



**WSV.de**

Wasser- und  
Schiffahrtsverwaltung  
des Bundes

Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg

**Naturmessungen  
zur schiffserzeugten Belastung  
des Uferdeckwerkes Lühesand**

**Erfassung der schiffserzeugten  
Wellen- und Strömungsbelastungen**

**Zusammenfassung der Ergebnisse**

**Gutachten**

---

Bericht Nr. 90213-06  
Hamburg, 1. März 2013

Revisions-Status

Rev.	Beschreibung	Datum	Autor	Abnahme
0	Berichtslegung	01.03.2013	K. Peters	T. Baur



Ingenieurgesellschaft mbH

Inhalt	Seite
<b>1 Veranlassung</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Hintergrund</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Projektorganisation</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Vorgehensweise und Arbeitsschritte</b>	<b>3</b>
<b>1.5 Abzuliefernde Unterlagen</b>	<b>3</b>
<b>1.6 Projektbeteiligte</b>	<b>3</b>
<b>1.7 Anmerkungen zum Gutachten</b>	<b>4</b>
<b>2 Beschreibung ablaufender Prozesse um ein fahrendes Schiff und Definition maßgebender Parameter</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Allgemeines</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Anmerkungen zur Fahrdynamik von Schiffen</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Hydraulische Prozesse um ein fahrendes Schiff (Verdränger)</b>	<b>7</b>
2.3.1 Beschreibung der Prozesse	7
2.3.2 Definition der kennzeichnenden Parameter	9
<b>2.4 Hydraulische Prozesse um ein schnellfahrendes Schiff (HSC - High Speed Craft)</b>	<b>10</b>
2.4.1 Beschreibung der Prozesse	10
2.4.2 Definition der kennzeichnenden Parameter	11
<b>2.5 Grundsätzliche Hinweise zur Überlagerung von Schiffswellen und Seegangswellen</b>	<b>12</b>
<b>3 Messkampagne Lühesand</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Revierübersicht und Lage der Messlokationen</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Revierbedingungen</b>	<b>16</b>
3.2.1 Hydrologie	16
3.2.2 Morphologie	16
3.2.3 Windverhältnisse	17
3.2.4 Seegang	18
3.2.5 Schiffswellen	19
3.2.6 Schiffsverkehr	22
3.2.7 Eisverhältnisse	23
<b>3.3 Messkonzept und Instrumentierung</b>	<b>24</b>
<b>3.4 Projektablauf und Übersicht verfügbarer Messdaten</b>	<b>26</b>
<b>3.5 Dokumentation und Darstellung der Messdaten</b>	<b>27</b>
3.5.1 Allgemeine Hinweise	27
3.5.2 Hydrologische Messdaten	27
3.5.3 Meteorologische Messdaten	28
3.5.4 Schiffspassagen	29
3.5.5 Wasserspiegelauslenkungen und Tideströmungen	30

<b>3.6 Datenformate</b>	<b>30</b>
<b>3.7 Datenablage</b>	<b>31</b>
<b>4 Auswertung der Schiffswellenereignisse</b>	<b>32</b>
<b>4.1 Auswertungskonzept</b>	<b>32</b>
<b>4.2 Definition der Mess- und Auswertungszeiträume</b>	<b>33</b>
<b>4.3 Postprocessing</b>	<b>33</b>
<b>4.4 Übersicht der analysierten Schiffswellenereignisse</b>	<b>34</b>
<b>5 Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Allgemeines</b>	<b>35</b>
<b>5.2 Schiffspassagen</b>	<b>37</b>
5.2.1 Statistik der Schiffspassagen	37
5.2.2 Statistik der Schiffstiefgänge	38
5.2.3 Statistik der Schiffsgeschwindigkeit	39
<b>5.3 Seegang</b>	<b>41</b>
<b>5.4 Messlokation M2</b>	<b>43</b>
5.4.1 Darstellung der Schiffswellenereignisse	43
5.4.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse	44
<b>5.5 Messlokation M3</b>	<b>51</b>
5.5.1 Darstellung der Schiffswellenereignisse	51
5.5.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse	52
<b>5.6 Vergleichende Betrachtungen zur Entwicklung der Schiffswellen zwischen den Querprofilen M2 und M3</b>	<b>60</b>
<b>5.7 Vergleichende Betrachtungen der schiffserzeugten Wellen und Strömungen mit und ohne Rücksichtnahme</b>	<b>64</b>
<b>5.8 Schiffswellenereignisse bei HSC-Passagen (<i>Halunder Jet</i>) an den Messlokalationen M2 und M3</b>	<b>67</b>
5.8.1 Schiffswellendarstellung	67
5.8.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse	69
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>72</b>

<b>Tabellen</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungen</b>	<b>IV</b>
<b>Anlagen</b>	<b>VIII</b>
<b>Anlagen zur Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>VIII</b>
<b>Digitale Anlagen der Messdaten und Auswertungen</b>	<b>VIII</b>
<b>Projektunterlagen</b>	<b>VIII</b>
<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>IX</b>
<b>Zeichnungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>

	<b>Seite</b>
<b>Tabellen</b>	
Tabelle 3-1: Gauß-Krüger-Koordinaten der beiden Messlokationen M2 und M3	14
Tabelle 3-2: Tidekennwerte der maßgebenden Pegel im Projektgebiet	16
Tabelle 3-3: Maximale signifikante Wellenhöhen in den drei Bereichen der Unterelbe zwischen Hamburg und Cuxhaven, vgl. Anlage 3 in [6]	18
Tabelle 3-4: Maximale schiffserzeugte Belastungen im derzeitigen Istzustand entlang der Unterelbe gem. [7]	20
Tabelle 3-5: Zusammenstellung von Maximalwerten schiffserzeugter Wellen aus Naturmessungen entlang der Unterelbe [7]	21
Tabelle 5-1: Statistik der Schiffspassagen für den Messzeitraum am Beispiel der Messlokation M2 (vgl. Anlage 9)	37
Tabelle 5-2: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation M2	44
Tabelle 5-3: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation M2	46
Tabelle 5-4: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation M3	53
Tabelle 5-5: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation M3	54
Tabelle 5-6: Analytierte Schiffswellenereignisse der ELYSÉE an der Messlokation M2 (oben) und M3 (unten)	62
Tabelle 5-7: Analytierte Schiffswellenereignisse der QUEEN MARY 2 an der Messlokation M2 (oben) und M3 (unten)	63
Tabelle 6-1: Maximale Schiffswellenparameter des Absunk $z_A$ , der Primärwellenhöhe $H_p$ und der Sekundärwellenhöhe $H_s$ an den Messlokationen M3 (links) und M2 (rechts)	73
	<b>Seite</b>
<b>Abbildungen</b>	
Abbildung 1-1: Revierübersicht im Bereich Lühesand	1
Abbildung 1-2: Schadensbild des fahrwasserseitigen Deckwerkes der Elbinsel Lühesand	2
Abbildung 2-1: Schnellfähre, eingesetzt im Finnischen Meerbusen [18]	5
Abbildung 2-2: Wellenausbreitung bei unterkritischer, kritischer und überkritischer Fahrt nach [14] (oben) und deren Wellenausbreitung bei unterkritischer Fahrt (auf dem Foto links) und überkritischer Fahrt (auf dem Foto rechts) nach [15]	6
Abbildung 2-3: Wellenbild eines Schiffes in Verdrängerfahrt in seitlich begrenztem Fahrwasser als Aufsicht (links) und Ansicht der Schiffswellensysteme (rechts) (BAW)	7
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Teilquerschnittes einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussparametern (BAW, 2006)	8
Abbildung 2-5: Definition maßgebender Kenngrößen schiffserzeugter Wellen (oben) und Strömungen (unten) für einen ortsfesten Betrachter nach BAW	9
Abbildung 2-6: Entwicklung des Wellenbildes eines beschleunigenden HSC (hier Katamaran) aus unterkritischer Fahrt mit $F_{nh} \sim 0,5$ (Verdrängerfahrt, oben links) bis zur überkritischen Fahrt mit $F_{nh} > 1$ (rechts) aus Heimann et al. (2008)	10
Abbildung 2-7: Empfehlung für die Definition und Auswertung von Schiffswellen aus HSC-Passagen bei überkritischer Fahrt (BAW)	11
Abbildung 2-8: Luftaufnahme eines HSC (oben) mit Angabe der schiffsdynamischen Kenngrößen nach Kirkegaard et al. (1998)	12
Abbildung 2-9: Interaktion von Schiffs- und Windwellen in Abhängigkeit des Seeganges (schematisch)	13
Abbildung 3-1: Projektgebiet mit Kennzeichnung der Messlokationen M2 und M3	14

Abbildung 3-2:	Querprofile an M3 (oben) und M2 (unten) mit Kennzeichnung der Messpfähle und der Fahrrinne	15
Abbildung 3-3:	Lage der projektrelevanten Pegel Hetlingen und Lühort	16
Abbildung 3-4:	Windstatistik für die Station Stadersand ( <a href="http://www.windfinder.de">www.windfinder.de</a> )	17
Abbildung 3-5:	Auftretende Schiffswellenbilder in der Unterebbe	19
Abbildung 3-6:	Beispiel einer Schiffspassage und auftretender Schiffswellen vor Lühesand	20
Abbildung 3-7:	Übersicht durchgeführter Naturmessungen zur Erfassung der Schiffswellen [7]	21
Abbildung 3-8:	Schiffsbewegungen in 2009 (WSD Nord)	22
Abbildung 3-9:	Anzahl der Schiffsbewegungen in 2009 im Vergleich ( <a href="http://www.wsv.de">www.wsv.de</a> )	22
Abbildung 3-10:	Häufigkeit des Eisvorkommens im deutschen Nordseeküstengebiet im Zeitraum 1961 bis 2000 [13]	23
Abbildung 3-11:	Fahrendes Schiff (Abgänger) bei Eisgang auf Höhe Lühesand	23
Abbildung 3-12:	Messkonzept mit Darstellung der eingesetzten Messgeräte	24
Abbildung 3-13:	Installation der Messgeräte	25
Abbildung 3-14:	Exemplarische Darstellung der meteorologischen Parameter, der hydrologischen Daten und der analysierten Seegangbedingungen für die 16. KW 2011 an der Messlokation M2	28
Abbildung 3-15:	Registrierte Schiffspassagen für die Messkampagne an den Messlokalationen M2 und M3	29
Abbildung 3-16:	Exemplarische Zeitreihe für die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen zusammen mit registrierten Schiffspassagen als Tagesplot an der Messlokation M2	30
Abbildung 4-1:	Auswertungskonzept zur Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse und zugehöriger Parameter	32
Abbildung 4-2:	Übersicht Messkampagne Lühesand	34
Abbildung 5-1:	Registrierte Schiffspassagen und Schiffswellenereignisse an den Messlokalationen M2 und M3 über den Messzeitraum	35
Abbildung 5-2:	Statistik (links), Häufigkeitsverteilung (rechts) und zeitliches Auftreten der Schiffstiefgänge (unten) an der Messlokation M2	39
Abbildung 5-3:	Statistik (links), Häufigkeitsverteilung der Schiffsgeschwindigkeit (oben rechts) und Zusammenhang zwischen Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang (unten rechts) an der Messlokation M2	40
Abbildung 5-4:	Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten SOG im Querprofil der Messlokation M2	40
Abbildung 5-5:	Projektgebiet mit Messlokalationen M2 und M3 und Kennzeichnung der für die Seegangserzeugung maßgebenden Windrichtungen	41
Abbildung 5-6:	Signifikante Wellenhöhen $H_{1/3}$ an den Messlokalationen M2 und M3 während des Messzeitraumes	42
Abbildung 5-7:	Seegangserzeugung an den Messlokalationen bei nordwestlicher Windlage	42
Abbildung 5-8:	Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M2 mit maximalem Absunk und maximaler Primärwellenhöhe (vgl. Anlage 9)	43
Abbildung 5-9:	Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M2 mit maximaler Sekundärwellenhöhe	44
Abbildung 5-10:	Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk $z_A$ (oben), Primärwellenhöhe $H_p$ (Mitte) und Sekundärwellenhöhe $H_s$ (unten) an der Messlokation M2	45
Abbildung 5-11:	Verteilung der 50 höchsten Absunk-Ereignisse in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M2	47
Abbildung 5-12:	Verteilung der 50 höchsten Sekundärwellenhöhen in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M2	48
Abbildung 5-13:	Einfluss des Tidewasserstandes auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenereignisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2	49

Abbildung 5-14: Einfluss des Passierabstandes auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenereignisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2	49
Abbildung 5-15: Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit (FdW) auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenereignisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2	50
Abbildung 5-16: Einfluss des Tiefganges auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenereignisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2	50
Abbildung 5-17: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M3 mit maximalem Absunk	51
Abbildung 5-18: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M3 mit maximaler Primärwellenhöhe	52
Abbildung 5-19: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M3 mit maximaler Sekundärwellenhöhe	52
Abbildung 5-20: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk $z_A$ (oben), Primärwellenhöhe $H_p$ (Mitte) und Sekundärwellenhöhe $H_s$ (unten) an der Messlokation M3	54
Abbildung 5-21: Verteilung der 50 höchsten Absunk-Ereignisse in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M3	55
Abbildung 5-22: Verteilung der 50 höchsten Ereignisse der Primärwelle in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M3	56
Abbildung 5-23: Verteilung der 50 höchsten Sekundärwellenhöhen in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M3	57
Abbildung 5-24: Einfluss des Tidewasserstandes (oben), des Passierabstandes, der Schiffsgeschwindigkeit und des Tiefganges (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter Absunk (links), Primärwelle(Mitte) und Sekundärwelle (rechts) für alle Schiffswellenereignisse an der Messlokation M3	58
Abbildung 5-25: Entwicklung der Schiffswellenparameter bei der Schiffspassage der ELYSÉE am 21.06.2011 bei einem Wasserstand am Pegel Hetlingen von NN -1,41 m	60
Abbildung 5-26: Einfluss der Parameter Tidewasserstand, Passierabstand, Geschwindigkeit und Tiefgang (von oben nach unten) auf die Schiffswellenparameter Absunk (links), Primärwellenhöhe (Mitte) und Sekundärwellenhöhe (rechts) an der Messlokation M3 für Schiffspassagen der ELYSÉE	61
Abbildung 5-27: Entwicklung der Schiffswellenparameter bei der Schiffspassage der QUENN MARY 2 am 08.05.2011	63
Abbildung 5-28: Arbeitsponton Rochen am 13.05.2011 ( <a href="http://www.hafenradar.de">www.hafenradar.de</a> )	64
Abbildung 5-29: Registrierte Schiffsgeschwindigkeiten im Messzeitraum mit Kennzeichnung der Zeiträume für die Rücksichtnahme (in Rot hinterlegt)	64
Abbildung 5-30: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk $z_A$ (oben), Primärwellenhöhe $H_p$ (Mitte) und Sekundärwellenhöhe $H_s$ (unten) an der Messlokation M2 ohne und mit Rücksichtnahme	65
Abbildung 5-31: Maximale Schiffswellenparameter über den Messzeitraum mit Kennzeichnung des Zeitraumes der Rücksichtnahme	66
Abbildung 5-32: HSC <i>Halunder Jet</i>	67
Abbildung 5-33: Auswertebeispiel für eine Passage des <i>Halunder Jet</i> an der Messlokation M3 am 29.04.2011 um 19:10 h	68
Abbildung 5-34: Auswertebeispiel für eine Passage des <i>Halunder Jet</i> an der Messlokation M2 am 29.04.2011 19:11 h	68
Abbildung 5-35: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für den Schiffswellenparameter $H_{ukrit}$ an der Messlokation M3 (oben) und M2 (unten)	69
Abbildung 5-36: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Sekundärwellenhöhe $H_s$ an der Messlokation M3 (oben) und M2 (unten)	69

---

Abbildung 5-37: Einfluss des Passierabstandes auf die für ein HSC charakteristischen Schiffswellenparameter der Wellenhöhe $H_{\text{ükrit}}$ (oben) und die Sekundärwellenhöhe $H_s$ (Mitte) für alle Schiffswellenereignisse an der Messlokation M2 (links) und M3 (rechts)	70
Abbildung 5-38: Geschwindigkeiten des <i>Halunder Jet</i> mit Kennzeichnung der Rücksichtnahme	71
Abbildung 5-39: Vergleichsbetrachtung der Schiffswellenereignisse des HSC ohne und mit Rücksichtnahme	71

**Anlagen**

- Anlage 1 Projektbeteiligte
- Anlage 2 Projektprotokoll mit Eisberichten des BSH und Memo 90213-01
- Anlage 3 Revierbedingungen
- Anlage 3.1 Hydrologie/Tidebedingungen
- Anlage 3.2 Morphologie
- Anlage 3.3 Seegang – Memo 90213-07
- Anlage 3.4 Schiffswellen - Gefährdungen durch Sog und Wellenschlag  
- Flyer des WSA Hamburg – Stand: 02/2007
- Anlage 3.5 Verkehrsstatistik 2008
- Anlage 3.6 Eisverhältnisse
- Anlage 4 Unterlagen zur Messtechnik und zu den eingesetzten Messgeräten (Wellendraht und Strömungssonde)
- Anlage 5 Übersicht Messkampagne
- Anlage 6 Memo 90213-04 zur Vorgehensweise Schiffswellenanalyse
- Anlage 7 Memo 90213-05 zur Vorgehensweise Seegangsanalyse

**Anlagen zur Darstellung der Ergebnisse**

- Anlage 8 Dokumentation der meteorologischen Messdaten der BAW in Verbindung mit den hydraulischen Parametern Wasserstand und Seegang an den Messlokationen M2 und M3
- Anlage 9 Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an der Messlokation M2
- Anlage 10 Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an der Messlokation M3
- Anlage 11 Präsentation der Ergebnisse vom 26.10.2011

**Digitale Anlagen der Messdaten und Auswertungen**

- Anlage 12 DVD – Daten und Auswertungen
- Anlage 13 DVD – Messdaten der Messlokationen M2 und M3

**Projektunterlagen**

- [1] WSA Hamburg (2010) Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung des Uferdeckwerkes Lühesand, Ausschreibungsunterlage, Oktober 2010
- [2] IMS (2006) Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung der Unterweser, Gutachten zur Erfassung des Ist-Zustandes schiffserzeugter Belastungen der Unterweser, Auftraggeber: Bundesanstalt für Wasserbau, Bericht-Nr. 9013-02a, Dezember 2006
- [3] IMS (2010) UVU zur geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden, Erfassung der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen, Bereitstellung von Seegangparametern für die Bundesanstalt für Wasserbau, Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Emden, Bericht 90141-01, 08. April 2010
- [4] BAW (2011) Naturmessungen Lühesand, Datenzugang zu der Wetterstation Lühesand, <http://bwm.hamburg.baw.de/>

- [5] BAW (1996) Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastung der Unterelbe. BAW-Nr. 94 52 3422/23
- [6] BAW (2004) Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt, Gutachten zur ausbaubedingten Änderung der morphodynamischen Prozesse, BAW-Nr A3955 03 10062, Unterlage H.1 c
- [7] BAW (2006) Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. BAW-Nr. 5.03.10062.00, Unterlage H.1 d
- [8] BAW (2009) Leistungsbeschreibung zur Ausschreibung: Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung des Emders Fahrwassers. Entwurf, Stand: April 2009
- [9] Initiative „Zukunft Elbe“, Internetportal zu der geplanten Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe, [www.zukunft-elbe.de](http://www.zukunft-elbe.de)
- [10] Führböter, Dette, Jensen (1984) Untersuchungen über schiffserzeugte Wellen an der Unterelbe, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 566, Technische Universität Braunschweig
- [11] EAU (2004) Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen", Häfen und Wasserstraßen. 10. Auflage, Ernst & Sohn.
- [12] Mai, Paesler, Zimmermann (2004) Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste, Wellen und Seegang an Küsten und Küstenschutzwerken, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 90a
- [13] Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Naturverhältnisse Nordsee und Englischer Kanal, Teil B zu den Handbüchern für die Nordsee und den Kanal, 2009

### **Weiterführende Literatur**

- [14] Erikson (2005) Swash Processes and Dune Erosion: Emphasis on vessel-generated waves. Department of Water Resources Engineering, Report No. 1033, Lund Institute of Technology, Lund University, Schweden
- [15] PIANC (2003) Guidelines for managing wake wash from high-speed vessels, MarCom, Working Group 41
- [16] Parnell, McDonald, Burke (2007) Shoreline effects of vessel wakes, Marlborough Sounds, New Zealand, Journal of Coastal Research, Special Issue 50, 2007
- [17] Heimann, Hutchison, Racine (2008) Application of the Free-Wave Spectrum to Minimize and Control Wake Wash, Paper No. SMTC-049-2008

- 
- [18] Torsvik (2009) Ship waves in Tallinn Bay: Experimental numerical study, Bergen Center for Computational Science UNIFOB AS, Präsentation des SEAMOCS Workshop, Malta
  - [19] Torsvik, Didenkulova, Soomere, Parnell (2009) Variability in spatial patterns of long nonlinear waves from fast ferries in Tallinn Bay, Nonlin. Processes in Geophysics, Band 16, S. 351 - 363
  - [20] Croud und Parnell (2002) Proposed Controls on Shipping Activity in the Marlborough Sounds, A Review under s. 32 of the Resource Management Act, Report to the Marlborough District Council, Opus International Consultants Limited and UniServices Limited
  - [21] Kirkegaard, Kofoed-Hansen und Elfrink (1998) Wake wash of high-speed craft in coastal waters, International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Kopenhagen

**Zeichnungsverzeichnis**

<b>Nr.</b>	<b>Zeichnungs-Nr.</b>	<b>Rev.</b>	<b>Titel</b>	<b>Maßstab</b>
1.	90213-S-01	a	Übersichtsplan Lühesand/Elbe	1 : 10.000 1 : 20.000
2.	90213-S-02		Böschungsprofile im Bereich der Messpfähle M2 und M3	1 : 500
3.	90213-S-03		Messpfähle M2 und M3 Böschungsprofile, Detailansichten Messpfahl und Instrumentierung	1 : 20.000 1 : 200 1 : 50, 1 : 20
4.	90213-S-04	a	Lageplan mit Kennzeichnung der registrierten Schiffspassagen	1 : 10.000
5.	90213-S-05	a	Querschnitte Messpfähle M2 und M3	M.d.L. 1 : 2500 M.d.H. 1 : 500

**Danksagung**

Die IMS bedankt sich ausdrücklich für die hervorragende Zusammenarbeit mit allen Projektbeteiligten. Stellvertretend möchten wir an dieser Stelle unseren besonderen Dank an Herrn Appel und seine Mitarbeiter vom Außenbezirk Wedel des WSA Hamburg richten, die uns bei der Ausrüstung der Messstationen, Installation und Demontage der Messgeräte perfekt unterstützt haben.

Der Bundesanstalt für Wasserbau danken wir für die exzellente Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Auswertung der Schiffswellenereignisse.

Die gesamte Messtechnik incl. Datenerfassung und –übertragung für die Messkampagne Lühesand 2011 wurde von der Fa. ARGUS Gesellschaft für Umweltmesstechnik mbH, Ritterhude konzipiert, installiert und betrieben. Die IMS bedankt sich für die hervorragende Zusammenarbeit.

**Bearbeitung**

Dr.-Ing. Karsten Peters  
Dr.-Ing. Tillmann Baur  
Dipl.-Ing. Michael Karch

## 1 Veranlassung

### 1.1 Hintergrund

Auf der Unterelbe zwischen Hamburg und Brunsbüttel werden jährlich mehr als 30.000 Schiffsbewegungen (ohne Sportboote und Ausflugsschiffe) registriert. Dabei führt die Fahrrinne teilweise dicht an den Ufern bzw. Elbinseln, wie auch an Lühesand, entlang (vgl.

Abbildung 1-1), was beidseitig zu entsprechenden hydraulischen Belastungen der Uferbefestigungen und Deckwerke führt.

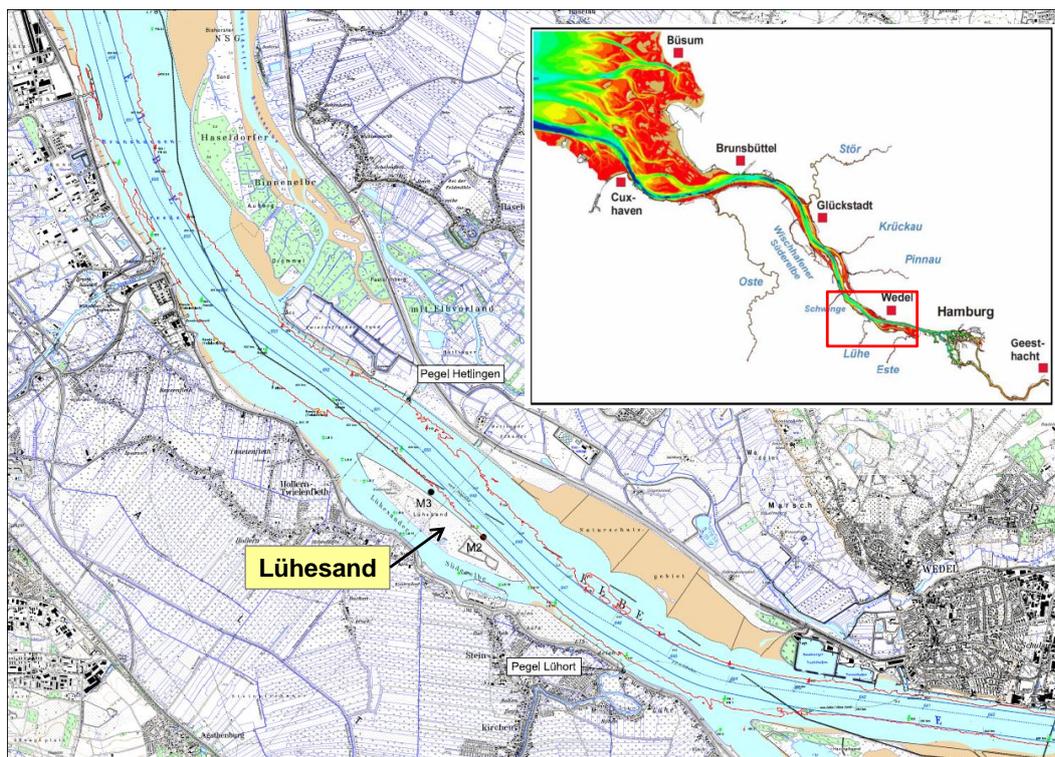


Abbildung 1-1: Revierübersicht im Bereich Lühesand

Am fahwasserseitigen Deckwerk der Elbinsel Lühesand sind in der Vergangenheit deutliche Schäden (vgl. Abbildung 1-2) aufgetreten, die auf die lokal auftretenden hydraulischen Belastungen aus Schiffswellen, Windwellen und tide- und welleninduzierte Strömungen zurückgeführt werden. Als maßgebend werden dabei die auftretenden schiffsinduzierten Wellen und Strömungen angesehen, da die Fahrrinne an dieser Seite sehr dicht am Ufer vor Lühesand vorbeiführt.

Um diesen Zusammenhang zwischen auftretenden hydraulischen Belastungen und dokumentierten Deckwerksschäden fachlich zu untersetzen und wichtige Hinweise für die spätere Bemessung eines neuen Deckwerkes an dieser Stelle geben zu können, wurde vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA Hamburg) der Auftrag für die Durchführung einer Messkampagne zur Erfassung der schiffsinduzierten Wellen- und Strömungsbelastungen an zwei fahwasser-

seitigen Messlokationen ausgeschrieben [1] und an die IMS Ingenieurgesellschaft mbH (IMS) vergeben.

Der vorliegende Bericht fasst die durchgeführten Naturmessungen zur Erfassung der schiffsinduzierten Wellen- und Strömungsbelastungen vor Lühesand, deren Analyse und die Ergebnisse zusammen.



Abbildung 1-2: Schadensbild des fahrwasserseitigen Deckwerkes der Elbinsel Lühesand (Ortsbesichtigung am 05.05.2011)

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung bestand konkret in der Planung und Durchführung von Naturmessungen zur Erfassung der schiffsinduzierten Wellen und Strömungen, deren Analyse und statistische Auswertung an den zwei Messlokationen M2 und M3 [1] am nördlichen Ufer der Elbinsel Lühesand.

Im Vorwege der durchgeführten Messungen wurden entsprechende Abstimmungen mit den Projektbeteiligten über die Durchführung der Messkampagne vorgenommen. Dabei wurde auf entsprechende Erfahrungen bei der Durchführung von Naturmessungen und Auswertung von Schiffswelleneignissen an der Unterweser [2] und in der Außenems [3] zurückgegriffen.

## 1.3 Projektorganisation

Die IMS führte die gesamten Leistungen als Hauptauftragnehmer aus. Als Nachunternehmer wurde die ARGUS Gesellschaft für Umweltmesstechnik mbH, Ritterhude (ARGUS) eingesetzt.

Die interne Aufgabenverteilung sah die Leistungen der Projektleitung sowie der Datenauswertung, Analyse, Dokumentation und Präsentation durch IMS vor, während die Planung, die Installation, der Betrieb und der Service der gesamten Messtechnik bei ARGUS lag. Bei der Durchführung der Naturmessungen wurde ARGUS durch IMS unterstützt.

## 1.4 Vorgehensweise und Arbeitsschritte

In Anlehnung an die durchgeführten Schiffswellenmessungen an der Unterweser [2] und in der Außenems [3] wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Planung der Messkampagne und Durchführung der Naturmessungen (offizieller Messzeitraum 18.04.2011 bis 10.07.2011) zusammen mit der Fa. ARGUS
- Zulieferung von Schiffspassage- und Pegeldata durch das WSA Hamburg
- Auswertung der Messdaten (Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen) nach Schiffswellenereignissen
- Auswertung der Messdaten (Wasserspiegelauslenkungen) hinsichtlich Seegang
- Prüfung der Schiffswellenereignisse und Kombination mit zugehörigen Daten (Wasserstandsdaten, Schiffspassagen)
- Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse
- Berichtslegung und Dokumentation der Daten.

## 1.5 Abzuliefernde Unterlagen

Die Dokumentation der analysierten schiffserzeugten Wellen und Strömungen an den beiden Messloktionen vor Lühesand für den Zeitraum der Messkampagne erfolgt mit dem vorliegenden Bericht.

Darin sind u. a. enthalten:

- Dokumentation der Messkampagne in 2011
- Dokumentation sämtlicher verfügbarer Messdaten
- Zeitreihendarstellungen der meteorologischen und hydrologischen Messdaten
- Zeitreihendarstellungen der ausgewerteten Seegangsparameter an den einzelnen Messloktionen
- Zeitreihendarstellungen der aufgezeichneten Messdaten (Tagesplots)
- Dokumentation des Auswertekonzeptes und der Datenanalyse
- Statistische Auswertungen der analysierten schiffserzeugten Wellen und Strömungen
- Bereitstellung der Messdaten und ausgewerteten Daten auf Datenträger.

## 1.6 Projektbeteiligte

Das WSA Hamburg als Auftraggeber hat IMS die erforderlichen hydrologischen Pegelinformationen und Daten der registrierten Schiffspassagen an den Messloktionen zur Verfügung gestellt.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hat die erfassten meteorologischen Messdaten der Wetterstation Lühesand [4] bereitgestellt.

Für die Phasen der Installation und Demontage der Messgeräte an den beiden Messloktionen M2 und M3 wurden IMS und ARGUS durch Personal und Schiffseinheiten des WSA Hamburg/Abz. Wedel unterstützt.

Eine detaillierte Liste der Projektbeteiligten liegt als Anlage 1 dem Bericht bei.

## 1.7 Anmerkungen zum Gutachten

Das vorliegende Gutachten erfasst den Istzustand der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen am fahrwasserseitigen Ufer vor Lühesand.

In dem folgenden Abschnitt 2 werden zunächst in allgemeiner Form die hydraulischen Prozesse, die bei verschiedenen Schiffstypen auftreten können, beschrieben und deren maßgebende Kenngrößen definiert.

Der Abschnitt 3 befasst sich anschließend mit der durchgeführten Messkampagne Lühesand. Dabei wird sowohl auf die Details zur Messtechnik als auch auf die vorherrschenden Revierbedingungen eingegangen.

Die Analyse der Schiffswellenereignisse wird in Abschnitt 4 erläutert.

Im Abschnitt 5 werden die Ergebnisse der Schiffswellenanalyse und der weiteren statistischen Auswertung lokationsweise vorgestellt. U. a. werden dort die maximalen Ereignisse und die Häufigkeitsverteilungen der kennzeichnenden Schiffswellenparameter vorgestellt.

Es folgt eine vergleichende Betrachtung von Schiffswellenereignissen und Statistiken für die Messzeiträume ohne und mit Rücksichtnahme im Hinblick auf die erfassten und analysierten Daten und Ereignisse.

Die Zusammenfassung erfolgt im Abschnitt 6.

Die Ergebnisse der Messkampagne wurden im Rahmen einer gemeinsamen Besprechung am 26.10.2011 beim WSA Hamburg präsentiert. Diese Präsentation gibt einen kompakten Überblick der durchgeführten Messungen, Auswertungen und Analysen und liegt dem Gutachten als Anlage 11 bei.

## 2 Beschreibung ablaufender Prozesse um ein fahrendes Schiff und Definition maßgebender Parameter

### 2.1 Allgemeines

Bei den folgenden Betrachtungen zur Fahrdynamik von Schiffen und den resultierenden Prozessen als Folge der Interaktion zwischen Schiff und Wasserstraße muss grundsätzlich zwischen Schiffen in Verdrängerfahrt (sog. Verdränger) und schnellfahrenden Schiffen (sog. *High Speed Craft*) unterschieden werden.

Grundlegende physikalische Zusammenhänge der Wellen- und Strömungsverhältnisse um ein fahrendes Schiff wurden seit Ende des 19. Jahrhunderts in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt. Erste Untersuchungen zu Schiffswellen und deren hydraulischen Prozessen gehen auf Froude (1877), Kelvin (1887) und Havelock (1908) zurück [5].

Detaillierte Beschreibungen der ablaufenden Prozesse um ein fahrendes Schiff in Verdrängerfahrt finden sich u. a. in der EAU (2004) sowie in BAW (1996), BAW (2006), Erikson (2005) oder IMS (2006 und 2009), auf die bei der nachfolgenden Beschreibung zurückgegriffen wird.

Hinsichtlich der Schiffsdynamik schnellfahrender Schiffe, sogenannte HSC (*High Speed Craft*) wird maßgeblich auf die Veröffentlichung von PIANC (2003) verwiesen.

Neben theoretischen Untersuchungen zur Beschreibung der ablaufenden hydraulischen Prozesse um ein fahrendes Schiff sind es maßgeblich Modelluntersuchungen u.a. der BAW sowie Naturmessungen von Schiffswellen, die den Wissensstand in diesem Bereich deutlich erweitert haben.

Belastungen infolge Schiffswellen sind nicht nur ein Thema für Wasserstraßen in Deutschland sondern auch in anderen Staaten weltweit von Bedeutung. So werden in den letzten Jahren bestehende Fährverbindungen vielfach von sogenannten Schnellfähren (vgl. Abbildung 2-1) bedient, die ihrerseits infolge Schiffstyp und Fahrtgeschwindigkeit deutliche größere Schiffswellenbelastungen erzeugen. Diesbezüglich werden weiterführende Hinweise u.a. von Croud und Parnell (2002), Parnell et al. (2007), Heimann et al. (2008) oder Torsvik et al. (2009) gegeben. Empfehlungen, wie mit Schiffswellen und deren Belastungen auf Bauwerke umgegangen werden sollte, sind in der Veröffentlichung der PIANC (2003) zusammengefasst.



Abbildung 2-1: Schnellfähre, eingesetzt im Finnischen Meerbusen [18]

## 2.2 Anmerkungen zur Fahrdynamik von Schiffen

Die Ausbreitung des schiffsinduzierten Wellenfeldes ist neben dem Schiffstyp (Verdränger oder HSC), dessen Verdrängung (Tiefgang, Schiffslänge und -breite) vor allem eine Funktion der Schiffsgeschwindigkeit und der topografischen Gegebenheiten des Fahrwassers (seitlich begrenzt oder unbegrenzt).

Unter Verwendung der Froudeschen Tiefenzahl  $Fr$ ,

$$Fr = \frac{v_{Schiff}}{\sqrt{g h}}$$

mit  $Fr$  [1] Froudesche Tiefenzahl,  
 $v_{Schiff}$  [m/s] Schiffsgeschwindigkeit  
 $h$  [m] Wassertiefe des Fahrwassers

die das Verhältnis aus Schiffsgeschwindigkeit zur Wellenausbreitung beschreibt, kann die Ausbreitung des Wellenfeldes (insbesondere die Sekundärwellen) in die drei Kategorien unterkritisch ( $v_{Schiff} < v_{krit}$ ), kritisch ( $v_{Schiff} \sim v_{krit}$ ) und überkritisch ( $v_{Schiff} > v_{krit}$ ) unterteilt werden.

Die aus der Fahrdynamik des Schiffes resultierenden Wellenfelder werden hinsichtlich ihrer Ausbreitung in der folgenden Abbildung 2-2 schematisch dargestellt. Während Schiffe und deren Wellenfelder in Verdrängerfahrt sich im unterkritischen Bereich ( $Fr < 1$ ) bewegen, treten bei schnellfahrenden HSC dementsprechend Fahrzustände und Wellenbilder des kritischen und überkritischen Bereiches ( $Fr \geq 1$ ) ein.

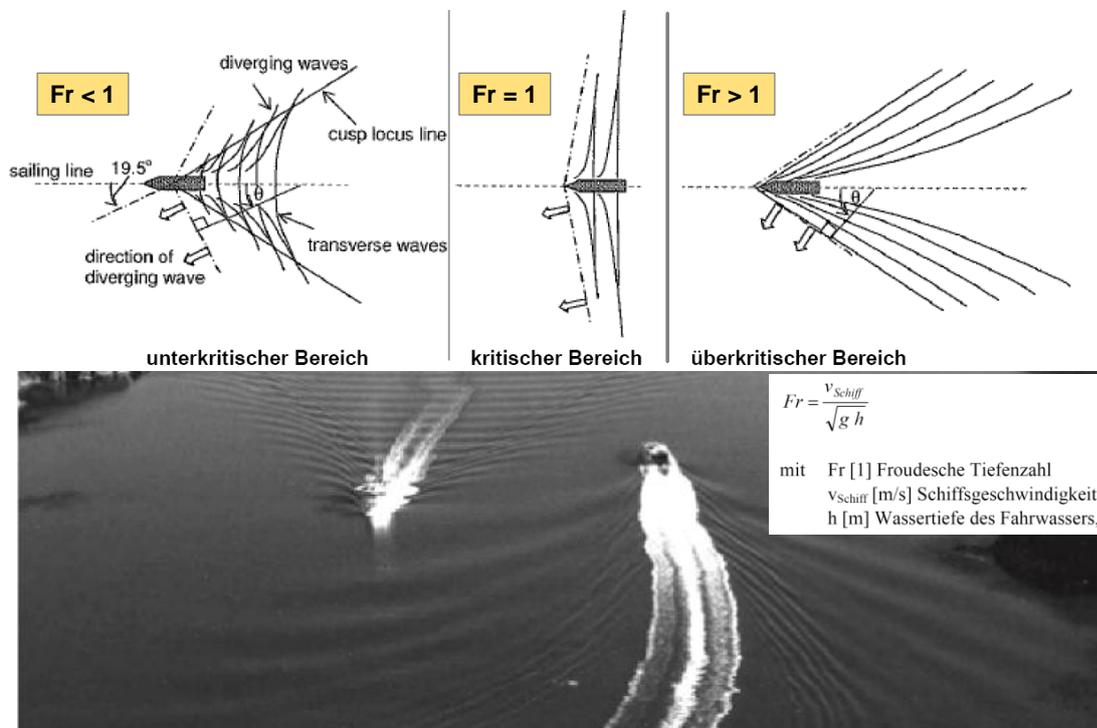


Abbildung 2-2: Wellenausbreitung bei unterkritischer, kritischer und überkritischer Fahrt nach [14] (oben) und deren Wellenausbreitung bei unterkritischer Fahrt (auf dem Foto links) und überkritischer Fahrt (auf dem Foto rechts) nach [15]

Für die im Rahmen der Naturmessungen auf der Unterelbe vor Lühesand zu messenden Schiffswellen ist davon auszugehen, dass diese für den Bereich der Berufsschifffahrt (ausgenommen HSC-Katamarane) ausschließlich im unterkritischen Bereich liegen. Die Katamarane, wie z.B. der Helgoliner (HSC-Katamaran *Halunder Jet*) mit täglichen Fahrten zwischen Hamburg und Helgoland (entsprechend ca. 2 % der Schiffspassagen), verkehren dagegen mit rund 30 kn Fahrt im Projektgebiet im überkritischen Bereich.

## 2.3 Hydraulische Prozesse um ein fahrendes Schiff (Verdränger)

### 2.3.1 Beschreibung der Prozesse

Ein fahrendes Schiff verdrängt ein dem Auftrieb entsprechendes Wasservolumen und verursacht neben der sogenannten Verdrängungsströmung (Bernoulli-Strömung) variierende Druck- und Wasserspiegeländerungen um den Schiffskörper, die sich mit dem Schiff mitbewegen und entsprechend der Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße einschließlich Morphologie verändern.

Vom fahrenden Schiff gehen an Bug, Heck und Schiffslängsseite Wellensysteme unterschiedlicher Charakteristik und Periode aus, die je nach den örtlichen Gegebenheiten zu unterschiedlichen Beanspruchungen der Ufer bzw. deren Sicherungen führen. Das Wellenbild in einem seitlich begrenzten Fahrwasser ist als Aufsicht in Abbildung 2-3 (links) dargestellt. Abbildung 2-3 (rechts) zeigt eine Seitenansicht des Wellenbildes im tiefen- und seitenbegrenzten Fahrwasser sowie ausgewählte Einflussgrößen.

Hinsichtlich der Ausprägung der ablaufenden Prozesse zwischen Schiff und Wasserstraße wird zwischen unbegrenztem und seitlich begrenztem Fahrwasser unterschieden.

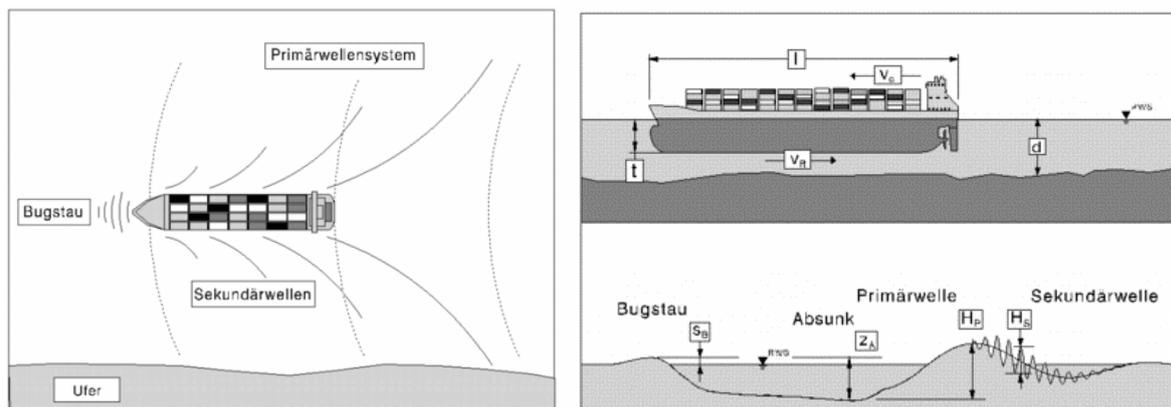


Abbildung 2-3 Wellenbild eines Schiffes in Verdrängerfahrt in seitlich begrenztem Fahrwasser als Aufsicht (links) und Ansicht der Schiffswellensysteme (rechts) (BAW)

Das fahrende Schiff bewirkt vor dem Bug eine Wasserspiegelanspannung, die dem Schiff als Schwallwelle vorausläuft. Direkt am Schiffskörper tritt ein weiterer lokaler Aufstau, der Bugstau  $s_B$ , auf.

Im Bereich des Schiffes wird der bisher ungestörte Gewässerquerschnitt um den Schiffsquerschnitt reduziert und die Strömung muss in einem verminderten Abflussquerschnitt stattfinden (Verdrängungsströmung) (vgl. auch Abbildung 2-4). Durch die daraus resultierende Beschleunigung des Abflusses erhöht sich die Umströmungsgeschwindigkeit gegenüber der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser. Aus energetischen Gründen entsteht eine Absenkung des Wasserspiegels neben dem Schiff. Der Absenk  $z_A$  ist definiert als die Differenz von Bugstau und maximalem Wasserspiegelabfall.

Am Heck des Schiffes findet wieder ein Ausgleich der Abflussverhältnisse statt, was durch eine Wasserspiegelanhebung, die Heckwelle  $H_p$ , gekennzeichnet ist. Die Heckwelle ist Teil des durch den Absenk angeregten langperiodischen Primärwellensystems.

Am Bug und Heck des Schiffes entstehen gleichzeitig kurzperiodische Wellen, die Sekundärwellen  $H_{\text{Sekr}}$ , die sich aus Schrägwellen und Heckquerwellen zusammensetzen. Diese sind besonders von der Schiffsgeschwindigkeit und der Schiffsform abhängig und überlagern das Wellensystem der ausschwingenden Primärwelle.

Die Einflussgrößen auf die Wasserspiegelschwankungen und induzierten Strömungen sind u. a. die Schiffsgeschwindigkeit  $v_s$  durchs Wasser, der Passierabstand  $L$ , die Schiffsabmessungen mit der Länge  $l$ , der Breite  $b$  sowie dem Tiefgang  $t$ , die Wassertiefe  $d$ , die Rückströmung  $v_R$  sowie die Größe des seitlich verfügbaren Wasserkörpers. Diesbezüglich zeigt Abbildung 2-4 in schematischer Weise die Situation eines seitlich begrenzten Fahrwassers, wie es auch für die Unterelbe zutrifft. Anhand definierter Teilquerschnitte ist es möglich, die Ausprägung der schiffsinduzierten Wellen- und Strömungsbelastungen einzuordnen.

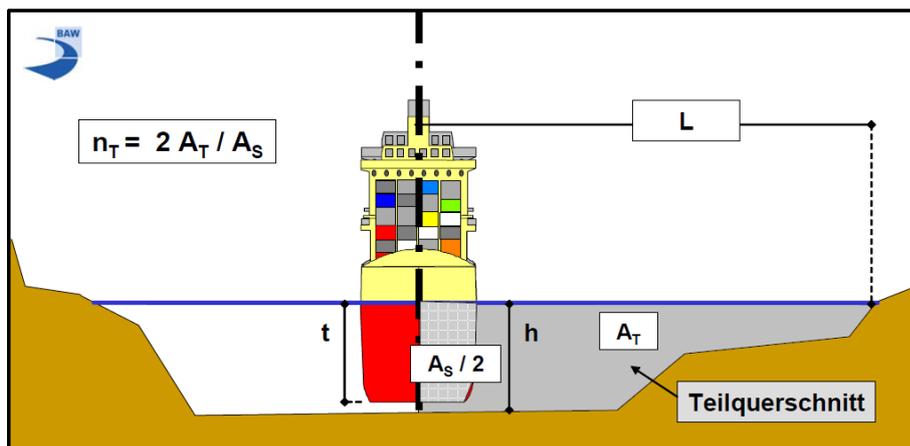


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Teilquerschnittes einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussparametern (BAW, 2006)

Je geringer der Passierabstand eines Schiffes (vgl. Parameter  $L$  in Abbildung 2-4) mit ausreichend Tiefgang und Geschwindigkeit ist, desto

- geringer ist auch der jeweilige Teilquerschnitt und
- höher fallen die schiffsinduzierten Wellen und Strömungsbelastungen aus.

### 2.3.2 Definition der kennzeichnenden Parameter

Die Schiffswellenbelastung setzt sich grundsätzlich zusammen aus

- langperiodischen Wellen (Absunk und Primärwelle) mit einer Wellenperiode von etwa 80 s bis 300 s und
- überlagernden kurzperiodischen Wellen (Sekundärwellen) mit einer Wellenperiode zwischen 2 s und 6 s.

In Abbildung 2-5 wird eine Definition der kennzeichnenden Wellen- und Strömungsparameter auf Grundlage der Ausschreibungsunterlagen der BAW [8] sowie BAW (1996 und 2006) vorgenommen.

Für einen ortsfesten Betrachter werden folgende Änderungen des Ruhewasserspiegels nacheinander sichtbar: Bugstau, Absunk, Primärwelle und das Sekundärwellensystem. Je nach Schiffstyp, Geschwindigkeit, Tiefgang und morphologischen Gegebenheiten fallen diese Änderungen des Wasserspiegels unterschiedlich aus.

Auf die Analyse dieser kennzeichnenden Parameter schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen wird detailliert in Abschnitt 4 eingegangen.

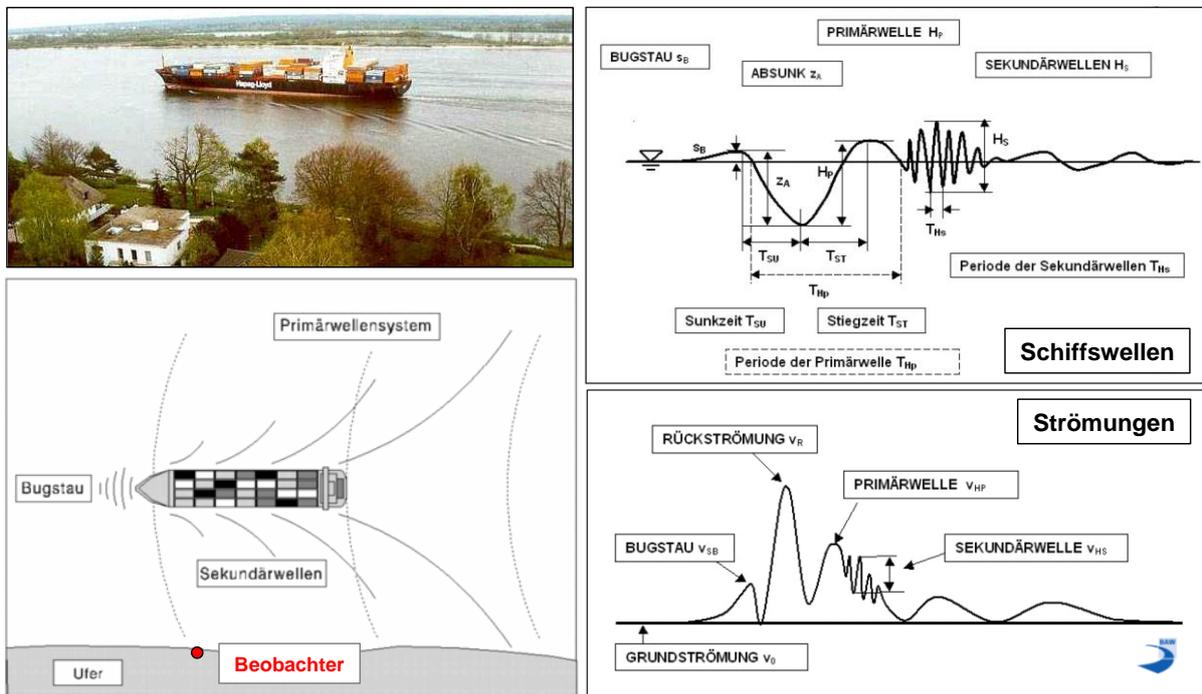


Abbildung 2-5: Definition maßgebender Kenngrößen schiffserzeugter Wellen (oben) und Strömungen (unten) für einen ortsfesten Betrachter nach BAW

## 2.4 Hydraulische Prozesse um ein schnellfahrendes Schiff (HSC - *High Speed Craft*)

### 2.4.1 Beschreibung der Prozesse

Nachfolgende Beschreibungen der Prozesse und des Wellenbildes bei HSC basieren auf den Ausführungen von Heimann et al. (2008). Die Entwicklung des Schiffswellenbildes in Abhängigkeit der Froude-Zahl (bzw. der Schiffsgeschwindigkeit bei Annahme gleicher Bedingungen) wird in Abbildung 2-6 dargestellt.

- Bei langsamer Fahrt im unterkritischen Bereich ( $F_{nh} \sim 0,5$ ) zeigt sich ein typisches Kelvin'sches Wellenbild, wie es von einem Verdränger aufgrund des Bernoulli-Effektes bekannt ist mit den typischen Quer- und Schrägwellen (Divergenzwellen) unter dem Kelvin'schen Ausbreitungswinkel ( $\alpha_K = 19,47^\circ$ ) (vgl. auch Abbildung 2-2).
- Mit zunehmender Froude-Zahl (oder Geschwindigkeit bei gleicher Wassertiefe) breitet sich bei  $F_{nh} \sim 1,0$  das Wellenbild nahezu  $90^\circ$  zur Fahrtrichtung des Schiffes aus (vgl. auch Abbildung 2-2), und die Schiffswellen aus Quer- und Schrägwellen laufen als ein zusammenhängendes Wellensystem in Schiffsrichtung mit.
- Bei weiterer Erhöhung der Froude-Zahl (oder weiterer Erhöhung der Schiffsgeschwindigkeit bei gleicher Wassertiefe, siehe  $F_{nh} \sim 1,5$  in Abbildung 2-6) können die Querwellen dem Schiff nicht mehr folgen und verschwinden allmählich. Die Schrägwellen (*diverging waves*) schwenken in ihrer Ausrichtung wieder zurück und der Ausbreitungswinkel verringert sich zunehmend in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit (siehe  $F_{nh} \sim 2,5$  in Abbildung 2-6 und Abbildung 2-2).

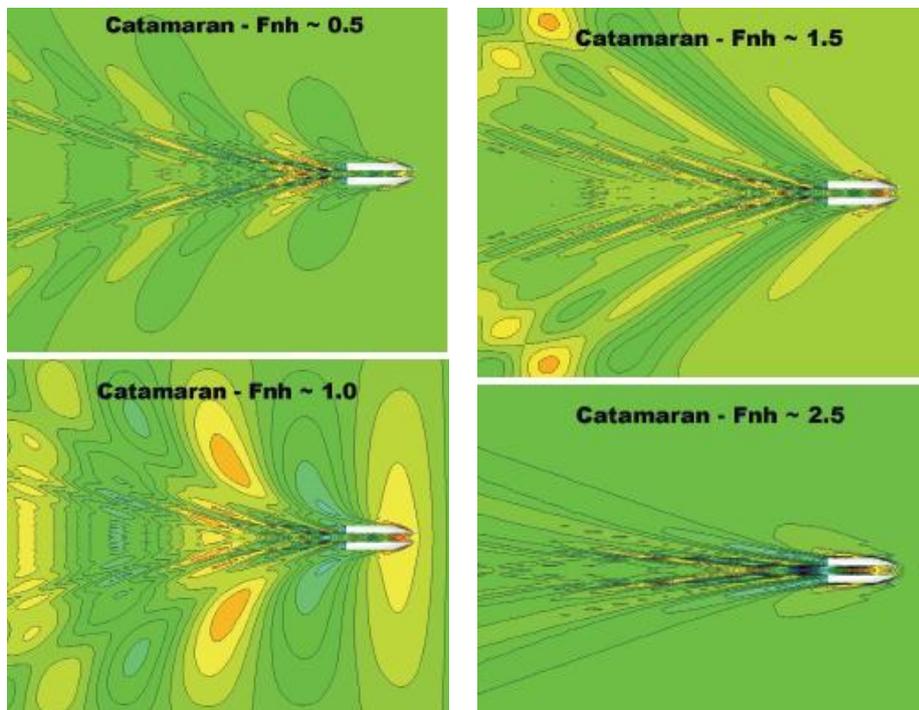


Abbildung 2-6: Entwicklung des Wellenbildes eines beschleunigenden HSC (hier Katamaran) aus unterkritischer Fahrt mit  $F_{nh} \sim 0,5$  (Verdrängerfahrt, oben links) bis zur überkritischen Fahrt mit  $F_{nh} > 1$  (rechts) aus Heimann et al. (2008)

## 2.4.2 Definition der kennzeichnenden Parameter

Für den HSC im unterkritischen Bereich kann das resultierende Wellenbild unter Verwendung der in Abschnitt 2.3 genannten Definitionen beschrieben und analysiert werden.

Vor dem Hintergrund, dass bei der Messkampagne in der Unterelbe vor Lühesand jedoch Schiffspassagen von HSC (z.B. *Halunder Jet*) vornehmlich in überkritischer Fahrt zu erwarten sind, und die Auswertung dieser Schiffswellen aufgrund unterschiedlicher Wellenbilder und schiffsdynamischer Prozesse nicht unter Zugrundelegung der Parameterdefinitionen für Schiffswellen infolge Verdrängerfahrt (vgl. Abschnitt 2.3.2) erfolgen kann, wurde mit der BAW eine gemeinsame Definition der Schiffswellenparameter für Schiffswellen infolge HSC bei überkritischer Fahrt abgestimmt (vgl. Abbildung 2-7).

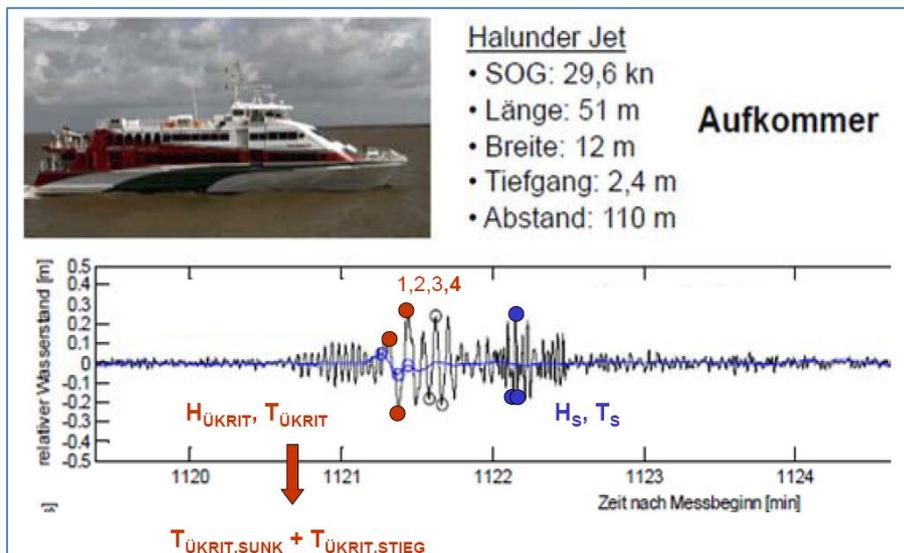


Abbildung 2-7: Empfehlung für die Definition und Auswertung von Schiffswellen aus HSC-Passagen bei überkritischer Fahrt (BAW)

Das typische Wellenbild des HSC zeichnet sich in der überkritischen Fahrt insbesondere dadurch aus, dass es keinen auf dem Bernoulli-Effekt beruhenden Absenk mehr gibt. Langperiodische Wellen in Analogie zum Absenk bei Verdrängerfahrt (blaue Linie in Abbildung 2-7) sind nicht mehr erkennbar.

Im Zeitsignal der Wasserspiegelauslenkungen (vgl. Abbildung 2-7) zeigt sich zeitlich zuerst ein Set aus mehreren langperiodischen Schiffswellen (Divergenzwellen in der Größenordnung  $T_{\text{ÜKRIT}}$  von ca. 10 s), bevor zeitlich anschließend eine Reihe von Sekundärwellen  $H_s$  mit ähnlichen Amplituden jedoch vergleichsweise kleineren Perioden  $T_s$  folgen (vgl. Abbildung 2-7).

Die folgende Abbildung 2-8 zeigt dazu ein Luftbild des Wellenbildes eines HSC bei überkritischer Fahrt ( $F_{nh} \sim 1,5$ ) in dänischen Gewässern. Hier sind die zeitlich zuerst auftretenden, im Wellenfeld äußeren langperiodischen Wellen mit  $T_{\text{ÜKRIT}}$  entlang der Interferenzlinie deutlich zu erkennen. Dahinter, d.h. zeitlich gesehen danach, folgen die kürzeren Sekundärwellen (vgl. auch Abbildung 2-2).



Aerial photograph of wave pattern generated at supercritical speed. The vessel speed is  $V_s = 35$  knots and the water depth is  $h = 13-14$  m. The Froude numbers are  $F_{nh} \sim 1.5$  and  $F_{nl} \sim 0.7$ . The overall length of the catamaran is approximately 78 m.

Abbildung 2-8: Luftaufnahme eines HSC (oben) mit Angabe der schiffsdynamischen Kenngrößen nach Kirkegaard et al. (1998)

Die beschriebene Vorgehensweise und Definition der Schiffswellenparameter infolge HSC-Passage wurde im Rahmen der Auswertung der Schiffswellen entsprechend berücksichtigt. Auf die Analyse dieser kennzeichnenden Parameter schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen wird detailliert in Abschnitt 4 eingegangen.

## 2.5 Grundsätzliche Hinweise zur Überlagerung von Schiffswellen und Seegangswellen

Obwohl der lokale winderzeugte Seegang bei der durchgeführten Messkampagne in der Unterelbe vor Lühesand hinsichtlich der Analyse der Schiffswellen eine eher untergeordnete Bedeutung hat (vgl. auch Abschnitt 3.2.4), werden nachfolgend einige Erläuterungen zur Überlagerung von Schiffs- und Seegangswellen gegeben.

Die Interaktion von Seegang und Schiffswellen stellt für den Bereich der Seeschiffahrtsstraße oder die offene See einen Prozess dar, der bislang noch nicht in ausreichendem Maße wissenschaftlich untersucht wurde. Vor diesem Hintergrund kann an dieser Stelle das Phänomen an sich beschrieben, aber nicht hinreichend quantifiziert werden. Auf wissenschaftliche Arbeiten oder Veröffentlichungen kann aus demselben Grund nicht zurückgegriffen werden.

Generell kann hinsichtlich der Interaktion von Schiff, Schiffswellen und Windwellen zwischen dem unmittelbaren Nahbereich um das Schiff, der von der Interaktion unmittelbar beeinflusst wird, und dem umgebenden Fernbereich (je nach Art der Interaktion beträgt die Entfernung vom Schiff mehrere Schiffslängen) unterschieden werden. Die Abbildung 2-9 stellt dies schematisch dar.

Beobachtungen zeigen grundsätzlich, dass das fahrende Schiff im unmittelbaren Nahfeld um den Schiffskörper das winderzeugte Wellenfeld, bestehend aus gebundenen Wellen, nachhaltig stört. An der Schiffshaut treten Diffraktions- und Reflexionseffekte der Windwellen auf. Gleichzeitig erzeugt das fahrende

Schiff durch die Verdrängung des Wassers in der Wasserstraße ein eigenes Wellenfeld, bestehend aus Primär- und Sekundärwellen, die sich mit dem gestörten Windwellenfeld überlagern (vgl. vorangegangene Abschnitte). Das resultierende, überlagerte Wellenfeld ist dabei abhängig vom fahrenden Schiff (Größe, Geschwindigkeit, Verdrängung) und dem erzeugten Schiffswellenfeld, vom Windwellenfeld mit den zugehörigen Wellenparametern (Wellenhöhe und -länge) sowie dem Grad der Störung (Interaktion Schiff mit Seegang).

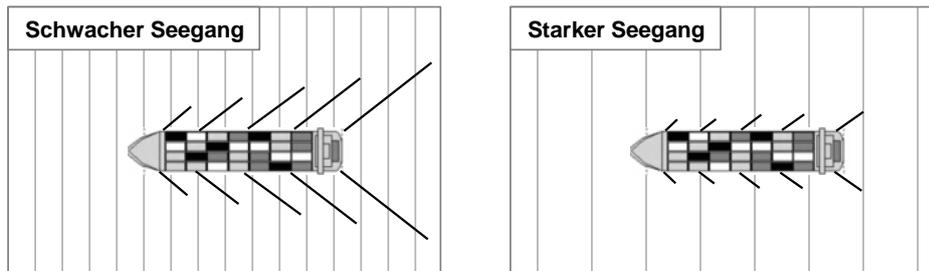


Abbildung 2-9: Interaktion von Schiffs- und Windwellen in Abhängigkeit des Seeganges (schematisch)

Theoretisch und energetisch betrachtet kommt es zu einer zufälligen aber vollständigen Überlagerung von Wind- und Schiffswellen. Praktisch gesehen treten jedoch energieverzehrende Prozesse auf, wie z.B. das Wellenbrechen erhöhter überlagerter Wellen, so dass nicht von einer vollständigen, sondern von einer deutlich reduzierten Überlagerung der Wellen ausgegangen werden muss. Als erste Anhaltswerte können folgende Annahmen für die praktische Bearbeitung getroffen werden:

- Für Windwellen bis zur gleichen Größenordnung wie Sekundärwellen (Windwellen  $\leq$  Sekundärwellen) kann angenommen werden, dass das schiffsinduzierte Sekundärwellenfeld gegenüber den Windwellen dominiert. Dabei kann es unter bestimmten Umständen auch zu entsprechenden, dem Zufall unterliegenden Überlagerungen von Schiffs- und Windwellen kommen, so dass ein neues, verändertes Wellenfeld entsteht und auf die Ufer zuläuft, wo es den bekannten Umformungsprozessen unterliegt.
- Für höhere Seegänge (Windwellen  $>$  Sekundärwellen) kann das Schiff diesen nicht mehr so nachhaltig stören, so dass mehr und mehr das Windwellenfeld dominiert. Die im Nahfeld erzeugten Schiffswellen können sich nicht weiter ausbreiten und werden vom dominierenden Seegang „geschluckt“ (vgl. Abbildung 2-9, rechte Darstellung).

Aus Naturmessungen ist bekannt, dass bei Schiffswellenmessungen an offenen Küsten mit erhöhtem Windwelleneinfluss die Analyse der Sekundärwellen nur sehr eingeschränkt möglich ist (vgl. Arbeiten von FÜHRBÖTER [15]). Eine Schiffspassage wird in diesen Fällen im Wesentlichen nur durch die Primärwelle detektiert und beschrieben. Die Sekundärwellen können signaltechnisch von den umgebenden Windwellen nicht mehr richtig unterschieden werden, was insbesondere auf die ähnlichen Wellenperioden zurückzuführen ist.

### 3 Messkampagne Lühesand

#### 3.1 Revierübersicht und Lage der Messlokationen

Das Revier der Unterelbe und das Projektgebiet mit den beiden Messlokationen M3 und M2 am südlichen Fahrrinnenrand an der Elbinsel Lühesand wird in der folgenden Abbildung 3-1 dargestellt. Beide Messlokationen liegen rund einen Kilometer auseinander und weisen ganz unterschiedliche Unterwasserprofile auf (vgl. Abbildung 3-2).

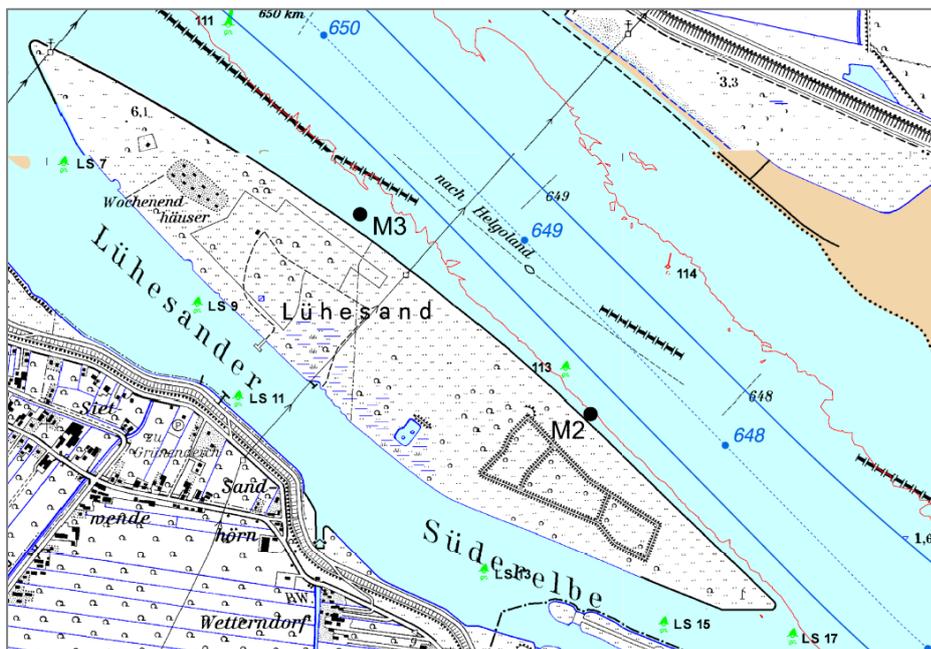


Abbildung 3-1: Projektgebiet mit Kennzeichnung der Messlokationen M2 und M3 (Planausschnitt 90213-S-01a)

Die genauen Koordinaten der beiden Messlokationen werden nachfolgend in Tabelle 3-1 angegeben:

Tabelle 3-1: Gauß-Krüger-Koordinaten der beiden Messlokationen M2 und M3

Messlokation	RW	HW	Elb-Kilometer
M2	3539893,82	5940033,11	648,40
M3	3539089,35	5940731,59	649,46

Mit Verweis auf die Darstellung der Querprofile im Bereich der Messlokationen M3 und M2 in Abbildung 3-2 ist festzuhalten, dass die Unterwassertopografie an den beiden Lokationen sehr unterschiedlich aussieht, insbesondere auch dadurch dass die Fahrrinne in Richtung oberstrom zur Elbinsel Lühesand schwenkt. Der Abstand zum südlichen Fahrrinnenrand beträgt lediglich 200 m an M3 bzw. 110 m an M2.

An der unterstromigen Messlokation M3 fällt die Böschung im Unterwasserbereich relativ flach ab mit einer Neigung von etwa 1:30, ehe mit einem Absatz und einer steileren Böschung die Fahrrinne beginnt.

An der oberstromigen Messlokation M2 fällt hingegen die Unterwasserböschung sehr steil innerhalb von ca. 30 m nahezu bis auf die Fahrrinntiefe ab. Dies entspricht etwa einer mittleren Böschungsneigung von 1:3 im Gegensatz zu 1:30 bei M3.

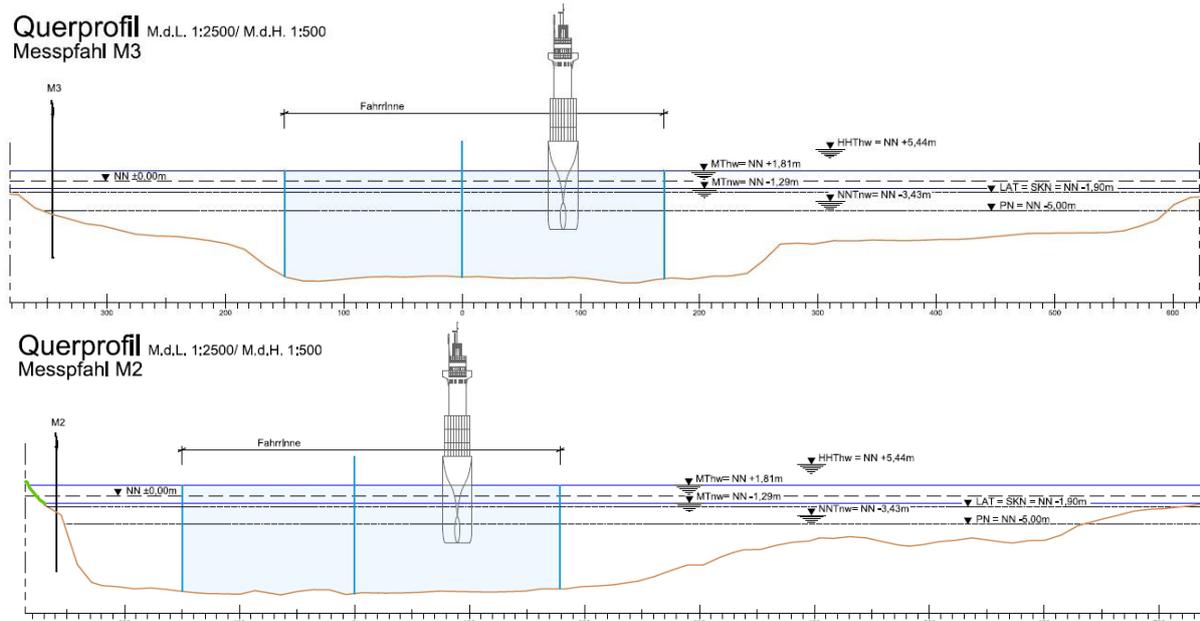


Abbildung 3-2: Querprofile an M3 (oben) und M2 (unten) mit Kennzeichnung der Messpfähle und der Fahrrinne (Ausschnitt Plan Nr. 90213-S-05a)

Allein der topografische Verlauf der beiden Querprofile lässt erwarten, dass an der Messlokation M2 aufgrund des geringeren Abstandes zur Fahrrinne und der deutlich steileren Unterwasserböschung insgesamt höhere schiffsinduzierte Belastungen zu erwarten sind.

Im folgenden Abschnitt wird auf die Revierbedingungen im Projektgebiet eingegangen. Daran anschließend folgen Erläuterungen zum Messkonzept (Abschnitt 3.3), Projektablauf und Übersicht der verfügbaren Messdaten (Abschnitt 3.4), Dokumentation und Darstellung der Messdaten (Abschnitt 3.5) sowie Angaben zu Datenformaten (Abschnitt 3.6) und zur Datenablage (Abschnitt 3.7).

## 3.2 Revierbedingungen

### 3.2.1 Hydrologie

Das Projektgebiet liegt im Tideregime des Elbästuars. Die nächstgelegenen Pegel sind die Pegel Hetlingen (Elb-km 650,55) und Lühort (645,50), die in Abbildung 3-3 sowie im beiliegenden Plan 90213-S-01a gekennzeichnet sind.

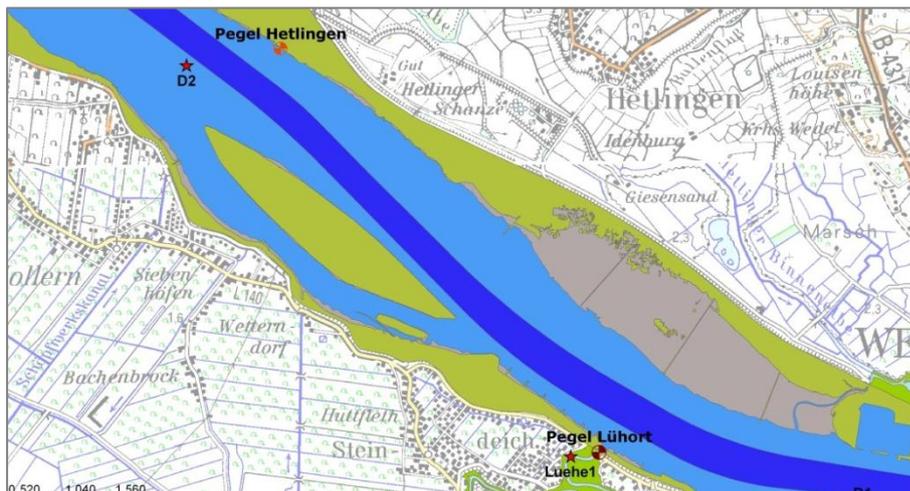


Abbildung 3-3: Lage der projektrelevanten Pegel Hetlingen und Lühort

Die folgende Tabelle 3-2 fasst die wesentlichen Tidekennwerte für die beiden projektrelevanten Pegel zusammen. Weitere Informationen zur Hydrologie, wie z.B. ein Auszug des Tidekalenders 2011 für den Projektzeitraum oder Summenhäufigkeiten der Tidehoch- und -niedrigwasserstände im Abflussjahr 2008 sind in der Anlage 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3-2: Tidekennwerte der maßgebenden Pegel im Projektgebiet

Pegel	Hetlingen	Lühort
<b>Tidekennwerte</b> in [mNN]	Elb-km 650,55	Elb-km 645,50
HHThw mit Datum	6,14 03.01.1976	6,21 03.01.1976
MThw (2001/2010)	1,82	1,85
MTnw (2001/2010)	-1,28	-1,32
NNTnw mit Datum	-3,42 02.03.1987	-3,35 02.03.1987

### 3.2.2 Morphologie

Informationen zur Morphologie im Projektgebiet liegen nur begrenzt vor. Neben den in Abbildung 3-2 dargestellten Querschnitten im Bereich der Messlokationen werden weitere Profile im beiliegenden Plan 9013-S-02 dargestellt.

Darüber hinaus sind in Anlage 3.2 Planausschnitte der Morphologie an M2 (Email des WSA Hamburg vom 21.04.2011) und an M3 (aus der Leistungsbeschreibung [1]) vorhanden.

### 3.2.3 Windverhältnisse

Die Unterelbe befindet sich aus meteorologischer Sicht im Bereich des Westwindgürtels der Nordhalbkugel.

Aus der nachfolgend in Abbildung 3-4 dargestellten Windstatistik für die nahegelegene Messstation Stadersand ist erkennbar, dass Winde aus südwestlichen Richtungen am häufigsten auftreten. Ferner sind die vorherrschenden Windrichtungen, Eintrittswahrscheinlichkeiten für Windgeschwindigkeiten größer vier Beaufort, durchschnittliche Windgeschwindigkeiten sowie durchschnittliche Lufttemperaturen monatsweise aufgeführt.

#### Stadersand (STADE)

Statistiken basieren auf Messwerten zwischen 9/2003 - 11/2011 täglich von 7:00 bis 19:00 lokaler Zeit.

Monat des Jahres	Jan 01	Feb 02	Mär 03	Apr 04	Mai 05	Jun 06	Jul 07	Aug 08	Sep 09	Okt 10	Nov 11	Dez 12	GES 1-12
Vorherrschende Windrichtung	↖	↖	↙	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
Wind-Wahrscheinlichkeit > = 4 Beaufort (%)	49	42	50	40	35	33	41	35	39	38	47	44	41
Durchschnitt Windgeschwindigkeit (Knots)	12	11	12	10	10	10	10	10	11	10	11	11	10
Durchschnittl. Lufttemp. (°C)	0	n/a	0										
Wähle Monat (Hilfe)	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr

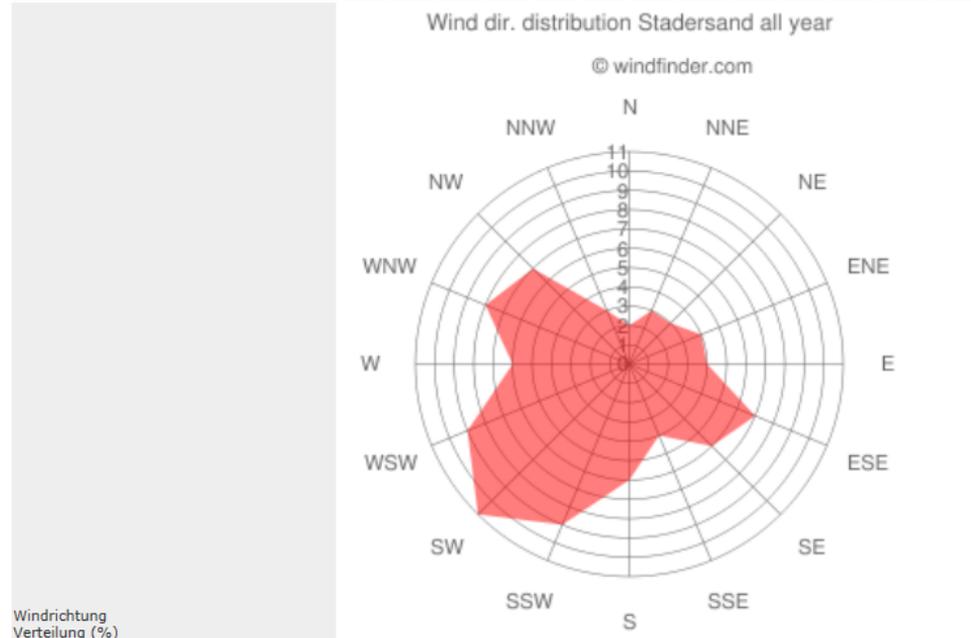


Abbildung 3-4: Windstatistik für die Station Stadersand (www.windfinder.de)

Die BAW hat projektbezogen eine Wetterstation auf Lühesand eingerichtet. Auf diese Messdaten wurde im Zuge der durchzuführenden Naturmessungen zugegriffen [4].

Hinsichtlich der detaillierteren Beschreibung der Windverhältnisse während der Messkampagne zwischen April und August 2011 wird auf den Abschnitt 3.5.3 verwiesen.

### 3.2.4 Seegang

Beim winderzeugten Seegang wird grundsätzlich differenziert hinsichtlich seiner Erzeugung zwischen lokal erzeugtem kurzperiodischen Seegang (Windwellen) und außerhalb des Untersuchungsgebietes erzeugten langperiodischen Seegangswellen (Dünungswellen).

Seegangswellen variieren stark entlang der Unterelbe in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und -richtung, der Nähe zur Elbmündung, dem Expositionsgrad des jeweiligen Elbabschnittes (Luv- oder Leelage) sowie als Funktion des Wasserstandes (Tidebewegung). Höhere Wasserstände erlauben dem Seegang weiter in die Elbe hineinzulaufen. Bei niedrigen Wasserständen wird der Seegang aufgrund der morphologischen Gegebenheiten entsprechend stark gedämpft.

In der folgenden Tabelle 3-3 werden die maximalen signifikanten Wellenhöhen auf Grundlage von Modellrechnungen der BAW für die drei Bereichen der Unterelbe zusammengefasst. Für den Projektbereich der Naturmessungen Lühesand (Bereich I) liegen zwar keine konkreten Modellergebnisse vor, es ist jedoch davon auszugehen, dass der Seegang im Bereich I noch geringere Werte hat als für den Bereich II angegeben werden.

Tabelle 3-3: Maximale signifikante Wellenhöhen in den drei Bereichen der Unterelbe zwischen Hamburg und Cuxhaven, vgl. Anlage 3 in [6]

Bereich	Abb. in Anlage 3	Südufer	Fahrrinne	Nordufer
<b>Bereich I Hamburger Hafen bis Schwarztonnensand</b>				
Sturmflut 1994	-	-	-	-
Wind aus SW	-	-	-	-
Wind aus SO	-	-	-	-
<b>Bereich II Schwarztonnensand bis Brunsbüttel (Angaben bis Elbe-km 670)</b>				
Sturmflut 1994	-	-	-	-
Wind aus SW	116, 118	0,3	0,6	0,5
Wind aus SO	124, 126	0,6	0,7	0,6
<b>Bereich III Brunsbüttel bis zur See</b>				
Sturmflut 1994	110	1,6	2,2	1,6
Wind aus SW	114	0,4	0,8	0,8
Wind aus SO	122	0,6	0,6	0,6

Der Seegang im Projektgebiet ist aufgrund der relativ geschützten Lage, der topografischen Bedingungen und begrenzten Fetchlängen im Vergleich zu den auftretenden Schiffswellen von untergeordneter Bedeutung. Passierende Schiffe erzeugen dagegen wesentliche größere Wellen. Zur Untersetzung dieser These wurde stellvertretend für den Projektbereich das Seegangsklima an der Messlokation M3 mit Hilfe des Seengangs atlas [12] analysiert. Die zugehörigen Ergebnisse sind als Memo 90213-07 in der Anlage 3.3 beigefügt.

Aus diesen Betrachtungen wird deutlich, dass maximale Seegangswellen (Windwellen) bei entsprechenden Winden aus nordwestlicher Richtung auftreten. Seegang in der dokumentierten Größenordnung bei Winden aus Nordwest kann ebenfalls bei Winden aus südöstlichen Richtungen auftreten. Höhere Tidewasserstände wirken sich zusätzlich seegangserhöhend aus.

### 3.2.5 Schiffswellen

Schiffswellen und deren Belastungen auf Ufer und Deckwerke stellen für den Bereich der gesamten Unterelbe aufgrund der Höhe und Wirkung der auftretenden Belastungen sowie der hohen Anzahl von Schiffspassagen ein wichtiges, aber auch sensibles Thema dar.

So weist auch das WSA Hamburg in dem als Anlage 3.4 beiliegenden Flyer auf *Gefährdungen durch Sog und Wellenschlag* hin und kennzeichnet einzelne Lokationen, an denen entsprechende Rücksichtnahme zur Minderung der Schiffswellenbelastung erforderlich ist. Die charakteristischen auf den Schiffstyp bezogenen Verläufe von Wellenbildern der generierten Schiffswellen werden in der folgenden Abbildung 3-5 dargestellt.

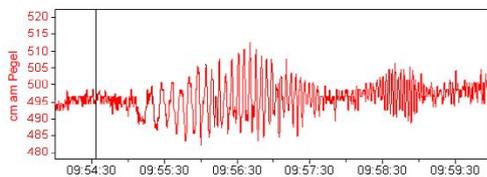


Abb. 2: Wellenbild eines Katamarans bei 31,3 Knoten

Abbildung 2 zeigt das Wellenbild einer Schnellfähre (Katamaran) mit einer Länge von 41 m und einer Breite von 10,1 m bei einem Tiefgang von 2,4 m. Es werden ausschließlich steile Sekundärwellen erzeugt. Primärwellen existieren nicht.



Katamaran Schnellfähre

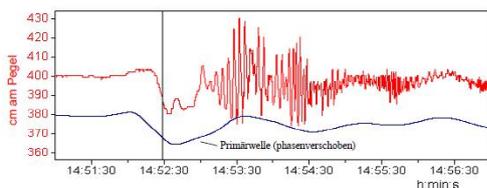


Abb. 3: Wellenbild eines Feederschiffes bei 17,2 Knoten

Abbildung 3 zeigt das Wellenbild eines Feederschiffes mit einer Länge von 117 m und einer Breite von 18,1 m bei einem Tiefgang von 6,8 m. Die Primärwelle ist im Vergleich zu den Sekundärwellen eher ungefährlich.



Feeder-Containerschiff

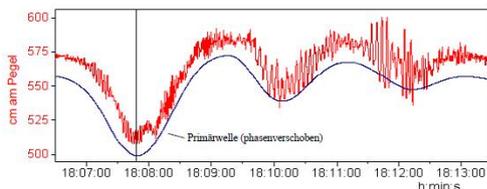


Abb. 4: Wellenbild eines Post-Panmax Containerschiffes bei 15,5 Knoten

Abbildung 4 zeigt das Wellenbild eines Großcontainerschiffes (Post-Panmax) mit einer Länge von 299 m und einer Breite von 42,8 m bei einem Tiefgang von 12,7 m. Es wird eine sehr große Primärwelle erzeugt, gefolgt von ebenfalls großen Sekundärwellen. Beide Wellengruppen sind geeignet, im ungünstigen Fall Schäden zu verursachen.



Post-Panmax Containerschiff

Abbildung 3-5: Auftretende Schiffswellenbilder in der Unterelbe (WSA Hamburg, vgl. Anlage 3.4)

Die verschiedenen Schiffstypen verursachen unterschiedliche Schiffswellen aufgrund der auftretenden schiffsdynamischen Prozesse. Auf die Erläuterungen in Abschnitt 2 wird verwiesen.

Der Projektbereich Lühesand wird maßgeblich von den schiffsinduzierten Wellen- und Strömungsbelastungen dominiert. Die folgende Abbildung 3-6 zeigt beispielhaft ein Luftbild einer Schiffspassage bei der Messlokation M3. Maximale schiffserzeugte Belastungen im derzeitigen Istzustand entlang der Unterelbe fasst die folgende Tabelle 3-4 zusammen.

Für weitergehende Erläuterungen zu Schiffswellen und durchgeführten Naturmessungen wird auf das umfassende Gutachten der BAW [7] zu ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung verwiesen.



Abbildung 3-6: Beispiel einer Schiffspassage und auftretender Schiffswellen vor Lühesand (entspricht etwa der Messlokation M3) (Quelle: google)

Für den Projektbereich Lühesand ist gemäß Tabelle 3-4 mit folgenden maximalen schiffserzeugten Belastungen zu rechnen:

- maximaler Absunk  $z_A$  von 1,1 m,
- maximale Primärwellenhöhe  $H_P$  von 1,1 m und
- maximale Sekundärwellenhöhe  $H_{Sek}$  von 1,0 m.

Bei den Projektvorbereitungen für die Auslegung der Messtechnik zur Erfassung der Schiffswellen wurde diese Größenordnung der maximal zu erwartenden Schiffswellen sogar noch angehoben (Prognose BAW:  $z_A \sim 1,5$  m,  $H_P \sim 1,5$  m,  $H_{Sek} \sim 1,0$  m, vgl. Abschnitt 3.3).

Tabelle 3-4: Maximale schiffserzeugte Belastungen im derzeitigen Istzustand entlang der Unterelbe gem. [7]

Bereich	Absunk $z_a$ [m]	Primärwellenhöhe $H_P$ [m]	Sekundärwellenhöhe $H_{Sek}$ [m]
<b>Bereich I</b> <i>Hamburger Hafen bis Schwarztonnensand</i> ( $v_s = 10$ kn)	0,5 - 1,1	0,5 - 1,1	1,0
<b>Bereich II</b> <i>Schwarztonnensand bis Brunsbüttel</i> ( $v_s = 12$ kn)	1,2	1,4	1,1
<b>Bereich III</b> <i>Brunsbüttel bis zur See</i>	ohne Angabe lokal bis 0,5 *)	ohne Angabe lokal bis 0,5 *)	< 1,0 lokal bis 1,4 *)

\*) lokal bedeutet hier zwischen Osteriff und Altenbruch

Die in Tabelle 3-4 zusammengefassten Angaben beruhen maßgeblich auf durchgeführten Untersuchungen und Naturmessungen, die in den vergangenen Jahren entlang der Unterelbe durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 3-7). Die analysierten Maximalwerte schiffserzeugter Wellen entlang der Unterelbe werden in der folgenden Tabelle 3-5 zusammengestellt.

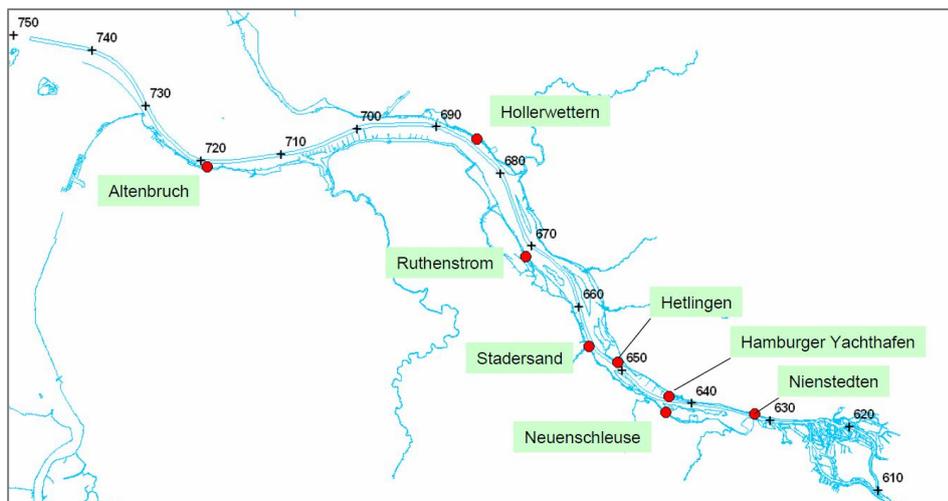


Abbildung 3-7: Übersicht durchgeführter Naturmessungen zur Erfassung der Schiffswellen [7]

Tabelle 3-5: Zusammenstellung von Maximalwerten schiffserzeugter Wellen aus Naturmessungen entlang der Unterelbe [7]

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

\*<sup>(1)</sup> im Vergleich zu Windwellen zu vernachlässigen (FÜHRBÖTER et al., 1988)\*<sup>(2)</sup> zur örtlichen Windsee bei Starkwind nachrangig (NLW, 1989; bei BAW 1996)\*<sup>(3)</sup> >5.000 Ereignisse (Messzeit 84 Tage)

### 3.2.6 Schiffsverkehr

Die Unter- und Außenelbe ist das meistbefahrene Revier Deutschlands. Die WSD Nord dokumentiert mit Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 die Schiffsbewegungen in der Deutschen Bucht in 2009 mit über 66.000 Schiffsbewegungen auf der Elbe. Im Vergleich dazu hat der Nord-Ostsee-Kanal etwa die Hälfte der Schiffsbewegungen.

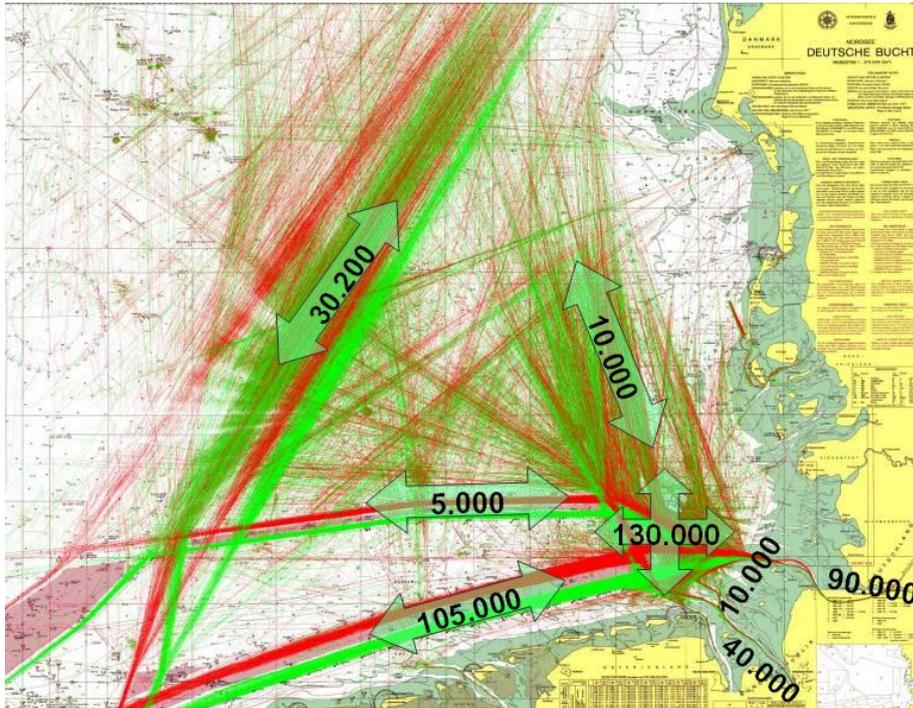


Abbildung 3-8: Schiffsbewegungen in 2009 (WSD Nord)

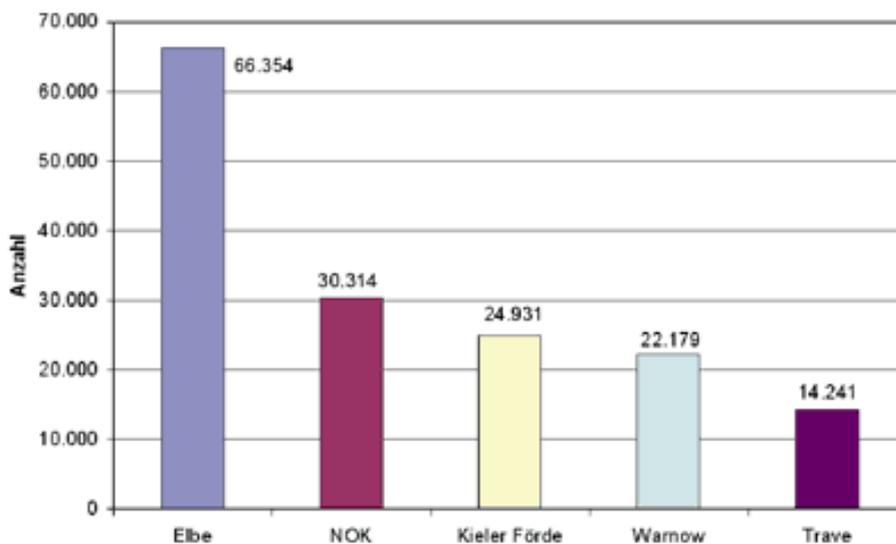


Abbildung 3-9: Anzahl der Schiffsbewegungen in 2009 im Vergleich (www.wsv.de)

Zusätzlich liegt dem Bericht die Verkehrsstatistik für das Jahr 2008 als Anlage 3.5 bei. Weitere Informationen zur Schiffsstatistik konnten nicht recherchiert werden.

### 3.2.7 Eisverhältnisse

Aus gegebenem Anlass wird nachfolgend in aller Kürze auf die Eisverhältnisse im Projektgebiet eingegangen. So musste die Messkampagne aufgrund der sich abzeichnenden Eisverhältnisse im Dezember 2010 verschoben werden.

Detaillierte Erläuterungen und Statistiken zu den Eisverhältnissen an der Nordseeküste und auf der Elbe sind vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in [13] dokumentiert. Die Häufigkeit des Eisvorkommens auf der Elbe kann Abbildung 3-10 und detailliert Anlage 3.6 entnommen werden.

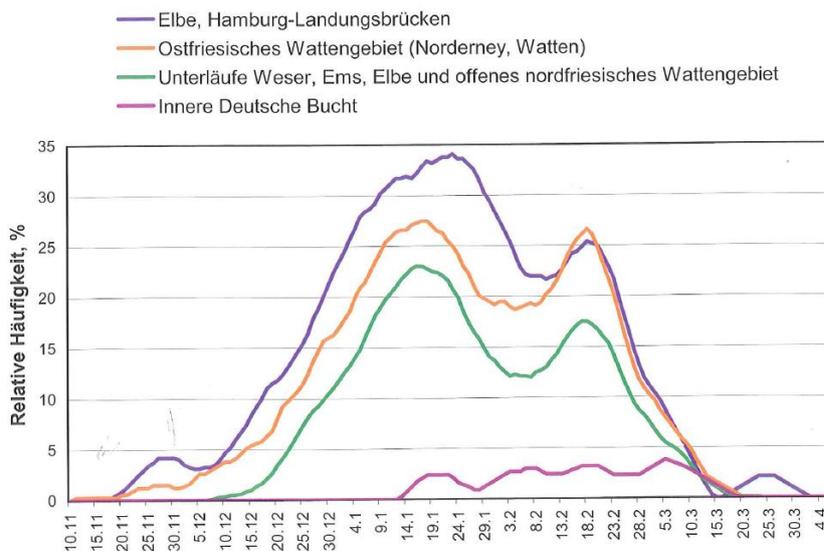


Abbildung 3-10: Häufigkeit des Eisvorkommens im deutschen Nordseeküstengebiet im Zeitraum 1961 bis 2000 [13]

Kontinuierliche Tidenströme und der intensive Schiffsverkehr sorgen dafür, dass auf der Elbe fast nur Treibeisformen vorkommen. Im Fall westlicher Wind wird das Eis dann zusammengeschoben, was in Stromengen zu Behinderungen der Schifffahrt führen kann. Die folgende Abbildung 3-11 verdeutlicht die Eisverhältnisse im Bereich Lühesand. Schiffswellen unterliegen bei derartigen Bedingungen einer sehr starken Dämpfung und breiten sich nur begrenzt aus.



Abbildung 3-11: Fahrendes Schiff (Abgänger) bei Eisgang auf Höhe Lühesand  
Fotoquelle: Hamburger Abendblatt vom 13.02.2012)

### 3.3 Messkonzept und Instrumentierung

Das Messkonzept wurde von der Fa. ARGUS erarbeitet. Unter Verweis auf Abbildung 3-12 und Anlage 4 wird nachfolgend das Messkonzept und die Instrumentierung kurz erläutert.

Die beiden Messlokationen M2 und M3 wurden als autarke Stationen mit eigener Stromversorgung (Brennstoffzelle und Windrad) und einem Pufferakku identisch konzipiert.

Folgende Messgeräte (Gerätedetails siehe Anlage 4) kamen bei jeder der beiden Messlokationen zum Einsatz:

- Wellendraht (AWG IV), ca. 9 m lang zur Erfassung der Wasserspiegelauslenkungen
- Strömungssonde (HS-Engineers) zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten.

Der Wellendraht wurde in seiner Länge auf den ursprünglich Anfang Dezember 2010 geplanten Einbau, die zu erwartenden höheren Wasserstände im Winter sowie die von der BAW erwarteten maximalen Schiffswellenereignisse, insbesondere den Absunk (Prognose BAW: Absunk ~ 1,5 m, Primärwellenhöhe ~ 1,5 m, Sekundärwellenhöhe ~ 1,0 m, vgl. Abschnitt 3.2.5) ausgelegt.

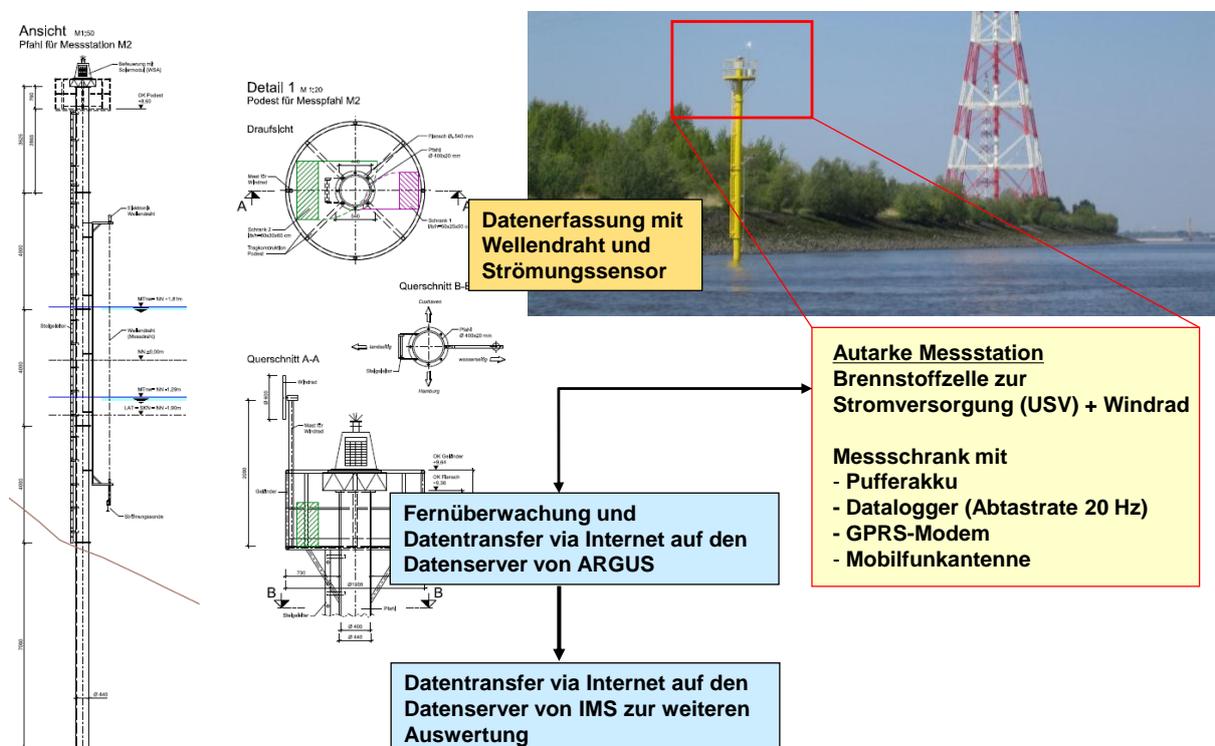


Abbildung 3-12: Messkonzept mit Darstellung der eingesetzten Messgeräte (Gerätekennblätter s. Anlage 4)

## Datenerfassung und -übertragung

Die Messdaten wurden von einem Datalogger mit der Abtastrate von 20 Hz aufgezeichnet, mittels Modem online zur Fa. ARGUS auf einen Daten-Server übertragen und tageweise abgelegt. Von dort erfolgte die Datenübertragung zum FTP-Server von IMS. Aufgrund der eingesetzten Messtechnik stehen zeit-synchrone Messdaten der Messlokationen M2 und M3 zur Verfügung.

Die Kalibrierung der Messgeräte erfolgte im Vorwege. Die Wellendrähte wurden vor Beginn der Messkampagne im Außenbezirk Wedel des WSA Hamburg kalibriert (vgl. Memo 90213-01 in Anlage 2). Die zugehörigen Kalibrierprotokolle sind in Anlage 4 dokumentiert. Bei den Strömungssonden wurden die Messbereiche der Geschwindigkeiten im Vorwege voreingestellt. Eine Kalibrierung war nicht erforderlich.

Weitere Gerätedetails zu der Brennstoffzelle, dem Modem sowie dem Datalogger können Anlage 4 entnommen werden.

## Installation / Deinstallation

Die Messgeräte wurden am 04.04.2011 und 05.04.2011 mit Unterstützung des WSA Hamburg installiert. Die Strömungssonde war an einem verlängerten Träger des Wellendrahtes befestigt. Das Messgerät wurde so konfiguriert und eingebaut, dass die Messebene der Strömungssonde einen Meter über der Sohle liegt.

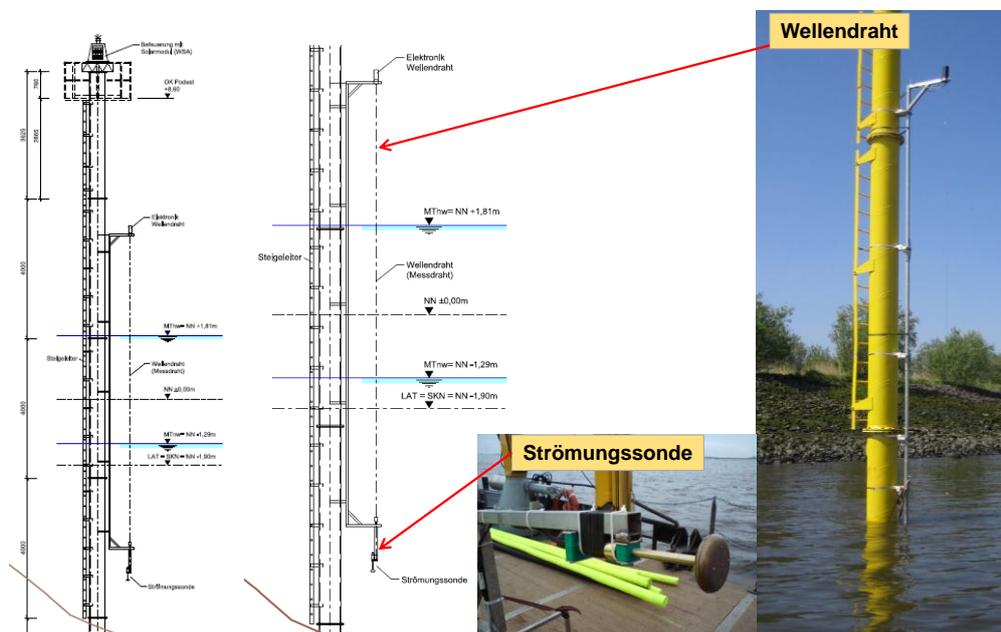


Abbildung 3-13: Installation der Messgeräte  
(vgl. Folie 7 der Präsentation in Anlage 11)

Die Instrumentierung an den beiden Messpfählen wird auf dem Plan 90213-S-03 dargestellt und dokumentiert.

Weitere Details zur Messkampagne und zur Instrumentierung können der Präsentation in Anlage 11 (Seiten 4 bis 14) entnommen werden. Details zum Einbau sowie Einbausketze sind in Anlage 4 dokumentiert.

### 3.4 Projektablauf und Übersicht verfügbarer Messdaten

#### Projektablauf

Die Planung und Vorbereitung der Messkampagne erfolgte im November/Dezember 2010. Aufgrund des starken Wintereinbruchs und der Eisbildung auf der Elbe Anfang Dezember 2010 wurde der Einbau der Messgeräte und damit die gesamte Messkampagne in Abstimmung mit dem WSA Hamburg verschoben. In Anlage 2 sind aus diesem Grunde neben dem Projektprotokoll auch Eisberichte des BSH sowie das IMS-Memo 90213-01 angefügt, welches die vorbereitenden Arbeiten beim Abz. Wedel dokumentiert.

Die Vorbereitungen wurden im März 2011 wieder aufgenommen. Die Installation der Messgeräte erfolgte dann Anfang April 2011 mit Unterstützung des WSA Hamburg.

Als offizieller Messzeitraum wurde in der Folge der Zeitraum zwischen dem 18.04.2011 und dem 10.07.2011 (insgesamt 12 Wochen) festgelegt. In diesem Zeitraum liegen die auftragsmäßig zu erbringenden Messzeiträume mit

- insgesamt rund 9 ½ Wochen Messzeit an M2 und M3 und
- 18 Tagen Messzeit mit offizieller Rücksichtnahmepflicht.

Baugrunderkundungen im Bereich Lühesand forderten eine Rücksichtnahme der passierenden Schiffe. Aus diesem Grunde wurde die Messkampagne verlängert, um daraus in der Folge die Wirkung einer Rücksichtnahme auf die schiffserzeugten Belastungen auswerten zu können.

Der Rückbau der Messgeräte erfolgte Ende August 2011 ebenfalls mit Unterstützung des WSA Hamburg.

#### Übersicht verfügbarer Messdaten

In der Anlage 5 werden sämtliche Informationen zur Messkampagne tabellarisch komprimiert, tagesgenau aufgelistet und dokumentiert.

Bis zum offiziellen Ende der Messkampagne am 10.07.2011 wurden insgesamt für

- die Messlokation M2  
Daten über 64 Messtage ohne Rücksichtnahme und  
Daten über 18 Messtage mit Rücksichtnahme
- die Messlokation M3  
Daten über 66 Messtage ohne Rücksichtnahme und  
Daten über 18 Messtage mit Rücksichtnahme

aufgezeichnet, d.h. zeitsynchrone Messdaten der Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen in einem Messtakt von 20 Hz.

Bei einem Datenvolumen von rd. 100 Mbyte pro Tag und Messlokation ergab sich damit eine Gesamtdatenmenge von 16,8 GByte.

Die Messlokationen M2 und M3 wurden noch bis Ende August 2011 weiterbetrieben. Weitere Details und zwischenzeitliche Ereignisse können dem Projektprotokoll in Anlage 2 entnommen werden.

Folgende Messdaten wurden vom WSA Hamburg zur Verfügung gestellt:

- Hydrologische Messdaten der Pegel Hetlingen und Lühort als Minutenwerte
- Meteorologische Messdaten der Wetterstation der BAW auf Lühesand [4] als 10-Minutenwerte
- Schiffspassagedaten für die beiden Messlokationen M2 und M3.

### 3.5 Dokumentation und Darstellung der Messdaten

#### 3.5.1 Allgemeine Hinweise

Nachfolgend wird die Dokumentation der Messdaten vorgenommen. Eine grafische Darstellung der Messdaten erfolgt aufgrund des Datenumfanges nur auszugsweise. Auf die Übersicht der Messdaten in der Anlage 5 wird verwiesen.

Die an den Messlokationen M2 und M3 erfassten Messdaten (Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen) sind als ASCII-Datensätze in der Anlage 13 *DVD – Messdaten der Messlokationen M2 und M3* tageweise, in dem entsprechenden Aufnahmeblatt und einzeln für jede Messlokation abgelegt.

Alle weitere Messdaten (Wasserstände, meteorologische Daten, Schiffspassagen, etc.) sind entweder im ASCII-Format oder als EXCEL-Dateien in Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/02 Messdaten* abgelegt.

Die grafische Darstellung aller Messdaten erfolgt thematisch geordnet in Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/03 Bilder-Zeitreihen*.

Nachfolgend wird exemplarisch auf die einzelnen Messdaten eingegangen.

#### 3.5.2 Hydrologische Messdaten

Für die Messkampagne wurden die Messdaten der Pegel Hetlingen (Elb-km 650,55) und Lühort (Elb-km 645,50) vom WSA Hamburg zur Verfügung gestellt. Die Messdaten sind im ASCII-Format und als EXCEL-Dateien in Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/02 Messdaten/Hydrologie* abgelegt.

Aus diesen Wasserständen wurden die Wasserstände an den Messlokationen M2 und M3 direkt mittels Interpolation ermittelt. Diese hydrologischen Messdaten sind sowohl in die Darstellung zusammen mit den meteorologischen Daten (vgl. Abbildung 3-14) als auch in die Darstellung als Tagesplot (vgl. Abbildung 3-16) mit den Messdaten der Lokationen M2 und M3 eingegangen. Für weitere Darstellungen wird auf Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/03 Bilder-Zeitreihen* verwiesen. Auf eine separate Darstellung der hydrologischen Zeitreihen wird aus diesem Grunde verzichtet.

### 3.5.3 Meteorologische Messdaten

Die Messdaten der BAW-Wetterstation auf Lühesand sind im ASCII-Format und als EXCEL-Dateien in Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/02 Messdaten/Meteorologie* abgelegt. Diese Messdaten werden in aufbereiteter Form zusammen mit den Wasserstandsdaten an M2 und M3 und dem analysierten Seegang in Abbildung 3-14 dargestellt.

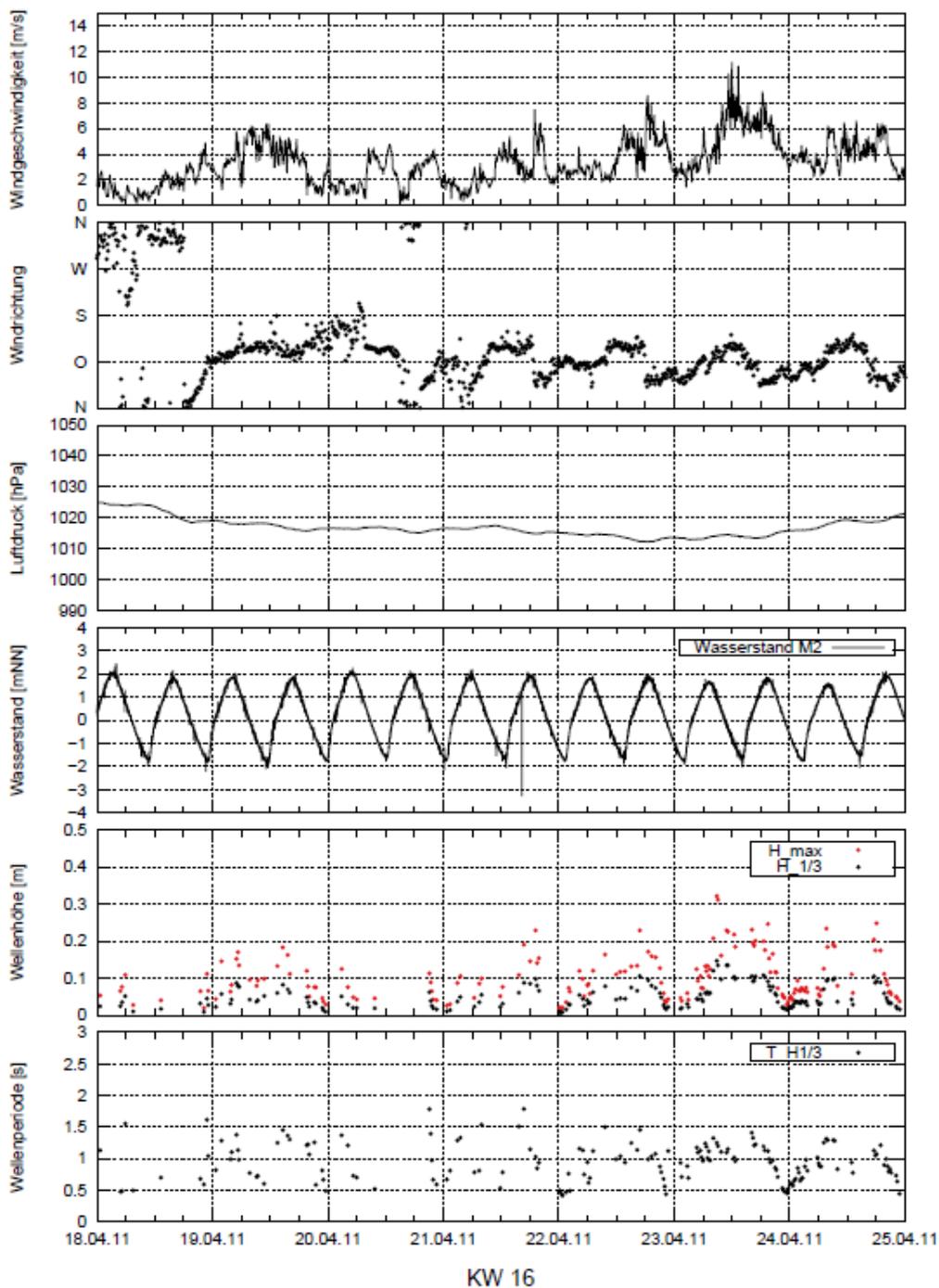


Abbildung 3-14: Exemplarische Darstellung der meteorologischen Parameter, der hydrologischen Daten und der analysierten Seegangsbedingungen für die 16. KW 2011 an der Messlokation M2



### 3.5.5 Wasserspiegelauslenkungen und Tidenströmungen

Für jede Messlokation und jeden einzelnen Messtag wurden die Messdaten der Wasserspiegelauslenkung, Strömung, Schiffspassage und Pegelwasserstand als sogenannter Tagesplot aufbereitet (vgl. Abbildung 3-16). Die roten Punkte der registrierten Schiffspassage geben dabei nicht nur eine Information über den genauen Schiffspassagezeitpunkt sondern auch über die Länge des zugehörigen Schiffes (rechte y-Achse in oberster Darstellung der Abbildung 3-16).

Dass mit größeren Schiffen tendenziell auch größere Schiffswellenereignisse verbunden sind, lässt sich aus den zeitlich begrenzten Schwankungen der Wasserstandsmessdaten in Abbildung 3-16 gegenüber dem ansonsten ruhigeren Verlauf deutlich ablesen.

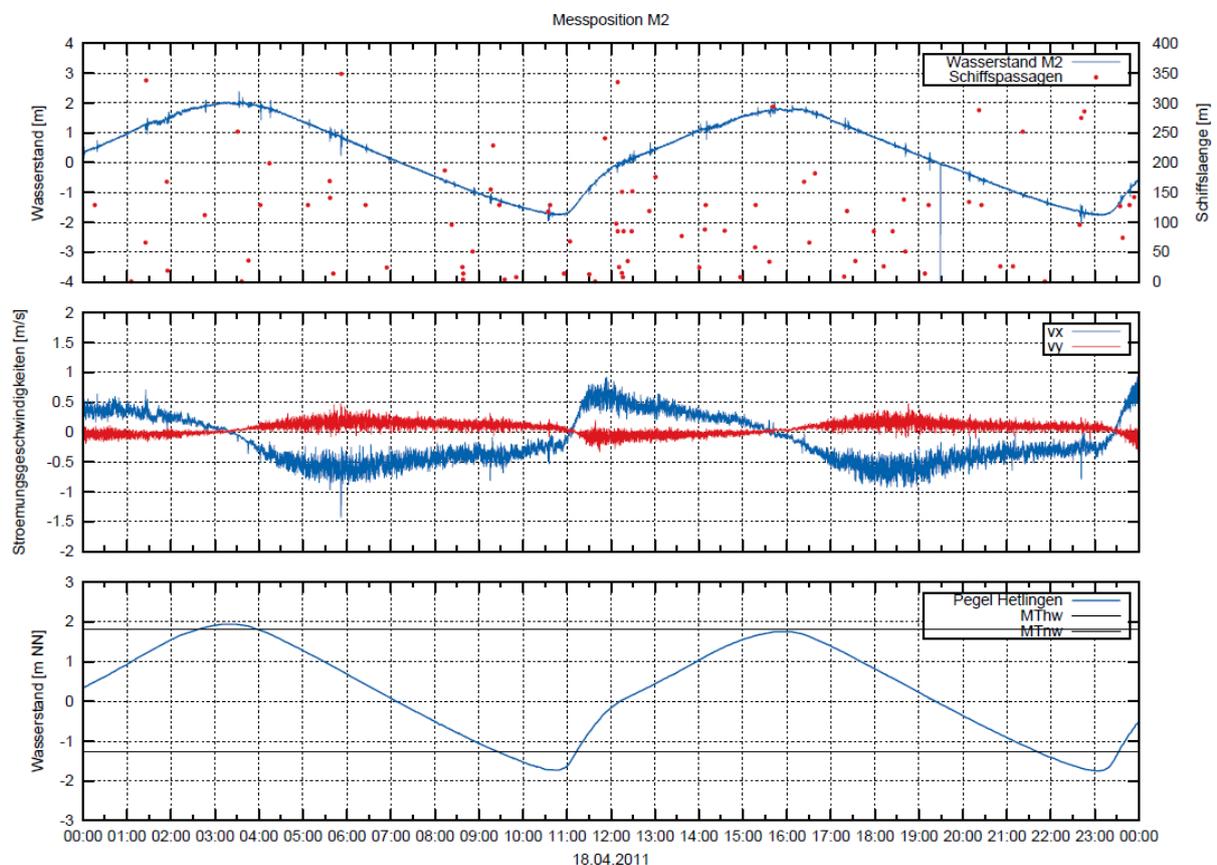


Abbildung 3-16: Exemplarische Zeitreihe für die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen zusammen mit registrierten Schiffspassagen als Tagesplot an der Messlokation M2

Diese Tagesplots für die Messdaten an den Messlokationen M2 und M3 sind in Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/03 Bilder-Zeitreihen/Tagesplots* abgelegt.

### 3.6 Datenformate

Sämtliche Messdaten liegen im ASCII-Format vor. Aufbereitete Daten werden u.a. im EXCEL-Format abgelegt. Zeitreihendarstellungen sind als Bildformate (wmf oder jpg) abgespeichert.

### 3.7 Datenablage

Sämtliche Messdaten, aufbereitete Daten und Ergebnisse sind auf den beiliegenden Datenträgern der Anlage 12 als aufbereite Daten und Anlage 13 mit Messdaten als Rohdaten gesichert. Nachfolgend werden einige Hinweise zur Struktur der Datenablage gegeben.

Anlage 12 - DVD – Daten und Auswertungen (1 DVD)

- 01 Pläne
- 02 Messdaten  
Messdaten zu Hydrologie, Meteorologie, Schiffspassagen
- 03 Bilder-Zeitreihen  
Zeitreihen zu Hydrologie, Meteorologie und Seegang sowie Tagesplots für die Messungen an M2 und M3
- 04 Auswertung  
Datensätze zu Schiffspassagen, Schiffsstatistik, Schiffswellenereignissen und zum Seegang
- 05 Auswertung-Zeitreihen  
Zeitreihen von Schiffswellenereignissen und analysiertem Seegang
- 06 Fotos  
zur Messkampagne

Anlage 13 - DVD – Messdaten der Messlokationen M2 und M3 (6 DVD)

Die ASCII-Datensätze der Messdaten (Rohdaten) sind tageweise abgelegt nach Messlokation M2 und M3. Bei einem Datenvolumen von rd. 100 Mbyte pro Tag und Messlokation ergibt sich eine Gesamtdatenmenge von 16,8 GByte.

Die Rohdaten sind pro Messlokation auf jeweils drei DVDs abgelegt.

## 4 Auswertung der Schiffswellenereignisse

### 4.1 Auswertungskonzept

Für die Messkampagne Lühesand wurde ein erprobtes Auswertungskonzept (vgl. [2] und [3]) für die Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse aufgestellt und durchgeführt, welches in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt und nachfolgend kurz erläutert wird. Für detaillierte Erläuterungen zur Analyse der Schiffswellen wird auf die Unterlagen in Anlage 6 verwiesen.

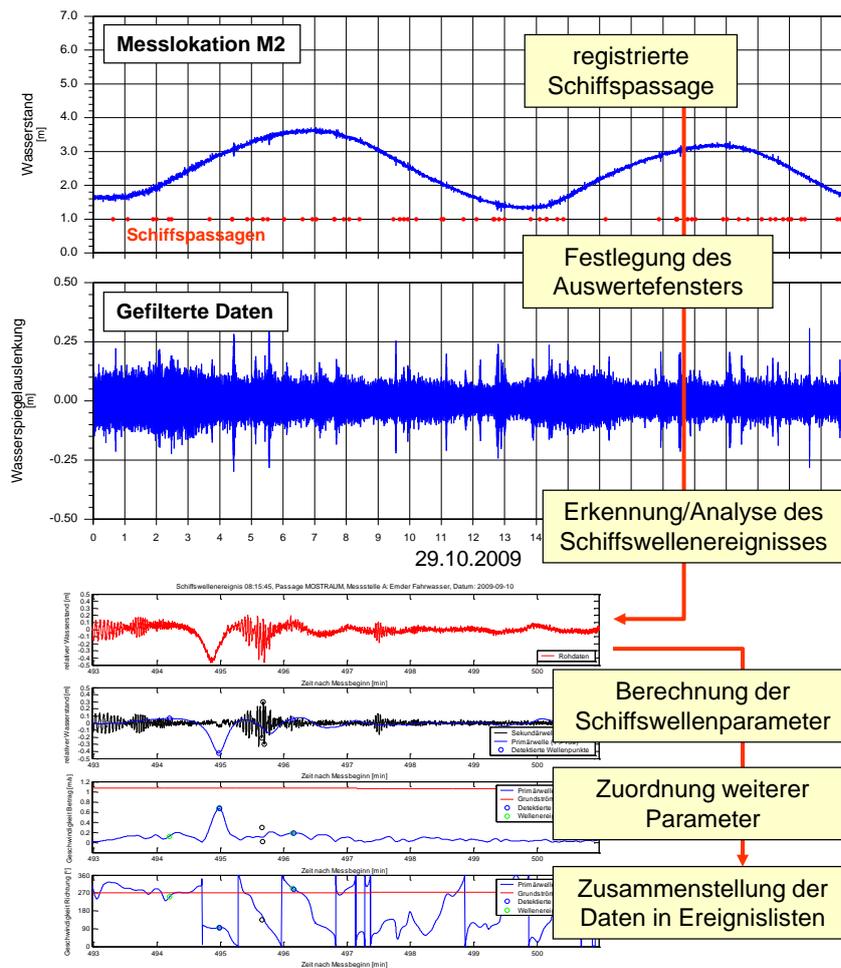


Abbildung 4-1: Auswertungskonzept zur Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse und zugehöriger Parameter

Folgende Arbeitsschritte wurden für jede der beiden Messlokationen M2 und M3 durchgeführt:

- Plausibilitätskontrolle der Messdaten einschließlich Schiffspassagen
- Aufbereitung weiterer Daten (Hydrologie, Schiffspassagen etc.)
- Filterung des Messdatentagesatzes, um den langperiodischen Tideanteil und den kurzperiodischen Anteil (Seegang) herauszufiltern.

- Auf Grundlage der registrierten Schiffspassagen an den einzelnen Messlokalationen wird in dem zeitlich aufgespannten Passagefenster nach einem zugehörigen Schiffswellenereignis gesucht. In Abstimmung mit der BAW handelt es sich um ein Schiffswellenereignis, wenn
  - ein Absink  $z_A \geq 0,05$  m oder
  - eine Primärwellenhöhe  $H_p \geq 0,10$  merkannt wird.
- Aus der Zeitreihe können dann die definierten Schiffswellenparameter analysiert werden.
- Die Analysesoftware speichert jedes Schiffswellenereignis als separate Bilddatei.
- Zugehörige Parameter zu Hydrologie und Schiffspassage werden zugeordnet und gemeinsam in einer Gesamtliste der analysierten Schiffswellenereignisse gesammelt.
- Im Nachgang werden die analysierten Schiffswellenereignisse noch einmal im Rahmen des Postprocessings geprüft. Die höchsten 50 Ereignisse werden noch einmal gesondert geprüft und ggf. die analysierten Schiffswellenparameter manuell modifiziert.
- Im weiteren Verlauf werden die analysierten Schiffswellenereignisse statistisch verarbeitet zu entsprechenden Häufigkeitsverteilungen.

#### 4.2 Definition der Mess- und Auswertungszeiträume

Für die Auswertung der Messkampagne Lühesand wurden folgende Definitionen getroffen (vgl. Anlage 5):

- offizieller Messzeitraum:  
18.04.2011 bis 10.07.2011 (12 Wochen)
- Auswertungszeitraum der Schiffswellenereignisse ohne Rücksichtnahme:  
22.04.2011 bis 04.05.2011, 22.05.2011 bis 26.06.2011 und 04.07.2011 bis 10.07.2011 (8 Wochen)
- Auswertungszeitraum der Schiffswellenereignisse mit Rücksichtnahme:  
07.05.2011 bis 20.05.2011 (2 Wochen)

#### 4.3 Postprocessing

Das Postprocessing dient der nachträglichen Kontrolle der analysierten Schiffswellenereignisse.

Im Einzelnen wurden die mit der Auswertesoftware automatisierte Erkennung der Schiffswellenereignisse und die Ermittlung der charakteristischen Schiffswellenparameter überprüft. Sofern die Überprüfung ergab, dass die Lage der Auswertepunkte in den Datenzeitreihen nicht korrekt definiert wurde, erfolgte eine manuelle Korrektur dieser Punkte und eine Neuberechnung der charakteristischen Schiffswellenparameter.

Für detaillierte Erläuterungen zur Schiffswellenanalyse wird auf die Unterlagen in Anlage 6 verwiesen.

### 4.4 Übersicht der analysierten Schiffswelleneignisse

In Anlage 5 sind alle relevanten Informationen zur Messkampagne, zu den erfassten Messdaten und analysierten Schiffswelleneignissen getrennt für die beiden Messlokalationen zusammengefasst. Im Detail sind dort u.a. folgende Informationen tageweise gekennzeichnet (vgl. Abbildung 4-2):

- Anzahl der registrierten Schiffspassagen
- Kennzeichnung der Zeiträume mit Rücksichtnahme
- Anzahl der Fenster für Seegangsanalyse
- Anzahl der analysierten Schiffswelleneignisse für Verdränger und HSC (Halunder Jet),

Aus dieser Zusammenstellung ergibt sich folgender Gesamtüberblick der Schiffswelleneignisse für die Messkampagne Lühesand:

- Messlokation M2
  - 5.042 analysierte Schiffswelleneignisse im gesamten Messzeitraum,
  - 131 (= 2,6 %) der 5.042 Ereignisse entfallen auf den *Halunder Jet* (HSC),
  - 3.201 analysierte Schiffswelleneignisse im Auswertungszeitraum (8 Wochen) ohne Rücksichtnahme und
  - 937 analysierte Schiffswelleneignisse im Auswertungszeitraum (2 Wochen) mit Rücksichtnahme
- Messlokation M3
  - 5.141 analysierte Schiffswelleneignisse im gesamten Messzeitraum,
  - 133 (= 2,6 %) der 5.141 Ereignisse entfallen auf den *Halunder Jet* (HSC),
  - 3.213 analysierte Schiffswelleneignisse im Auswertungszeitraum (8 Wochen) ohne Rücksichtnahme und
  - 864 analysierte Schiffswelleneignisse im Auswertungszeitraum (2 Wochen) mit Rücksichtnahme

KW	Datum	Messdaten WSA Hamburg / BAW			registrierte Schiffspassagen				Analyse Seegang		Messstation Lühesand M2					Messstation Lühesand M3												
		AIS-Daten	Pegel Hellinggen	Pegel Lühort	Meeroroi. Daten / BAW	Anzahl gesamt an M2	Anzahl gesamt an M3	Auswertungszeitraum ohne Rücksichtnahme M2	Auswertungszeitraum mit Rücksichtnahme M2	Auswertungszeitraum ohne Rücksichtnahme M3	Auswertungszeitraum mit Rücksichtnahme M3	Rücksichtnahme	Messstation M2	Messstation M3	Zeitraum der Messung	Datenqualität [Tage]	Anzahl Messstage (Rücksichtnahme)	Anzahl analysierte Schiffswelleneignisse ohne Rücksichtnahme Halunder Jet	Anzahl analysierte Schiffswelleneignisse ohne Rücksichtnahme	Ereignisse mit Rücksichtnahme	Zeitraum der Messung	Datenqualität [Tage]	Anzahl Messstage (Rücksichtnahme)	Anzahl analysierte Schiffswelleneignisse ohne Rücksichtnahme Halunder Jet	Anzahl analysierte Schiffswelleneignisse ohne Rücksichtnahme	Ereignisse mit Rücksichtnahme		
16	18.4.2011					91	89				20	10		1,0	1,0		1	60					1,0	1,0		2	58	
	19.4.2011					111	110				0	23		0,4	1,4		0	5					1,0	2,0		2	73	
	20.4.2011					79	123				0	10		0,0	1,4		0	1					1,0	3,0		0	61	
	21.4.2011					94	93				0	15		0,3	1,8		1	26					1,0	4,0		2	62	
	22.4.2011					86	84	86	84		29	30		1,0	2,8		2	59	59				1,0	5,0		1	58	58
	23.4.2011					69	69	69	69		43	40		1,0	3,8		2	55	55				1,0	6,0		2	54	54
	24.4.2011					50	49	50	49		43	39		1,0	4,8		2	33	33				1,0	7,0		2	27	27
27	4.7.2011					74	74	74	74		39	43		1,0	57,7		2	61	61				1,0	60,0		2	59	59
	5.7.2011					112	112	112	112		17	21		1,0	58,7		2	71	71				1,0	61,0		2	85	85
	6.7.2011					75	71	75	71		38	39		1,0	59,7		2	50	50				1,0	62,0		2	49	49
	7.7.2011					84	84	84	84		21	21		1,0	60,7		2	56	56				1,0	63,0		2	53	53
	8.7.2011					75	73	75	73		27	29		1,0	61,7		2	50	50				1,0	64,0		2	48	48
	9.7.2011					82	80	82	80		29	23		1,0	62,7		2	55	55				1,0	65,0		2	53	53
	10.7.2011					78	77	78	77		17	19		1,0	63,7		1	52	52				1,0	66,0		1	59	59
						<b>Summe</b>	<b>7.453</b>	<b>7.378</b>	<b>4.754</b>	<b>4.682</b>	<b>1.370</b>	<b>1.353</b>					<b>131</b>	<b>4.911</b>	<b>3.201</b>	<b>937</b>				<b>133</b>	<b>5.008</b>	<b>3.213</b>	<b>864</b>	
						Passagen/Woche	621	615		29%		29%											29%				27%	

Abbildung 4-2: Übersicht Messkampagne Lühesand (Auszug aus Anlage 5)

## 5 Darstellung der Ergebnisse

### 5.1 Allgemeines

In Anlehnung an das vorgestellte Auswertungskonzept wurden die Messdaten systematisch ausgewertet und weitergehend analysiert.

Für die beiden Messlokalationen M2 und M3 konnte festgestellt werden, dass rund 70 % der passierenden Schiffe auch ein Schiffswellenereignis (vgl. Definition in Abschnitt 4.1) erzeugt, was die folgende Abbildung 5-1 für den Messzeitraum verdeutlicht.

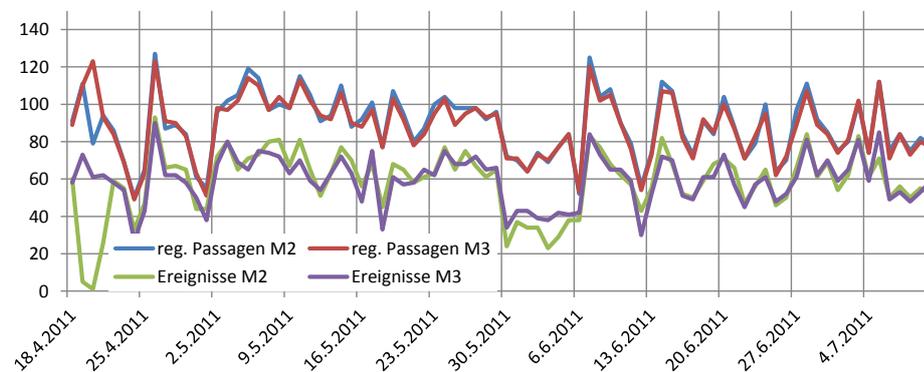


Abbildung 5-1: Registrierte Schiffspassagen und Schiffswellenereignisse an den Messlokalationen N2 und M3 über den Messzeitraum

### Schiffswellenereignisse

Die Schiffswellenereignisse wurden lokationsweise mit Hilfe einer eigenen IMS-Software (MATLAB-Anwendung) analysiert sowie in separaten EXCEL-Dateien zusammengefasst und weiter aufbereitet. Auf dieser Grundlage wurden weitere statistische Auswertungen der Schiffswellen vorgenommen, auf die in diesem Abschnitt lokationsweise Bezug genommen wird.

Zu jedem Schiffswellenereignis gehören

- der Zeitpunkt des Schiffereignisses (= Zeitpunkt des maximalen Absunks),
- die analysierten Parameter der schiffserzeugten Wellen,
- die analysierten Parameter der schiffserzeugten Strömungen,
- die zugeordnete Schiffspassage mit allen zugehörigen Parametern,
- die zugeordneten analysierten Seegangparameter signifikante Wellenhöhe  $H_s$  und mittlere Periode  $T_{m02}$ ,
- der zugehörige Tidewasserstand des maßgebenden Pegels sowie die jeweilige Tidephase und
- die ermittelte Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser (*Fahrt durch Wasser*).

## Übertragbarkeit der Strömungsmessungen zur Ermittlung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser

Ein maßgebender Faktor bei der Bewertung der Schiffswellenparameter ist die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser. Bei der Ermittlung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser wurde davon ausgegangen, dass die Strömungsmessungen an den Messlokationen M2 und M3 auf die Strömungsverhältnisse in der Fahrrinne direkt übertragbar sind. D.h. die Strömungsmessungen wurden direkt zur Ermittlung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser herangezogen.

## Statistische Auswertung der Schiffswellenereignisse

Die statistische Auswertung der analysierten Schiffswellenereignisse orientiert sich sowohl an der Leistungsbeschreibung als auch an den analysierten Ergebnissen und Erfahrungen (vgl. [2] und [3]). So werden im Folgenden differenzierte Statistiken für jede Messlokation durchgeführt sowohl für alle analysierten Schiffswellenereignisse als auch für die höchsten Ereignisse eines Kollektivs.

Für die Darstellung der höchsten Schiffswellenereignisse wurde unter Berücksichtigung der analysierten Ereignisse festgelegt, dass die Darstellung der 50 höchsten Schiffswellenereignisse für die Kriterien maximaler Absunk, maximale Primär- und Sekundärwelle ausreichend ist. Dies lässt sich damit begründen, dass die höchsten 50 Ereignisse die Parameter im oberen Bereich soweit abbilden, so dass nach dem 50. Rang keine signifikanten Änderungen des jeweiligen Parameters zwischen den einzelnen der Größe nach geordneten Schiffswellenereignissen erfolgen.

## Seegang

Die Seegangsparameter an den beiden Messlokationen M2 und M3 sind geprägt von den maßgebenden hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen. Eine Einschätzung der Seegangsverhältnisse wurde in Abschnitt 3.2.4 gegeben. In dem folgenden Abschnitt 5.3 wird auf die ermittelten Seegangsverhältnisse eingegangen.

## Hinweise

Im nachfolgenden Abschnitt 5.2 wird zunächst auf die Schiffspassagen eingegangen, die während des Messzeitraumes registriert wurden. Abschnitt 5.3 behandelt die ermittelten Seegangsverhältnisse an den beiden Messlokationen M2 und M3.

In den Abschnitten 5.4 und 5.5 wird auf die Schiffswellenereignisse an den Messlokationen M2 und M3 und deren Analyse eingegangen. Vergleichende Betrachtungen sind in Abschnitt 5.6 zu finden. In Abschnitt 5.7 werden vergleichende Betrachtungen zu den Schiffswellenereignissen mit und ohne Rücksichtnahme vorgestellt und erläutert. In diesen Abschnitten wird der Parameter Sekundärwellenhöhe mit  $H_s$  angesprochen.

Abschnitt 5.8 geht auf Schiffswellenereignisse des *Halunder Jet* ein.

Auf die Ergebnispräsentation in Anlage 11 wird für alle nachfolgenden Erläuterungen verwiesen.

## 5.2 Schiffspassagen

Die vom WSA Hamburg bereitgestellten Daten der Schiffspassagen für M2 und M3 wurden für den Messzeitraum statistisch aufbereitet. Auf die Erläuterungen in Abschnitt 3.5.4 wird verwiesen. Die Aufbereitung dieser Messdaten ist in Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/04 Auswertung/Schiffspassagen* getrennt für die Messlokationen M2 und M3 abgelegt. Nachfolgend wird auf einzelne Details dieser Auswertung näher eingegangen.

### 5.2.1 Statistik der Schiffspassagen

Die beiden Messlokationen M2 und M3 liegen vergleichsweise dicht nebeneinander. In Tabelle 5-1 wird repräsentativ für die Messkampagne Lühesand die Statistik der Schiffspassagen an der Messlokation M2 zusammengestellt.

Tabelle 5-1: Statistik der Schiffspassagen für den Messzeitraum am Beispiel der Messlokation M2 (vgl. Anlage 9)

Statistik über alle Passagen						Schiffslänge		Schiffsbreite		Tiefgang		SOG			Passierabstand		
Kz	Anzahl	%	Aufk	Abg		[m] Min	[m] Max	[m] Min	[m] Max	[m] Min	[m] Max	[kn] Min	[kn] Mittel	[kn] Max	[m] Min	[m] Mittel	[m] Max
Schiffspassagen gesamt	-	7.453	100	3423	3520	0	367	0	55	0,2	19,6	0,1	12,1	38,9	-3	298	991
Aufkommer	-	3.423				0	366	0	55	0	19,6	0,1	12,0	37,3	0	189,5	991
Abgänger	-	3.520				0	367	0	55	0	19,6	0,0	12,0	38,9	-3	403,7	991
Häufigkeitsverteilung nach Schiffstyp						Schiffslänge		Schiffsbreite		Tiefgang		SOG			Passierabstand		
Schiffsanzahl für Zeitraum						[m] Min	[m] Max	[m] Min	[m] Max	[m] Min	[m] Max	[kn] Min	[kn] Mittel	[kn] Max	[m] Min	[m] Mittel	[m] Max
Schiffstyp	Kz	Anzahl	%	Aufk	Abg	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max
<b>Binnenschiffe</b>		<b>1.257</b>	<b>17,5</b>	<b>571</b>	<b>604</b>												
Mehrzweckschiff	1	531	7,4	237	250	1	134	1	14	0,0	3,0	1,8	8,9	12,2	59	300	625
Chemikaliertanker	2	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	#DIV/0!	0,0	0	#DIV/0!	0
Gastanker	3	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	#DIV/0!	0,0	0	#DIV/0!	0
Mineralöltanker	4	726	10,1	334	354	1	99	1	11	0,0	3,0	2,7	9,6	14,0	66	329	963
Sonstige Binnenschiffe	5	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	#DIV/0!	0,0	0	#DIV/0!	0
<b>Seeschiffe</b>		<b>5.939</b>	<b>82,5</b>	<b>2.724</b>	<b>2.795</b>												
Autotransporter	A	137	1,9	60	66	2	214	3	49	0,0	9,6	5,2	13,6	20,5	153	287	604
Bulk-Carrier	B	148	2,1	64	71	0	327	0	55	0,0	15,4	6,5	12,1	16,2	94	274	556
Containerschiff	C	2.502	34,8	1.132	1.161	0	367	0	52	0,0	15,1	0,0	13,7	21,1	81	273	991
General Cargo	G	951	13,2	434	445	0	320	0	37	0,0	10,2	4,9	11,6	19,6	59	293	600
Chemikaliertanker	H	512	7,1	247	242	0	349	0	46	0,0	11,5	4,6	11,9	18,1	70	286	627
Gastanker	L	22	0,3	10	11	0	328	0	13	0,0	4,6	6,4	11,7	15,7	88	301	512
Marine + Beh.fahrzeug	M	494	6,9	245	243	0	174	0	24	0,0	8,0	0,3	10,1	22,6	-3	351	975
Öltanker	O	319	4,4	140	143	0	265	0	47	0,0	12,3	4,5	10,9	17,8	60	293	703
Fahrgastschiff / Fähre	P	339	4,7	154	164	0	345	0	41	0,0	10,2	0,0	19,6	38,9	44	296	672
RoRo-Schiff	R	53	0,7	24	23	21	293	2	36	0,0	9,4	6,0	12,3	18,2	107	297	499
Spezialfahrzeug	S	328	4,6	146	162	0	333	0	42	0,0	11,9	0,1	9,9	16,8	59	330	962
Sonstige Fahrzeuge	X	134	1,9	68	64	0	133	0	40	0,0	10,0	3,0	8,9	15,9	57	301	552
<b>Binnen- und Seeschiffe</b>		<b>7.196</b>	<b>100</b>	<b>3.295</b>	<b>3.399</b>												

Im definierten Messzeitraum wurden insgesamt 7.453 Schiffspassagen an M2 und 7.378 Schiffspassagen an M3 registriert. Mit Hilfe der schiffsbezogenen AIS-Daten ist es möglich, eine weitergehende Statistik zu betreiben, in dem zu bezogen auf den Schiffstyp die Anzahl der Passagen sowie bezogen auf

- die Schiffslänge,
- die Schiffsbreite,
- den Tiefgang,
- die Geschwindigkeit über Grund (SOG<sup>1</sup>) und
- den Passierabstand

minimale, mittlere und maximale Parameter ausgegebene werden können.

SOG - <sup>1</sup> speed over ground

Aus der Tabelle 5-1 lässt sich für den Messzeitraum ablesen, dass u.a.

- mehr als 80 % Seeschiffe registriert wurden,
- Containerschiffe (Schiffstyp C) mit rund 35 % den Hauptanteil der Schiffspassagen darstellen vor dem Schiffstyp *General Cargo* (Schiffstyp G) mit 13,1 %,
- die maximale Schiffslänge von 367 m zu einem Containerschiff gehört,
- die maximale Schiffsbreite von 55 m einem Bulker (Schiffstyp B) zuzuordnen ist,
- der größte Tiefgang mit 15,4 m zu einem Bulker (Schiffstyp B) gehört,
- abgesehen vom HSC *Halunder Jet* maximale Geschwindigkeiten von 22,6 kn von Marine und behördlichen Fahrzeugen (Schiffstyp m= stammen gefolgt von den Schiffstypen C, A und G und
- minimale Passierabstände von rd. 50 m registriert wurden.

Die Auswertung der Schiffspassagen für die Messlokation M3 kann analog in Anlage 10 nachgeschlagen werden. Nennenswerte Unterschiede zur Statistik für die Messlokation M2 bestehen nicht.

Weiterhin ist festzustellen, dass auf der Bundeswasserstraße Elbe mit durchschnittlich 620 Schiffspassagen pro Woche im Bereich Lühesand zwei- bis dreimal so viele Binnen- und Seeschiffe fahren im Vergleich zur Außenems (200 – 350 Passagen/Woche [3]) oder Unterweser (200 Passagen/Woche [2]).

### 5.2.2 Statistik der Schiffstiefgänge

Die Daten der Schiffspassagen können weitergehend analysiert werden z.B. auch hinsichtlich der Schiffstiefgänge, deren Ergebnis in Abbildung 5-2 dargestellt wird.

Binnenschiffe erreichen Tiefgänge bis 3 m und stellen 17,5 % des Verkehrsaufkommens dar.

Seeschiffe mit 7 m bzw. 8 m Tiefgang wurden am häufigsten registriert, was den Feederschiffen zuzuordnen ist. Der maximale Tiefgang wurde mit 15,4 m für ein Bulker registriert. Insgesamt wurden im Messzeitraum drei Seeschiffe mit einem maximalen Tiefgang zwischen 15,0 m und 15,4 m registriert, die den Schiffstypen C (Containerschiff) und B (Bulk-Carrier) zuzuordnen sind.

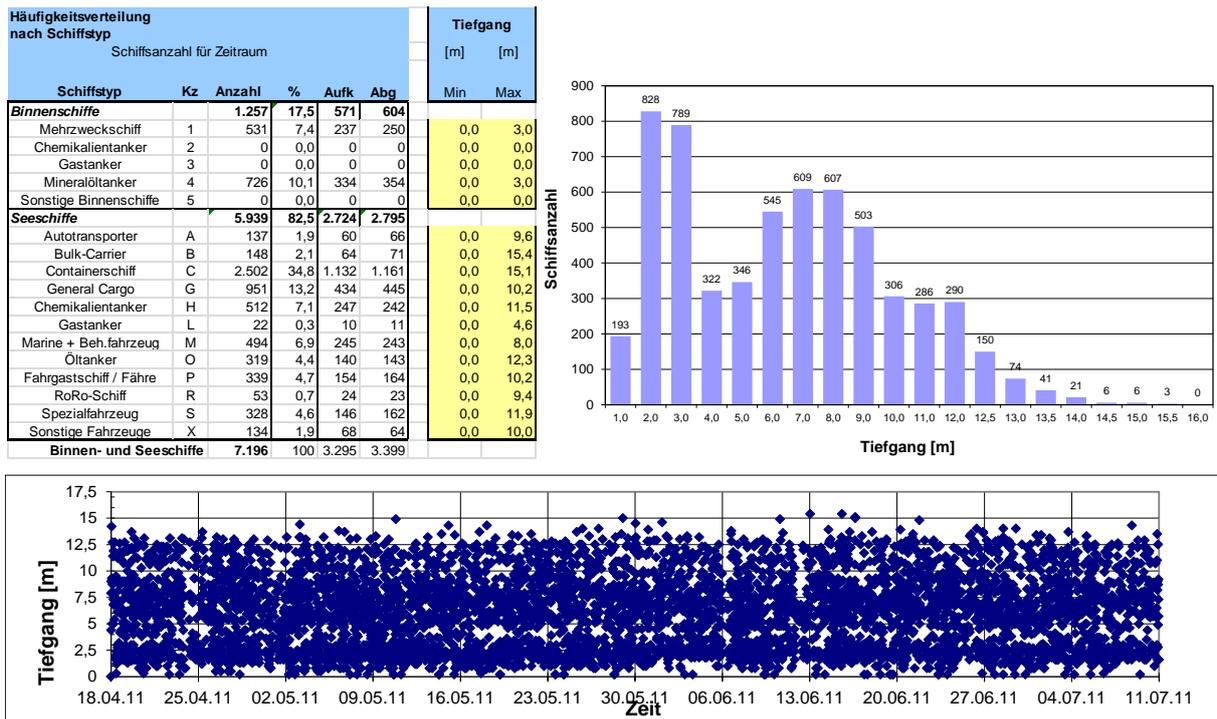


Abbildung 5-2: Statistik (links), Häufigkeitsverteilung (rechts) und zeitliches Auftreten der Schiffstiefgänge (unten) an der Messlokation M2

### 5.2.3 Statistik der Schiffsgeschwindigkeit

Die Daten der Schiffspassagen können weitergehend auch hinsichtlich der Schiffsgeschwindigkeiten analysiert werden. Abbildung 5-3 zeigt die Statistik, Häufigkeitsverteilung der Schiffsgeschwindigkeit und den Zusammenhang zwischen Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M2.

Schiffsgeschwindigkeiten von 12 kn kommen am häufigsten vor. In Verbindung mit dem Tiefgang zeigt sich, dass bis zu einem Tiefgang von 7 m bis 8 m die Schiffsgeschwindigkeit stetig ansteigt bis ca. 20 kn. Für Schiffe mit größerem Tiefgang als 7 m bis 8 m nimmt die maximal auftretende Geschwindigkeit tendenziell wieder ab, d.h. Schiffe mit sehr großem Tiefgang (z.B. > 12 m) fahren deutlich langsamer als schnell fahrende Feederschiffe mit 7 m bis 8 m Tiefgang.

Die räumliche Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten im Querprofil der Elbe und über die Fahrrinne wird in der folgenden Abbildung 5-4 dargestellt. Der rote Pfeil markiert die Fahrinnenmitte.

Tendenziell werden die maximalen Schiffsgeschwindigkeiten in der Fahrinnenmitte gefahren; im äußeren Bereich des Fahrwassers nehmen die Schiffsgeschwindigkeiten sehr stark ab.

Weiterhin ist aus Abbildung 5-4 erkennbar, dass sich die Abgänger bedingt durch das vorhandene Querprofil deutlich über die nördliche Fahrinnenbegrenzung hinaus verteilen.

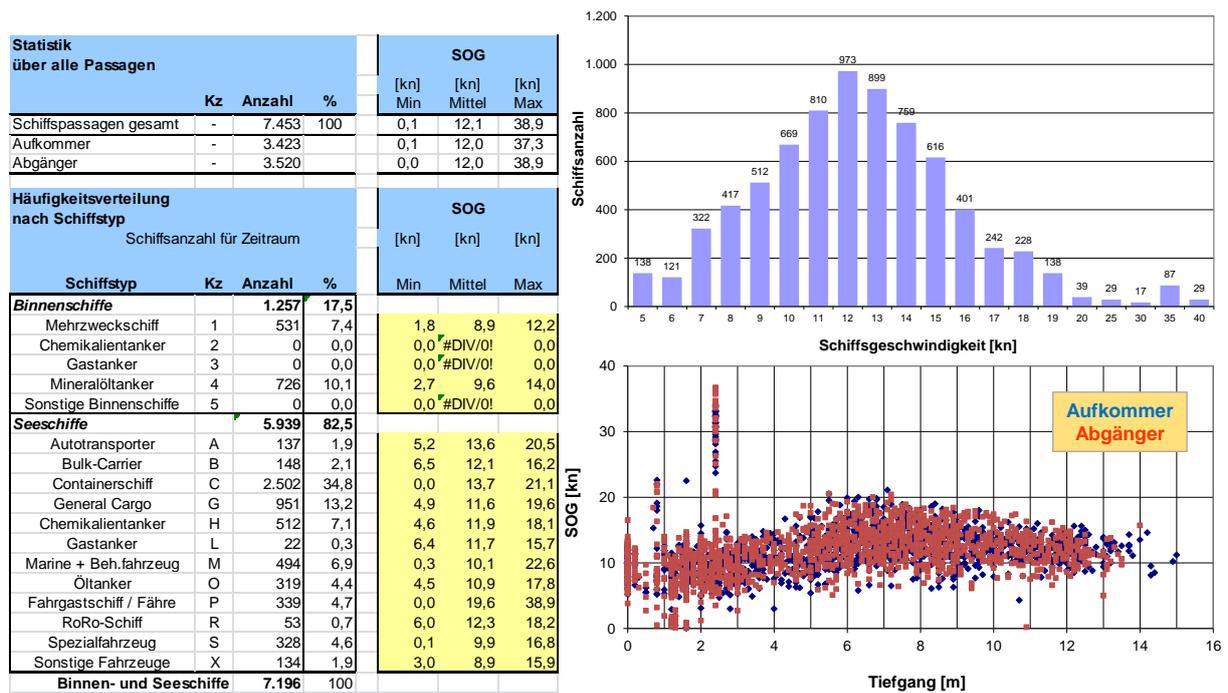


Abbildung 5-3: Statistik (links), Häufigkeitsverteilung der Schiffsgeschwindigkeit (oben rechts) und Zusammenhang zwischen Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang (unten rechts) an der Messlokation M2

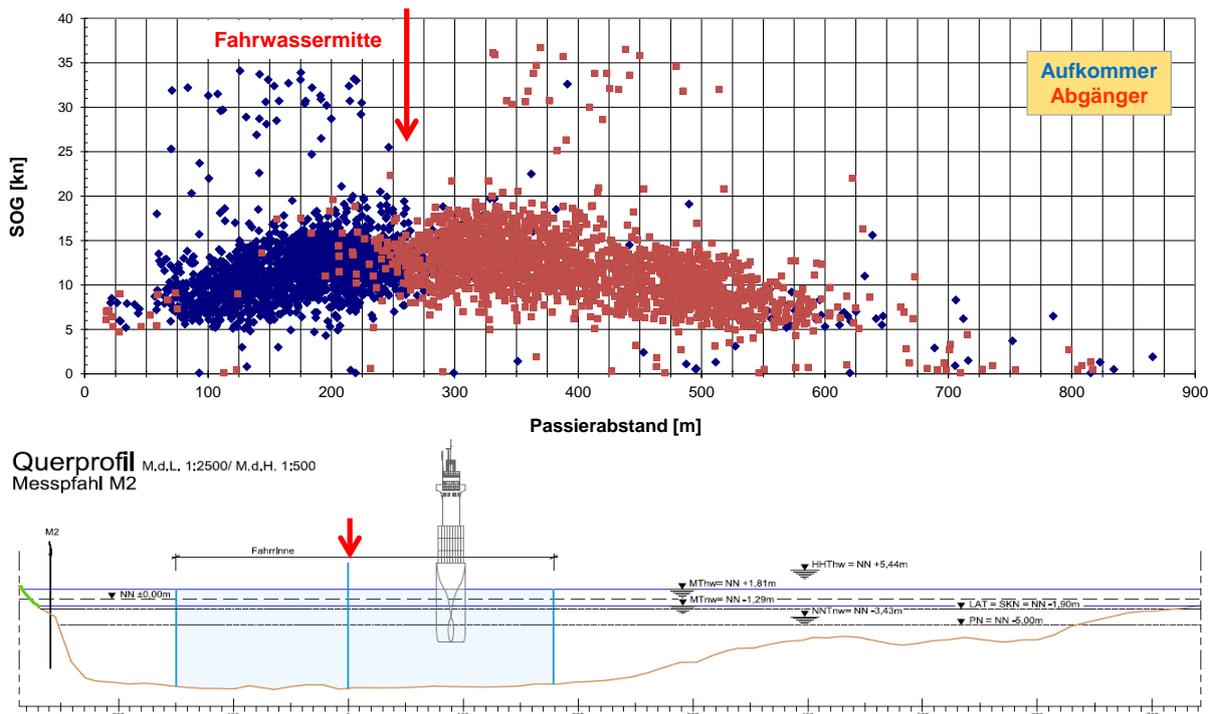


Abbildung 5-4: Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten SOG im Querprofil der Messlokation M2

### 5.3 Seegang

Die Seegangsverhältnisse an den Messlokalen M2 und M3 sind maßgeblich geprägt durch die lokalen Windverhältnisse und insbesondere durch die Windrichtung. Die folgende Abbildung 5-5 verdeutlicht, dass nur Windrichtungen aus

- WNW bis NW mit Laufrichtung des Seegangs nach oberstrom oder
- SO mit Laufrichtung des Seegangs nach unterstrom

überhaupt in der Lage sind, lokalen Seegang zu erzeugen. Für alle südlichen Windrichtungen schattet die Elbinsel Lühesand die Messlokalen ab, so dass die Messlokalen in Leelage liegen und ruhiges Wasser zu erwarten ist. Für Windrichtungen aus nördlichen Richtungen steht nur eine geringe Fetchlänge<sup>2</sup> zur Verfügung, so dass nur sehr geringe Seegänge zu erwarten sind.

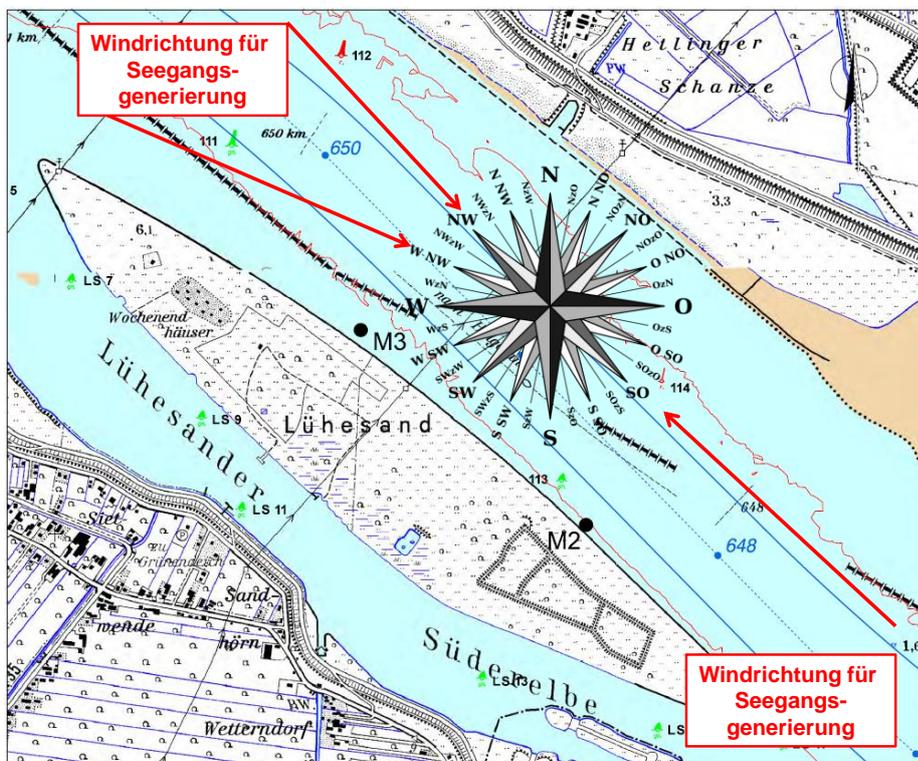


Abbildung 5-5: Projektgebiet mit Messlokalen M2 und M3 und Kennzeichnung der für die Seegangserzeugung maßgebenden Windrichtungen

Die ermittelten Seegangsdaten sind in Anlage 12 *DVD – Daten und Auswertungen/04 Auswertung/Seegang* als Datensätze abgelegt. Abbildung 5-6 zeigt die ermittelte signifikante Wellenhöhe  $H_{1/3}$  an den Messlokalen M2 und M3 als Zeitreihe über den Messzeitraum. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ergebnisse der signifikanten Wellenhöhe des Seegangs an den Messlokalen M2 und M3 identisch sind und überwiegend eine Größenordnung von 0,1 m bis 0,2 m annehmen.

<sup>2</sup> Streichlänge des Windes auf der Wasseroberfläche

Kurzzeitig, wenn die Windrichtung und die antreibende Windgeschwindigkeit vorhanden sind, kann der Seegang ansteigen wie z.B. zum Ende des Messzeitraumes, in dem eine Wellenhöhe von 0,4 m ermittelt wurde.

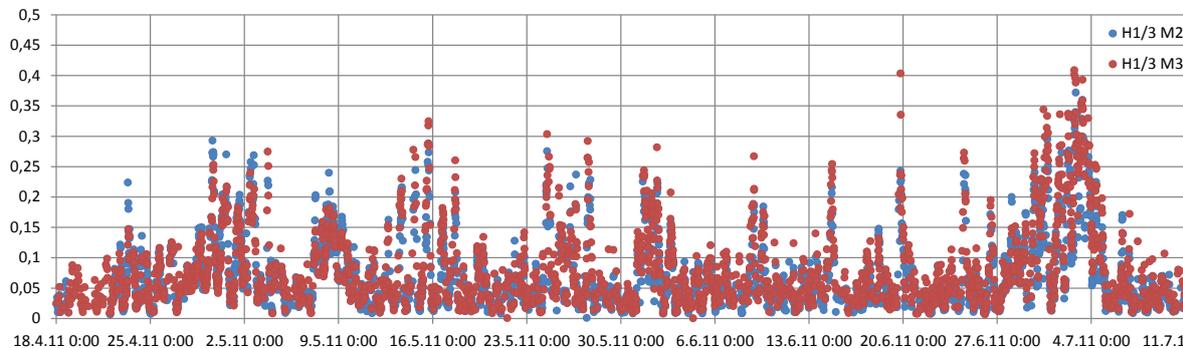


Abbildung 5-6: Signifikante Wellenhöhen  $H_{1/3}$  an den Messlokationen M2 und M3 während des Messzeitraumes

Bei näherer Betrachtung der Windverhältnisse in der 26. KW lässt sich die lokale Seegangserzeugung z.B. bei nordwestlicher Windrichtung in der folgenden Abbildung 5-7 nachvollziehen. Die zugehörigen Wellenperioden  $T_{m02}$  liegen im Bereich von 2 s bis 3 s.

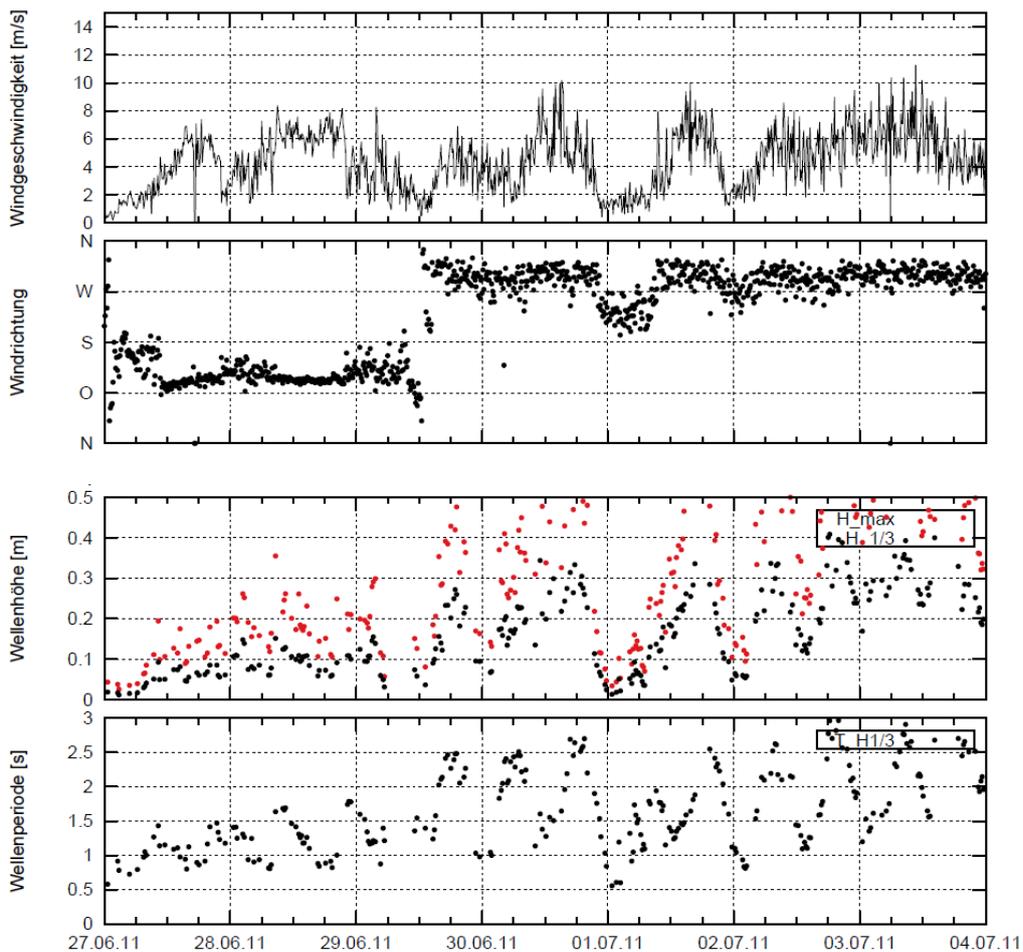


Abbildung 5-7: Seegangserzeugung an den Messlokationen bei nordwestlicher Windlage (vgl. Anlage 8)

## 5.4 Messlokation M2

Im Messzeitraum wurden an der Messlokation M2 insgesamt 7.453 Schiffspassagen registriert und 5.042 Schiffswellenereignisse detektiert und ausgewertet, davon 131 Passagen (= 2,6 %) des *Halunder Jet* (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Im Folgenden wird auf die analysierten Schiffswellenereignisse der Verdränger im Messzeitraum eingegangen. Hinsichtlich der Schiffswellenereignisse des *Halunder Jet* und deren Analyse wird auf Abschnitt 5.8 verwiesen.

### 5.4.1 Darstellung der Schiffswellenereignisse

Das gesamte Datenkollektiv sämtlicher analysierten Schiffswellenereignisse ist in der EXCEL-Datei in Anlage 12 DVD - Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse zu finden. Die zugehörigen Abbildungen eines jeden Schiffswellenereignisses finden sich in dem Verzeichnis Anlage 12 DVD - Daten und Auswertungen\05 Auswertung-Zeitreihen.

Die folgende Abbildung 5-8 stellt beispielhaft die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für ein extremes Schiffswellenereignis (maximaler Absenk  $z_A = 1,15$  m und maximale Primärwellenhöhe  $H_p = 1,57$  m) bei Ebbstrom und einem Wasserstand von NN  $-1,32$  m dar. Dieses Ereignis konnte dem Schiff *ELYSEE* zugeordnet werden. Weitere Details sind Anlage 9 zu entnehmen.

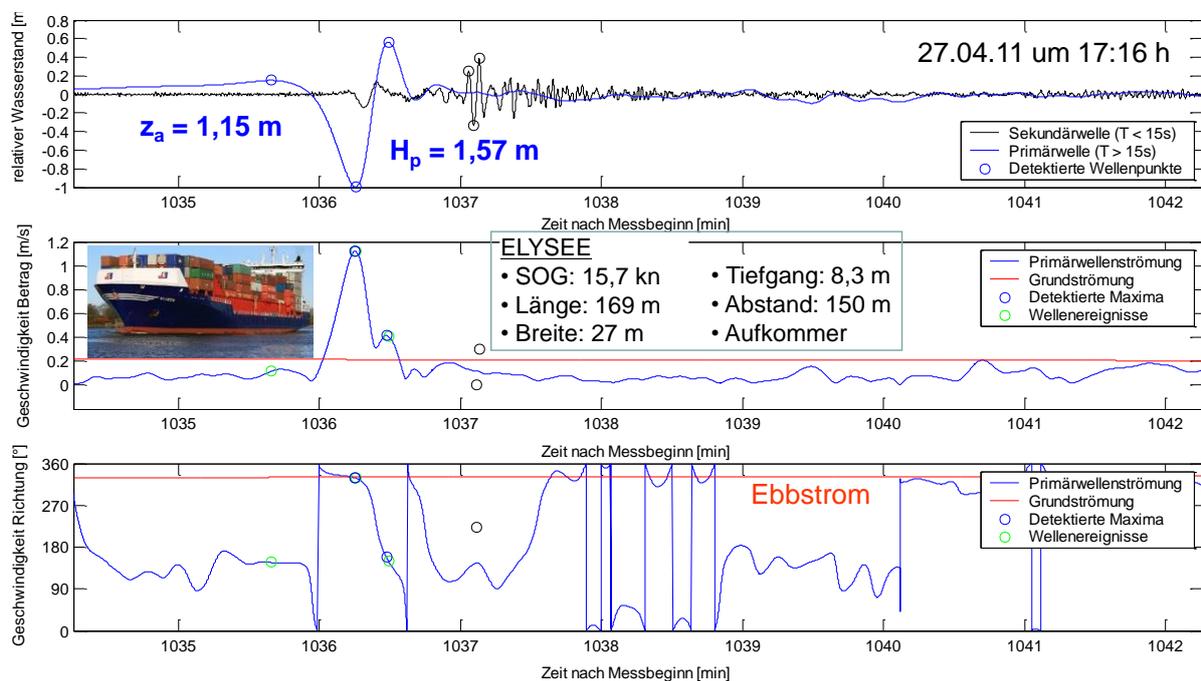


Abbildung 5-8: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M2 mit maximalem Absenk und maximaler Primärwellenhöhe (vgl. Anlage 9)

Die folgende Abbildung 5-9 stellt beispielhaft die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für ein extremes Schiffswellenereignis mit maximaler Sekundärwellenhöhe  $H_s = 1,44$  m bei Ebbstrom und einem Wasserstand von NN  $+0,11$  m dar (vgl. Anlage 9). Dieses Ereignis konnte dem Schiff *MSC MAUREEN* zugeordnet werden.

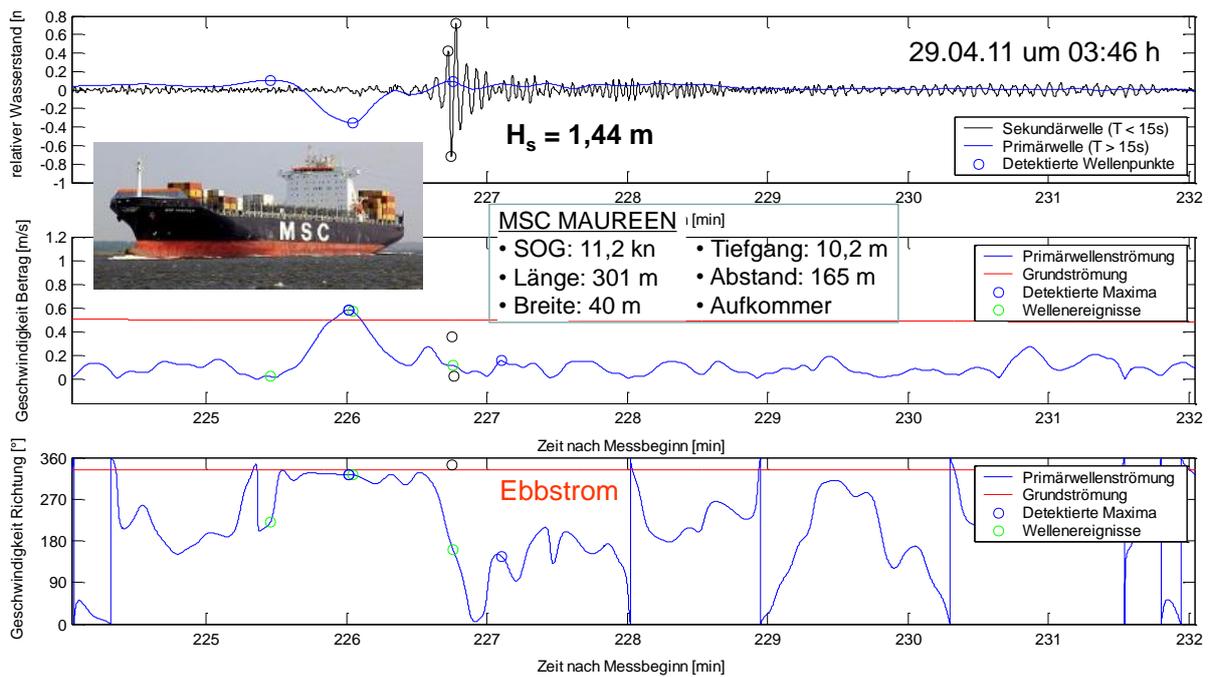


Abbildung 5-9: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M2 mit maximaler Sekundärwellenhöhe (vgl. Anlage 9)

### 5.4.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse

#### 5.4.2.1 Gesamtstatistik

##### Statistische Kenngrößen

Das Kollektiv der analysierten Schiffswellenereignisse an der Messlokation M2 wurde tageweise über den gesamten Zeitraum der Messkampagne analysiert. Tagesmittelwerte und Tagesmaximalwerte werden in Anlage 9 dokumentiert. Die folgende Tabelle 5-2 fasst die ermittelbaren statistischen Kenngrößen (Minimum, Mittelwert, Maximum) über die tageweise analysierten mittleren und maximalen Schiffswellenereignisse zusammen.

Tabelle 5-2: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation M2

Messlokation M2 Lühesand	Zeitraum	Gesamtanzahl registrierter Schiffspassagen [1]	Anzahl analysierte Schiffswellenereignisse [1]	Analyse der Schiffswellen								Analyse schiffserzeugter Strömungen								Seegang	
				Mittlere Parameter								Mittlere Parameter								Mittlere Parameter	
KW	Datum			Z <sub>A</sub> [m]	H <sub>p</sub> [m]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>Hp</sub> [s]	T <sub>Su</sub> [s]	T <sub>St</sub> [s]	T <sub>Hs</sub> [s]	v <sub>0</sub> [m/s]	θ <sub>v0</sub> [Grad]	v <sub>RS</sub> [m/s]	θ <sub>RS</sub> [Grad]	v <sub>Hp</sub> [m/s]	θ <sub>vHp</sub> [Grad]	v <sub>Hs</sub> [m/s]	θ <sub>vHs</sub> [Grad]	H <sub>s</sub> [m]	T <sub>m02</sub> [s]	
	Minimum	1		0,04	0,03	0,01	0,0	55,8	49,2	1,5	0,11	139	0,07	136	0,03	90	0,04	173	0,01	0,45	
	Mittelwert	58		0,09	0,09	0,33	61,6	62,2	60,3	2,6	0,31	237	0,16	243	0,07	169	0,09	234	0,07	1,17	
	Maximum	93		0,16	0,17	0,50	99,5	89,4	131,0	3,1	0,44	268	0,53	275	0,12	309	0,14	333	0,21	2,03	
	Minimum	1		0,05	0,03	0,01	0,0	83,0	94,7	1,5	0,25	139	0,22	136	0,09	162	0,10	258	0,01	0,45	
	Mittelwert	58		0,51	0,63	0,92	264,2	90,0	129,4	4,7	0,60	341	0,56	352	0,28	313	0,24	778	0,14	1,79	
	Maximum	93		1,15	1,57	1,44	410,1	94,2	135,0	7,5	0,87	360	1,12	360	0,47	315	0,54	990	0,37	3,04	
	Summe der Schiffspassagen	7.453	4.911																		

### Häufigkeitsverteilungen

Die nachfolgende Abbildung 5-10 stellt die Unterschreitungshäufigkeiten und relativen Häufigkeiten für die Schiffswellenparameter an der Messlokation M2 dar. Folgende Aussagen sind ableitbar:

- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit des Absunks verläuft sehr steil. 90 % der Ereignisse zeigen einen Absunk  $z_A$  kleiner 0,20 m.
- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit der Primärwellenhöhe verläuft analog zum Absunk ebenfalls sehr steil. 90 % der Schiffswelleneignisse zeigen eine Primärwellenhöhe  $H_p$  kleiner 0,20 m.
- Die Sekundärwellenhöhe zeigt eine relativ breite Verteilung und entsprechend einen flacheren Verlauf der Unterschreitungshäufigkeit. Am häufigsten treten Sekundärwellen in der Höhe von 0,2 m auf. 90 % der Schiffswelleneignisse zeigen eine Sekundärwellenhöhe  $H_s$  kleiner 0,65 m.

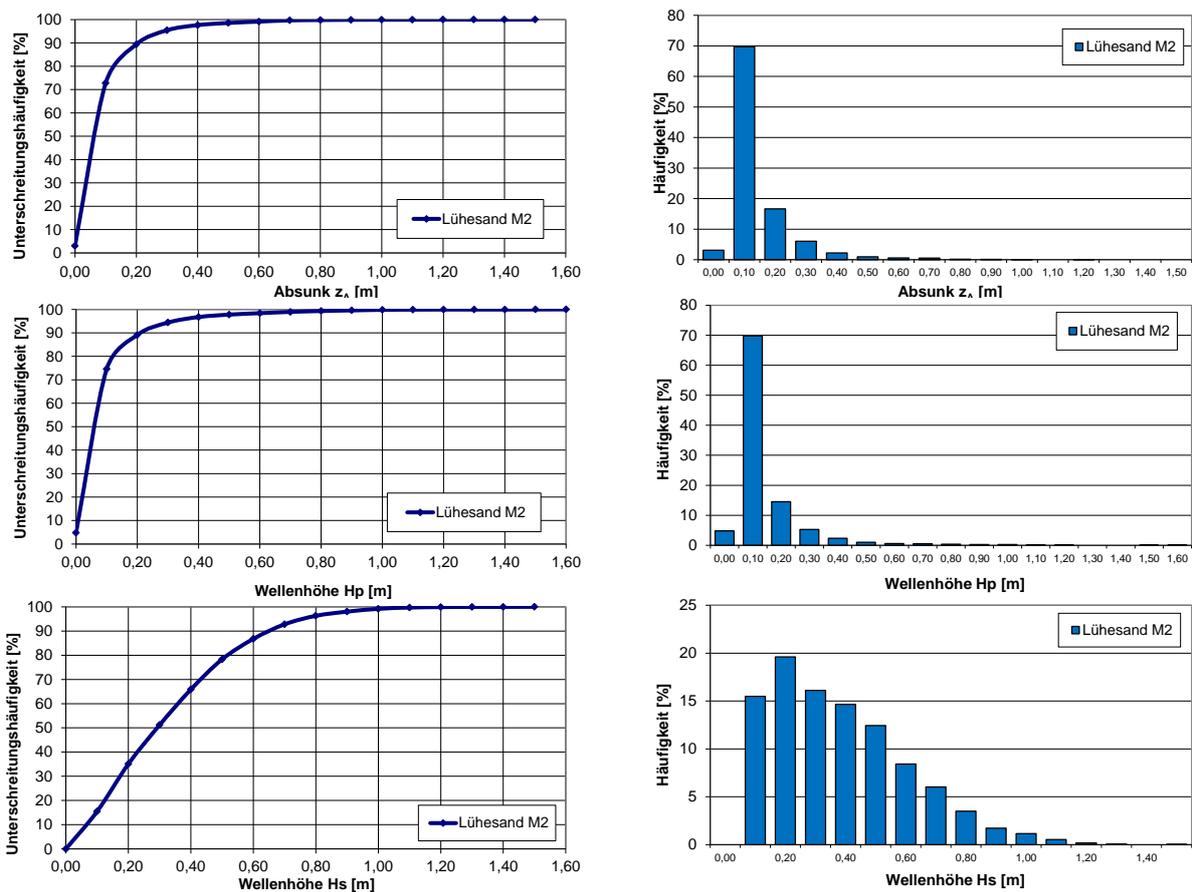


Abbildung 5-10: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absink  $z_A$  (oben), Primärwellenhöhe  $H_p$  (Mitte) und Sekundärwellenhöhe  $H_s$  (unten) an der Messlokation M2

### 5.4.2.2 Einzelauswertung

Die nachfolgenden Ergebnisse der Einzelauswertung beziehen sich auf die 50 höchsten Schiffswellenereignisse bezogen auf die Parameter Absunk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s$ .

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Einzelauswertung für die maximalen Schiffswellenereignisse an der Messlokation M2 liefert die folgende Tabelle 5-3. Die dort in Rot hinterlegten Zellen deuten darauf hin, dass diese dem jeweiligen maximalen Schiffswellenereignis zugeordnet sind, d.h. zu demselben Ereignis gehören.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation M2

Kriterium	Parameter Analyse Schiffswelle								Parameter schiffserz. Strömung							
	$z_A$ [m]	$H_p$ [m]	$H_s$ [m]	T Hp [s]	T Su [s]	T St [s]	T Hs [s]	$v_0$ [m/s]	$\theta v_0$ [Grad]	vRS [m/s]	$\theta$ RS [Grad]	v Hp [m/s]	$\theta$ vHp [Grad]	v Hs [m/s]	$\theta$ vHs [Grad]	
max $z_A$ M2	min	0,54	0,00	0,17	3,7	1,7	0,0	1,4	0,02	5	0,03	140	0,01	90	0,02	28
	mittel	0,69	0,86	0,55	64,2	44,5	24,8	3,6	0,29	281	0,59	314	0,22	142	0,14	224
	max	1,15	1,57	1,16	219,0	35,9	14,0	5,7	0,22	328	1,12	329	0,45	276	0,32	360
max $H_p$ M2	min	0,42	0,68	0,17	3,7	1,7	2,0	1,4	0,00	5	0,03	140	0,01	90	0,02	8
	mittel	0,67	0,89	0,56	58,6	45,6	21,8	3,7	0,30	275	0,57	318	0,24	143	0,14	219
	max	1,15	1,57	1,16	42,0	90,0	111,4	5,6	0,22	328	1,12	334	0,42	158	0,32	360
max $H_s$ M2	min	0,01	0,00	0,94	39,1	25,7	7,0	2,1	0,04	85	0,05	131	0,01	90	0,03	9
	mittel	0,21	0,23	1,06	133,7	66,1	57,6	3,1	0,28	252	0,28	271	0,11	185	0,17	224
	max	0,70	0,84	1,44	298,5	94,2	135,0	3,3	0,51	334	0,93	351	0,40	315	0,34	344

Nachfolgend wird detaillierter auf die Ergebnisse der Einzelauswertung eingegangen. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen den maximalen Schiffswellenparametern und den maßgebenden schiffsdynamischen Parametern dargestellt.

### 5.4.2.3 Weitergehende Analysen

Für weitergehende Analysen mit dem Datenkollektiv der analysierten Schiffswellenereignisse wird auf die Seiten 47 bis 56 der Abschlusspräsentation in Anlage 11 verwiesen. Die zugehörigen Daten sind in Anlage 9 dokumentiert und in Anlage 12 digital abgelegt.

#### Maximaler Absunk

Die statistische Verteilung der Schiffswellenereignisse mit den 50 höchsten Absunk-Ereignissen wird in Abbildung 5-11 in Abhängigkeit der maßgebenden Einflussparameter Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang dargestellt.

Dabei wird deutlich, dass die 50 höchsten Absunk-Ereignisse überwiegend von Schiffen mit Tiefgängen von 7 m bis 13 m verursacht werden. Der maximale Absunk geht dabei auf die ELYSÉE mit rund 8 m Tiefgang zurück. Auch die nächst kleineren Absunk-Ereignisse gehören zu Schiffen mit Tiefgängen zwischen 7 m und 9 m Tiefgang, für die vergleichsweise hohe Geschwindigkeiten registriert wurden (Abbildung 5-11 unten).

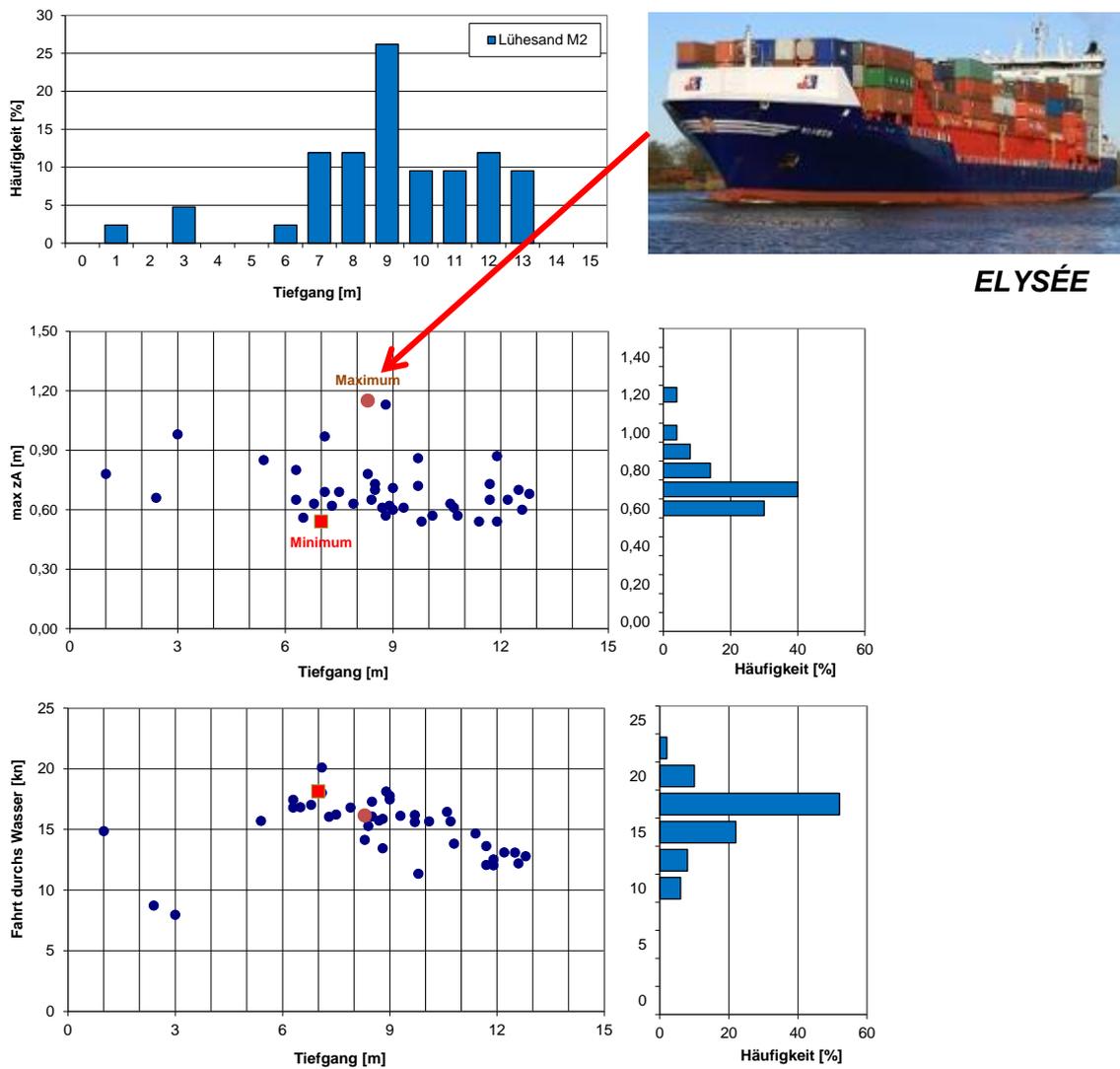


Abbildung 5-11: Verteilung der 50 höchsten Absunk-Ereignisse in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M2

**Maximale Primärwellenhöhe**

Die statistische Verteilung der Schiffswellenereignisse mit den 50 höchsten Primärwellenhöhen wird auf Seite 50 der Anlage 11 dargestellt. Die Verteilung ist analog zu Abbildung 5-11.

**Maximale Sekundärwellenhöhe**

Auf die statistische Verteilung der Schiffswellenereignisse mit den 50 höchsten Sekundärwellenhöhen wird auf Seite 52 der Anlage 11 eingegangen. Die Verteilung der Schiffswellenereignisse in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit und des Tiefganges wird in Abbildung 5-12 dargestellt.

Die 50 höchsten Ereignisse mit Sekundärwellenhöhen zwischen 0,94 m und 1,44 m werden Schiffen zwischen 6 m und 13 m zugeordnet (vgl. Anlage 9). Ein Viertel dieser Schiffe hat einen Tiefgang von 11 m (vgl. Abbildung 5-12).

Die maximale Sekundärwellenhöhe wird der *MSC MAUREEN* zugeordnet. Dies ist insofern bemerkenswert, da dieses Schiff rund 5 kn bis 8 kn langsamer fuhr als Schiffe mit einem geringeren Tiefgang von 6 m. Auch Schiffe mit vergleichbaren Tiefgängen zeigen ähnliche Schiffsgeschwindigkeiten wie die *MSC MAUREEN*. Das deutet daraufhin, dass es etwas Schiffsspezifisches geben könnte wie z.B. die Schiffsförm, was tendenziell zu vergleichsweise höheren Sekundärwellenhöhen föhrt. Weitere Details sind nicht bekannt.

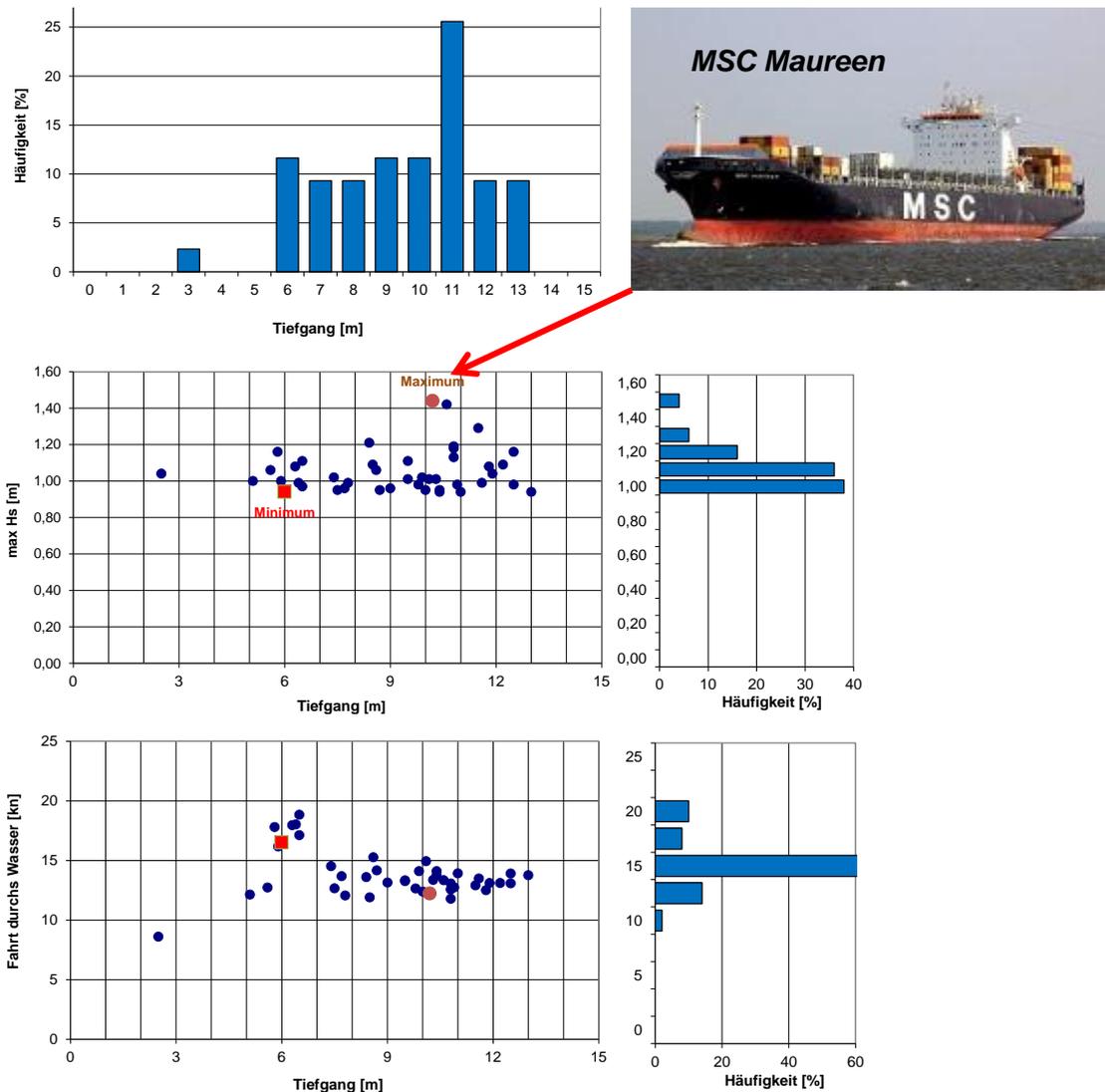


Abbildung 5-12: Verteilung der 50 höchsten Sekundärwellenhöhen in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M2

**Einflussparameter**

Der Einfluss der Parameter Tidewasserstand, Passierabstand, Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang auf die charakteristischen Schiffswellenparameter wurde weitergehend untersucht. In den folgenden Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-16 werden die höchsten und alle Schiffswellenereignisse bezogen auf die charakteristischen Schiffswellenparameter Absunk, Primärwellenhöhe und Sekundärwellenhöhe dargestellt.

Grundsätzlich können große Schiffswellenparameter bei jedem Tidewasserstand eintreten. Tendenziell treten jedoch Ereignisse mit maximalem Absunk oder maximaler Primärwellenhöhe eher bei niedrigeren Tidewasserständen zwischen NN +0 m und NN -2 m auf (vgl. Abbildung 5-13).

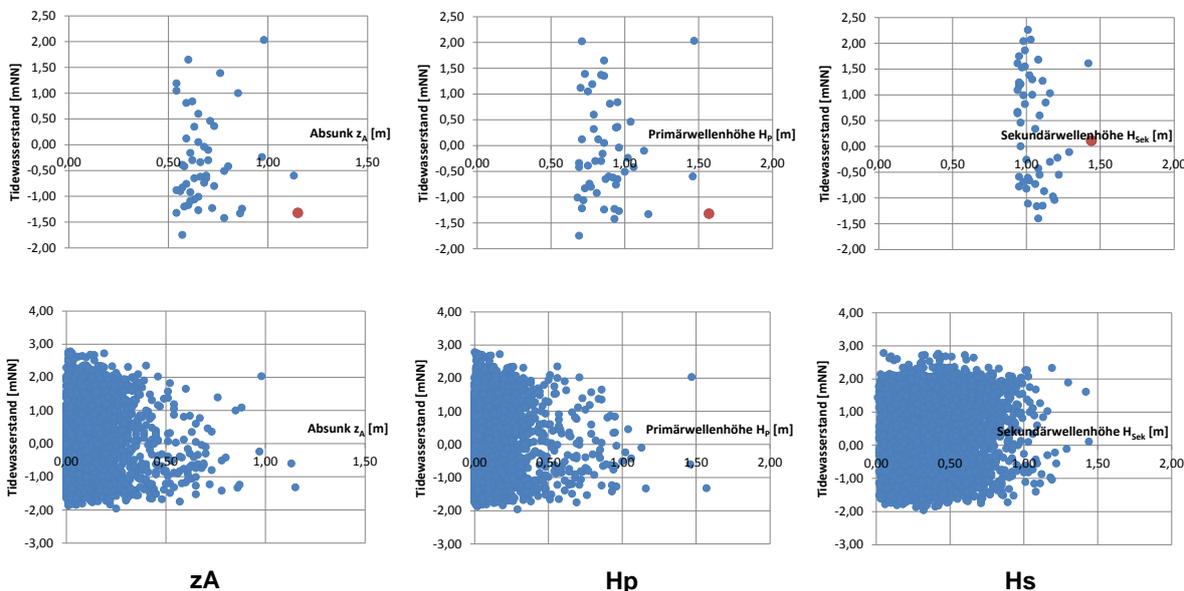


Abbildung 5-13: Einfluss des Tidewasserstandes auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenereignisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2

Der Einfluss des Passierabstandes auf die Schiffswellenparameter ist in Abbildung 5-14 sehr deutlich erkennbar. Maximale Ereignisse treten bei Passagen von Schiffen mit einem Passierabstand von rund 200 m auf.

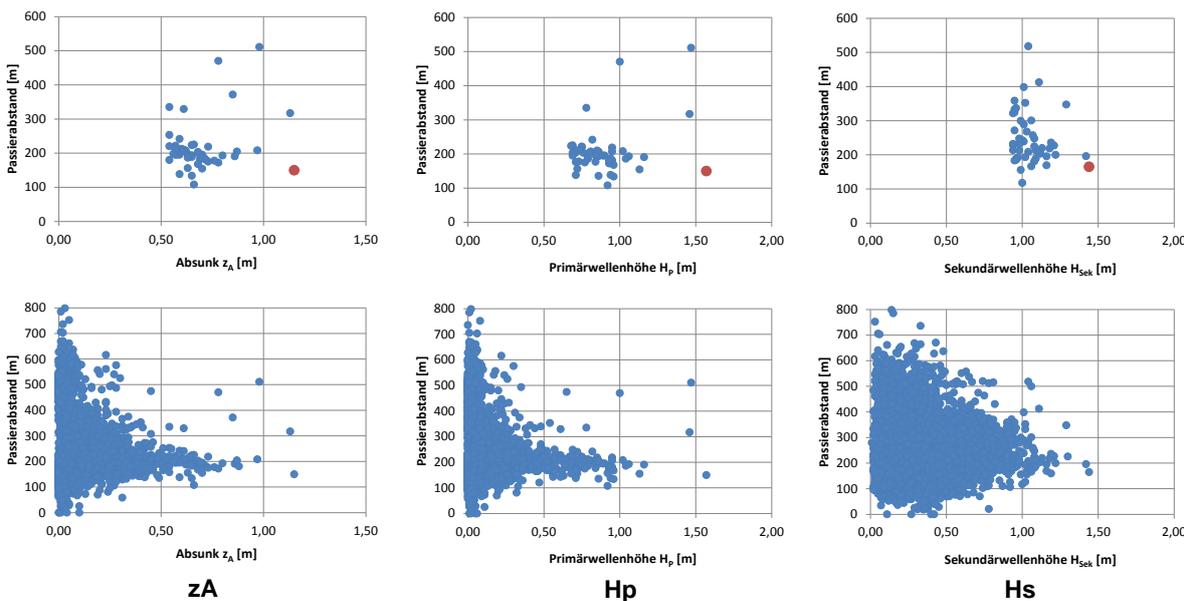


Abbildung 5-14: Einfluss des Passierabstandes auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenereignisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2

Der Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit auf die Schiffswellenparameter wird in der folgenden Abbildung 5-15 ebenfalls deutlich sichtbar. Maximaler Absunk und maximale Primärwellenhöhe sind bei Geschwindigkeiten von > 15 kn zu erwarten.

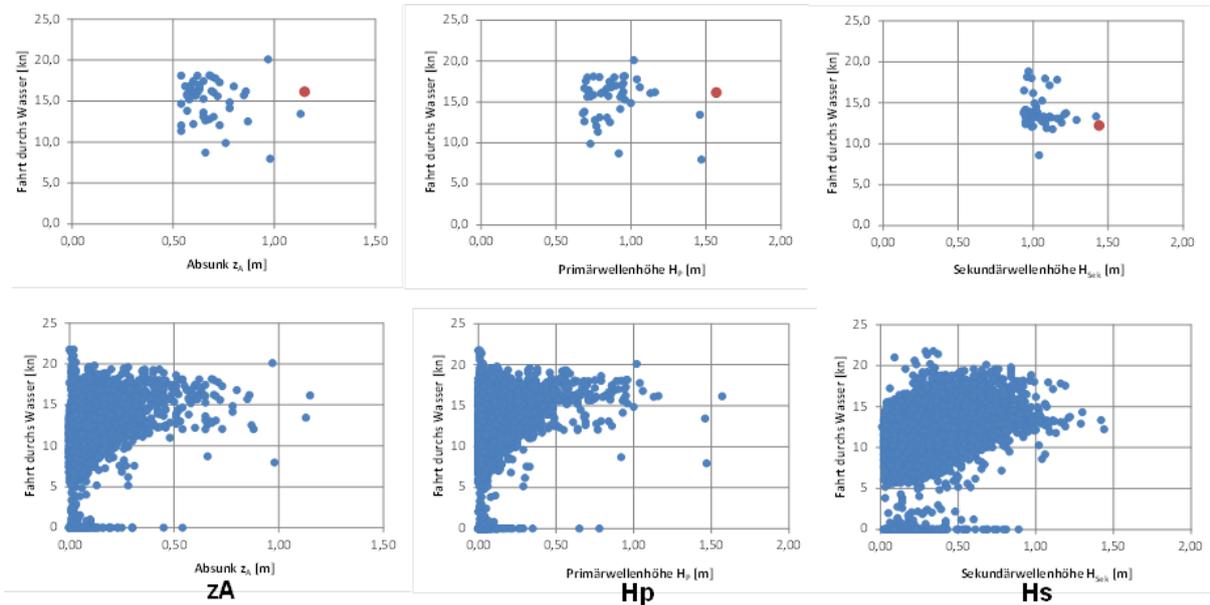


Abbildung 5-15: Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit (FdW) auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenergebnisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2

Der Einfluss des Tiefganges wird in Abbildung 5-16 dargestellt. Maximale Ereignisse sind für Schiffe mit Tiefgängen zwischen 9 m und 11 m zu erwarten.

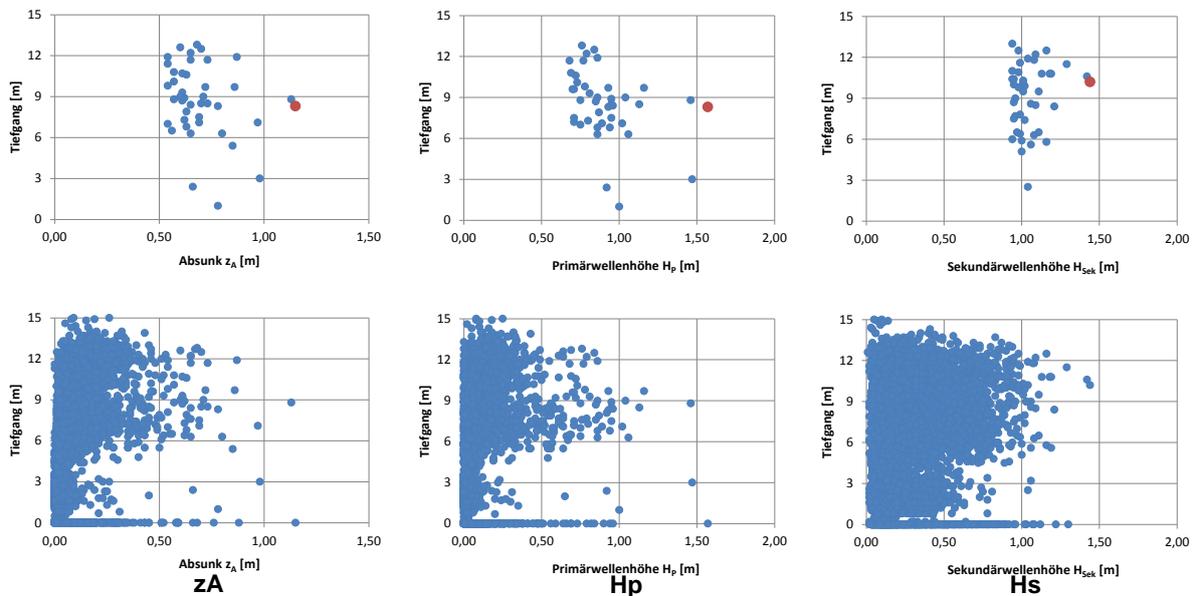


Abbildung 5-16: Einfluss des Tiefganges auf die 50 höchsten (oben) und alle Schiffswellenergebnisse (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2

## 5.5 Messlokation M3

Im Messzeitraum wurden an der Messlokation M3 insgesamt 7.378 Schiffspassagen registriert und 5.141 Schiffswellenereignisse detektiert und ausgewertet, davon 133 Passagen (= 2,6 %) des *Halunder Jet* (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Im Folgenden wird auf die analysierten Schiffswellenereignisse der Verdränger im Messzeitraum eingegangen. Hinsichtlich der Schiffswellenereignisse des *Halunder Jet* und deren Analyse wird auf Abschnitt 5.8 verwiesen.

### 5.5.1 Darstellung der Schiffswellenereignisse

Das gesamte Datenkollektiv sämtlicher analysierten Schiffswellenereignisse ist in der EXCEL-Datei in Anlage 12 DVD - Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse zu finden. Die zugehörigen Abbildungen eines jeden Schiffswellenereignisses finden sich in dem Verzeichnis Anlage 12 DVD - Daten und Auswertungen\05 Auswertung-Zeitreihen.

Die folgenden Abbildungen stellen beispielhaft die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für maximale Schiffswellenereignisse an der Messlokation M3, die alle bei Ebbstrom generiert wurden, dar für

- den maximalen Absenk  $z_A = 0,91$  m (Abbildung 5-17),  
Wasserstand NN  $-1,41$  m, Schiff *ELYSEE*
- die maximale Primärwellenhöhe  $H_p = 1,22$  m (Abbildung 5-18),  
Wasserstand NN  $-1,23$  m, Schiff *CSCL PUSAN* und
- die maximale Sekundärwellenhöhe  $H_s = 1,33$  m (Abbildung 5-19)  
Wasserstand NN  $+0,14$  m, Schiff *MSC MAUREEN*.

Weitere Details dieser extremen Ereignisse können Anlage 10 entnommen werden.

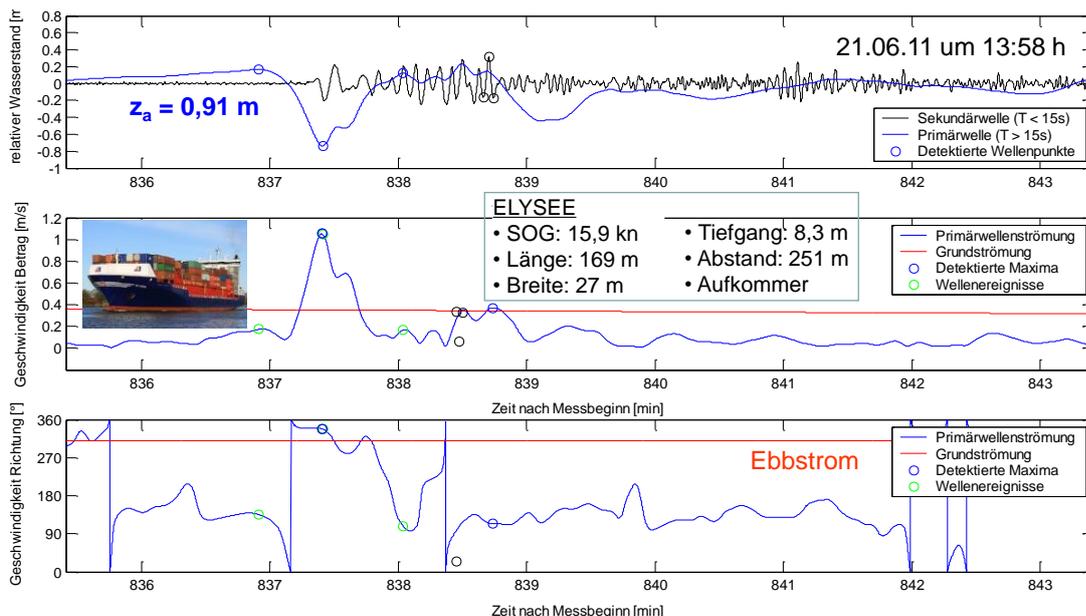


Abbildung 5-17: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M3 mit maximalem Absenk (vgl. Anlage 10)

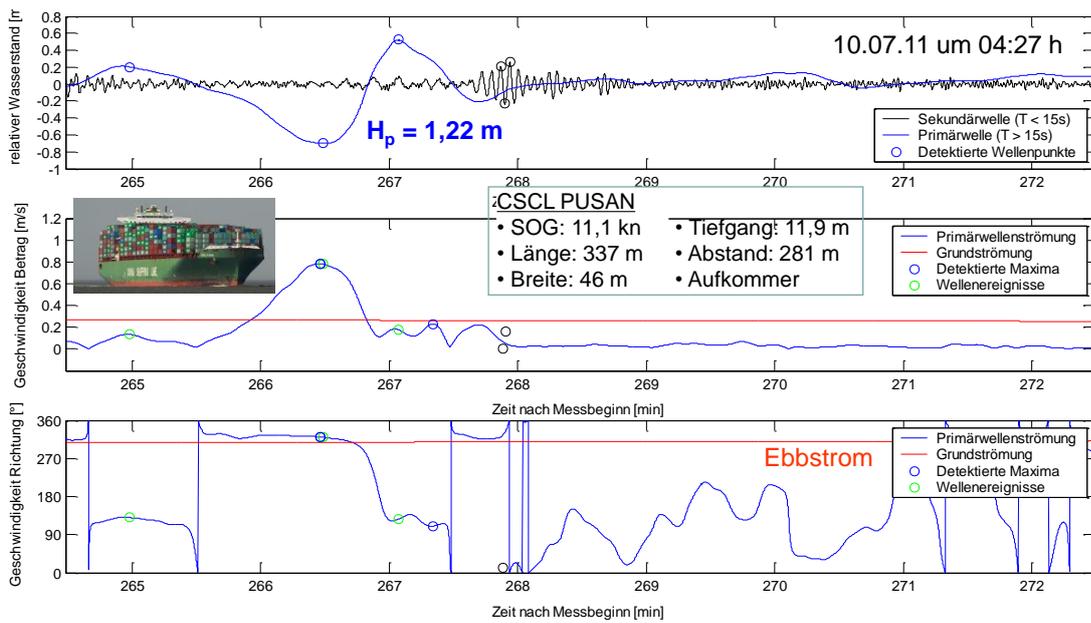


Abbildung 5-18: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M3 mit maximaler Primärwellenhöhe (vgl. Anlage 10)

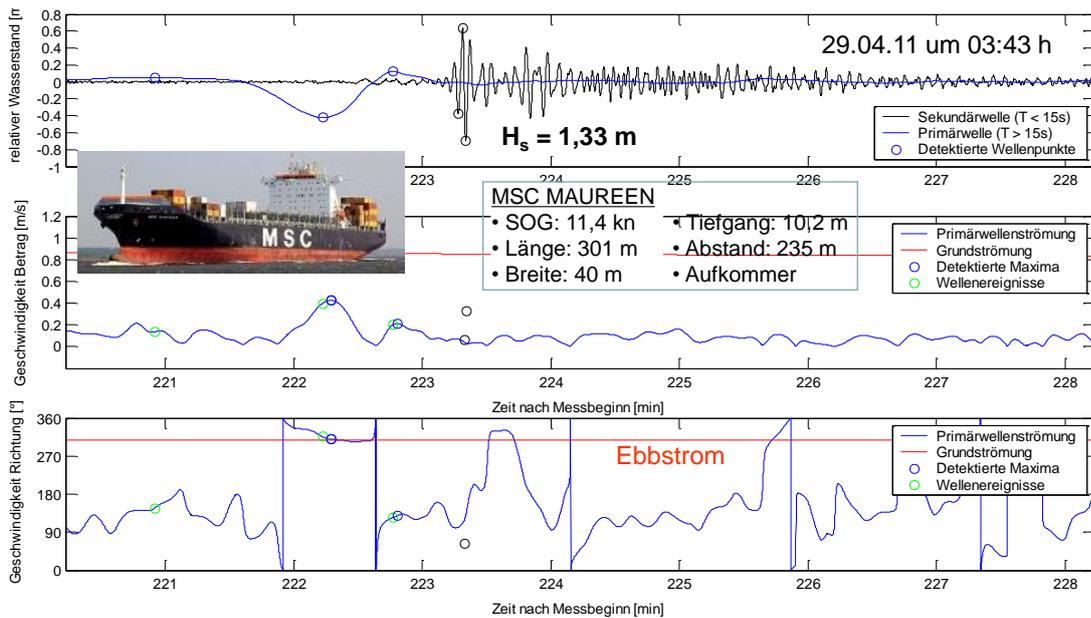


Abbildung 5-19: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation M3 mit maximaler Sekundärwellenhöhe (vgl. Anlage 10)

## 5.5.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse

### 5.5.2.1 Gesamtstatistik

#### Statistische Kenngrößen

Das Kollektiv der analysierten Schiffswellenereignisse an der Messlokation M3 wurde tageweise über den gesamten Zeitraum der Messkampagne analysiert. Tagesmittelwerte und Tagesmaximalwerte werden in Anlage 10 dokumentiert.

Die folgende Tabelle 5-4 fasst die ermittelbaren statistischen Kenngrößen (Minimum, Mittelwert, Maximum) über die tageweise analysierten mittleren und maximalen Schiffswellenereignisse zusammen.

Tabelle 5-4: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation M3

Messlokation M2 Lühesand  Zeitraum		Gesamtanzahl registrierter Schiffspassagen	Anzahl analysierte Schiffswellenereignisse	Analyse der Schiffswellen								Analyse schiffserzeugter Strömungen								Seegang	
				Mittlere Parameter								Mittlere Parameter								Mittlere Parameter	
KW	Datum	(1)	(1)	$z_A$ [m]	$H_p$ [m]	$H_s$ [m]	$T_{Hp}$ [s]	$T_{Su}$ [s]	$T_{St}$ [s]	$T_{Hs}$ [s]	$v_0$ [m/s]	$\theta_{v_0}$ [Grad]	$v_{RS}$ [m/s]	$\theta_{RS}$ [Grad]	$v_{Hp}$ [m/s]	$\theta_{vHp}$ [Grad]	$v_{Hs}$ [m/s]	$\theta_{vHs}$ [Grad]	$H_s$ [m]	$T_{m02}$ [s]	
	Minimum	27		0,04	0,03	0,12	31,5	50,4	46,5	1,9	0,22	208	0,08	209	0,04	105	0,05	155	0,02	0,63	
	Mittelwert	60		0,09	0,10	0,29	69,7	62,3	60,6	2,6	0,41	237	0,15	234	0,06	164	0,09	188	0,08	1,21	
	Maximum	90		0,17	0,19	0,46	100,1	69,7	76,8	3,1	0,54	266	0,23	267	0,10	193	0,13	220	0,29	1,87	
	Minimum	27		0,13	0,11	0,36	139,4	90,0	115,0	3,2	0,53	309	0,19	327	0,11	311	0,12	335	0,05	1,19	
	Mittelwert	60		0,52	0,63	0,86	269,8	90,5	132,7	5,0	0,85	313	0,65	353	0,29	315	0,26	355	0,16	1,98	
	Maximum	90		0,91	1,22	1,33	429,1	110,0	135,0	6,4	1,08	322	1,19	360	0,80	315	0,52	360	0,41	3,42	
Summe der Schiffspassagen		7.378	5.008																		

### Häufigkeitsverteilungen

Die nachfolgende Abbildung 5-10 stellt die Unterschreitungshäufigkeiten und relativen Häufigkeiten für die Schiffswellenparameter an der Messlokation M3 dar.

Folgende Aussagen sind ableitbar:

- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit des Absunks verläuft sehr steil. 90 % der Ereignisse zeigen einen Absunk  $z_A$  kleiner 0,20 m.
- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit der Primärwellenhöhe verläuft analog zum Absunk ebenfalls sehr steil. 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Primärwellenhöhe  $H_p$  kleiner 0,20 m.
- Die Sekundärwellenhöhe zeigt eine relativ breite Verteilung und entsprechend einen flacheren Verlauf der Unterschreitungshäufigkeit. Am häufigsten treten Sekundärwellen in der Höhe von 0,2 m auf. 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Sekundärwellenhöhe  $H_s$  kleiner 0,60 m.

Die Unterschreitungshäufigkeiten an der Messlokation M3 sind damit mit denen an der Messlokation M2 nahezu identisch.

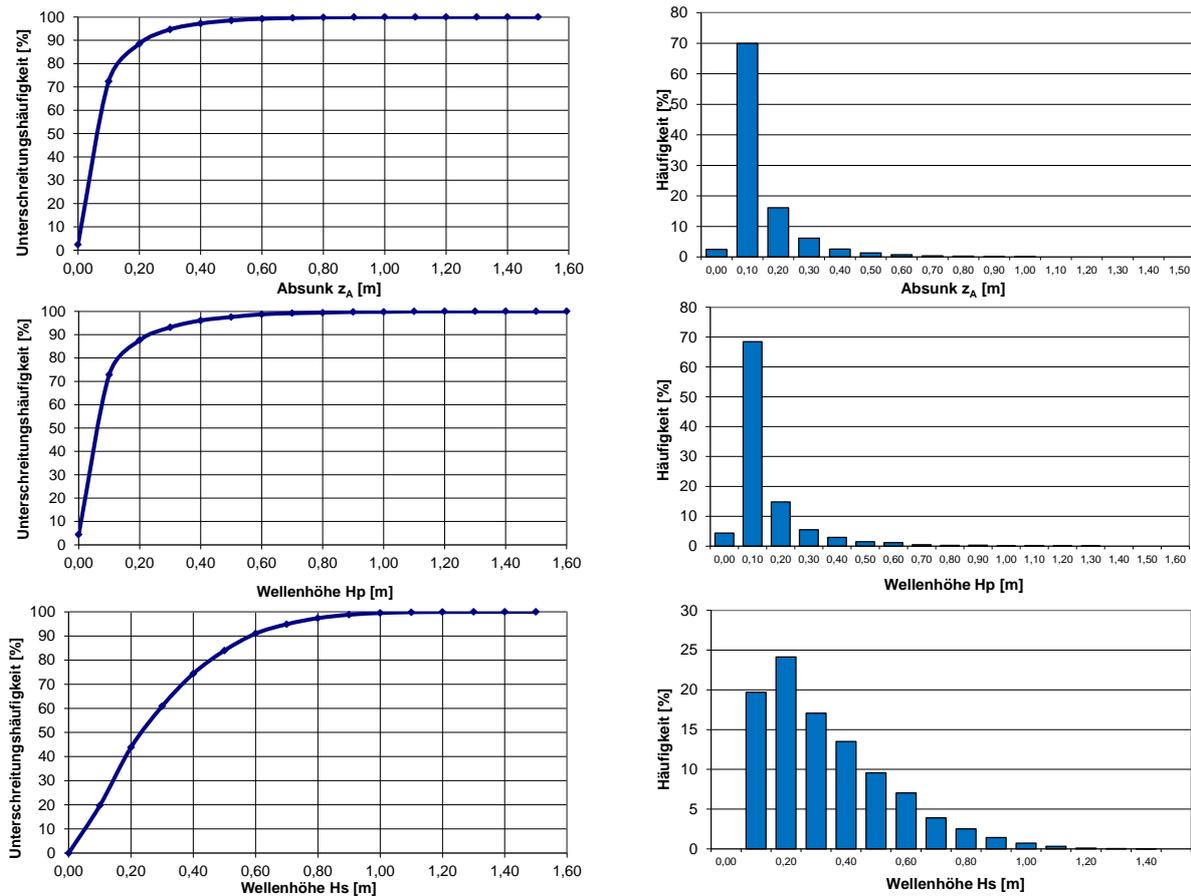


Abbildung 5-20: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk  $z_A$  (oben), Primärwellenhöhe  $H_p$  (Mitte) und Sekundärwellenhöhe  $H_s$  an der Messlokation M3

### 5.5.2.2 Einzelauswertung

Die nachfolgenden Ergebnisse der Einzelauswertung beziehen sich auf die 50 höchsten Schiffswellenereignisse bezogen auf die Parameter Absunk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s$ . Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Einzelauswertung für die maximalen Schiffswellenereignisse an der Messlokation M2 liefert die folgende Tabelle 5-5.

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation M3

Kriterium	Parameter Analyse Schiffswelle								Parameter schiffserz. Strömung							
	$z_A$ [m]	$H_p$ [m]	$H_s$ [m]	$T_{Hp}$ [s]	$T_{Su}$ [s]	$T_{St}$ [s]	$T_{Hs}$ [s]	$v_0$ [m/s]	$\theta_{v_0}$ [Grad]	$v_{RS}$ [m/s]	$\theta_{RS}$ [Grad]	$v_{Hp}$ [m/s]	$\theta_{vHp}$ [Grad]	$v_{Hs}$ [m/s]	$\theta_{vHs}$ [Grad]	
max $z_A$ M3	min	0,52	0,00	0,10	36,1	23,4	0,0	2,1	0,09	124	0,09	122	0,03	90	0,07	2
	mittel	0,66	0,77	0,50	101,0	57,1	39,2	3,8	0,49	295	0,71	313	0,28	137	0,18	188
	max	0,91	1,22	0,96	167,8	30,1	37,7	6,4	0,38	309	1,05	339	0,80	297	0,37	358
max $H_p$ M3	min	0,45	0,62	0,22	37,2	24,5	14,7	2,4	0,09	124	0,37	122	0,04	90	0,09	2
	mittel	0,64	0,81	0,50	102,5	58,4	41,3	3,8	0,50	305	0,73	315	0,28	134	0,18	187
	max	0,91	1,22	0,96	120,0	90,0	118,3	6,0	0,27	306	1,19	344	0,23	110	0,37	358
max $H_s$ M3	min	0,02	0,02	0,88	61,7	30,7	23,9	2,1	0,02	123	0,01	113	0,01	90	0,04	27
	mittel	0,21	0,23	0,98	138,7	69,9	63,5	3,0	0,40	228	0,28	254	0,09	168	0,15	206
	max	0,74	0,86	1,33	243,6	110,0	135,0	3,5	0,88	309	0,92	326	0,32	314	0,26	63

Die in Tabelle 5-5 in Rot hinterlegten Zellen zeigen an, dass diese dem jeweiligen maximalen Schiffswellenereignis zugeordnet sind, d.h. zu demselben Ereignis gehören.

### 5.5.2.3 Weitergehende Analysen

Nachfolgend wird analog zu Abschnitt 5.4.2.3 detaillierter auf die Ergebnisse der Einzelauswertung an der Messlokation M3 eingegangen. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen den maximalen Schiffswellenparametern und den maßgebenden schiffsdynamischen Parametern an der Messlokation M3 dargestellt. Im Ergebnis ergibt sich ein ähnliches Bild wie für an der Messlokation M2.

#### Maximaler Absunk

Die statistische Verteilung der 50 höchsten Absunk-Ereignisse an der Messlokation M3 wird in Abbildung 5-21 in Abhängigkeit der maßgebenden Einflussparameter Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die 50 höchsten Absunk-Ereignisse von  $z_A = 0,52$  m bis  $0,91$  m überwiegend von Schiffen mit Tiefgängen von 8 m bis 13 m verursacht werden. Der maximale Absunk mit  $z_A = 0,91$  m wird wie auch an der Messlokation M2 durch die Passage der ELYSÉE mit 8,3 m Tiefgang verursacht.

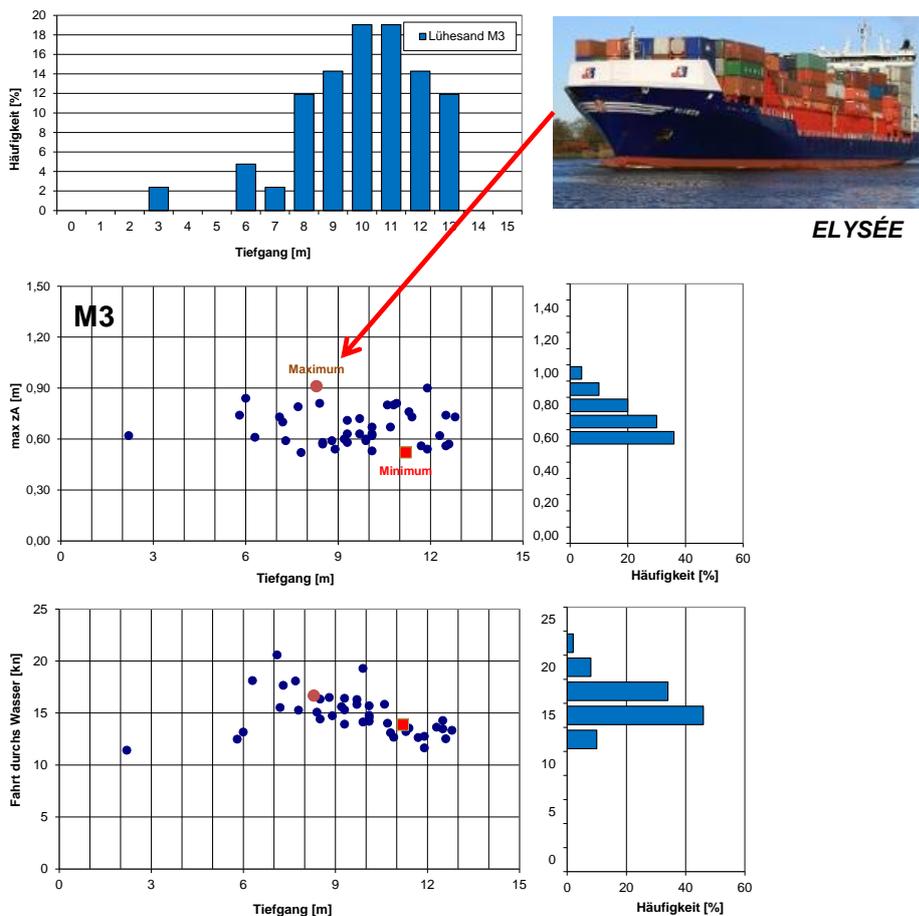


Abbildung 5-21: Verteilung der 50 höchsten Absunk-Ereignisse in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M3

### Maximale Primärwellenhöhe

Die statistische Verteilung der Schiffswelleneignisse mit den 50 höchsten Primärwellenhöhen  $H_p$  zwischen 0,62 m und 1,22 m (Maximalereignis) wird in der folgenden Abbildung 5-22 in Abhängigkeit der Einflussparameter Tiefgang und Schiffsgeschwindigkeit (Fahrt durchs Wasser) dargestellt.

Das Maximalereignis der Primärwellenhöhe mit  $H_p = 1,22$  m geht auf die Passage der *CSCL PUSAN* mit 11,9 m Tiefgang bei 11,9 kn zurück. Dieses Maximalereignis ist doppelt so groß wie die Primärwellenhöhe im 50. Rang (Schiff mit Tiefgang von 10,8 m und Fahrt durchs Wasser von 13,3 kn, vgl. Anlage 10).

Aus Abbildung 5-22 wird weiter ersichtlich, dass Schiffe mit größeren Tiefgängen zwar langsamer fahren aber aufgrund ihrer Verdrängung trotzdem relativ hohe Primärwellen erzeugen können.

Im Vergleich zur Statistik der 50 höchsten Absunk-Ereignisse in Abbildung 5-21 fällt auf, dass Schiffe mit 8 m Tiefgang hier vergleichsweise wenig vertreten sind.

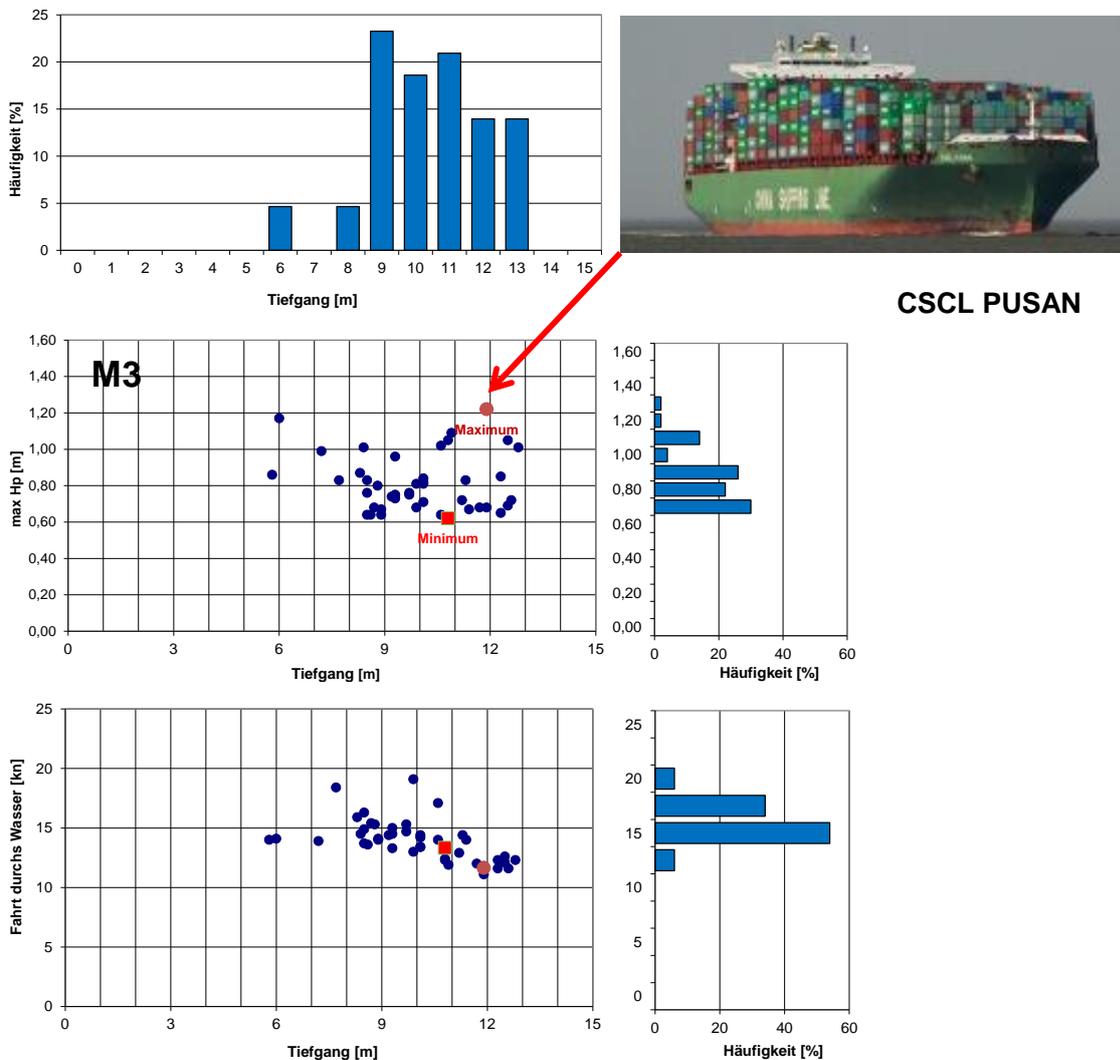


Abbildung 5-22: Verteilung der 50 höchsten Ereignisse der Primärwelle in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M3

### Maximale Sekundärwellenhöhe

Die statistische Verteilung der Schiffswelleneignisse mit den 50 höchsten Sekundärwellenhöhen  $H_s$  zwischen 0,88 m und 1,33 m (Maximalereignis) wird in der folgenden Abbildung 5-23 in Abhängigkeit der Einflussparameter Tiefgang und Schiffsgeschwindigkeit (Fahrt durchs Wasser) dargestellt.

Die Tiefgänge der Schiffe für die 50 höchsten Ereignisse variieren gleichmäßig verteilt zwischen 6 m und 13 m, wobei ein Viertel dieser Schiffe hat einen Tiefgang von 11 m (vgl. Abbildung 5-23).

Die maximale Sekundärwellenhöhe mit  $H_s = 1,33$  m wird der *MSC MAUREEN* zugeordnet. Dies ist insofern bemerkenswert, da dieses Schiff rund 5 kn bis 8 kn langsamer fuhr als Schiffe mit einem geringeren Tiefgang von 6 m. Auch Schiffe mit vergleichbaren Tiefgängen zeigen ähnliche Schiffsgeschwindigkeiten wie die *MSC MAUREEN*. Das deutet daraufhin, dass es etwas Schiffsspezifisches geben könnte wie z.B. die Schiffsform oder die Trimmung, die tendenziell zu vergleichsweise höheren Sekundärwellenhöhen führt. Weitere Details sind nicht bekannt.

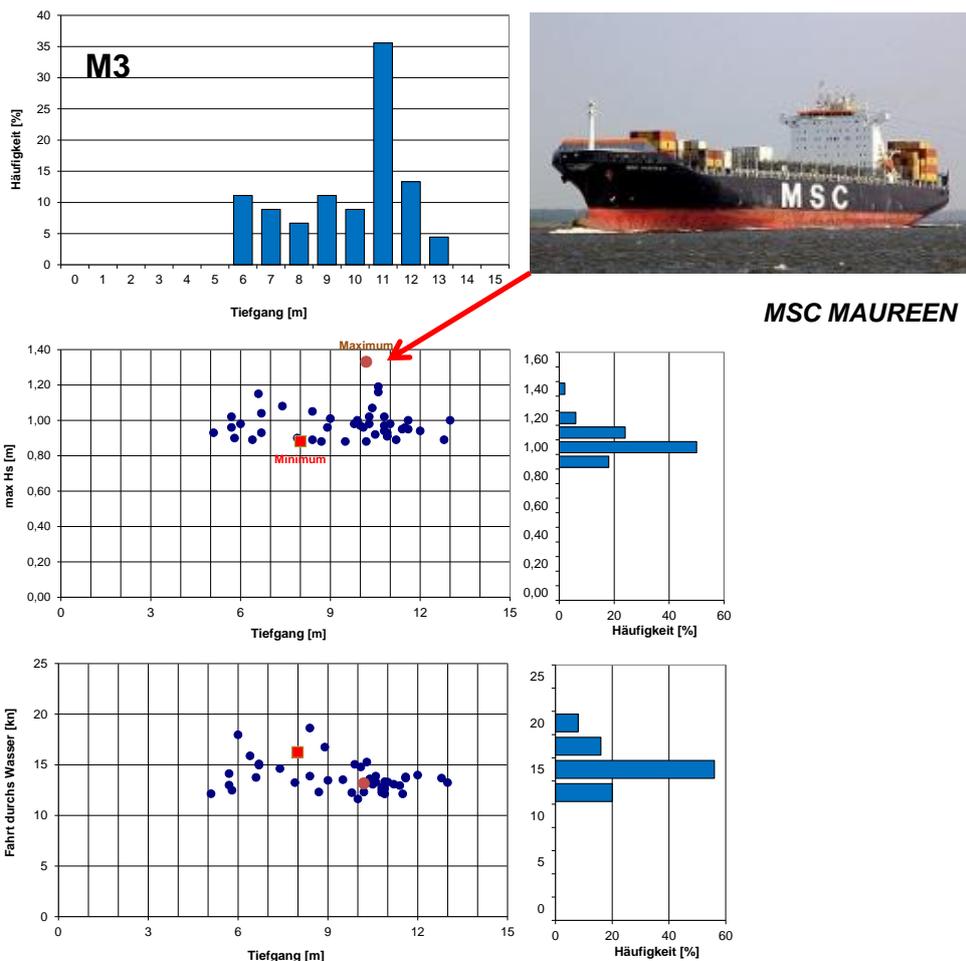


Abbildung 5-23: Verteilung der 50 höchsten Sekundärwellenhöhen in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang an der Messlokation M3

### Einflussparameter

Der Einfluss der Parameter Tidewasserstand, Passierabstand, Schiffsgeschwindigkeit und Tiefgang auf die charakteristischen Schiffswellenparameter Absunk, Primärwellenhöhe und Sekundärwellenhöhe wird für alle analysierten Schiffswellenereignisse an der Messlokation M3 in der folgenden Abbildung 5-24 dargestellt.

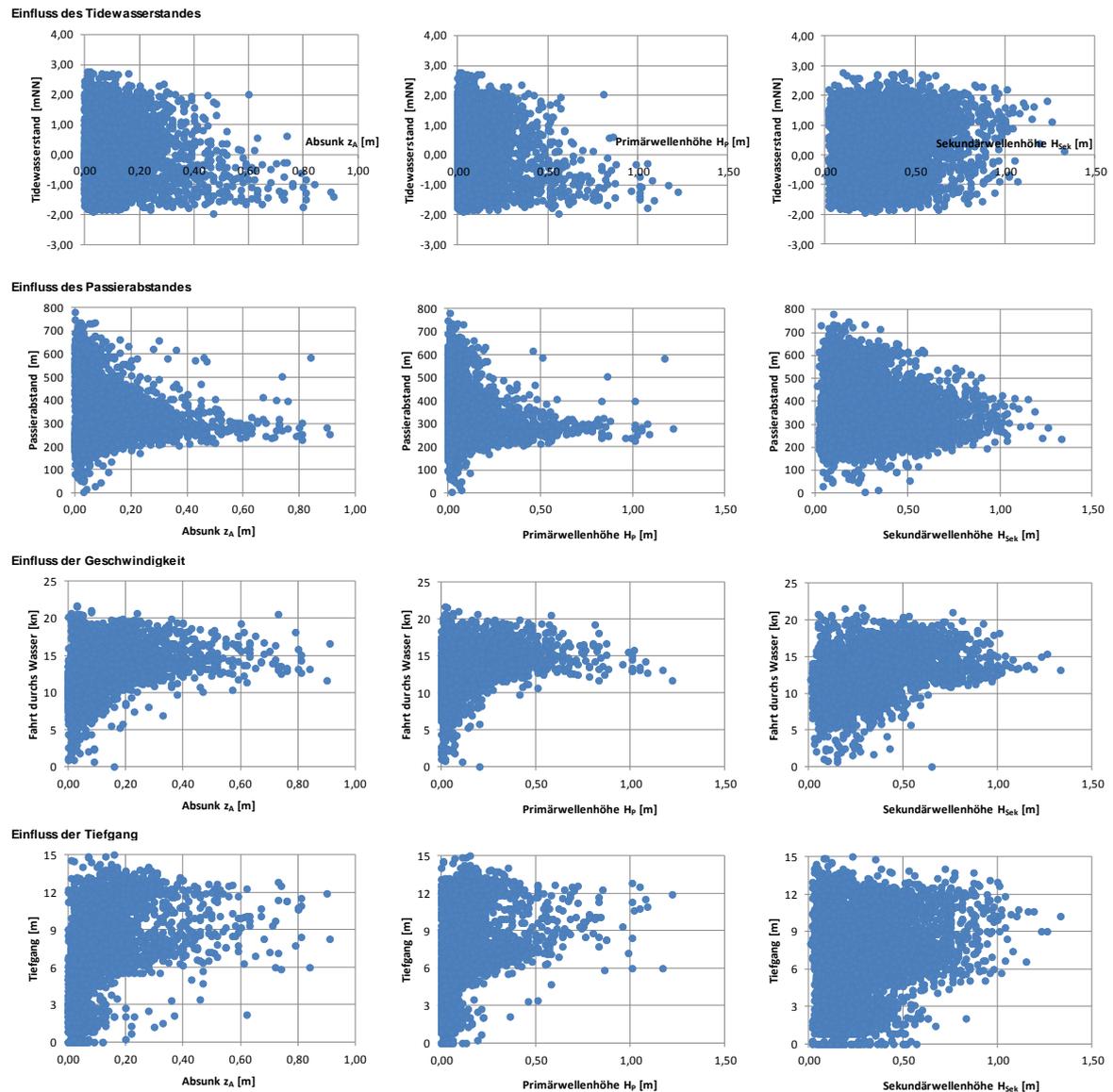


Abbildung 5-24: Einfluss des Tidewasserstandes (oben), des Passierabstandes, der Schiffsgeschwindigkeit und des Tiefganges (unten) auf die charakteristischen Schiffswellenparameter Absunk (links), Primärwelle (Mitte) und Sekundärwelle (rechts) für alle Schiffswellenereignisse an der Messlokation M3

Für die an der Messlokation M3 analysierten und in Abbildung 5-24 dargestellten Schiffswellenereignisse und ihre zugehörigen charakteristischen Schiffswellenparameter sind folgende Aussagen ableitbar:

- Maximaler Absunk kann erwartet werden für Schiffspassagen bei
  - Tidewasserständen zwischen NN –1 m bis NN – 2 m,
  - Passierabständen von rund 250 m bis 300 m,
  - Schiffsgeschwindigkeiten  $FdW^3$  zwischen 12 kn und 17 kn und
  - Tiefgängen zwischen 8 m und 12 m
- Für die maximale Primärwellenhöhe zeigt sich derselbe Zusammenhang wie bereits für den Absunk erläutert (s.o.).
- Die analysierten Sekundärwellenhöhen weisen eine deutlich weitere Streuung über die Einflussparameter auf. Maximale Sekundärwellen sind zu erwarten bei
  - Tidewasserständen größer NN +0 m
  - Passierabständen von rund 200 m bis 300 m,
  - Schiffsgeschwindigkeiten  $FdW$  zwischen 13 kn und 15 kn und
  - Tiefgängen zwischen 9 m und 12 m.

Auf die dokumentierten und aufbereiteten Daten in Anlage 10 wird verwiesen.

Diese für die Messlokation M3 aufgezeigten Zusammenhänge stehen grundsätzlich in Übereinstimmung mit den aufgezeigten Abhängigkeiten der charakteristischen Schiffswellenparameter an der Messlokation M2 (vgl. Abbildung 5-13 bis Abbildung 5-16).

---

<sup>3</sup> Fahrt durchs Wasser

## 5.6 Vergleichende Betrachtungen zur Entwicklung der Schiffswellen zwischen den Querprofilen M2 und M3

Die relativ eng beieinander liegenden Messlokationen M2 und M3 eröffnen die Möglichkeit, die unterschiedliche Entwicklung der Schiffswellen bei derselben Schiffspassage näher zu untersuchen. Diese vergleichenden Betrachtungen sollen nachfolgend für die Schiffspassage der ELYSÉE und der QUEEN MARY 2 vorgestellt werden.

Die Schiffspassage der ELYSÉE am 21.06.2011 als Aufkommer verursachte an beiden Messlokationen ein Schiffswellenereignis, welches an der Messlokation M3 sogar den maximalen Absunk erzeugte (vgl. Anlage 10). In der folgenden Abbildung 5-25 werden die Zeitreihen der Primär- und Sekundärwellen zeitsynchron abgebildet und mit zusätzlichen relevanten Passageinformationen dargestellt. Die Passage der ELYSÉE kann als Musterbeispiel für ein Schiffswellenereignis eines Containerfeeders angesehen werden.

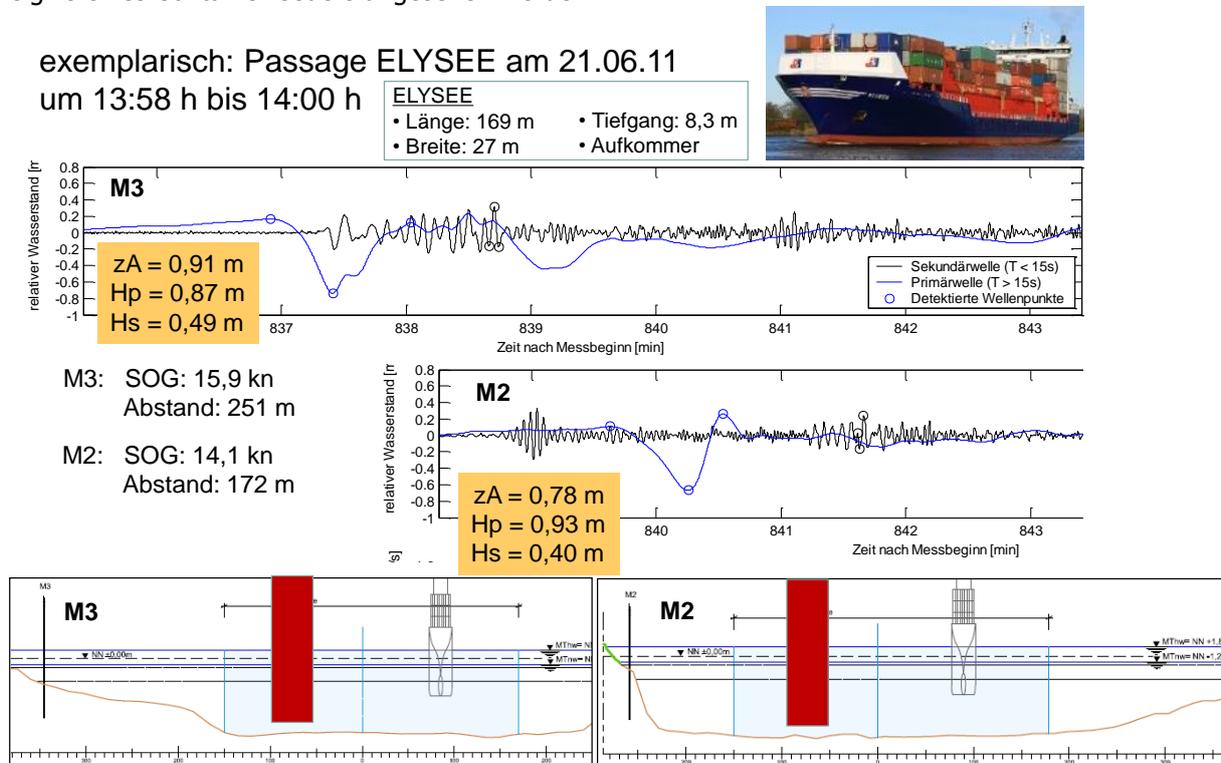


Abbildung 5-25: Entwicklung der Schiffswellenparameter bei der Schiffspassage der ELYSÉE am 21.06.2011 bei einem Wasserstand am Pegel Hetlingen von NN -1,41 m

Als Aufkommer erreicht die ELYSÉE zuerst die Messlokation M3. Aufgrund des niedrigen Tidewasserstandes von NN -1,41 m und der Schiffsgeschwindigkeit  $FdW^4$  von 16,7 kn fällt der Absunk  $z_A$  mit 0,91 m am abgeflachten Unterwasserprofil M3, gleichbedeutend mit einem verringerten verfügbaren Wasservolumen zwischen Schiff und Ufer, relativ groß aus und erreicht den 1. Rang der maximalen Ereignisse (vgl. Anlage 10).

Trotz des deutlich verringerten Passageabstandes verringert sich an der Messlokation M3 der Absunk  $z_A$  auf 0,78 m (10. Rang der maximalen Ereignisse, vgl.

<sup>4</sup> Fahrt durchs Wasser

Anlage 9), was auf das steilere Unterwasserprofil und die vergleichsweise größere verfügbare Wassermasse zurückgeführt werden kann.

An der Messlokation M2 wird im Vergleich zu der Messlokation M3 eine 5 cm größere Primärwellenhöhe  $H_p$  analysiert. Aus Abbildung 5-25 ist ebenfalls zu erkennen, dass an der Messlokation M2 die Primärwelle einen idealen und unverformten Verlauf zeigt, was auf die Unterschiede in der Unterwassertopografie zwischen M2 und M3 zurückgeführt werden kann.

Für die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  wurden 0,49 m an der Messlokation M3 und 0,40 m an der Messlokation M2 analysiert.

Welchen Einfluss die Parameter Tidewasserstand, Passierabstand, Geschwindigkeit und Tiefgang auf die Schiffswellenparameter Absunk, Primärwellenhöhe und Sekundärwellenhöhe an der Messlokation M3 für Passagen der ELYSÉE haben, kann Abbildung 5-26 entnommen werden.

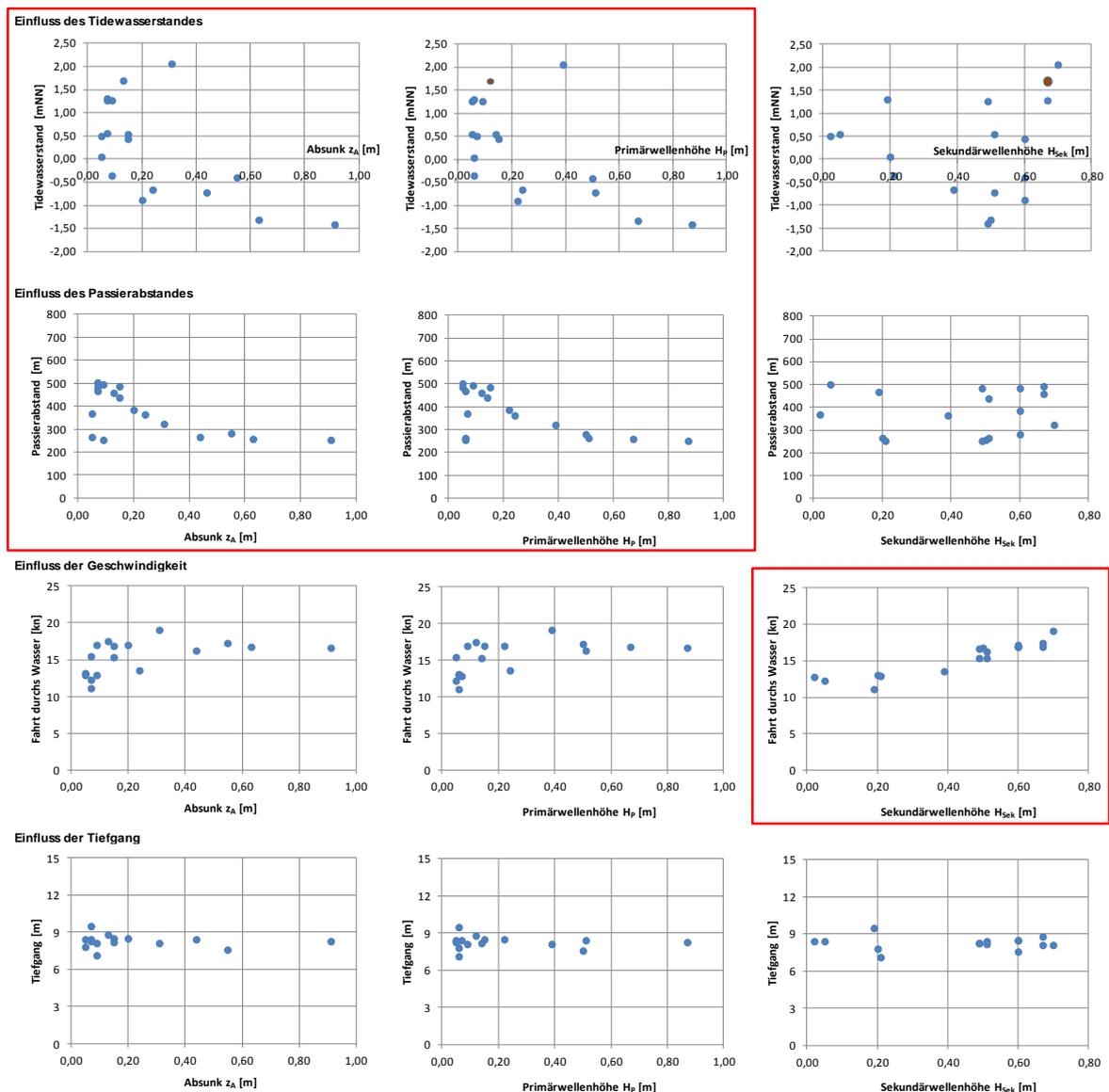


Abbildung 5-26: Einfluss der Parameter Tidewasserstand, Passierabstand, Geschwindigkeit und Tiefgang (von oben nach unten) auf die Schiffswellenparameter Absunk (links), Primärwellenhöhe (Mitte) und Sekundärwellenhöhe (rechts) an der Messlokation M3 für Schiffspassagen der ELYSÉE

Aus Abbildung 5-26 ist zu erkennen, dass Absunk und Primärwellenhöhe bei den Passagen der ELYSÉE maßgebend durch die Parameter Tidewasserstand und Passierabstand geprägt wird.

Die Sekundärwellenhöhe zeigt eine deutliche Abhängigkeit zur Schiffsgeschwindigkeit. Hier wird deutlich, dass eine Erhöhung der Geschwindigkeit von z.B. 14 kn auf 19 kn nahezu eine Verdoppelung der Sekundärwellenhöhe bewirken kann.

Zusätzlich sind nachfolgend in Tabelle 5-6 die analysierten Schiffswellenereignisse der ELYSÉE an der Messlokation M2 und M3 als Auszug der Anlage 9 und Anlage 10 aufgeführt.

Tabelle 5-6: Analysierte Schiffswellenereignisse der ELYSÉE an der Messlokation M2 (oben) und M3 (unten)

Schiffswellenereignis			Analyse Schiffswelle			Schiffsname	Seegang			Tidewasserstand		Schiff		
No.	Datum	Eintrittszeit	Absunk	Höhe PW	Höhe SW		Tiefgang	SOG	Abstand	Hs	T H1/3		Pegel Hettingen	Tidestieg/ Tidefall
	[TT.MM.JJJJ]	[hh:mm:ss]	Z <sub>A</sub> [m]	H <sub>p</sub> [m]	H <sub>s</sub> [m]	[ ]	[m]	[kn]	[m]	[m]	[s]	[mNN]	[1]	
438	27.4.2011	17:16:46	1,15	1,57	0,73	ELYSEE	NaN	16	149,8	0,06	0,9	-1,32	Tidefall	16,1
520	28.4.2011	21:54:56	0,17	0,12	0,66	ELYSEE	8,5	16	359,3	0,07	1,1	0,41	Tidestieg	16,9
1303	10.5.2011	4:23:36	0,08	0,10	0,42	ELYSEE	7,8	15	176,9	0,12	1,6	0,06	Tidestieg	13,7
1451	12.5.2011	7:19:11	0,04	0,02	0,04	ELYSEE	8,4	10	363	0,01	0,8	0,53	Tidestieg	10,9
1833	18.5.2011	0:26:43	0,05	0,06	0,10	ELYSEE	8,4	10	288,0	0,03	1,1	0,48	Tidestieg	11,5
2417	26.5.2011	22:40:44	0,36	0,51	0,71	ELYSEE	8,1	17	185,2	0,01	0,7	2,09	Tidefall	16,8
2589	29.5.2011	11:32:41	0,03	0,00	0,35	ELYSEE	8,1	16	400,2	0,07	1,6	1,24	Tidestieg	16,8
2978	8.6.2011	3:32:12	0,46	0,59	0,63	ELYSEE	8,4	17	172,1	0,04	0,9	-0,67	Tidestieg	15,6
3847	21.6.2011	14:00:43	0,78	0,93	0,40	ELYSEE	8,3	14	172,2	0,03	1,0	-1,42	Tidefall	14,1
3933	23.6.2011	6:51:00	0,04	0,02	0,04	ELYSEE	8,3	15	393,6	0,04	1,2	1,25	Tidestieg	15,4
4155	27.6.2011	4:00:59	0,64	0,85	0,66	ELYSEE	7,6	16	218,6	0,04	1,5	-0,41	Tidefall	16,2
4254	28.6.2011	12:20:22	0,07	0,08	0,13	ELYSEE	9,5	12	367,2	0,14	1,9	1,29	Tidestieg	12,1
4849	7.7.2011	12:33:05	0,08	0,04	0,05	ELYSEE	NaN	12	208,2	0,06	2,1	-0,68	Tidefall	11,8
5034	10.7.2011	19:50:19	0,21	0,17	0,64	ELYSEE	8,2	17	357,3	0,05	1,5	0,52	Tidestieg	16,8

Schiffswellenereignis			Analyse Schiffswelle			Schiffsname	Seegang			Tidewasserstand		Schiff		
No.	Datum	Eintrittszeit	Absunk	Höhe PW	Höhe SW		Tiefgang	SOG	Abstand	Hs	T H1/3		Pegel Hettingen	Tidestieg/ Tidefall
	[TT.MM.JJJJ]	[hh:mm:ss]	Z <sub>A</sub> [m]	H <sub>p</sub> [m]	H <sub>s</sub> [m]	[ ]	[m]	[kn]	[m]	[m]	[s]	[mNN]	[1]	
116	19.4.2011	17:09:35	0,13	0,12	0,67	ELYSEE	8,8	18	459	0,06	1,3	1,69	Tidefall	17,5
584	27.4.2011	17:14:46	0,63	0,67	0,50	ELYSEE		16	257	0,04	0,8	-1,32	Tidefall	16,8
662	28.4.2011	21:57:18	0,15	0,15	0,60	ELYSEE	8,5	16	485	0,07	1,1	0,44	Tidestieg	16,9
1414	10.5.2011	4:21:10	0,05	0,06	0,20	ELYSEE	7,8	14	265	0,08	1,3	0,04	Tidestieg	13,1
1545	12.5.2011	7:22:24	0,07	0,05	0,05	ELYSEE	8,4	12	501	0,02	0,9	0,55	Tidestieg	12,2
1859	17.5.2011	7:54:37	0,09	0,06	0,21	ELYSEE	7,1	12	253	0,08	1,6	-0,35	Tidefall	12,9
1915	18.5.2011	0:29:57	0,05	0,07	0,02	ELYSEE	8,4	12	369	0,01	0,7	0,50	Tidestieg	12,8
2469	26.5.2011	22:38:59	0,31	0,39	0,70	ELYSEE	8,1	19	322	0,03	0,8	2,06	Tidefall	19,1
2651	29.5.2011	11:35:23	0,09	0,09	0,67	ELYSEE	8,1	17	494	0,11	1,6	1,27	Tidestieg	16,9
3106	8.6.2011	3:30:23	0,44	0,51	0,51	ELYSEE	8,4	17	264	0,03	1,0	-0,72	Tidestieg	16,3
3215	9.6.2011	14:33:01	0,20	0,22	0,60	ELYSEE	8,5	18	385	0,15	1,9	-0,89	Tidefall	16,9
3942	21.6.2011	13:58:43	0,91	0,87	0,49	ELYSEE	8,3	16	251	0,04	1,8	-1,41	Tidefall	16,7
4022	23.6.2011	6:53:46	0,07	0,05	0,49	ELYSEE	8,3	15	484	0,07	1,3	1,26	Tidestieg	15,4
4244	27.6.2011	3:59:00	0,55	0,50	0,60	ELYSEE	7,6	16	280	0,01	0,8	-0,40	Tidefall	17,2
4337	28.6.2011	12:23:45	0,07	0,06	0,19	ELYSEE	9,5	11	467	0,11	1,5	1,30	Tidestieg	11,1
4953	7.7.2011	12:31:15	0,24	0,24	0,39	ELYSEE		13	362	0,13	3,4	-0,66	Tidefall	13,6
5139	10.7.2011	19:52:35	0,15	0,14	0,51	ELYSEE	8,2	15	439	0,06	1,2	0,54	Tidestieg	15,3

Die analysierten und in Anlage 9 und Anlage 10 dokumentierten Schiffswellenereignisse können gezielt für weitere Untersuchungen und Analysen zur Entwicklung von Schiffswellenparametern herangezogen werden. Auf die vorliegenden EXCEL-Dateien in Anlage 12 wird verwiesen.

Die Schiffspassage der QUEEN MARY 2 am 08.05.2011 dient in diesem Zusammenhang der Dokumentation, dass ein großes Schiff auch sehr geringe Schiffswellen erzeugen kann. In der folgenden Abbildung 5-27 werden die Zeitreihen der Primär- und Sekundärwellen zeitsynchron abgebildet und mit zusätzlichen relevanten Passageinformationen dargestellt.

exemplarisch: Passage QUEEN MARY 2  
am 08.05.11 um 19:44 h bis 19:47 h



**QUEEN MARY 2**  
 • Länge: 345 m • Tiefgang: 10,2 m  
 • Breite: 41 m • Abgänger

M3: SOG: 8,8 kn  
Abstand: 402 m

M2: SOG: 10 kn  
Abstand: 280 m

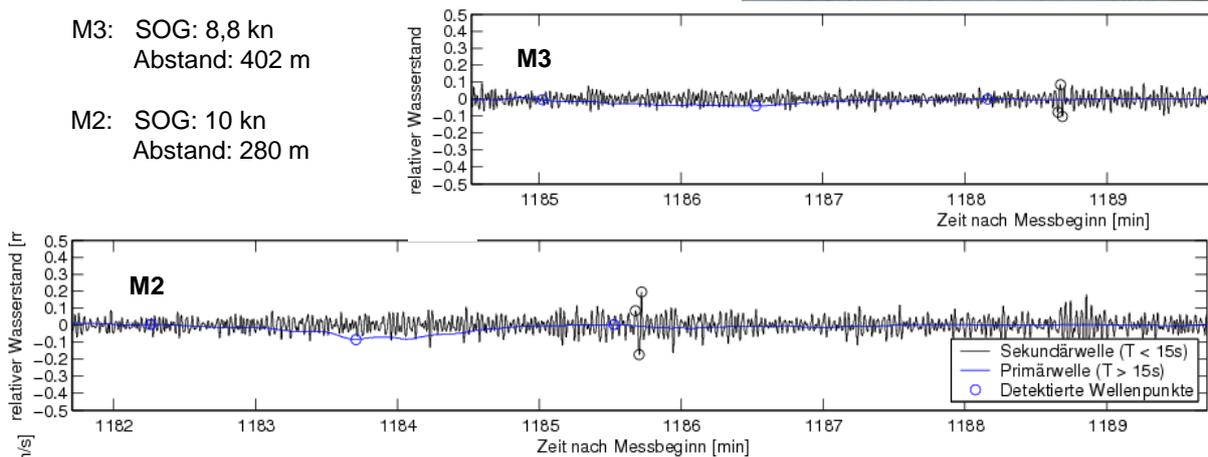


Abbildung 5-27: Entwicklung der Schiffswellenparameter bei der Schiffspassage der QUEEN MARY 2 am 08.05.2011

An der Messlokation M2 ist der Absenk in der Größenordnung von 0,1 m minimal erkennbar. Für die registrierten sechs Passagen der QUEEN MARY 2 variierte der Absenk zwischen 0,09 m und 0,20 m. Für die Primärwellenhöhe reichte die Spanne von 0,09 m bis 0,19 m. Die Sekundärwellen variierten in den analysierten sechs Passagen zwischen 0,3 m und 0,7 m. Tabelle 5-7 zeigt die analysierten Schiffswellenereignisse der QUEEN MARY 2 an den Messlokalationen.

Tabelle 5-7: Analytierte Schiffswellenereignisse der QUEEN MARY 2 an der Messlokation M2 (oben) und M3 (unten)

No.	Schiffswellenereignis			Analyse Schiffswelle			Schiffsname	Seegang			Tidewasserstand		Schiff	
	Datum	Eintrittszeit	Absenk	Höhe PW	Höhe SW	Tiefgang		SOG	Abstand	Hs	T H1/3	Pegel Hettingen		Tidestieg/ Tidestieg
	[TT.MM.JJJJ]	[hh:mm:ss]	Z <sub>A</sub> [m]	H <sub>p</sub> [m]	H <sub>s</sub> [m]	[m]	[kn]	[m]	[m]	[s]	[mN]	[1]	[kn]	
847	4.5.2011	3:42:19	0,11	0,11	0,33	QUEEN MARY 2	10,2	12	206,3	0,01	0,4	1,69	Tidestieg	11,7
897	4.5.2011	18:56:00	0,14	0,13	0,56	QUEEN MARY 2	10,2	14	294,9	0,08	1,4	0,79	Tidefall	12,8
1143	8.5.2011	4:00:28	0,17	0,15	0,45	QUEEN MARY 2	10,2	13	188,9	0,16	1,9	0,31	Tidestieg	12,3
1197	8.5.2011	19:44:10	0,09	0,09	0,37	QUEEN MARY 2	10,2	10	279,7	0,14	1,8	1,15	Tidefall	9,5
2369	26.5.2011	7:40:44	0,20	0,19	0,44	QUEEN MARY 2	10,2	13	174,9	0,18	2,0	0,06	Tidestieg	12,5
2420	26.5.2011	23:08:55	0,12	0,11	0,71	QUEEN MARY 2	10,2	13	358,8	0,01	0,7	1,96	Tidefall	12,1
979	4.5.2011	3:39:28	0,07	0,09	0,04	QUEEN MARY 2	10,2	12	322	0,01	0,5	1,67	Tidestieg	11,7
1033	4.5.2011	18:57:33	0,07	0,00	0,13	QUEEN MARY 2	10,2	14	405	0,09	1,6	0,78	Tidefall	12,3
1269	8.5.2011	3:57:53	0,08	0,10	0,18	QUEEN MARY 2	10,2	11	300	0,12	1,6	0,28	Tidestieg	10,9
1319	8.5.2011	19:47:53	0,04	0,04	0,19	QUEEN MARY 2	10,2	8,8	402	0,13	1,5	1,13	Tidefall	7,7
2426	26.5.2011	7:38:19	0,14	0,15	0,39	QUEEN MARY 2	10,2	13	293	0,14	1,8	0,04	Tidestieg	12,9
2472	26.5.2011	23:12:02	0,13	0,12	0,61	QUEEN MARY 2	10,2	13	376	0,03	0,8	1,94	Tidefall	11,7
2767	1.6.2011	3:28:36	0,04	0,04	0,19	QUEEN MARY 2	10,2	14	312	0,08	1,0	1,82	Tidefall	14,2

## 5.7 Vergleichende Betrachtungen der schiffserzeugten Wellen und Strömungen mit und ohne Rücksichtnahme

Die Möglichkeit vergleichender Betrachtungen schiffserzeugter Wellen und Strömungen mit und ohne Rücksichtnahme ergab sich zufällig im Laufe des Projektes, da im Bereich Lühesand seitens der Verkehrszentrale wegen eines Arbeitspontons (*Rochen*) für den Zeitraum 18. KW bis 20. KW offiziell Rücksichtnahme eingefordert wurde.

Die folgende Abbildung 5-28 zeigt den Elbabschnitt und die Position des *Rochen* am 13.05.2011. Rücksichtnahme bedeutet konkret, dass die passierenden Schiffe ihre Geschwindigkeit ausreichend vor ihrer Passage reduzieren, um die Schiffswellenbelastungen für ein bestimmtes Fahrzeug oder laufende Arbeiten während der Passage zu reduzieren.

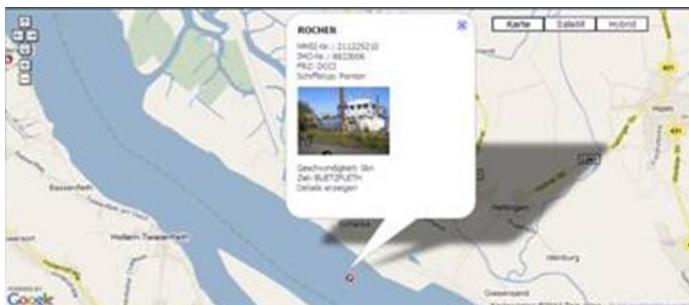


Abbildung 5-28: Arbeitsponton Rochen am 13.05.2011 (www.hafenradar.de)

Im Nachgang betrachtet erweist sich dieser Zufall als absoluter Glücksfall, da auf diese Weise im Rahmen der Messkampagne die Wirkung einer Rücksichtnahme auf die schiffserzeugten Wellen und Strömungen näher untersucht werden konnte. Auf diese Ergebnisse wird nachfolgend eingegangen.

Die Zeiten der Rücksichtnahme sind u.a. in der Übersicht der Messdaten (Anlage 5) gekennzeichnet. Einen Überblick der registrierten Schiffsgeschwindigkeiten SOG über den Messzeitraum stellt die folgende Abbildung 5-29 dar. In dem Zeitfenster der ersten Rücksichtnahme ist rein optisch erkennbar, dass sich die maximalen Schiffsgeschwindigkeiten um etwa 5 kn verringert haben.

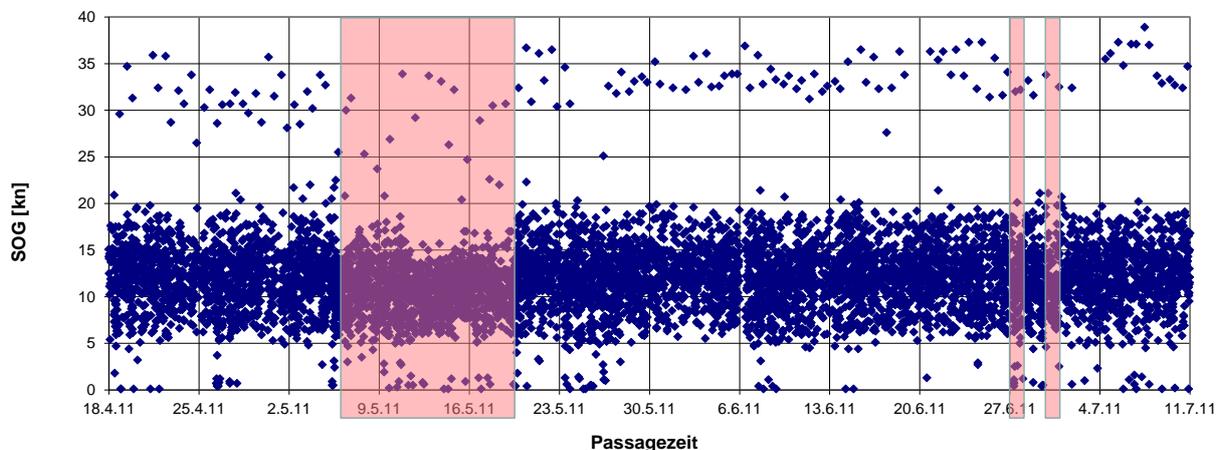


Abbildung 5-29: Registrierte Schiffsgeschwindigkeiten im Messzeitraum mit Kennzeichnung der Zeiträume für die Rücksichtnahme (in Rot hinterlegt)

In den Listen der ausgewerteten Schiffswelleneignisse an den Messlokalationen M2 und M3 (vgl. Anlage 9 und Anlage 10) sind die Schiffswelleneignisse bei Rücksichtnahme zur besseren Kennzeichnung jeweils farbig hinterlegt worden. Auf die entsprechenden EXCEL-Dateien wird verwiesen.

Trotz der formal angemeldeten Rücksichtnahme sind in den Listen der 50 höchsten Schiffswelleneignisse, sortiert nach maximalem Absunk, maximaler Primär- oder Sekundärwelle (vgl. Anlage 9 und Anlage 10), auch Ereignisse bei Rücksichtnahme zu finden. Für die auftretenden Sekundärwellen an der Messlokation M2 sind dies sogar 5 Schiffswelleneignisse unter den größten 50 Ereignissen. Für die anderen Parameter sind es 2 bis 3 Ereignisse bei Rücksichtnahme, die sich unter den höchsten 50 befinden.

Bei dem Vergleich der charakteristischen Schiffswellenparameter für Absunk, Primär- und Sekundärwellenhöhe für die definierten Auswerteziträume ohne Rücksichtnahme (in Blau) und mit Rücksichtnahme (in Rot) ergibt sich die folgende Abbildung 5-30 für Unterschreitungshäufigkeiten und relative Häufigkeiten. Die Wirkung der Rücksichtnahme auf die charakteristischen Schiffswellenparameter Absunk, Primär- und Sekundärwellenhöhe wird dabei sehr deutlich.

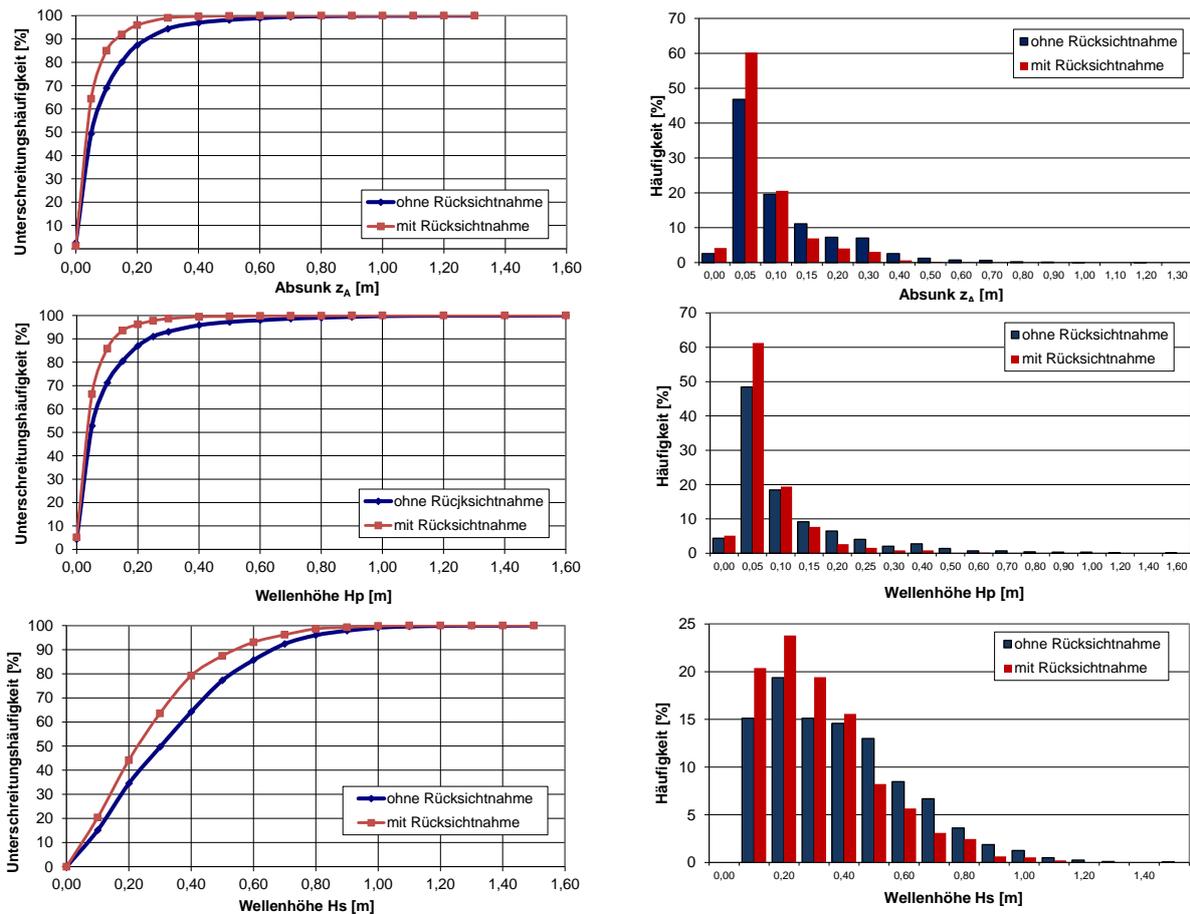


Abbildung 5-30: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk  $z_A$  (oben), Primärwellenhöhe  $H_p$  (Mitte) und Sekundärwellenhöhe  $H_s$  (unten) an der Messlokation M2 ohne und mit Rücksichtnahme (vgl. S. 42 in Anlage 11)

Als Ergebnisse der vergleichenden Betrachtungen in Abbildung 5-30 kann Folgendes festgehalten werden:

- Die Häufigkeiten der charakteristischen Schiffswellenparameter (vgl. Abbildung 5-30 rechts) verlagern sich aufgrund der Rücksichtnahme hin zu kleineren Schiffswellenparametern, d.h. Schiffswellenereignisse mit hohen Schiffswellenparametern treten nicht mehr so häufig auf und Schiffswellenereignisse mit kleineren Schiffswellenparametern treten entsprechend häufiger auf als ohne Rücksichtnahme.
- Die Unterschreitungshäufigkeiten (vgl. Abbildung 5-30 links) mit Rücksichtnahme (in Rot) liegen deutlich links von den Unterschreitungshäufigkeiten ohne Rücksichtnahme (in Blau). D.h. die auftretenden Schiffswellenbelastungen für Absunk, maximaler Primär- oder Sekundärwelle sind insgesamt bei Rücksichtnahme reduziert. Statistisch
  - verringern sich der Absunk und die Primärwelle um rund 50 %. So zeigen 90 % der Ereignisse einen Absunk  $z_A$  kleiner 0,10 m anstelle 0,20 m ohne Rücksichtnahme. Gleiches gilt für die Primärwelle.
  - verringert sich die Sekundärwellenhöhe um rund 25 %. So zeigen 90 % der Schiffswellenereignisse eine Sekundärwellenhöhe  $H_s$  kleiner 0,50 m anstelle 0,65 m ohne Rücksichtnahme.

Die deutliche Reduzierung charakteristischen Schiffswellenparameter bei Rücksichtnahme wird auch in der folgenden Abbildung 5-31 deutlich.

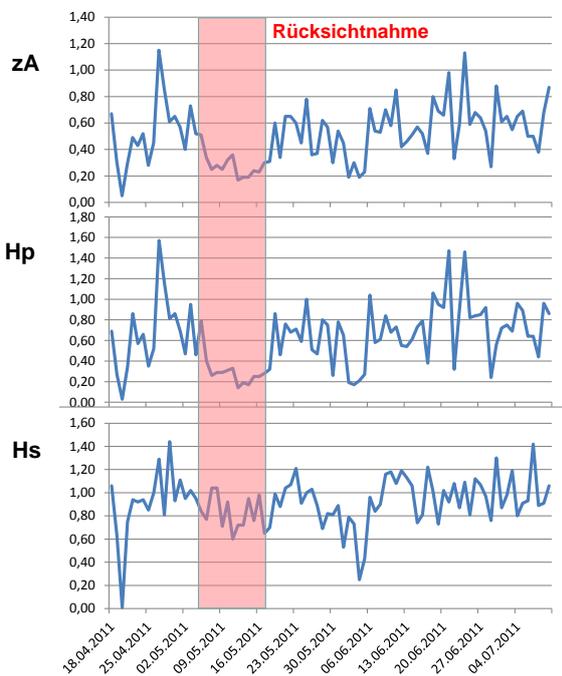


Abbildung 5-31: Maximale Schiffswellenparameter über den Messzeitraum mit Kennzeichnung des Zeitraumes der Rücksichtnahme

Weitere vergleichende Analysen der charakteristischen Schiffswellenparameter und deren Abhängigkeit von den Einflussparametern Schiffsgeschwindigkeit (Fahrt durchs Wasser) und Tiefgang kann den Seiten 43 bis 45 der Abschlusspräsentation in Anlage 11 entnommen werden.

## 5.8 Schiffswellenereignisse bei HSC-Passagen (*Halunder Jet*) an den Messloktionen M2 und M3

Im Rahmen der Messkampagne wurden innerhalb des Messzeitraumes insgesamt 131 HSC-Passagen und zugehörige Ereignisse an M2 bzw. 133 an M3 registriert und analysiert. Diese Anzahl entspricht ca. 2,6 % der ausgewerteten Schiffswellenereignisse und wurde von dem *Halunder Jet* (vgl. Abbildung 5-32) verursacht.



Abbildung 5-32: HSC *Halunder Jet*

Von diesen 131 bzw. 133 Ereignissen wurden 71 Ereignisse an der Messloktion M2 bzw. 42 Ereignisse an der Messloktion M3 vor dem Hintergrund der für die Passagen von schnellfahrenden HSC getroffenen Schiffswellendefinition (vgl. Abbildung 2-7) gesondert kontrolliert. Hinsichtlich der Erläuterungen zu den hydraulischen Prozessen um ein fahrendes Schiff und der grundlegenden Unterschiede in der Fahrdynamik zwischen einem Verdränger und einem HSC wird auf die Abschnitte 2 und 2.4 verwiesen.

Nachfolgend wird auf die Ergebnisse bei der Auswertung der analysierten HSC-Passagen eingegangen, die auch in der Ergebnispräsentation auf den Seiten 62 bis 66 der Anlage 11 dokumentiert sind.

### 5.8.1 Schiffswellendarstellung

Nachfolgend werden die Auswertebeispiele zweier Passagen des *Halunder Jet* auf seiner Rückfahrt nach Hamburg exemplarisch dargestellt. Als Aufkommer passiert der *Halunder Jet* am 29.04.2011 um 19:10 Uhr zunächst die Messloktion M3 (vgl. Abbildung 5-33) und anschließend eine Minute später die Messloktion M2 (vgl. Abbildung 5-34). Beide Ereignisse finden bei Ebbstrom und einem Wasserstand von NN – 1,50 m statt (vgl. Messdaten in Anlage 12).

Aus den zugehörigen Zeitreihen und unter Beachtung der Schiffswellendefinition in Abbildung 2-7 können die langperiodischen Schiffswellen (Divergenzwellen) an den beiden Messloktionen mit  $H_{\text{ükrit}} = 0,48$  m an M3 und  $H_{\text{ükrit}} = 0,51$  m an M2 ermittelt werden.

Für das zeitlich anschließende Sekundärwellenfeld wurde an M3 die Wellenhöhe  $H_s = 0,41$  m trotz des größeren Passierabstandes etwa 50 % größer ermittelt als an M2 mit  $H_s = 0,29$  m.

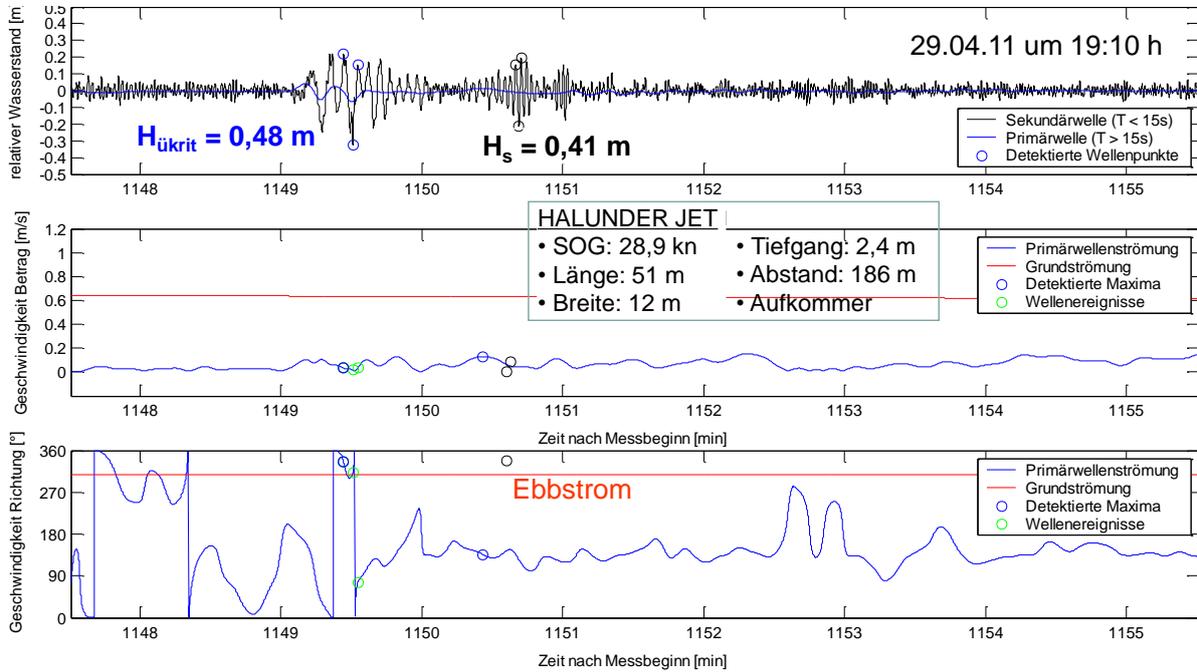


Abbildung 5-33: Auswertbeispiel für eine Passage des *Halunder Jet* an der Messlokation M3 am 29.04.2011 um 19:10 h

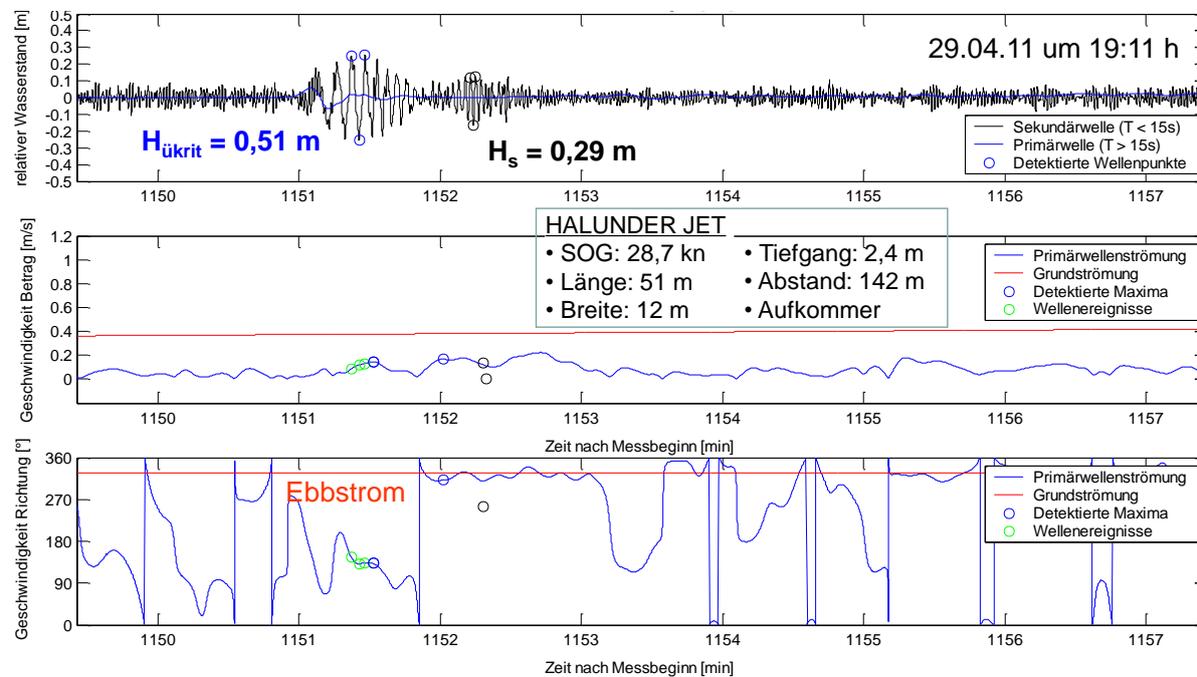


Abbildung 5-34: Auswertbeispiel für eine Passage des *Halunder Jet* an der Messlokation M2 am 29.04.2011 19:11 h

### 5.8.2 Statistische Analyse der Schiffswelleneignisse

In der folgenden Abbildung 5-35 werden die Unterschreitungshäufigkeiten und die relativen Häufigkeiten für die Wellenhöhe  $H_{\text{ükrit}}$  an den Messlokalen M3 und M2 ausgegeben. An der Messlokation M2 ist mit einer geringfügig größeren Belastung aus der Wellenhöhe  $H_{\text{ükrit}}$  zu rechnen.

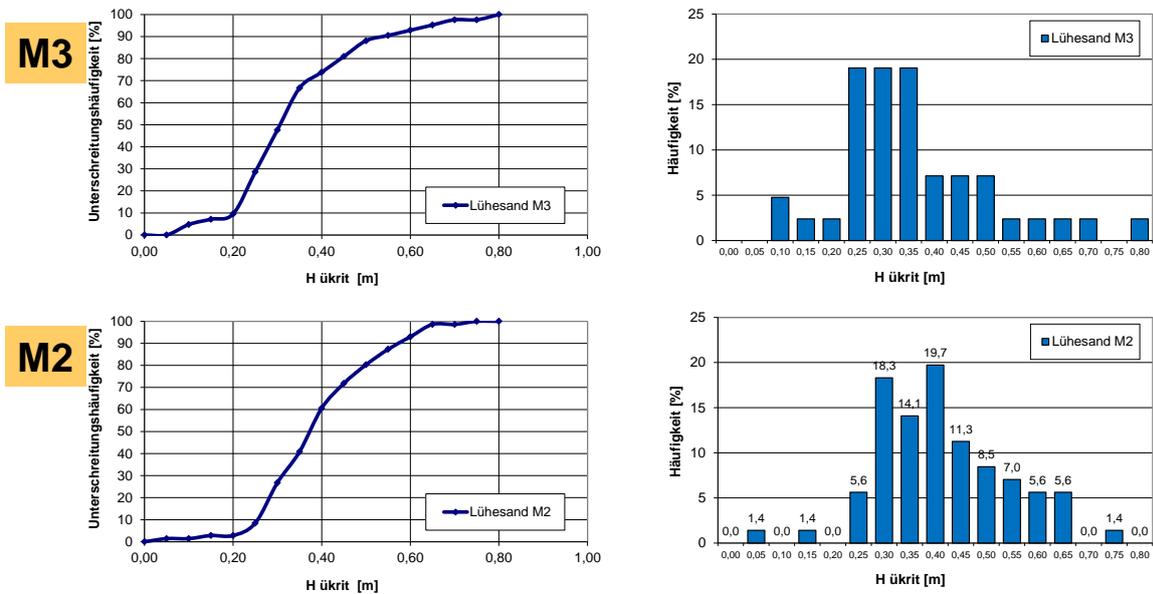


Abbildung 5-35: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für den Schiffswellenparameter  $H_{\text{ükrit}}$  an der Messlokation M3 (oben) und M2 (unten)

Die in Abbildung 5-36 dargestellten Unterschreitungs- und relativen Häufigkeiten zeigen auch für die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  eine höhere Belastung an der Messlokation M2 im Vergleich zu M3, was maßgeblich auf den geringeren Passierabstand an M2 zurückgeführt werden kann.

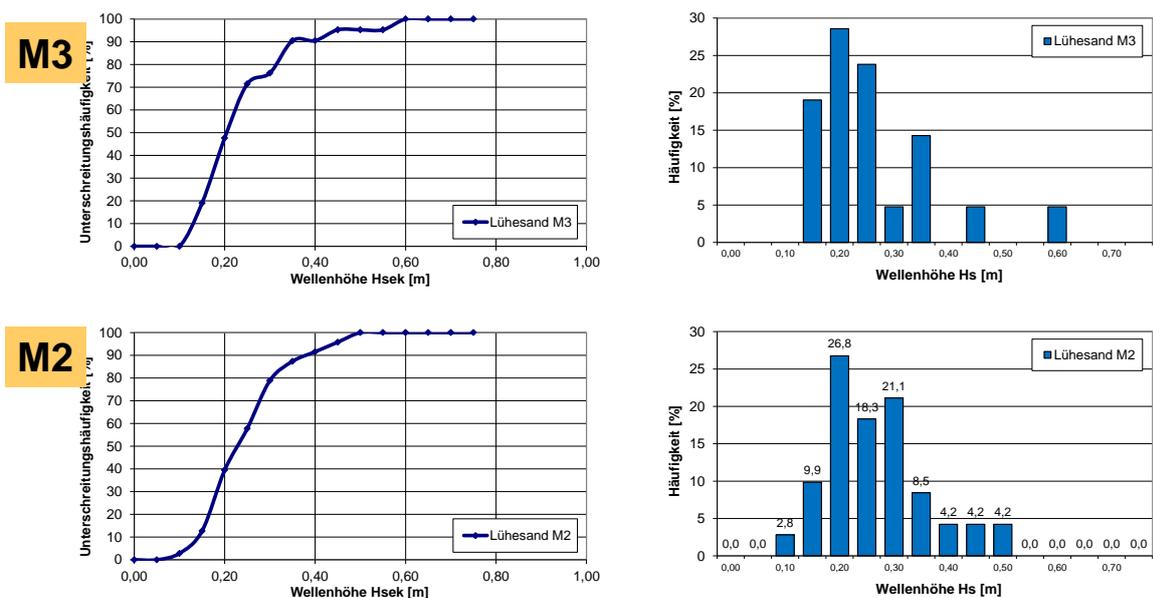


Abbildung 5-36: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  an der Messlokation M3 (oben) und M2 (unten)

**Einflussparameter**

Analog zu der Analyse der Schiffswellenereignisse in den Abschnitten 5.4.2.3 und 5.5.2.3 werden nachfolgend in Abbildung 5-37 die Abhängigkeiten der für HSC-Passagen charakteristischen Wellenparameter  $H_{\text{ükrit}}$  und  $H_s$  von dem Passierabstand und der Fahrtgeschwindigkeit dargestellt. Aus diesen Abbildungen lässt sich ableiten, dass die Wellenhöhe  $H_{\text{ükrit}}$  ebenso wie die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  mit zunehmendem Passierabstand tendenziell abnehmen. Weitere Details sind den Auswertungen in Anlage 12 zu entnehmen.

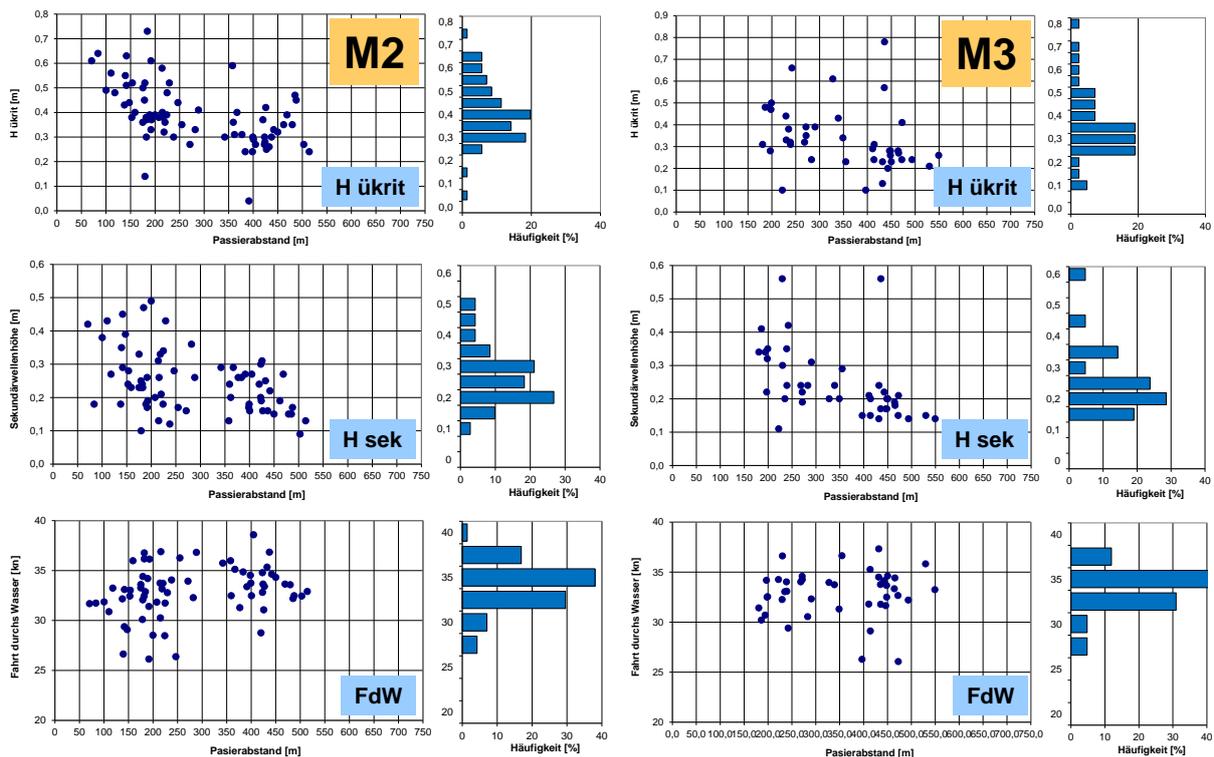


Abbildung 5-37: Einfluss des Passierabstandes auf die für ein HSC charakteristischen Schiffswellenparameter der Wellenhöhe  $H_{\text{ükrit}}$  (oben) und die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  (Mitte) für alle Schiffswellenereignisse an der Messlokation M2 (links) und M3 (rechts)

**Einfluss der Rücksichtnahme auf Schiffswellenereignisse**

Für die Passagen des *Halunder Jet* kann festgestellt werden, dass dieser seine Fahrtgeschwindigkeit während der Zeit der Rücksichtnahme nur wenige Male reduziert hat. In Abbildung 5-38 werden die Geschwindigkeiten des *Halunder Jet* chronologisch aufgetragen. Tendenziell ist im zeitlichen Verlauf eine Steigerung der Fahrtgeschwindigkeit von 2 kn bis 3 kn festzustellen.



## 6 Zusammenfassung

---

Am fahwasserseitigen Rand der Elbinsel Lühesand wurden vom 18.04.2011 bis zum 10.07.2011 an zwei Messlokationen Messungen der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen durchgeführt.

Mehr als 10.000 Schiffswellenereignisse wurden über die Dauer der Messkampagne über insgesamt 12 Wochen registriert und ausgewertet, deren Ergebnisse analysiert und aufbereitet. Die ausgewerteten Schiffswellenereignisse wurden u.a. mit AIS-Daten der zugehörigen Schiffspassage sowie mit Wasserstandsdaten verknüpft, so dass ein umfassendes Datenkollektiv zusammengetragen werden konnte, welches auch für weitergehende Auswertungen und Analysen herangezogen wurde.

Während der Messkampagne ergab sich die Möglichkeit, die Wirkung einer Rücksichtnahme auf die schiffserzeugten Belastungen näher zu untersuchen. Hintergrund für die Rücksichtnahme war die Durchführung von Baugrunduntersuchungen im Projektbereich. Auf die Auswirkungen dieser Rücksichtnahme auf die schiffserzeugten Belastungen wird nachfolgend eingegangen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Messkampagne Lühesand zusammengefasst.

### Statistik der Schiffspassagen

Aus der Statistik der Schiffspassagen wird ersichtlich, dass mehr als 80 % der Schiffspassagen den Seeschiffen zuzuordnen ist. Jedes dritte Seeschiff ist ein Containerschiff. Innerhalb des Messzeitraumes wurden auch Schiffspassagen vom schnellfahrenden *Halunder Jet* (HSC) registriert, die etwa 2,6 % der registrierten Passagen ausmachen. Folgende Angaben können der Schiffsstatistik entnommen werden:

- maximale Schiffslänge von 367 m (Containerschiff),
- maximale Schiffsbreite von 55 m (Bulkler),
- größter Tiefgang mit 15,4 m (Bulkler),
- maximale Geschwindigkeiten von 22,6 kn von Marine und behördlichen Fahrzeugen (abgesehen vom HSC *Halunder Jet*)
- minimale Passierabstände von rd. 50 m.

### Schiffserzeugte Belastungen der Verdränger

Die Auswertung der Schiffswellenereignisse hat ergeben, dass rund 70 % der registrierten Schiffspassagen auch tatsächlich ein Schiffswellenereignis an den Messlokationen M2 und M3 verursachen. Für den definierten Messzeitraum wurden insgesamt rund 10.000 Schiffswellenereignisse für die Messlokationen M2 und M3 ausgewertet.

Für die charakteristischen Schiffswellenparameter Absink  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s$  wurden Häufigkeitsverteilungen erstellt.

Im Rahmen der Einzelauswertung wurden u.a. die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der charakteristischen Schiffswellenparameter des Absink  $z_A$ , der Primärwellenhöhe  $H_p$  und der Sekundärwellenhöhe  $H_s$  bestimmt. Diese Schiffswel-

lenparameter sind nachfolgend in der Tabelle 6-1 komprimiert zusammengestellt. Die orange Hinterlegung markiert dort die jeweilige Sortierung der Schiffswellenereignisse nach Absunk, Primärwellenhöhe und Sekundärwellenhöhe.

Tabelle 6-1: Maximale Schiffswellenparameter des Absunk  $z_A$ , der Primärwellenhöhe  $H_P$  und der Sekundärwellenhöhe  $H_S$  an den Messlokalen M3 (links) und M2 (rechts)

M3		Parameter Analyse Schiffswelle			M2		Parameter Analyse Schiffswelle		
		$z_A$ [m]	$H_P$ [m]	$H_S$ [m]			$z_A$ [m]	$H_P$ [m]	$H_S$ [m]
max $z_A$ M3	min	0,52	0,00	0,10	max $z_A$ M2	min	0,54	0,00	0,17
	mittel	0,66	0,77	0,50		mittel	0,69	0,86	0,55
	max	0,91	1,22	0,96		max	1,15	1,57	1,16
max $H_P$ M3	min	0,45	0,62	0,22	max $H_P$ M2	min	0,42	0,68	0,17
	mittel	0,64	0,81	0,50		mittel	0,67	0,89	0,56
	max	0,91	1,22	0,96		max	1,15	1,57	1,16
max $H_S$ M3	min	0,02	0,02	0,88	max $H_S$ M2	min	0,01	0,00	0,94
	mittel	0,21	0,23	0,98		mittel	0,21	0,23	1,06
	max	0,74	0,86	1,33		max	0,70	0,84	1,44

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass an der Messlokation M2 im Vergleich zu M3 größere charakteristische Schiffswellenparameter analysiert werden konnten. Je nach Parameter kann diese Erhöhung 10 % bis 20 % betragen. Ursächlich dafür sind u.a. der tendenziell geringere Passierabstand an M2 sowie die steilere Unterwasserböschung.

Die maximalen Schiffswellenereignisse an den Messlokalen M2 und M3 gehen alle auf drei einzelne Containerschiffe mit Tiefgängen von 8,3 m, 10,2 m und 11,9 m zurück. Auch die nachfolgenden Ränge der maximalen Schiffswellenereignisse werden überwiegend mit mehr als 80 % durch Containerschiffe verursacht. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass maximale Wellenereignisse an den Messlokalen M2 und M3 erzeugt werden von Schiffen mit

- hoher Geschwindigkeit,
- Tiefgang von 9 bis 11 m,
- geringem Passierabstand und
- bei geringen Tidewasserständen.

### Schiffserzeugte Belastungen bei Rücksichtnahme

Bei angeordneter Rücksichtnahme sind die passierenden Schiffe grundsätzlich angehalten, ihre Geschwindigkeit zu reduzieren, wodurch sich auch unmittelbar die Schiffswellenbelastungen reduzieren. Entsprechende Untersuchungen über die tatsächliche Wirkungsweise der Rücksichtnahme während der Messkampagne Lühesand und insbesondere zu den Eintrittshäufigkeiten zeigen

- eine Halbierung der charakteristischen Parameter für den Absunk  $z_A$  und die Primärwellenhöhe  $H_P$  sowie
- eine Reduzierung von Sekundärwellenhöhe  $H_S$  um ca. 10 cm – 15 cm.

Der Vergleich der Schiffswellenbelastungen ohne und mit Rücksichtnahme zeigt, dass die schiffserzeugten Belastungen damit signifikant reduziert werden können.

### **Schiffserzeugte Belastungen des *Halunder Jet* (HSC)**

Rund 2,6 % der registrierten Schiffswellenereignisse gehen auf Passagen des *Halunder Jet* als sogenanntes *High Speed Craft* (HSC) zurück. Die Schiffsdynamik und damit auch das resultierende Schiffswellenbild unterscheiden sich grundlegend von den Verdrängern. Aus diesem Grunde wurde mit der Bundesanstalt für Wasserbau eine eigene Definition der Schiffswellen für ein HSC vorgenommen. Demnach ergeben sich für den *Halunder Jet* die folgenden charakteristischen Schiffswellen:

- langperiodische Schiffswelle  $H_{\text{ükrit}}$  : 0,3 m bis 0,7 m
- Sekundärwellenhöhe  $H_s$  bis 0,6 m.

Im Vergleich zu den Schiffswellenbelastungen aus den Passagen der Verdränger und deren Häufigkeiten kann für die Belastungen aus HSC-Passagen festgestellt werden, dass die Wellenbelastungen des *Halunder Jet* eine untergeordnete Rolle spielen, da die Verdränger deutlich größere Schiffswellen verursachen.

Vergleiche der Schiffswellen des HSC ohne und mit Rücksichtnahme zeigen im Mittel keine nennenswerten Unterschiede.

In der Konsequenz erscheint eine Reduzierung der Fahrtgeschwindigkeit des HSC bei Rücksichtnahme als nicht erforderlich.

Hamburg, 1. März 2013

**IMS** Ingenieurgesellschaft mbH

gez. Peters

gez. Baur

## Anlagen

- Anlage 1** Projektbeteiligte
- Anlage 2** Projektprotokoll mit Eisberichten des BSH und Memo 90213-01
- Anlage 3** Revierbedingungen
- Anlage 3.1** Hydrologie/Tidebedingungen
- Anlage 3.2** Morphologie
- Anlage 3.3** Seegang – Memo 90213-07
- Anlage 3.4** Schiffswellen - Gefährdungen durch Sog und Wellenschlag  
Flyer des WSA Hamburg – Stand: 02/2007
- Anlage 3.5** Verkehrsstatistik 2008
- Anlage 3.6** Eisverhältnisse
- Anlage 4** Unterlagen zur Messtechnik und zu den eingesetzten Messgeräten  
(Wellendraht und Strömungssonde)
- Anlage 5** Übersicht Messkampagne
- Anlage 6** Memo 90213-04 zur Vorgehensweise Seegangsanalyse
- Anlage 7** Memo 90213-05 zur Vorgehensweise Schiffswellenanalyse

## Anlagen zur Darstellung der Ergebnisse

- Anlage 8** Dokumentation der meteorologischen Messdaten der BAW in Verbindung mit den hydraulischen Parametern Wasserstand und Seegang an den Messlokalationen M2 und M3
- Anlage 9** Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an der Messlokation M2
- Anlage 10** Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an der Messlokation M3
- Anlage 11** Präsentation der Ergebnisse vom 26.10.2011

## Digitale Anlagen der Messdaten und Auswertungen

- Anlage 12** DVD – Daten und Auswertungen
- Anlage 13** DVD – Messdaten der Messlokalationen M2 und M3

# **Anlage 1**

## **Projektbeteiligte**

## **Anlage 2**

### **Projektprotokoll mit Eisberichten des BSH und Memo 90213-01**

## **Anlage 3**

### Revierbedingungen

Anlage 3.1 Hydrologie/Tidebedingungen

Anlage 3.2 Morphologie

Anlage 3.3 Seegang – Memo 90213-07

Anlage 3.4 Schiffswellen - Gefährdungen durch Sog  
und Wellenschlag

Flyer des WSA Hamburg – Stand: 02/2007

Anlage 3.5 Verkehrsstatistik 2008

Anlage 3.6 Eisverhältnisse

## **Anlage 3.1**

### Hydrologie/Tidebedingungen

# **Anlage 3.2**

## **Morphologie**

## **Anlage 3.3**

### **Seegang – Memo 90213-07**

## **Anlage 3.4**

### Schiffswellen - Gefährdungen durch Sog und Wellenschlag

## **Anlage 3.5**

### **Verkehrsstatistik 2008**

## **Anlage 3.6**

### Eisverhältnisse

## **Anlage 4**

Unterlagen zur Messtechnik und  
zu den eingesetzten Messgeräten  
(Wellendraht und Strömungssonde)

## **Anlage 5**

# Übersicht Messkampagne

## **Anlage 6**

### Memo 90213-04 zur Vorgehensweise Seegangsanalyse

## **Anlage 7**

### Memo 90213-05 zur Vorgehensweise Schiffswellenanalyse

## Anlagen zur Darstellung der Ergebnisse

## **Anlage 8**

Dokumentation der meteorologischen Messdaten der BAW  
in Verbindung mit den hydraulischen Parametern  
Wasserstand und Seegang an den Messlokalen M2 und M3

## Messlokation M2

## Messlokation M

3

## Anlage 9

### Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an der Messlokation M2

- Statistik der Schiffspassagen
- Übersicht Messkampagne
- Zusammenstellung mittlere Schiffswellenparameter
- Zusammenstellung der 50 höchsten Schiffswellenereignisse für
  - Absunk  $z_A$
  - Primärwelle  $H_P$
  - Sekundärwelle  $H_S$
- Schiffswellenereignisse Halunder Jet
  - alle Ereignisse
  - kontrollierte Ereignisse

## Anlage 10

### Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an der Messlokation M3

- Statistik der Schiffspassagen
- Übersicht Messkampagne
- Zusammenstellung mittlere Schiffswellenparameter
- Zusammenstellung der 50 höchsten Schiffswellenereignisse für
  - Absenk  $z_A$
  - Primärwelle  $H_P$
  - Sekundärwelle  $H_S$
- Schiffswellenereignisse Halunder Jet
  - alle Ereignisse
  - kontrollierte Ereignisse

## **Anlage 11**

Präsentation der Ergebnisse vom 26.10.2011

## Digitale Anlagen der Messdaten und Auswertungen

## **Anlage 12**

### DVD – Daten und Auswertungen

## **Anlage 13**

### DVD – Messdaten der Messlokationen M2 und M3

**Inhalt DVD's 1 / 6 bis 3 / 6: Messlokation M2**

 m2_cor20110404.dat	 m2_cor20110514.dat	 m2_cor20110623.dat	 m2_cor20110802.dat
 m2_cor20110405.dat	 m2_cor20110515.dat	 m2_cor20110624.dat	 m2_cor20110803.dat
 m2_cor20110406.dat	 m2_cor20110516.dat	 m2_cor20110625.dat	 m2_cor20110804.dat
 m2_cor20110407.dat	 m2_cor20110517.dat	 m2_cor20110626.dat	 m2_cor20110805.dat
 m2_cor20110408.dat	 m2_cor20110518.dat	 m2_cor20110627.dat	 m2_cor20110806.dat
 m2_cor20110409.dat	 m2_cor20110519.dat	 m2_cor20110628.dat	 m2_cor20110807.dat
 m2_cor20110410.dat	 m2_cor20110520.dat	 m2_cor20110629.dat	 m2_cor20110808.dat
 m2_cor20110411.dat	 m2_cor20110521.dat	 m2_cor20110630.dat	 m2_cor20110809.dat
 m2_cor20110412.dat	 m2_cor20110522.dat	 m2_cor20110701.dat	 m2_cor20110810.dat
 m2_cor20110413.dat	 m2_cor20110523.dat	 m2_cor20110702.dat	 m2_cor20110811.dat
 m2_cor20110414.dat	 m2_cor20110524.dat	 m2_cor20110703.dat	 m2_cor20110812.dat
 m2_cor20110415.dat	 m2_cor20110525.dat	 m2_cor20110704.dat	 m2_cor20110813.dat
 m2_cor20110416.dat	 m2_cor20110526.dat	 m2_cor20110705.dat	 m2_cor20110814.dat
 m2_cor20110417.dat	 m2_cor20110527.dat	 m2_cor20110706.dat	 m2_cor20110815.dat
 m2_cor20110418.dat	 m2_cor20110528.dat	 m2_cor20110707.dat	 m2_cor20110816.dat
 m2_cor20110419.dat	 m2_cor20110529.dat	 m2_cor20110708.dat	 m2_cor20110817.dat
 m2_cor20110420.dat	 m2_cor20110530.dat	 m2_cor20110709.dat	 m2_cor20110818.dat
 m2_cor20110421.dat	 m2_cor20110531.dat	 m2_cor20110710.dat	 m2_cor20110819.dat
 m2_cor20110422.dat	 m2_cor20110601.dat	 m2_cor20110711.dat	 m2_cor20110820.dat
 m2_cor20110423.dat	 m2_cor20110602.dat	 m2_cor20110712.dat	 m2_cor20110821.dat
 m2_cor20110424.dat	 m2_cor20110603.dat	 m2_cor20110713.dat	 m2_cor20110822.dat
 m2_cor20110425.dat	 m2_cor20110604.dat	 m2_cor20110714.dat	 m2_cor20110823.dat
 m2_cor20110426.dat	 m2_cor20110605.dat	 m2_cor20110715.dat	 m2_cor20110824.dat
 m2_cor20110427.dat	 m2_cor20110606.dat	 m2_cor20110716.dat	 m2_cor20110825.dat
 m2_cor20110428.dat	 m2_cor20110607.dat	 m2_cor20110717.dat	 m2_cor20110826.dat
 m2_cor20110429.dat	 m2_cor20110608.dat	 m2_cor20110718.dat	 m2_cor20110827.dat
 m2_cor20110430.dat	 m2_cor20110609.dat	 m2_cor20110719.dat	 m2_cor20110829.dat
 m2_cor20110501.dat	 m2_cor20110610.dat	 m2_cor20110720.dat	
 m2_cor20110502.dat	 m2_cor20110611.dat	 m2_cor20110721.dat	
 m2_cor20110503.dat	 m2_cor20110612.dat	 m2_cor20110722.dat	
 m2_cor20110504.dat	 m2_cor20110613.dat	 m2_cor20110723.dat	
 m2_cor20110505.dat	 m2_cor20110614.dat	 m2_cor20110724.dat	
 m2_cor20110506.dat	 m2_cor20110615.dat	 m2_cor20110725.dat	
 m2_cor20110507.dat	 m2_cor20110616.dat	 m2_cor20110726.dat	
 m2_cor20110508.dat	 m2_cor20110617.dat	 m2_cor20110727.dat	
 m2_cor20110509.dat	 m2_cor20110618.dat	 m2_cor20110728.dat	
 m2_cor20110510.dat	 m2_cor20110619.dat	 m2_cor20110729.dat	
 m2_cor20110511.dat	 m2_cor20110620.dat	 m2_cor20110730.dat	
 m2_cor20110512.dat	 m2_cor20110621.dat	 m2_cor20110731.dat	
 m2_cor20110513.dat	 m2_cor20110622.dat	 m2_cor20110801.dat	

**Inhalt DVD's 4 / 6 bis 6 / 6: Messlokation M3**

 m3_cor20110404.dat	 m3_cor20110514.dat	 m3_cor20110623.dat	 m3_cor20110802.dat
 m3_cor20110405.dat	 m3_cor20110515.dat	 m3_cor20110624.dat	 m3_cor20110803.dat
 m3_cor20110406.dat	 m3_cor20110516.dat	 m3_cor20110625.dat	 m3_cor20110804.dat
 m3_cor20110407.dat	 m3_cor20110517.dat	 m3_cor20110626.dat	 m3_cor20110805.dat
 m3_cor20110408.dat	 m3_cor20110518.dat	 m3_cor20110627.dat	 m3_cor20110806.dat
 m3_cor20110409.dat	 m3_cor20110519.dat	 m3_cor20110628.dat	 m3_cor20110807.dat
 m3_cor20110410.dat	 m3_cor20110520.dat	 m3_cor20110629.dat	 m3_cor20110808.dat
 m3_cor20110411.dat	 m3_cor20110521.dat	 m3_cor20110630.dat	 m3_cor20110809.dat
 m3_cor20110412.dat	 m3_cor20110522.dat	 m3_cor20110701.dat	 m3_cor20110810.dat
 m3_cor20110413.dat	 m3_cor20110523.dat	 m3_cor20110702.dat	 m3_cor20110811.dat
 m3_cor20110414.dat	 m3_cor20110524.dat	 m3_cor20110703.dat	 m3_cor20110812.dat
 m3_cor20110415.dat	 m3_cor20110525.dat	 m3_cor20110704.dat	 m3_cor20110813.dat
 m3_cor20110416.dat	 m3_cor20110526.dat	 m3_cor20110705.dat	 m3_cor20110814.dat
 m3_cor20110417.dat	 m3_cor20110527.dat	 m3_cor20110706.dat	 m3_cor20110815.dat
 m3_cor20110418.dat	 m3_cor20110528.dat	 m3_cor20110707.dat	 m3_cor20110816.dat
 m3_cor20110419.dat	 m3_cor20110529.dat	 m3_cor20110708.dat	 m3_cor20110817.dat
 m3_cor20110420.dat	 m3_cor20110530.dat	 m3_cor20110709.dat	 m3_cor20110818.dat
 m3_cor20110421.dat	 m3_cor20110531.dat	 m3_cor20110710.dat	 m3_cor20110819.dat
 m3_cor20110422.dat	 m3_cor20110601.dat	 m3_cor20110711.dat	 m3_cor20110820.dat
 m3_cor20110423.dat	 m3_cor20110602.dat	 m3_cor20110712.dat	 m3_cor20110821.dat
 m3_cor20110424.dat	 m3_cor20110603.dat	 m3_cor20110713.dat	 m3_cor20110822.dat
 m3_cor20110425.dat	 m3_cor20110604.dat	 m3_cor20110714.dat	 m3_cor20110823.dat
 m3_cor20110426.dat	 m3_cor20110605.dat	 m3_cor20110715.dat	 m3_cor20110824.dat
 m3_cor20110427.dat	 m3_cor20110606.dat	 m3_cor20110716.dat	 m3_cor20110825.dat
 m3_cor20110428.dat	 m3_cor20110607.dat	 m3_cor20110717.dat	 m3_cor20110826.dat
 m3_cor20110429.dat	 m3_cor20110608.dat	 m3_cor20110718.dat	 m3_cor20110827.dat
 m3_cor20110430.dat	 m3_cor20110609.dat	 m3_cor20110719.dat	 m3_cor20110828.dat
 m3_cor20110501.dat	 m3_cor20110610.dat	 m3_cor20110720.dat	 m3_cor20110829.dat
 m3_cor20110502.dat	 m3_cor20110611.dat	 m3_cor20110721.dat	 m3_cor20110830.dat
 m3_cor20110503.dat	 m3_cor20110612.dat	 m3_cor20110722.dat	
 m3_cor20110504.dat	 m3_cor20110613.dat	 m3_cor20110723.dat	
 m3_cor20110505.dat	 m3_cor20110614.dat	 m3_cor20110724.dat	
 m3_cor20110506.dat	 m3_cor20110615.dat	 m3_cor20110725.dat	
 m3_cor20110507.dat	 m3_cor20110616.dat	 m3_cor20110726.dat	
 m3_cor20110508.dat	 m3_cor20110617.dat	 m3_cor20110727.dat	
 m3_cor20110509.dat	 m3_cor20110618.dat	 m3_cor20110728.dat	
 m3_cor20110510.dat	 m3_cor20110619.dat	 m3_cor20110729.dat	
 m3_cor20110511.dat	 m3_cor20110620.dat	 m3_cor20110730.dat	
 m3_cor20110512.dat	 m3_cor20110621.dat	 m3_cor20110731.dat	
 m3_cor20110513.dat	 m3_cor20110622.dat	 m3_cor20110801.dat	

## Zeichnungsverzeichnis

<b>Nr.</b>	<b>Zeichnungs-Nr.</b>	<b>Rev.</b>	<b>Titel</b>	<b>Maßstab</b>
1.	90213-S-01	a	Übersichtsplan Lühesand/Elbe	1 : 10.000 1 : 20.000
2.	90213-S-02		Böschungsprofile im Bereich der Messpfähle M2 und M3	1 : 500
3.	90213-S-03		Messpfähle M2 und M3 Böschungsprofile, Detailansichten Messpfahl und Instrumentierung	1 : 20.000 1 : 200 1 : 50, 1 : 20
4.	90213-S-04	a	Lageplan mit Kennzeichnung der registrierten Schiffspassagen	1 : 10.000
5.	90213-S-05	a	Querschnitte Messpfähle M2 und M3	M.d.L. 1 : 2500 M.d.H. 1 : 500



Ingenieurgesellschaft mbH

**IMS Ingenieurgesellschaft mbH**

Stadtdeich 7  
20097 Hamburg

Tel. 040 32818-0  
Fax 040 32818-139  
info@ims-ing.de  
www.ims-ing.de

