Ingenieurbüro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner

Küsteningenieurwesen · Naturmessung · Beweissicherung · Hafenplanung Genehmigungsverfahren · Umweltmanagement · Hydrologie · Wasserbau



Ermittlung und Bewertung schiffserzeugter Belastungen am Liegeplatz 9.4 in Cuxhaven

Bericht Nr. 341



Januar 2016

Auftraggeber:

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG Niederlassung Cuxhaven



Inhaltsverzeichnis

			Seite
1	Ein	leitung und Aufgabenstellung	1
2	Rev	/ierbeschreibung	2
3	Ker Aus	nntnisse über schiffserzeugte Belastungen und vorgesehene swertekonzept zur Belastungsermittlung	es 3
	3.1 3.2	Grundlagen Auswertekonzept	3 6
4	Dat	tenaufnahme	8
	4.1 4.2	Aufbau, Gerätebestückung und Messzeitraum Konfiguration der Datenerfassung	8 10
5	Erg	jänzende Daten	11
	5.1 5.2 5.3	AIS-Datensätze Strömungsdaten der H-ADCP – Messstation an der Neuen Seebäderbrücke . Wasserstandsdaten vom Pegel Cuxhaven - Steubenhöft	11 11 11
6	Dat	tenauswertung	12
	6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 6.6. 6.6.	 Charakterisierung des Schiffsverkehrs auf Basis der AIS-Datensätze	12 17 17 18 19 23 23 24
	6.7 6.7. 6.7. 6.8 6.8 6.8. 6.8.	Ergebnisse Primärwelle1Charakteristik2Kenngrößenspezifische BetrachtungErgebnisse Sekundärwelle1Charakteristik2Kenngrößenspezifische Betrachtung	29 29 30 35 35 36
7	Bev	wertung	41
	7.1 7.2 7.3 7.3. 7.3. 7.3. 7.3.	 Verteilungen und Hauptwerte Einführende Betrachtungen zum Einfluss der geometrischen, fahrt- und tidedynamischen Kenngrößen auf die schiffserzeugten Belastungen Detaillierte Betrachtung der Randbedingungen zu den ermittelten schiffserzeugten Belastungen 1 Eigenständige Einflussgröße	41 45 49 49 51 62
8	Zus	sammenfassung	64



Tabellenverzeichnis

		Seite
Tab. 1:	Verwendete Geräte und Einbauhöhen	9
Tab. 2:	Auswerte- und Filterparameter zur Ermittlung der Wellenkenngrößen für die verschiedenen Auswerteparameter	18
Tab. 3:	Bandbreite der aufgezeichneten Wasserspiegelauslenkungen	18
Tab. 4:	Statistische Hauptwerte der Absunkhöhen im Messzeitraum 2015 (78 Tage)	42
Tab. 5:	Statistische Hauptwerte der Primärwellenhöhen im Messzeitraum 2015 (78 Tage)	43
Tab. 6:	Statistische Hauptwerte der Sekundärwellenhöhen im Messzeitraum 2015 (78 Tage)	44

Abbildungsverzeichnis

		Seite
Abb.	1:	Lageübersichtsplan des Liegeplatzes 9.4 in Cuxhaven mit dem Messpfahl zur Erfassung schiffserzeugter Belastungen, der definierten Passierlinie sowie den Positionen der verwendeten Wasserstands- und Strömungsmessungen
Abb.	2:	Wasserspiegeländerungen an einer ortsfesten Position bei einer Schiffspassage; Definition maßgebender Kenngrößen für Schiffswellen und Ausbreitung der Wellensysteme bei einem fahrenden Schiff (schematisch, aus SPINGAT, 1999)
Abb.	3:	Signalaufbereitung zur rechnergestützten Ermittlung maßgebender Kenngrößen bei schiffserzeugten Belastungen (schematische Darstellung, aus SPINGAT, 1999)
Abb.	4:	Messstation zur Erfassung schiffsinduzierter Belastungen am Liegeplatz 9.4 in Cuxhaven
Abb.	5:	Messschrank mit der Datenerfassungs- und -übertragungseinheit
Abb.	6:	Schiffslängen und Schiffstypen im Messzeitraum 201512
Abb.	7:	Schiffsbreite (oben) und Schiffstiefgang (unten) in Abhängigkeit der Schiffslänge im Messzeitraum 201513
Abb.	8:	Schiffstiefgang in Abhängigkeit der Schiffsbreite im Messzeitraum 201514
Abb.	9:	Schiffsgeschwindigkeit (oben) über Grund und Passierabstand (unten) in Abhängigkeit der Schiffslänge im Messzeitraum 201515
Abb.	10:	Verteilung der Passagenanzahlen absolut (oben) und prozentual (unten) während des jeweils betrachteten Ereignisses (Mehrfachpassagen im Auswerteintervall)
Abb.	11:	Datenkollektiv der beiden verschiedenen Schiffsgeschwindigkeiten im Messzeitraum 2015
Abb.	12:	Wellenhöhen und -perioden für die Zeitbereichs- (oben) und Frequenzbereichsauswertung (unten) im Messzeitraum 201520
Abb.	13:	Abschätzung der Wellenlängen nach Linearer Wellentheorie
Abb.	14:	Wellenhöhen und Wellenanzahl für die Zeitbereichsauswertung im Messzeitraum 2015 (Analysefenster = 15 Minuten)21
Abb.	15:	Maximale zur mittleren Wellenhöhe (Zeitbereichsauswertung) zur Erkennung seegangsdominierter Messungen in 201522



Abb.	16:	Charakterisierung der maximalen Wellenhöhen in Abhängigkeit des Wasserstandes im Messzeitraum 201522
Abb.	17:	Gesamtkollektiv der Absunkhöhe und –periode zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 201523
Abb.	18:	Abhängigkeit der Absunkhöhe von der Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt25
Abb.	19:	Abhängigkeit der Absunkhöhe vom Schiffstyp25
Abb.	20:	Abhängigkeit der Absunkhöhe von der Schiffslänge, –breite und dem Schiffstiefgang
Abb.	21:	Abhängigkeit der Absunkhöhe von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund (oben) und durchs Wasser (unten)27
Abb.	22:	Abhängigkeit der Absunkhöhe vom Passierabstand
Abb.	23:	Abhängigkeit der Absunkhöhe vom Wasserstand
Abb.	24:	Gesamtkollektiv der Primärwellenhöhe und –periode zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 2015
Abb.	25:	Abhängigkeit der Primärwellenhöhe von der Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt
Abb.	26:	Abhängigkeit der Primärwellenhöhe vom Schiffstyp
Abb.	27:	Abhängigkeit der Primärwellenhöhe von der Schiffslänge, –breite und dem Schiffstiefgang
Abb.	28:	Abhängigkeit der Primärwellenhöhe von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund (oben) und durchs Wasser (unten)
Abb.	29:	Abhängigkeit der Primärwellenhöhe vom Passierabstand
Abb.	30:	Abhängigkeit der Primärwellenhöhe vom Wasserstand34
Abb.	31:	Gesamtkollektiv der Sekundärwellenhöhe und –periode zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 2015
Abb.	32:	Gesamtkollektiv der mittleren Wellenhöhe und Sekundärwellenhöhe zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 2015
Abb.	33:	Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe von der Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt
Abb.	34:	Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe vom Schiffstyp37
Abb.	35:	Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe von der Schiffslänge, –breite und dem Schiffstiefgang
Abb.	36:	Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe von der Schiffsgeschwindigkeit
Abb.	37:	Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe vom Passierabstand40
Abb.	38:	Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe vom Wasserstand40
Abb.	39:	Verteilungen der Absunkhöhen und -perioden im Messzeitraum 201542
Abb.	40:	Verteilung der Primärwellenhöhen und -perioden im Messzeitraum 201543
Abb.	41:	Verteilung der Sekundärwellenhöhen und -perioden im Messzeitraum 201544
Abb.	42:	Statistische Betrachtung der geometrischen, fahrdynamischen und tidebedingten Randbedingungen für die höchsten Absunkereignisse im Messzeitraum 2015 oben: für die 78 höchsten Absunkereignisse (1. Szenario) unten: für die täglich höchsten Absunkereignisse (2. Szenario)46
Abb.	43:	Statistische Betrachtung der geometrischen, fahrdynamischen und tidebedingten Randbedingungen für die höchsten Primärwellenereignisse im Messzeitraum 2015 oben: für die 78 höchsten Primärwellenereignisse (1. Szenario) unten: für die täglich höchsten Primärwellenereignisse (2. Szenario)



Abb.	44:	Statistische Betrachtung der geometrischen, fahrdynamischen und tidebedingten Randbedingungen für die höchsten Sekundärwellenereignisse im Messzeitraum 2015 oben: für die 78 höchsten Sekundärwellenereignisse (1. Szenario) unten: für die täglich höchsten Sekundärwellenereignisse (2. Szenario)
Abb.	45:	Einfluss der Anzahl der Passagen im zugrunde liegenden Auswertefenster für die Messkampagne 201550
Abb.	46:	Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit der Schiffsbreite für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 201552
Abb.	47:	Entwicklung der Randbedingungen Passierabstand, Geschwindigkeit durchs Wasser und Wasserstand in Abhängigkeit der Schiffsbreite für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 201553
Abb.	48:	Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen
Abb.	49:	Entwicklung der Randbedingungen Schiffsbreite, Passierabstand und Wasserstand in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen56
Abb.	50:	Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit des Passierabstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen
Abb.	51:	Entwicklung der Randbedingungen Schiffsbreite, Geschwindigkeit durchs Wasser und Wasserstand in Abhängigkeit des Passierabstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen
Abb.	52:	Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit des Wasserstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen
Abb.	53:	Entwicklung der Randbedingungen Schiffsbreite, Passierabstand und Geschwindigkeit durchs Wasser in Abhängigkeit des Wasserstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen61

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Rahmen einer Umnutzung des Liegeplatzes 9.4 in Cuxhaven für die Verladung von Schwergut-Offshore-Windenergieturbinen entwickelte sich die Frage nach den schiffsinduzierten Belastungen der vorbeifahrenden Schifffahrt, da die zu beladenen Schiffseinheiten nicht aufgeständert werden, sondern im Wasserraum verbleiben.

Insbesondere stehen Fragen zur Größe der zu erwartenden langperiodischen Wellenbelastungen (Schwall und Sunk) und deren Eintrittsbedingungen im Vordergrund der zu beantwortenden Fragen.

Daher beauftragte die Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG, Niederlassung Cuxhaven (NPC) mit Schreiben vom 15. Juli 2015 das Ingenieurbüro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner (IMP), Oldenburg mit der Durchführung, Auswertung und gutachterlichen Bewertung der schiffserzeugten Belastungen im Bereich des Liegeplatzes 9.4 auf Basis eines am 08. Juli 2015 vorgelegten Angebotes.

Im Einzelnen waren folgende Arbeitsschritte und Untersuchungspakete vorgesehen:

- Aufbau und Betrieb einer Messstation zur zeitlich hochauflösenden, kontinuierlichen Erfassung des Wasserspiegels am Liegeplatz 9.4 über rd. 13 Wochen
- Auswertung der lang- und kurzperiodischen Wellenbelastungen aus Schiffspassagen und Seegang
- Ermittlung und Zuordnung der schiffsspezifischen Informationen aus den AIS-Datensätzen
- Erweiterte Ermittlung schiffsspezifischer Kenngrößen durch Berücksichtigung der jeweils vorherrschenden Tideströmungen
- Gutachterliche Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse in einem abgeschlossenen Bericht

Aufgrund der Einbindung dieser Ergebnisse in ein notwendiges Planfeststellungsänderungsverfahren sollte mit der Untersuchung schnellstmöglich begonnen werden, um eine Planeinreichung Anfang 2016 zu gewährleisten.

2 Revierbeschreibung

Der in den Jahren 2011/12 errichtete Liegeplatz 9.4 liegt im Elbmündungsgebiet stromab des Altenbrucher Bogens am südöstlichen Ende des Cuxhavener Hafengebietes. Abb. 1 kennzeichnet die Lage des Liegeplatzes, des errichteten Messpfahles und der definierten Passierlinie zur Erfassung der Schiffsbewegungen im Revier. Die Passierlinie wurde senkrecht zum Fahrwasser ausgerichtet. Darüber hinaus sind auch die Positionen der verwendeten Wasserstands- und Strömungsmessungen in dem Lageübersichtsplan mit aufgenommen.

Gem. Seekarte betragen die Abstände auf der Passierlinie zwischen dem Messpfahl und den Fahrwasserrändern rd. 460 bzw. 870 m. Die Mittelachse liegt rd. 665 m von der Messposition entfernt.



Abb. 1: Lageübersichtsplan des Liegeplatzes 9.4 in Cuxhaven mit dem Messpfahl zur Erfassung schiffserzeugter Belastungen, der definierten Passierlinie sowie den Positionen der verwendeten Wasserstands- und Strömungsmessungen



3 Kenntnisse über schiffserzeugte Belastungen und vorgesehenes Auswertekonzept zur Belastungsermittlung

3.1 Grundlagen

Bei der Fahrt eines Schiffes durch das Wasser treten durch Druck- und Wasserspiegeländerungen an Bug, Schiffslängsseite und Heck Wellensysteme mit unterschiedlichen Auslenkungen und Perioden auf.

Diese Schiffswellensysteme können wie folgt unterschieden werden:

- Bugstau (s_B) direkt am Schiffskörper
- Absunk (z_A) seitlich des Schiffes
- Heckwelle als Teil des durch den Absunk angeregten langperiodischen Primärwellensystems (H_P)
- Kurzperiodisches Sekundärwellensystem (Hs)

Mit der Wasserspiegeländerung gehen darüber hinaus auch Verdrängungsströmungen einher, die hier jedoch nicht weiter betrachtet werden sollen.

Für die Passage eines Schiffes (Abb. 2, oben) zeigt Abb. 2 (Mitte) in stark überhöhter Darstellung die für einen ortsfesten Betrachter erkennbaren Wasserspiegeländerungen mit Identifikation der o.g. kennzeichnenden Größen für die Parametrisierung von Schiffswellen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Absunk z.T. unterschiedlich definiert wird. In einigen Arbeiten wird als Absunk nur die Halbwelle unterhalb des Ruhewasserspiegels (RWS), also ohne den Bugstau, angesehen.

Darüber hinaus ist in Abb. 2 (unten) das Wellenbild eines Schiffes in der Draufsicht schematisch dargestellt.

Je nach den geometrischen Bedingungen des Fahrwassers kann zwischen Tief- (keine Seiten- und Tiefenbegrenzung) und Flachwasserverhältnissen (nach Tiefe beschränkt, Breite unbeschränkt) sowie Kanalstrecken (Seiten- und Tiefenbegrenzung) unterschieden werden.

Das Wellenbild ist über die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit c stark von der Wassertiefe abhängig. Im Flachwasser oder bei der Kanalfahrt beträgt die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit

 $\begin{array}{ll} c = \sqrt{g \cdot d} & [m/s] & (1) \\ mit: & g = Erdbeschleunigung [m/s^2] \\ & d = Wassertiefe [m] \end{array}$

Der Winkel α , unter dem sich die Wellenkämme der Primär- und Sekundärwelle treffen (vgl. Abb. 2, unten), kann unter Verwendung der FROUDschen Tiefenzahl Fr_s

$$Fr_{s} = \frac{v_{s}}{\sqrt{g \cdot d}} \qquad [-] \qquad (2)$$

mit: $v_s =$ Schiffsgeschwindigkeit [m/s]

aus dem in Abb. 2 (unten) aufgenommenen Diagramm ermittelt werden.





Abb. 2: Wasserspiegeländerungen an einer ortsfesten Position bei einer Schiffspassage; Definition maßgebender Kenngrößen für Schiffswellen und Ausbreitung der Wellensysteme bei einem fahrenden Schiff (schematisch, aus SPINGAT, 1999¹)

¹ SPINGAT, F.: Auswertung schiffserzeugter Belastungen aus Langzeitmessungen, Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Band 52, S. 168 – 177, 1999.

In unbeschränktem Fahrwasser treffen sich die Wellenkämme von Primär- und Sekundärwelle unter einem Winkel von 19°28' (Kelvin`scher Winkel), wobei der Winkel α in beschränktem Fahrwasser bis auf 90° ansteigen kann (bei Fr_s = 1).

In der Handelsschifffahrt wird normalerweise in dem nach Abb. 2 (unten) ausgewiesenen unterkritischen Geschwindigkeitsbereich (Verdrängerfahrt) gefahren. Bei Annäherung an die kritische Geschwindigkeit wird ein starker Anstieg des Schiffswiderstandes festgestellt. Im überkritischen Geschwindigkeitsbereich schiebt sich das Schiff auf die eigene Welle und kommt ins Gleiten.

Für weitergehende Betrachtungen zur Ausbreitung schiffsgenerierter Wellen wird auf SÖRENSEN (1969)² verwiesen.

Die Höhe schiffserzeugter Belastungen ist von einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter abhängig, als wesentliche Einflussgrößen werden i.allg.

- Schiffsabmessungen und –geometrie (Länge, Breite, Tiefgang,
- Hauptspantquerschnitt)
- Schiffsgeschwindigkeit
- Fahrwasserverhältnisse (Wasserspiegel- und Sohlbreite, Wassertiefe, Form und Fläche des Querschnittes)
- Passierabstand

angesehen. Darüber hinaus bestehen aber z.B. auch Abhängigkeiten von

- dem Gesamtwiderstand des Schiffes (Schiffsform),
- dem Driftwinkel des Schiffes,
- der Antriebsart des Schiffes,
- den Strömungsverhältnissen im Gewässer,
- der Dichte des Wasserkörpers sowie
- Refraktions- und Shoalingeinflüssen.

Schiffswellen unterliegen somit sehr stark veränderlichen Randbedingungen und ortsspezifischen Einflüssen.

Dennoch können die Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in der Unterelbe von FÜHRBÖ-TER et al. (1988)³ für eine generelle Charakterisierung und Beschreibung von Schiffswellenereignissen in begrenztem Fahrwasser herangezogen werden:

- 1. Die Schiffsgeschwindigkeit ist, neben dem Querschnittsverhältnis, die wichtigste und einzige aktiv beeinflussbare Steuergröße für die Höhe der Schiffswellen.
- 2. Die Primärwellenhöhe und der Absunk nehmen mit größer werdendem Querschnitt ab, im Gegensatz dazu nimmt die Sekundärwellenhöhe zu.
- 3. Die Primärwellen wirken als langperiodische Wasserspiegelschwankungen über lange Zeiträume, während die Sekundärwellenbelastung nur über relativ kurze Zeiträume auftritt.
- 4. Eine rechnerische Abschätzung der Absunktiefen und Schiffswellenhöhen liefert unter geometrisch komplizierten, natürlichen Verhältnissen und variablen Randbedingungen keine befriedigenden Ergebnisse.

² SÖRENSEN, R.M.: Waves generated by model ship hull. Journal of the Waterways and Harbors Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineers. Vol. 95, WW4, S. 513-538, 1969.

³ FÜHRBÖTER, A.; DETTE, H.H.; JENSEN, J.; KOTZBAUER, U.; OELERICH, J.: Wind- und Schiffswellenvorhersage für ausgewählte Abschnitte der Unterelbe. Bericht Nr. 649 aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig (unveröffentlicht), 1988.



3.2 Auswertekonzept

Schiffserzeugte Belastungen treten unregelmäßig auf und erfordern damit kontinuierliche Messungen für eine systematische Betrachtung. Die zeitliche Auflösung für derartige Messungen entspricht den Anforderungen an herkömmliche Seegangsmessungen.

Zur Beschreibung schiffserzeugter Belastungen werden nachfolgend die Wasserspiegeländerungen hinsichtlich maximaler Werte des Absunkes, der Primär- und Sekundärwelle untersucht, die Vorgehensweise stellt eine Einzelwellenbetrachtung im Zeitbereich dar. Spektrale Parameter, bei der Beschreibung des Seegangsklimas sehr gebräuchlich, können für die Schiffswellenauswertung nicht verwendet werden.

Die rechnergestützte, automatisierte Auswertung von Schiffswellen muss somit in der Lage sein, die genannten Parameter für ein erkanntes Schiffsereignis zu parametrisieren und mögliche maßgebende Überlagerungen mit Seegangsereignissen ausschließen.

Ausgangspunkt für die Erkennung eines Schiffsereignisses bilden AIS-Datensätze, welche für definierte geometrische Bedingungen (hier: Festlegung einer Passierlinie) von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Nord (GDWS) in Kiel auf Anforderung zur Verfügung gestellt werden. Damit ist neben einer Erkennung des Passierzeitpunktes auch eine entsprechende Beschreibung des Fahrzeugs auf Basis der Standarddokumentation im AIS-Datensatz möglich.

In der eigentlichen Auswertephase wird eine Zeitbereichsanalyse zur Bestimmung der maximalen Wellenhöhe für ein festgelegtes Zeitfenster um den Passierzeitpunkt mit verschiedenen Wellenerkennungsverfahren durchgeführt. Dazu wird das windowsfähige Wellenund Strömungsanalyseprogramm Water Movement Calculation WMC verwendet, das am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig entwickelt und seit 1996 von IMP überarbeitet und weiterentwickelt wurde. Das Programm ist für die automatische Auswertung von Massendaten ausgelegt und bietet die Möglichkeit einer anwendungsspezifischen Signalaufbereitung.

In Abb. 3 sind beispielhaft die aufgezeichneten Messdaten sowie deren Auswertung durch mit verschiedenen Signalaufbereitungsverfahren zur Ermittlung der Parameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle grafisch dargestellt.

Für die kontrollierte Ermittlung insbesondere der Sekundärwellenbelastung ist die Analyse des vorherrschenden Seegangsklimas notwendig. Resultierend aus der nur kurzen Wirkdauer des Sekundärwellensystems gegenüber einer kontinuierlichen Seegangsbelastung ergeben sich signifikante Unterschiede im Verhältnis von mittleren zu maximalen Wellenkenngrößen, so dass eine Erkennung seegangsdominanter Ereignisse auf dieser Basis problemlos möglich ist.

Außerdem wird mithilfe der H-ADCP-Messungen an der Neuen Seebäderbrücke die Schiffsgeschwindigkeiten über Grund die hydrodynamisch aussagefähigere Größe "Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser" ermittelt.

Basierend auf einer kompletten Datengrundlage werden auf diese Weise, bei hinreichender Messdauer, abgesicherte statistische Kenntnisse über die schiffserzeugten Belastungsgrößen Absunk, Primär- und Sekundärwelle für eine objektive Beurteilung bereitgestellt. Zudem können über die AIS-Informationen auch verkehrsspezifische Randbedingungen beschrieben und für eine Bewertung herangezogen werden.



Abb. 3: Signalaufbereitung zur rechnergestützten Ermittlung maßgebender Kenngrößen bei schiffserzeugten Belastungen (schematische Darstellung, aus SPINGAT, 1999)



4 Datenaufnahme

4.1 Aufbau, Gerätebestückung und Messzeitraum

Die Messstation am Liegeplatz 9.4 in Cuxhaven wurde am 14.09.2015 aufgebaut und in Betrieb genommen. Abb. 4 zeigt den Messpfahl mit dem Wellendraht; die Druckmessdose und eine Strömungssonde liegen unterhalb des Wasserspiegels.



Abb. 4: Messstation zur Erfassung schiffsinduzierter Belastungen am Liegeplatz 9.4 in Cuxhaven

Die Grundhalterung bestehend aus zwei Holzdalben sowie der hölzernen Trägerkonstruktion wurden von NPC errichtet. Die Geräteinstallation erfolgte in Zusammenarbeit von NPC, Argus⁴ und IMP.

Die verwendeten Geräte und deren Einbauhöhen sind in Tab. 1 zusammengestellt. Der Wellendraht stellt das maßgebende Gerät für die Wellenerfassung dar, der Druckmessgeber wird zur genauen Erfassung des mittleren Wasserstandes und als Ausfallsicherung zum

⁴ Argus, Gesellschaft für Umweltmesstechnik mbH, Ritterhude

Wellendraht verwendet. Bedingt durch die notwendige Berücksichtigung des hydraulischen Filters bei der Wellenauswertung von Druckmessgebern werden kurzperiodische Wellen in Abhängigkeit des Wasserstandes z.T. nur gedämpft erfasst und liefern damit abweichende Ergebnisse zum Wellendraht. Bei den längerperiodischen Wellen sind beide Systeme jedoch gleichwertig.

Gerät	Hersteller	Einbauhöhe	Messbereich
Wellendraht AWG-IV	Argus Ges. für Umweltmess- technik mbH	NN - 2,32 m bis NN + 6,13 m	8,45 m
Druckmessgeber PR-36XW	Keller Ges. für Druckmesstechnik mbH	NN – 2,67 m	1 bar
Strömungssensor ISM2001	hs engineers	NN – 3,73 m	+/- 3 m/s

Tab. 1: Verwendete Geräte und Einbauhöhen

Die Datenerfassungseinheit bestand aus einem Datenlogger der Fa. Campbell Typ CR100 inkl. Speichereinheit mit 2 GB und einem Übertragungsmodem GSM Typ COM110A mit Buffermodul SC105, ebenfalls alles von der Fa. Campell.

Zur Überbrückung kurzzeitiger Ausfälle in der Energieversorgung ist die Station mit einem Akku (7 Ah) und Ladegerät ausgestattet.

Weiterhin ist ein Überspannungsschutz installiert. Den an den von NPC aufgestellten Holzdalben hochwassersicher montierten Messschrank zeigt Abb. 5.



Abb. 5: Messschrank mit der Datenerfassungs- und -übertragungseinheit

Zur Erfassung schiffserzeugter Belastungen wurde die Station über rd. 11 Wochen in der Zeit vom 14.09. bis 30.11.2015 betrieben. In dem Betriebszeitraum sind keine Datenausfälle eingetreten, so dass das Signal des Wellendrahtes durchgehend für alle Wellenauswertungen genutzt werden konnte.

Der Abbau der Station erfolgte am 19.01.2016; bis zu diesem Zeitpunkt wurde die Datenerfassung weiter betrieben, jedoch nicht mehr ausgewertet. Die Daten stehen damit bei Bedarf für erweiterte Betrachtungen zur Verfügung.

In der Zeit vom 11.11.2015 nachmittags bis 23.11.2015 nachmittags lag der rd. 152 m lange Heavy Load Carrier "Annette" der SAL⁵ am Liegeplatz 9.4. Das mit der Backbordseite am Liegeplatz liegende Schiff deckte den Messpfahl mit seinem Bugbereich ab. Eine Wirkung auf die schiffserzeugten Sekundärwellen sowie den vorherrschenden Seegang kann in dieser Zeit nicht ausgeschlossen werden. Für die längerperiodischen Wellenkomponenten wird jedoch davon ausgegangen, dass der Einfluss vernachlässigbar ist.

4.2 Konfiguration der Datenerfassung

Die Daten wurden mit einem Messtakt von 20 Hz erfasst und kontinuierlich aufgezeichnet. Über die Modemverbindung erfolgte alle 10 Minuten eine Datenübertragung zu IMP. Auf diese Art und Weise konnte eine enge Dateneingangskontrolle und Plausibilisierung der aufgenommenen Daten erreicht werden, um Unregelmäßigkeit zeitnah zu entdecken und Ausfallzeiten so gering wie möglich zu halten.

⁵ Schifffahrtskontor Altes Land, Hamburg

5 Ergänzende Daten

5.1 AIS-Datensätze

Die AIS-Datensätze wurden von der GDWS als anonymisierte binäre Rohdaten für die in Abb. 1 dargestellte Passierlinie auf Höhe der Messstation am Liegeplatz 9.4 kostenfrei zur Verfügung gestellt. Die Daten enthielten die wesentlichen Informationen zur Schiffsgeometrie, der Geschwindigkeit, der Fahrtrichtung und dem Passierabstand zur Messstation.

Die Daten wurden in GMT-Zeit abgelegt und für die weitere Bearbeitung auf MEZ-Zeit umgerechnet.

Die binären Daten wurden mit einem von IMP entwickelten Konvertierungstool in ASCIIlesbarer Form zusammengestellt. Dabei erfolgte eine Plausiblisierung und Bereinigung der Daten, um fehlerhafte Mehrfachpassagen und unplausible Datensätze auszuschließen.

5.2 Strömungsdaten der H-ADCP – Messstation an der Neuen Seebäderbrücke

Zur Ermittlung der maßgebenden Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser für die Bewertung der schiffsinduzierten Belastungen werden neben den AIS-Daten (Geschwindigkeit über Grund) auch die revieraktuellen Strömungsgeschwindigkeiten benötigt. Da entsprechende Werte nicht im unmittelbaren Betrachtungsquerschnitt verfügbar sind wurden die Daten der H-ADCP-Messstation von NPC an der Neuen Seebäderbrücke (NSBB) verwendet. Die Station liegt rd. 4,8 km stromab der Messstation am Liegeplatz 9.4.

Das Gerät der Fa. RD Instruments, San Diego, USA (300 MHz) misst im 1-Minutentakt auf NN – 7,5 m und ist in der Lage Daten bis rd. 300 m vor dem Gerät zu erfassen. Unter Berücksichtigung zunehmender Störungen und nicht mehr durchgängiger Verfügbarkeit bei Maximalentfernung wurde der Messpunkt 275 m als Referenzströmung gewählt. Dieser Messpunkt liegt am südlichen Rand der Fahrrinne.

Die Strömungsdaten wurden direkt verwendet, eine Anpassung aufgrund des Abstandes zum Liegeplatz 9.4 sowie der Lage im Querschnitt erfolgte nicht. Gegenüber alternativen Ansätzen mit Berücksichtigung einer mittleren Strömungsganglinie werden hier jedoch schon wirklichkeitsnähere Randbedingungen erfasst, so dass von einer guten Näherungslösung zur Abschätzung der Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser ausgegangen wird.

5.3 Wasserstandsdaten vom Pegel Cuxhaven - Steubenhöft

Die Wasserstandsdaten am Pegel Cuxhaven – Steubenhöft werden vom WSA Cuxhaven aufgenommen und kostenfrei als Rohdaten für den gesamten Untersuchungszeitraum zur Verfügung gestellt. Die Station liegt rd. 3,5 km stromab der Messstation am Liegeplatz 9.4.

Die Daten werden im 1-Minutentakt aufgezeichnet und als Wasserstände mit Bezug auf Pegelnull abgelegt. Der Pegelnullpunkt liegt bei NHN – 5,019 m. Für die weiteren Betrachtungen wurden alle Werte auf den NHN-Horizont umgerechnet.

Die Daten dienen im Wesentlichen der internen Plausibilisierung und als ergänzende Betrachtung der lokalen Wasserstandsentwicklung, da auch an der Messstation selbst vergleichbare Wasserstandsdaten ermittelt werden.



6 Datenauswertung

6.1 Charakterisierung des Schiffsverkehrs auf Basis der AIS-Datensätze

In dem Messzeitraum von rd. 11 Wochen wurden insgesamt 10.578 plausible Schiffspassagen registriert, die verschiedenen Schiffstypen zugeordnet werden können (vgl. Abb. 6). Die Kategorie der Frachtschiffe nimmt dabei einen Anteil von rd. 50 % ein. 5.321 Schiffspassagen sind dem einlaufenden Verkehr und 5.257 Passagen dem auslaufenden Schiffsverkehr zuzuordnen.



Abb. 6: Schiffslängen und Schiffstypen im Messzeitraum 2015

Zur näheren Charakterisierung der Verkehre werden nachfolgend verschiedene AIS-gestützte Daten herangezogen und in Abhängigkeit der Schiffslänge bzw. -breite dokumentiert. Es werden folgende Kenngrößen dargestellt:

- Schiffsbreite (Abb. 7)
- Schiffstiefgang (Abb. 7 und Abb. 8)
- Schiffsgeschwindigkeit über Grund (Abb. 9)
- Passierabstand zum Messpfahl (Abb. 9)

Darüber hinaus wird auch die Verkehrsdichte über die Passagenanzahl in einem Zeitraum von \pm 8 Minuten zum jeweiligen Passierzeitpunkt im AIS-Datensatz (Abb. 10) dokumentiert⁶. Diese Information wird später im Rahmen der Auswertung näher betrachtet, da hiermit Mehrfachereignisse beschrieben werden.

⁶ Der gewählte Betrachtungszeitraum von 16 Minuten reflektiert auf den "Suchraum" nach der höchsten Schiffswelle im Rahmen der späteren rechnergestützte Auswertung



Bedingt durch einzelne Fehlwerte in den Datensätzen weicht die Grundgesamtheit in den einzelnen Darstellungen z.T. geringfügig ab, dieses wird hier jedoch vernachlässigt. Für die weitere Auswertung werden jedoch nur vollständige Datensätze verwendet, so dass sich dadurch die Grundgesamtheit um 195 Ereignisse auf 10.383 Passagen verringert.



Abb. 7: Schiffsbreite (oben) und Schiffstiefgang (unten) in Abhängigkeit der Schiffslänge im Messzeitraum 2015



Abb. 8: Schiffstiefgang in Abhängigkeit der Schiffsbreite im Messzeitraum 2015

Die verschiedenen Darstellungen zur Beschreibung der Schiffsgeometrie (Länge, Breite, Tiefgang) zeigen systematische Zusammenhänge, die jedoch eine gewisse Bandbreite aufweisen.

Bei der Schiffsgeschwindigkeit (über Grund) (vgl. Abb. 9, oben) ist erkennbar, dass der Kleinverkehr eine große Geschwindigkeitsbandbreite aufweist. Besonders auffällig ist hier der deutlich erkennbare Hochgeschwindigkeits-Katamaran für den Helgolandverkehr (Schiffslänge: 52 m), aber auch andere Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge liefern Geschwindigkeiten oberhalb von 20 kn. Ansonsten werden die tendenziell höchsten Geschwindigkeiten von Schiffen mit einer Länge von rd. 150 m erreicht. Mit zunehmender Schiffsgröße nimmt dann das Höchstgeschwindigkeitsniveau wieder etwas ab, die Minimalgeschwindigkeiten verbleiben jedoch etwa auf dem Niveau und betragen rd. 7 bis 8 kn.

Der Passierabstand zeigt, dass die größten Schiffseinheiten mittig im Fahrwasser verkehren, während sich mit abnehmender Schiffsgröße die ein- und auslaufenden Verkehre auf die richtungsspezifischen Seiten einsortieren (vgl. Abb. 9, unten). Der einlaufende Schiffsverkehr hat damit mit Ausnahme der ganz großen Schiffe geringere Passierabstände als der auslaufende Verkehr.

Die Betrachtungen zur Verkehrsdichte weisen aus, dass in dem zugrunde gelegten 16minütigen Zeitfenster sehr häufig mehrere Schiffspassagen liegen. So weist Abb. 10 (unten) aus, dass nur rd. 22,5 % aller Schiffspassagen als klassische Einzelpassage zu betrachten sind. Am häufigsten mit einem Anteil von rd. 1/3 kommt die Passage von zwei Schiffen innerhalb des Betrachtungszeitfensters vor. Aber auch die Passage von 3 Schiffseinheiten ist noch häufiger als die Einzelpassage.



Abb. 9: Schiffsgeschwindigkeit (oben) über Grund und Passierabstand (unten) in Abhängigkeit der Schiffslänge im Messzeitraum 2015



Abb. 10: Verteilung der Passagenanzahlen absolut (oben) und prozentual (unten) während des jeweils betrachteten Ereignisses (Mehrfachpassagen im Auswerteintervall)

6.2 Weitere Kenngröße zur Charakterisierung des Schiffsverkehrs

Wie bereits erläutert wurde die H-ADCP-Messung an der NSBB zur Ermittlung der Tidestromgeschwindigkeiten verwendet. Die Messwerte in einem Abstand zum Bauwerk von rd. 275 m lieferten dann die Basis für die Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser. Ausgehend von dem Passierzeitpunkt wird eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit über die folgenden 5 Minutenwerte ermittelt und daraus die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser in den AIS-Datensätzen ergänzt.

Der Zusammenhang beider Schiffsgeschwindigkeiten ist für das gesamte Datenkollektiv in Abb. 11 dokumentiert.





6.3 Auswertekonfigurationen

Die Datenauswertung erfolgt mit dem IMP-eigenen Programm WMC 4.2.06.01 (November 2015), welches Wellenauswertungen im Zeit- und Frequenzbereich erlaubt. Weiterhin kann auch ein hydraulischer Filter zur Berechnung von Wellenhöhen bei Druckmessgebern berücksichtigt werden.

Für die Ermittlung der verschiedenen Wellenanteile aus der schiffserzeugten Belastung sowie dem Seegang werden die Messungen der Wasserspiegelauslenkungen unterschiedlich aufbereitet, so dass die verschiedenen maßgebenden Parameter aus den aufgenommenen Daten in unterschiedlichen Rechenläufen abgeleitet werden können (vgl. Abschn. 3.2).

Ausgangsbasis für die Ermittlung der maßgebenden schiffsinduzierten Parameter bilden aber immer die im AIS-Datensatz abgelegten Passierzeiten. Je nach Auswerteparameter erfolgte der Auswertebeginn bis zu 3 Minuten vor der Passage.



Die verschiedenen Auswerte- und Filterparameter sind in nachfolgender Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Auswerte- und Filterparameter zur Ermittlung der Wellenkenngrößen für die verschiedenen Auswerteparameter

Kenngröße	Absunk	Primärwelle	Sekundärwelle	Seegang
Auswertebeginn	-3 min	-3 min	0 min	halbstündlich
Auswertefenster	8 min	8 min	7,5 min	15 min
Werteanzahl Median-Filter	5	5	5	5
Werteanzahl Mittelwert-Filter	191	191	9	9
Mindestweite Wellenerkennung	1,5 sek	1,5 sek	0,4 sek	0,4 sek

In dem Messzeitraum wurde die Bandbreite der messbaren Wasserspiegelauslenkungen weitgehend ausgenutzt, zu keinem Zeitpunkt sind Wasserspiegelauslenkungen vor Datenfilterung außerhalb des Messbereichs aufgetreten (vgl. Tab. 3).

Tab. 3:	Bandbreite der	aufgezeichneten	Wasserspiegelauslenkungen
100101	Ballabi cite aci	aargezeienneten	n'accer opregera acremitarigen

Wasserspiegelauslenkung	Messwert	Messbereich Wellendraht	Messbereich Druck- messgeber
Minimum ungefiltert	NN - 2,29 m (29.09. 20:46:50)	NN – 2,32 m	NN – 2,67 m
Maximum ungefiltert	NN + 5,26 m (30.11. 03:42:25)	NN + 6,13 m	NN + 7,46 m

6.4 Ergebnisdatenstruktur

Für die Betrachtung der schiffsinduzierten Belastung ist es notwendig, alle maßgebenden Datensätze zusammenzuführen. Dieses erfolgt unter dem prioritären Zeitstempel der Passierzeit aus den AIS-Datensätzen.

Dann wird die zugehörige Wellenauswertung des jeweiligen Rechenlaufs für die Parameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle sowie die mithilfe der H-ADCP-Messungen ermittelte Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser jeweils der Schiffspassage zugeordnet. Im Wellendatensatz ist auch der mittlere Wasserstand für den Auswertezeitpunkt enthalten. Die Daten werden zeilenweise abgelegt.

Aus diesen drei Datensätzen der Rechenläufe zur schiffsinduzierten Belastung für die Parameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle (s. Tab. 2) lassen sich dann alle folgenden Darstellungen und Auswertungen ableiten.



6.5 Ergebnisse Seegang

Die Seegangsauswertung dient der Kontrolle und Beschreibung der Randbedingungen für die Messung schifferzeugter Belastungen, insbesondere einer möglichen Abgrenzung von Zeiträumen mit vorwiegender Seegangsbelastung, da sich Seegang und Sekundärwelle wegen der weitgehend gleichen Welleneigenschaften nicht direkt trennen lassen. Außerdem verbleibt bei starkem Seegang trotz der beschriebenen Filterung noch eine Restamplitude aus dem Seegangsereignis, so dass auch Absunk und Primärwelle in diesen Zeiträumen nicht weiter betrachtet werden.

Einen Überblick über die Seegangscharakteristik gibt Abb. 12 sowohl im Zeit- (oben) als auch im Frequenzbereich (unten). Beide Seegangsanalyseverfahren liefern sehr ähnliche signifikante Wellenhöhen, die sich im Zeitbereich aus der Wellenhöhe der höchsten 33 % der Wellen (H_{1/3}) und im Frequenzbereich aus dem Mittelwert des 0. Momentes (Hm0) ergeben. Die zugehörigen Perioden zeigen ein paar Unterschiede, im Wesentlichen treten bei der Spektralanalyse kaum längerperiodische, kleine Wellen auf. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Spektralanalyse auch ein Kollektiv mit geringfügig kürzeren Wellenperioden als bei der Zeitbereichsanalyse.

Für eine orientierende Zuordnung der Wellenlängen zu den ermittelten Wellenperioden wurde die Wellenlänge nach Linearer Wellentheorie ermittelt und in Abb. 13 dokumentiert. Damit liegen die Wellenlängen für die höchsten Seegangsereignisse bei gut 50 m. Abb. 14 liefert zudem mit dem Parameter Wellenanzahl einen weiteren Blick auf die Ergebnisse wie zuvor mit der Wellenperiode.

Ein Vergleich von maximaler und mittlerer Wellenhöhe (s. Abb. 15) kann genutzt werden, um die seegangsdominanten Zeitreihen zu erkennen, da schiffserzeugte Belastungen überproportional hohe Einzelwellen liefern.

Für die weitere Betrachtung schiffserzeugter Belastungen wurden Zeiträume mit einer mittleren Wellenhöhe von mehr als 35 cm als seegangsdominante Zeiträume klassifiziert und nicht weiter betrachtet. In diese Kategorie fielen insgesamt 148 Schiffspassagen, so dass sich damit die Grundgesamtheit auf (maximal) 10.235 auswertbare Ereignisse reduzierte.

Weiterhin wurde kontrolliert, ob sich ein systematischer Zusammenhang zwischen dem Tidewasserstand und der Wellenhöhe erkennen lässt (vgl. Abb. 16). Eine derartige Abhängigkeit der maximalen Wellenhöhe vom jeweiligen Wasserstand ist nicht belegbar.



Abb. 12: Wellenhöhen und -perioden für die Zeitbereichs- (oben) und Frequenzbereichsauswertung (unten) im Messzeitraum 2015



Abb. 13: Abschätzung der Wellenlängen nach Linearer Wellentheorie



Abb. 14: Wellenhöhen und Wellenanzahl für die Zeitbereichsauswertung im Messzeitraum 2015 (Analysefenster = 15 Minuten)



Abb. 15: Maximale zur mittleren Wellenhöhe (Zeitbereichsauswertung) zur Erkennung seegangsdominierter Messungen in 2015



Abb. 16: Charakterisierung der maximalen Wellenhöhen in Abhängigkeit des Wasserstandes im Messzeitraum 2015



6.6 Ergebnisse Absunk

6.6.1 Charakteristik

Für die Analyse des Absunkes konnten insgesamt 10.201 Passagen ausgewertet werden. Die Ergebnisse aus dem aufbereiteten Datenkollektiv sind mit ihrer Absunkhöhe und –periode in Abb. 17 charakterisiert, zudem sind die zuvor erkannten seegangsdominierten Resultate (148 Passagen) ausgewiesen, die im Rahmen der weiteren Betrachtungen jedoch nicht berücksichtigt werden.

Die maximale Absunkhöhe wurde mit knapp 80 cm ermittelt. Auffällig ist, dass das zweitund dritthöchste Ereignis aus dem Messzeitraum nur eine Höhe von etwas über 40 cm aufweist. Die mittlere Absunkhöhe liegt bei 5 cm. Die Bandbreite der Perioden reicht von < 10 s bis rd. 400 s. Insbesondere die längeren Perioden lassen sich aus einer klassischen Absunkbetrachtung nicht mehr herleiten⁷. Dieses deutet auf eine indifferente, langperiodische Wellenunruhe sowie auf Mehrfachereignisse hin.

Aus den Betrachtungen über Wellenlängen (vgl. Abb. 13) ergibt sich, dass der in Fahrtrichtung des Schiffes mitlaufende Absunk mit den dokumentierten Perioden i.d.R. Wellenlängen von mehr als 100 m aufweist und die am Liegeplatz liegenden Schiffe die Absunkbewegung mehr oder weniger ungedämpft komplett mitmachen werden, wie auch aus den grundlegenden Betrachtungen in Abschn. 3 zu erwarten war (vgl. auch Abb. 2).

Bei den nicht weiter berücksichtigten, seegangsdominierten Passagen ist erkennbar, dass die weitaus meisten Ereignisse relativ kurze Perioden aufweisen und daher auch keine typischen Absunkereignisse markieren.



Abb. 17: Gesamtkollektiv der Absunkhöhe und –periode zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 2015

⁷ Unter der Annahme einer maximalen Schiffslänge von 400 m und einer moderaten Geschwindigkeit von rd. 7 kn ergibt sich eine rechnerische Maximalperiode der Absunkbelastung von etwa 110 s.

6.6.2 Kenngrößenspezifische Betrachtung

Nachfolgend wird die Absunkhöhe in Abhängigkeit verschiedener geometrischer und fahrdynamischer Schiffskenngrößen betrachtet, um entsprechende Zusammenhänge zu isolieren und damit auch Schwerpunkte für die weiteren Betrachtungen zu bilden.

Folgende Kenngrößen werden nachfolgend näher betrachtet:

- Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt (Abb. 18)
- Schiffstyp (Abb. 19)
- Schiffslänge (Abb. 20, oben)
- Schiffsbreite (Abb. 20, Mitte)
- Schiffstiefgang (Abb. 20, unten)
- Schiffsgeschwindigkeit über Grund (Abb. 21, oben)
- Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser (Abb. 21, unten)
- Passierabstand (Abb. 22)
- Wasserstand (Abb. 23)

Schon bei der Betrachtung der AIS-Datensätze wurde deutlich, dass der Schiffsverkehr auf der Elbe sehr intensiv ist und sich innerhalb des Suchfensters nach dem zur Passage zugehörigen Wellenbild Mehrfachereignisse nicht vermeiden lassen (vgl. Abb. 10). Neben einer Abfolge von n Ereignissen in dem Auswertefenster sind jedoch auch Überlagerungen von Wellenereignissen denkbar, die dann zu höheren Absunkwerten führen als bei jedem der Einzelereignisse. Die Effekte auf die Ergebnisse sind unterschiedlich:

- Abfolge von mehreren Ereignissen im Auswertefenster: Allen Passagen wird das höchste Ereignis zugeordnet; das maßgebende Schiff liefert ein Ereignis wie bei einer Einzelpassage
- Überlagerung von mehreren Ereignissen im Auswertefenster: Allen Passagen wird das höchste (überlagerte) Ereignis zugeordnet; auch für das maßgebende Schiff wird eine Absunkbelastung ermittelt, die über der Belastung bei Einzelpassage liegt

Abb. 18 liefert Hinweise, dass es durch Mehrfachpassagen zu signifikanten Überlagerungseffekten kommt. Bei Einzelpassagen ist (jedoch mit der nachfolgend näher beschriebenen Ausnahme) eine signifikant geringere Absunkhöhe erkennbar als bei zeitnaher Passage von 2 bis 5 Schiffen. Bei 6 und mehr Schiffen im Auswertefenster ist die Anzahl der Ereignisse so gering (Gesamtanzahl: 293), dass es offensichtlich zu keiner Kombination mit Schiffen gekommen ist, die maßgebende Ereignisse liefern. Daher weisen diese Passagen scheinbar wieder kleinere Absunkhöhen aus.

Diese Problematik der Mehrfachpassagen ist bei den nachfolgenden Darstellungen stets zu beachten, da die daraus resultierenden Zuweisungsfehler in allen Darstellungen weiterhin enthalten sind. Deshalb wurde an dieser Stelle auf eine Unterscheidung des Datenkollektives nach ein- und auslaufenden Schiffen verzichtet.

Die Ergebnisse zum Schiffstyp gem. Abb. 19 weisen aus, dass das höchste Ereignis von einem Passagierschiff stammt. Im Rahmen einer Recherche konnte das Schiff eindeutig identifiziert werden. Es handelte sich um die "Norwegian Escape"⁸, die sich auslaufend als Einzelpassage auf Werftprobefahrt befand.

Ansonsten ist erkennbar, dass der wesentliche Anteil hoher Absunkwerte wohl trotz der Mehrfachpassagenproblematik aus dem Frachtschiffsverkehr stammt.

⁸ dabei wurde festgestellt, dass das AIS-Signal dieses Schiffes eine falsche Schiffsbreite lieferte (und zum Zeitpunkt der Berichtserstellung immer noch liefert). Die Schiffsbreite wurde in den Datensätzen von 55 m auf 41 m gem. den Angaben auf der Homepage der Meyer-Werft korrigiert.

Die Absunkhöhen in Abhängigkeit der Schiffsabmessungen (vgl. Abb. 20) zeigen zunächst keinen offensichtlichen und ausgeprägten Zusammenhang.

Die Auftragungen der Absunkhöhe in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeiten (Abb. 21) zeigen, dass niedrige Geschwindigkeiten nicht zu hohen Absunkhöhen beitragen. Darüber hinaus liefern aber auch die dem Typus Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge zuzurechnenden Passagen mit Geschwindigkeiten über 20 kn keine auffällige Häufung hoher Absunkwerte.

Der Passierabstand bleibt im Rahmen dieser Betrachtungen unauffällig (vgl. Abb. 22) während niedrige Wasserstände wohl überproportional an höheren Absunkwerten beteiligt sind (vgl. Abb. 23).

Insgesamt bedarf es aber weitergehender Ursache-Wirkungsbetrachtungen, die in Abschn. 7 vorgenommen werden.



Abb. 18: Abhängigkeit der Absunkhöhe von der Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt



Abb. 19: Abhängigkeit der Absunkhöhe vom Schiffstyp





Abb. 20: Abhängigkeit der Absunkhöhe von der Schiffslänge, –breite und dem Schiffstiefgang



Abb. 21: Abhängigkeit der Absunkhöhe von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund (oben) und durchs Wasser (unten)



Abb. 22: Abhängigkeit der Absunkhöhe vom Passierabstand



Abb. 23: Abhängigkeit der Absunkhöhe vom Wasserstand



6.7 Ergebnisse Primärwelle

6.7.1 Charakteristik

Für die Analyse der Primärwelle konnten insgesamt 10.223 Passagen ausgewertet werden. Die Ergebnisse aus dem aufbereiteten Datenkollektiv sind mit ihrer Primärwellenhöhe und –periode in Abb. 24 charakterisiert, zudem sind die zuvor erkannten seegangsdominierten Resultate (148 Passagen) ausgewiesen, die im Rahmen der weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt werden.

Die maximale Primärwelle wurde mit 97 cm ermittelt. Auffällig ist, dass das zweit- und dritthöchste Ereignis aus dem Messzeitraum auch hier nur eine deutlich geringere Höhe von rd. 56 und 52 cm aufweist. Die mittlere Primärwellenhöhe liegt bei 5 cm. Die Bandbreite der Perioden reicht von < 10 s bis rd. 400 s. Dieses deutet auf eine indifferente, langperiodische Wellenunruhe sowie auf Mehrfachereignisse hin.

Auch hier ist davon auszugehen, dass am Liegeplatz 9.4 liegende Schiffe die Höhenänderungen aus der in Fahrtrichtung des Schiffes mitlaufenden Primärwelle mehr oder weniger ungedämpft mitmachen.

Bei den nicht weiter berücksichtigten, seegangsdominierten Passagen ist erkennbar, dass die weitaus meisten Ereignisse relativ kurze Perioden aufweisen und daher auch keine typischen Primärwellenereignisse markieren.



Abb. 24: Gesamtkollektiv der Primärwellenhöhe und –periode zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 2015

6.7.2 Kenngrößenspezifische Betrachtung

Nachfolgend wird die Primärwellenhöhe in Abhängigkeit verschiedener geometrischer und fahrdynamischer Schiffskenngrößen betrachtet, um entsprechende Zusammenhänge zu visualisieren und damit auch Schwerpunkte für die weiteren Betrachtungen zu bilden.

Folgende Kenngrößen werden nachfolgend näher betrachtet:

- Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt (Abb. 25)
- Schiffstyp (Abb. 26)
- Schiffslänge (Abb. 27, oben)
- Schiffsbreite (Abb. 27, Mitte)
- Schiffstiefgang (Abb. 27, unten)
- Schiffsgeschwindigkeit über Grund (Abb. 28, oben)
- Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser (Abb. 28, unten)
- Passierabstand (Abb. 29)
- Wasserstand (Abb. 30)

Insgesamt ist erkennbar, dass die Primärwellenbelastung eine ähnliche Verteilung wie der Absunk aufweist. Allerdings werden bei gleichem Mittelwert (5 cm) höhere Belastungen erreicht. Der Maximalwert von rd. 97 cm wurde wiederum von der schon beim Absunk maßgebenden Passage der "Norwegian Escape" erzeugt.

Mehrfachpassagen führen auch bei der Primärwelle zu signifikanten Überlagerungseffekten (vgl. Abb. 25), wie zuvor schon für den Absunk belegt. Die bereits diskutierte Zuordnungsproblematik der Belastungsgröße zu ggf. mehreren Schiffspassagen infolge enger Zeitabstände besteht auch bei den folgenden Betrachtungen.

Die Primärwellenhöhen zeigen in Abhängigkeit der Schiffsabmessungen (vgl. Abb. 27) keinen offensichtlichen und ausgeprägten Zusammenhang.

Die Auftragungen der Primärwellenhöhe in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeiten (Abb. 28) zeigen ebenfalls, dass niedrige Geschwindigkeiten nicht zu hohen Primärwellen beitragen. Darüber hinaus liefern aber auch Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge mit Geschwindigkeiten über 20 kn keine Häufung auffällig hoher Ereignisse.

Der Passierabstand bleibt im Rahmen dieser Betrachtungen unauffällig (vgl. Abb. 29) während niedrige Wasserstände auch hier eher überproportional an höheren Primärwellen beteiligt sind (vgl. Abb. 30).

Insgesamt bedarf es aber auch bei der Primärwelle weitergehender Ursache-Wirkungsbetrachtungen, die in Abschn. 7 vorgenommen werden.



Abb. 25: Abhängigkeit der Primärwellenhöhe von der Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt



Abb. 26: Abhängigkeit der Primärwellenhöhe vom Schiffstyp



Abb. 27: Abhängigkeit der Primärwellenhöhe von der Schiffslänge, –breite und dem Schiffstiefgang



Abb. 28: Abhängigkeit der Primärwellenhöhe von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund (oben) und durchs Wasser (unten)





Abb. 29: Abhängigkeit der Primärwellenhöhe vom Passierabstand



Abb. 30: Abhängigkeit der Primärwellenhöhe vom Wasserstand

6.8 Ergebnisse Sekundärwelle

6.8.1 Charakteristik

Für die Analyse der Sekundärwelle konnten insgesamt 10.233 Passagen ausgewertet werden. Die Ergebnisse aus dem aufbereiteten Datenkollektiv sind mit ihrer Sekundärwellenhöhe und –periode in Abb. 17 charakterisiert, zudem sind die zuvor erkannten seegangsdominierten Resultate (148 Passagen) ausgewiesen, die im Rahmen der weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt werden.

Die maximale Sekundärwellenhöhe wurde mit rd. 245 cm ermittelt. Im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Schiffswellenparametern ragt der Maximalwert nicht so deutlich aus dem Datenkollektiv heraus. Die mittlere Sekundärwellenhöhe liegt bei rd. 42 cm. Die zugehörigen Perioden liegen im Bereich zwischen 1 und 8 s, wobei die Höchstwerte eine Periode von rd. 4 s aufweisen. Damit liegen die maßgebenden Wellenlängen der schräg einlaufenden Sekundärwelle bei rd. 25 m (vgl. Abb. 13).

Damit bleiben die Sekundärwellenereignisse in der durch Seegangwirkung zu erreichenden Bandbreite, wie die mit dargestellten seegangsdominanten Ereignisse (vgl. Abb. 31 und Abb. 32) und die Seegangscharakteristik gem. Abb. 12 ausweisen. Die Wellenperiode der höchsten Sekundärwellen sind jedoch etwas kürzer als bei den höchsten Seegangsereignissen, die Perioden von rd. 6 bis 7 s gezeigt haben (vgl. Abb. 12).



Abb. 31: Gesamtkollektiv der Sekundärwellenhöhe und –periode zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 2015



Abb. 32: Gesamtkollektiv der mittleren Wellenhöhe und Sekundärwellenhöhe zur Charakterisierung der Ergebnisse im Messzeitraum 2015

6.8.2 Kenngrößenspezifische Betrachtung

Nachfolgend wird die Sekundärwellenhöhe in Abhängigkeit verschiedener geometrischer und fahrdynamischer Schiffskenngrößen betrachtet, um entsprechende Zusammenhänge zu visualisieren und damit auch Schwerpunkte für die weiteren Betrachtungen zu bilden.

Folgende Kenngrößen werden nachfolgend näher betrachtet:

- Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt (Abb. 33)
- Schiffstyp (Abb. 34)
- Schiffslänge (Abb. 35, oben)
- Schiffsbreite (Abb. 35, Mitte)
- Schiffstiefgang (Abb. 35, unten)
- Schiffsgeschwindigkeit über Grund (Abb. 36, oben)
- Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser (Abb. 36, unten)
- Passierabstand (Abb. 37)
- Wasserstand (Abb. 38)

Die kurzperiodische Sekundärwelle unterscheidet sich signifikant von den beiden vorher betrachteten langperiodischen Wellenparametern. Der Maximalwert wird von einem einlaufenden Frachtschiff erzeugt, welches in den bereitgestellten AIS-Daten mit einer Länge von 277 m, einer Breite von 40 m und einem Tiefgang von 11,2 m ausgewiesen wird. Aufgrund der anonymisierten AIS-Daten ist der Name nicht zuzuordnen.

Mehrfachpassagen lassen zumindest gegenüber der Einzelpassage einen Überlagerungseffekt erkennen (vgl. Abb. 33). Die bereits diskutierte Zuordnungsproblematik der Belastungsgröße zu ggf. mehreren Schiffspassagen infolge enger Zeitabstände besteht auch bei den folgenden Betrachtungen. Die Sekundärwellenhöhen zeigen in Abhängigkeit der Schiffsabmessungen (vgl. Abb. 35) ebenfalls keinen offensichtlichen und ausgeprägten Zusammenhang.

Die Auftragungen der Sekundärwellenhöhe in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeiten (Abb. 36) zeigen wiederum, dass niedrige Geschwindigkeiten nicht zu hohen Sekundärwellen beitragen. Darüber hinaus liefern Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge mit Geschwindigkeiten über 20 kn überdurchschnittliche, aber nicht höchste Werte.

Der Passierabstand bleibt auch im Rahmen dieser Betrachtungen unauffällig (vgl. Abb. 37) während niedrige Wasserstände eher überproportional an höheren Sekundärwellen beteiligt sind (vgl. Abb. 38).

Insgesamt bedarf es aber auch bei der Sekundärwelle weitergehender Ursache-Wirkungsbetrachtungen, die in Abschn. 7 vorgenommen werden.



Abb. 33: Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe von der Anzahl der Passagen im Zeitfenster ± 8 Minuten vom Passierzeitpunkt



Abb. 34: Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe vom Schiffstyp



Abb. 35: Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe von der Schiffslänge, –breite und dem Schiffstiefgang



Abb. 36: Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe von der Schiffsgeschwindigkeit über Grund (oben) und durchs Wasser (unten)



Abb. 37: Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe vom Passierabstand



Abb. 38: Abhängigkeit der Sekundärwellenhöhe vom Wasserstand

7 Bewertung

7.1 Verteilungen und Hauptwerte

Im Folgenden werden die Verteilungen für die drei wesentlichen schiffserzeugten Wellenkenngrößen Absunk, Primär- und Sekundärwelle hinsichtlich der Höhe und Periode für das maßgebende Datenkollektiv ohne dominierende Seegangswirkung dokumentiert. Zur Orientierung wurde aber jeweils auch eine Verteilungsfunktion mit dem gesamten Datenkollektiv mit aufgenommen.

Dazu sind die Verteilungen der Absunkhöhen und –perioden (Abb. 39), der Primärwellenhöhen und –perioden (Abb. 40) und der Sekundärwellenhöhen und –perioden (Abb. 41) im Messzeitraum 2015 dargestellt.

Daraus abgeleitete, wesentliche statistische Hauptwerte der Belastungshöhen sind zudem in Tab. 4 (Absunk), Tab. 5 (Primärwelle) und Tab. 6 (Sekundärwelle) zusammengefasst.

In jedem Fall stellen die Verteilungsfunktionen eine pessimale Ereignisverteilung dar, da infolge enger Zeitabstände - ggf. mehreren Passagen das in dieser Zeit aufgetretene Höchstereignis zugeordnet wird.

Für die Verteilungsfunktionen wurde weiterhin nicht nach ein- und auslaufendem Schiffsverkehr unterschieden. Weitergehende Untersuchungen zum Fahrtrichtungseinfluss werden im Rahmen selektiver Betrachtungen der Randbedingungen in Abschn. 7.3 vorgenommen.

Während aus der Ereignishöhe selbst nicht unmittelbar auf Mehrfachereignisse geschlossen werden kann, ergibt sich - wie zuvor ausgeführt - aus der Ereignisperiode beim Parameter Absunk ein direkter Hinweis auf Überlagerungseffekte. Die Ergebnisse zeigen einen Anteil von rd. 20 % mit einer Periode > 110 s (vgl. Abb. 39, unten), die sich in jedem Fall aus Überlagerungseffekten mehrerer Passagen ergeben müssen. Zunehmende Anteile von Ereignissen mit Überlagerungseffekten werden aber auch schon bei Perioden ab rd. 25-30 s auftreten.

Bei den statistischen Hauptwerten sind auch Mittelwerte der höchsten Ereignisse des 78tägigen Messzeitraumes mit aufgenommen, die auf zwei verschiedenen Betrachtungsszenarien der Daten beruhen:

- 1. Szenario: Selektion der insgesamt 78 höchsten Ereignisse
- 2. Szenario: Selektion der täglich höchsten Ereignisse

Beide Betrachtungsweisen haben unter den hier vorherrschenden Randbedingungen sowohl Vorteile als auch Schwächen.

Bei den 78 höchsten Ereignissen (1. Szenario) werden die ermittelten Höchstereignisse direkt betrachtet. Allerdings verbleibt vor dem Hintergrund der zahlreichen Mehrfachpassagen innerhalb des Auswertefensters das Problem, dass fehlzugewiesene Werte für das Zweit-, Dritt-, usw.- Fahrzeug mit in die Betrachtung eingehen.





Abb. 39: Verteilungen der Absunkhöhen und -perioden im Messzeitraum 2015

Tab. 4: Statistische Hauptwerte der Absunkhöhen im Messzeitraum 2015 (78 Tage)

Parameter	Absunkhöhe
Mittelwert	5,1 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Stunde	7,5 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Tag	21,0 cm
Mittelwert der täglich höchsten Ereignisse	22,7 cm
Mittelwert der 78 höchsten Ereignisse	26,0 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Monat	40,6 cm
Maximalwert	78,9 cm





Abb. 40: Verteilung der Primärwellenhöhen und -perioden im Messzeitraum 2015

Tab. 5:	Statistische Hauptwerte der Primärwellenhöhen im Messzeitraum 2015 (78
	Tage)

Parameter	Primärwellenhöhe
Mittelwert	5,1 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Stunde	7,4 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Tag	21,3 cm
Mittelwert der täglich höchsten Ereignisse	23,6 cm
Mittelwert der 78 höchsten Ereignisse	29,5 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Monat	52,6 cm
Maximalwert	97,0 cm





Abb. 41: Verteilung der Sekundärwellenhöhen und -perioden im Messzeitraum 2015

Tab. 6:	Statistische Hauptwerte der Sekundärwellenhöhen im Messzeitraum 2015 (78
	Tage)

Parameter	Sekundärwellenhöhe		
Mittelwert	41,8 cm		
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Stunde	61,8 cm		
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Tag	129,0 cm		
Mittelwert der täglich höchsten Ereignisse	130,5 cm		
Mittelwert der 78 höchsten Ereignisse	153,9 cm		
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Monat	224,8 cm		
Maximalwert	242,4 cm		

IM+P Seite 45

Bei den täglich höchsten Ereignissen (2. Szenario) wurden die Ergebnisse bei maßgebenden Mehrfachereignissen nachbearbeitet und nur dem (offensichtlich) maßgebenden Schiff zugewiesen. Die dafür verwendeten Kriterien ergaben sich durch eine iterative Betrachtung der nachfolgenden Ergebnisse⁹. Bei dieser Betrachtungsweise der Höchstwerte ist zu beachten, dass ein weiteres hohes Ereignis am selben Tag, wenn es unterhalb des Tagesmaximalereignisses liegt, nicht weiter betrachtet wird.

Damit ist zu erwarten, dass die maßgebenden schiffserzeugten Wellenkenngrößen nach der ersten Betrachtungsweise (1. Szenario) etwas über- und nach der zweiten Betrachtungsweise (2. Szenario) etwas unterschätzt werden. Aus diesem Grund werden zunächst beide Ergebnisse aufgenommen, um insbesondere die sich daraus ergebende Bandbreite besser einschätzen zu können.

7.2 Einführende Betrachtungen zum Einfluss der geometrischen, fahrt- und tidedynamischen Kenngrößen auf die schiffserzeugten Belastungen

Die zu den höchsten Ereignissen gehörenden geometrischen Schiffskenngrößen, fahrdynamischen Werte und Wasserstände sind nachfolgend für die drei Belastungsparameter Absunk (Abb. 42), Primär- (Abb. 43) und Sekundärwelle (Abb. 44) als prozentuale Abweichungen zum insgesamt verfügbaren Datenkollektiv dargestellt, wobei die Höchstwerte gem. den beiden zuvor eingeführten Systematiken (höchste 78 Werte und Tageshöchstwerte, vgl. Abschn. 7.1) betrachtet werden. Darüber hinaus sind jeweils auch Ergebnisse für das Teildatenkollektiv "Einzelpassagen" mit aufgenommen.

Die Randbedingungen für höchste Absunk- und Primärwellenbelastungen weisen für beide Betrachtungsweisen aus, dass maßgebende schiffserzeugte Belastungen von

- größeren,
- schnelleren,
- zumeist auslaufenden Schiffen bei
- eher niedrigen Wasserständen

erzeugt werden.

Passierabstand und Anzahl der Passagen im Auswertefenster weisen keine Auffälligkeit gegenüber dem Gesamtdatenkollektiv aus und sind daher wohl eher von untergeordneter Bedeutung.

Bei den Randbedingungen der Sekundärwellenbelastung zeigt sich ein deutlicher Unterschied gegenüber den vorherigen Belastungskenngrößen. Hier liefert das einlaufende Schiff statistisch signifikant höhere Belastungen, auch wenn die beiden Betrachtungsweisen hier deutliche Unterschiede liefern. Die übrigen Randbedingungen weisen einen vergleichbaren Einfluss wie bei den zuvor betrachteten langperiodischen Kenngrößen auf, wobei tendenziell die Geschwindigkeitswirkung etwas größer und der Wasserstandseinfluss etwas kleiner ausfällt.

Das jeweils separat betrachtete Teildatenkollektiv der Einzelereignisse bestätigt die Einschätzungen zur Wirkung der verschiedenen Randbedingungen.

⁹ Es wurden größere und schnellere Schiffe bevorzugt



Abb. 42: Statistische Betrachtung der geometrischen, fahrdynamischen und tidebedingten Randbedingungen für die höchsten Absunkereignisse im Messzeitraum 2015 oben: für die 78 höchsten Absunkereignisse (1. Szenario)

unten: für die täglich höchsten Absunkereignisse (2. Szenario)



Abb. 43: Statistische Betrachtung der geometrischen, fahrdynamischen und tidebedingten Randbedingungen für die höchsten Primärwellenereignisse im Messzeitraum 2015 oben: für die 78 höchsten Primärwellenereignisse (1. Szenario)

unten: für die täglich höchsten Primärwellenereignisse (2. Szenario)



Abb. 44: Statistische Betrachtung der geometrischen, fahrdynamischen und tidebedingten Randbedingungen für die höchsten Sekundärwellenereignisse im Messzeitraum 2015 oben: für die 78 höchsten Sekundärwellenereignisse (1. Szenario) unten: für die täglich höchsten Sekundärwellenereignisse (2. Szenario)



Aufbauend auf den zuvor charakterisierten Wirkungen verschiedener Randbedingungen soll zwischen ausgewählten

- eigenständigen Einflussgrößen und
- kombinierten Wirkungen

unterschieden werden.

Nach Vorbetrachtungen verbleibt nur die Passageanzahl im zugrunde gelegten Auswertefenster als eigenständige und von den anderen Randbedingungen weitgehend als unabhängig angesehene Einflussgröße. Es wird damit vereinfachend davon ausgegangen, dass die Verkehrsdichte hinreichend gleichverteilt über die übrigen Randbedingungen ist.

Alle anderen Randbedingungen können hingegen nicht als im statistischen Sinne hinreichend unabhängig angesehen werden und bedürfen daher einer mehrschichtigen Betrachtung.

Um jedoch die ohnehin komplexen Wirkzusammenhänge noch überschaubar darstellen und diskutieren zu können, wird nachfolgend zur Beschreibung der Schiffsgeometrie nach Vorabbetrachtungen ausschließlich die Schiffsbreite verwendet.

Zusammen mit den fahr- und tidedynamischen Einflussparametern zur Beschreibung der schiffsinduzierten Belastungen ergeben sich daher folgende Randbedingungen, die nachfolgend systematisch betrachtet werden:

- Fahrtrichtung
- Schiffsbreite
- Passierabstand
- Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser
- Wasserstand

Ebenfalls vereinfachend werden die sehr geringen Unterschiede in der Grundgesamtheit für die drei Belastungskenngrößen Absunk, Primär- und Sekundärwelle (zwischen 10.201 und 10.233 Ereignisse) nicht weiter betrachtet, sondern die ermittelten Randbedingungen der Sekundärwelle als maßgebend angesetzt.

7.3.1 Eigenständige Einflussgröße

Die Ergebnisse der drei Belastungskenngrößen Absunk, Primär- und Sekundärwellenhöhe sind auf Abb. 45 in Abhängigkeit der Passageanzahl in dem zugrunde liegenden Auswertefenster dargestellt.

Die Ergebnisse weisen bei allen drei Kenngrößen einen Anstieg der Belastungen mit zunehmender Passageanzahl aus. Bei Einzelpassagen erreichen die Belastungsgrößen rd. 80 bis 85 % des jeweiligen Gesamtmittelwertes.

Während Absunk und Primärwelle kontinuierlich auf einen Wert von rd. 120 bis 125 % des Gesamtmittels bei 6 und mehr Passagen ansteigen, erreicht die Sekundärwelle schon bei 4-fach-Passagen mit rd. 115 % das Maximum. Eine weitere Steigerung der kurzperiodischen Sekundärwellenhöhe ist also statistisch oberhalb von 4-fach-Passagen nicht mehr nachweisbar.



Abb. 45: Einfluss der Anzahl der Passagen im zugrunde liegenden Auswertefenster für die Messkampagne 2015

7.3.2 Kombinierte Wirkungen

Die Ergebnisse der drei Belastungskenngrößen Absunk, Primär- und Sekundärwelle werden nachfolgend unter verschiedenen Randbedingungen betrachtet und deren weitere Randbedingungen dazu dargestellt. Dabei wird generell zwischen ein- und auslaufendem Schiffsverkehr unterschieden. Lediglich der zur Orientierung ausgewiesene Gesamtmittelwert wurde für alle Daten ohne Berücksichtigung der Fahrtrichtung ermittelt.

Im Einzelnen werden folgende Wirkungen auf die drei Belastungskenngrößen näher betrachtet:

- Belastungen in Abhängigkeit der Schiffsbreite (Abb. 46) zugehörige Randbedingungen des Passierabstandes, der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser, sowie des Tidewasserstandes (Abb. 47)
- Belastungen in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser (Abb. 48) zugehörige Randbedingungen der Schiffsbreite, des Passierabstandes, sowie des Tidewasserstandes (Abb. 49)
- Belastungen in Abhängigkeit des Passierabstandes (Abb. 50) zugehörige Randbedingungen der Schiffsbreite, der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser sowie des Tidewasserstandes (Abb. 51)
- Belastungen in Abhängigkeit des Tidewasserstandes (Abb. 52) zugehörige Randbedingungen der Schiffsbreite, des Passierabstandes sowie der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser (Abb. 53)

Darüber hinaus werden die Belastungsgrößen auch für ein Teildatenkollektiv mit dem Kriterium "Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr" (Abb. 48 ff) ermittelt und dargestellt. Analog dazu erfolgt ebenfalls die Ausweisung der jeweils zugehörigen Randbedingungen in den entsprechenden Ergebnisgrafiken.

Nachfolgend werden die Wirkungen auf Basis der Ergebnisgrafiken näher vorgestellt und erläutert.

Einfluss der Schiffsgeometrie (Schiffsbreite; Abb. 46 und Abb. 47)

Generell ist festzustellen, dass Absunk und Primärwelle eine sehr vergleichbare Entwicklung der Belastungshöhe aufzeigen, die Sekundärwelle jedoch einige Unterschiede in Abhängigkeit der Schiffsbreite aufweist (Abb. 46).

Absunk und Primärwelle weisen einen Anstieg der Belastungshöhe mit zunehmender Schiffsbreite aus, für den auslaufenden Schiffsverkehr deutlich, bei den einlaufenden Schiffen allerdings erheblich geringer. Ein Blick auf die mitgeführten Randbedingungen weist aus, dass der Passierabstand diesen Unterschied nicht erklären kann. Auch die rd. 1-1,5 kn höheren Geschwindigkeiten der breiten, auslaufenden Schiffe erklären die Unterschiede nur unzureichend und liefern für die Kategorie 30-40 m Schiffsbreite keine Erklärung (vgl. Abb. 47). Beim zugehörigen Tidewasserstand ist allerdings erkennbar, dass einlaufende Schiffe bei signifikant höheren Wasserständen fahren als der Verkehr in der Gegenrichtung.

Schiffe mit einer Breite bis rd. 30 m liefern insgesamt statistisch keine auffälligen langperiodischen Belastungen. Oberhalb dieser Schiffsbreiten scheinen die ausgewiesenen Unterschiede der Passierabstände eher von untergeordneter Bedeutung zu sein. Die leicht erhöhten Schiffsgeschwindigkeiten breiter, auslaufender Schiffe sowie die gleichzeitig niedrigeren Wasserstände führen jedoch zu einem überproportionalen Anstieg der Belastungsgrößen für den auslaufenden Schiffsverkehr.



Abb. 46: Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit der Schiffsbreite für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015





Abb. 47: Entwicklung der Randbedingungen Passierabstand, Geschwindigkeit durchs Wasser und Wasserstand in Abhängigkeit der Schiffsbreite für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015

Die kurzperiodische Sekundärwelle zeigt zunächst einen früheren Anstieg der Belastungen schon bei der Schiffsbreitenkategorie 20-30 m. Im weiteren Verlauf ist jedoch der Anstieg unterproportional gegenüber den beiden anderen Belastungsgrößen bzw. sinkt für den einlaufenden Schiffsverkehr sogar wieder ab. Neben den ebenfalls wasserstandsbedingten Einflüssen bei den größten Schiffsbreiten (s. zuvor) ist jedoch im Sekundärwellenverlauf in Abhängigkeit der Schiffsbreite eine deutliche Ähnlichkeit mit der Entwicklung der Schiffsgeschwindigkeiten erkennbar (vgl. Abb. 46, unten und Abb. 47, Mitte) während der Passierabstand zumindest keinen offensichtlichen Einfluss zeigt.

Damit ist insgesamt erkennbar, dass die Sekundärwellenbelastung schon bei Schiffsbreiten von rd. 20 m signifikant ansteigt und noch deutlicher von der Schiffsgeschwindigkeit beeinflusst wird als die langperiodischen Belastungsgrößen. Doch auch hier liefern niedrige Wasserstände zunehmende Sekundärwellenhöhen.

Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser (Abb. 48 und Abb. 49)

Auch bei dem Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit auf die Belastungskenngrößen ist festzustellen, dass Absunk und Primärwelle eine sehr vergleichbare Entwicklung der Belastungshöhe aufzeigen, die Sekundärwelle jedoch wiederum einige Unterschiede aufweist (Abb. 48).

Das Gesamtdatenkollektiv zeigt zunächst bei allen Belastungskenngrößen erst einen signifikanten Anstieg oberhalb einer Schiffsgeschwindigkeit von rd. 12,5 kn während im Teildatenkollektiv der großen Schiffe (B \geq 40 m) zumindest auslaufend schon Geschwindigkeiten von mehr als rd. 7,5 kn ausreichen, um Absunk- und Primärwellenbelastungen oberhalb des Gesamtmittels zu erzeugen. Insgesamt wird durch die Unterschiede zwischen dem Teilund Gesamtdatenkollektiv die erhebliche Wirkung der Schiffsgeometrie (Schiffsbreite) auf die Belastungshöhe deutlich.

Die hier erkennbaren Unterschiede der Belastungskenngrößen bei jeweils ein- und auslaufendem Schiffsverkehr im Gesamtdatenkollektiv bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten wären aufgrund der dokumentierten Randbedingungen nur mit dem geringeren Passierabstand des einlaufenden Verkehrs sowie der z.T. größeren Breite dieser Schiffe (gegenüber den zugehörigen auslaufenden Schiffen) begründbar, da der Tidewasserstand eher eine umgekehrte Wirkung erwarten ließe (vgl. Abb. 49). Der nur schwache Anstieg bei höchsten Einlaufgeschwindigkeiten wird auf die gleichzeitig deutlich abnehmenden Schiffsbreiten zurückgeführt. Derartige Geschwindigkeiten werden weit überwiegend von dem Helgoland-Katamaran und anderen Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen erreicht, die sich signifikant vom übrigen Schiffsverkehr unterscheiden. Darüber hinaus ist aber auch auffällig, dass im Gesamtdatenkollektiv des einlaufenden Verkehrs der Passierabstand mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit (im Bereich 5 bis 20 kn) wächst, was einen unterproportionalen Anstieg der Belastungsgrößen ebenfalls begründen kann.

Für das Teildatenkollektiv "Schiffe mit 40 m Breite und mehr" überwiegen die geschwindigkeitsabhängigen Belastungen auslaufender Schiffe bei den Kenngrößen Absunk und Primärwelle. Da der Passierabstand derartige Unterschiede nicht begründen kann, wäre eine Kombination aus Breiten- und Wasserstandswirkung denkbar. Im Bereich niedriger Schiffsgeschwindigkeiten wären dann die deutlichen Wasserstandsunterschiede maßgebend, bei höheren Geschwindigkeiten würden dann die Wirkungen aus der Schiffsgeometrie (Schiffsbreite) überwiegen.

Bei der Sekundärwelle zeigt sich überwiegend eine vergleichbare Entwicklung, allerdings scheinen unterdurchschnittliche Wasserstände bei großen Schiffen mit hohen Schiffsgeschwindigkeiten sensitiver auf die Belastungshöhe zu wirken, da die Maximalwerte der Sekundärwelle – abweichend zu den beiden anderen Belastungskenngrößen – bei einlaufendem Schiffsverkehr erreicht werden.



Abb. 48: Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen



Abb. 49: Entwicklung der Randbedingungen Schiffsbreite, Passierabstand und Wasserstand in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser für den einund auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen

IM+F Seite 57

Einfluss des Passierabstandes (Abb. 50 und Abb. 51)

Die Entwicklung der Belastungskenngrößen Absunk, Primär- und Sekundärwelle ist durchgehend sehr ähnlich. Höchste Belastungswerte beim Gesamtdatenkollektiv treten in der Fahrwassermitte (Klasse 600 – 700 m) auf, wobei hier der auslaufende Schiffsverkehr höhere Werte erreicht (vgl. Abb. 50). Die generelle Belastungsentwicklung im Gesamtdatenkollektiv zeigt eine gute Übereinstimmung mit der abstandsabhängigen Verteilung der Schiffsgrößen (Schiffsbreite). Die geringeren und wechselnden Unterschiede zwischen einund auslaufenden Belastungen im Gesamtdatenkollektiv werden auf die nicht gleichgerichteten Wirkungen der beiden Randgrößen Geschwindigkeit und Wasserstand zurückgeführt. So sind im Fahrrinnenbereich (mittlere Passierabstände) die Einlaufgeschwindigkeiten im Gesamtdatenkollektiv zumeist nachweisbar höher, gleichzeitig sind diese Randbedingungen jedoch auch mit deutlich höheren Wasserständen verknüpft, die dann wieder belastungsreduzierend wirken.

Bei den großen Schiffen zeigt die Darstellung der Ergebnisse eine Belastungszunahme mit Verringerung des Passierabstandes, wobei hier für den auslaufenden Verkehr ebenfalls ein höheres Werteniveau dokumentiert ist. Mit Blick auf die Randbedingungen (Abb. 51) lässt sich die systematisch höhere Belastungssituation bei großen Schiffen zunächst mit der Geometrie begründen. Der größere Belastungsanstieg dieser Schiffe bei auslaufendem Verkehr wird mit etwas höheren Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser als auch signifikant niedrigeren Wasserständen begründet.

Einfluss des Wasserstandes (Abb. 52 und Abb. 53)

Bei den Ergebnissen zur Wirkung des Wasserstandes auf die Belastungskenngrößen fällt zunächst wieder die gute Übereinstimmung in der Entwicklung des Absunks und der Primärwelle auf, während die Sekundärwelle doch einen eher eigenständigen Verlauf zeigt (vgl. Abb. 52).

Für die Absunk- und Primärwellenentwicklung des Gesamtdatenkollektivs gilt, dass Wasserstände oberhalb von etwa NN + 1,0 m zu unterdurchschnittlichen Belastungshöhen führen während Wasserstände unterhalb von NN – 1,0 m belastungserhöhend wirken. Ein Blick auf die zugehörigen Randbedingungen weist aus, dass für die Beurteilung der Ergebnisse die Schiffsbreiten und auch die Schiffsgeschwindigkeiten praktisch gleich sind, so dass hier keine daraus resultierenden Effekte das Ergebnis überlagern. Auch der Passierabstand auslaufender Schiffe zeigt nur eine geringe Abhängigkeit vom Wasserstand (mit Ausnahme ganz hoher Wasserstände). Lediglich der sowieso schon systematisch geringere Passierabstand der einlaufenden Schiffe weist eine weitere Verringerung des Passierabstandes mit abnehmendem Wasserstände aus. Gleichwohl erreicht der auslaufende Schiffsverkehr bei niedrigen Wasserständen etwas höhere Belastungshöhen, die auf Basis der betrachteten Randgrößen nicht erklärt werden können.

Das Teildatenkollektiv der großen Schiffe zeigt signifikant höhere Absunk- und Primärwellenbelastungen, die bei niedrigen Wasserständen zudem überproportional stark ansteigen. Während für den auslaufenden Schiffsverkehr bei allen Wasserständen deutlich überdurchschnittliche Belastungen dokumentiert sind, treten beim einlaufenden Verkehr erst bei Wasserständen unterhalb von rd. NN + 1,5 m Belastungen oberhalb des Gesamtmittels auf. Tendenziell wurden beim auslaufenden Schiffsverkehr höhere Belastungen ermittelt. Weiterhin fällt auf, dass keine einlaufenden Schiffsverkehr die höchsten Belastungen erzeugten. Die höheren Belastungen auslaufender Schiffe lassen sich nur durch die überlagerte Wirkung von Schiffsgröße und –geschwindigkeit erklären. Bei Wasserstanden oberhalb von rd. NN + 1,0 m traten beim auslaufenden Schiff signifikant höhere Schiffsgeschwindigkeiten auf, gleichzeitig weisen unterhalb dieses Wasserstandsniveaus (mit einer Ausnahme) die Klassenmittel der Schiffsbreite höhere Werte auf. Auffällig ist, dass die signifikant höheren Geschwindigkeiten einlaufender Schiffe bei niedrigen Wasserständen den Effekt der Breitenunterschiede nicht ausgleichen können.



Abb. 50: Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit des Passierabstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen



Abb. 51: Entwicklung der Randbedingungen Schiffsbreite, Geschwindigkeit durchs Wasser und Wasserstand in Abhängigkeit des Passierabstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen



Abb. 52: Entwicklung der Belastungsparameter Absunk, Primär- und Sekundärwelle in Abhängigkeit des Wasserstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen





Abb. 53: Entwicklung der Randbedingungen Schiffsbreite, Passierabstand und Geschwindigkeit durchs Wasser in Abhängigkeit des Wasserstandes für den ein- und auslaufenden Schiffsverkehr im Messzeitraum 2015; Schiffe mit einer Breite von 40 m und mehr sind zusätzlich ausgewiesen

Für das Teildatenkollektiv wird deutlich, dass der Passierabstand generell mit abnehmendem Wasserstand geringer wird, wobei der Effekt beim auslaufenden Verkehr ausgeprägter ist. Mithin ist die Belastungswirkung des Passierabstandes mittelbar an die Wasserstandsentwicklung gekoppelt und verstärkt dessen Wirkung.

Die Entwicklung der Sekundärwellenbelastung im Gesamtdatenkollektiv zeigt deutliche Unterschiede zu den langperiodischen Belastungsparametern. Wie zuvor festgestellt, unterscheiden sich die Randbedingungen im Wesentlichen nur durch den Passierabstand, dessen Wirkung sich offensichtlich in der Sekundärwellenbelastung widerspiegelt. So steigt die Belastung einlaufender Schiffe schon bei deutlich höheren Wasserständen an und liegt dann durchgehend oberhalb des Belastungsniveaus für den auslaufenden Schiffsverkehr.

Im Teildatenkollektiv der großen Schiffe erreicht die Belastungshöhe bei höheren Wasserständen zunächst im auslaufenden Verkehr höhere Werte. Allerdings zeigt sich im auslaufenden Schiffsverkehr kein wasserstandsabhängiger Trend, so dass bei Wasserständen unterhalb von NN + 0,5 m die überlinear zunehmenden Belastungen des einlaufenden Schiffsverkehrs deutlich überwiegen. Mit Blick auf die Randbedingungen dominiert hier insgesamt der Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit gegenüber der Schiffsgeometrie (Schiffsbreite).

7.3.3 Fazit

Die systematischen Betrachtungen maßgebender Einflussgrößen auf die Entwicklung der schiffserzeugten Belastungen konnten einerseits deren Wirkungen beschreiben und erlauben andererseits auch Rückschlüsse auf die verkehrliche Situation. So lassen sich auf Basis des zugrunde liegenden Datenkollektives bestimmte generelle Verkehrskonstellationen und Nutzungsverhältnisse beschreiben.

Verkehrssituation

Große einlaufende Schiffe verkehren eher bei höheren Wasserständen. Dabei erreichen sie zumeist unterdurchschnittliche Geschwindigkeiten durchs Wasser. Allerdings ist ebenfalls klar erkennbar, dass mit Verringerung des Wasserstandes auch höhere Geschwindigkeiten gefahren werden. Passagen einlaufender Schiffe bei Wasserständen unterhalb von NN – 1,5 m sind jedoch nicht aufgetreten. Insgesamt nimmt der Passierabstand zum Liegeplatz 9.4 mit sinkenden Wasserständen generell ab. Bei großen Schiffen ist die Abstandsreduktion jedoch nicht so ausgeprägt wie beim Gesamtverkehr.

Der auslaufende Verkehr mit großen Schiffen verkehrt eher bei mittleren bis unterdurchschnittlichen Wasserständen, wobei die Schiffsgeschwindigkeit schwächer variiert als beim einlaufenden Verkehr. Tendenziell nimmt sie jedoch größtenteils bei niedrigeren Wasserständen eher ab. Der Passierabstand variiert beim Gesamtverkehr nur gering, bei den großen Schiffseinheiten lässt sich hingegen eine deutliche Reduktion des Passierabstandes zum Liegeplatz 9.4 mit abnehmendem Wasserstand nachweisen.

Belastungsentwicklung Absunk und Primärwelle

Maßgebende Absunk- und Primärwellenhöhenbelastungen treten nur bei großen Schiffen ab einer Breite von rd. 30 m auf. Weiterhin liefern nur Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser von mehr als rd. 12,5 kn signifikante Belastungshöhen. Hinsichtlich der Wasserstände ist nachgewiesen worden, dass auffällige schiffserzeugte Belastungen erst unterhalb von rd. NN -1,0 m auftreten. Der Passierabstand als eigenständige Einflussgröße ist eher von untergeordneter Bedeutung, da dessen Wirkung von dem gleichgerichteten, dominanten Wasserstandseinfluss überlagert wird.

Höchste Belastungen werden somit bei niedrigen Wasserständen und hohen Geschwindigkeiten großer Schiffe erreicht, wobei gerade niedrige Wasserstände besonders auffallende Wirkungen entfaltet haben.



Belastungsentwicklung Sekundärwelle

Maßgebende Absunk- und Primärwellenhöhenbelastungen treten nur bei Schiffen ab einer Breite von rd. 20 m auf. Weiterhin liefern auch nur Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser von mehr als rd. 10 kn signifikante Belastungshöhen. Hinsichtlich der Wasserstände kann davon ausgegangen werden, dass erst Werte unterhalb von rd. NN zu auffälligen schiffserzeugten Belastungen führen. Der Passierabstand als eigenständige Einflussgröße ist auch hier eher von untergeordneter Bedeutung, da dessen Wirkung von dem gleichgerichteten Wasserstandseinfluss überlagert wird.

Höchste Belastungen werden daher bei hohen Geschwindigkeiten größerer Schiffe und niedrigeren Wasserständen erreicht, wobei hier eher der Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit dominiert.

8 Zusammenfassung

Der in den Jahren 2011/12 errichtete Liegeplatz 9.4 liegt im Elbmündungsgebiet stromab des Altenbrucher Bogens am südöstlichen Ende des Cuxhavener Hafengebietes. Im Rahmen einer Umnutzung dieses Liegeplatzes für die Verladung von Schwergut-Offshore-Windenergieturbinen entwickelte sich die Frage nach den schiffsinduzierten Belastungen der vorbeifahrenden Schifffahrt, da die zu beladenen Schiffseinheiten nicht aufgeständert werden, sondern im Wasserraum verbleiben.

Daher beauftragte die Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG, Niederlassung Cuxhaven (NPC) mit Schreiben vom 15. Juli 2015 das Ingenieurbüro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner (IMP), Oldenburg mit der Durchführung, Auswertung und gutachterlichen Bewertung der schiffserzeugten Belastungen im Bereich des Liegeplatzes 9.4 auf Basis eines am 08. Juli 2015 vorgelegten Angebotes.

Im Einzelnen waren folgende Arbeitsschritte und Untersuchungspakete vorgesehen:

- Aufbau und Betrieb einer Messstation zur zeitlich hochauflösenden, kontinuierlichen Erfassung des Wasserspiegels am Liegeplatz 9.4 über rd. 13 Wochen
- Auswertung der lang- und kurzperiodischen Wellenbelastungen aus Schiffspassagen und Seegang
- Ermittlung und Zuordnung der schiffsspezifischen Informationen aus den AIS-Datensätzen
- Erweiterte Ermittlung schiffsspezifischer Kenngrößen durch Berücksichtigung der jeweils vorherrschenden Tideströmungen
- Gutachterliche Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse in einem abgeschlossenen Bericht

Zur Beschreibung der schiffserzeugten Belastungen wurden die Wasserspiegeländerungen hinsichtlich maximaler Werte des Absunkes, der Primär- und Sekundärwelle untersucht. Die Vorgehensweise stellte eine Einzelwellenbetrachtung im Zeitbereich dar. Die Parametrisierung der Schiffswellen erfolgte rechnergestützt in einer automatisierten Auswertung mit dem am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig entwickelten und seit 1996 von IMP überarbeiteten und weiterentwickelten windowsfähigen Wellen- und Strömungsanalyseprogramm Water Movement Calculation WMC.

Ausgangspunkt für die Erkennung eines Schiffsereignisses bildeten AIS-Datensätze, welche für definierte geometrische Bedingungen (hier: Festlegung einer Passierlinie) von der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Nord (GDWS) in Kiel auf Anforderung als anonymisierte binäre Rohdaten zur Verfügung gestellt wurden. Damit war neben einer Erkennung des Passagezeitpunktes auch eine entsprechende Beschreibung des Fahrzeugs auf Basis der Standarddokumentation im AIS-Datensatz möglich.

Für die Bewertung der schiffsinduzierten Belastungen wurden weiterhin revieraktuelle Strömungsgeschwindigkeitsmessungen der H-ADCP-Messstation von NPC an der Neuen Seebäderbrücke (NSBB) verwendet, um die maßgebenden Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser zu ermitteln. Die Station liegt rd. 4,8 km stromab des Liegeplatzes 9.4.

Weiterhin war für die kontrollierte Ermittlung der schiffserzeugten Belastung auch eine Analyse des vorherrschenden Seegangsklimas notwendig, um seegangsdominierte Zeiträume zu erkennen und diese von der Bewertung schiffserzeugter Belastungen auszuschließen.

Zur Erfassung schiffserzeugter Belastungen am Liegeplatz 9.4 wurde in dem Uferbereich eine Messstation eingerichtet, die Daten in der Zeit vom 14.09. bis 30.11.2015 mit einem Messtakt von 20 Hz unterbrechungsfrei aufgezeichnete. Bis zum Rückbau der Station am 19.01.2016 wurde die Datenerfassung weiter betrieben, die Daten stehen bei Bedarf für erweiterte Betrachtungen zur Verfügung.

Insgesamt wurden, unter Berücksichtigung unvollständiger AIS-Datensätze, Zeiträumen mit dominierender Seegangsbelastung und einigen Auswertestörungen, 10.201 Absunkereignisse, 10.223 Primär- und 10.233 Sekundärwellenereignisse vollständig ausgewertet und die zugehörigen Randbedingungen dokumentiert. Die statistischen Hauptwerte der drei Belastungsgrößen sind in nachfolgender Tab. zusammengefasst.

Parameter	Absunk- höhe	Primär- wellenhöhe	Sekundär- wellenhöhe
Mittelwert	5,1 cm	5,1 cm	41,8 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Stunde	7,5 cm	7,4 cm	61,8 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Tag	21,0 cm	21,3 cm	129,0 cm
Mittelwert der täglich höchsten Ereignisse	22,7 cm	23,6 cm	130,5 cm
Mittelwert der 78 höchsten Ereignisse	26,0 cm	29,5 cm	153,9 cm
Überschreitungshöhe 1 Ereignis/Monat	40,6 cm	52,6 cm	224,8 cm
Maximalwert	78,9 cm	97,0 cm	242,4 cm

Aus der hohen Verkehrsdichte im Revier war direkt ableitbar, dass im Rahmen einer systematischen, rechnergestützten Auswertung eine Erfassung von überlagernden Wirkungen mehrerer (nahezu) zeitgleicher Schiffspassagen unvermeidlich ist. Daher wurden in einem ersten Bewertungsschritt die Wirkungen von Mehrfachpassagen betrachtet, die als statistisch unabhängig von den übrigen Randbedingungen eingestuft wurden.

Die Ergebnisse wiesen bei allen drei Kenngrößen Absunk, Primär- und Sekundärwellenhöhe einen Anstieg der Belastungen mit zunehmender Passageanzahl aus. Bei Einzelpassagen erreichten die Belastungsgrößen nur rd. 80 bis 85 % des jeweiligen Gesamtmittelwertes. Während Absunk und Primärwelle dann kontinuierlich auf einen Wert von rd. 120 bis 125 % des Gesamtmittels bei 6 und mehr Passagen anstiegen, erreichte die Sekundärwelle schon bei 4-fach-Passagen mit rd. 115 % das Maximum. Eine weitere Steigerung der kurzperiodischen Sekundärwellenhöhe oberhalb von 4-fach-Passagen war statistisch nicht mehr nachweisbar.

Im Rahmen umfangreicher statistischer Auswertungen wurden die Wirkungen weitere Randbedingungen betrachtet, die jedoch nicht als voneinander unabhängig einzustufen waren. Dennoch erlaubten die Untersuchungen Rückschlüsse auf die verkehrliche Situation im Revier und es konnten die Wirkungen der Randbedingungen

- Schiffsgeometrie,
- Schiffsgeschwindigkeit,
- Passierabstand und
- Wasserstand

auf die Absunk-, Primär- und Sekundärwellenhöhe detailliert belegt werden.

Verkehrssituation

Große einlaufende Schiffe verkehrten eher bei höheren Wasserständen. Dabei erreichten sie zumeist unterdurchschnittliche Geschwindigkeiten durchs Wasser. Allerdings war ebenfalls klar erkennbar, dass mit Verringerung des Wasserstandes auch höhere Geschwindigkeiten gefahren wurden. Passagen einlaufender Schiffe bei Wasserständen unterhalb von

NN – 1,5 m sind jedoch nicht aufgetreten. Insgesamt nahm der Passierabstand zum Liegeplatz 9.4 mit sinkenden Wasserständen generell ab. Bei großen Schiffen war die Abstandsreduktion jedoch nicht so ausgeprägt wie beim Gesamtverkehr.

Der auslaufende Verkehr mit großen Schiffen verkehrte eher bei mittleren bis unterdurchschnittlichen Wasserständen, wobei die Schiffsgeschwindigkeit schwächer variierte als beim einlaufenden Verkehr. Tendenziell nahm sie jedoch größtenteils bei niedrigeren Wasserständen eher ab. Der Passierabstand variierte beim Gesamtverkehr nur gering, bei den großen Schiffseinheiten ließ sich hingegen eine deutliche Reduktion des Passierabstandes zum Liegeplatz 9.4 mit abnehmendem Wasserstand nachweisen.

Belastungsentwicklung Absunk und Primärwelle

Maßgebende Absunk- und Primärwellenhöhenbelastungen traten nur bei großen Schiffen ab einer Breite von rd. 30 m auf. Weiterhin lieferten nur Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser von mehr als rd. 12,5 kn signifikante Belastungshöhen. Hinsichtlich der Wasserstände ist nachgewiesen worden, dass auffällige schiffserzeugte Belastungen erst unterhalb von rd. NN -1,0 m auftraten. Der Passierabstand als eigenständige Einflussgröße war eher von untergeordneter Bedeutung, da dessen Wirkung von dem gleichgerichteten, dominanten Wasserstandseinfluss überlagert wurde.

Höchste Belastungen wurden somit bei niedrigen Wasserständen und hohen Geschwindigkeiten großer Schiffe erreicht, wobei gerade niedrige Wasserstände besonders auffallende Wirkungen entfaltet haben.

Belastungsentwicklung Sekundärwelle

Maßgebende Absunk- und Primärwellenhöhenbelastungen traten nur bei Schiffen ab einer Breite von rd. 20 m auf. Weiterhin lieferten auch nur Schiffsgeschwindigkeiten durchs Wasser von mehr als rd. 10 kn signifikante Belastungshöhen. Hinsichtlich der Wasserstände kann davon ausgegangen werden, dass erst Werte unterhalb von rd. NN zu auffälligen schiffserzeugten Belastungen führten. Der Passierabstand als eigenständige Einflussgröße war auch hier eher von untergeordneter Bedeutung, da dessen Wirkung von dem gleichgerichteten Wasserstandseinfluss überlagert wurde.

Höchste Belastungen wurden daher bei hohen Geschwindigkeiten größerer Schiffe und niedrigeren Wasserständen erreicht, wobei hier eher der Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit dominierte.

Mit der gewählten Mess- und Auswertestrategie wurde unter Nutzung aller vorgestellten Informationslinien eine kausale Beschreibung der maßgebenden Wellendynamik an dem Liegeplatz 9.4 in Cuxhaven erreicht.

Oldenburg, 29. Januar 2016

(Dr.-Ing. H. Manzenrieder)

pl.-Ing. A. Bischof)

