

Analyse der Vertäukräfte am geplanten Offshore Terminal Bremerhaven

Dipl.-Ing. Anja Brüning
DHI, Hørsholm

Dr. Oliver Stoschek
DHI-WASY GmbH, Syke

Dipl.-Ing. Dominic Spinnreker
DHI-WASY GmbH, Syke

Dipl.-Ing. Ulrich Kraus
Bremenports GmbH & Co. KG, Bremerhaven

Zusammenfassung

Brechende Trossen von Schiffen ist eines der desaströsesten Ereignisse, welches während Hafen- und Terminalarbeiten die Produktivität und besonders die Sicherheit gefährdet. Aus diesem Grund ist eine dynamische Analyse der Schiffsbewegungen und Vertäukungskräfte für Hafenbehörden erforderlich.

Besonders in engen Fahrwassern und nah angrenzenden Terminals mit limitierten Navigationsmöglichkeiten für den Schiffsverkehr sind langperiodische, instationäre Wellen (Sunk und Schwall) infolge der Vorbeifahrt von Schiffen von Bedeutung. Derzeit ist es nicht möglich, die durch Schiffspassage induzierten Kräfte in den Festmacherleinen aus den gegebenen Richtlinien abzuleiten. Daher wird hier ein kombinierter Modellansatz bestehend aus DHIs hydrodynamischem Modell MIKE 21 und WAMIT® verwendet.

Die vorliegende Fallstudie konzentriert sich auf die Ermittlung der operativen Sicherheit des geplanten Offshore Terminal Bremerhaven (OTB) für gravierende Schiffsverkehrssituationen. Die betrachteten Fälle sind aus einer Matrix von nautischen Simulationen abgeleitet, welche im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden. Entsprechend konnten die für die Simulation der Schiffspassage angesetzten Parameter festgelegt werden. Die Eingangsdaten für die vertäuten Schiffe und Kajenausüstung wurden zusammen mit dem Kunden definiert. Diese Zusammenstellung beruht auf Annahmen der zukünftig am Terminal operierenden Schiffe, Richtlinien und bisher eingesetzten Hafenausüstungen.

Die in diesem Beitrag beschriebene Methodik wurde zum ersten Mal in einem deutschen Genehmigungsprozess verwendet. Die Ergebnisse der dynamischen Analyse bestätigen im Grundsatz das vorgeschlagene Vertäukonzept für das „Worst Case“ Szenario einer Schiffspassage.

1. Einleitung

Um seine Vorrangstellung als einen der wichtigsten Häfen für die Offshore Wind Industrie in Norddeutschland zu behaupten, verfolgt Bremerhaven den Ausbau und die Weiterentwicklung des früheren „Fischereihafens“. Zur Unterstützung, dieses im industriellen Um- und Aufbruch befindlichen Bereiches, ist geplant, durch die Erbauung eines neuen Offshore Terminals im Bereich des Blexer Bogens, jenen mit der bestmöglichen Infrastruktur für den Umschlag von Komponenten für die ansässige Offshore Wind Industrie auszustatten (Abbildung 1).

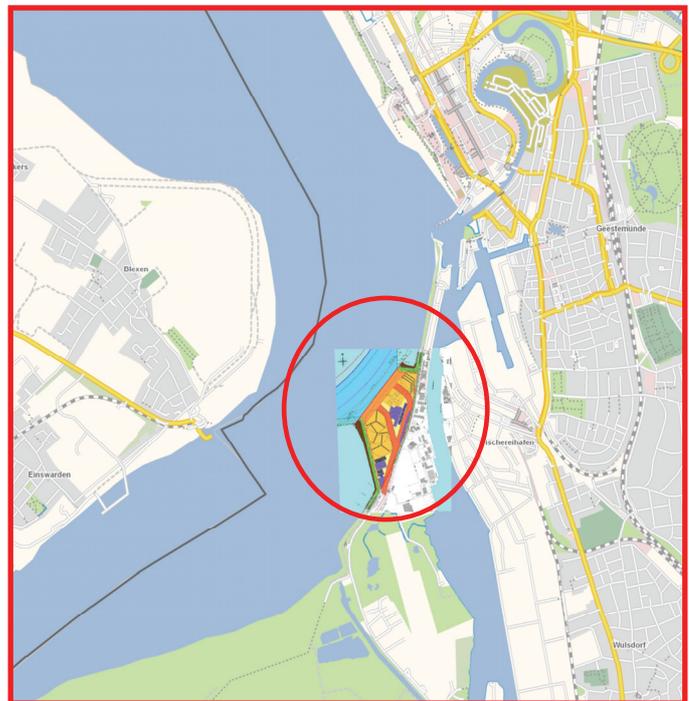
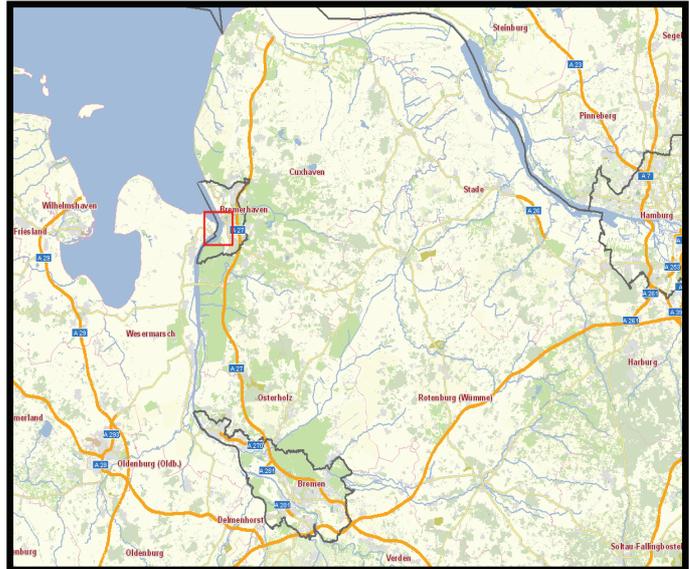


Abbildung 1: Lage des geplanten Offshore-Terminals Bremerhaven (Entwurf: bremenports GmbH & Co.KG) im „Blexer Bogen“ (Bild © OpenStreetmap)

Die geplante Wassertiefe am vorgesehenen Terminal ist -14.1m MSL, während die Fahrrinne in der Umgebung des Terminals bis zu -19.0m MSL tief ist.

Um das Festmachen und Operieren (Be- und Entladen) der vorgesehenen Schiffe sicherzustellen, müssen die verwendeten Trossen- und Fendersysteme den unterschiedlichsten äußeren Kräften standhalten. Gefährdung für Material und Menschen besteht neben unerfahrenem Umgang mit der Vertäukung, durch signifikante Schiffsbewegungen und den daraus resultierenden Rückstellkräften in den Trossen infolge externer Einwirkungen.

Typische äußere Einwirkkräfte sind:

- Wind
- Strömung
- Wellen
- Passierende Schifffahrt

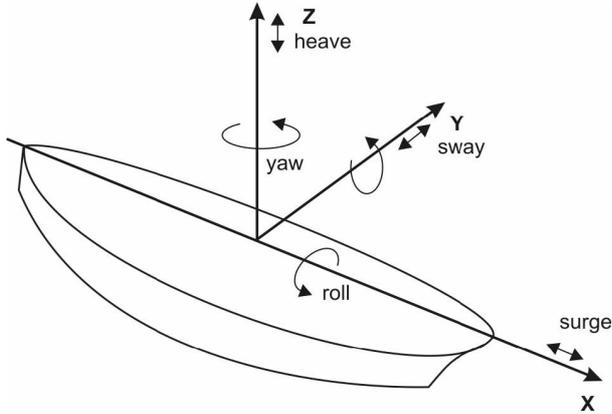


Abbildung 2: Definition der Schiffsbewegungen (3 Translationen und 3 Rotationen)

Im "Blexer Bogen" passieren große Bulker das geplante Terminal in geringem Abstand von circa 270m (siehe Abbildung 3, Grüne Linie). Aufgrund dieser Gegebenheit wird voraussichtlich ein Zusammenspiel von Schiffverkehr und Vertäukräften auftreten.

bremenports GmbH & Co. KG beauftragte DHI, in einer Studie die Sicherheit der voraussichtlich an diesem Terminal vertäuten Schiffe zu untersuchen. Da eine Einschränkung der Fahrtgeschwindigkeit an dieser Stelle inakzeptable ist, galt zu prüfen, dass der durch die Vorbeifahrt induzierte Schwall und Sunk das jeweils vorgesehene Vertäusystem nicht gefährdet.

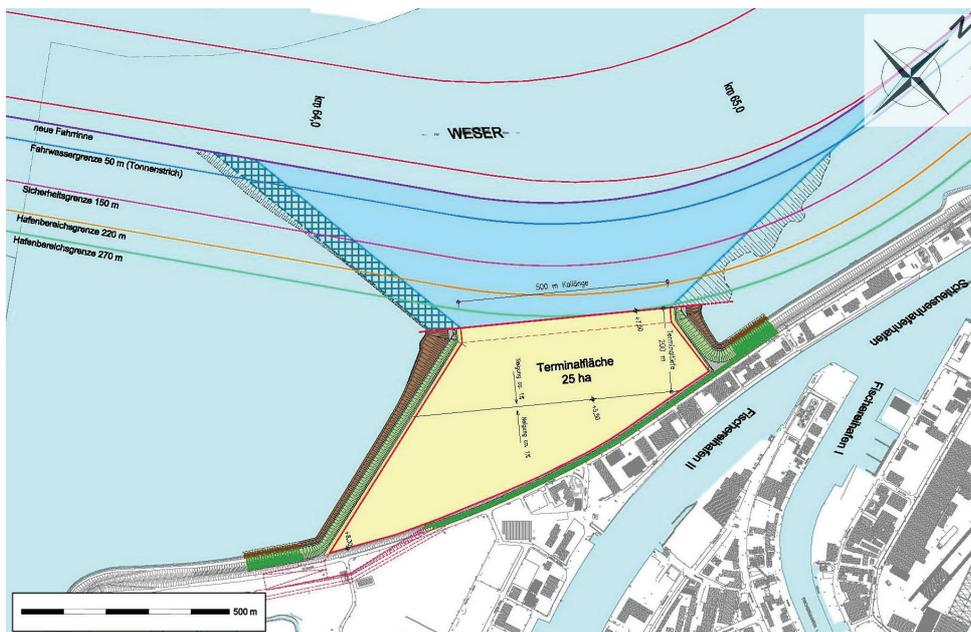


Abbildung 3: Layout des geplanten Offshore-Terminals Bremerhaven (bremenports GmbH & Co.KG)

2. Methodik

Das zur Berechnung der Schiffsbewegungen und Vertäukräfte verwendete Modell WAMSIM ist eine von DHI entwickelte Software. Sie wird nach Stand der Technik zur Analyse dynamischer Vertäulasten von schwimmenden Körpern unter externen Krafteinwirkungen eingesetzt. Hierzu werden neben geometrischen und materialspezifischen, auch hydrodynamische Eigenschaften des Körpers benötigt. Die sogenannten Frequenzganglinien werden mit Hilfe der Software WAMIT (WAMIT, 2011) ermittelt.

WAMSIM führt eine Fourier-Transformation der Frequenzganglinien durch und ermittelt daraus das Impulsansprechverhalten des Körpers. Dieses geht mit den äußeren dynamischen Einwirkungen, wie z. B. eintreffenden Wellen, Hydrostatik, Vertäuerung, Wind, Strömungen und viskosen Dämpfungskräften in die Bewegungsgleichungen für den Körper ein, welche für alle sechs Freiheitsgrade gelöst werden. Die generelle Qualität von WAMSIM wurde mit Hilfe physikalischer Modellversuche validiert (Christensen et al. 2008).

Um die verschiedenen Vertäukonzepte der Schiffstypen zu untersuchen, mussten vorab zwei maßgebliche Eingangsinformationen für die WAMSIM Simulationen ermittelt werden (siehe Abbildung 4).

Die Sammlung und Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellierung (z. B. Schiffshüllen/ 3D-Rumpfformen, Annahme der geplanten Ausführung und Ausrüstung des Terminals, Eigenschaften der verwendeten Trosen) umfassten einen Großteil des Arbeitsaufwandes.

Als erster Schritt erfolgte die Modellierung verschiedener Szenarios des passierenden Verkehrs mit MIKE 21. Um die Vorbeifahrt möglichst genau abzubilden, wurde ein hydrodynamisches Modell mit hoher Auflösung erstellt. Passierende Schiffe konnten in das Modell integriert werden, indem das definierte verdrängte Wasservolumen sich mit festgelegter Geschwindigkeit entlang eines vorgegebenen Weges durch das Modellgebiet bewegt. Die entstehenden, modellierten „schiffs-

generierten“ Wellen wurden mit in-situ Messungen verglichen, um die Modellergebnisse zu validieren. Verschiedene Fälle mit unterschiedlichen Schiffsgeschwindigkeiten und Passierabständen zum Offshore Terminal wurden untersucht.

Im zweiten Schritt wurden die hydrodynamischen Modellergebnisse aus dem Nahbereich des Terminals mit der Modellsoftware WAMSIM gekoppelt. WAMSIM berücksichtigt die angegebenen Geometrien der vertäuten Schiffe, welche durch die induzierten Schwall

und Sunk Kräfte in Bewegung versetzt werden. Als Ergebnis einer dynamischen Berechnung werden die-Bewegungsganglinien sowie die implizierten Trossen- und Fenderkräfte ausgegeben. Diese Methodik wurde bereits in einigen praktischen Anwendungsfällen verwendet, wie zum Beispiel für den Hafen von Brisbane (Mortensen et al. 2009).

Im Verlauf der Untersuchung wurden die initialen Vertäupläne iterativ verbessert.



3. Simulation des Schwall und Sunks

Die Größe des Schwall und Sunk Effekts, bzw. des Absunks an einem fahrenden Schiff, ist in vielen verschiedenen Formeln in Abhängigkeit von den Schiffseigenschaften und der Kanalkonfiguration (Briggs, 2006) und BAW (2006) beschrieben:

- Schiffsdimensionen (Schiffsform repräsentiert durch Länge, Breite, Tiefgang und Blockkoeffizient) und Schiffsgeschwindigkeit
- Abstand zum Kanalufer und der Sohle abgebildet durch die Kanaltiefe und der Querschnittsform.

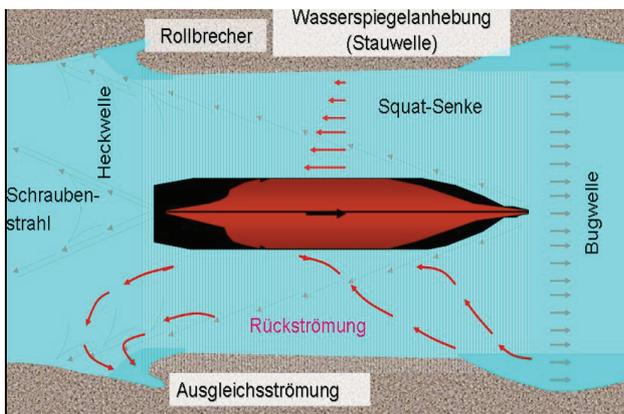


Abbildung 5: Squat-Effekt bei symmetrischer Fahrt (BAW, 2006)

Des Weiteren berücksichtigen die Formeln lediglich eine mittige Schiffspassage in einem graden Kanalabschnitt mit einer konstanten Geschwindigkeit.

Der Effekt des Wasserspiegelabsunkes und der zugehörigen Ausgleichsströmungen ist auch am Uferrand als eine langperiodische Wellenbewegung bemerkbar und hängt in seiner Größenordnung ab von der Schiffsgeschwindigkeit, dem Passierabstand und dem Verhältnis zwischen dem Schiffs- und Kanalquerschnitt.

Wuebben (1995) hat physikalische Untersuchungen (in-situ) an den Great Lakes durchgeführt, um die Wirkung dieser Größen auf den Absunk zu bestimmen. Die BAW (2006) untersuchte diesen Zusammenhang in der Weser. Eine generelle Auswirkung des bewegten Wasserkörpers ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 6 zeigt schematisch die lokal gemessene Auslenkung des Wasserspiegels infolge einer Schiffspassage. Zu erkennen ist die langperiodische Wellenbewegung (Bugstau, s_B , Absunk und Primärwelle, H_P) gefolgt von den kurzperiodischen Sekundärwellen.

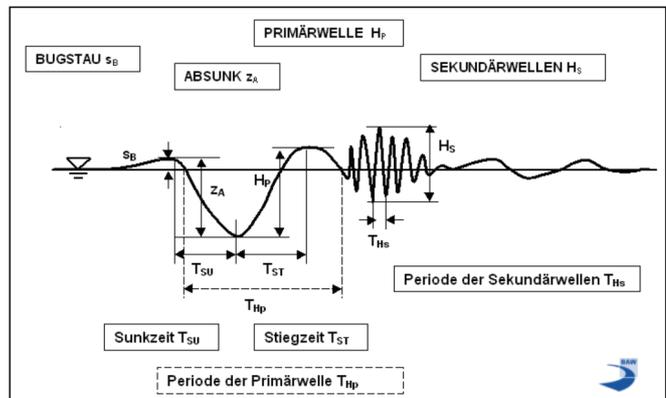


Abbildung 6: Seitliche Ansicht des Schiffswellensystems am Standort des Beobachters (BAW, 2006)

Infolge der hydrodynamischen Druckveränderungen entstehen große Variationen des Wasserspiegels mit lang anhaltenden und hohen lokalen Strömungen. Diese Kräfte sind bedeutende Lasten, welche signifikante Bewegungen bei schwach vertäuten Schiffen hervorrufen können.

Aufgrund fehlender Berücksichtigung von komplexeren Einflüssen wie bathymetrischen Änderungen, Kurvenfahrt und variierendem Passierabstand in den oben genannten Formeln, verwendet DHI den Ansatz eines bewegten Druckfeldes, um die vorliegenden physikalischen Zusammenhänge numerisch in einem hydrodynamischen MIKE 21 FM Modell abbilden zu können. Die Hauptparameter des passierenden Verkehrs, Kurs und Maximalgeschwindigkeit, wurden in das Modell übertragen. Eine Validierung dieses Ansatzes präsentierte bereits in Mortensen et al. (2009) in Form eines Vergleiches mit physikalischen Modellversuchen.

3.1 Hydrodynamisches Modell, MIKE 21 Flow Model FM

MIKE 21 Flow Model FM ist ein numerischer Lösungsansatz für zweidimensionale, tiefengemittelte Oberflächenströmungen. Diese Modellsoftware ist für Simulationen von hydraulischen und ökologischen Phänomenen in Seen, Ästuaren, Buchten, Küstenzonen und Meeren einsetzbar, wenn eine Stratifikation vernachlässigt werden kann.

sigt werden kann. Der Modellansatz verwendet für die räumliche Diskretisierung ein unstrukturiertes Gitter (Mesh) sowie einen Finite-Volumen-Lösungsansatz. Für weitere Informationen zur MIKE 21 FM Modellsoftware wird auf (DHI, 2014) verwiesen.

Das Modell umfasst die Weser ca. 5 km flussauf- und flussabwärts des Offshore Terminals Bremerhaven. Ein flexibles Modelgitter bestehend aus einer Kombination von triangularen (geböschtem Flussufer) und quadrangularen (tiefe Fahrrinne) Elementen wurde für eine optimale räumliche Auflösung der Bathymetrie eingesetzt. Dieses ermöglicht eine genaue Abbildung der dimensionierten Verdrängung eines passierenden Schiffes als integriertes Druckfeld (siehe Abbildung 7) und der Ausbildung des Absunk.

Abbildung 7 zeigt eine Nahaufnahme der Gitterauflösung in der Umgebung des OTB. Die Auflösung der Dreieckselemente waren maximal 8 m². In der Fahrrinne wurden Viereckselemente mit einer Auflösung von ca. 2,25 m² verwendet. Hintergrund dieser hohen Gitterauflösung war die bestmögliche Wiedergabe der Wellendeformation.

Die für die Interpolation verwendeten Bathymetrischen Daten wurden von der Hochschule Bremen zur Verfügung gestellt.

Weiter beinhaltet das hydrodynamische Model folgendes:

- stationäre Randbedingungen: konstanter Wasserstand, keine Tide oder Abflussströmungen
- verdrängtes Wasservolumen (in Raum und Zeit) implementiert als bewegtes Druckfeld mit Anfangsbedingung: zweidimensionaler konstanter Wasserstand (s. o.) mit „eingestanztem“ verdrängtem Wasservolumen am Startpunkt des passierenden Schiffes/ Druckfeld

Der für den Simulationszeitraum zugrunde gelegte Wasserstand wurde auf Basis der vorliegenden Informationen vom Pegel „Alter Leuchtturm“ in Bremerhaven abgelesen.

3.2 Validierung des numerischen Modells

Der oben beschriebene Ansatz wurde bisher bereits in verschiedenen Häfen weltweit verwendet, jedoch noch nie für die Bedingungen der norddeutschen Ästuare erprobt. Um die Anwendbarkeit für die Weser zu prüfen, konnten vorliegende in-situ Messungen der langperiodischen Schiffswellen in Dedesdorf verwendet (BAW, 2006b) werden. Diese Messkampagne dokumentierte vorrangig die Passage zweier Schiffstypen, die in ihren Eigenschaften auch relevant für die späteren Simulationen am OTB waren. Beobachtungen des generierten Absunkes durch einen Bulker (Panmax size) und einem Frachtschiff wurden für die Validierung berücksichtigt.

Vier verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Tidewasserständen, Passierabständen, Schiffstypen und Geschwindigkeiten wurden für die Überprüfung der numerischen Abbildbarkeit des Absunkes und folglich der Güte des Ansatzes berechnet. Tabelle 1 fasst die Parameter zusammen.

| Datum/Zeit | Wasserstand | Schiffsdaten | | | | Passierabstand | |
|------------------|-------------|-----------------------------|----------|---------|-------|----------------|--------------|
| | | Typ | Tiefgang | SOG | Kurs | Kleinensiel D1 | Dedesdorf D2 |
| 23.10.2005/15:19 | +0,91 mMSL | Weserstahl (Bulker) | 10,4 m | 10 kn | 179°N | 318 m | 414m |
| 24.10.2005/07:06 | +1,00 mMSL | Weserstahl (Bulker) | 7,1 m | 12 kn | 356°N | 381 m | 351 m |
| 05.11.2005/20:07 | +0,74 mMSL | Star Ikebana (Frachtschiff) | 8,7 m | 14,1 kn | 355°N | 390 m | 342 m |
| 08.11.2005/03:30 | +1,26 mMSL | Weserstahl (Bulker) | 10,1 m | 9,3 kn | 184°N | 278 m | 454m |

Tabelle 1: Parameter der Validierungsrechnungen

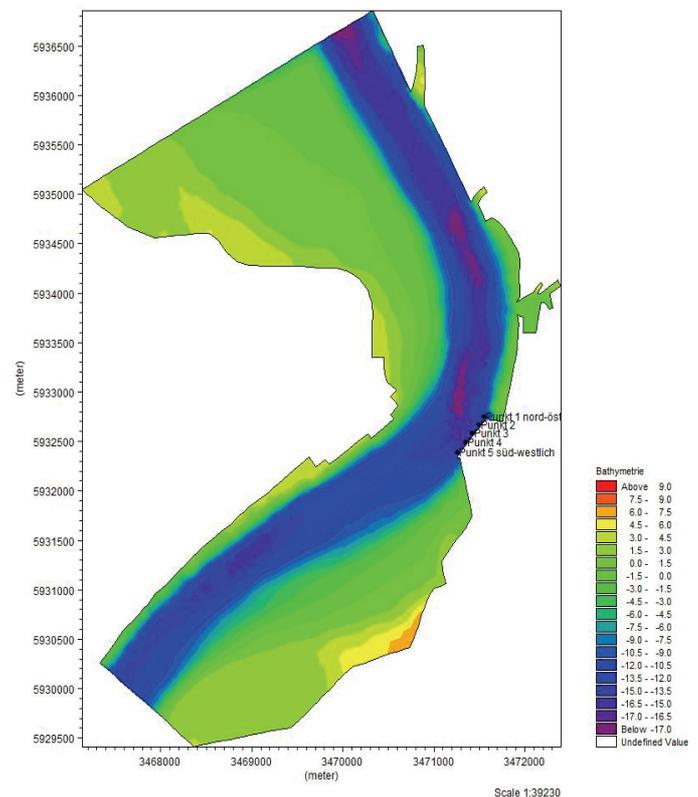
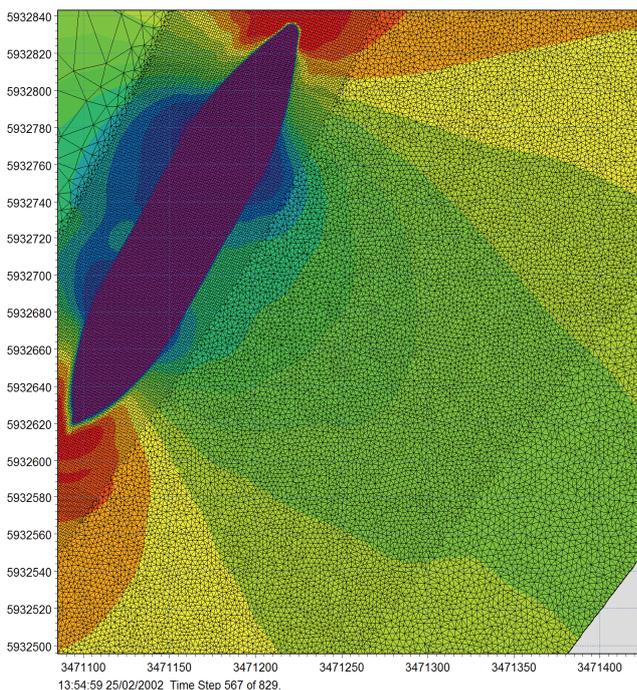


Abbildung 7: links: Passierendes Schiff - Druckfeld integriert im Modellgitter nahe dem OTB; rechts: Bathymetry des Modellgebietes

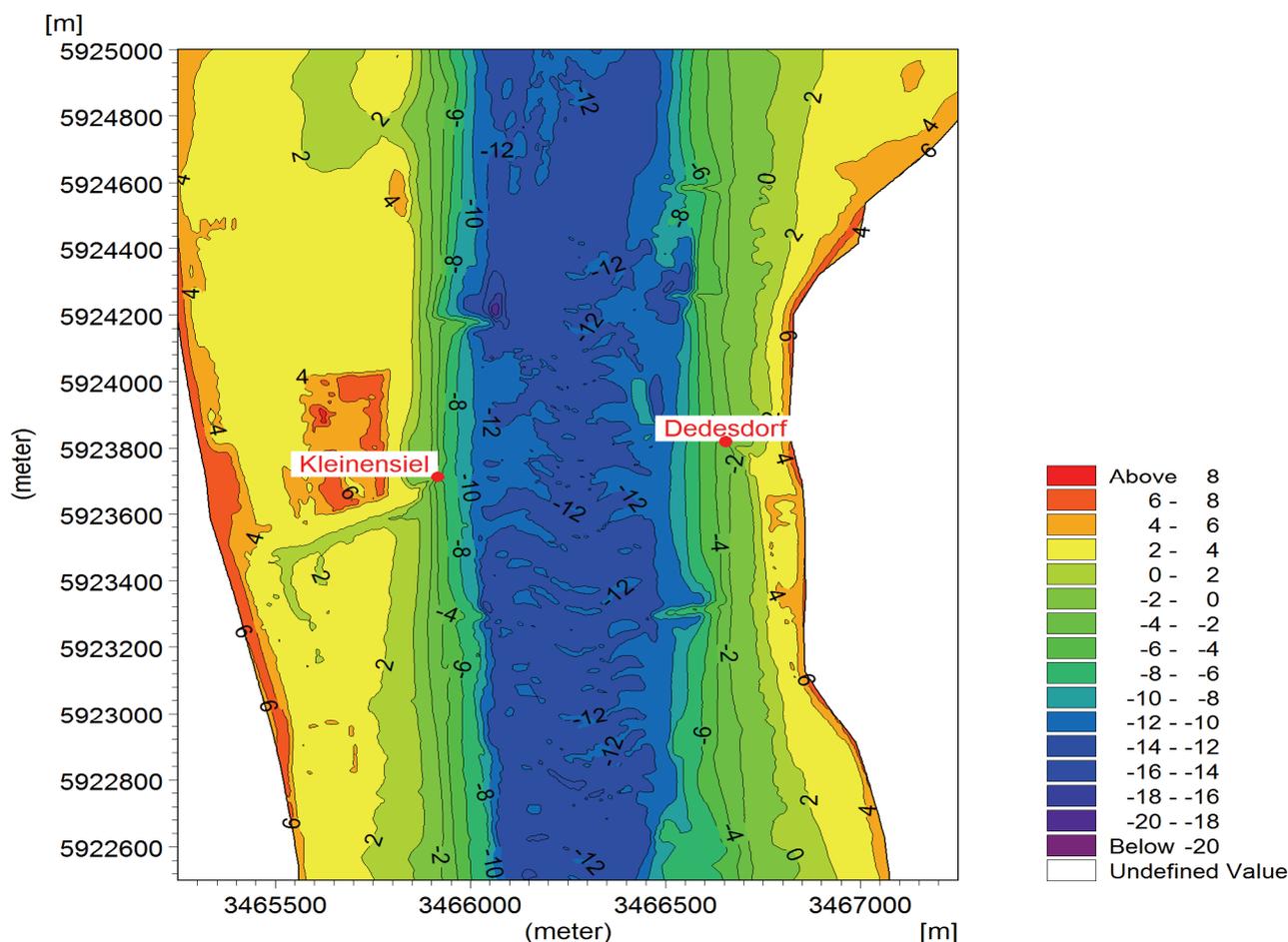


Abbildung 8: Bathymetrie der Weser im Abschnitt zwischen Dedesdorf und Kleinesiel (inklusive Messstation)

Abbildung 8 zeigt den Simulationsbereich für den Weserabschnitt bei Dedesdorf. Messgeräte waren an beiden Uferseiten an den Anladungspfählen der früheren Fährverbindung Kleinesiel (D1)-Dedesdorf (D2) befestigt.

Die maximalen modellierten und gemessenen Absunkwerte sind in Tabelle 2 gegenübergestellt. Abbildung 9 zeigt eine graphische Darstellung. Man kann festhalten, dass der modellierte Absunk in guter Übereinstimmung mit den Messungen steht, obwohl in den meisten Fällen eine Tendenz zur Überschätzung des gemessenen Absunkes festzustellen ist.

| Datum | Typ | Vergleich | | | | | | | |
|------------|-----------------------------|------------------|------|-------------------------|------|---------------|------|-------------------------|------|
| | | Modellergebnisse | | | | Messungen | | | |
| | | Absunk za [m] | | Primärwellenhöhe Hp [m] | | Absunk za [m] | | Primärwellenhöhe Hp [m] | |
| | | D1 | D2 | D1 | D2 | D1 | D2 | D1 | D2 |
| 23.10.2005 | Weserstahl (Bulker) | 0,14 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 0,08 | 0,12 |
| 24.10.2005 | Weserstahl (Bulker) | 0,13 | 0,17 | 0,11 | 0,12 | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,10 |
| 05.11.2005 | Star Ikebana (Frachtschiff) | 0,48 | 0,83 | 0,31 | 0,71 | 0,31 | 0,50 | 0,39 | 0,59 |
| 08.11.2005 | Weserstahl (Bulker) | 0,11 | 0,08 | 0,08 | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 0,08 | 0,02 |

Tabelle 2: Modellergebnisse versus in-situ Messungen

Vergleicht man die Ergebnisse des Bulklers *Weserstahl* vom 23.10.2005 und dem 08.11. 2005, so ist festzustellen, dass der größere Passierabstand, die geringere Schiffsgeschwindigkeit und die erhöhte Kieffreiheit (bedingt durch geringeren Tiefgang und/oder höheren Wasserstand) eine verringerte Ausbildung des Absunkes und der Primärwellenhöhe am 08.11.2005 zur Folge hat.

Starke Abweichungen in der Größe der Ergebnisse konnten für die beiden stromauf fahrenden Schiffe am 24.10.2005 und 05.11.2005 ermittelt werden, Obwohl der Passierabstand nahezu gleich war, ist der Absunk und die Primärwellenhöhe des Frachters *Star Ikebana* mehr als doppelt so groß. Es ist anzunehmen, dass dieses neben der geringeren Kieffreiheit und der anderen Schiffsform insbesondere auf die erhöhte Geschwindigkeit zurückzuführen ist.

Der Grund für die Diskrepanz zwischen modellierten und gemessenen Werten für die Passage der *Star Ikebana* konnte nicht abschließend geklärt werden. Dennoch zeigte die Validierung, dass das Modell in der Lage ist ein „Worst Case“ Szenario ausreichend gut abzubilden. Zusätzlich kann festgehalten werden, dass die Tendenz der Überschätzung von Absunk und Primärwelle zu konservativen Ergebnissen führt.

3.3 Schiffspassage am OTB

Für das Genehmigungsverfahren zum Offshore Terminal Bremerhaven wurden nautische Simulationen mit Hilfe der Weserlotsen durchgeführt, um den Einfluss des Bauwerkes auf den Schiffsverkehr zu ermitteln (Morgenstern, 2011). Dabei lag ein Hauptaugenmerk auf der Manövrierbarkeit der passierenden Schiffe, insbesondere bei der Vorbeifahrt am geplanten Terminal. Diese Simulationen beinhalteten sowohl einzelne Passagen als auch Begegnungsverkehr unter Tidenströmungs- und Windeinfluss.

Hafenbau- und infrastruktur

Analyse der Vertäukräfte am geplanten Offshore Terminal Bremerhaven

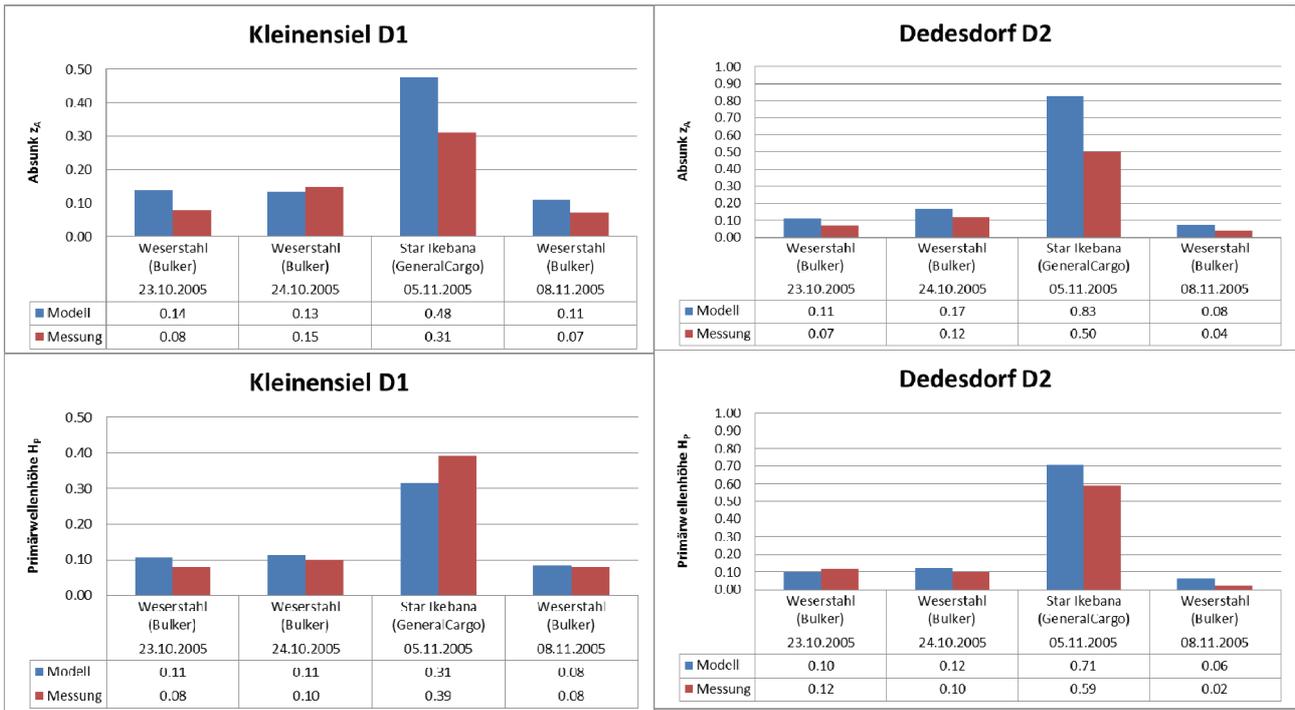


Abbildung 9: Absink (oben) und Primärwellenhöhe (unten) bei Kleinesiel und Dedesdorf

Zur Identifikation der kritischen Schiffpassagen wurden die nautischen Simulationen anhand der Schiffsgeschwindigkeiten (über Grund und durchs Wasser) und dem Passierabstand ausgewertet. Die größte der beiden Schiffsgeschwindigkeiten (Fahrt über Grund = SOG oder Fahrt durchs Wasser = STW) wurden als konservativer Ansatz im MIKE21 FM Model verwendet.

In den nautischen Simulationen konnten vereinzelt höhere Passagegeschwindigkeiten oder östlichere Kurse (geringere Distanz) identifiziert werden. Basierend auf diesen Informationen wurde ein zusätzliches „Worst Case“ Szenario als konservativer Ansatz abgeleitet. Eine Deformation der Welle aufgrund von Tidedrömung wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt, da nur tideabhängige Schiffe für eine kritische Vorbeifahrt am Terminal in Frage kommen. Diese passieren das Terminal nur nahe Hochwasser und folglich bei geringer oder keiner Tidedrömung.

Abbildung 10 zeigt das Beispiel eines passierenden Bulklers (STW = 13kn) und die resultierende Wasserspiegellagenauslenkung am OTB für einen Ruhewasserstand von +1,76 mMSL. Das signifikante zweidimensionale Muster zeigt die instationäre Welle (Bugstau, Absink und Primärwelle). Das Modell gibt nicht die Sekundärwellen wieder.

Die Auslenkung der Wasserspiegellage wurde an mehreren Punkten entlang der Kaje in einem ungefähren Abstand von 20 m vor der Spundwand aus dem Modell extrahiert (Abbildung 11).

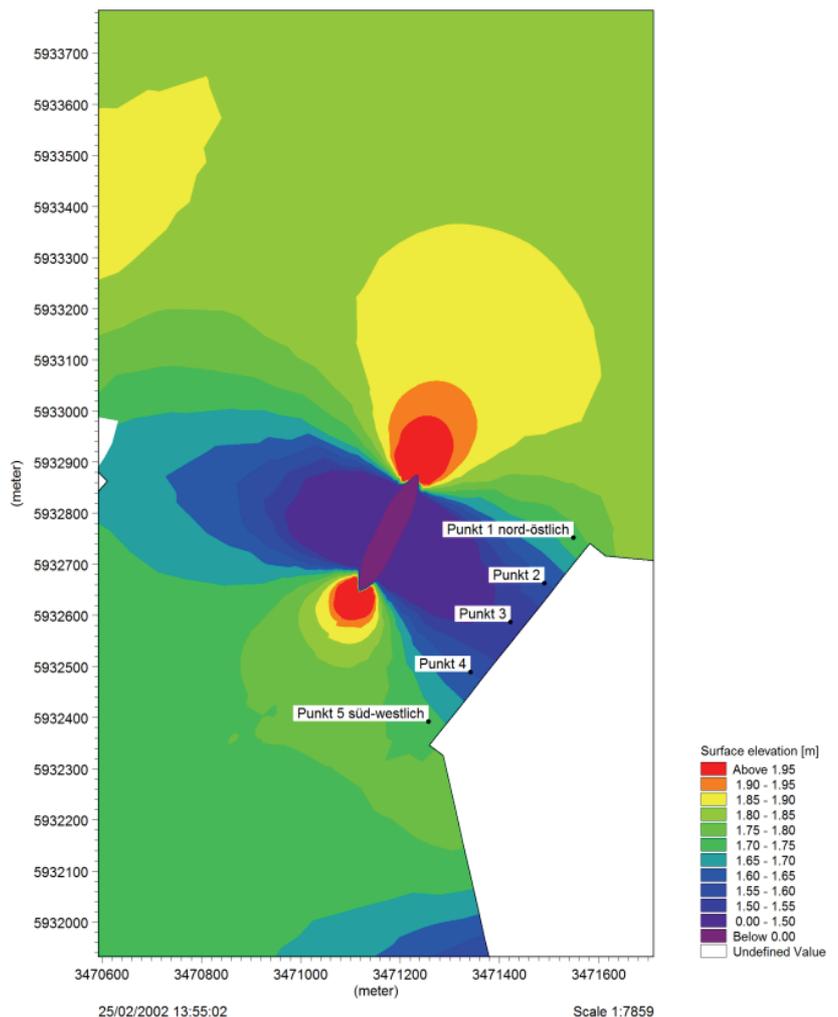


Abbildung 10: Passage eines Bulklers. Form der instationären Welle (Bugstau, Absink und primäre Heckwelle)

Hafenbau- und infrastruktur

Analyse der Vertäukräfte am geplanten Offshore Terminal Bremerhaven

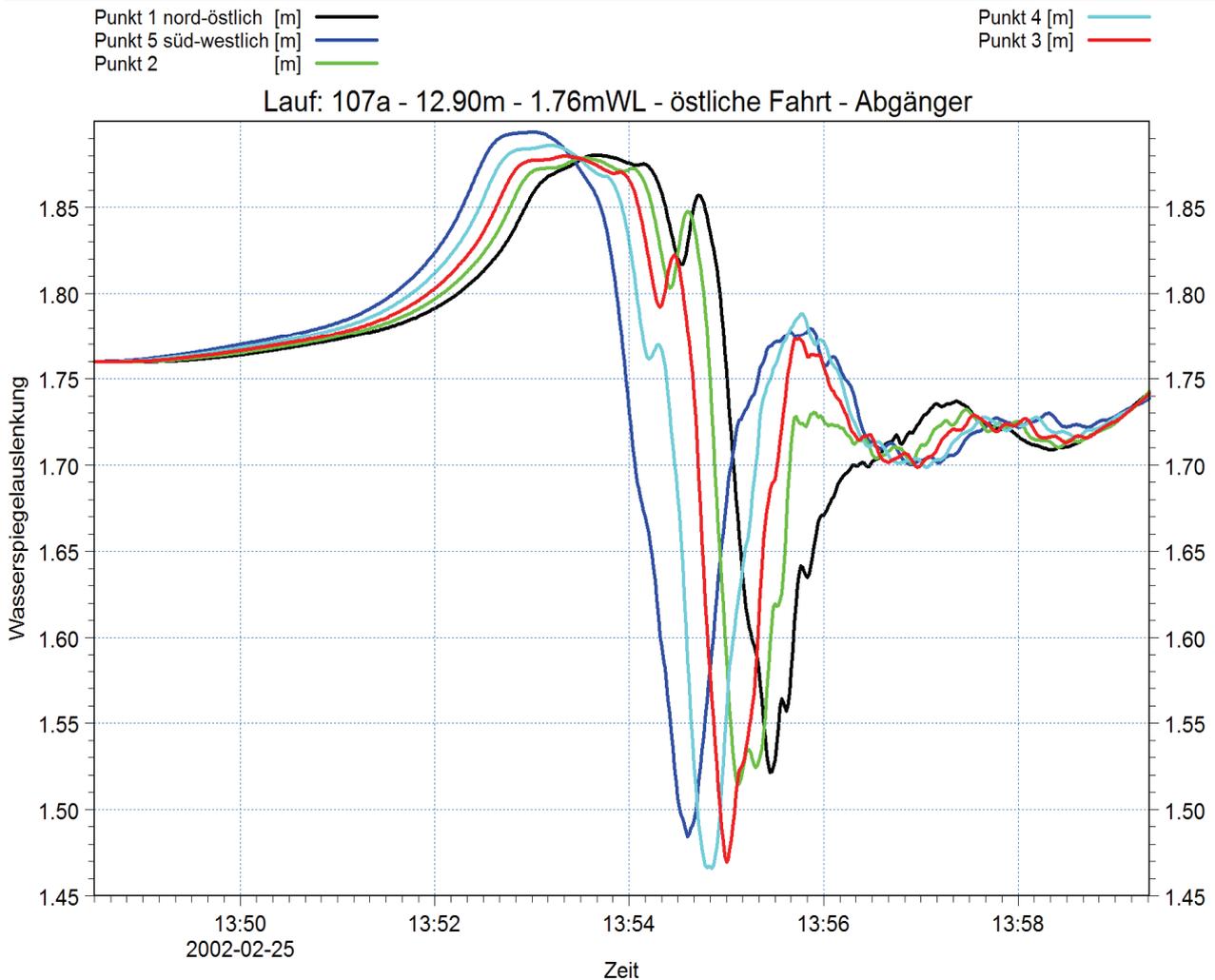


Abbildung 11: Extrahiertes Signal der simulierten Wasserspiegelauslenkung für einen flussabwärts fahrenden Bulker auf östlicher Kurslage – „Worst Case“ (Tidewasserstand: +1,76 mMSL)

Die Modellergebnisse der einzelnen Szenarien zeigten, dass der „Worst Case“ Fall den größten Absunkeffekt von ca. 40 cm am OTB hervorruft. Aufgrund dieses konservativen Ergebnisses wurde die Ermittlung der Schiffsbewegungen und Vertäukräfte für diesen Fall bestimmt.

4. Ermittlung von Schiffsbewegungen und Vertäukräften

Um den Einfluss des in MIKE 21 berechneten Primärwellensystems und den zugehörigen Strömungen auf die am OTB vertäuten Schiffseinheiten zu bestimmen, wurden die hydrodynamischen Ergebnisse im Nahbereich der Terminals extrahiert. Nach anschließender Bearbeitung konnten diese mit dem Zeitbereichsmodell WAMSIM gekoppelt werden. WAMSIM berücksichtigt neben anderen vorliegenden Schiffsgeometrien auch die der Offshore-Installationsschiffe, welche durch den Absunkeffekt der vorbeifahrenden Schiffe beeinflusst werden, und berechnet die Vertäukräfte aufgrund der Relativbewegungen der schwimmenden Schiffskörper. Ein weiterer Vorzug dieser Modellsoftware ist die Berücksichtigung der nicht linearen Interaktion zwischen externen Kräften, und den gekoppelten Eigenschaften des Vertäusystems (Fender und Trossen) im Vergleich zu einer vereinfachten statischen Berechnung.

4.1 Modellaufbau

Um die Schiffsbewegungen und Vertäukräfte nach dem oben beschriebenen Verfahren zu ermitteln, ist bestmögliche Kenntnis des verwendeten Vertäukonzeptes (geometrische Anordnung der Kajen - und Decks-ausrüstung, Fender- und Trosseneigenschaften) und der physikalischen Parameter der Bemessungsschiffe (Größe, Tiefgang, Verdrängung und vertikale Schwerpunkt-lage entsprechend Beladungszustand) von zentraler Bedeutung für die Verbindlichkeit der Ergebnisse. Die im Rahmen der Studie durchgeführten Simulationen berücksichtigten die in Tabelle 4 aufgelisteten Schiffe. Zusätzlich wurde für die Interaktion zwischen Schiff und Fender ein Reibungskoeffizient von $\mu = 0,4$ und eine Vorspannung der Leinen von 10 t angenommen; diese Werte basieren auf Erfahrungen.

In Absprache mit bremenports GmbH & Co.KG wurden für das Layout des Terminals in Anlehnung an das benachbarte Container Terminal CT4 folgende Annahmen getroffen:

- Blockabstand: 20m ($\leq 0,25 \text{ LoA} \approx 0,25 \cdot 90\text{m} = 22,5\text{m}$, siehe (PIANC, 2002))
- Doppelpoller: max. Last 200t, max. 4 Trossen
- Fender : Durchmesser 2,00m; Länge 3,50m

Die Anordnung der Fender und Poller erfolgte jeweils mittig in einem Block. Die Charakteristika der Fender sind in Tabelle 3 aufgeführt.

| Fabrikat | Typ | Durchmesser [m] | Länge [m] | Energie [kNm] | Reaktion [kN] |
|------------|-----------|-----------------|-----------|---------------|---------------|
| Trelleborg | Sea Guard | 2,00 | 3,50 | 454 | 845 |

Tabelle 3: Eigenschaften der Fender

Die untersuchten Schiffstypen wurden durch bremenports GmbH & Co. KG auf Grundlage des geplanten Terminaleinsatzes festgelegt. Informationen zu Schiffsgrößen, Vertäuanordnungen an Deck und den verwendeten Trossen wurden bei den Schiffseignern/ Reedern angefragt und zusammengetragen. Für die Untersuchungen wurden vorab festgelegte Beladungsfälle (ballastiert/ beladen) definiert, welche den anzusetzenden Tiefgang und die Verdrängung der untersuchten Schiffe bestimmten. Die prinzipiellen Dimensionen der verwendeten Schiffstypen sind in Tabelle 4 aufgelistet, während die Eigenschaften der Festmacher in Tabelle 5 zu finden sind. Die digitalen Schiffsrümpfe (in Form entsprechend des Typus) aus der DHI - Datenbank wurden entsprechend der Angaben für das Modell skaliert. Ein Beispiel ist in Abbildung 12 dargestellt.

| Schiffstyp | LüA [m] | Lpp [m] | Tiefgang [m] | Breite [m] |
|--------------------------------------|---------|---------|--------------|------------|
| Frachtschiff P2-Klasse (ballastiert) | 168,68 | 155,79 | 9,50 | 25,20 |
| Ponton (ballastiert) | 90,00 | 90,00 | 2,00 | 32,00 |
| Ponton (beladen) | 90,00 | 90,00 | 5,00 | 32,00 |
| Jack-up Schiff 1 (ballastiert) | 100,00 | 99,20 | 4,44 | 40,00 |
| Jack-up Schiff 2 (ballastiert) | 147,50 | 146,80 | 7,00 | 42,00 |

Tabelle 4: Schiffsdimensionen

| Schiffstyp | Leinentyp/ Material | Durchmesser [mm] | Bruchlast (BL) [kN] | Anzahl |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------|---------------------|--------|
| Frachtschiff P2-Klasse (ballastiert) | Polypropylene Octoply | 64 | 480 | 8 |
| Ponton (ballastiert/beladen) | Tipto Winchline | 70 | 990 | 4 |
| Jack-up Schiff 1 (ballastiert) | Geo Twin Polyamid | 46 | 512 | 8 |
| Jack-up Schiff 2 (ballastiert) | Tipto Winchline | 64 | 850 | 12 |

Tabelle 5: Eigenschaften der verwendeten Festmacher

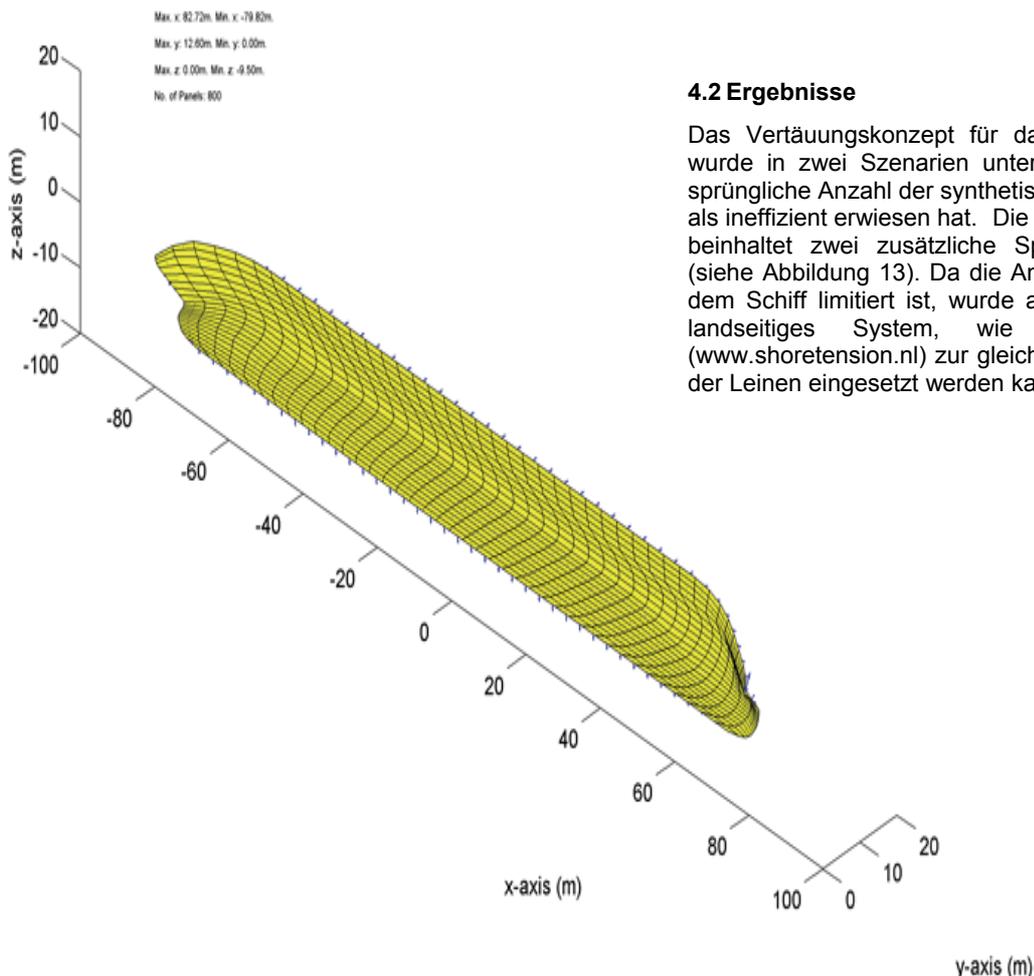


Abbildung 12: Digitalisierte Schiffshülle des Frachtschiffes - P2 Klasse(ballastiert)

4.2 Ergebnisse

Das Vertäuungskonzept für das Frachtschiff P2-800 wurde in zwei Szenarien untersucht, da sich die ursprüngliche Anzahl der synthetischen Festmacherleinen als ineffizient erwiesen hat. Die optimierte Vertäuung beinhaltet zwei zusätzliche Spring- und Querleinen (siehe Abbildung 13). Da die Anzahl der Winschen auf dem Schiff limitiert ist, wurde angenommen, dass ein landseitiges System, wie z. B. ShoreTension (www.shoretension.nl) zur gleichmäßigen Vorspannung der Leinen eingesetzt werden kann.

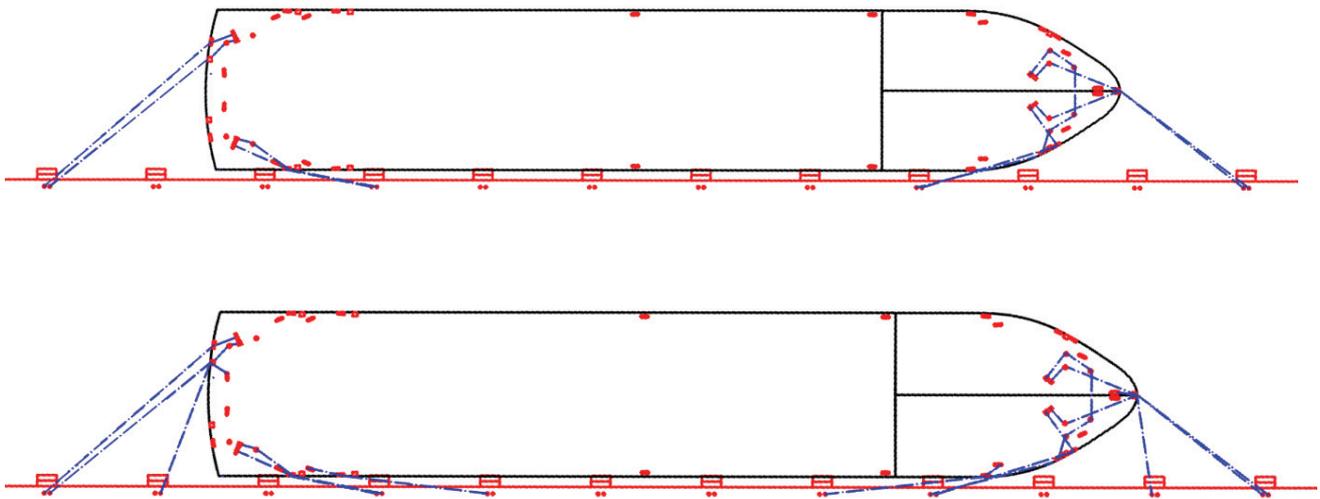


Abbildung 13: Frachtschiff P2-800: Initiales Vertäulayout (oben) und optimiertes Layout (unten)

In Bild 14 und Tabelle 6 ist ein Vergleich der während der Schiffs Passage maximal auftretenden Bewegungen und Trossenkräfte für beide Vertäuungskonzepte dargestellt. Die Aufzeichnungen relativer Bewegungen basieren auf einer gemeinsamen Ausgangsposition des Schiffsschwerpunktes. Um die Bewegungen in Relation zum Absunk darzustellen, wurde die Auslenkung des Wasserspiegels am Schiffsschwerpunkt gemessen. Generell lag das Hauptaugenmerk auf den maximal auftretenden Werten.

Die Schiffsbewegung bei initialem Vertäulayout ohne jegliche Optimierung ist als gepunktete Linie gekennzeichnet. Eine große Driftbewegung „Schwoien“ in Richtung der Fahrinne wurde dabei durch die aktive Vorspannung der Trossen vermieden und somit ein stetiger Kontakt mit den Fendern gewährleistet. Tauchbewegungen sind nur in geringem Maße vorhanden und folgen in etwa der Auslenkung des Wasserspiegels. Hauptsächlich tritt eine Längsbewegung „Wogen“ (entlang der Kaje) auf, während die Rotationen gering bleiben.

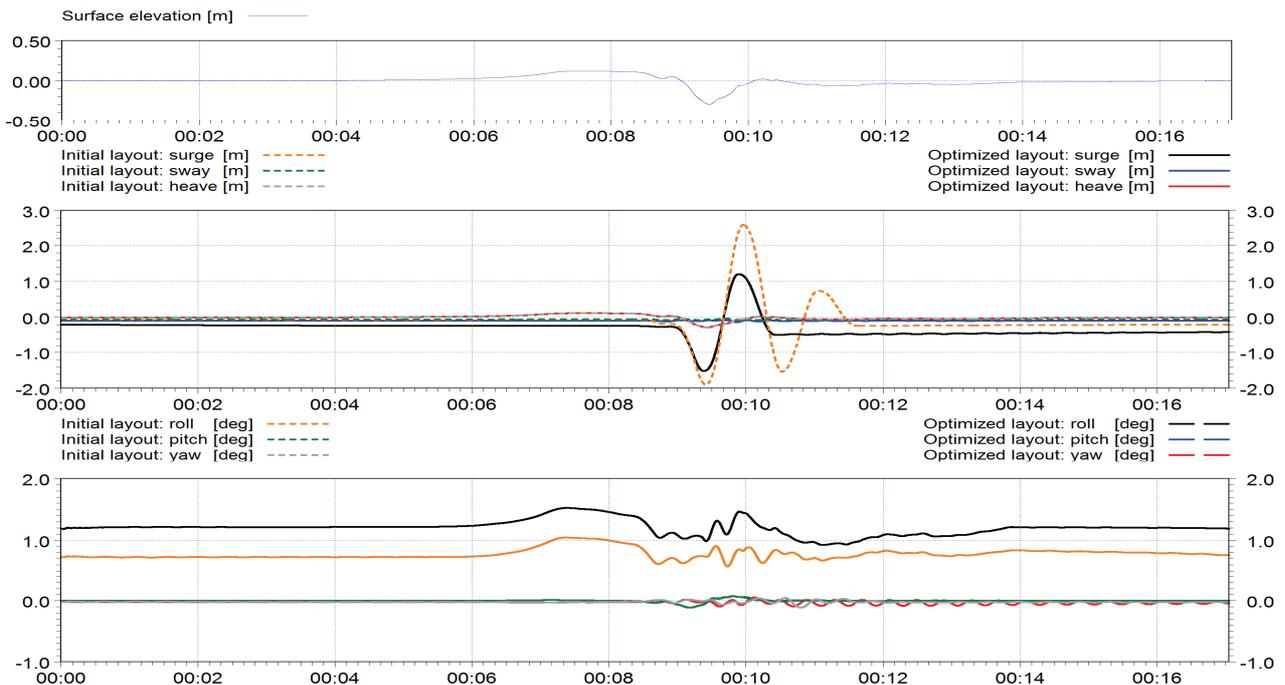


Abbildung 14: Wasserspiegelauslenkung (oben) und Schiffsbewegungen (mittig: Translationen; unten: Rotationen)

| Anzahl | Position | Initiales Vertäulayout | Optimiertes Vertäulayout |
|--------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| | | Max. Kraft [kN] | Max. Kraft [kN] |
| 1 | Heckleine | 221 | 153 |
| 2 | Heckleine | 223 | 157 |
| 3 | Achterspring | 258 | 203 |
| 4 | Achterspring | 251 | 199 |
| 5 | Vorspring | 258 | 175 |
| 6 | Vorspring | 291 | 170 |
| 7 | Bugleine | 173 | 150 |
| 8 | Bugleine | 172 | 150 |
| 9 | Achterquerleine *) | - | 157 |
| 10 | Achterspring *) | - | 183 |
| 11 | Vorspring *) | - | 183 |
| 12 | Vordere Querleine *) | - | 114 |

*) Vorspannung mit landseitigem Vertäusystem

Tabelle 6: Maximalkraft pro Trosse verglichen mit der max. zulässigen Kraft (0.50*MBL = 240 kN).

Bei dem ursprünglichen Vertäuungskonzept traten Längsbewegungen von bis zu +2,5m auf, während die anderen Bewegungen relativ gering ausfielen. Um dies zu optimieren, wurden weitere uferseitige vorgespannte Festmacher eingesetzt, um die Bewegungen zu reduzieren. Die durchgezogene schwarze Linie zeigt, dass die Längsbewegung bei der optimierten Vertäuung signifikant, auf bis zu +1,2 m abnahm. Der leichte Anstieg der Rollbewegung (circa 0,5°) ist für die resultierenden Trossenkraft vernachlässigbar.

Aufgrund des Einsatzes von Springleinen zur Vermeidung von exzessiven Längsbewegungen, ist an dieser Stelle eine große Last für die initiale Vertäuung zu erwarten.

Die OCIMF empfiehlt einen Sicherheitsfaktor zu verwenden, der die maximal zulässige Kraft der Trossen für deren Lebenszyklus beschreibt. Deren Größe basiert auf einer abgeminderten minimalen Bruchlast (MBL), die explizit für jeden Festmacher definiert ist. Für verschiedene Materialien werden folgende Abminderungswerte empfohlen (OCIMF, 2008):

- Stahldraht: 55% MBL
- Synthetische Leinen: 50% MBL
- Polyamide: 45% MBL

Im Falle einer Überschreitung der max. zulässigen Trossenkraft sind die Ergebnisse rot markiert.

4.3 Zusammenfassung

In Tabelle 7 sind die maximal auftretenden Trossenkraften zusammengefasst. Zusätzlich werden dort die entsprechenden Auslastungsraten des jeweils beanspruchten Festmachertypes dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass für einige Fälle zusätzliche Leinen notwendig sind, um die durch das vorbeifahrende Schiff erzeugten Kräfte zu kompensieren. Das Frachtschiff, sowie eines der Jack-Up Schiffe wurden optimiert, um die gegebenen Toleranzen einzuhalten.

Die maximalen, absoluten Schiffsbewegungen in den Simulationen wurden für die einzelnen untersuchten Szenarios tabellarisch zusammengefasst. Als Referenz dienen die von der PANIC Working Group no. 24 empfohlenen und veröffentlichten, maximal zulässigen Schiffsbewegungen beim Be- und Entladen für allgemeine Frachtschiffe (PIANC, 1995). Diese basieren auf Erfahrungen, sowie Untersuchungen, und stellen einen guten Anhaltswert für verschiedene Schiffstypen dar. Tabelle 8 zeigt die maximalen Bewegungen, die in den Simulationen ermittelt wurden. Rote Zahlen kennzeichnen eine Überschreitung der von der PIANC empfohlenen Werte.

Generell ist festzuhalten, dass die Modellergebnisse zumeist unter dem empfohlenen Wert liegen. Dennoch gab es einige kritische Fälle, z.B. das Frachtschiff P2-800, welches trotz dem optimiertem Vertäulayout mit ShoreTension keine akzeptablen Wert für die maximale Längsbewegung erreichen konnte. In diesem Fall wurde der empfohlene Wert von maximal 2,0 m Längsbewegung um 36% überschritten. Es muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass dieses Ereignis nur sehr selten auftritt und in einem solchen Fall die Beladung für die Dauer dieser Schiffspassage kurz unterbrochen werden kann.

Die Überschreitung von Längsbewegungen wird für beide Jack-up Schiffe eine untergeordnete Rolle spielen, da diese den Ladevorgang voraussichtlich nur in einer gejacketen Position durchführen werden.

| Schiffstyp | MBL [kN] | abgeminderte MBL [kN] | Max. Kraft [kN] | Auslastungsrate |
|---|----------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Frachtschiff P2-Klasse (8 Trossen) | 480 | 240 | 291 | 121% |
| Frachtschiff P2-Klasse (8 + 4 Trossen *) | 480 | 240 | 203 | 85% |
| Ponton (balastiert) | 990 | 495 | 144 | 29% |
| Ponton (beladen) | 990 | 495 | 280 | 57% |
| Jack-up Schiff 1 (6 Trossen) | 512 | 230 | 263 | 114% |
| Jack-up Schiff 1 (6 Trossen + 2x Springs) | 512 | 230 | 180 | 78% |
| Jack-up Schiff 2 (12 Trossen) | 850 | 425 | 277 | 65% |

*) Vorspannung mit landseitigem Vertäusystem

Tabelle 7: Maximale Kräfte pro Trosse. Absolutwerte während der dynamischen Lastberechnung.

| Schiffstyp | Wogen [m] | Schwoien [m] | Tauchen [m] | Rollen [°] | Stampfen [°] | Gieren [°] |
|---|-----------|--------------|-------------|------------|--------------|------------|
| Frachtschiff P2-Klasse (8 Trossen) | 4,49 | 0,06 | 0,40 | 1,62 | 0,19 | 0,16 |
| Frachtschiff P2-Klasse (8 + 4 Trossen *) | 2,72 | 0,05 | 0,40 | 0,60 | 0,19 | 0,14 |
| Ponton (balastiert) | 0,19 | 0,03 | 0,39 | 0,11 | 0,18 | 0,08 |
| Ponton (beladen) | 0,94 | 0,17 | 0,41 | 0,34 | 0,20 | 0,51 |
| Jack-up Schiff 1 (6 Trossen) | 2,40 | 0,12 | 0,40 | 0,21 | 0,21 | 0,40 |
| Jack-up Schiff 1 (6 Trossen + 2x Springs) | 1,58 | 0,12 | 0,40 | 0,13 | 0,19 | 0,32 |
| Jack-up Schiff 2 (12 Trossen) | 0,94 | 0,17 | 0,39 | 0,22 | 0,20 | 0,14 |

Tabelle 8: Maximalbewegungen. Absolutwerte der untersuchten Schiffsbewegungssimulationen.

5. Fazit

Die Studie befasste sich mit folgender zentralen Frage des Genehmigungsverfahrens: Können passierende Schiffe das Offshore Terminal Bremerhaven mit der erforderlichen uneingeschränkten Manövriergeschwindigkeit passieren, ohne die dort vertäuten Schiffe zu gefährden?

Dieses lässt sich wie folgt beantworten: Mit Hilfe einer geringfügig verbesserten (und teilweise landseitig vorgespannten) Vertäuerung sind alle untersuchten Schiffe in der Lage, den Kräften des „Worst Case Szenarios“ eines passierenden Schiffes standzuhalten. Des Weiteren wurden die im Fender System auftretenden dynamischen Lasten infolge der rapiden Schiffsbewegungen analysiert und als unkritisch befunden. Zur Sicherung des operativen Betriebes, sollte eine kurzzeitige Unterbrechung des laufenden Ladeprozesses in einigen Fällen aufgrund von hohen Schiffslängsbewegungen erwägt werden.

Abschließend ist hinzuzufügen, dass detaillierte Wind-einflüsse nicht mit analysiert wurden, da Be- und Entladevorgänge für gewöhnlich nicht in Zeitfenstern mit extremen Wetterlagen durchgeführt werden. Gleichwohl verfügt die angesetzte Widerstandskraft der Festmacherleinen noch über erhebliche Reserven, welche das Ergebnis dieser Studie - die sichere Vertäumöglichkeit - weiter bekräftigen.

Danksagung

Die Autorin dankt bremenports GmbH & Co. KG für die Erlaubnis, diese Fallstudie einem größeren Publikum präsentieren zu dürfen. Des Weiteren dankt sie allen involvierten Reedereien, Schiffsbetreiber und Werften, welche dieses Projekt mit relevanten Informationen unterstützt haben.

Literatur

BAW (2006), Fahrrinnenanpassung der Unterweser, Gutachten zur ausbaubedingten Änderung schiffserzeugter Belastungen, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

BAW (2006b), Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung der Unterweser, Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

Briggs, M. J. (2006), Ship Squat Predictions for Ship/Tow Simulator, Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-I-72. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Christensen, E.D., Mortensen, S.B., Jensen, B., Hansen, H.F., Kirkegaard, J. (2008), Numerical simulation of ship motion in offshore and harbour areas. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE 2008, June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.

DHI (2014), MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic and Transport Module – Scientific Documentation, MIKE by DHI, Hørsholm.

Morgenstern, H. von (2011), Simulations-Studie Offshore Terminal Bremerhaven, Abschlussbericht, Bremen.

Mortensen, S.B., Alley, C., Kirkegaard, J., Hancock, R. (2009), Numerical modelling of moored vessel motions caused by passing vessels, Proceedings of Coasts & Ports 2009, pp. 544, Wellington, New Zealand.

OCIMF (2008), Mooring Equipment Guidelines” 3rd MEG3 Edition.

PIANC (1995), Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours, A practical Guide, Supplement to Bulletin No 88, PIANC.

PIANC (2002), Guideline for the Design of Fenders Systems.

WAMIT (2011), WAMIT User Manual 7.0, WAMIT Inc.

Wuebben, J.L. (1995), Winter Navigation on the Great Lakes, A Review of Environmental Studies, CRRL Report.

Verfasser

Dipl.-Ing. Anja Brüning

DHI
Agern Allé 5
2970 Hørsholm, Denmark
E-Mail: abu@dhigroup.com

Dr. Oliver Stoscchek

DHI-WASY GmbH
Max-Planck-Straße 6
28857 Syke, Germany
Tel.: 04242/1638-18
E-Mail: ost@dhigroup.com

Dipl.-Ing. Dominic Spinneker

DHI-WASY GmbH
Max-Planck-Straße 6
28857 Syke, Germany
Tel.: 04242/1638-0

Dipl.-Ing. Ulrich Kraus

bremenports GmbH & Co.KG
Am Strom 2
27568 Bremerhaven, Germany
Tel.: 0471/30901 - 547
E-Mail: ulrich.kraus@bremenports.de