bauwerken werden Umformungsprozesse wie Wellendiffraktion wirksam.

3.3 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
- Systemversuche im hydraulischen Maßstabsmodell

Die Bearbeitungsmethoden werden im Folgenden nach dem heutigen Stand von Technik und Wissenschaft (Juni 2012) zusammengefasst.

3.3.1 Empirische und analytische Berechnungsansätze

Theoretisch hergeleitete oder empirisch entwickelte Berechnungsansätze können aufgrund der begrenzten Anzahl von gewählten physikalischen Parametern die Wechselwirkung zwischen Wasserstraße und Schiffspassage für zusammengesetzte unregelmäßige Profile nur unzureichend beschreiben. Auch Bemessungsansätze, die für den Bereich der Binnenwasserstraßen hinreichend genaue Prognosen der schiffserzeugten Belastungen liefern (BAW, 2011), können u.a. aufgrund des Anwendungsbereichs auf Wasserstraßen mit vorwiegend parallelem Uferverlauf (prismatische Querschnitte) und auf Binnenschiffe üblicher Bauart nicht für eine Prognose in Seeschiffahrtsstraßen verwendet 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.

3.3.2 Numerische Berechnungsverfahren

Die BAW führte seit mehreren Jahren im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten (FuE) Untersuchungen zu numerischen Bearbeitung der Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße durch, die u.a. im Gutachten der BAW zur Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe (BAW, 2006) aufgearbeitet wurde.

Weitere FuE-Projekte der BAW in den letzten Jahren verdeutlichten, dass zur Berechnung der Hydrodynamik dreidimensionaler Körper (z.B. Seeschiffe) in einer inhomogenen dreidimensionalen Wasserstraße (z.B. Außenems) nur hochauflösende – Reibung berücksichtigende - numerische Berechnungsverfahren wie Finite-Volumen RANSE-Verfahren (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations) geeignet sind (GL, 2009). Deren Aussagegenauigkeit hinsichtlich einer quantitativen Prognose ist allerdings deutlich begrenzt, da sie u.a. aufgrund der erforderlichen Gitterauflösung schon bei deutlich vereinfachten Querprofilen mit einem erheblichen Rechenaufwand an die Grenzen ihrer Wirtschaftlichkeit stoßen.

Für Fragestellungen hinsichtlich der Ermittlung ausbaubedingter Änderungen schiffserzeugter Belastungen der Seeschiffahrtsstraßen, besonders für typische Schiffsgeschwindigkeiten tiefgehender Containerschiffe bei tideabhängiger Revierfahrt, ist die numerische Bearbeitung noch nicht als abgesicherte Methode gemäß anerkanntem Stand der Technik einzustufen.

3.3.3 Prognose auf Basis von Naturmessungen

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

Umfangreiche Messungen der BAW 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 allein auf der Basis von Naturmessungen sind nicht möglich.

3.3.4 Systemversuche im hydraulischen Maßstabsmodell

Untersuchungen im hydraulischen Maßstabsmodell nach den FROUDEschen Modellgesetzen und bei hohen REYNOLDS-Zahlen sind seit etwa einem Jahrhundert bei Modellversuchen, bei denen die Wirkung von Wellen und Strömungen 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 Versuchs in einem fachlich hinreichenden Modellmaßstab gewährleistet.

4 Methodisches Vorgehen

Das Untersuchungsgebiet im Rahmen der Vertiefung der Außenems bis Emden umfasst den Bereich zwischen Ems-km 40,8 (Hafeneinfahrt Emden) und etwa Ems-km 100 (Borkumriff) sowie die Nebenrinnen. Bei der Auftragsbearbeitung wurde nach folgendem Konzept vorgegangen:

- Beschreibung des Ist-Zustands
 - Analyse der Querschnittsverhältnisse Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße zur Abschätzung charakteristischer Abschnitte der Außenems.
 - Analyse von Naturmesskampagnen zur Erfassung der schiffserzeugten Belastungen im Ist-Zustand für die charakteristischen Abschnitte der Außenems.
 - Beschreibung von Wirkungsmechanismen und Belastungsprozessen auf potentiell betroffene Schutzgüter.
- Prognose ausbaubedingter Änderungen
 - Systemversuche im hydraulischen Maßstabsmodell mit ausgewählten Parameterstudien zur Abschätzung deren revierspezifischer Relevanz.
 - Analyse der Teilquerschnittsverhältnisse zur Herausarbeitung außergewöhnlicher Abschnitte und potentieller Betroffenheiten beidseits der Seeschiffahrtsstraße.
 - Abschnittsweise Betrachtung der Schiffsgeschwindigkeiten als wichtiges Belastungskriterium.
 - Gebietsabhängige Prognose und Bewertung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen für die Seeschiffahrtsstraße Außenems.

5 Beschreibung des Ist-Zustands

5.1 Charakteristische Querschnittsverhältnisse

Die Querschnittsverhältnisse n ($n = A / A_S$; mit A : Lokaler Wasserstraßenquerschnitt, A_S : Benetzter Hauptspantquerschnitt des Schiffs) wurden für ein derzeit verkehrendes PanMax-Schiff mit einem Völligkeitsgrad von $c_B = 0,6$ (z.B. Fahrzeugtransporter) und den maximal möglichen Tiefgängen entlang der Außenems von Emden bis etwa zur Nordsee bei tideabhängiger Fahrt (MThw_{2001/2010} [U5]) sowie bei tideunabhängiger Fahrt (MTnw_{2001/2010} [U5]) aufgetragen (Bild 5; Planerischer Soll-Zustand PS2).

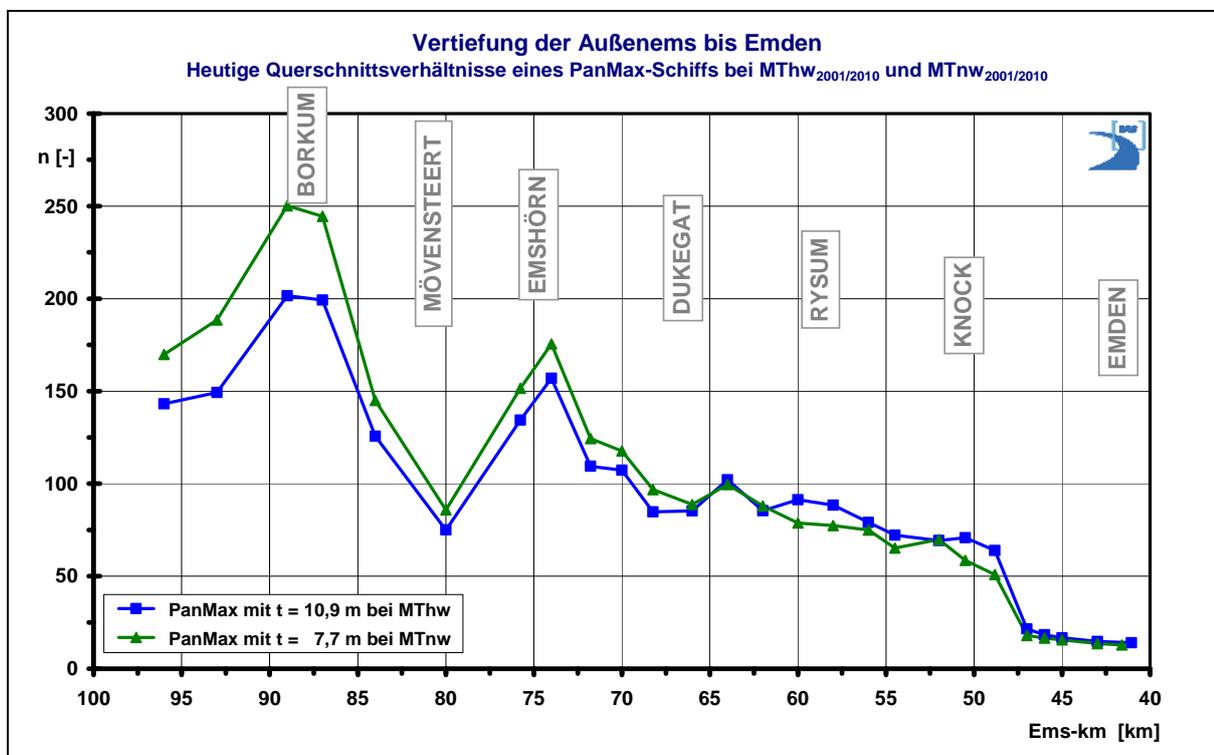


Bild 5: Querschnittsverhältnisse eines PanMax-Schiffs bei Tidehochwasser (MThw, $t = 10,9$ m) und bei Tideniedrigwasser (MTnw, $t = 7,7$ m)

Anhand der Querschnittsverhältnisse zeichnen sich entlang der Außenems von Emden bis zur See drei charakteristische Bereiche ab:

- Emders Fahrwasser
 - Zwischen dem **Hafen Emden und dem Leitdamm Seedeich** (ca. Ems-km 40 bis 48) ergeben sich Querschnittsverhältnisse für tiefgangsrelevante Fahrzeuge zwischen $10 < n < 20$.

- Innerer Ästuartrichter
 - Ungefähr vom **Knockster Watt bis etwa Dukegat** (ca. Ems-km 49 bis 68) weitet sich das Emsästuar derart auf, dass die Querschnittsverhältnisse für tiefgangsrelevante Fahrzeuge bei MThw und auch MTnw stetig zunehmend zwischen $50 < n < 100$ berechnet werden.
- Äußerer Ästuartrichter
 - Das äußere Emsästuar ab etwa **Emshörn bis zur Nordsee** (ca. Ems-km 70 bis 100) zeigt aufgrund der Sände und Platen sehr unstete Querschnittsverhältnisse z.B. mit etwa $150 < n < 180$ bei Emshörn, rund $75 < n < 85$ am Mövensteert (seewärts Ems-km 80) und über $n > 200$ vor Borkum.

Generell ist festzuhalten, dass seewärts des Emders Fahrwassers die Querschnittsverhältnisse der tiefgangsrelevanten Fahrzeuge sprunghaft auf Werte ansteigen, die im Vergleich zu den Seeschiffahrtsstraßen Elbe und Weser erst ab Cuxhaven bzw. seewärts der Leitdämme der Außenweser für die dort verkehrende Großschifffahrt maßgeblich sind (BAW, 2006a; BAW, 2006b).

5.2 Messungen in der Natur

Zur Beschreibung der schiffserzeugten Belastungen entlang des Emsästuars von Emden bis zur Nordsee wurde in den charakteristischen Abschnitten der Außenems vor dem geplanten Ausbavorhaben die Ingenieurgesellschaft IMS, Hamburg, vom WSA Emden mit der Erfassung der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen beauftragt. Die Messungen erfolgten im September / Oktober 2009 annähernd synoptisch an drei Lokationen entlang der Außenems über einen repräsentativen Messzeitraum von rund 8 Wochen und sind detailliert in [U3] beschrieben.

Die gewählten Lokationen (Bild 6; aus [U3]) liegen in charakteristischen Abschnitten der Außenems, so dass die schiffserzeugten Belastungen

- sowohl im engen Emders Fahrwasser (Lokation A; Ems-km 44,6),
- im Inneren Ästuartrichter am östlichen Ufer vom Paapsand / Hund (hier allgemein: Paapsand; Lokation B; Ems-km 61,2),
- als auch im Äußeren Ästuartrichter im breiten Fahrwasser vor Borkum (Lokation C; Ems-km 87,0) erfasst wurden.

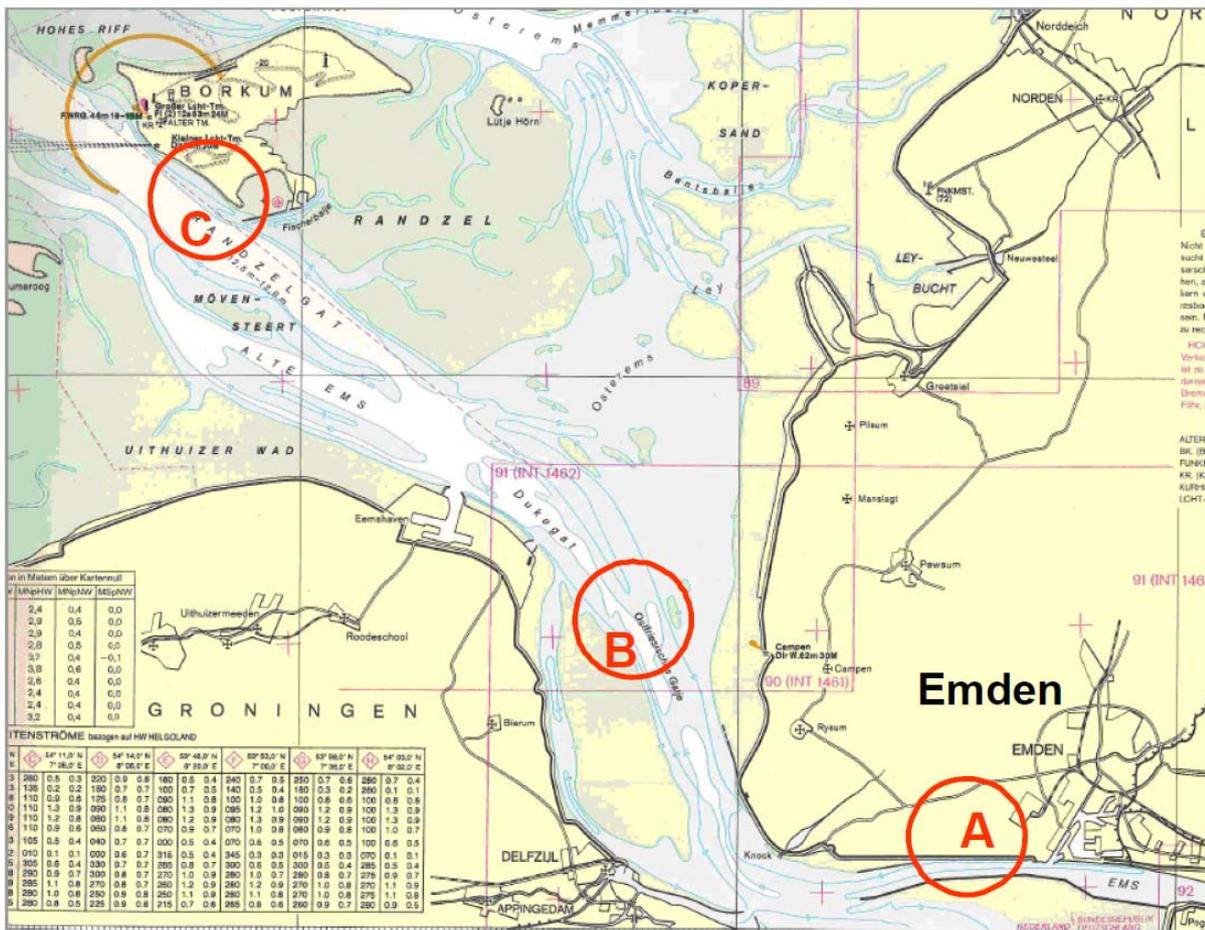


Bild 6: Revierübersicht mit Messlokalationen zur Erfassung der schiffserzeugten Belastungen (aus [U3])

Die Unterschreitungshäufigkeiten der im Untersuchungszeitraum erfassten schiffserzeugten Wellensysteme Absunk z_A , Primärwelle H_P und Sekundärwelle H_S sind für die drei Lokationen in Bild 7 bis Bild 9 zusammengestellt (nach [U3]):

- Die Unterschreitungshäufigkeit des **Absunks** z_A (Bild 7) zeigt an den gewählten Messorten einen sehr steilen Verlauf bis zu etwa ca. 70 % der Ereignisse. Im Emden Fahrwasser lagen rund 90 % aller Ereignisse unter $z_A < 0,15$ m, während bei Paapsand und vor Borkum aufgrund der größeren Querschnittsverhältnisse sogar ca. 95 % unter $z_A < 0,1$ m ermittelt wurden (lediglich 5% über $z_A > 0,1$ m). Die Maximalwerte lagen für A bei $z_{A,MAX} = 0,64$ m, für B bei $z_{A,MAX} = 0,38$ m und für C bei $z_{A,MAX} = 0,65$ m (aus [U3]).

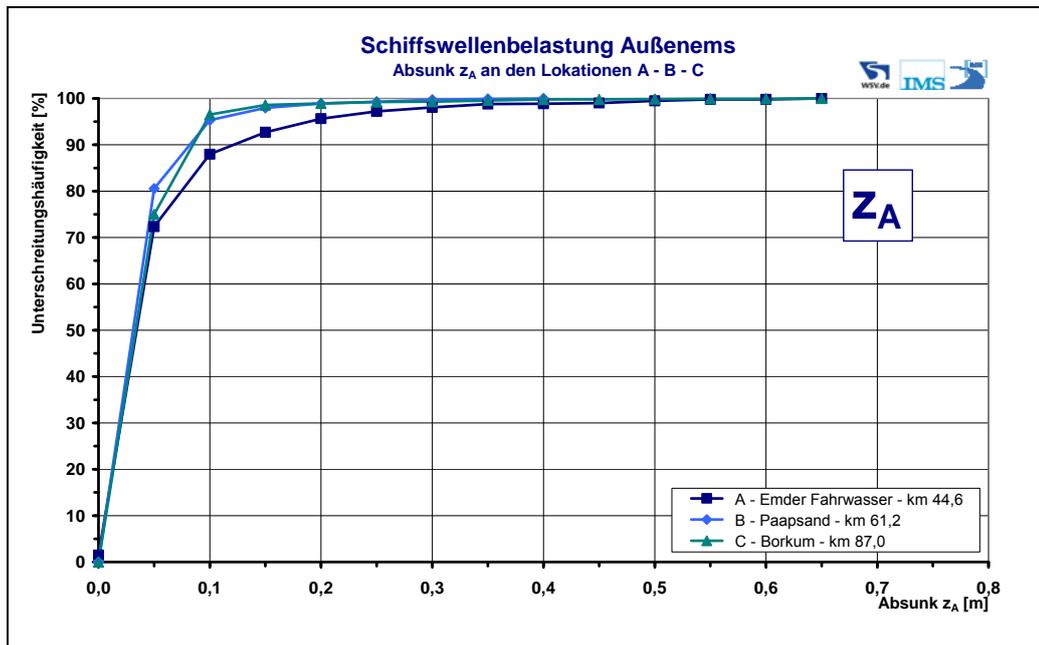


Bild 7: Unterschreitungshäufigkeiten des Absunks z_A in den Lokationen A Ender Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3])

- Die Analyse der **Primärwellenhöhe H_P** (Bild 8) zeigt bei den drei Lokationen einen etwa ähnlichen Verlauf der Unterschreitungshäufigkeit mit annähernd gleichen prozentualen Werten wie beim Absunk und mit Maximalwerten für A von $H_{P,MAX} = 0,57$ m, für B von $H_{P,MAX} = 0,45$ m und für C von $H_{P,MAX} = 0,71$ m (aus [U3]).

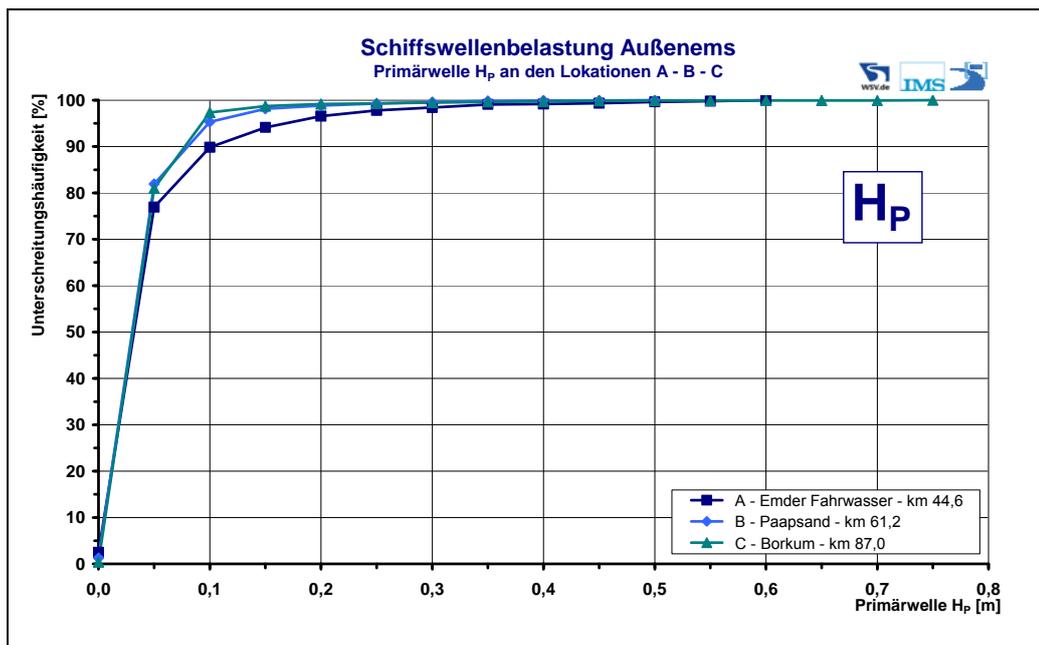


Bild 8: Unterschreitungshäufigkeiten der Primärwelle H_P in den Lokationen A Ender Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3])

- Die Unterschreitungshäufigkeit der **Sekundärwelle H_S** (Bild 9) zeigt an allen drei Lokationen einen ähnlichen Verlauf, wenn die schiffserzeugten Wellenereignisse für C (Borkum) auf Zeiträume eines Seegangs mit signifikanten Wellenhöhen von $H_{1/3} < 0,4$ m (s.u.) begrenzt werden. Im Emdener Fahrwasser lagen rund 95 % aller Ereignisse unter $H_S < 0,6$ m, während bei Paapsand und vor Borkum etwa 90 % unter $H_S < 0,6$ m registriert wurden. Die Maximalwerte erreichten an den Messlokationen A den Wert von $H_{S,MAX} = 1,04$ m, an B den Wert von $H_{S,MAX} = 1,23$ m und an C einen Wert von $H_{S,MAX} = 1,30$ m (nach [U3]).

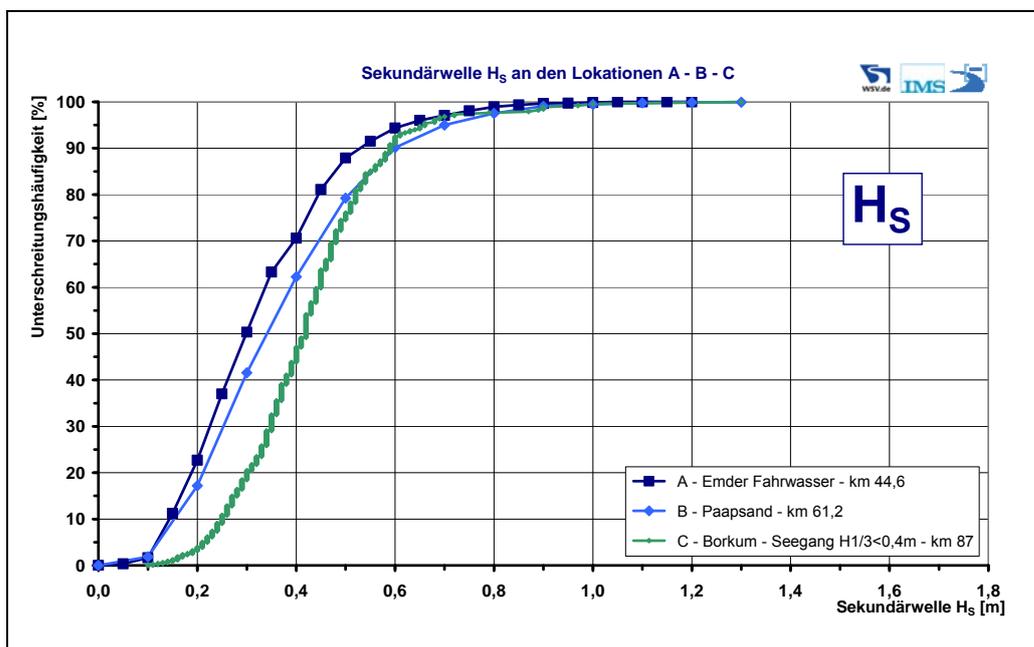


Bild 9: Unterschreitungshäufigkeiten der Sekundärwelle H_S in den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3])

Für die Unterschreitungshäufigkeiten an der Messlokation Borkum wurde nach [U3] eine Trennung nach den Ereignissen aus Seeverkehr und aus Insolverkehr auf Basis des registrierten Passierwinkels der Fahrzeuge zum Messpfahl vorgenommen. In den Grafiken von Bild 7 bis Bild 9 wurden für die Lokation C Borkum nur die separierten Ereignisse des Seeverkehrs verwendet, um nicht Schiffswellen von den nach Borkum-Hafen abbiegenden Fahrzeugen der Messposition C seewärts der Hafenzufahrt zuzuordnen (z.B. Wellen der Schnellfähren; nach [U3]).

Im gewählten Messzeitraum wurden nach [U3] an der Lokation C aufgrund ausgeprägter Westwindlagen bei einer Sturmflut am 03./04.10.2009 signifikante Wellenhöhen von $H_{1/3} = 2,1$ m ($H_{MAX} = 3,0$ m) gemessen, was eine Auswertung schiffserzeugter Wellen erschwerte und deutliche Auswirkungen auf die Analyse der kurzperiodischen Sekundärwellen hatte, da diese im allgemeinen Seegang nicht automatisch zu detektieren waren. In Kenntnis

der Revierbedingungen waren bei Sturmbedingungen für eine Analyse der kurzperiodischen Schiffswellen Seegangsgrenzen festzulegen, damit

- eine eindeutige Separierung von schiffserzeugten Sekundärwellen im allgemeinen Seegangsspektrum möglich,
- und eine hinreichende Anzahl der Ereignisse für eine repräsentative Stichprobe gewährleistet war.

Infolgedessen wurden die analysierten schiffserzeugten Ereignisse für die Lokation Borkum (C) auf Seegangskriterien unter $H_{1/3} < 0,4$ m limitiert (vergl. Bild 9). Damit entfielen für die Lokation Borkum rund 640 Ereignisse, die das Kriterium $H_{1/3} < 0,4$ m nicht erfüllten. Desgleichen wurde der höchste ausgewertete „schiffserzeugte“ Ereigniswert bei der Lokation Paapsand ($H_S = 1,72$ m) aufgrund von gemessenen Seegangseignissen von $H_{1/3} = 1,12$ m aus der Statistik gestrichen (Starke Nordwindlage am 16.10.2009; vergl. [U3]).

***ANMERKUNG:** Eine fachlich sichere Analyse kurzperiodischer schiffserzeugter Wellen in den äußeren Ästuaren ist bei höheren Seegangseignissen u.a. wegen annähernd gleicher Wellenperioden nicht möglich, wie schon von FÜHRBÖTER et al. (1988) und vom NLW (1989) festgestellt wurde. Weitergehende Analysen von IMS in [U3] zeigten, dass in seegangsdominierten Gebieten erst ab relativen Wellenhöhen von $H_S / H_{1/3} > 2,25$ der Einfluss der schiffserzeugten Wellen auf die Unterschreitungshäufigkeit aller kurzperiodischen Welleneignisse deutlich wurde. Da z.B. der Maximalwert eines Wellenspektrums den rund 1,8-fachen Wert der signifikanten Seegangswellenhöhe $H_{1/3}$ erreichen kann, war eine abgesicherte Detektierung von Schiffswellen in einem sturmgenerierten Seegangsspektrum (Frequenzanalyse) nach Stand der Technik nicht möglich und desgleichen waren die kurzperiodischen Sekundärwellen aus einer gemessenen Zeitreihe (Analyse im Zeitbereich) nicht mehr zu selektieren.*

Einen Überblick über die mittlere Unterschreitungswahrscheinlichkeit (< 50%), die 95 % Unterschreitungswahrscheinlichkeit und das Maximum der gemessenen schiffserzeugten Wellen nach [U3] an den Lokationen A Emden Fahrwasser (1.327 Ereignisse), B Paapsand (1.804 Ereignisse) und C Borkum (1.403 Ereignisse; für H_S : 759 Ereignisse) sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

| Alle Fahrzeuge | Ems | Absunk _{IST} | | | Primärwelle _{IST} | | | Sekundärwelle _{IST} | | |
|----------------|------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | | Z _A (50%) [m] | Z _A (95%) [m] | Z _{A,MAX} [m] | H _P (50%) [m] | H _P (95%) [m] | H _{P,MAX} [m] | H _S (50%) [m] | H _S (95%) [m] | H _{S,MAX} [m] |
| Lokation | [km] | | | | | | | | | |
| A | 44,6 | < 0,05 | < 0,2 | 0,64 | < 0,05 | < 0,2 | 0,57 | < 0,30 | < 0,6 | 1,04 |
| B | 61,2 | < 0,05 | < 0,1 | 0,38 | < 0,05 | < 0,1 | 0,45 | < 0,35 | < 0,7 | 1,23 |
| C | 87,0 | < 0,05 | < 0,1 | 0,65 | < 0,05 | < 0,1 | 0,71 | < 0,42 | < 0,65 | 1,30 |

Tabelle 1: Zusammenstellung der gemessenen schiffserzeugten Belastungen durch Absunk, Primär- und Sekundärwellen entlang der Außenems (nach [U3])

Um die größeren tiefgangsrelevanten Fahrzeuge hinsichtlich ihres Verhaltens im Revier gesondert betrachten zu können, wurden diese an allen Lokationen mit der Grenzbedingung $t > 7,5$ m aus der jeweilig gemessenen Stichprobe herausgefiltert. In dieser Stichprobe sind auch die entsprechenden bemessungsrelevanten, tideunabhängig ($t_{MAX} = 7,7$ m) und tideabhängig ($t_{MAX} = 10,9$ m) verkehrenden Schiffe enthalten. Die Grenzbedingung $t > 7,5$ m berücksichtigt dabei auch tideunabhängige Verkehre z.B. bei meteorologisch bedingten geringeren Tidewasserständen. Die Analyse der gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten bei der Passage von Fahrzeugen mit $t > 7,5$ m an den Lokationen Emders Fahrwasser, Paapsand und Borkum führte zu den in Bild 10 aufgetragenen Unterschreitungshäufigkeiten. Die mittels AIS* als Geschwindigkeit über Grund war mittels örtlicher Strömungsmessungen des WSA Emden in eine Geschwindigkeit durchs Wasser umgerechnet worden (nach [U3]).

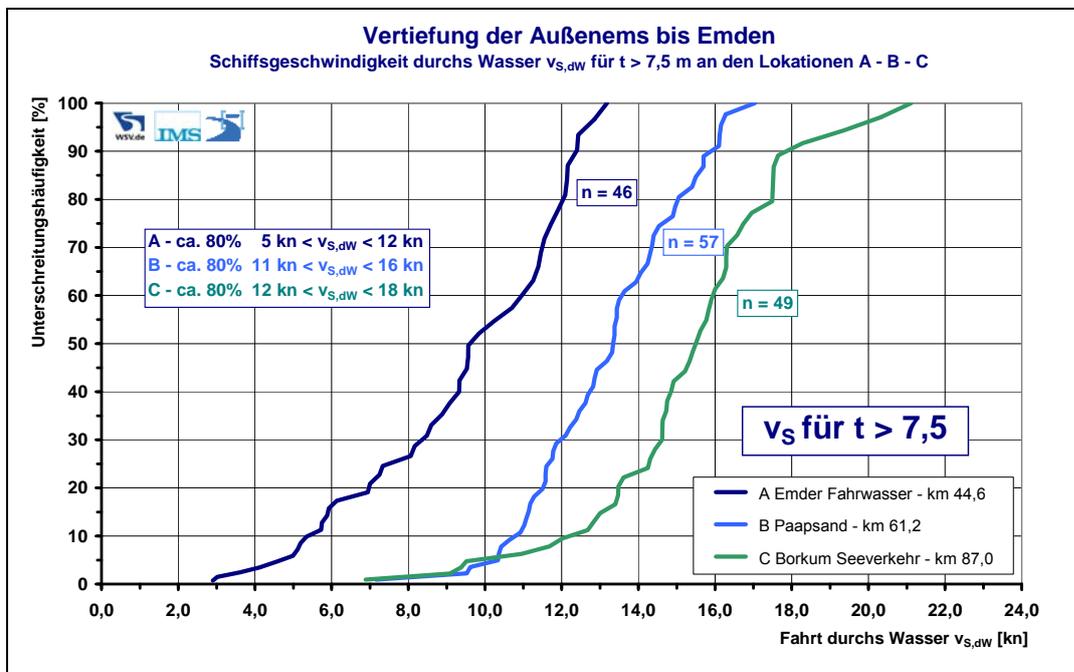


Bild 10: Unterschreitungshäufigkeiten der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_{S,dW}$ für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m an den Lokationen A Emders Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3])

Wird für Tiefgänger mit $t > 7,5$ m bei der Analyse der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser ein Geschwindigkeitsband von rund 80% der Passagen ($10\% < P(x) < 90\%$) sowie der lokale Maximalwert betrachtet, ergeben sich für die einzelnen Lokationen entlang der Außenems folgende Werte (vgl. Bild 10):

* AIS = Automatic Identification System = Schiffsidentifikationssystem, siehe u.a.: <http://www.bsh.de/de/Schifffahrt/Berufsschifffahrt/AIS-Schiffsidentifikationssystem/index.jsp>

- A Emder Fahrwasser: $5 \text{ kn} < v_{S,dW} < 12 \text{ kn}$ ($v_{S,dW,MAX} = 13,2 \text{ kn}$)
- B Paapsand: $11 \text{ kn} < v_{S,dW} < 16 \text{ kn}$ ($v_{S,dW,MAX} = 17,0 \text{ kn}$)
- C Borkum Seeverkehr: $12 \text{ kn} < v_{S,dW} < 18 \text{ kn}$ ($v_{S,dW,MAX} = 21,1 \text{ kn}$)

Das in der Natur gemessene Geschwindigkeitsprofil entlang der Außenems zeigt für tiefgangsrelevante Fahrzeuge mit $t > 7,5 \text{ m}$, dass die mittleren Schiffsgeschwindigkeiten dieser Fahrzeuge durchs Wasser (50%) an der Lokation A Emder Fahrwasser bei rund $v_{S,dW} \approx 9,6 \text{ kn}$, an der Lokation B Paapsand bei etwa $v_{S,dW} \approx 13,3 \text{ kn}$ und an der Lokation C Borkum Seeverkehr bei ca. $v_{S,dW} \approx 15,5 \text{ kn}$ lag.

Desgleichen wurden die Messdaten des schiffserzeugten Absunks z_A der einzelnen Lokationen hinsichtlich der Schiffe mit einem Tiefgang größer $t > 7,5 \text{ m}$ gefiltert und als Unterschreitungshäufigkeiten für die Lokationen Emder Fahrwasser, Paapsand und Borkum in Bild 11 aufgetragen.

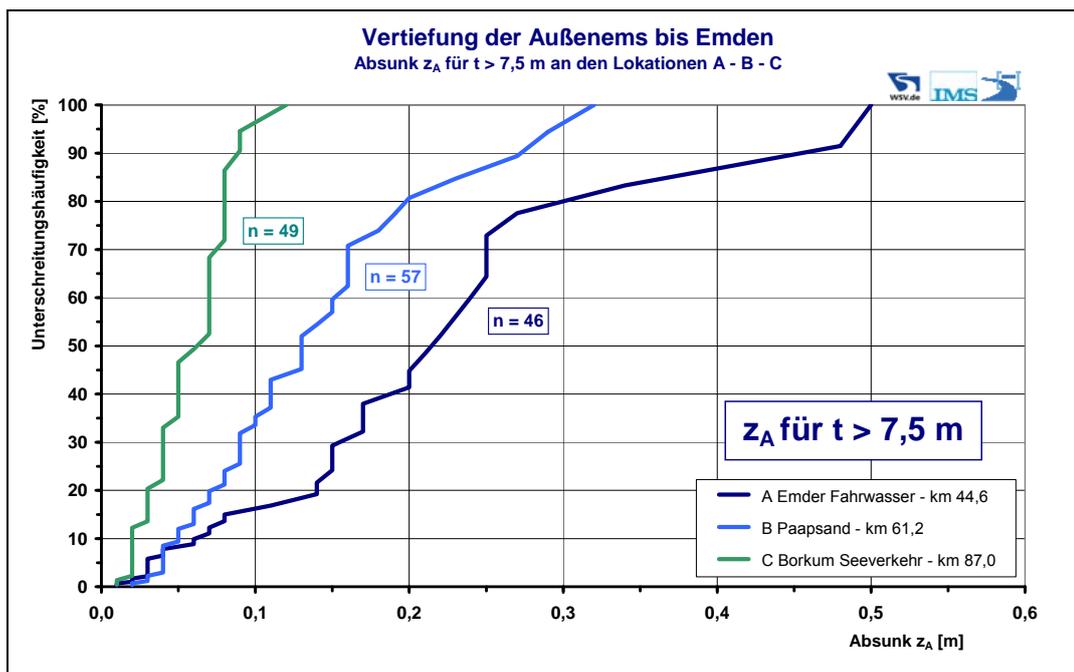


Bild 11: Unterschreitungshäufigkeiten des Absunks z_A für Fahrzeuge mit $t > 7,5 \text{ m}$ an den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum (nach [U3])

Für Passagen von heute schon tiefgangsrelevanten Fahrzeugen mit $t > 7,5 \text{ m}$ wurden folgende Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der lang- und kurzperiodischen Schiffswellenbelastungen an den Lokationen A Emder Fahrwasser (46 Ereignisse), B Paapsand (57 Ereignisse) und C Borkum (49 Ereignisse; für H_S : 27 Ereignisse) ermittelt (Tabelle 2):

| Fahrzeuge $t > 7,5 \text{ m}$ | Ems | Absunk _{IST} | | | Primärwelle _{IST} | | | Sekundärwelle _{IST} | | |
|----------------------------------|------|-----------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | Lokation [km] | Z_A (50%) [m] | Z_A (95%) [m] | $Z_{A,MAX}$ [m] | H_P (50%) [m] | H_P (95%) [m] | $H_{P,MAX}$ [m] | H_S (50%) [m] | H_S (95%) [m] |
| A | 44,6 | < 0,22 | < 0,5 | 0,50 | < 0,21 | < 0,45 | 0,48 | < 0,30 | < 0,55 | 0,68 |
| B | 61,2 | < 0,13 | < 0,3 | 0,32 | < 0,12 | < 0,30 | 0,31 | < 0,53 | < 0,92 | 1,05 |
| C | 87,0 | < 0,06 | < 0,1 | 0,12 | < 0,05 | < 0,1 | 0,13 | < 0,43 | < 0,80 | 0,90 |

Tabelle 2: Zusammenstellung der gemessenen schiffserzeugten Belastungen durch Absunk, Primär- und Sekundärwellen für Fahrzeuge mit $t > 7,5 \text{ m}$ entlang der Außenems (Bearbeitet nach [U3])

Zur Einordnung der Größenordnung der durch die tiefgangsrelevanten Fahrzeuge mit $t > 7,5 \text{ m}$ erzeugten schiffserzeugten Belastungen in die Gesamtstichprobe wurden die analysierten Maximalbelastungen nach [U3] hinzugezogen. Auf Basis der Einzelauswertung der 25 höchsten langperiodischen Ereignisse (Z_A sowie H_P) an den jeweiligen Messlokalationen war festzustellen, dass unter dem Kollektiv der höchsten Ereignisse im Emder Fahrwasser 12%, bei Paapsand 24% und bei Borkum dagegen keines der Fahrzeuge mit $t > 7,5 \text{ m}$ zu finden sind, also die tiefgangsrelevanten Fahrzeuge im Emder Fahrwasser und im inneren Ästuartrichter der Außenems prozentual auch an den höchsten langperiodischen schiffserzeugten Belastungen beteiligt sind (nach [U3], dort Anlagen 9,10,12).

Die 25 höchsten Schiffswellenereignisse an den jeweiligen Messlokalationen wurden des Weiteren nach Rückströmung v_R , Primärwellenströmung v_{HP} und Sekundärwellenströmung v_{HS} analysiert (vergl. Bild 3) und der Mittelwert der schiffserzeugte Strömungskomponenten dieses Kollektivs entlang der Außenems in Tabelle 3 zusammengestellt (aus [U3]).

| Lokation | Ems [km] | $v_{R,MITT}$ [m/s] | $v_{HP,MITT}$ [m/s] | $v_{HS,MITT}$ [m/s] |
|----------|-------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| A | 44,6 | 1,30 | 0,23 | 0,66 |
| B | 61,2 | 0,29 | 0,13 | 0,28 |
| C | 87,0 | 0,17 | 0,15 | 0,54 |

Tabelle 3: Zusammenstellung der mittleren schiffserzeugten Strömungsbelastungen v_R , v_{HP} und v_{HS} der 25 höchsten Schiffswellenereignisse an den Lokationen Emder Fahrwasser, Paapsand und Borkum (aus [U3])

5.3 Bewertung des Ist-Zustands

Zu den Querschnittsverhältnissen n (vergl. Bild 5) für ein derzeit verkehrendes PanMax-Schiff mit den maximal möglichen Tiefgängen entlang der Außenems von Emden bis etwa zur Nordsee bei tideabhängiger Fahrt (MThw_{2001/2010} [U5]) sowie bei tideunabhängiger Fahrt (MTnw_{2001/2010} [U5]; jeweils Planerischer Soll-Zustand PS2) enthält die Grafik in Bild 12 ein annähernd charakteristisches Geschwindigkeitsprofil über Grund für ein- und auslaufende bemessungsrelevante Fahrzeuge sowohl bei Tidehoch- und als auch bei Tideniedrigwasser (rechte rote Achse; nach [U1] und [U4]).

Zur Beschreibung der schiffserzeugten Wellenbelastungen der Außenems im Ist-Zustand werden zudem die vorgestellten Messungen in der Natur von 2009 (in [U3]) des Kapitels 5.2 hinzugezogen.

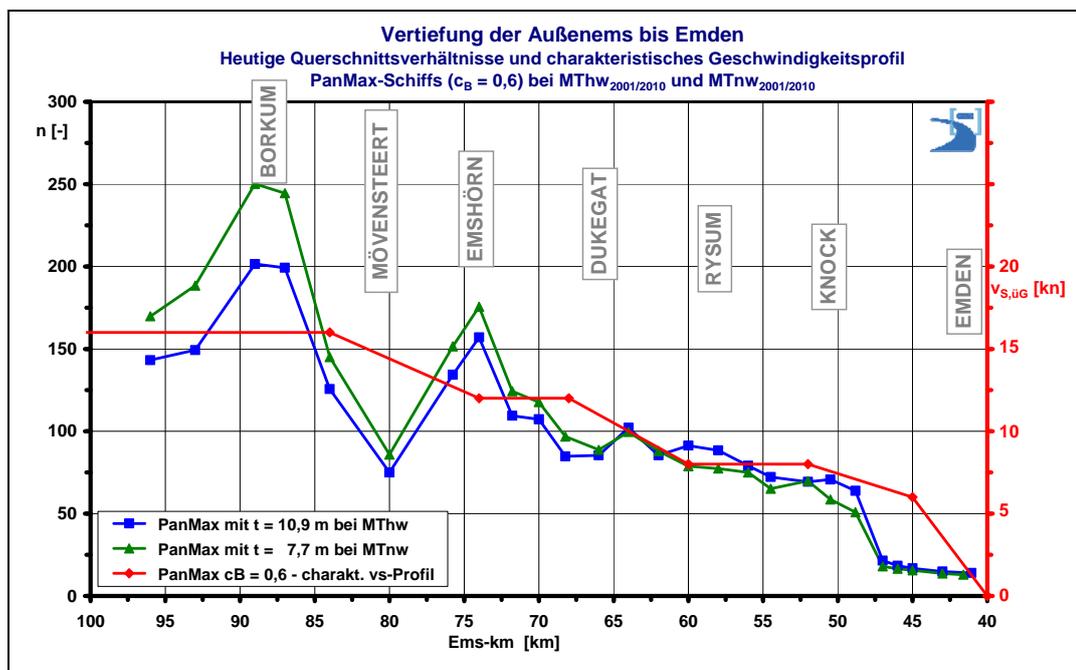


Bild 12: Querschnittsverhältnisse und charakteristisches Geschwindigkeitsprofil über Grund (nach [U1]) eines PanMax-Schiffs bei Tidehochwasser (MThw, $t = 10,9$ m) und bei Tideniedrigwasser (MTnw, $t = 7,7$ m)

Anhand der Querschnittsverhältnisse, des charakteristischen Geschwindigkeitsprofils und der gemessenen schiffserzeugten Belastungen zeichnen sich aus Sicht der Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße entlang der Außenems von Emden bis zur See für die drei charakteristische Bereiche folgende Zusammenhänge ab:

- Emden Fahrwasser
 - Zwischen dem **Hafen Emden** und dem **Leitdamm Seedeich** führten die Querschnittsverhältnisse für bemessungsrelevante Fahrzeuge zwischen $10 < n < 20$

aufgrund der geringen Geschwindigkeiten zwischen $0 \text{ kn} < v_S < 7 \text{ kn}$ zu geringen langperiodischen schiffserzeugten Belastungen ($z_A = H_P < 0,1 \text{ m}$) und lediglich rund 5 % kurzperiodischen Wellen über $H_{S,MAX} \approx 0,6 \text{ m}$.

- Infolge der geringen Schiffsgeschwindigkeit bemessungsrelevanter Fahrzeuge werden durch diese Fahrzeuge nur geringe Sekundärwellen erzeugt. Der allgemeine Schiffsverkehr mit geringerem Tiefgang kann allerdings zu schiffserzeugten kurzperiodischen Sekundärwellen bewirken, die als maßgebliche Belastung für Ufer und Strombauwerke anzusehen sind. Diese liegen mit rund 5 % bei Werten zwischen $0,6 \text{ m} < H_S < 1,0 \text{ m}$, was bei der derzeitigen Bemessung der Deckschichten von Bühnen, Leitdämmen und Deckwerken keine nennenswerte Schäden bewirkt hatte.
- Innerer Ästuartrichter
 - Ungefähr vom **Knockster Watt bis etwa Dukegat** weitet sich das Emsästuar stetig zunehmend zwischen $50 < n < 100$ auf.
 - Da neben den Querschnittsverhältnissen auch das charakteristische Schiffsgeschwindigkeitsprofil von ca. $v_S \approx 8 \text{ kn}$ bis auf rund $v_S \approx 12 \text{ kn}$ zunimmt, liegen die schiffserzeugten Belastungen annähernd in der gleichen Größenordnung wie im Emders Fahrwasser. Dies gilt auch für die ohne Tiefgangsrestriktion verkehrende Schifffahrt (vergl. [U3]).
 - Die Messungen in der Natur bei Paapsand / Hund machten deutlich, dass bei bestimmten Windrichtungen (z.B. Wind aus Nord) auch im inneren Ästuartrichter mit erhöhtem Seegang zu rechnen ist, der zu einer Überlagerung mit den schiffserzeugten kurzperiodischen Sekundärwellen führen kann. Erst bei einem deutlich größeren Verhältnis von $H_S / H_{1/3} > 2,2$ ist ein Einfluss von Schiffswellen feststellbar (nach [U3]).
- Äußerer Ästuartrichter
 - Das äußere Emsästuar ab etwa **Emshörn bis zur Nordsee** weist aufgrund der Sände und Platen hohe aber sehr unstete Querschnittsverhältnisse auf.
 - Trotz der größeren Querschnittsverhältnisse ist derzeit aufgrund des charakteristischen Geschwindigkeitsprofils mit einem Anstieg von $v_S \approx 12 \text{ kn}$ bis auf rund $v_S \approx 16 \text{ kn}$ mit einer Verdopplung des Anteils der langperiodischen schiffserzeugten Belastung von 5% über $z_A \approx H_P > 0,1 \text{ m}$ auf etwa 10% gegenüber dem Emders Fahrwasser bzw. dem inneren Ästuartrichter zu rechnen (vgl. [U3]).
 - Das äußere Emsästuar ist bei starken Windereignissen als „seegangsdominiert“ zu bezeichnen, was z.B. während der Messkampagne vom September/Oktober 2009 dazu führte, dass nur etwa 54% der kurzperiodischen Schiffswellenereignisse des Referenzzeitraums annähernd gesichert analysiert werden konnten.

Obwohl für die tiefgangrelevanten Fahrzeuge seewärts des Emders Fahrwassers etwa gleiche Schiffsgeschwindigkeiten wie auf den Seeschiffahrtsstraßen Elbe und Weser (BAW, 2006a; BAW, 2006b) gemessen wurden, lag der Anteil der schiffserzeugten Belastungen über $z_A \approx H_P > 0,1$ m sowie $H_S > 0,6$ m lediglich unter 10% der gemessenen repräsentativen Ereignisse (z.B. Außenweser bei Imsum fahrrinnennah ca. 30% über $z_A \approx H_P > 0,1$ bzw. über $H_S > 0,6$ m; BAW, 2006a).

Auf Grundlage der Betrachtung des Ist-Zustands ist die schiffserzeugte Belastung der Außenems bis Emden im Vergleich zu den Seeschiffahrtsstraßen Elbe und Weser als relativ gering einzustufen.

5.4 Beschreibung der Wirkungsmechanismen

5.4.1 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 (u.a. BAW, 2006b).

Im äußeren und inneren Ästuartrichter sind bei erhöhten Wasserständen am Deich (z.B. Sturmfluten) die langperiodischen schiffserzeugte Belastungen wegen des dann für die Schiffe deutlich höheren Querschnittsverhältnisses nachrangig gegenüber den ohnedies wirkenden Belastungen aus Wasserstand und Windwellen. An diesen seegangsdominierten Abschnitten der Seeschiffahrtsstraße Ems sind zudem die schiffserzeugten, kurzperiodischen Sekundärwellen innerhalb des dann anstehenden Seegangsspektrums nicht abgesichert zu detektieren, wie im Kapitel 5.2 dargestellt ([U3], vgl. FÜHRBÖTER et al., 1988; NLW, 1989;).

5.4.2 Wattgebiete, Sände und natürliche Ufer

Die Neigung von natürlichen, unbefestigten Ufern und Sänden 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. In der Außenems betragen die Böschungsneigungen lediglich im Emden Fahrwasser, am Süd-Westrand des Gatjebogens und bei Eemshaven etwa 1:6. Im Allgemeinen liegt die Neigung der Unterwasserböschungen zwischen 1:10 und 1:50 sowie deutlich darüber. 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. BAW, 2006a).

Mögliche betroffene Sände mit Bewuchs (u.a. Seegras- und Muschelbestände) sind in Auszügen einer Karte der Außenems bis Emden rot markiert (Bild 13; nach [U6]), wobei anzumerken ist, dass aufgrund des Passierabstands die im Dollart hervorgehobenen Bereiche keinen Belastungen durch die Schiffe unterliegen, die auf der Außenems oder im Emden Fahrwasser verkehren (mehrfache Energiedissipation durch Diffraktion und Refraktion).

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. Die Sekundärwellen wandeln ihre Energie u.a. als Schaumkronenbrecher durch Turbulenzeintrag in den Wasserkörper um.

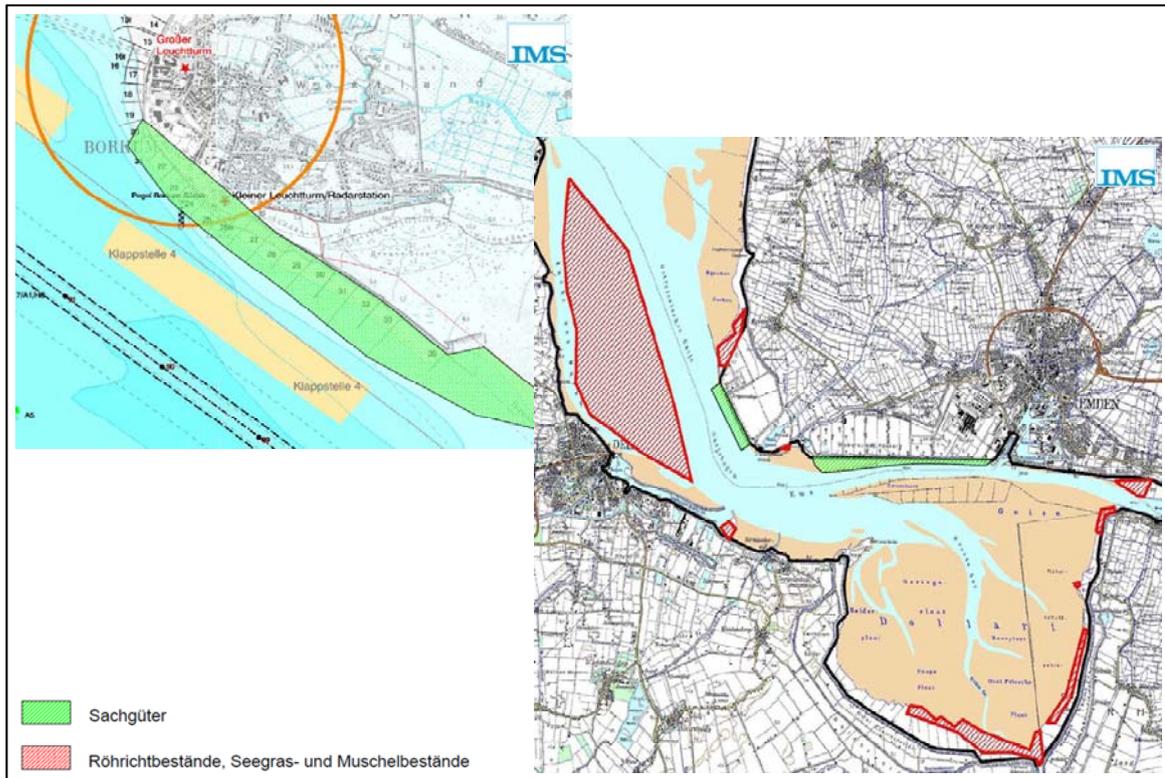


Bild 13: Potentielle Betroffenheiten hinsichtlich schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen (nach [U6])

Bei nur *geringer Überdeckung* des Watts brechen die kurzperiodischen Wellen im Bereich der Wattkante. Auf den überdeckten Bereichen des Wattgebiets treten zu Beginn des Abzugs hohe Strömungsgeschwindigkeiten durch das ablaufende Wasser auf. Je nach Tidewasserstand, Schiffsgröße, Schiffsgeschwindigkeit u.a.m. kann das Wasser bis zum Trockenfallen des gesamten Wattgebiets abströmen. Nach Passage des Schiffs läuft die Heckwelle je nach Neigung des Unterwasserstrands bei entsprechend hohen Energieumwandlungsprozessen als Schwall- oder Sturzbrecher auf das Watt auf. Die kurzperiodischen Sekundärwellen können in Abhängigkeit des Passierabstands die lange Primärwelle überlagern und dem Wellenbrechen weitere Energie zuführen.

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

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

5.4.3 Bauliche Anlagen

Baulichen Anlagen, die aufgrund der Querschnittsverhältnisse und des Abstands zur Fahr-
rinne durch schiffserzeugte Belastungen betroffen sein könnten, sind zwischen Emden und
der Nordsee im Wesentlichen das Emspier sowie das Entwässerungsbauwerk Siel Knock,
der Geiseleitdamm, der Leitdamm Seedeich, das Leitwerk Borkum Fischerbalje sowie die
Buhnen im Emden Fahrwasser, seewärts des Siel Knock und am Westrand von Borkum.
Mögliche betroffene Sachgüter sind in Auszügen einer Karte der Außenems bis Emden grün
markiert (Bild 13; nach [U6]).

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 wie der Emspier
liegenden großen Schiffseinheiten ist deren "Angriffsfläche" und der Hauptspantquerschnitt
des Vorbeifahrers etwa linear anzunehmen. Die Passiergeschwindigkeit ist etwa quadratisch,
der Passierabstand als Funktion höherer Potenz anzusetzen (vergl. BAW, 2006b). Diese
Aussagen betreffen Kanalfahrtbedingungen mit Passierabständen von im Mittel 100 m zum
Liegeplatz. Es ist davon auszugehen, dass für vertäute große Schiffe kurzperiodische Belas-
tungen durch Sekundärwellen aufgrund ihrer Eigenfrequenz nicht wirksam werden, dagegen
schiffserzeugte langperiodische Anteile in Abhängigkeit beider Schiffslängen (Festlieger und
Vorbeifahrer) auf die Trossen wirken. Die Trossenkräfte sind wiederum abhängig von der
Amplitude des Absunks, dieser u.a. von der Passiergeschwindigkeit. Im Bereich der Emspier
wird die Manövriergeschwindigkeit großer Fahrzeuge noch unter $v_s < 6$ kn liegen.

Auf die mechanisch beweglichen Anlagen von Entwässerungsbauwerken (Sielen) an engen
Wasserstraßen wirkt die schiffserzeugte instationäre Wasserdruckdifferenz infolge Bugstau,
Absunk und Primärwelle, also die langperiodischen Wasserspiegelschwankungen, sowie die
durch das Wasserspiegelgefälle einsetzende Strömung in Bauwerksachse. Ein Problem
kann das Schlagen von Sieltoren und von nicht exakt fixierten Sperrtoren darstellen. Diese
Belastungen der Anlagen sind abhängig von den Binnen- und Außenwasserständen sowie
von der Amplitude der langperiodischen schiffserzeugten Wasserspiegeländerungen.

Das Siel Knock entwässert das Niederschlagswasser über Pumpen und Hubtore (Entwässe-
rungsverband Emden, 2012), so dass die für Stemmtore geltenden Belastungen nicht auftre-
ten. Der Abstand der Fahrrinne zum Siel Knock beträgt zudem etwa 1.600 m, so dass auf-
grund des Passierabstands bei Querschnittsverhältnissen selbst größter Fahrzeuge über

$n > 50$ (vergl. Bild 5) nicht mit messbaren schiffserzeugten Belastungen des Sielbauwerks zu rechnen ist.

Bauliche Anlagen wie Leitdämme und Buhnen sind in ihrer kurzperiodischen Wellen- und Strömungsbelastung wie Deckwerke zu betrachten. Bei Wasserständen über Niveau der Bauwerkskrone können große und tiefgehende Schiffe durch ihr langperiodisches Primärwellensystem (Absunk und Primärwelle) Überströmungsprozesse bewirken, die zu Schäden an den Strombauwerken führen könnten. Derartige Schäden wurden allerdings vom zuständigen WSA Emden bisher nicht festgestellt (WSA Emden, Sept. 2011, *unveröffentlicht*).

Bei an Wasserstraßen angeschlossenen Hafenbecken wirken die kurzperiodischen Sekundärwellen wie winderzeugter Seegang, der sich entsprechend den Wellenausbreitungs- und Wellenumformungsprozessen (Diffraktion, Reflexion u.a.) verhält und dessen Amplitude im Hafenbecken durch dessen konstruktive Ausbildung beeinflusst wird. Einen wesentlichen Einfluss auf die Wellenamplituden der langperiodischen Anteile der Schiffswellen in den Hafenbecken haben die Beckengröße, die Öffnungsbreite und die Beckenform. Die in der Wasserstraße erzeugte Ausgangswellenhöhe wirkt sich demnach in der Hafenanlage geringer aus bei größeren Becken, bei deutlich kleineren Öffnungsbreiten sowie bei einer breiteren Beckenform gegenüber langgestreckten Becken (vergl. BAW, 2006b).

Bei den überwiegend geringen Ausgangssignalen der schiffserzeugten, langperiodischen Wellen in der Fahrrinne selbst ($> 95\%$ von $z_A \approx H_P < 0,2$ m nach [U3]; vergl. z.B. Bild 7) und den Abständen der Fahrrinne zu den Hafeneinfahrten an der Außenems (z.B. Ems-km 73,5: Eemshaven ca. 1.300 m) werden derartige schiffserzeugte Belastungen innerhalb den Hafenanlagen im Rahmen der Messgenauigkeit liegen. Lediglich der Werkshafen auf Niederländischer Seite bei Ems-km 68,6 (Doekegat Werkhaven, nördlich der Emscentrale) liegt mit ca. 600 m nahe an der Fahrrinne, so dass schon heute - im Einzelfall - langperiodische, schiffserzeugte Strömungsbelastungen in der Hafeneinfahrt nicht auszuschließen sind.

5.4.4 Sport- und Kleinschifffahrt

Das Maß der Beeinflussung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs für die Sport- und Kleinschifffahrt 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 Sportschifffahrt und kurze Fahrzeuge (u.a. Rollen, Stampfen). Hohe Sekundärwellen ($H_S > 0,5$ m), die sich zudem bei einer Ausbreitung gegen die Strömung aufteilen, sind dadurch noch "störender" für Kleinfahrzeuge von 5 m bis 10 m Länge. Die langperiodischen Wasserspiegeländerungen wirken sich mehr bei Fahrzeugen wie z.B. Fahrgast- oder 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 Fahrinnenrands verkehrenden Sport- und Kleinschiffahrt und deren durch die geringere Kielfreiheit möglicherweise beeinträchtigte Manövrierbarkeit zu berücksichtigen.

Die schiffserzeugte Rückstromgeschwindigkeit im Nahbereich von z.B. großen Fahrzeugtransportern 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. von Schiffen auf Reede erhöht.

5.4.5 Marine archäologische Kulturgüter

Sind im Bereich der Außenems marinearchäologische Kulturgüter vorhanden, sind diese im Fahrwasser im Wesentlichen durch die schiffserzeugten langperiodischen Belastungen (Absunk, Primärwelle, Verdrängungsströmung) betroffen. In flacheren Seitenbereichen des Ästuars können auch kurzperiodische Sekundärwellen durch ihre Orbitalströmung wirksam werden. Das Maß der Belastung ist u.a. abhängig vom Abstand zur Fahrrinne und von der Schiffsgeschwindigkeit des Durchgangsverkehrs. Hinweise auf alte Schiffswracks gibt es in der Nähe von Eemshaven (nach [U2]).

5.4.6 Fahrrinne und Unterwasserböschungen

Die Fahrrinne eines Ästuars wird maßgeblich durch die langperiodische Druckänderung des Primärwellensystems und die damit einhergehende schiffserzeugte Rückstromgeschwindigkeit belastet. Bei der Passage großer Fahrzeugtransporter mit $n < 20$ im Emders Fahrwasser können an den Fahrinnenrändern in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit Rückstromwerte etwa in der Größenordnung der maximalen gemessenen Tidedrömung auftreten ($v_{MAX} \approx 0,8 - 1,7$ m/s; aus [U3]; vergl. Tabelle 3). Somit kann z.B. bei Fahrt gegen die Tide für die Dauer der maximalen Rückstromgeschwindigkeit in der Fahrrinne des Emders Fahrwassers eine schiffserzeugte, kurzzeitige Verdopplung der lokalen, tidebedingten Strömungsgeschwindigkeit eintreten.

Die Auswirkungen der vertikalen Verteilung der Verdrängungsströmung zwischen einem tiefgehenden Seeschiff mit geringer UKC und der 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 Sedi-mentkonzentration sind aus den bisherigen Messungen nicht abzuleiten.
- Bei der Fahrt eines Schiffs sind Schraubenstrahl und Nachstromfeld hinsichtlich der Belastung der Fahrinnensohle 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 – nach Stand der Technik die Wirkung von Schraubenstrahl und Nachstromfeld gegenüber der Belastung durch die Rückstromgeschwindigkeit als nachrangig zu werten (BAW, 1999). Erste Forschungsprojekte mit Beteiligung der BAW und nationalen wie internationalen Partnern sind in der Beantragungphase.

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

5.4.7 Nebenrinnen und Priele

Zur Belastung der Nebenrinnen und Priele wurden von der BAW am Beispiel von Messungen im Elbeästuar Aussagen hergeleitet (vergl. BAW, 2006b), die auch auf Nebenrinnen, Hafenzufahrten und Priele des Emsästuars übertragen werden könnten. Das schiffserzeugte langperiodische Primärwellensystem mit Bugstau, Absunk und Primärwelle konnte sich im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit der Tidephase nahezu ungedämpft in einem kleinen Nebenfluss ausbreiten. Die langperiodischen physikalischen Vorgänge können prinzipiell auch in zur Fahrrinne exponiert liegenden Hafenzufahrten, Außentiefs, schmalen, tieferen Nebenrinnen und Prielen der Außenems ablaufen.

Bei den vorwiegend geringen Ausgangssignalen in der Fahrrinne selbst und den Abständen der Fahrrinne zu den Mündungen von Nebenrinnen können derartige Ausbreitungsprozesse nicht ausgeschlossen werden, auch wenn bei 95% Unterschreitungswahrscheinlichkeit die Werte lediglich $z_A \approx H_P < 0,2$ m betragen (nach [U3]; vergl. z.B. Bild 8). Betroffen wären z.B. bei Ems-km 51 der Zeehavenkanaal Delfzijl und bei Ems-km 86,5 die Zufahrt zum Schutzhafen Borkum (Fischerbalje) mit Abständen von jeweils ca. 1.000 m. Derartige schiffserzeugte langperiodische Belastungen werden allerdings im Verlauf der Zufahrten und Nebenrinnen der Außenems nur mit erhöhtem Aufwand nachweisbar sein.

6 Systemversuche im hydraulischen Modell

6.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Eine gesicherte, quantitative Prognose ausbaubedingter Änderungen schiffserzeugter Belastungen in unregelmäßigen Wasserstraßenprofilen ist - wie in Kapitel 3.3 dargelegt - derzeit nur auf Basis von hydraulischen Versuchen in hinreichendem Modellmaßstab möglich. In dem hydraulischen Modell - hier mittels Systemversuchen - sind möglichst alle diejenigen Parameter zu untersuchen, die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugte Belastungen zur Folge haben können.

Allgemein ausgedrückt kann sich die Belastung einer Seeschiffahrtsstraße ändern

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

Basis für eine abschnittsweise Beurteilung von einerseits möglichen und andererseits örtlich wirksamen ausbaubedingten, tiefgangsabhängigen Änderungen in der Außenems bis Emden sind Systemversuche in einem hydraulischen Maßstabsmodell. In den folgenden Kapiteln werden die physikalischen Voraussetzungen (u.a. Modellgesetze) und Randbedingungen sowie die Ergebnisse der verschiedenen Parameterstudien vorgestellt.

6.2 Hydraulisches Maßstabsmodell

6.2.1 Modellgesetze

Die Naturähnlichkeit eines hydraulischen Modells zur Simulation von Schwerewellen und Strömungen ist gewährleistet, wenn im Modell und in der Natur das Verhältnis der Trägheitskräfte gleich ist (FROUDEsches Modellgesetz; vergl. auch BAW, 2006a). Dieses Verhältnis wird im Schiffbau durch die dimensionslose FROUDEsche Längen-Zahl Fr_l , hier das Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zur Wurzel aus der Schiffslänge und Erdbeschleunigung, ausgedrückt:

$$Fr_l = v_s / (l \cdot g)^{0,5} \quad (1)$$

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

Bei den aktuellen Untersuchungen zur schiffserzeugten Belastung auf Basis von Systemversuchen betrug diese FROUDEsche Zahl

$$Fr_l = 0,04 \text{ bis } 0,14$$

(z.B. PanMax-Schiff $c_B = 0,6$ mit $v_s = 4,3 \text{ kn}$ bis $v_s = 12,7 \text{ kn}$, $l = 280 \text{ m}$).

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

Für die dimensionslose, Tiefen bezogene FROUDEsche Zahl Fr_h als Kenngröße für die unterkritische, kritische oder überkritische Schiffsgeschwindigkeit in einer Wasserstraße wird die Schiffslänge l in Gleichung (1) durch die Wassertiefe h ersetzt. Die Systemversuche wurden - wie in der Seeschifffahrt bei z.B. Massengutschiffen üblich - im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich ($Fr_h < 1$) gefahren. Dementsprechend lagen die FROUDEschen Tiefen-Zahlen bei:

$$Fr_h = 0,19 \text{ bis } 0,70$$

(z.B. PanMax-Schiff $c_B = 0,8$ mit $v_s = 7,0 \text{ kn}$ bis $v_s = 12,3 \text{ kn}$, $h = 13,7 \text{ m}$).

Die REYNOLDSzahl Re beschreibt den Einfluss der Zähigkeit, gibt Grenzbedingungen hinsichtlich der Naturähnlichkeit der turbulenten Strömungsprozesse vor. Die REYNOLDSzahl beschreibt das Verhältnis von Schiffsgeschwindigkeit und Schiffslänge zur Zähigkeit des

Wassers und kann in Natur und Modell bei gewählter FROUDEscher Ähnlichkeit nicht übereinstimmen:

$$Re = v_s \cdot l / \nu \quad (2)$$

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

Die REYNOLDSzahlen betragen bei den Systemversuchen im Maßstab 1:40

$$Re = 1,7 \cdot 10^6 \text{ bis } 6,7 \cdot 10^6$$

(z.B. PanMax-Schiff $c_B = 0,6$ mit $v_s = 4,3 \text{ kn}$ bis $v_s = 12,7 \text{ kn}$, $l = 280 \text{ m}$, $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6}$).

Als unterer Grenzwert der turbulenten Strömung im verkleinerten Modell wird u.a. im Schiffbau eine REYNOLDSzahl von $Re < 5 \cdot 10^5$ angegeben (u.a. SCHNEEKLUTH, 1988), so dass bei den Systemversuchen die Zähigkeit von untergeordneter Bedeutung war. Für Modellversuche im Schiffbau zur Ermittlung von Schiffswiderstand und Propulsion bei maximaler Geschwindigkeit sind REYNOLDSzahlen zwischen $Re \approx 10^6$ und 10^7 im Modell, bei Werten von $Re \approx 10^8$ bis 10^9 in der Natur, üblich.

Die Naturähnlichkeit der Schiffswellenentstehung und der Wellenausbreitung im hydraulischen Modell ist mit dem bei der BAW gewähltem Maßstab von 1:40 hinsichtlich der hydrodynamischen Ähnlichkeitsbedingungen (Modellwassertiefen $h > 5 \text{ cm}$, Modellwellenperioden $T > 0,7 \text{ s}$) für die langperiodischen Primärwellen sehr gut erfüllt. Die hydrodynamischen Ähnlichkeitsbedingungen für ausgeprägte kurzperiodische Sekundärwellen (Modellperioden $T > 0,4 \text{ s}$) sind für die vorgenommenen Systemversuche erst ab Schiffsgeschwindigkeiten von deutlich über $v_{S,MODELL} > 0,98 \text{ m/s}$ ($v_{S,NATUR} > 12 \text{ kn}$) gegeben, da erst dann die geforderten Ausgangswellenhöhen am Modellschiff über $H > 2 \text{ cm}$ lagen (u.a. KOHLHASE / DETTE, 1984). Dies ist im Folgenden bei der Interpretation und Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt.

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

6.2.2 Versuchseinrichtung

Die Abmessungen des Versuchsbeckens der BAW betragen ca. 90 m x 35 m bei einer möglichen Wassertiefe von etwa 0,7 m. In dem Versuchsbecken wurde auf einer Fläche von etwa 40 m x 17 m ein Fahrrinnenquerschnitt vereinfacht als Trapezprofil (Böschungsneigung

gen 1:6 bzw. 1:10) im Maßstab 1 : 40 nachgebildet. Die in den Systemversuchen betrachteten Böschungen sowie die Position der für die Ergebnisdarstellungen ausgewählten Messsonden (Wasserspiegel und 2D-Strömung) sind schematisch in Bild 14 dargestellt.

Da die bemessungsrelevanten Schiffe den Wasserkörper bei Fahrt quasi zerteilen, ist es hinreichend, für die Prognose der schiffserzeugten Belastungen jeweils den ungünstigeren Teilquerschnitt der Wasserstraße zu betrachten, bei dem das Schiff in einem extrem geringen Abstand zur Fahrrinnenkante fährt (hier mit z.B. $b/2$ oder $b/3$). Da das Schiff auf dieser Fahrrinnenseite aufgrund des geringeren Passierabstands die höheren schiffserzeugte Belastungen bewirkt, liegen die Prognosewerte auf Basis dieser Modellversuche somit auf der sicheren (ungünstigeren) Seite.

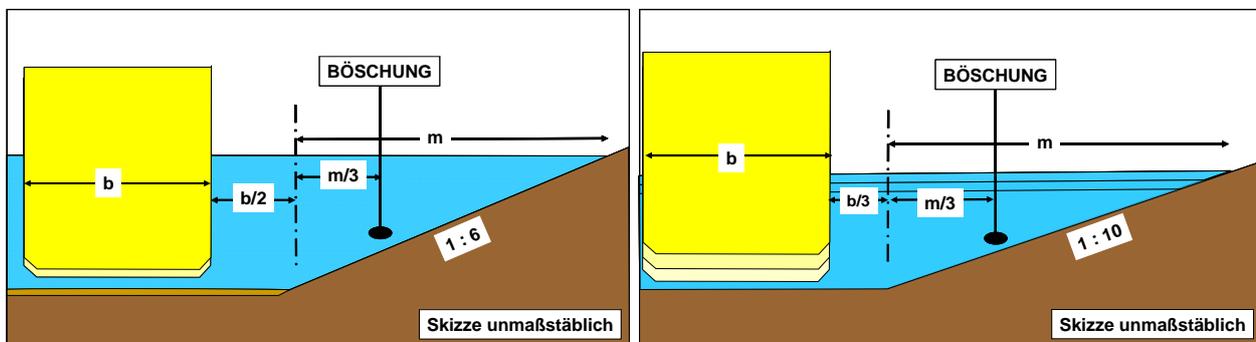


Bild 14: Schematische Darstellung der Randbedingungen der Systemversuche im hydraulischen Modell der BAW-DH (z.B. Böschungsneigung 1:6 links bzw. 1:10 rechts)

Die bei den Systemversuchen untersuchten Böschungsneigungen wurden mit gewaschenem Kiesel (Durchmesser 2 bis 8 mm) modelliert. Die Böschungsoberflächen wurden jeweils durchgehend mit Zementleim fixiert.

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

- Wasserspiegelauslenkung (2 Sonden):
 - Wave Meter DHI 102E mit Wave Gauge DHI 202/60
 Danish Hydraulic Institut, DK
 Messbereich: $\pm 12,5$ cm (Modellmaßstab)
- Strömung (2 Sonden):
 - Electromagnetic Flow Meter 2D-Type "E",
 Delft Hydraulics, NL
 Messbereich: ± 100 cm/s (Modellmaßstab)

- Schiffsgeschwindigkeit:
 - Laser-Distanzsensor OWTF 8999 APD S1
WELOTEC GmbH, D
 - Auflösung < 5 mm Modell = < 0,2 m Natur
 - Messfehler < 0,5 % , hier < 0,1 kn (Natur)

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.

Das Foto eines Autotransporter ($c_B = 0,6$; Maßstab 1 : 40) bei der Fahrt an einer 1:6 geneigten Böschung im Modellwellenbecken der BAW mit einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_S \approx 11,6$ kn (Natur) vermittelt einen Eindruck der langperiodischen, schiffserzeugten Wellenbelastungen am Ufer eines engen Querschnitts wie z.B. des Emders Fahrwassers.



Bild 15: Autotransporter ($c_B = 0,6$) und langperiodische Wasserspiegelauslenkung an einer 1:6 geneigten Böschung im Modellwellenbecken der BAW (Maßstab 1:40, $v_S \approx 11,6$ kn)

6.2.3 Untersuchte Schiffstypen

Die Systemversuche wurden mit Schiffstypen vorgenommen, die revierspezifisch als Auto-transporter (Bezeichnung: PanMax $c_B = 0,6$) oder als Massengutschiffe (Bezeichnung: PanMax $c_B = 0,8$) tideunabhängig als auch tideabhängig verkehren.

Die Hauptabmessungen, die untersuchten Tiefgänge sowie der jeweilige tiefgangsabhängige Völligkeitsgrad c_B sind in Tabelle 4 geführt.

| Name | Typ | Länge zw.d.L. | Breite | Tiefgänge | $c_B = f(t, \dots)$ * |
|-----------------------|-----------------|------------------|--------|----------------------------|----------------------------------|
| | - | m | m | m | - |
| PanMax $c_B = 0,6$ | Autotransporter | 280 | 32,2 | 8,0 / 9,0 / 10,9 / 11,9 | 0,62 / 0,633 / 0,657 / 0,671 |
| PanMax $c_B = 0,8$ | Massengutschiff | 225 | 32,2 | 8,0 / 9,0 / 10,9 / 11,9 | 0,826 / 0,831 / 0,840 / 0,845 |

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

Tabelle 4: Basisdaten der untersuchten Schiffstypen

Die Modellschiffe fahren als funkferngeschaltete Selbstfahrer (Propellerantrieb), deren seitlicher Freiheitsgrad durch einen Führungsarm eingeschränkt, dessen vertikale Bewegung aber ermöglicht wurde (Bild 15). Zur Minimierung von zufallsabhängigen äußeren Einflüssen auf die Schiffsbewegung, dementsprechend auch auf die schiffserzeugte Belastung, wurden die Schiffsmodelle mit "hartem" Trimm gefahren.

Im untersuchten Geschwindigkeitsbereich von rund $v_S \approx 4,5$ Kn bis etwa $v_S \approx 12,5$ Kn wurden zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse die wasserstands-, schiffs- und tiefgangsabhängigen Fahrkurven zweifach, die schiffstechnisch und querschnittsabhängig möglichen Maximalgeschwindigkeiten dreimal gefahren.

6.3 Systemversuche

Die Ergebnisse der Systemversuche und Parameterstudien wurden in den folgenden Grafiken in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit v_S aufgetragen. Für die Ergebnisdarstellungen wurden die Messungen an der Sondenposition auf dem unteren Drittel der Böschungen ausgewählt. Diese Messergebnisse wurden durch zusätzliche Sonden an weiteren Positionen abgesichert (z.B. Böschungsfuß), aber zur besseren Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Wie die ersten Analysen und Grafiken zeigten, war bei den Systemversuchen der Wert des Absunks jeweils höher als der der Primärwellen, so dass im Weiteren - außer demonstrativ in Bild 16 und Bild 17 - nur der jeweilige Absunk sowie die Verdrängungsströmung dargestellt wurden.

Bei den Systemversuchen erreichten die kurzperiodischen Sekundärwellen erst ab Schiffsgeschwindigkeiten von etwa $v_S > 12$ kn die erforderlichen Grenzbedingungen im Nahbereich der Modellschiffe mit Höhen von rund $H_{S,NATUR} > 0,8$ m ($H_{S,MODELL} > 2$ cm) und wurden somit bei der Analyse nicht weiter betrachtet (vergl. Kapitel 6.2.1). Eine gesonderte fachwissenschaftliche Bewertung der Sekundärwellen hinsichtlich ihrer ausbaubedingten Änderungen erfolgte in Kapitel 7.1.8.

6.3.1 Tiefgangszunahme mit Vertiefung

In einer Parameterstudie wurden die Änderungen der schiffserzeugten Belastungen bei einer Tiefgangszunahme um $\Delta t = +1,0$ m und einer Vertiefung der Fahrrinne um ebenso $\Delta h = +1,0$ m untersucht und in den Grafiken von Bild 16 und Bild 17 am Beispiel eines PanMax-Schiffs mit dem Völligkeitsgrad von $c_B = 0,6$ vorgestellt.

Die Grafiken in Bild 16 zeigen die geschwindigkeitsabhängigen Kenngrößen Absunk z_A (oben), Primärwelle H_P (mittig) und Rückströmgeschwindigkeit v_R (unten) bei Tiefgängen von $t = 8,0$ m und $t = 9,0$ m sowie Fahrrinnentiefen von $h = 8,8$ m bzw. $h = 9,8$ m, wie sie im Extremfall etwa bei Tideniedrigwasserbedingungen (Tnw) z.B. im Emdener Fahrwasser vor und nach einem Ausbau vorkommen könnten.

Die Grafiken in Bild 17 verdeutlichen desgleichen die geschwindigkeitsabhängigen Kenngrößen Absunk z_A (oben), Primärwelle H_P (mittig) und Rückströmgeschwindigkeit v_R (unten) bei Tiefgängen von $t = 10,9$ m und $t = 11,9$ m sowie Fahrrinnentiefen von $h = 12,0$ m bzw. $h = 13,0$ m, wie sie im Extremfall etwa bei Tidehochwasserbedingungen (Thw) z.B. im Emdener Fahrwasser vor und nach einem Ausbau vorkommen könnten.

Die hier untersuchte Böschungsneigung von 1:6 stellt hinsichtlich der Querschnittsverhältnisse ungünstige Bedingungen dar, da sich natürliche Fahrinnenböschungen aufgrund des anstehenden Bodenmaterials (z.B. Mittelsand, Feinsand) im Wesentlichen flacher ausbilden und damit für die Schiffe relativ größere Querschnitte zur Verfügung stehen.

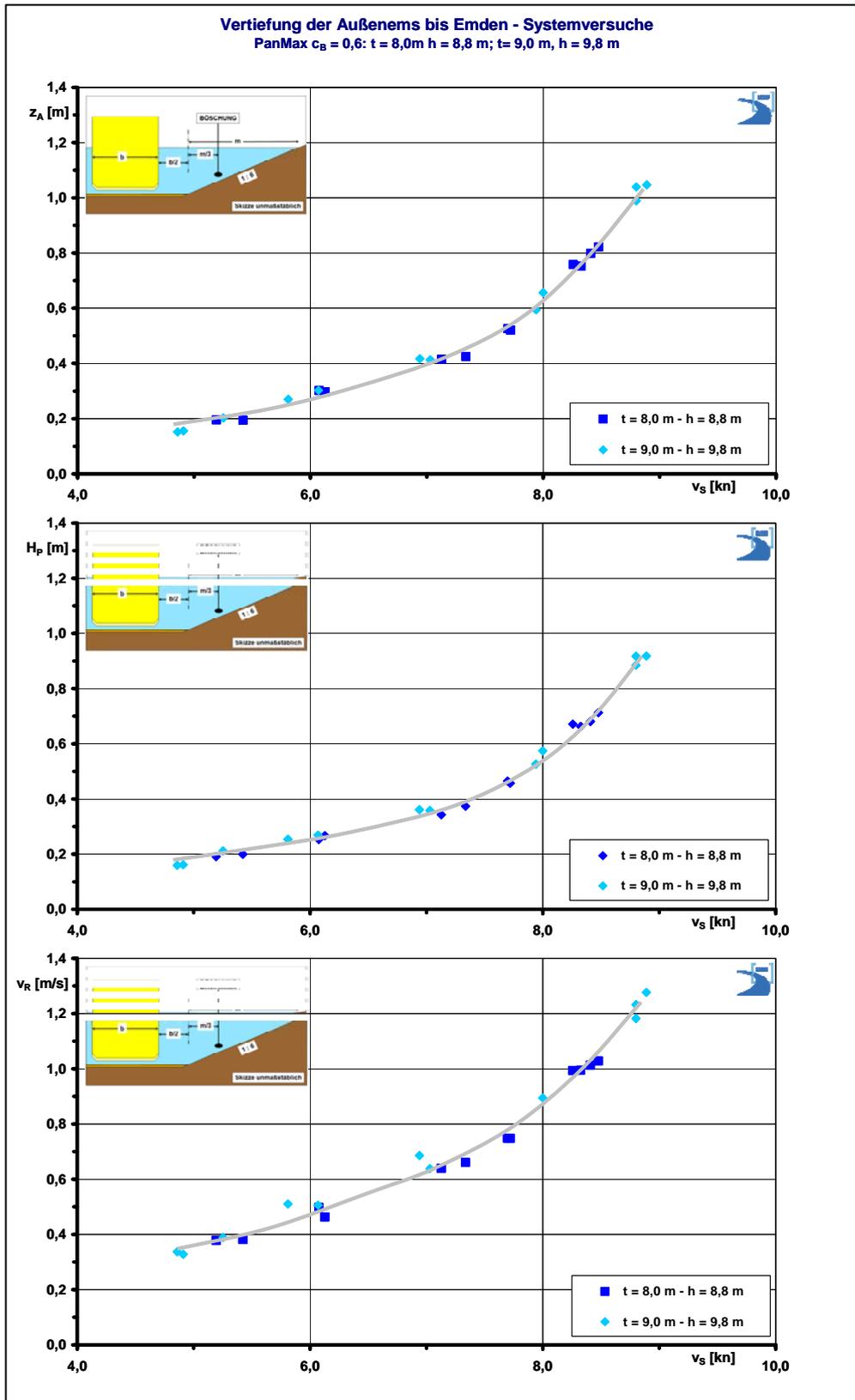


Bild 16: Systemversuche zu Absenk, Primärwelle und Rückstromgeschwindigkeit bei Vertiefung und Tiefgangszunahme unter **Tideniedrigwasserbedingungen** (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$)

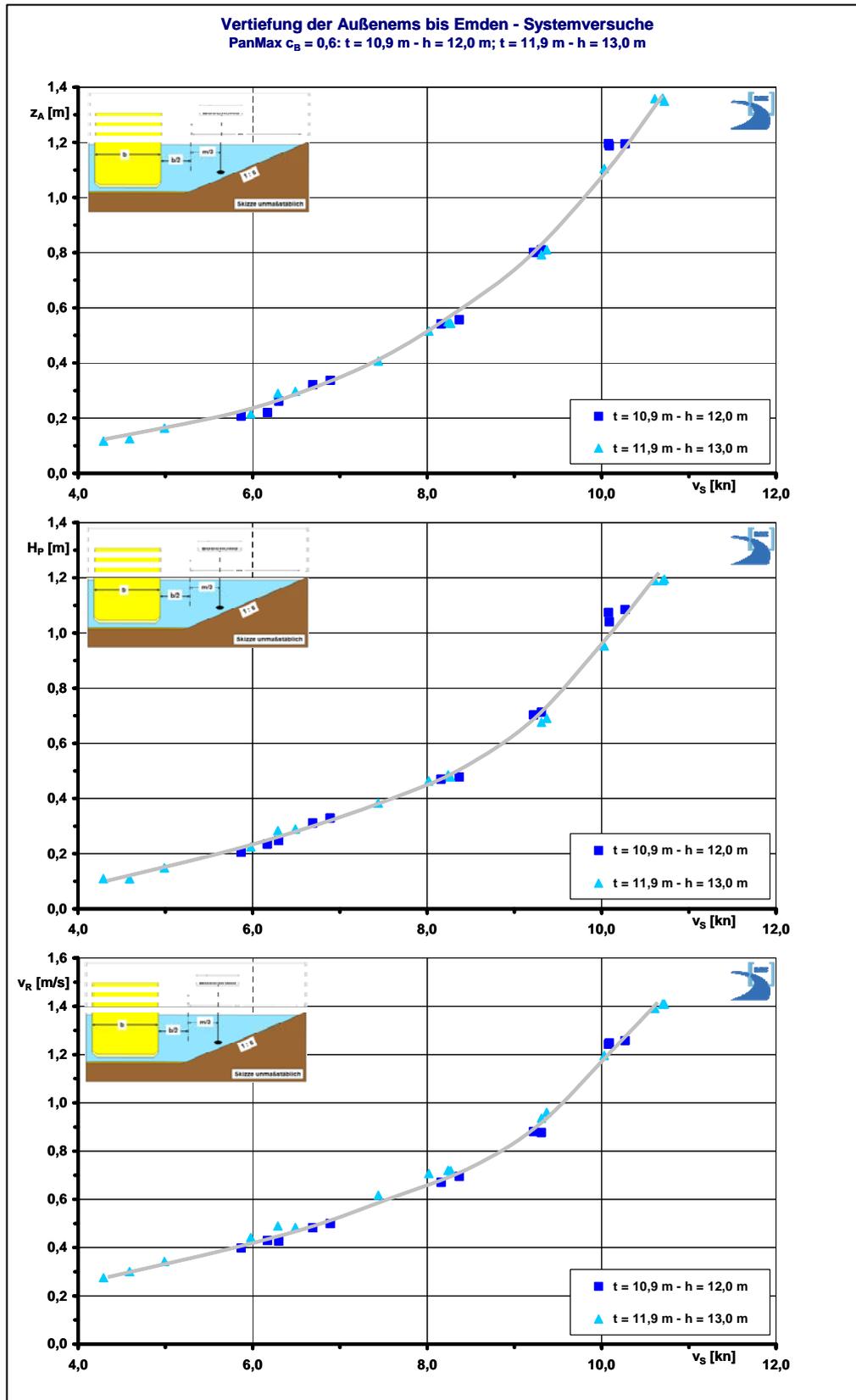


Bild 17: Systemversuche zu Absenk, Primärwelle und Rückstromgeschwindigkeit bei Vertiefung und Tiefgangszunahme unter **Tidehochwasserbedingungen** (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$)

Der Abstand der Schiffsaußenhaut zur Fahrinnenkante betrug jeweils lediglich eine halbe Schiffsbreite, was aus nautischer und wasserbaulicher Sicht einen extrem ungünstigen Fall darstellt. Die Teilquerschnittsverhältnisse n_T (vergl. Bild 4) berechneten sich für ca. Tnw-Bedingungen zu $n_T = 4,1$ bzw. $n_T = 4,3$ und für etwa Thw zu $n_T = 4,8$ bzw. $n_T = 4,9$.

Bewertung:

Wie aufgrund der Zunahme der Teilquerschnittsverhältnisse mit rund $\Delta n_T \approx +0,2$ sowohl bei etwa Tnw- als auch bei nahezu Thw-Bedingungen zu erwarten war, zeigen die geschwindigkeitsabhängigen Messergebnisse beim Absunk, der Primärwelle und der Rückströmung im Rahmen des Streubereichs, dass die Zunahme des Tiefgangs durch die Vertiefung der Fahrinne hydraulisch kompensiert wird und dadurch die jeweiligen Kennwerte z_A , H_P und v_R innerhalb der Messgenauigkeit gleich bleiben. Folglich sind bei gleichbleibender Schiffsgeschwindigkeit der bemessungsrelevanten Fahrzeuge keine höheren schiffserzeugten Belastungen zu erwarten.

6.3.2 Belastungen bei tideabhängiger und tideunabhängiger Fahrt

Eine weitere Parameterstudie ermittelte die geschwindigkeitsabhängigen Differenzen der schiffserzeugten Belastung bei verschiedener Füllung des Wasserstraßenquerschnitts. Anhand der revierbezogenen Systemversuche wurden somit die schiffserzeugte Belastungen bei etwa Tideniedrigwasserbedingungen für tideunabhängige und bei annähernd Tidehochwasser für tideabhängige Fahrten des PanMax-Schiffs ($c_B = 0,6$) bei entsprechend geringer UKC ermittelt.

Die Teilquerschnittsverhältnisse n_T berechneten sich für ca. Tnw-Bedingungen zu $n_T = 4,3$ ($t = 9,0$ m, $h = 9,8$ m) und für etwa Thw zu $n_T = 4,9$ ($t = 11,9$ m, $h = 13,0$ m). Die Böschungsneigung betrug bei diesen Systemversuchen 1:6. Diese Ergebnisse liegen auf der sicheren Seite, da bei natürlich anstehenden, flacheren Böschungsneigungen - wegen der dann zur Verfügung stehenden größeren Teilquerschnittsfläche - die Belastungen geringer werden.

Die geschwindigkeitsabhängigen Ergebnisse für Absunk und Rückstromgeschwindigkeit sind in den folgenden Grafiken aufgetragen (Bild 18).

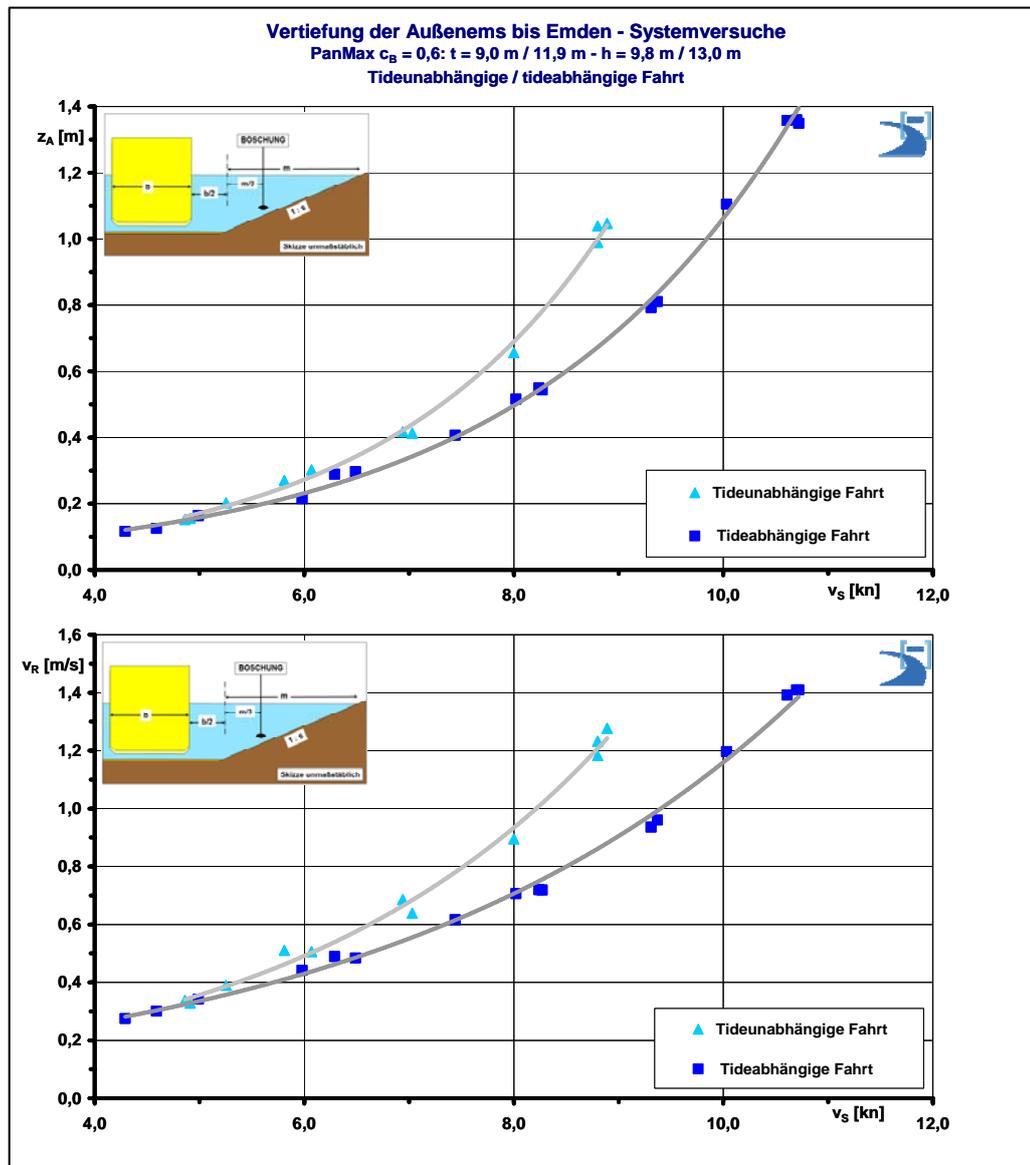


Bild 18: Vergleich von Systemversuchen zu Absenk und Rückstromgeschwindigkeit bei tideabhängiger und tideunabhängiger Fahrt (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$)

Die Auswirkungen des größeren Teilquerschnittsverhältnisses von $\Delta n_T = +0,6$ bei Thw auf die langperiodischen schiffserzeugten Belastungen werden anhand der Grafiken in Bild 18 diskutiert:

- Die n_T -Differenzen führten erst ab Schiffsgeschwindigkeiten von rund $v_s > 6 \text{ kn}$ zu deutlich höheren schiffserzeugten Absenkwerten bei Tnw-Bedingungen.
- Die schiffserzeugten Rückstrombelastungen streuen bei geringen Fahrgeschwindigkeiten, erkennbare systematische Unterschiede waren ebenso erst ab $v_s > 6 \text{ kn}$ festzustellen.

- Bei gleichen Schiffsgeschwindigkeiten sind deutlich höhere Belastungen bei Tnw aufgrund des geringeren n_T -Verhältnisses aufgetreten (z.B. bei $v_S \approx 9$ kn: $\Delta z_A \approx +0,3$ m bzw. $\Delta v_R \approx +0,3$ m/s; d.h.: $\Delta z_A \approx +40\%$ bzw. $\Delta v_R \approx +30\%$ bei Tnw).
- Die bei Tnw schon bei $v_S \approx 9$ kn gemessenen Belastungen von $z_A = 1,0$ m bzw. $v_R = 1,2$ m/s werden bei Thw aufgrund des größeren Wasserstraßenquerschnitts erst bei einer höheren Schiffsgeschwindigkeit von etwa $v_S \approx 10$ kn erreicht.
- Die FROUDEsche Tiefenzahl betrug für die „Höchstgeschwindigkeiten“ bei etwa Tnw ($v_S \approx 9$ kn, $h = 9,8$ m, Propeller ca. 52 U/min) wie auch bei ca. Thw ($v_S \approx 11$ kn, $h = 13$ m, Propeller ca. 73 U/min) annähernd $Fr_h \approx 0,5$. Die bis zu $\Delta v_S \approx +2$ kn höheren Schiffsgeschwindigkeiten bei etwa gleichem rechnerischen Wert für den „Flachwasserwiderstand“ Fr_h waren aber nur aufgrund einer höheren Drehzahl (entspricht größerem Energieeintrag) von rund +20 U/min möglich, was dann folglich auch zu entsprechend höheren schiffserzeugten Belastungen führte. Bei der Berechnung von Fr_h geht nicht die seitliche Begrenzung des Fahrwassers als Widerstandsgröße ein, so dass die erforderliche Drehzahlerhöhung und die daraus folgende höheren Böschungsbelastungen physikalisch nachvollziehbar sind.

Bewertung:

Die tideunabhängige Fahrt bei etwa Tnw-Bedingungen ist gegenüber Thw für die schiffserzeugte Belastung der ungünstigere Zustand, wenn gleiche Schiffsgeschwindigkeiten vorausgesetzt werden. Bei tideabhängiger Fahrt sind trotz rechnerisch etwa gleicher FROUDEschen Tiefenzahl aufgrund des seitlich begrenzten Fahrwassers für deutlich höhere Schiffsgeschwindigkeiten resultierend ebenfalls ein höherer Energieeintrag erforderlich und somit dann auch höhere Böschungsbelastungen möglich. Bei einer Prognose der ausbaubedingten schiffserzeugten Belastungen sind die Passagen aller Schiffe - unabhängig vom Tidewasserstand - zu betrachten, da ein individuell variierender Energieeintrag nicht auszuschließen ist.

6.3.3 Tiefgangszunahme ohne Vertiefung

Der Einfluss des Parameters Tiefgang auf die Belastungsänderung ohne gleichzeitige Vertiefung der Sohle wurde in weiteren Systemversuchen untersucht. Da in Abschnitten der Außenems, in denen die Wasserstraße schon heute die Wassertiefen vorweist, die eine Fahrt mit größeren Tiefgängen ermöglichen würde, wurden die Auswirkungen revierspezifischer Tiefgangserhöhungen großer Fahrzeuge bezüglich der schiffserzeugten Belastungsänderungen analysiert (Bild 19).

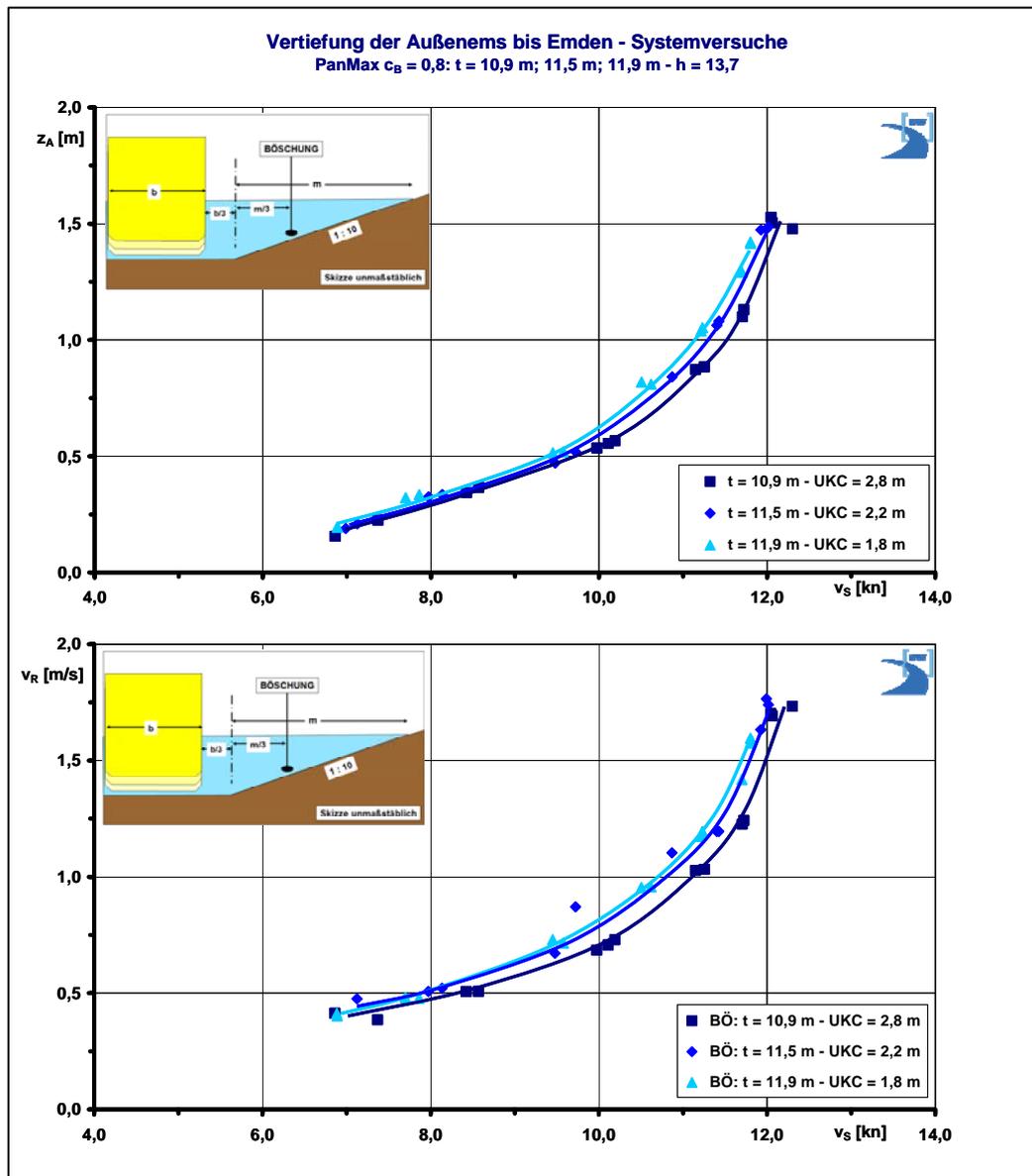


Bild 19: Systemversuche zu Absenk und Rückstromgeschwindigkeit bei stufenweiser Tiefgangszunahme (PanMax-Schiff $c_B = 0,8$)

Zur Abschätzung des ungünstigsten Falls (h gerade ausreichend für t_{MAX}) wurde bei Systemversuchen die Wassertiefe mit $h = 13,7$ m konstant gehalten. Der Tiefgang eines PanMax-Massengutschiffs ($c_B \approx 0,8$) wurde in Anlehnung an die Randbedingungen der Außenems in Schritten von $\Delta t = +0,6$ m (für tideabhängige Fahrt) und $\Delta t = +1,0$ m (für tideunabhängige Fahrt) erhöht (Basistiefgang $t = 10,9$ m).

Die Teilquerschnittsverhältnisse änderten sich von $n_T = 7,6$ ($t = 10,9$ m) um $\Delta n_T = -0,4$ ($t = 11,5$) sowie $\Delta n_T = -0,6$ auf $n_T = -7,0$ ($t = 11,9$ m). Die Parameterstudien wurden an einer Unterwasserböschung mit einer Neigung von 1:10 vorgenommen.

Die Untersuchungsergebnisse für Absenk und Rückstromgeschwindigkeit sind in Bild 19 zusammengestellt und wurden wie folgt bewertet:

- Ab einer Schiffsgeschwindigkeit von etwa $v_S \approx 10$ kn steigt die schiffserzeugte Belastung überproportional an.
- Die mit der Tiefgangszunahme und somit einer Abnahme der UKC einhergehende Reduzierung des Teilquerschnittsverhältnisses wirkt sich erst ab höheren Schiffsgeschwindigkeiten von etwa $v_S > 10$ kn eindeutig auf die Erhöhung der schiffserzeugten Belastungen aus.
- Bei einer Tiefgangszunahme um $\Delta t = +0,6$ m wurde eine mittlere Belastungserhöhung von rund +10% gemessen, bei $\Delta t = +1,0$ m ergab sich im Mittel eine Belastungserhöhung von etwa +15%.

Bewertung:

In Abschnitten einer Seeschiffahrtsraße wie z.B. der Außenems, in denen streckenweise keine Vertiefung der Fahrinne erforderlich ist, sind infolge möglicher Tiefgangszunahmen maximale schiffserzeugte Belastungserhöhungen um rund +10% bis zu etwa +15% zu erwarten. Das tatsächliche Maß der örtlichen Belastungserhöhung hängt aber zudem noch von der dort zu erwartenden Schiffsgeschwindigkeit, des berechneten Teilquerschnittsverhältnisses und von der natürlichen UKC ab.

6.3.4 Einfluss der Völligkeit

Die Wirkung verschiedener Schiffstypen auf die schiffserzeugten Belastungen wurde untersucht, indem anhand revierspezifischer Fahrzeuge der Parameter Völligkeit unter sonst gleichen Randbedingungen (u.a. Tiefgang, Kurs, Passierabstand, geringe UKC) variiert wurde.

Das Fahrzeug PanMax mit Völligkeitsgrad $c_B = 0,6$ repräsentierte z.B. einen Autotransporter, das PanMax mit dem Völligkeitsgrad $c_B = 0,8$ z.B. ein Massengutschiff (vergl. Kapitel 6.2.3). Die Ergebnisse für die Kenngrößen Absenk z_A und Rückstromgeschwindigkeit v_R sind in Bild 20 für die hier relevante Position „Böschung“ aufgetragen.

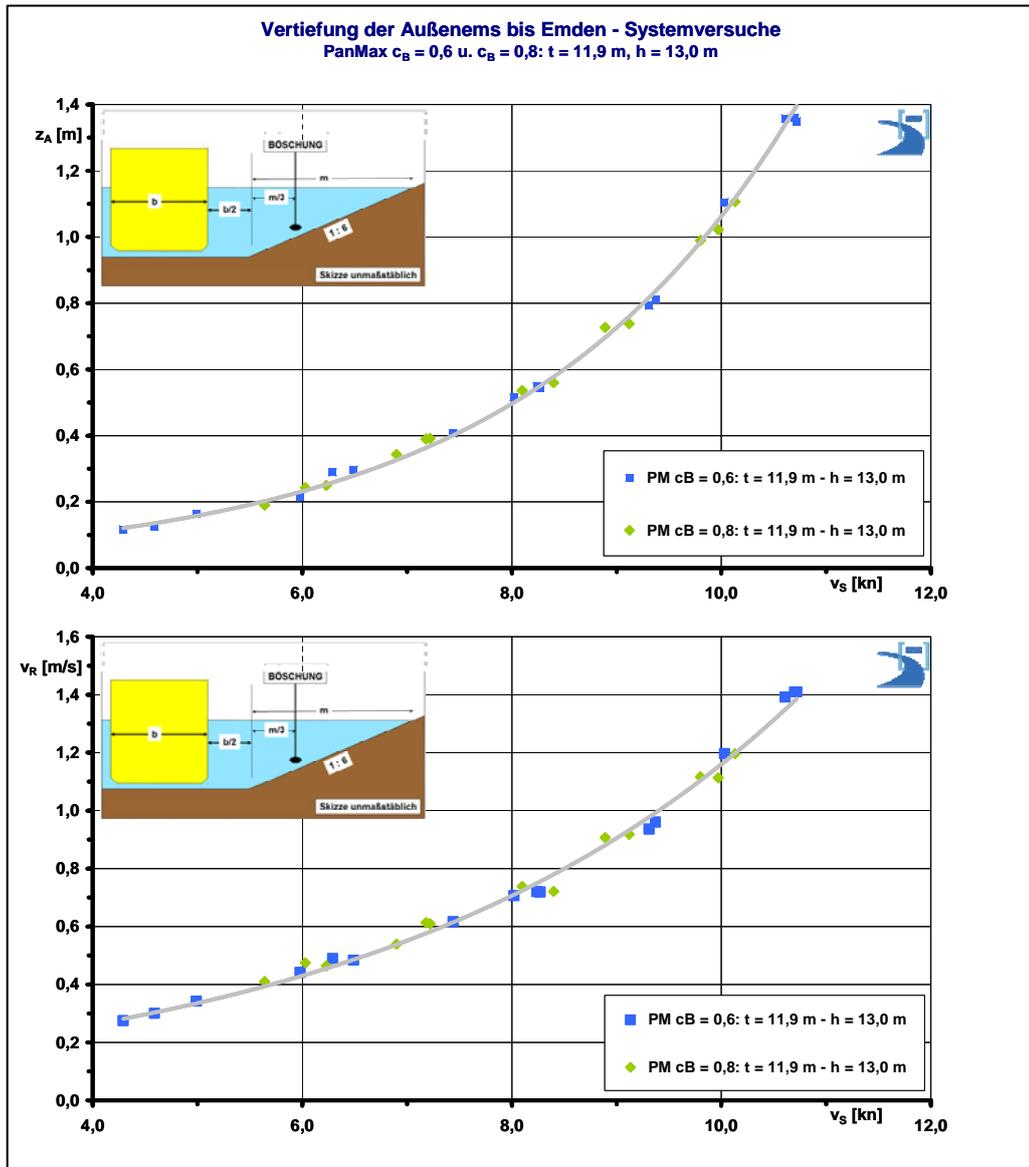


Bild 20: Systemversuche zu Absenk und Rückstromgeschwindigkeit zum Vergleich der Völligkeit (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$ u. $0,8$)

Die geschwindigkeitsabhängigen Messwerte der Systemversuche verdeutlichen, dass in einem größeren Abstand vom Schiff auf der Böschung – im Rahmen der Streuungen - hinsichtlich der schiffserzeugten Belastungen kein signifikanter Unterschied infolge der Völligkeit der untersuchten Fahrzeugtypen gemessen wurde.

Bewertung:

Zur Bewertung der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen im Bereich der Fahrinnenböschungen der Außenems ist folglich keine Unterscheidung nach Schiffstypen erforderlich.

6.3.5 Einfluss von Wasserstand und Under-Keel-Clearance

Der Einfluss des Parameters Under-Keel-Clearance (UKC: Kielfreiheit) auf die schifferzeugten Belastungen wurde anhand von revierbezogenen Systemversuchen mit dem PanMax $c_B = 0,6$ bei gleichbleibendem Tiefgang ($t = 11,9$ m), aber unterschiedlicher Kielfreiheit von $UKC = 1,2$ m, $1,8$ m und $2,4$ m untersucht. Indem der Wasserstand mit Werten von $h = 13,1$ m, $13,7$ m und $14,3$ m variiert wurde, vergrößerte sich mit Zunahme der Wassertiefe ebenfalls das Füllvolumen der Wasserstraße und somit auch das Teilquerschnittsverhältnis von $n_T = 6,4$ über $n_T = 7,0$ auf $n_T = 7,5$. Die Böschungsneigung betrug $1:10$ (Bild 21).

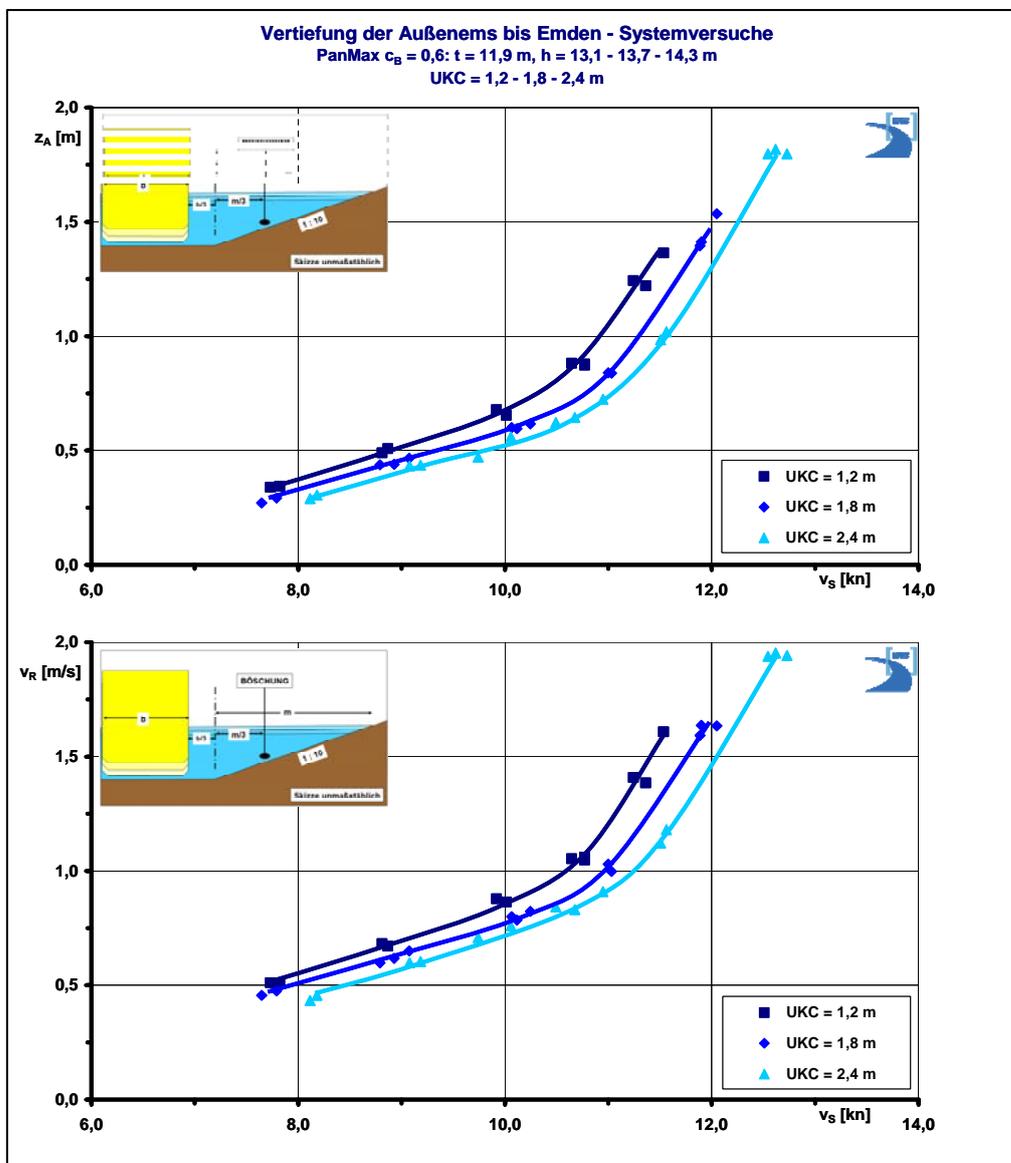


Bild 21: Systemversuche zum Einfluss der UKC auf Absenk und Rückstromgeschwindigkeit (PanMax-Schiff $c_B = 0,6$)

Die Systemversuche (Bild 21) bestätigen die physikalischen Zusammenhänge von Wasserstraßenquerschnitt zu Schiffsquerschnitt bzw. Tiefgang zu Kiefreiheit,

- dass mit Zunahme der UKC und damit einhergehend des Teilquerschnittverhältnisses eine geringere schiffserzeugte Belastung zu erwarten ist, was z.B. bei einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_S \approx 11,5$ kn eine Abnahme des Absunks von rund $\Delta z_A \approx -0,4$ m zwischen den Fahrten mit UKC = 1,2 m und UKC = 2,4 m bedeutete ($\Delta n_T = +1,1$),
- dass bei entsprechend größerer Kiefreiheit von $\Delta UKC = +1,2$ m ($\Delta n_T = +1,1$) trotz höherer Schiffsgeschwindigkeit von rund $\Delta v_S \approx +1$ kn noch eine annähernd gleichbleibende schiffserzeugte Belastung auftreten wird.

Die aus den Grafiken umgekehrt abzuleitende Belastungserhöhung bei Reduzierung der Kiefreiheit und des Teilquerschnittsverhältnisses wird auch daran deutlich, dass zum Erreichen der Schiffsgeschwindigkeit von z.B. $v_S \approx 11,5$ kn bei abnehmender Wassertiefe eine Drehzahlerhöhung von etwa 52 U/min ($h = 14,3$ m) über ca. 66 U/min ($h = 13,7$ m) auf rund 81 U/min ($h = 13,1$ m) erforderlich war. Die bedeutete eine entsprechenden Zunahme des Absunks von etwa $z_A \approx 1,1$ m ($h = 14,3$ m) auf annähernd $z_A \approx 1,3$ m ($h = 13,1$ m; vergl. Bild 21, z.B. Böschungsfuß = blaue Quadrate bei $v_S \approx 11,5$ kn).

Um bei einer Wassertiefe von $h = 14,3$ m die in Bild 21 höchste Schiffsgeschwindigkeit von $v_S = 12,6$ kn zu erreichen, war eine weitere Drehzahlerhöhung auf ca. 91 U/min erforderlich, so dass dann auch die entsprechende höhere Absunkbelastung von annähernd $z_A \approx 1,9$ m bzw. höhere Rückstromgeschwindigkeit $v_R \approx 2,0$ m/s die Folge war.

Bewertung:

Sind Schiffe mit konstantem Tiefgang bei höheren Wasserständen unterwegs, werden entweder geringere Belastungen bei gleicher Geschwindigkeit (gleichem Energieeintrag) auftreten oder gleiche Wellen- und Strömungsbelastungen werden erst bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten erkennbar. Größere schiffserzeugte Belastungen bei gleichem Wasserstand (gleicher UKC) können nur bei größerer Geschwindigkeit durch einen größeren Energieeintrag, d.h. eine höhere Propellerdrehzahl entstehen.

7 Prognose der Vorhabensauswirkungen

7.1.1 Beurteilungskriterien

Zur Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen der Außenems bis Emden aufgrund von Fahrrinnenvertiefungen, Tiefgangszunahme großer Fahrzeuge sowie Tidefahrplanänderungen für bemessungsrelevante Schiffe wurden für die charakteristischen Abschnitte folgende Ausgangsdaten und Beurteilungskriterien festgelegt:

- Analyse des Ist-Zustands anhand von Naturmesskampagnen
- Analyse der Parameterstudien mit revierspezifischer Bewertung
- Betrachtung der lokalen baulichen Veränderungen
- Analyse der veränderten (Teil-)Querschnittsverhältnisse
- Berücksichtigung der örtlichen Schiffsgeschwindigkeiten
- Maximale Tiefgangszunahme der Schiffe bei gleichbleibender Flottenstruktur

Diese Einzelkriterien, wie z.B. die Parameterstudien bezüglich des Reviers, wurden fachlich gewichtet, auf Grundlage eines umfangreichen, fachwissenschaftlichen Expertenwissens mit einander verknüpft und hinsichtlich möglicher Belastungsänderungen bewertet. Die maßgeblichen Kriterien hinsichtlich der ausbaubedingten Änderung der Belastungsgrößen waren die veränderten Teilquerschnittsverhältnisse unter Berücksichtigung der örtlichen Schiffsgeschwindigkeit (Kontinuität vorausgesetzt) auf Grundlage des erfassten Ist-Zustands in der Außenems. Die Parameterstudien ermöglichten eine revierspezifische Quantifizierung der erwarteten Belastungsänderungen unter Zugrundelegung der maximal möglichen Tiefgangszunahme.

Die Prognosen der ausbaubedingten Änderungen der Tidedynamik auf Basis von hydrodynamisch-numerischer Modellierung ergaben nur geringfügige Veränderungen sowohl beim Thw als auch beim Tnw von unter einem halben Dezimeter (BAW, 2012). Aufgrund der daraus folgenden kleinen Änderungen der Wassertiefe ($\Delta h < 0,5 \%$) und damit des Wasserstraßenquerschnitts in Relation zu allgemein bekannten Unsicherheiten (z.B. Peilgenauigkeit) sind die Auswirkungen auf die Prognose zu den ausbaubedingten Änderungen der Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtstraße von untergeordneter Bedeutung.

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.

Die abschnittswisen Prognosen der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen entlang der Außenems bis Emden erfolgten jeweils für die Fahrinnenkante. Darüber hinaus wirkende Wellenumformungsprozesse (u.a. Refraktion, Reflexion, Diffraktion, Wellenaufsteilen, Wellenbrechen) z.B. in Bühnenfeldern, auf Sänden und auf Wattgebieten werden - wie schon im Ist-Zustand - ablaufen, so dass auch die ausbaubedingte Zunahmen der lang- und kurzperiodischen Wellensysteme diesen Prozessen mit der entsprechenden Energiedissipation unterliegen werden.

7.1.2 Hydraulisch wirksame bauliche Veränderungen

Die geplanten Vertiefungen in der Fahrinnenachse der Außenems bis Emden sind am Längsschnitt in Bild 22 ersichtlich (Detail nach [U4]). In einigen Abschnitten sind deutliche Baggerungen erforderlich (z.B. Emders Fahrwasser, etwa Ems-km 50 bis 52), in dem Großteil der Außenems sind die heutigen Wassertiefen für die vorgesehene Ausbaumaßnahme ausreichend (z.B. stromab Gatjebogen, Ems-km 53 bis 60).

Für die Berücksichtigung der lokalen baulichen Veränderungen sowie für die Analyse der veränderten Teilquerschnittsverhältnisse wurde die Unterwasserbathymetrie des digitalen Geländemodells (DGM) der hydrodynamisch-numerischen Modellierung verwendet (vergl. BAW, 2012).

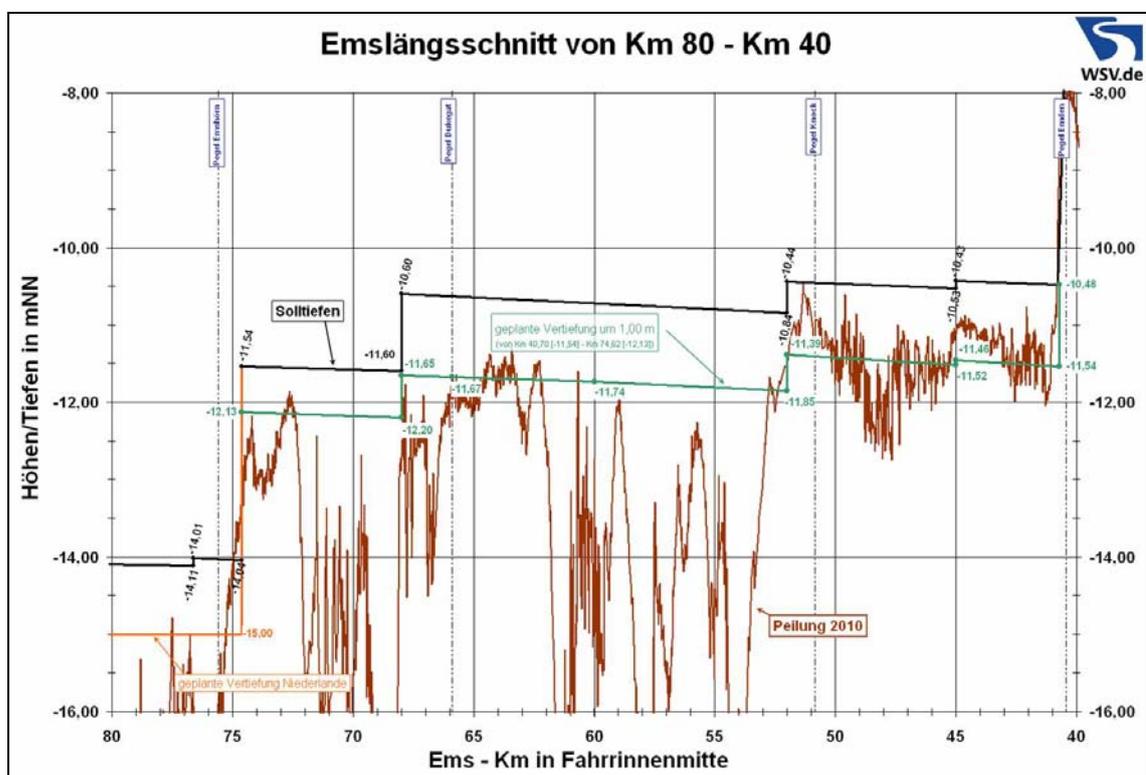


Bild 22: Längsschnitt der derzeitigen und geplanten Wassertiefen der Seeschiffahrtsstraße Außenems bis Emden in Fahrinnenachse (Detail nach [U4])

Die - für die Bewertung der schiffserzeugten Belastungen in der Außenems - maßgebliche Bathymetrie des Planerischen Sollzustands 2 (PS2) beinhaltet

- die Wassertiefen auf Basis des DGM-W 2010,
- die planfestgestellte Tiefe der Fahrrinne von Papenburg bis zur Nordsee,
- die geplante Zufahrt vom Emdener Fahrwasser zum Emspolder
- sowie die geplanten Ausbaumaßnahmen der Fahrrinne zwischen dem niederländischen Eemshaven bis zur Nordsee ab etwa Ems-km 74,5.

Der Ausbau-Zustand (AZ1) beinhaltet mit den Maßnahmen des PS2 zudem

- die Vertiefung der Fahrrinne der Außenems bis Emden bis zu ca. $\Delta h \approx +1$ m,
- der Vertiefung der Wendestelle bis $\Delta h \approx +1$ m
- sowie die Querschnittseinengung im Emdener Fahrwasser durch Verlängerung von Buhne 6 und Buhne 7.

Da für das hier zu betrachtende Verfahren die Wassertiefen ab etwa Ems-km 74,6 auch ohne das niederländische Ausbauprojekt ausreichend sind und somit keine Vertiefungen erforderlich sind, wird in der Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen dieses Vorhaben nicht mit einbezogen, so dass von einem ungünstigeren Zustand mit heute geringeren Querschnitten ausgegangen wird.

Die geplante niederländische Maßnahme bewirkt zusätzliche Querschnittsaufweitungen, so dass die prognostizierten Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen bei Verwirklichung des letzteren Ausbaus geringer ausfallen werden.

7.1.3 Änderungen der (Teil-)Querschnittsverhältnisse

Bei der Ermittlung des Fahrwasserquerschnitts A ($n = A / A_S$) bzw. des Teilquerschnitts A_T wurde nur der für die Schifffahrt hydraulisch wirksame Wasserstraßenquerschnitt berücksichtigt, d.h. flachere Seitenbereiche (z.B. Paapsand oder Randzel bei Thw) sowie durch flache Sände oder durch Platen „hydraulisch getrennte“ Wattgebiete und Rinnen (z.B. Alte Ems) wurden nicht in die Querschnittsflächenberechnung einbezogen.

Die Änderungen der Querschnittsverhältnisse n bei mittlerem Tideniedrigwasser (MTnw) der Jahre 2001 bis 2012 ($MTnw_{2001/2012}$ nach [U5]) wurden für ein PanMax-Schiff mit den Tiefgängen von $t = 7,7$ m (PS2) und $t = 8,7$ m (AZ1) berechnet und für den Betrachtungsraum bis zur Nordsee in Bild 23 dargestellt.

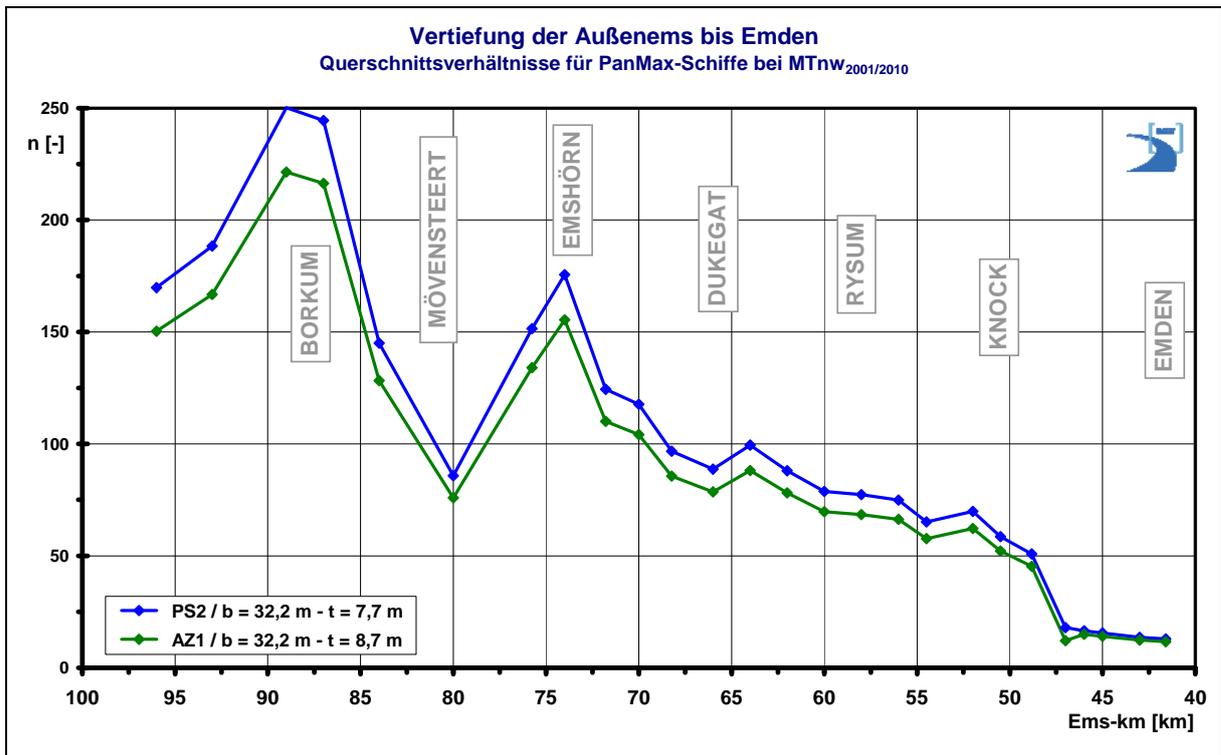


Bild 23: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff entlang der Außenems (PS2 und AZ1) bei $MTnw_{2001/2010}$

Wie schon bei der Beschreibung des Ist-Zustands in Kapitel 5.1 zeichnen sich auch im Ausbauzustand anhand der Querschnittsverhältnisse (Bild 23, grüne Linie) deutlich die drei charakteristischen Abschnitte der Außenems bis Emden ab: Emders Fahrwasser mit $n < 20$, Innerer Ästuartrichter mit etwa $50 < n < 100$ und Äußerer Ästuartrichter mit $n > 150$. Neben einem Übergangsbereich zwischen Innerem und Äußerem Ästuartrichter fällt im Äußerem Ästuartrichter vor allen der Bereich am Mövensteert mit lokal geringen Querschnittsverhältnissen zwischen $75 < n < 80$ auf, der auch Auswirkungen auf die schiffserzeugten Belastungen haben wird.

Die Änderungen der Querschnittsverhältnisse bei mittlerem Tidehochwasser (MThw) der Jahre 2001 bis 2012 ($MThw_{2001/20112}$ nach [U5]) wurden für ein PanMax-Schiff mit den Tiefgängen von $t = 10,9 \text{ m}$ (PS2) und $t = 11,5 \text{ m}$ (AZ1) berechnet und für den Betrachtungsraum bis zur Nordsee in Bild 24 dargestellt.

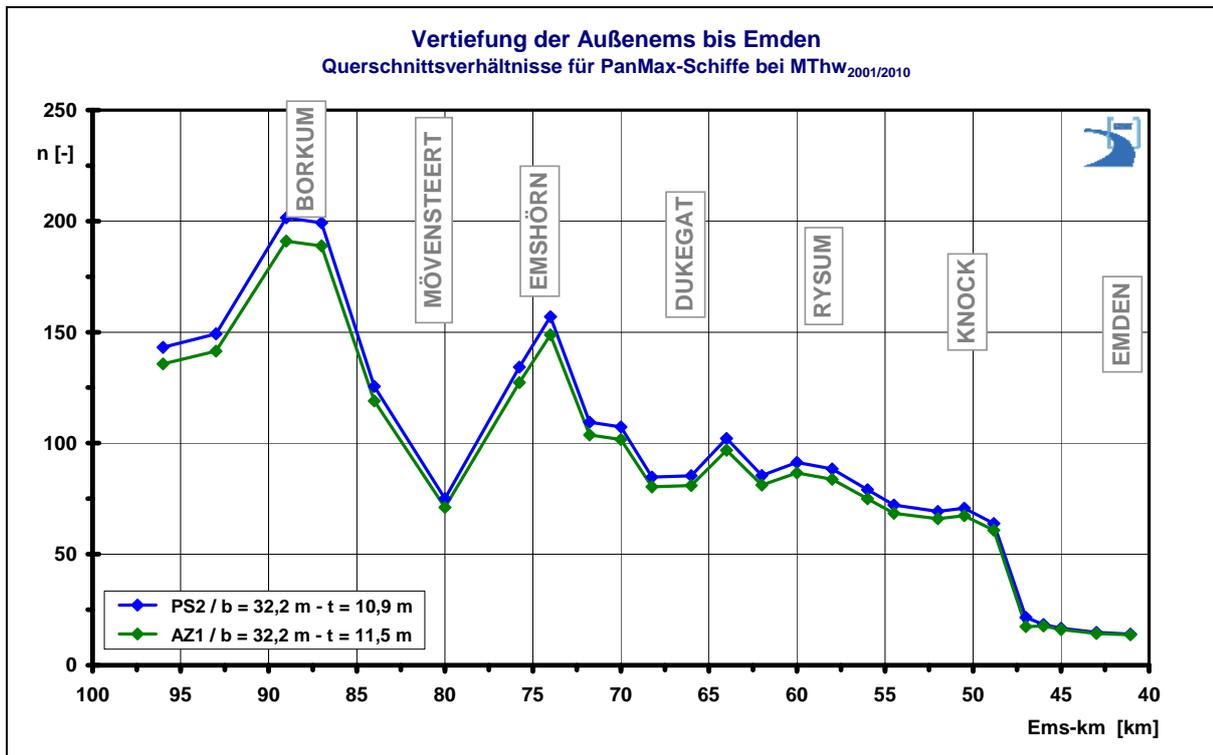


Bild 24: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff entlang der Außenems (PS2 und AZ1) bei MThw_{2001/2010}

Hervorzuheben sind bei Thw-Bedingungen (Bild 24) die geringeren Absolutwerte im Äußeren Ästuar sowie die eindeutig geringeren Differenzen zwischen PS2 und AZ1 als bei Tnw-Bedingungen (Bild 23). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Tiefgangsdifferenzen der relevanten Schiffe zwischen tideunabhängigem und tideabhängigem Verkehr in der Außenems zum Einen derzeit $\Delta t = 3,2$ m betragen, so dass in den größeren Querschnitten des Äußeren Ästuartrichters die PanMax-Schiffe bei MTnw mit Tiefgängen von $t = 7,7$ m deutlich geringere Hauptspantquerschnitte relativ zum tideabhängigen Verkehr mit $t = 10,9$ m bei MThw haben. Zum Anderen werden die Differenzen bei tideabhängigem Verkehr bei etwa Thw zukünftig nur $\Delta t = 2,8$ m betragen, also die Änderungen des Querschnittsverhältnisses generell geringer ausfallen (Bild 24).

Eine detailliertere Betrachtung der Querschnitts- und Teilquerschnittsverhältnisse für den Ausbaubereich des Vorhabensträgers (bis ca. Ems-km-75) wie in den nächsten Absätzen ist hinsichtlich der Detektierung lokaler Betroffenheiten erforderlich.

Die absoluten und prozentualen ausbaubedingten Änderungen der Querschnittsverhältnisse bei MTnw zwischen PS2 und AZ1 für Ems-km 40 bis 75 sind in Bild 25 für den tideunabhängigen Verkehr aufgetragen (Absolutwerte: Blaugrün; Prozentzahlen: Hellblau).

Die Zunahme der absoluten Differenzen in Richtung See hängt direkt mit den geringeren Querschnittsaufweitungen stromab zusammen, während die prozentualen Änderungen an-

nähernd konstant bei $\Delta n \approx -10\%$ bleiben, ausgenommen von etwa $\Delta n \approx -33\%$ bei der örtlichen Querschnittseinengung zwischen den Buhnen 6 und 7 (Ems-km 47), auf deren Ausmaß und Auswirkungen noch detaillierter in Kapitel 7.1.4 eingegangen wird.

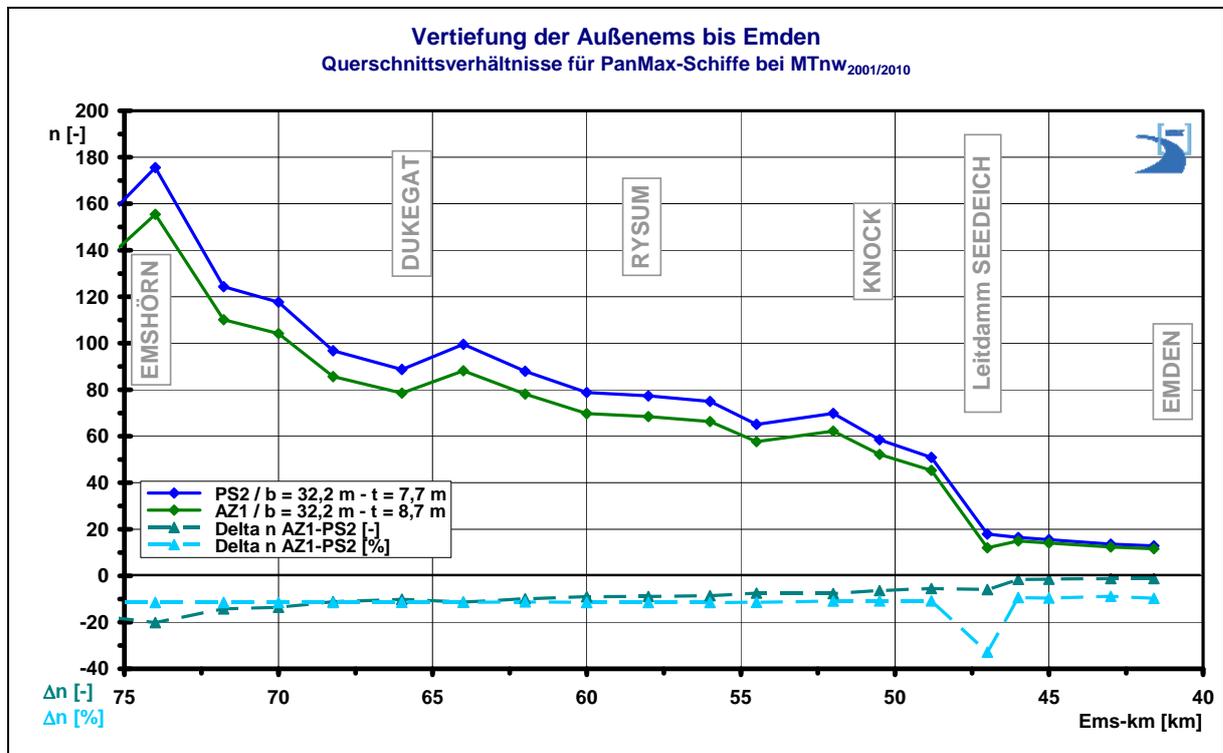


Bild 25: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff zwischen Emden und Emshörn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei MTnw_{2001/2010}

Die absoluten und prozentualen ausbaubedingten Änderungen der Querschnittsverhältnisse bei MThw zwischen PS2 und AZ1 für Ems-km 40 bis 75 sind in Bild 26 für den tideabhängigen Verkehr aufgetragen (Absolutwerte: Blaugrün; Prozentzahlen: Hellblau).

Die Tendenz zu größeren Differenzen der Absolutwerte in Richtung See wird auch bei MThw festgestellt, und entsprechend den zu Bild 24 ausgeführten Gründen liegen auch die prozentualen Änderungen der Querschnittsverhältnisse mit rund $\Delta n \approx -5\%$ entlang der Ausbaustrecke deutlich unter den Werten bei MTnw und tideunabhängigem Verkehr. Die lokale Strombaumaßnahme bei Ems-km-47 (Querschnittseinengung an Buhnen 6 und 7) wirkt sich mit $\Delta n \approx -20\%$ auch dementsprechend geringer aus.

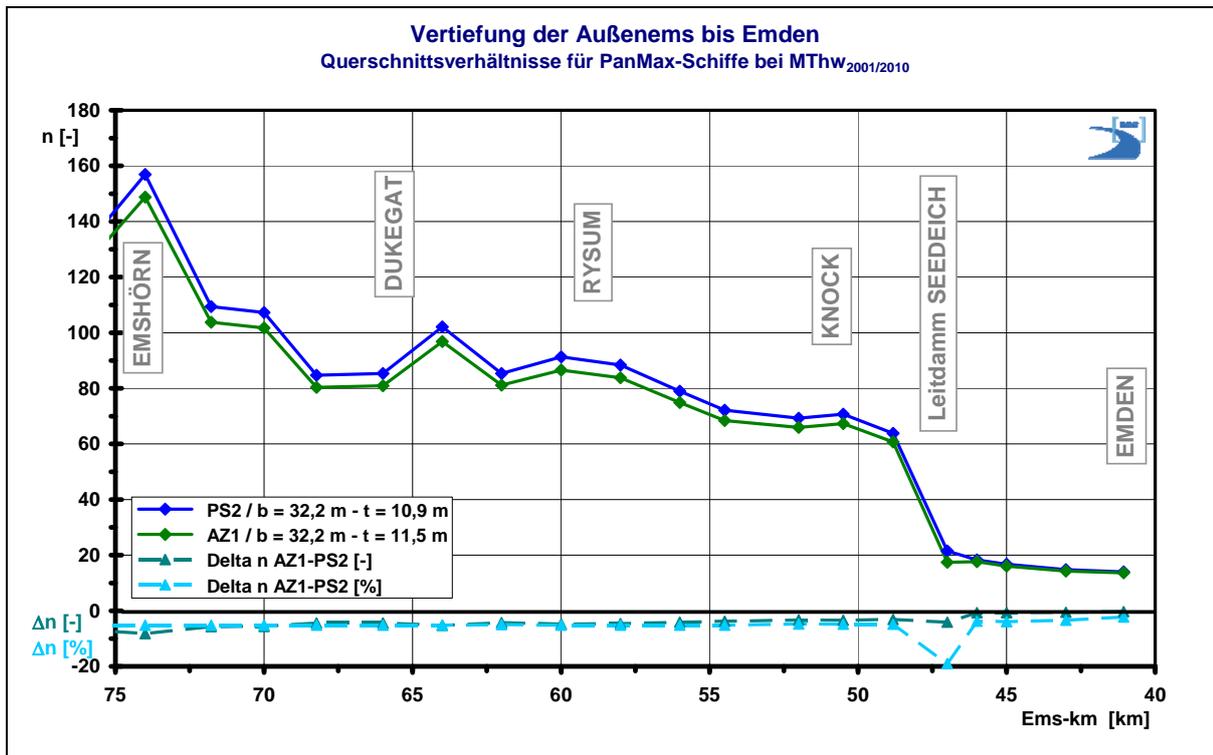


Bild 26: Ausbaubedingte Änderung der Querschnittsverhältnisse für ein PanMax-Schiff zwischen Emden und Emshorn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei MThw_{2001/2010}

Annähernd analog zu den Systemversuchen im hydraulische Maßstabsmodell der BAW (vergl. Kapitel 6.3) wurden - zur Bewertung der schiffserzeugten Belastungen bei ungünstigsten Bedingungen - die Teilquerschnittsverhältnisse n_T für ein extrem außermittig fahrendes Schiff (Passierabstand lediglich eine halbe Schiffsbreite) für das „Nordufer“ (Abgänger) sowie für das „Südufer“ (Aufkommer) berechnet. Somit konnten örtliche Besonderheiten des Fahrwassers wie z.B. die Lage zu steileren Sänden oder flacheren Wattgebieten hinsichtlich der hydraulischen Wechselwirkung mit dem Schiffsverkehr deutlicher herausgearbeitet werden.

Bei den Berechnungen der Teilquerschnitte wurde wiederum unterschieden zwischen dem tideunabhängigen und dem tideabhängigen Verkehr mit jeweils maximal zugelassenem Tiefgang bei MTnw bzw. MThw. Die n_T -Verhältnisse beim PS2 und AZ1 sind in Bild 27 und Bild 28 für das „Nordufer“ als blaue Linien mit Rauten und für das „Südufer“ als grüne Linien mit Dreiecken dargestellt. Die ausbaubedingten absoluten und prozentualen Differenzen wurden in dem jeweils unteren Teil der Grafiken als unterbrochene Linien für das „Nordufer“ mit bläulich-grünen Rauten und für das „Südufer“ mit roten und orangen Dreiecken aufgetragen.

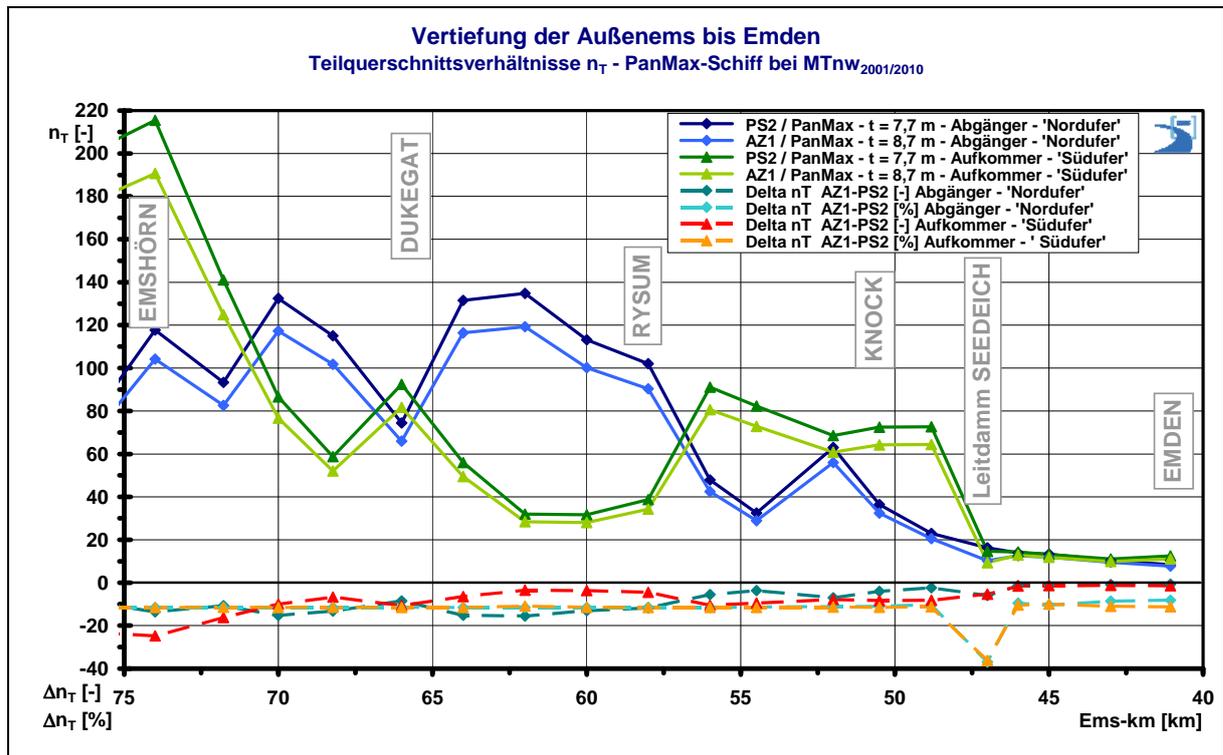


Bild 27: Ausbaubedingte Änderungen der Teilquerschnittsverhältnisse ‚Nordufer‘ und ‚Südufer‘ für tideunabhängige PanMax-Schiffe zwischen Emden und Emshörn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei MTnw_{2001/2010}

Anhand der Teilquerschnittsverhältnisse zeigen sich sowohl für tideunabhängigen (Bild 27) als auch für tideabhängigen Verkehr (Bild 28) annähernd gleiche Gebiete in der Außenems, die mehr oder weniger durch außermittig verkehrende Aufkommer oder Abgänger belastet werden:

- Im Emdener Fahrwasser liegen die Teilquerschnittsverhältnisse n_T an ‚Nordufer‘ und ‚Südufer‘ in der gleichen Größenordnung, so dass generell kein Ufer gesondert betrachtet wird. Lediglich der Ausbau der Wendestelle führt nördlich bei ca. km 41 zu einem günstigeren n_T ($n_T \approx +4\%$). Die Abnahmen der seewärtigen n_T -Verhältnisse liegen bei rund $\Delta n_T < -10\%$ (tideunabhängiger Verkehr) bzw. etwa $\Delta n_T \approx -4\%$ bis -5% (tideabhängiger Verkehr), wobei die örtliche Strombaumaßnahme an den Buhnen 6 und 7 (Ems-km 47) Werte von rund $\Delta n_T \approx -36\%$ (bzw. $\Delta n_T \approx -20\%$), bewirken.
- Seewärts des Leitdamms Seedeich ab annähernd Ems-km 48 im Gatjebogen bis etwa Ems-km 56 ist eher das ‚Nordufer‘ höheren schiffserzeugten Belastungen ausgesetzt, da hier die Teilquerschnittsverhältnisse nur rund 30 % der Werte des ‚Südufers‘ ausmachen. Die ausbaubedingten Differenzen betragen durchgehend etwa $\Delta n_T \approx -12\%$ (tideunabhängiger Verkehr) bzw. $\Delta n_T \approx -5\%$ (tideabhängiger Verkehr) und variieren nur in der Nachkommastelle aufgrund lokaler Bathymetrieänderungen. Die Absolutwerte nehmen tendenziell leicht zu.

- Ab etwa Ems-km 57 nähert sich die Fahrrinne der Außenems im „Ostfriesischen Gattje“ dem südöstlich gelegenen Paapsand, so dass hier bis etwa Ems-km 65 (Robbenplate) aufgrund der geringeren Teilquerschnitte am ‚Südufer‘ (Bezeichnung wird trotz Richtungsänderung beibehalten) eine höhere Betroffenheit als am ‚Nordufer‘ zu erwarten sein wird. Die prozentualen Änderungen bleiben für Aufkommer und Abgänger bei MTnw weiterhin bei etwa $\Delta n_T \approx -12\%$, bei MThw bei rund $\Delta n_T \approx -5\%$. Die ausbaubedingte Reduzierung der n_T -Absolutwerte liegt bei MTnw-Verhältnissen (Bild 27) etwa mit dem Faktor 2 über den Werten des tideabhängigen Verkehrs bei MThw (Bild 28), was u.a. aufgrund der unterschiedlichen Tiefgangszunahmen zu erwarten war.

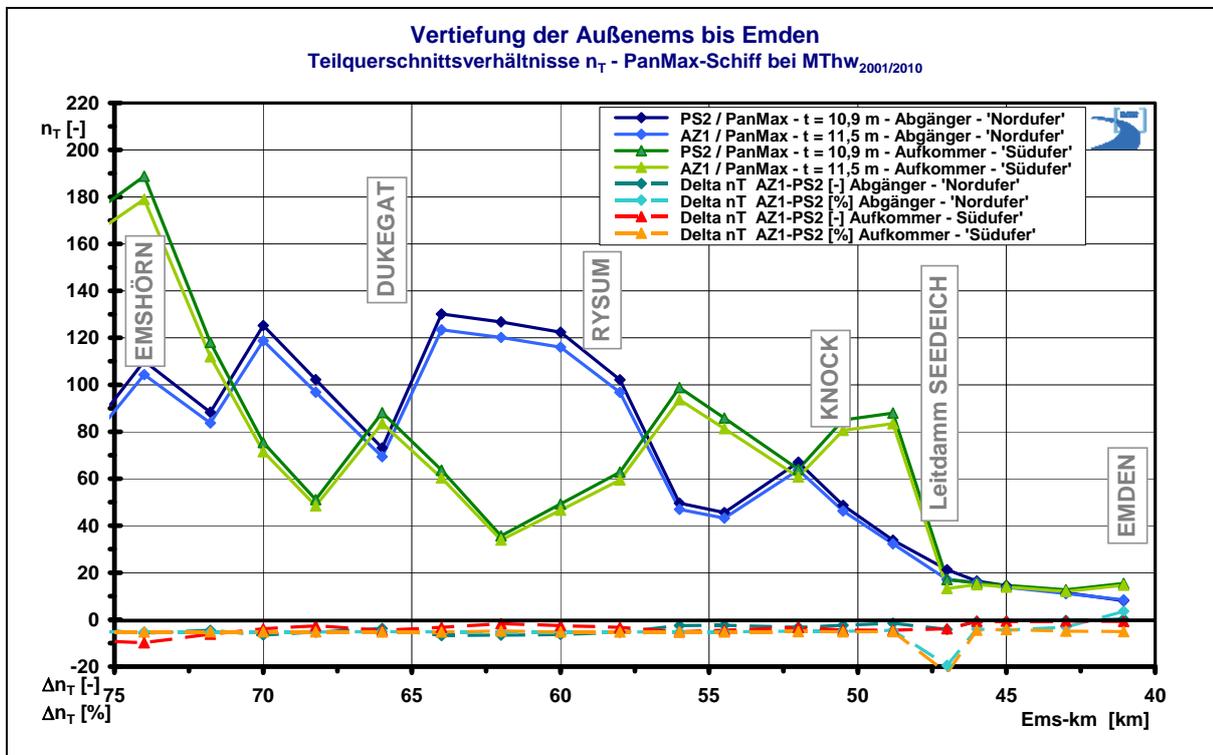


Bild 28: Ausbaubedingte Änderungen der Teilquerschnittsverhältnisse ‚Nordufer‘ und ‚Südufer‘ für tideabhängige PanMax-Schiffe zwischen Emden und Emshörn sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei MThw_{2001/2010}

- Die Teilquerschnittsverhältnisse etwa ab Ems-km 66 werden durch den Abstand der Fahrrinne zum ‚Südufer‘ und zur nordwestlich gelegenen Dukegatplate bestimmt. Der Abstand der Fahrrinne zum Niederländischen Werkshafen nördlich der Emscentrale reduziert zwar bei etwa Ems-km 68 auffallend das örtliche Teilquerschnittsverhältnis am ‚Südufer‘ deutlich, allerdings bleiben die prozentualen ausbaubedingten Änderungen weiterhin konstant bei rund $\Delta n_T \approx -12\%$ (tideunabhängiger Verkehr) bzw. $\Delta n_T \approx -5\%$ (tideabhängiger Verkehr).

- Im Abschnitt des Äußeren Ästuartrichters seewärts von etwa Emshörn, der für die Ausbaumaßnahme nicht vertieft werden muss (Bild 29; seeseitige Erweiterung von Bild 27), nehmen die Teilquerschnittsverhältnisse auf der nördlichen Fahrrinnenseite bis seewärts von Borkum bei ca. Ems-km 94 zwischen $100 < n_T < 150$ stetig zu. Dagegen ergeben sich zum südwestlich gelegenen Mövensteert im Bereich Ems-km 80 auffällig geringe Werte von ca. $n_T \approx 28$. Nach seewärtigen deutlichen Aufweitungen südlich der Fahrrinne nähern sich im Bereich der Hubertplate die nördlichen und südlichen Teilquerschnitte wieder auf Werte zwischen $130 < n_T < 180$ an. Die hohen Absolutwerte der ausbaubedingten Änderungen der Teilquerschnittsverhältnisse für den tideunabhängigen Verkehr ($\Delta t = +1,0$ m) bei MTnw zwischen Ems-km 85 und 90 werden bestimmt durch das südlich der Fahrrinne gelegene seewärtige Stromspaltungsgebiet der Alten Ems und dem Randzelgat. Prozentual werden die ausbaubedingten Änderungen weiterhin konstant bei rund $\Delta n_T \approx -12\%$ (tideunabhängiger Verkehr) bzw. $\Delta n_T \approx -5\%$ (tideabhängiger Verkehr; keine grafische Darstellung) liegen.

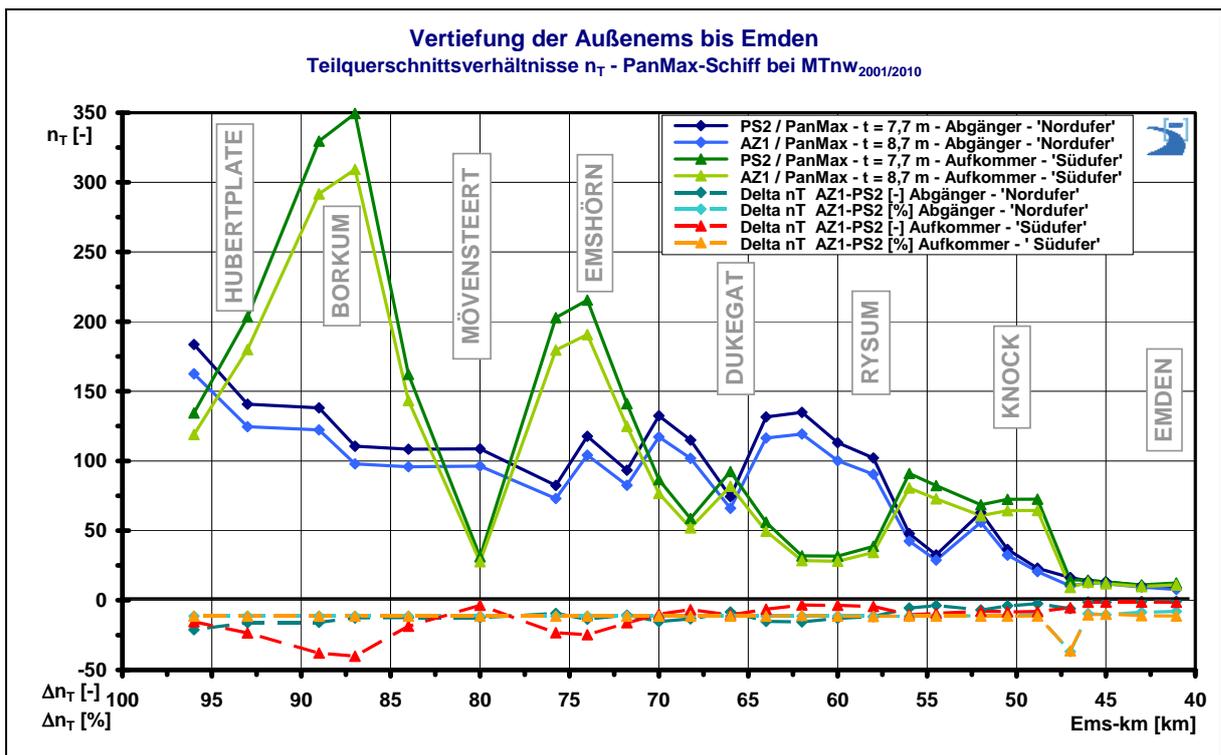


Bild 29: Ausbaubedingte Änderungen der Teilquerschnittsverhältnisse ‚Nordufer‘ und ‚Südufer‘ für tideunabhängige PanMax-Schiffe zwischen Emden und Nordsee sowie Differenzen in Betrag und Prozent (PS2 und AZ1) bei MTnw_{2001/2010}

Die analysierten ausbaubedingten Änderungen der Querschnitts- und vornehmlich der Teilquerschnittsverhältnisse werden - wie bei den Beurteilungskriterien in Kapitel 7.1.1 beschrieben - zur Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen herangezogen.

7.1.4 Prognose Abschnitt Emders Fahrwasser bis Leitdamm Seedeich

Im Abschnitt Emders Fahrwasser zwischen dem Hafen Emden und dem seewärtigem Ende des Leitdamms Seedeich (ca. Ems-km 40 bis 48) sind - annähernd durchgehend - Vertiefungen in der Fahrinnenachse bis zu rund $\Delta h \approx +0,5$ m erforderlich. Die Teilquerschnittsverhältnisse der bemessungsrelevanten Fahrzeuge werden etwa $10 < n_T < 20$ betragen und ändern sich um rund $\Delta n_T \approx -12$ % (tideunabhängiger Verkehr) bzw. $\Delta n_T \approx -5$ % (tideabhängiger Verkehr). Die gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten der tiefgangsrelevanten Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m liegen überwiegend zwischen $5 \text{ kn} < v_{S,dW} < 12 \text{ kn}$.

Auf Basis der Messungen des Ist-Zustands sind für die ungünstigste Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen im Abschnitt Emders Fahrwasser nach ihrer Priorität maßgeblich,

- die geringen Teilquerschnittsverhältnisse,
- die erforderlichen Fahrinnenvertiefungen,
- die Parameterstudien zur Tiefgangszunahme mit / ohne Vertiefungsmaßnahmen,
- die Ergebnisse der Parameterstudie zum tide-(un)-abhängigen Verkehr,
- die relativ geringen Schiffsgeschwindigkeiten.

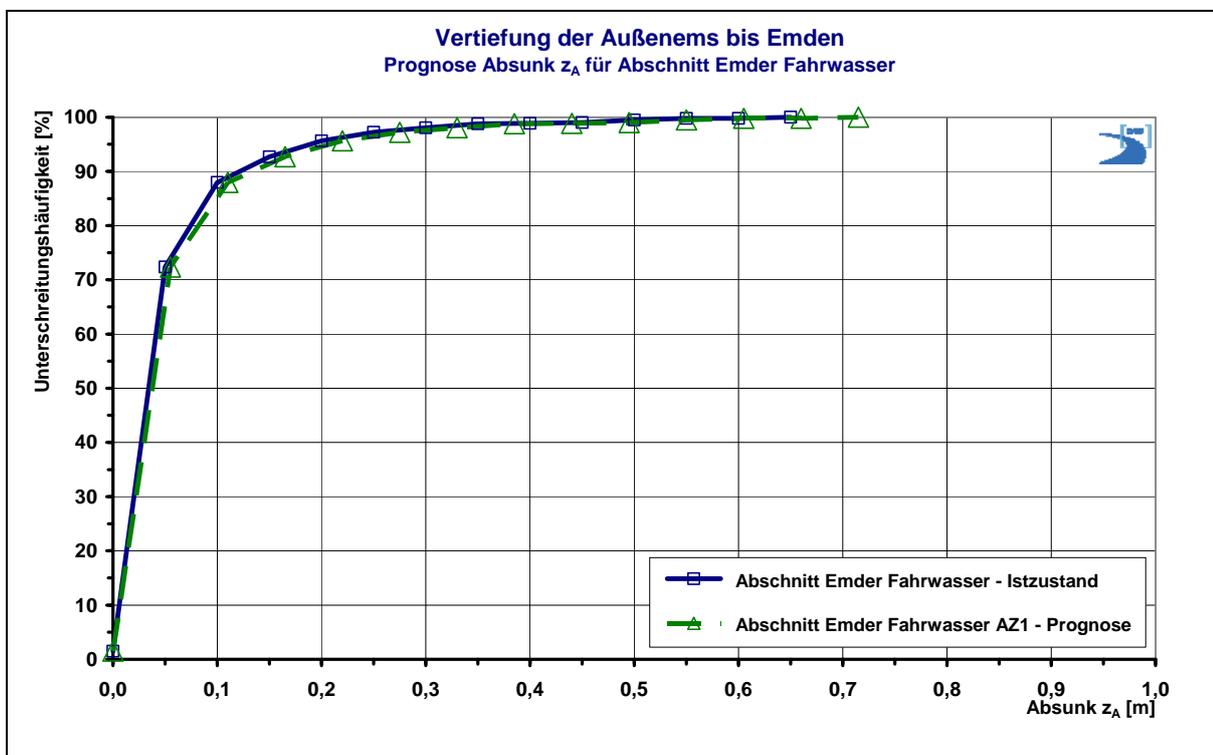


Bild 30: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des ausbaubedingten schiffserzeugten Absunks im Abschnitt Emders Fahrwasser bis Leitdamm Seedeich

Ausgehend von gleichbleibenden Schiffsgeschwindigkeiten werden die ausbaubedingten langperiodischen Änderungen, wie in Bild 30 für den Absenk z_A dargestellt, beidseitig der Fahrinne bei maximal $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx +10\%$ liegen, da die Tiefgangszunahmen der zukünftig tideunabhängig verkehrenden PanMax-Schiffe sowie mögliche Tiefgangsänderungen der schon heute tideunabhängig verkehrenden allgemeinen Schifffahrt durch die örtlich vorgesehenen Vertiefungen – allerdings nur zum Teil - kompensiert werden können. Somit wird auch eine Zunahme der schiffserzeugten Strömung in gleicher Größenordnung von maximal $\Delta v_R \approx +10\%$ zu erwarten sein.

Anhand der Unterschreitungswahrscheinlichkeit des Absenks in Bild 30 wird deutlich, dass im Abschnitt Emders Fahrwasser zukünftig 95 % aller langperiodischen Wellen unter $z_A \approx H_P < 0,25$ m liegen werden, und dass der Maximalwert bei etwa $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,7$ zu erwarten sein wird. Die maximale Rückstromgeschwindigkeit wird somit bei etwa $v_{R,MAX} \approx 1,4$ m/s liegen.

Die am nördlichen Fahrinnenrand betroffenen baulichen Anlagen (u.a. Deckwerke, Bühnen sowie Leitdamm) sind aufgrund der zu erwartenden Belastungszunahmen auf ihre hydraulische Bemessung hin zu überprüfen.

Die im Emders Fahrwasser vorgesehene Strombaumaßnahme durch Einengung des Querschnitts auf Höhe der Bühnen 6 und 7 (etwa Ems-km 47) um ca. 23 % wird gemäß [U7] erst ab Schiffsgeschwindigkeiten von $v_S > 11$ kn deutlich wirksam:

- Im Bereich des Bauwerks sind u.a. durch Reflexionsanteile maximale örtliche Zunahmen der schiffserzeugten langperiodischen Wellenbelastungen von rund $\Delta z_{A,MAX} \approx \Delta H_{P,MAX} \approx +20\%$ zu erwarten, im Nahbereich des Schiffs und in der Fahrinne werden es bei Passagen der Querschnittseinengung Zunahmen bis zu etwa $\Delta z_{A,MAX} \approx \Delta H_{P,MAX} \approx 15\%$ sein.
- Die schiffserzeugte Verdrängungsströmung wird am Bauwerkskopf deutlich um maximal $\Delta v_{R,MAX} \approx +60\%$ zunehmen, in Schiffsnähe und im Fahrwasser wird lokal begrenzt mit maximal $\Delta v_{R,MAX} \approx +10\%$ zu rechnen sein.

Die erhöhte schiffserzeugte Rückstromgeschwindigkeit ist für den ungünstigsten Fall (Passage bei voll entwickeltem Tidestrom) zur maximalen örtlichen Tidestromung zu addieren und bei der Bemessung der Deckschicht des neuen Strombauwerks sowie der Sicherung eines möglichen Kolks am Bühnenkopf zu berücksichtigen.

7.1.5 Prognose Abschnitt Knockster Watt bis Dukegat

Im Abschnitt Knockster Watt bis etwa Dukegat mit Gatjebogen und Paapsand (ca. Ems-km 49 bis 68) sind Vertiefungen in der Fahrrinnenachse nur zwischen ca. km 49 bis km 52 partiell bis zu rund $\Delta h \approx +1$ m und im Bereich von km 62 bis km 65 teils bis zu rund $\Delta h \approx +0,5$ m erforderlich. Die ausschlaggebenden Teilquerschnittsverhältnisse der bemessungsrelevanten Fahrzeuge werden am Nordufer im Bereich Knock / Rysum (km 49 bis km 57) zwischen etwa $20 < n_T < 60$ liegen und werden sich ausbaubedingt um rund $\Delta n_T \approx -12$ % (tideunabhängiger Verkehr) bzw. $\Delta n_T \approx -5$ % (tideabhängiger Verkehr) ändern. Ab etwa km 58 bis rund km 65 dominiert der Einfluss des Paapsands auf der Südseite der Fahrrinne mit Teilquerschnittsverhältnissen der bemessungsrelevanten Fahrzeuge zwischen etwa $30 < n_T < 60$. Diese werden ausbaubedingt um rund $\Delta n_T \approx -12$ % (tideunabhängiger Verkehr) bzw. $\Delta n_T \approx -5$ % (tideabhängiger Verkehr) zunehmen. Die gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten der tiefgangsrelevanten Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m liegen im Wesentlichen zwischen $11 \text{ kn} < v_{S,dW} < 16 \text{ kn}$.

Auf Basis der Messungen des Ist-Zustands Paapsand sind für die ungünstigste Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in diesem Abschnitt nach ihrer Priorität maßgeblich,

- die örtlichen Teilquerschnittsverhältnisse am ‚Nordufer‘ bzw. ‚Südufer‘,
- die Parameterstudie zur Tiefgangszunahme mit / ohne Vertiefungsmaßnahme,
- die Ergebnisse der Parameterstudie zum tide-(un)-abhängigen Verkehr,
- die relativ hohen Schiffsgeschwindigkeiten.

Aufgrund der bereichsweisen Vertiefungen bis auf Höhe Knock (km 52) wird insgesamt keine bzw. nur eine sehr geringe Zunahme der schiffserzeugten Belastungen von $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx \Delta V_R < +10$ % in der Fahrrinne zu erwarten sein. Das Siel- und Schöpfwerk Knockster Tief wird aufgrund des großen Abstands zur Fahrrinne (ca. 1.600 m) und der bis dahin wirkenden Energiedissipation wie schon heute nicht messbar durch Schiffswellen belastet werden.

Im Gatjebogen, im Bereich Rysum (Mittelplate) und entlang des Paapsands bis km 68 sind unter den ungünstigsten Bedingungen, dass die derzeitige Fahrrinntiefe gerade noch ausreichend ist, und infolge der hohen Schiffsgeschwindigkeiten wasserstandsabhängige Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen von $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx \Delta V_R < +10$ % bei einer Tiefgangszunahme um $\Delta t = +0,6$ m (etwa MThw; tideabhängiger Verkehr) und bis zu ca. $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx \Delta V_R \approx +15$ % bei einer Tiefgangszunahme um $\Delta t = +1,0$ m (ca. MTnw; tideunabhängiger Verkehr) zu erwarten.

Dementsprechend werden z.B. die Ränder der bei Niedrigwasser trocken fallenden Sände und Watten (z.B. Paapsand) durch den tideunabhängigen Verkehr zukünftig um etwa +5 % stärker belastet werden als die bei Tidehochwasser betroffenen Uferzonen (z.B. Bühnenfelder bei Rysum) infolge der tideabhängig verkehrenden Fahrzeuge.

Die teilweisen Vertiefungsmaßnahmen bei km 62 bis km 65 werden sich aufgrund der hohen Schiffsgeschwindigkeiten kaum belastungsmindernd auswirken.

Auf Basis der für den Abschnitt Paapsand repräsentativ angenommenen Messungen in der Natur sind in Bild 31 die zu erwartenden Zunahmen der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des tideabhängigen ($\Delta t = +0,6$ m; $\Delta z_A < +10$ %) und tideunabhängigen Verkehrs ($\Delta t = +1,0$ m; $\Delta z_A \approx +15$ %) zusätzlich zu den Werten des Ist-Zustands aufgetragen.

Am Beispiel der in Bild 31 aufgetragenen Unterschreitungswahrscheinlichkeit des Absunks wird deutlich, dass im Abschnitt Paapsand im ungünstigsten Fall (gerade keine Vertiefung erforderlich, tideunabhängiger Verkehr) zukünftig 95 % aller langperiodischen Wellen unter $z_A \approx H_P < 0,15$ m liegen werden, und dass der Maximalwert bei etwa $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,5$ m zu erwarten sein wird.

Die maximale Rückstromgeschwindigkeit wird im ungünstigsten Fall - einer tideunabhängigen Passage eines bemessungsrelevanten Fahrzeugs - bei etwa $v_{R,MAX} \approx 0,3$ m/s liegen.

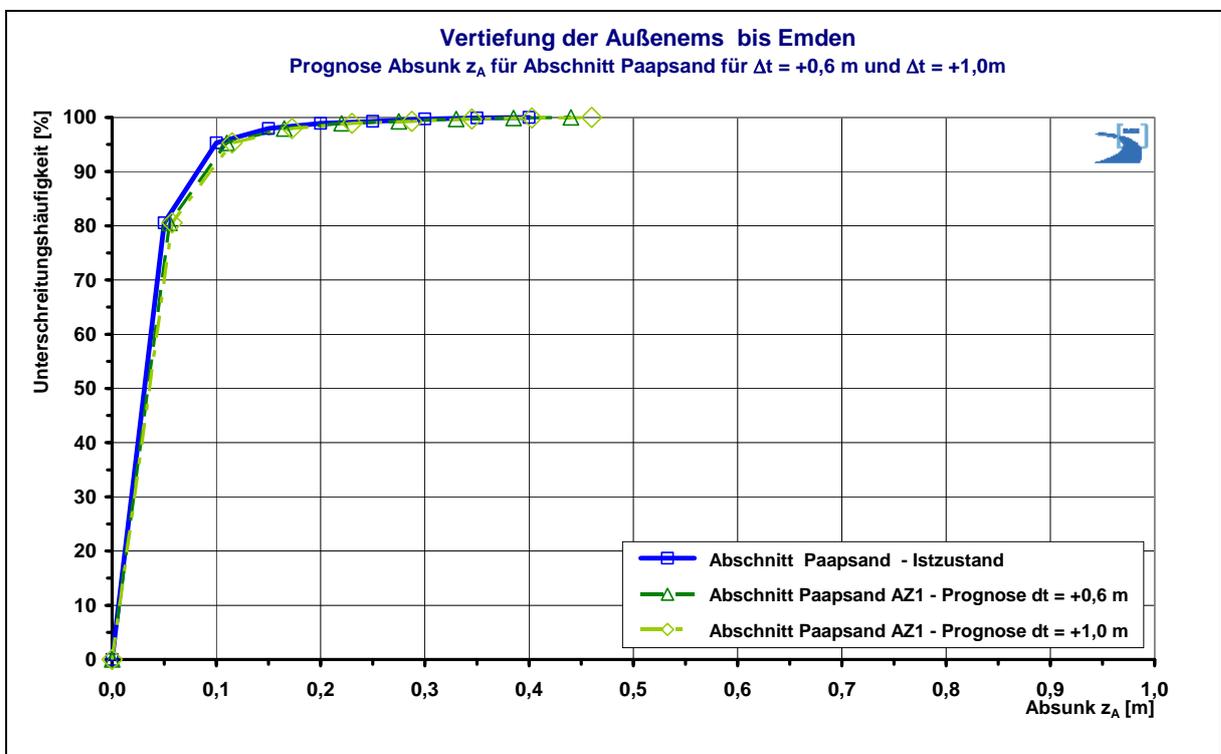


Bild 31: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des ausbaubedingten schiffserzeugten Absunks im Abschnitt Knockster Watt bis Dukegat

Der etwa auf Höhe Ems-km 68 am Niederländischen ‚Südufer‘ liegende Werkshafen nördlich der Eemscentrale wird

- aufgrund der Tiefgangszunahme der großen Fahrzeuge,
- da keinen Vertiefungen in der Fahrrinne erforderlich sind,
- infolge der hohen Schiffsgeschwindigkeiten,
- bei Teilquerschnittsverhältnissen von etwa $n_T \approx 50$ sowie
- wegen des geringen Abstands zur Fahrrinne (ca. 600 m)

mit einer Zunahme der - schon heute im Einzelfall nicht auszuschließenden - langperiodischen schiffserzeugten Wellen vor der Hafeneinfahrt von rund $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +10\%$ bei Tidehochwasser und von ca. $\Delta z_A \approx \Delta H_P < +15\%$ bei Tideniedrigwasser zu rechnen haben.

7.1.6 Prognose Abschnitt Emshörn bis Nordsee

Bis zum Ende der vorgesehenen Ausbaustrecke sind im Abschnitt seewärts von Emshörn bis zur Nordsee (ca. Ems-km 70 bis 100) nur zwischen km 72 und km 73 Vertiefungen in der Fahrrinne bis zu maximal $\Delta h \approx +0,5$ m erforderlich. Die Teilquerschnittsverhältnisse der bemessungsrelevanten Fahrzeuge steigen am ‚Nordufer‘ stetig von minimal etwa $n_T \approx 75$ bei Emshörn (ca. km 76), etwa $n_T \approx 100$ beim Leitwerk Borkum Fischerbalje (ca. km 85) bis auf Werte von über $n_T > 120$ seewärts von Borkum (ca. km 94). Auf der ‚Südseite‘ der Fahrrinne steigen die Teilquerschnittsverhältnisse der bemessungsrelevanten Fahrzeuge seewärts von ca. km 70 (etwa Eemshaven) deutlich auf Werte über $n_T > 100$, gegenüber von Borkum auf Werte von $n_T > 200$ an, um dann auf Höhe Hubertplate (ca. km 96) wieder Werte von etwa $n_T \approx 120$ anzunehmen. Eine Ausnahme bildet der südöstliche Bereich des Mövensteert, bei dem die Teilquerschnittsverhältnisse bis auf Werte zwischen $25 < n_T < 30$ zurückgehen, da dort die Fahrrinne in ähnlichen Abständen wie am Paapsand vorbeiführt. Die Teilquerschnittsverhältnisse werden beidseitig der Fahrrinne auch in diesem Abschnitt ausbaubedingt um rund $\Delta n_T \approx -12\%$ (tideunabhängiger Verkehr) bzw. $\Delta n_T \approx -5\%$ (tideabhängiger Verkehr) abnehmen. Die gemessenen Schiffsgeschwindigkeiten der tiefgangsrelevanten Fahrzeuge vor Borkum mit Tiefgängen über $t > 7,5$ m liegen im Wesentlichen zwischen $12 \text{ kn} < v_{S,dW} < 18 \text{ kn}$.

Auf Basis der Messungen des Ist-Zustands vor Borkum sind für die ungünstigste Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in diesem Abschnitt nach ihrer Priorität maßgeblich,

- die großen Teilquerschnittsverhältnisse (Ausnahme Mövensteert),
- die Parameterstudie zur Tiefgangszunahme ohne Vertiefungsmaßnahme,
- die Ergebnisse der Parameterstudie zum tide-(un)-abhängigen Verkehr,
- die hohen Schiffsgeschwindigkeiten.

Da das derzeitige Fahrwasser zwar ausreichende Tiefen aufweist und beidseits der Fahrrinne im Wesentlichen große Teilquerschnittsverhältnisse vorliegen werden, ist davon auszugehen, dass aufgrund der Tiefgangszunahme und infolge der hohen Schiffsgeschwindigkeiten unabhängig vom Wasserstand maximale Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen von $\Delta z_A \approx \Delta H_P \approx \Delta v_R < +10\%$ auftreten werden.

Die maximal zu erwartenden Zunahmen der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten sind beispielhaft für den Abschnitt Borkum auf Basis der Messungen in der Natur für den Absunk in Bild 32 zusammen mit den Werten des Ist-Zustands nach [U3] aufgetragen.

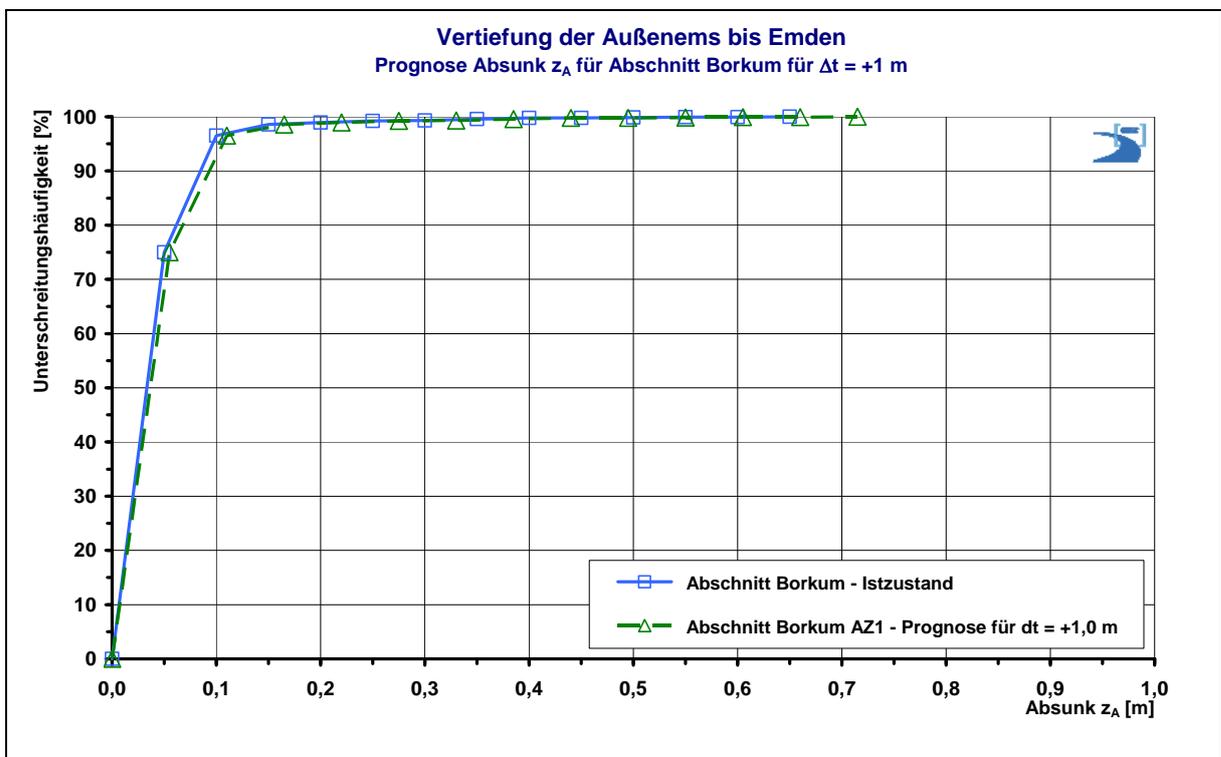


Bild 32: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten des ausbaubedingten schiffserzeugten Absunks im Abschnitt Emshörn bis Nordsee

Im Abschnitt Borkum werden (ausgenommen Mövensteert) im ungünstigsten Fall weiterhin rund 95 % aller langperiodischen Wellen unter $z_A \approx H_P < 0,1$ m, der Maximalwert bei annähernd $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,7$ m und die maximale schiffserzeugte Rückstromgeschwindigkeit bei etwa $v_{R,MAX} \approx 0,2$ m/s liegen.

Der südöstliche Bereich des Mövensteert (ca. Ems-km 79 bis 81) ist aufgrund der geringen Teilquerschnittsverhältnisse ($25 < n_T < 30$) und der weiterhin zu erwartenden hohen Schiffsgeschwindigkeiten hinsichtlich der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen ähnlich den Bedingungen am Paapsand zu bewerten, auch wenn im Randzelgat deutlich größere Wassertiefen vorhanden sind. Demnach werden am südöstlichen Mö-

vensteert vornehmlich bei Tideniedrigwasserbedingungen (tideunabhängige Fahrt) ausbaubedingte Belastungszunahmen von $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx \Delta V_R \approx +15\%$ erwartet, so dass zukünftig 95 % aller langperiodischen Wellen zwar noch unter $Z_A \approx H_P < 0,15$ m liegen werden, der Maximalwert mit hoher Wahrscheinlichkeit auf etwa $Z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX} \approx 0,75$ m ansteigen wird. Bei Tidehochwasserbedingungen wird die Belastungszunahme wegen des niedrigeren Höhenniveaus des Mövensteerts (km 80: ca. -2,5 mNHN) im Vergleich zum Paapsand (km 62: ca. ± 0 mNHN) und der somit zeitweilig deutlich höheren Wasserüberdeckung eher unter $\Delta Z_A \approx \Delta H_P \approx \Delta V_R < +10\%$ liegen.

7.1.7 Prognose für tiefgangsrelevante Fahrzeuge $t > 7,5$ m

Ausgehend davon, dass die Vertiefung der Außenems bis Emden in erster Linie Auswirkungen auf die Abladetiefe der tiefgangsrelevanten Schiffe mit $t > 7,5$ m hat, eine Tiefgangserhöhung von $\Delta t = +1,0$ m für tideunabhängigen sowie $\Delta t = +0,6$ m und eine Erweiterung des Tidefensters für tideabhängigen Verkehr ermöglicht, wurden diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer heutigen Belastungsgrößen und Schiffsgeschwindigkeiten gesondert betrachtet (vergl. Kapitel 5.2).

Grundlage der Prognosen waren wiederum die in Kapitel 7.1.1 vorgestellten Beurteilungskriterien (u.a. Messungen in der Natur, Systemversuche, Teilquerschnittsverhältnisse, Schiffsgeschwindigkeiten).

Darüber hinaus wurde eine separate Prognose der schiffserzeugten Belastungszunahme nach der Ausbaumaßnahme für diese Tiefgänger vorgenommen und für die Abschnitte Emden Fahrwasser (A), Paapsand (B) und Borkum Seeverkehr (C) auf Grundlage der Unterschreitungshäufigkeiten des Absunks in Bild 33 dargestellt.

Die zu erwartenden prognostizierten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten basieren auf den in den vorherigen Kapiteln abgeleiteten abschnittswisen prozentualen Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen.

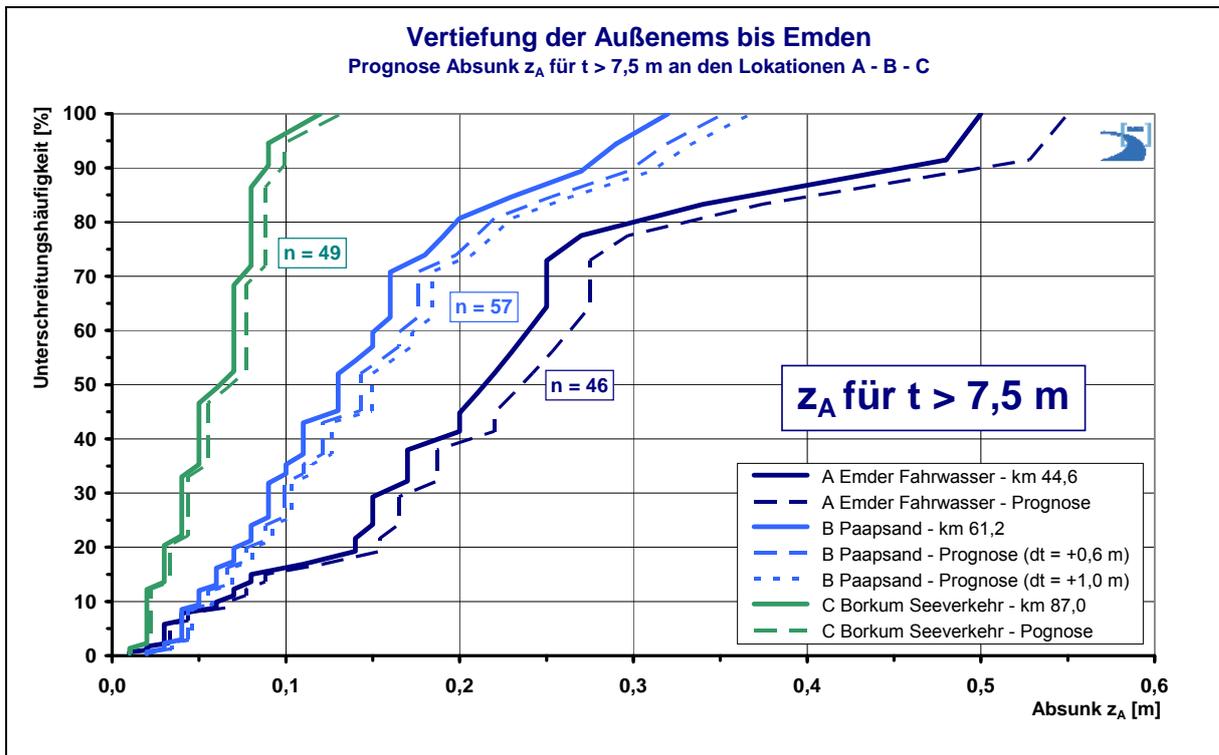


Bild 33: Prognose der Unterschreitungshäufigkeiten des ausbaubedingten Absunks z_A für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m an den Lokationen A Emder Fahrwasser, B Paapsand und C Borkum

Die Prognose der ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Belastungen ($z_A \approx H_P$) für Fahrzeuge mit Tiefgängen $t > 7,5$ m ergab entsprechend der prozentualen Zunahmen folgende Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (vergl. Bild 33; Werte auf 0,1 m gerundet):

- Abschnitt Emder Fahrwasser (+10 %):

| | |
|---------------------------------|---|
| 50 % $z_A \approx H_P < 0,3$ m; | 95 % $z_A \approx H_P < 0,6$ m ($z_{A,MAX} \approx 0,6$ m) |
|---------------------------------|---|
- Abschnitt Paapsand (+10 % bzw. +15 %):

| | |
|--|---|
| • $\Delta t = +0,6$ m: 50 % $z_A \approx H_P < 0,2$ m; | 95 % $z_A \approx H_P < 0,4$ m ($z_{A,MAX} \approx 0,4$ m) |
| • $\Delta t = +1,0$ m: 50 % $z_A \approx H_P < 0,2$ m; | 95 % $z_A \approx H_P < 0,4$ m ($z_{A,MAX} \approx 0,4$ m) |
- Abschnitt Borkum (+10 %):

| | |
|---------------------------------|---|
| 50 % $z_A \approx H_P < 0,1$ m; | 95 % $z_A \approx H_P \approx 0,1$ m ($z_{A,MAX} \approx 0,1$ m) |
|---------------------------------|---|

Für exponierte Bereiche im Abschnitt Borkum, wie dem südöstlichen Mövensteert, werden Werte in der Größenordnung der Prognosen des Abschnitts Paapsand erwartet.

Im Vergleich zu der Prognose auf Grundlage der Unterschreitungshäufigkeit aller gemessenen Fahrzeuge liegen die prognostizierten Absolutwerte für die tiefgangsrelevanten Schiffe

mit $t > 7,5$ m in den Abschnitten Emden Fahrwasser und Paapsand (sowie südöstlicher Mövensteert) bei 95 % aller Werte deutlich höher, bei Borkum (ohne Mövensteert) in der gleichen Größenordnung, während die Maximalbelastung etwa gleich, im Abschnitt Borkum (ohne Mövensteert) für die Tiefgänger aber als erheblich geringer bewertet wird.

Die Häufigkeit von schiffserzeugten Wellenereignisse durch die tiefgangsrelevanten Fahrzeuge, damit auch der prognostizierte höhere Belastungsanteil durch diese Schiffe, liegt auf Grundlage der Messungen in der Natur bei etwa 3 % aller repräsentativen Wellenereignisse, die für die gesamte derzeit verkehrende Schiffsflotte gemessen und prognostiziert wurde.

Trotz des geringen Anteils der schiffserzeugten Belastung durch die tiefgangsrelevanten Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m ist davon auszugehen, dass die - auf den prozentualen Zunahmen der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten basierenden - Absolutwerte zukünftig als maßgebliche langperiodische schiffserzeugte Belastung zur Bewertung der Betroffenheiten zu verwenden sind, sofern sie über den Prognosewerten der Gesamtheit aller Fahrzeuge liegen.

7.1.8 Prognose zur ausbaubedingten Änderung der Sekundärwellenbelastung

Die Größenordnung der anhand der Systemversuche im hydraulischen Maßstabsmodell ermittelten Sekundärwellen lag bis zu Schiffsgeschwindigkeiten von $v_{S,NATUR} \approx 12$ kn unterhalb der Grenzbedingungen ($H_{NATUR} > 0,8$ m), so dass die Ergebnisse der Systemversuche nicht in die Beurteilungskriterien einbezogen werden konnten.

Da aber die kurzperiodischen Sekundärwellen infolge langperiodischer, geschwindigkeitsabhängiger Druckänderungen an der vorderen Schulter eines Schiffs sowie am Heck entstehen, kann aufgrund der prognostizierten langperiodischen Amplitudenerhöhung durch die allgemeine Schiffsflotte sowie durch die tiefgangsrelevanten Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m eine maximale Belastungszunahme in der gleichen Größenordnung der langperiodischen Druckänderungen bis maximal $\Delta H_S \approx +15\%$ im Abschnitt Paapsand und $\Delta H_S \approx +10\%$ in den Abschnitten Emden Fahrwasser und Borkum erwartet werden (südöstlicher Mövensteert: $\Delta H_S \approx +15\%$).

Die Prognosen der Unterschreitungswahrscheinlichkeit von H_S für die Abschnitte Emden Fahrwasser, Paapsand und Borkum Seeverkehr (jeweils AZ1) erfolgten auf Grundlage der Unterschreitungshäufigkeiten der in der Natur gemessenen Sekundärwellen (vergl. Bild 9, unten) und wurden (ohne Mövensteert) zusammen mit den Messdaten in Bild 33 für alle Fahrzeuge als unterbrochene Linien aufgetragen.

Damit werden bei Einbeziehung aller Fahrzeuge folgende abschnittswisen Unterschreitungshäufigkeiten von Absolutwerten prognostiziert (Werte auf 0,1 m gerundet):

- Emden Fahrwasser (+10 %): 50 % $H_S < 0,3 \text{ m}$; 95 % $H_S < 0,7 \text{ m}$ ($H_{S,MAX} \approx 1,2 \text{ m}$)
- Paapsand (+15 %): 50 % $H_S < 0,4 \text{ m}$; 95 % $H_S < 0,8 \text{ m}$ ($H_{S,MAX} \approx 1,5 \text{ m}$)
- Borkum (+10 %): 50 % $H_S < 0,5 \text{ m}$; 95 % $H_S < 0,7 \text{ m}$ ($H_{S,MAX} \approx 1,5 \text{ m}$)

Die prognostizierten Unterschreitungshäufigkeiten der ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen schiffserzeugten Wellen für Fahrzeuge mit $t > 7,5 \text{ m}$ wurden tabellarisch in Kapitel 8 zusammengestellt und hier nicht gesondert aufgetragen.

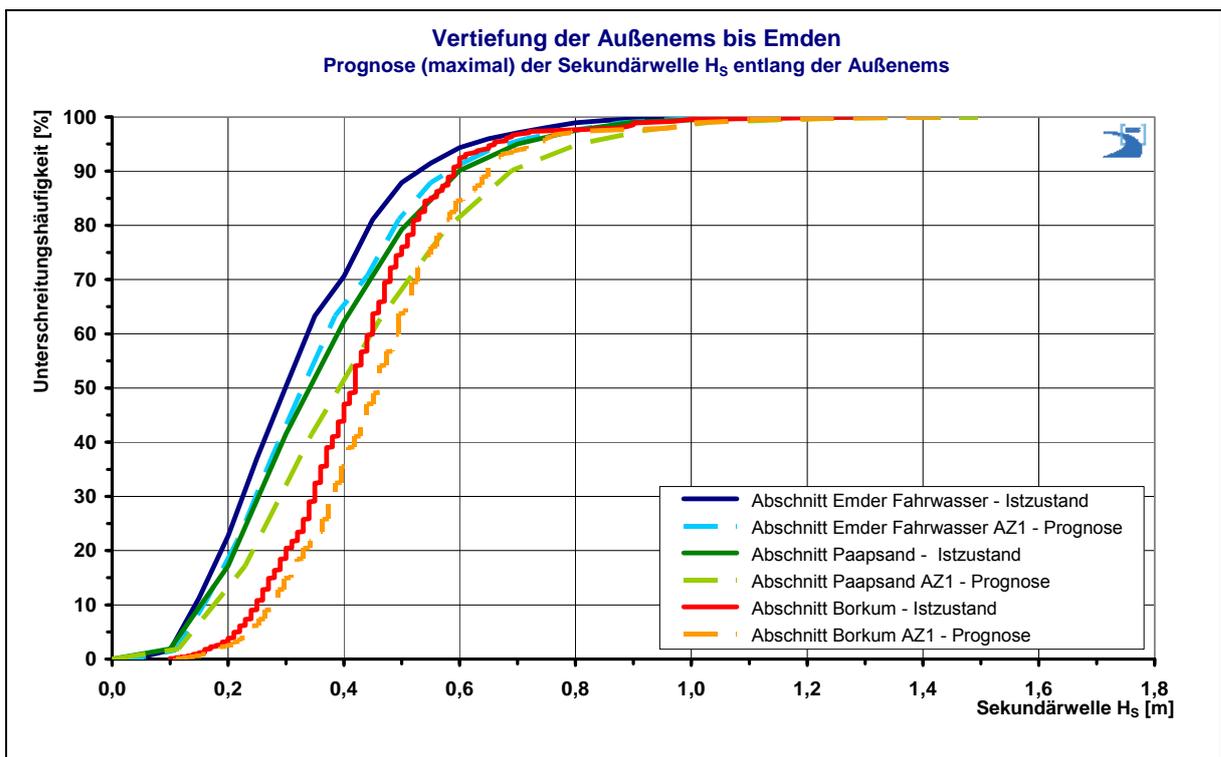


Bild 34: Prognose der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten, kurzperiodischen Sekundärwellen für alle Fahrzeuge entlang der Außenems

Die - auf den prozentualen Zunahmen der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten basierenden – prognostizierten Zunahmen der Sekundärwellenbelastung sind (vor allem im Abschnitt Borkum) hinsichtlich der Häufigkeit ihres Auftretens sowie ihres Amplitudenspektrums in Relation zu den winderzeugten Seegangsbelastungen zu bewerten (vergl. Kapitel 5.2).

7.1.9 Bewertung nach potentiellen Betroffenheiten

In der Beschreibung des Ist-Zustands wurden unter Kapitel 5.4 u.a. die Wirkungsmechanismen schiffserzeugter Belastungen auf die Umwelt sowie auf ausgewählte Schutzgüter analysiert. Zur Bewertung potentieller Betroffenheiten durch prognostizierte schiffserzeugte Belastungszunahmen wird im Folgenden auf einzelne Sach-, Umwelt- und Kulturgüter gesondert eingegangen:

Die Deckschichten von Leitdämmen, Deckwerken und scharliegende Deichfüßen werden angesichts der durch die Schifffahrt schon heute bewirkten lang- und kurzperiodischen Absolutwerte (z.B. Unterschreitungswahrscheinlichkeit 95 %: $z_A \approx H_P < 0,2$ m; $H_S < 0,7$ m) durch eine Zunahme um 10 % bis 15 % nicht gefährdet werden. Die derzeitige Bemessungspraxis ist hinsichtlich der maximalen Einzelereignisse zu überprüfen. Für exponiert liegende Bauwerke wie z.B. den Leitdamm Borkum Fischerbalje sind die schiffserzeugten Wellenbelastungen und deren ausbaubedingte Änderungen von untergeordneter Bedeutung gegenüber den winderzeugten Seegangbelastungen, wie Messungen ca. 880 m seewärts des Bauwerkskopfs bei Sturmereignissen z.B. mit signifikanten Wellenhöhen von $H_{1/3} \approx 2$ m belegen (nach [U3]). Bei erhöhten Wasserständen an den Deichen (z.B. bei Sturmfluten) sind die schiffserzeugten Belastungszunahmen in der Außenems aufgrund des großen Abstands der Fahrrinne zum befestigten Ufer und wegen des dann für die Schiffe deutlich höheren Querschnittsverhältnisses nachrangig gegenüber den ohnedies auf die Außenböschung wirkenden Wasserstands- und Windwellenbelastungen (vergl. Kapitel 5.2).

Flache Sände, Wattgebiete und natürliche Ufer werden im Nahbereich der Fahrrinne entsprechend der abschnittsweise prognostizierten schiffserzeugten Wellen- und Strömungszunahme von etwa +10 % bis +15 % direkt belastet werden (z.B. Mövensteert). In Abhängigkeit des Wasserstands und mit zunehmendem Abstand zur Fahrrinne (z.B. Hubertplate) werden bei der weiteren Wellenausbreitung die Belastungszunahmen entsprechend der Absolutwerte infolge flachwasserbedingter Energiedissipation gedämpft und entsprechend abklingen. Langperiodische schiffserzeugte Belastungen werden durch Umformungsprozesse in einem deutlich geringeren Maß reduziert wie kurzperiodische Wellenereignisse. Somit wird in den Teilstrecken, in denen schon heute Erosion durch schiffserzeugte Belastungen auftritt, auch zukünftig mit Erosionsprozessen zu rechnen sein.

Bauliche Anlagen entlang der Außenems bis Emden (z.B. Siel- und Schöpfwerk Knockster Tief; vergl. Kapitel 5.4.3) werden aufgrund ihres Abstands zur Fahrrinne von der abschnittsweise prognostizierten schiffserzeugten Belastungszunahmen an der Fahrrinnenkante von etwa +10 % bzw. +15 % nicht betroffen sein. Eine Ausnahme kann hier der Werkshafen bei Eemshaven (nördlich der Eemscentrale) bilden, der bei einem Abstand der Hafeneinfahrt zur Fahrrinne von ca. 600 m vor allem langperiodische schiffserzeugte Wellen- und Strömungszunahmen von maximal ca. +15 % zu erwarten hat. Dies ist hinsichtlich der Nutzungsbedingungen des Werkshafens zu beachten.

Die Sport- und Kleinschifffahrt wird die ca. +10 % bis +15 % Zunahme der derzeit geringen schiffserzeugten Belastungen im gesamten Revier (95 % von $z_A \approx H_P < 0,2$ m und von $H_S < 0,7$ m) bezüglich kurzperiodischer Wellenhöhe oder langperiodischer Verdrängungsströmung aufgrund der Vielfalt der heutigen und zukünftigen Flottenstruktur nicht als Erschwernis wahrnehmen, auch wenn diese nicht auszuschließen ist.

Die ausbaubedingten Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen auf archäologische Kulturgüter im subhydrischen Bereich im Norden des Betrachtungsraums, in dem es Hinweise auf alte Schiffswracks gibt, sind in diesem Abschnitt gegenüber der grundlegenden Belastung aus winderzeugtem Seegang von untergeordneter Bedeutung.

Die prognostizierten schiffserzeugten Belastungszunahmen von ca. +10 % bis +15 % werden in erster Linie in der Fahrrinne und auf den Unterwasserböschungen durch größere geschwindigkeitsabhängige Druck- und Strömungsamplituden während einer Schiffspassage wirksam. In Abhängigkeit des örtlich anstehenden Bodens und der Spannungsreduzierung im Korngerüst kann die Grenzscherbannung des Sohl- oder Böschungsmaterials zeitweilig überschritten werden, so dass während einer Schiffspassage mit schiffserzeugten Erosionsprozessen zu rechnen sein wird. Des Weiteren können durch einen temporär größeren propellerinduzierten Energieeintrag (z.B. gleiche Schiffsgeschwindigkeit bei größerem Tiefgang) und daraus folgende größere schiffserzeugte Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen bisher erosionsstabile Sohlmaterialien aufgewirbelt und in Abhängigkeit der Tidephase verfrachtet werden.

In den Nebenrinnen, Prielen und Hafenzufahrten wird in erster Linie der langperiodische Anteil der ausbaubedingten Änderungen wirksam. Diese schiffserzeugten Belastungsänderungen werden analog den schon heute die Nebenrinnen „flussauf“ laufenden Absunkeereignissen gedämpft. In Abhängigkeit der Lage und des Abstands der Mündungen der Rinnen oder Hafenzufahrten zur Hauptrinne (z.B. Emshörngat oder Zeehavenkanaal Delfzijl bzw. Zufahrt Schutzhafen Borkum) werden die prognostizierten prozentualen Änderungen an den Einmündungen (ca. +10 % bis +15 %), also auch in den Nebenrinnen bzw. Hafenzufahrten, zwar zu erwarten aber kaum nachweisbar sein.

Auf die Häufigkeit der schiffserzeugten Belastungen infolge tiefgangsrelevanter Fahrzeuge, die rund 3 % aller repräsentativen Ereignisse ausmachen, wurde in Kapitel 7.1.7 eingegangen. Die Häufigkeitszunahme von Schiffsbewegungen auch schon heute verkehrender Fahrzeugtransportschiffe wird nach [U8] etwa 2 % pro Jahr betragen, wobei ein überproportionaler Anstieg der tiefgangsrelevanten größeren Fahrzeuge über 15.000 tdw * vorausgesagt wurde (Abmessungen größer $l \approx 180$ m, $b \approx 26$ m, $t \approx 9$ m; nach EAU 2009). Entsprechend der Steigerung der Schiffspassagen wird auch die Häufigkeit der schiffserzeugten Belastungen durch tiefgangsrelevante Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m (derzeit ca. 3 % aller Passagen) zunehmen.

* tdw = tons dead weight: Maß für die Gesamttragfähigkeit eines Handelsschiffs

8 Ausbaubedingte Änderungen - Tabellarische Zusammenstellung

Die prognostizierten Unterschreitungshäufigkeiten infolge der ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Wellen wurden abschnittsweite (ohne Sonderfälle) für alle Fahrzeuge und gesondert für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m in den folgenden beiden Tabellen zusammengestellt:

| Alle Fahrzeuge | Ems-km | Prognose Absunk $z_A \approx$ Primärwelle H_P | | |
|---|--------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | $z_A \approx H_P$ (50%) [m] | $z_A \approx H_P$ (95%) [m] | $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,05 | < 0,25 | 0,7 |
| Paapsand B $\Delta t = +0,6$ m (+10 %) | ca. 49 - 68 | < 0,05 | < 0,15 | < 0,45 |
| Paapsand B $\Delta t = +1,0$ m (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,05 | < 0,15 | 0,5 |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,05 | < 0,1 | < 0,8 |

Tabelle 5: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittsweisen ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Wellen (alle Fahrzeuge; ohne Sonderfälle)

| Fahrzeuge $t > 7,5$ m | Ems-km | Prognose Absunk $z_A \approx$ Primärwelle H_P | | |
|---|--------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | $z_A \approx H_P$ (50%) [m] | $z_A \approx H_P$ (95%) [m] | $z_{A,MAX} \approx H_{P,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,3 | < 0,6 | $\approx 0,6$ |
| Paapsand B $\Delta t = +0,6$ m (+10 %) | ca. 49 - 68 | < 0,2 | < 0,4 | $\approx 0,4$ |
| Paapsand B $\Delta t = +1,0$ m (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,2 | < 0,4 | $\approx 0,4$ |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,1 | < 0,1 | $\approx 0,1$ |

Tabelle 6: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittsweisen ausbaubedingten Änderungen der langperiodischen schiffserzeugten Wellen (Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m; ohne Sonderfälle)

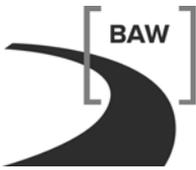
Die prognostizierten Unterschreitungshäufigkeiten infolge der ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen schiffserzeugten Wellen wurden abschnittsweite (ohne Sonderfälle) insgesamt für alle Fahrzeuge und gesondert für Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m in den folgenden beiden Tabellen zusammengestellt:

| Alle Fahrzeuge | Ems-km | Prognose Sekundärwelle H_S | | |
|-------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | H_S (50%) [m] | H_S (95%) [m] | $H_{S,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,3 | < 0,7 | ≈ 1,2 |
| Paapsand B (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,4 | < 0,8 | ≈ 1,5 |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,5 | < 0,7 | ≈ 1,5 |

Tabelle 7: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittsweisen ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen schiffserzeugten Wellen (alle Fahrzeuge; ohne Sonderfälle)

| Fahrzeuge $t > 7,5$ m | Ems-km | Prognose Sekundärwelle H_S | | |
|-------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | H_S (50%) [m] | H_S (95%) [m] | $H_{S,MAX}$ [m] |
| Emder Fahrwasser A (+10 %) | ca. 40 - 48 | < 0,35 | < 0,6 | ≈ 0,75 |
| Paapsand B (+15 %) | ca. 49 - 68 | < 0,6 | < 1,0 | ≈ 1,2 |
| Borkum C (+10 %) | ca. 70 - 100 | < 0,5 | < 0,7 | ≈ 1,0 |

Tabelle 8: Prognostizierte Unterschreitungswahrscheinlichkeiten infolge der abschnittsweisen ausbaubedingten Änderungen der kurzperiodischen schiffserzeugten Wellen (Fahrzeuge mit $t > 7,5$ m; ohne Sonderfälle)



9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die maßgeblichen Kriterien hinsichtlich der abschnittswisen Prognose der ausbaubedingten Änderung der Belastungsgrößen waren die veränderten Teilquerschnittsverhältnisse unter Berücksichtigung der örtlichen Schiffsgeschwindigkeit.

Die schiffserzeugte Belastung der Außenems bis Emden sowie deren ausbaubedingten Änderungen sind als relativ gering und hinsichtlich der Standsicherheit der Strombauwerke als technisch unbedenklich zu bewerten.

Die prognostizierten Zunahmen der schiffserzeugten Belastungen können durch eine Verkehrsregelung deutlich reduziert werden, wenn das vom Träger des Vorhabens für den Ausbau verwendete charakteristische Geschwindigkeitsprofil für alle (Verdränger-) Fahrzeuge der Handelsschifffahrt als Richtgeschwindigkeit (hier: v_s durchs Wasser) festgelegt wird.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, den 29. August 2012
Im Auftrag

gez. Rahlf

BDir Dipl.-Ing. H. Rahlf
Referatsleiter K2

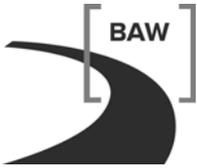
Bearbeiter

gez. Uliczka

Dr.-Ing. K. Uliczka
Wiss. Angestellter

10 Literaturverzeichnis

- BAW Erosionsverhalten von Böschungen am NOK – Bewertung und Empfehlungen anhand von Messungen im hydraulischen Modell und in der Natur, BAW Nr. 98 51 3750 / 97 52 3449, Hamburg 1999 (*unveröffentlicht*)
- BAW 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, BAW Nr. 5.02.10048.00-3, Hamburg 2006a
http://www.weseranpassung.de/downloads/dateien/Planfeststellungsunterlagen/Aussew eser/I.4_AW_Schiffsbelastungen_2006_03_31.pdf
- BAW Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt - Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen, BAW Nr. A39550310062 – H.1d, Hamburg 2006b
http://www.fahrrinnenausbau.de/Projektbuero/planaenderung/Downloads/h/h1/Schiffse rzeugte_Belastungen.pdf
- BAW Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen, Herausgeber (im Eigenverlag): Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Stand: März 2011
http://www.baw.de/de/die_baw/publikationen/merkmale/index.php.html dort: GBB (2010)
Karlsruhe 2011
- BAW Vertiefung der Außenems bis Emden - Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen von Hydrodynamik, Transport und Seegang
BAW Nr. A39550310144, Hamburg 2012a
- BAW Vertiefung der Außenems bis Emden – Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen
BAW Nr. A39550310144, Hamburg 2012b
- Bollrich, G. Technische Hydromechanik, Band 2,
und Autorenkollektiv VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1989
- EAU 2009 Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“, Häfen und Wasserstraßen, EAU 2004 digitalisierte und aktualisierte Fassung 2009, Ernst & Sohn 2009



- Entwässerungsver-
band Emden Internetpräsentation <http://www.entwaesserungsverband-emen.de>
I. Entwässerungsverband Emden, Krummhörn 2012
- 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.
648, Braunschweig 1988
- GL Validierung numerischer Verfahren zur Vorhersage des Squat großer
Frachtschiffe in Revierfahrt , Germanischer Lloyd AG, Abteilung Fluid
Dynamics, Hamburg 2009 (*unveröffentlicht*)
- Kohlhase, S.
Dette, H.H. Modelle für wellenerzeugte Vorgänge
In: Wasserbauliches Versuchswesen, Hrsg. Kobus, DVWK-Schriften,
Heft 39, Verlag Paul Parey, Hamburg / Berlin 1984
- NLW Untersuchungen zu Seegang und Schiffswellen in der Elbe – Bereich
geplanter Mehrzweckterminal Cuxhaven-Groden, Niedersächsisches
Landesamt für Wasserwirtschaft, Forschungsstelle Küste
Norderney 1989
- Schneekluth, H. Hydromechanik zum Schiffsentwurf.
3. Auflage, Koehlers Verlagsgesellschaft,
Herford 1988



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. 0721 97 26-0 · Fax 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. 040 81 908-0 · Fax 040 81 908-373

Am Ehrenberg 8 · 98693 Ilmenau
Tel. 03677 669-0 · Fax 03677 669-33 33

www.baw.de