



WSV.de

Wasserstraßen- und
Schiffahrtsverwaltung
des Bundes

Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg

Wellen- und Strömungsmessungen im Rahmen von Makrophytenuntersuchungen

Zusammenfassung der Ergebnisse

Gutachten



Bericht Nr. 0219-05 Rev. 01
Hamburg, 6. Dezember 2016

Revisions-Status

Rev.	Beschreibung	Datum	Autoren	Abnahme
1	Berichtslegung	06.12.16	ARNS/Pe	Pe

Inhalt	Seite
1. Veranlassung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Projektorganisation	2
1.4 Vorgehensweise und Arbeitsschritte	2
1.5 Abzuliefernde Unterlagen	3
1.6 Projektbeteiligte	3
1.7 Anmerkungen zum Gutachten	3
2. Beschreibung ablaufender Prozesse um ein fahrendes Schiff und Definition maßgebender Parameter	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Anmerkungen zur Fahrdynamik von Schiffen	6
2.3 Hydraulische Prozesse um ein fahrendes Schiff	7
2.3.1 Beschreibung der Prozesse	7
2.3.2 Definition der kennzeichnenden Parameter	9
2.4 Hydraulische Prozesse um ein schnellfahrendes Schiff	10
2.4.1 Beschreibung der Prozesse	10
2.4.2 Definition der kennzeichnenden Parameter	11
2.5 Grundsätzliche Hinweise zur Überlagerung von Schiffswellen und Seegangswellen	12
3. Messkampagne Unterelbe 2015	15
3.1 Revierübersicht und Lage der Messlokationen	15
3.2 Revierbedingungen	17
3.2.1 Hydrologie	17
3.2.2 Morphologie und Röhrichte	18
3.2.3 Windverhältnisse	18
3.2.4 Seegang	19
3.2.5 Schiffswellen	20
3.2.6 Schiffsverkehr	23
3.2.7 Eisverhältnisse	24
3.2.8 Strömungen im Fahrwasser	25
3.3 Messkonzept und Instrumentierung	25
3.4 Messzeitraum und Übersicht verfügbarer Messdaten	27
3.5 Dokumentation und Darstellung der Messdaten	29
3.5.1 Allgemeine Hinweise	29
3.5.2 Hydrologische Messdaten	29
3.5.3 Meteorologische Messdaten	30
3.5.4 Schiffspassagen	31
3.5.5 Wasserspiegelauslenkungen und Tidenströmungen	31

3.6 Datenformate	32
3.7 Datenablage	32
4. Auswertung der Schiffswellenereignisse	33
4.1 Auswertungskonzept	33
4.2 Definition der Mess- und Auswertungszeiträume	34
4.3 Postprocessing	34
4.4 Übersicht der analysierten Schiffswellenereignisse	34
5. Darstellung der Ergebnisse	35
5.1 Allgemeines	35
5.2 Schiffspassagen	37
5.2.1 Statistik der Schiffspassagen	37
5.2.2 Statistik der Schiffstiefgänge	39
5.2.3 Statistik der Schiffsgeschwindigkeit	40
5.3 Messlokation A1 - Hollerwettern	42
5.3.1 Darstellung der maximalen Schiffswellenereignisse	42
5.3.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse	44
5.4 Messlokation B1 – Bielenberg	47
5.4.1 Darstellung der maximalen Schiffswellenereignisse	47
5.4.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse	50
5.5 Messlokation C1 – Schwarztonnensand	53
5.5.1 Darstellung der maximalen Schiffswellenereignisse	53
5.5.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse	56
5.6 Vergleichende Betrachtung der Messlokationen A1, B1 und C1	59
5.7 Schiffspassagen des HSC HALUNDER JET	63
5.8 Überstaudauern und -höhen	67
6. Zusammenfassung	70

Tabellen	IV
Abbildungen	V
Anlagen	VIII
Anlagen zur Darstellung der Ergebnisse	VIII
Digitale Anlagen der Messdaten und Auswertungen	VIII
Projektunterlagen	IX
Naturmessungen in den Ästuaren Ems, Weser und Elbe	IX
Weiterführende Literatur und Unterlagen	IX
Links	X

	Seite
Tabellen	
Tabelle 3-1: Zusammenstellung der Messlokationen, deren nautische Koordinaten, Höhenlage der Sohle und Abstand zur Fahrwassermitte	15
Tabelle 3-2: Tidekennwerte der maßgebenden Pegel im Projektgebiet (WSA Hamburg)	17
Tabelle 3-3: Maximale signifikante Wellenhöhen in den drei Bereichen der Unterelbe zwischen Hamburg und Cuxhaven, vgl. Anlage 3 in [8]	19
Tabelle 3-4: Maximale schiffserzeugte Belastungen im derzeitigen Ist-Zustand entlang der Unterelbe gem. [9] am Fahrwasserrand	21
Tabelle 3-5: Zusammenstellung von Maximalwerten schiffserzeugter Wellen aus Naturmessungen entlang der Unterelbe [9]	22
Tabelle 5-1: Übersicht der analysierten Schiffswellenereignisse an den Messlokationen A1, B1 und C1 in der Messkampagne 2015	35
Tabelle 5-2: Statistik der Schiffspassagen an der Messlokation A1 für den Messzeitraum (vgl. Anlage 9)	38
Tabelle 5-3: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation A1	44
Tabelle 5-4: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation A1 (Statistik der jeweils 50 höchsten Schiffswellenereignisse)	46
Tabelle 5-5: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation B1	50
Tabelle 5-6: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation B1	52
Tabelle 5-7: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation C1	56
Tabelle 5-8: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation C1	58
Tabelle 5-9: Vergleich der Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokationen A1, B1 und C1	61
Tabelle 5-10: Übersicht der analysierten Schiffswellenereignisse an den Messlokationen A1, B1 und C1 in der Messkampagne 2015 mit Kennzeichnung der Passagen des HALUNDER JET	63
Tabelle 5-11: Auswertungsergebnis der Passage des <i>HALUNDER JET</i> am 25.10.2015 an den Messlokationen C1, B1 und A1	64
Tabelle 5-12: Überstauereignisse an den Messlokationen A1, B1 und C1	68
Tabelle 5-13: Ableitung der mittleren Überstauhöhe	68

	Seite
Abbildungen	
Abbildung 1-1: Revierübersicht Unterelbe mit Kennzeichnung der Messlokationen	1
Abbildung 2-1: Schnellfähre, eingesetzt im Finnischen Meerbusen [15]	5
Abbildung 2-2: Wellenausbreitung bei unterkritischer, kritischer und überkritischer Fahrt	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	10
Abbildung 2-7: Empfehlung für die Definition und Auswertung von Schiffswellen aus HSC-Passagen bei überkritischer Fahrt (BAW, in [5])	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	13
Abbildung 2-10: Schiff in der Außenelbe bei Seegang aus Nordwest am 01.10.2009	14
Abbildung 3-1: Revierübersicht Unterelbe mit Kennzeichnung der Messlokationen als Auszug des Planes 0219-S-01	15
Abbildung 3-2: Querprofile an den Messlokationen A1 Hollerwettern (oben), B1 Bielenberg (Mitte) und C1 Schwarztonnensand (unten)	16
Abbildung 3-3: Lage der projektrelevanten Pegel nach [23]	17
Abbildung 3-4: Windstatistik für die Station Glückstadt für den Zeitraum 04/2015 bis 04/2016	18
Abbildung 3-5: Auftretende Schiffswellenbilder in der Unterelbe	20
Abbildung 3-6: Übersicht durchgeführter Naturmessungen zur Erfassung der Schiffswellen [9]	22
Abbildung 3-7: Schiffsbewegungen in 2009 (WSD Nord)	23
Abbildung 3-8: Anzahl der Schiffsbewegungen in 2009 im Vergleich (www.wsv.de)	23
Abbildung 3-9: Häufigkeit des Eisvorkommens im deutschen Nordseeküstengebiet im Zeitraum 1961 bis 2000 nach [21]	24
Abbildung 3-10: Fahrendes Schiff (Abgänger) bei Eisgang auf Höhe Lühesand	24
Abbildung 3-11: Dauermessstationen für die Erfassung von Tideströmungen in der Unterelbe mit Kennzeichnung der drei Messlokationen A1, B1 und C1	25
Abbildung 3-12: Messkonzept	26
Abbildung 3-13: Exemplarische Darstellung der meteorologischen Parameter, der hydrologischen Daten und der analysierten Seegangsbedingungen für die 41. KW 2015 an der Messlokation A1	30

Abbildung 3-14: Exemplarische Zeitreihe für die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen zusammen mit registrierten Schiffspassagen als Tagesplot an der Messlokation A1	31
Abbildung 4-1: Auswertungskonzept zur Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse und zugehöriger Parameter	33
Abbildung 5-1: Vergleich der Statistiken der Schiffspassagen an den Messlokalationen A1, B1 und C1 im Messzeitraum	39
Abbildung 5-2: Häufigkeitsverteilung der Schiffstiefgänge an der Messlokation A1 im Messzeitraum	40
Abbildung 5-3: Häufigkeitsverteilung der Schiffsgeschwindigkeit an der Messlokation A1	40
Abbildung 5-4: Zusammenhang zwischen der Schiffsgeschwindigkeit SOG und dem Tiefgang aus den Schiffspassagen an der Messlokation A1	41
Abbildung 5-5: Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten SOG im Querprofil der Messlokation A1	41
Abbildung 5-6: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation A1 mit maximalem Absunk und maximaler Primärwellenhöhe (vgl. Anlage 9)	42
Abbildung 5-7: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation A mit maximaler Sekundärwellenhöhe H_{sek}	43
Abbildung 5-8: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk z_A (oben), Primärwellenhöhe H_p (Mitte) und Sekundärwellenhöhe H_{sek} (unten) an der Messlokation A1	45
Abbildung 5-9: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation B1 mit maximalem Absunk	47
Abbildung 5-10: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation B1 mit maximaler Primärwellenhöhe	48
Abbildung 5-11: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation B1 mit maximaler Sekundärwellenhöhe H_{sek}	49
Abbildung 5-12: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk z_A (oben), Primärwellenhöhe H_p (Mitte) und Sekundärwellenhöhe H_{sek} (unten) an der Messlokation B1	51
Abbildung 5-13: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation C1 mit maximalem Absunk	53
Abbildung 5-14: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation C1 mit maximaler Primärwellenhöhe	54
Abbildung 5-15: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation C1 mit maximaler Sekundärwellenhöhe H_{sek}	55
Abbildung 5-16: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk z_A (oben), Primärwellenhöhe H_p (Mitte) und Sekundärwellenhöhe H_{sek} (unten) an der Messlokation C1	57
Abbildung 5-17: Vergleich der Unterschreitungshäufigkeiten für die Parameter Absunk (oben), Primärwellenhöhe (Mitte) und Sekundärwellenhöhe (unten) an den Messlokalationen A1, B1 und C1	59
Abbildung 5-18: Beispielhaftes Schiffswellenereignis des <i>HALUNDER JET</i> an der Messlokation C1 am 25.10.2015 um 10:13	65

Abbildung 5-19: Beispielhaftes Schiffswellenereignis des <i>HALUNDER JET</i> an der Messlokation B1 am 25.10.2015 um 10:17	65
Abbildung 5-20: Beispielhaftes Schiffswellenereignis des <i>HALUNDER JET</i> an der Messlokation A1 am 25.10.2015 um 10:28	66
Abbildung 5-21: Ganglinien der zeitsynchronen Druckmessungen an den Messlokalationen A1, B1 und C1 über den gesamten Messzeitraum von 6 Wochen (20.09.2015 – 01.11.2015)	67
Abbildung 5-22: Definition der Parameter Überstaudauer und -höhe	67
Abbildung 5-23: Häufigkeitsverteilungen der Überstaudauern (oben) und -höhen (unten)	69
Tabelle 6-1: Maximale Schiffswellenparameter der jeweils 50 höchsten Ereignisse	70

Anlagen

- Anlage 1 Projektbeteiligte
- Anlage 2 Projektprotokoll
- Anlage 3 Revierbedingungen
- Anlage 3.1 Hydrologie/Tidebedingungen
- Anlage 3.2 Morphologische Bedingungen
- Anlage 3.3 Seegangsvorhersage – Memo 0219-02
- Anlage 3.4 Schiffswellen - Gefährdungen durch Sog und Wellenschlag
- Flyer des WSA Hamburg – Stand: 02/2007
- Anlage 3.5 Verkehrsstatistik 2008 und 2015
- Anlage 3.6 Eisverhältnisse für die Unterelbe [21]
- Anlage 3.7 Strömungen im Fahrwasser
- Anlage 4 Messstationen, Messtechnik und eingesetzte Messgeräte
- Anlage 5 Übersicht Messkampagne
- Anlage 6 Vorgehensweise Schiffswellenanalyse - Memo 0219-04
- Anlage 7 Vorgehensweise Seegangsanalyse - Memo 0219-03

Anlagen zur Darstellung der Ergebnisse

- Anlage 8 Dokumentation der meteorologischen Messdaten in Verbindung mit den hydraulischen Parametern Wasserstand und Seegang an den Messlokalationen A1 Hollerwettern, B1 Bielenberg und C1 Schwarztonnensand
- Anlage 9 Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an Messlokation A1
- Anlage 10 Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an Messlokation B1
- Anlage 11 Ergebnisse der Schiffswellenanalyse an Messlokation C1
- Anlage 12 Präsentation der Ergebnisse vom 20.04.2016

Digitale Anlagen der Messdaten und Auswertungen

- Anlage 13 Daten und Auswertungen ⇒ *auf Datenträger*
- Anlage 14 Messdaten der Messlokalationen A1, B1 und C1
⇒ *auf Datenträger*

Projektunterlagen

- [1] WSA Hamburg, Messungen in der Natur zur Belastung von Makrophytenbeständen, Wellen- und Strömungsmessungen in der Unterelbe, Leistungsbeschreibung zur Ausschreibung, Monitoringzeitraum Herbst 2015
- [2] Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Planfeststellungsbehörde, Planfeststellungsbeschluss für die Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe für 14,5 m tiefgehende Containerschiffe, Az.:P-143.3/46, 23.04.2012

Naturmessungen in den Ästuaren Ems, Weser und Elbe

- [3] 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
- [4] IMS (2010) UVU zur geplanten Vertiefung der Außenems bis Emden, Erfassung der schiffserzeugten Wellen- und Strömungslastungen, Bereitstellung von Seegangparametern für die Bundesanstalt für Wasserbau, Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Emden, Bericht 90141-01, 08. April 2010
- [5] IMS (2013) Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung des Uferdeckwerkes Lühesand, Erfassung der schiffserzeugten Wellen- und Strömungslastungen, Zusammenfassung der Ergebnisse, Gutachten, Bericht Nr. 90213-06, Stand: 01.03.2013
- [6] IMS (2015) Schiffswellenmessung in der Außenweser 2014, Zusammenfassung der Ergebnisse, Gutachten, Bericht Nr. 0145-03, Stand: 08/2015

Weiterführende Literatur und Unterlagen

- [7] BAW (1996) Anpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastung der Unterelbe. BAW-Nr. 94 52 3422/23
- [8] 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
- [9] BAW (2006) Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe – Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen. BAW-Nr. 5.03.10062.00, Unterlage H.1 d
- [10] WSA Hamburg (2007) Schiffswellen – Gefährdungen durch Sog und Wellenschlag, Flyer des WSA Hamburg, Stand: 02/2007
- [11] 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

- [12] PIANC (2003) Guidelines for managing wake wash from high-speed vessels, MarCom, Working Group 41
- [13] Parnell, McDonald, Burke (2007) Shoreline effects of vessel wakes, Marlborough Sounds, New Zealand, Journal of Coastal Research, Special Issue 50, 2007
- [14] Heimann, Hutchison, Racine (2008) Application of the Free-Wave Spectrum to Minimize and Control Wake Wash, Paper No. SMTC-049-2008
- [15] Torsvik (2009) Ship waves in Tallinn Bay: Experimental numerical study, Bergen Center for Computational Science UNIFOB AS, Präsentation des SEAMOCs Workshop, Malta
- [16] 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
- [17] 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
- [18] Kirkegaard, Kofoed-Hansen und Elfrink (1998) Wake wash of high-speed craft in coastal waters, International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Kopenhagen
- [19] Führböter, Dette, Jensen (1984) Untersuchungen über schiffserzeugte Wellen an der Unterelbe, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 566, Technische Universität Braunschweig
- [20] Mai, Paesler, Zimmermann (2004) Seegangsatlas der deutschen Nordseeküste, Wellen und Seegang an Küsten und Küstenschutzwerken, Mitteilungen des Franzius-Instituts, Heft 90a
- [21] Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Naturverhältnisse Nordsee und Englischer Kanal, Teil B zu den Handbüchern für die Nordsee und den Kanal, 2009

Links

- [22] Internetseite zur Fahrrinnenanpassung Elbe, www.zukunft-elbe.de
- [23] Internetseite Pegel Online, www.pegelonline.wsv.de, Wasser- und Schifffahrtsverwaltung

Zeichnungsverzeichnis

Nr.	Zeichnungs-Nr.	Rev.	Titel	Maßstab
1.	0219-S-01		Übersicht	1 : 50.000
2.	0219-S-02		A1: Hollerwettern (Elbe-km 681,0)	diverse
3.	0219-S-03		B1: Bielenberg (Elbe-km 669,4)	diverse
4.	0219-S-04		C1: Schwarztonnensand (Elbe-km 666,2)	diverse
5.	0219-S-05		Detail Messkäfig	1 : 25

Danksagung

Die Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH bedankt sich ausdrücklich für die hervorragende Zusammenarbeit mit allen Projektbeteiligten.

Dem WSA Hamburg und der Bundesanstalt für Wasserbau danken wir für die exzellente Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Bereitstellung der verschiedenen Messdaten.

Die gesamte Messtechnik incl. Datenerfassung und –übertragung für die Messkampagne 2015 wurde von der Fa. ARGUS Gesellschaft für Umweltmesstechnik mbH, Ritterhude konzipiert, installiert und betrieben. Die Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH bedankt sich für die hervorragende Zusammenarbeit.

Bearbeitung

Dr.-Ing. Karsten Peters
Dr.-Ing. Arne Stahlmann
Dipl.-Ing. Michael Karch

1. Veranlassung

1.1 Hintergrund

Der Planfeststellungsbeschluss der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord¹ zur geplanten Fahrrinnenanpassung [2] fordert ein Monitoring der Makrophytenbestände über 12 Jahre nach Ausbau. Hydrodynamische Belastungen infolge Wellen und Strömungen wirken auf diese Makrophytenbestände ein.

Im Hinblick auf die Bewertung der hydrodynamischen Belastung der Makrophytenbestände wurden drei Lokationen entlang der Unterelbe ausgewählt, für die ein Monitoring schiffserzeugter Wellen- und Strömungsergebnisse auszuführen war.

Um den Ist-Zustand der schiffserzeugten Belastungen in der Unterelbe an den drei Lokationen Hollerwettern, Bielenberg und Schwarztonnensand zu erfassen, wurde vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA Hamburg) der Auftrag für die Durchführung der Messkampagne zur Erfassung der schiffsinduzierten Belastungen ausgeschrieben [1] und in der Folge an die Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH (IMS) vergeben. Die folgende Abbildung 1-1 zeigt eine Revierübersicht der Unterelbe.

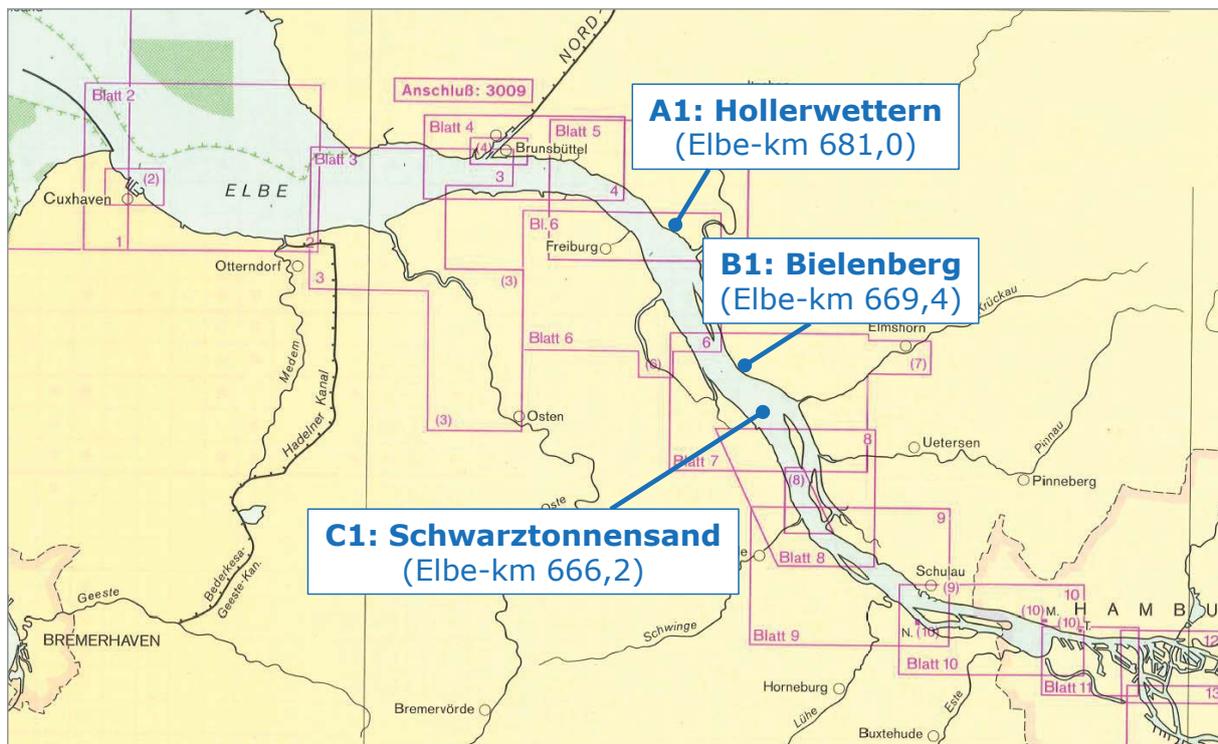


Abbildung 1-1: Revierübersicht Unterelbe mit Kennzeichnung der Messlokationen

¹ jetzt: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt –Standort Kiel-

Der vorliegende Bericht fasst die 2015 durchgeführten Messungen in der Natur zur Erfassung der schiffsinduzierten Wellenbelastungen an den drei Lokationen in der Untereibe zusammen, deren Messdaten, die Auswertung und Analyse sowie die resultierenden Ergebnisse. Diese Dokumentation beinhaltet des Weiteren Messdaten und Auswertungen u.a. zu Tidewasserständen, Schiffspassagen und zur Meteorologie, die IMS zur Verfügung gestellt wurden.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung für IMS bestand konkret in der Vorbereitung und Durchführung einer sechswöchigen Messkampagne zur Erfassung der schiffsinduzierten Wellen und Strömungen an insgesamt drei Messlokalationen, der Auswertung und Dokumentation der durchzuführenden Messungen. Weiterhin waren vom WSA HH zur Verfügung gestellte Strömungsdaten am Fahrwasserrand sowie Schiffspassagedaten in die Auswertung und Dokumentation miteinzubeziehen.

Im Vorwege der durchgeführten Messungen wurden entsprechende Abstimmungen mit den Projektbeteiligten über die Durchführung der Messkampagne vorgenommen. Im Gegensatz zu den bisher gesammelten Erfahrungen bei der Durchführung von Naturmessungen von Schiffswelleneignissen in den Ästuaren Ems, Weser und Elbe [3], [4], [5], [6] bestand in diesem Projekt die Besonderheit, dass die Messlokation direkt vor den Makrophytenbeständen aufzubauen und zu betreiben war, und folglich aufgrund der Höhenlage im Wechsel der Gezeiten die Messgeräte ab Tide-mittelwasser trockenfallen. Auf die daraus resultierenden Besonderheiten wird im nachfolgenden Bericht an zahlreichen Stellen eingegangen.

1.3 Projektorganisation

IMS führte das Projekt als Hauptauftragnehmer durch und übernahm die Projektleitung, Auswertung der Messdaten und Dokumentation der Messungen.

Fa. ARGUS konzipierte die Messtechnik, führte deren Installation aus und sorgte für den reibungslosen Betrieb während der Messkampagne einschließlich Wartungsarbeiten.

Weiterhin unterstützte IMS die Fa. ARGUS bei der Montage und Demontage der Messtechnik.

1.4 Vorgehensweise und Arbeitsschritte

In Anlehnung an durchgeführte Messkampagnen [3], [4], [5], [6] wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Planung der Messkampagne und Durchführung der Messungen in der Natur (offizieller Messzeitraum 20.09.2015 bis 01.11.2015) zusammen mit der Fa. ARGUS
- Zulieferung von Strömungs-, Schiffspassage- und Pegel-daten durch das WSA Hamburg

- Zulieferung von meteorologischen Daten durch das WSA Hamburg
- Auswertung der Messdaten (Strömungen und Druckmessungen) nach Schiffswellenereignissen
- Auswertung der Messdaten (Druckmessungen) hinsichtlich Seegang
- Prüfung der Schiffswellenereignisse und Kombination mit zugehörigen Daten (u.a. Wasserstandsdaten, Schiffspassagen, Tidenströmungen im Fahrwasser)
- Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse
- Analyse der Überstaudauern und -höhen
- Präsentation der Ergebnisse
- Berichtslegung und Dokumentation der Daten.

1.5 Abzuliefernde Unterlagen

Die Dokumentation der analysierten schiffserzeugten Wellen und Strömungen an den drei Messlokalationen in der Unterelbe für den Zeitraum der Messkampagne erfolgt mit dem vorliegenden Bericht. Darin sind u. a. enthalten:

- Dokumentation der Messkampagne in 2015
- Dokumentation sämtlicher verfügbarer Messdaten
- Zeitreihendarstellungen der meteorologischen und hydrologischen Messdaten
- Zeitreihendarstellungen der ausgewerteten Seegangparameter an den einzelnen Messlokalationen
- 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

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

1.7 Anmerkungen zum Gutachten

Das vorliegende Gutachten erfasst den Ist-Zustand der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen an drei Messlokalationen entlang der Unterelbe.

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 Unterelbe 2015. 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. wer-

den dort die maximalen Ereignisse und die Häufigkeitsverteilungen der kennzeichnenden Schiffswellenparameter vorgestellt.

Die Zusammenfassung erfolgt im Abschnitt 6.

Die Ergebnisse der Messkampagne wurden im Rahmen einer gemeinsamen Besprechung am 20.04.2016 im Hause des WSA Hamburg präsentiert. Diese Präsentation gibt einen kompakten Überblick der durchgeführten Messungen, Auswertungen und Analysen und liegt dem Gutachten als Anlage 12 bei.

Hinzuweisen ist an dieser Stelle darauf, dass im Nachgang zu der Besprechung am 20.04.2016 die Analyse der Schiffswellenereignisse nochmals verfeinert und qualitätsgesichert wurde. So wurden beispielsweise die Filterkriterien weitergehend optimiert. Aus diesem Grunde können geringfügige Unterschiede in der Ergebnisdarstellung zwischen Abschnitt 5 und Anlage 12 auftreten, wie z.B. in der Auflistung der der maximalen Sekundärwellenereignisse. Die statistische Verteilung und die getroffenen Aussagen zu den Schiffswellenbelastungen an den untersuchten Messloktionen insgesamt bleiben weiterhin gültig.

In Anlage 13 und Anlage 14 sind sämtliche Messdaten und Auswertungen dokumentiert. In Anlage 13 finden sich alle verfügbaren Messdaten (u.a. zur Hydrologie, Meteorologie, Schiffspassagen, Strömungsmessungen) sowie die durchgeführten Auswertungen in den gängigen Formaten. In Anlage 14 sind alle erfassten Messdaten als ASCII-Tagesdatensätze zusammengestellt.

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

2.1 Allgemeines

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

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.

Detaillierte Beschreibungen der ablaufenden Prozesse um ein fahrendes Schiff in Verdrängerfahrt finden sich u. a. in der EAU (2012) sowie in BAW (1996), BAW (2006), Erikson (2005) oder IMS (2006, 2010, 2013 und 2015), 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 Messungen in der Natur 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 [15]

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.

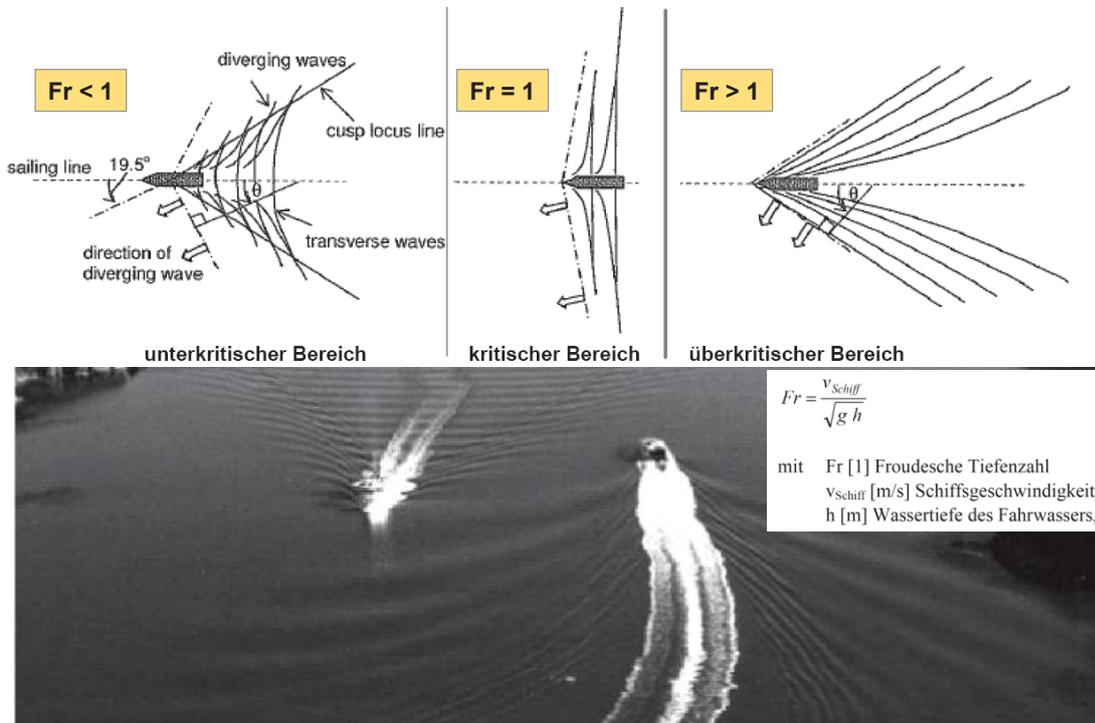


Abbildung 2-2: Wellenausbreitung bei unterkritischer, kritischer und überkritischer Fahrt nach [11] (oben) und deren Wellenausbreitung bei unterkritischer Fahrt (auf dem Foto links) und überkritischer Fahrt (auf dem Foto rechts) nach [12]

Für die im Rahmen der Messungen in der Natur in der Unterelbe zu messenden Schiffswellen ist davon auszugehen, dass die Schiffsgeschwindigkeiten für den Bereich der Berufsschifffahrt überwiegend im unterkritischen Bereich liegen. Als schnellfahrender Katamaran ist lediglich der *HALUNDER JET*, der normalerweise im überkritischen Bereich verkehrt, im Revier der Unterelbe zu erwarten. Auf die unterschiedlichen hydraulischen Prozesse sowohl eines Verdrängers als auch eines HSC wird nachfolgend eingegangen.

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.

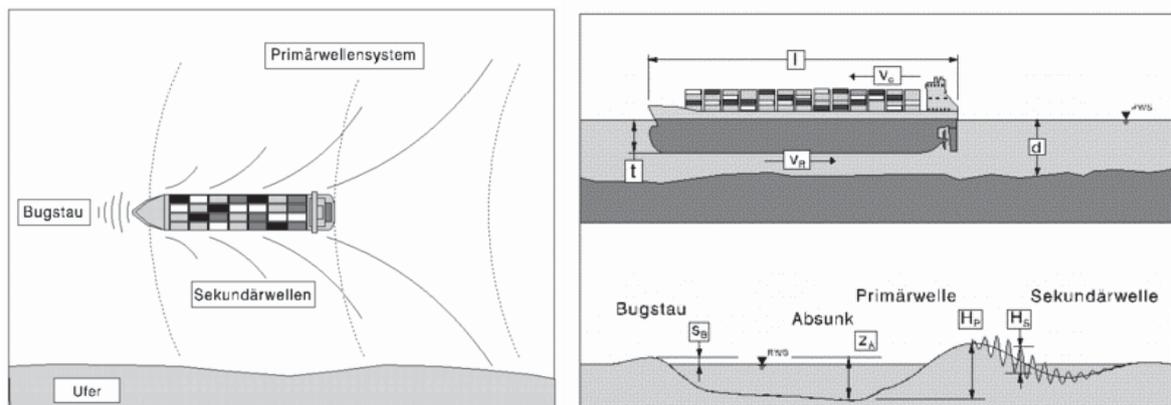


Abbildung 2-3 Wellenbild eines Schiffes in Verdrängerfahrt in seitlich begrenztem Fahrwasser als Aufsicht (links) und Ansicht der Schiffswellensysteme (rechts) (BAW)

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 sog. Primärwellenhöhe H_P , gekennzeichnet ist. Diese Heckwelle (Primärwelle) ist Teil des durch den Absenk angeregten langperiodischen Primärwellensystems.

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

Die Einflussgrößen auf die Wasserspiegelauslenkungen 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. Anhand definierter Teilquerschnitte ist es möglich, die Ausprägung der schiffsinduzierten Wellen- und Strömungsbelastungen einzuordnen.

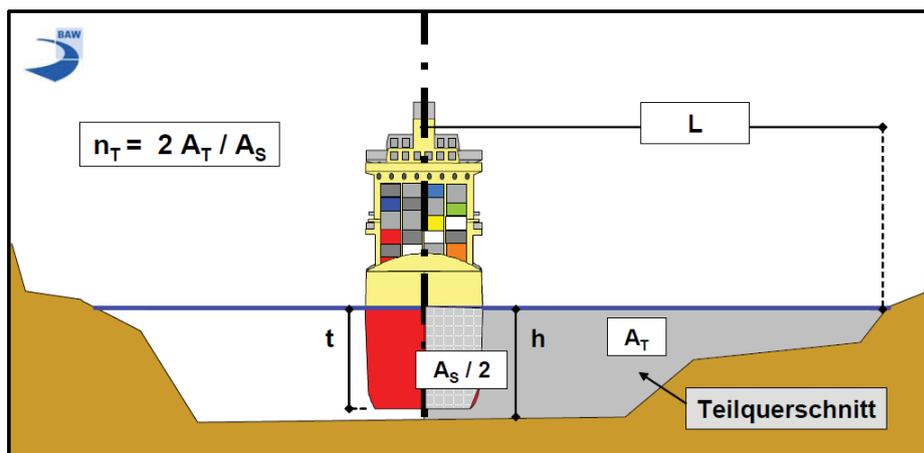


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Teilquerschnittes einer Wasserstraße mit ausgewählten Einflussparametern (BAW, 2006)

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 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.

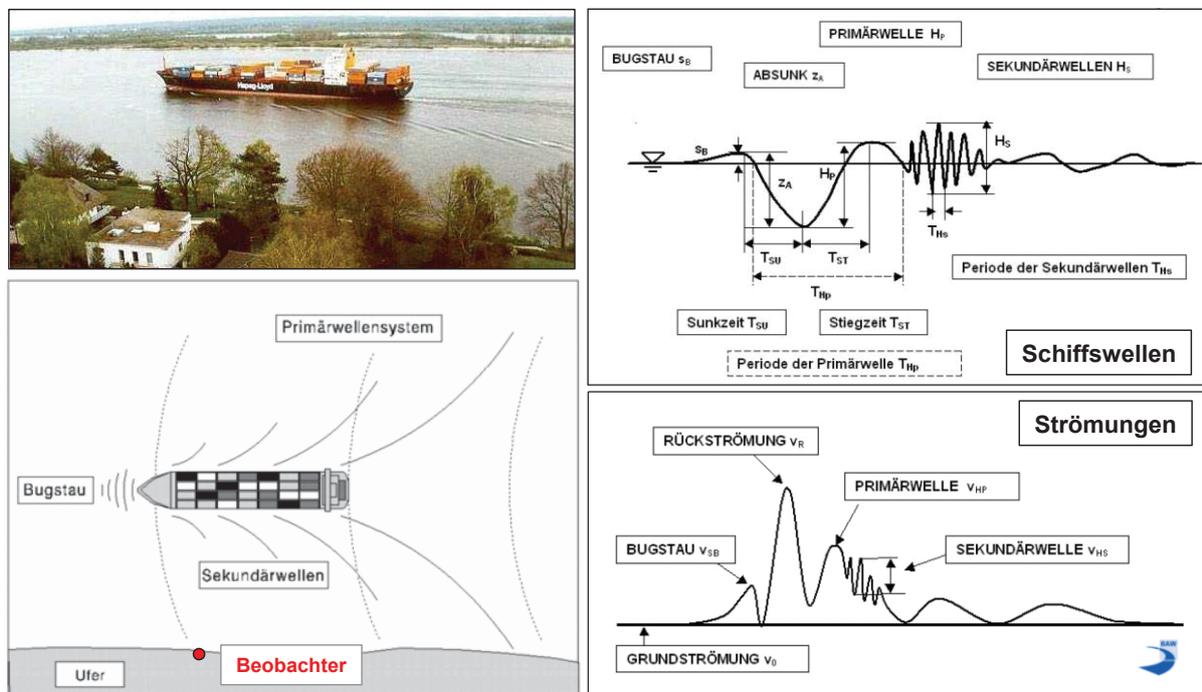


Abbildung 2-5: Definition maßgebender Kenngrößen schiffserzeugter Wellen (oben) und Strömungen (unten) für einen ortsfesten Betrachter nach BAW

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 ($Fr \sim 0,5$) 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 $Fr \sim 1,0$ das Wellenbild nahezu 90° 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 $Fr \sim 1,5$ 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 $Fr \sim 2,5$ in Abbildung 2-6 und Abbildung 2-2).

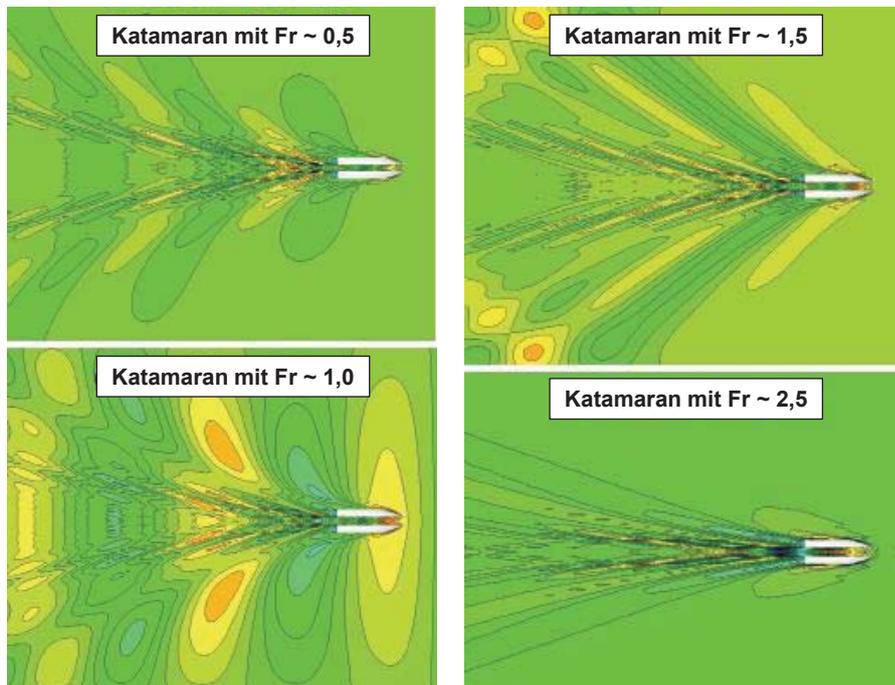


Abbildung 2-6: Entwicklung des Wellenbildes eines beschleunigenden HSC (hier Katamaran) aus unterkritischer Fahrt mit $Fr \sim 0,5$ (Verdrängerfahrt, oben links) bis zur überkritischen Fahrt mit $Fr > 1$ (rechts) aus Heimann et al. (2008)

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.

Für Schiffswellenereignisse infolge von Schiffspassagen von HSC in überkritischer Fahrt kann 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. Dafür wurde mit der BAW im Rahmen der Schiffswellenmessungen vor Lühesand [5] eine Definition der Schiffswellenparameter für Schiffswellen infolge HSC bei überkritischer Fahrt gefunden (vgl. Abbildung 2-7).

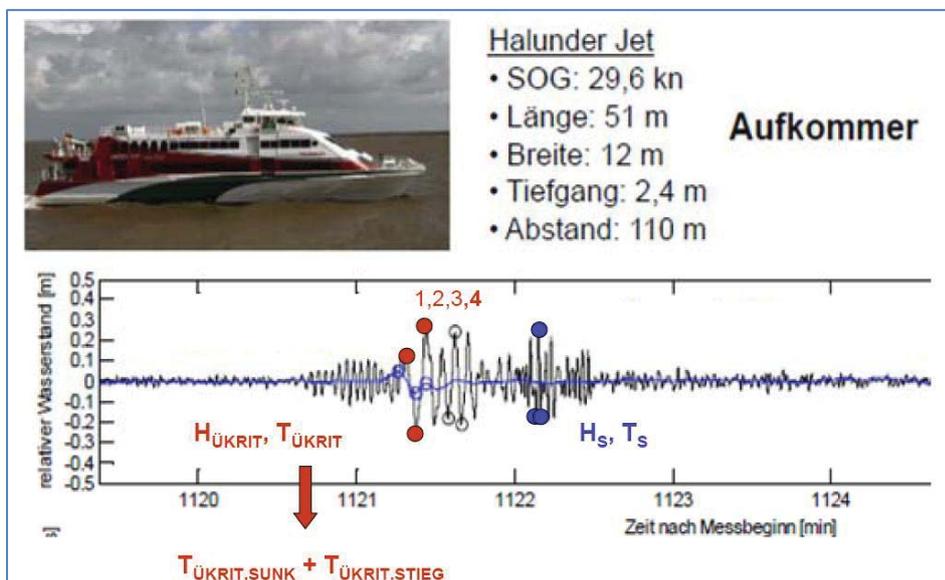


Abbildung 2-7: Empfehlung für die Definition und Auswertung von Schiffswellen aus HSC-Passagen bei überkritischer Fahrt (BAW, in [5])

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 ($Fr \sim 1,5$) 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)

2.5 Grundsätzliche Hinweise zur Überlagerung von Schiffswellen und Seegangswellen

Schiffswellen und Seegangswellen überlagern sich und bilden ein gemeinsames und die Schiffspassage umgebendes Wellenbild. Je nach Revier ist diese Überlagerung aus Schiffs- und Seegangswellen jedoch hinsichtlich der Analyse der Schiffswellen von unterschiedlicher Bedeutung (vgl. auch Abschnitt 3.2.4). Aus diesem Grunde werden daher nachfolgend einige grundsätzliche 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).

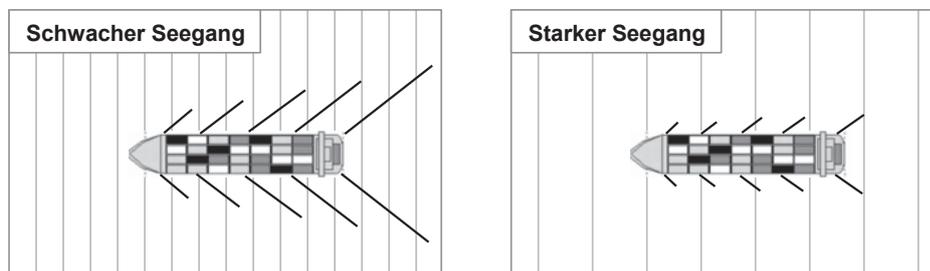


Abbildung 2-9: Interaktion von Schiffs- und Windwellen in Abhängigkeit des Seeganges (schematisch)

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 erster Anhalt 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 Messungen in der Natur ist bekannt, dass bei Schiffswellenmessungen an offenen Küsten mit erhöhtem Windwelleneinfluss die Analyse der Sekundärwellen nur sehr eingeschränkt möglich ist (vgl. Arbeiten von

FÜHRBÖTER [19] oder die Schiffswellenmessungen in der Außenweser [6]). Eine Schiffspassage wird in diesen Fällen im Wesentlichen nur durch die Primärwelle detektiert und beschrieben. Die Sekundärwellen können in diesen Fällen signaltechnisch von den umgebenden Windwellen nicht mehr richtig unterschieden werden, was insbesondere auf die ähnlichen Wellenperioden zurückzuführen ist.

Die nachfolgende Abbildung 2-10 zeigt beispielhaft, wie sich das schiffsinduzierte Wellensystem seegangsbedingt nur noch sehr begrenzt räumlich ausbilden kann (vgl. schematische Darstellung in Abbildung 2-9) und der natürliche Seegang das Wellenbild dominiert.



Abbildung 2-10: Schiff in der Außenelbe bei Seegang aus Nordwest am 01.10.2009
(Fotoquelle: Peters/Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH)

3. Messkampagne Unterelbe 2015

3.1 Revierübersicht und Lage der Messlokationen

Das Revier der Unterelbe mit den drei Messlokalen in Hollerwettern, Bielenberg und Schwarztonnensand wird in der folgenden Abbildung 3-1 dargestellt. Die Koordinaten der Messlokalen gemäß Vorgabe der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), deren tatsächliche Einbaukoordinaten, die Höhenlage der Sohle beim Einbau sowie den Abstand zur Fahrwassermitte fasst die Tabelle 3-1 zusammen. Für eine weitere Beschreibung der lokalen Umgebung wird auf Fotos in der Präsentation in Anlage 12 verwiesen.

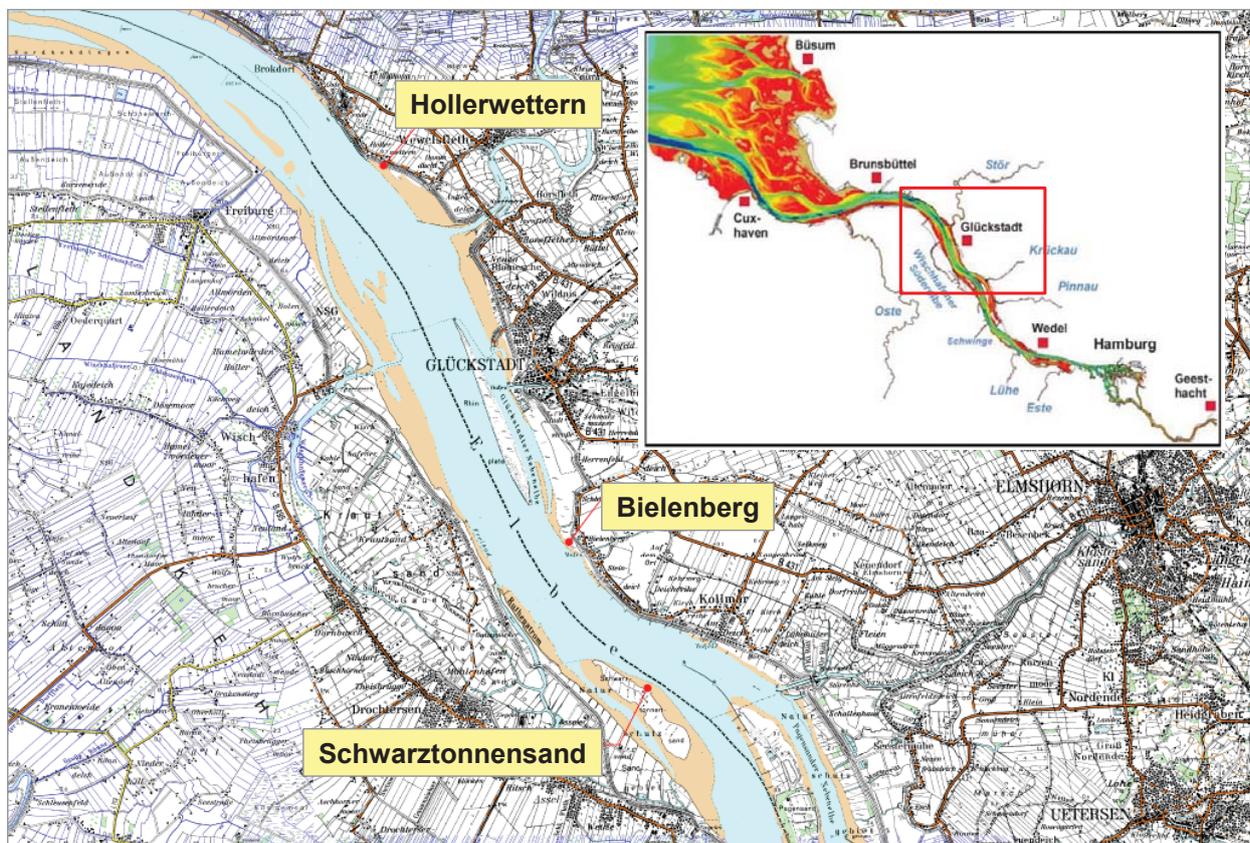


Abbildung 3-1: Revierübersicht Unterelbe mit Kennzeichnung der Messlokalen als Auszug des Planes 0219-S-01

Tabelle 3-1: Zusammenstellung der Messlokalen, deren nautische Koordinaten, Höhenlage der Sohle und Abstand zur Fahrwassermitte

Messlokation	Elbe-km	Messlokation Vorgabe BfG Koordinaten	Messlokation Einbau Koordinaten	Höhenlage Sohle	Abstand zur Fahrwassermitte
A1 Hollerwettern	681,0	N 53°50'13.2" E 9°21'37.4"	N 53°50'13.2" E 9°21'37.3"	NHN +0,13 m	750 m
B1 Bielenberg	669,4	N 53°44'56.4" E 9°25'54.8"	N 53°44'56.4" E 9°25'54.8"	NHN +0,20 m	1.100 m
C1 Schwarztonnensand	666,2	N 53°42'53.3" E 9°27'41.95"	N 53°42'53.2" E 9°27'43.5"	NHN +0,07 m	700 m

Die folgende Abbildung 3-2 zeigt die erstellten Querprofile an den drei Messlokalationen vom Ufer bis über das Fahrwasser hinweg als Auszug der zugehörigen Pläne 0219-S-02, -03 und -04. Die Messlokation befindet sich jeweils an der Rot markierten Position unmittelbar vor den Makrophytenbeständen (hellgrüne Markierung). Für weitere Details wird auf die genannten Pläne verwiesen.

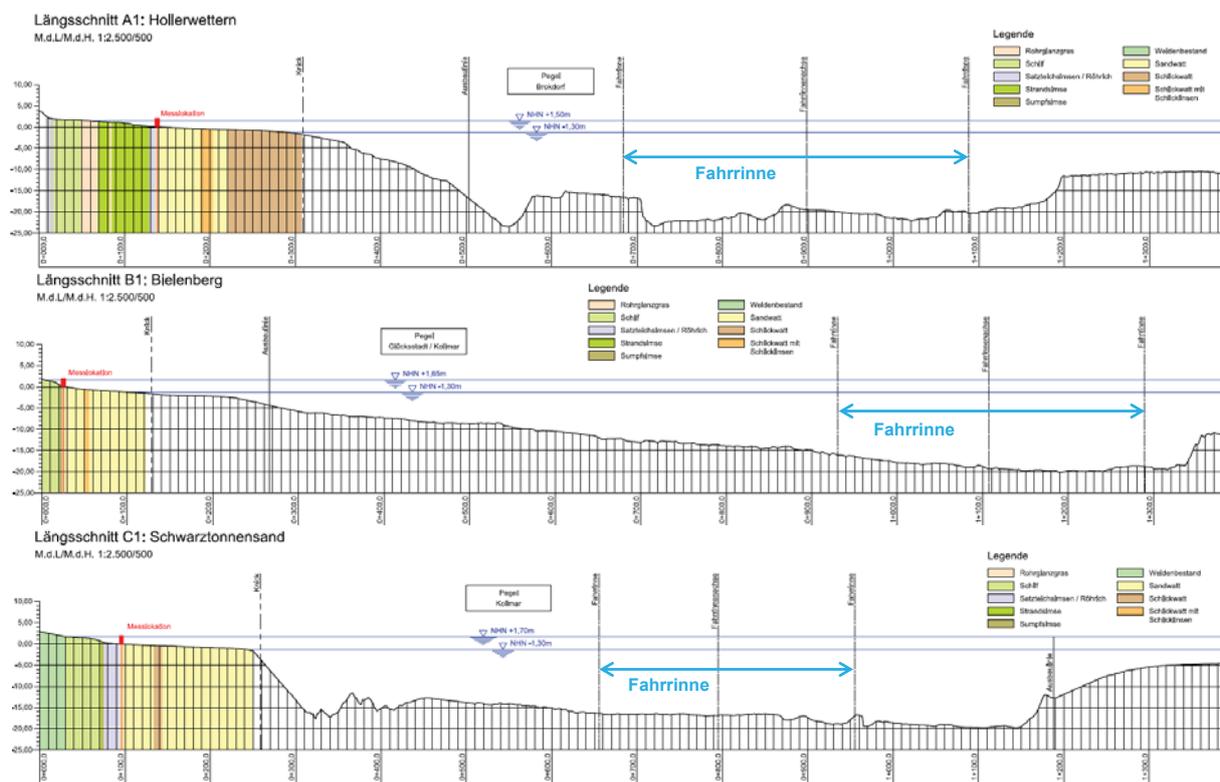


Abbildung 3-2: Querprofile an den Messlokalationen A1 Hollerwettern (oben), B1 Bielenberg (Mitte) und C1 Schwarztonnensand (unten)

Auffallend ist der unterschiedliche Profilverlauf unterhalb des Tideniedrigwassers in Abbildung 3-2. An der unterstromigen Lokation Hollerwettern kann eine Neigung der Unterwasserböschung von ca. 1 : 20 festgestellt werden. Während an der Messlokation B1 in Bielenberg die Unterwasserböschungsneigung deutlich flacher ausfällt mit etwa 1 : 60 zeigt sich im Querprofil der Messlokation Schwarztonnensand die vergleichsweise steilste Unterwasserböschung mit einer Neigung von etwa 1 : 4.

Die Unterwasserböschungsneigung hat maßgeblichen Einfluss auf die Ausbildung und Ausbreitung der Schiffswellen. Für weitere Details wird auf Anlage 12 sowie Abschnitt 5 verwiesen.

Im folgenden Abschnitt wird auf die Revierbedingungen im Projektgebiet eingegangen. Daran anschließend folgen Erläuterungen zum Messkonzept (Abschnitt 3.2.8), 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 und die festgelegten Messlokationen liegen im Tideregime des Elbästuars. Die nächstgelegenen Pegel werden in Abbildung 3-3 dargestellt.

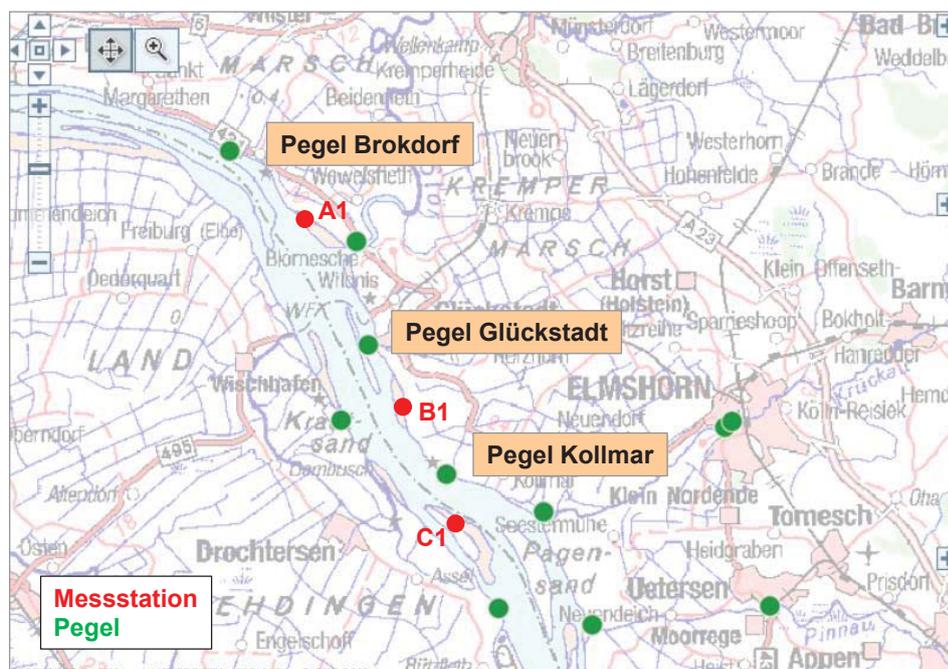


Abbildung 3-3: Lage der projektrelevanten Pegel nach [23]

Die folgende Tabelle 3-2 fasst die wesentlichen Tidekennwerte für die projektrelevanten Pegel zusammen. Weitere Informationen zur Hydrologie, wie z.B. ein Auszug des Tidekalenders 2015 für den Projektzeitraum, die Wasserstandshauptzahlen der genannten Pegel oder die Summenhäufigkeiten der Tidehoch- und -niedrigwasserstände im Abflussjahr 2015 sind in der Anlage 3.1 zusammengestellt.

Tabelle 3-2: Tidekennwerte der maßgebenden Pegel im Projektgebiet (WSA Hamburg)

Pegel	Brokdorf	Glückstadt	Kollmar
Referenzpegel zu	A1 Hollerwettern	B1 Bielenberg	C1 Schwarztonnensand
Tidekennwerte in [mNN]	Elb-km 684,4	Elb-km 674,3	Elb-km 666,8
HHThw mit Datum	5,65 03.01.1976	5,83 03.01.1976	5,89 03.01.1976
MThw (2006/2015)	1,54	1,60	1,67
MTnw (2006/2015)	-1,26	-1,25	-1,26
NNTnw mit Datum	-3,75 25.01.1937	-3,72 25.01.1937	-3,57 25.01.1937

3.2.2 Morphologie und Röhrichte

Hinsichtlich der Morphologie im Querprofil der Messlokationen wird auf die Abbildung 3-2 verwiesen.

Weiterhin sind in Anlage 3.2 Informationen zu Morphologie und Röhrichten (Quelle: BfG) zusammen mit Fotoaufnahmen für die einzelnen Messlokationen zusammengestellt. Darüber hinaus beinhalten die Anlage 12 auf den Seiten 3 bis 8 sowie die Pläne 0219-S-02, -03 und -04 weitere Informationen zur räumlichen Ausweitung der Makrophyten.

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 den Zeitraum 04/2015 bis 05/2016 für die Messstation Glückstadt ist erkennbar, dass Winde aus westlichen und südwestlichen Richtungen am häufigsten auftreten.

Ferner sind beispielhaft für das Projektgebiet die vorherrschenden Windrichtungen, Eintrittswahrscheinlichkeiten für Windgeschwindigkeiten größer vier Beaufort, durchschnittliche Windgeschwindigkeiten sowie durchschnittliche Lufttemperaturen monatsweise aufgeführt. Hinsichtlich der detaillierteren Beschreibung der Windverhältnisse während der Messkampagne wird auf den Abschnitt 3.5 verwiesen.

Monat des Jahres	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	1-12
Vorherrsch. Windrichtung	➔	↙	➔	➔	➔	➔	➔	➔	➔	➔	↙	↙	↙
Wind-Wahrscheinlichkeit >= 4 Beaufort (%)	6	9	1	3	2	2	2	0	2	0	9	8	4
Durchschnittliche Windgeschwindigkeit (kts)	5	6	5	5	6	5	5	3	5	3	6	6	5
Durchschnittl. Lufttemp. (°C)	2	5	7	12	17	19	22	23	16	11	9	9	12

Windrichtung Verteilung in (%)
 Jahr

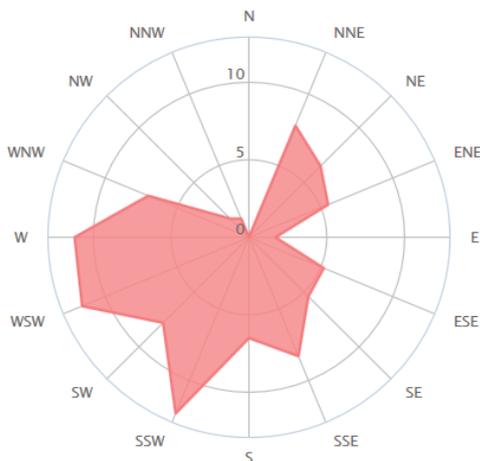


Abbildung 3-4: Windstatistik für die Station Glückstadt für den Zeitraum 04/2015 bis 04/2016 (www.windfinder.de)

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 Bereiche der Unterelbe zusammengefasst.

Tabelle 3-3: Maximale signifikante Wellenhöhen in den drei Bereichen der Unterelbe zwischen Hamburg und Cuxhaven, vgl. Anlage 3 in [8]

Bereich	Abb. in Anlage 3	Südufer	Fahrrinne	Nordufer
Bereich I Hamburger Hafen bis Schwarztonnensand				
Sturmflut 1994	-	-	-	-
Wind aus SW	-	-	-	-
Wind aus SO	-	-	-	-
Bereich II Schwarztonnensand bis Brunsbüttel (Angaben bis Elbe-km 670)				
Sturmflut 1994	-	-	-	-
Wind aus SW	116, 118	0,3	0,6	0,5
Wind aus SO	124, 126	0,6	0,7	0,6
Bereich III Brunsbüttel bis zur See				
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

Alle drei Messlokationen Hollerwettern, Bielenberg und Schwarztonnensand liegen in dem genannten Bereich II. Zur besseren Einschätzung wurden die Seegangsbedingungen in den drei Messlokationen mit Hilfe des Seegangsatlas [20] analysiert. Die zugehörigen Ergebnisse sind als Memo 0219-02 (Anlage 3.3) beigefügt.

Bei starken westlichen bis nordwestlichen Winden kommt es aufgrund des Windstaus zu erhöhten Wasserständen in der Elbe. Auch der Seegang läuft dann in das Ästuar hinein, so dass der Seegang durchaus bis zur unterstromigen Lokation in Hollerwettern laufen kann. Weiter nach stromauf wird der Seegang zunehmend lokal erzeugt und hängt jeweils von der Windrichtung, -stärke und der Fetchlänge ab. Für die Lokation B1 in Bielenberg ist es Wind aus Nordwest bei dann vergleichsweise langer Fetchlänge, so dass maximale Seegangsbedingungen generiert werden.

Für maximale Seegangsbedingungen an der Lokation C1 Schwarztonnen-sand muss der Wind noch weiter aus NNW wehen.

Für die Messkampagne Unterelbe 2015 kann festgestellt werden, dass vergleichsweise nur sehr geringer Seegang während des Messzeitraumes aufgetreten ist (vgl. Anlage 8). Hinsichtlich der Überlagerung von Schiffs- und Windwellen kann festgestellt werden, dass die aufgetretenen Windwellen keinen Einfluss auf die Analyse der gemessenen Schiffswellen gehabt haben.

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.

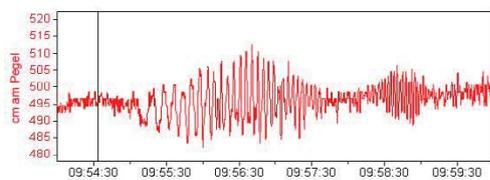


Abb. 2: Wellenbild eines Katamarans bei 31,3 Knoten

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

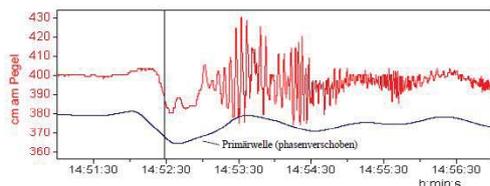


Abb. 3: Wellenbild eines Feederschiffs bei 17,2 Knoten

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

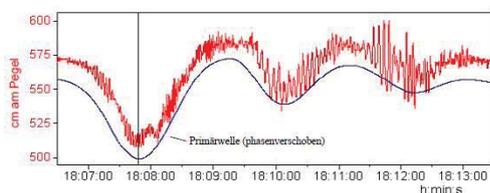


Abb. 4: Wellenbild eines Post-Panmax Containerschiffs bei 15,5 Knoten

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.

Maximale zu erwartende schiffserzeugte Belastungen im derzeitigen Ist-Zustand entlang der Untereibe fasst die folgende Tabelle 3-4 zusammen. Für weitergehende Erläuterungen zu Schiffswellen und durchgeführten Naturmessungen wird auf das umfassende Gutachten der BAW [9] zu ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung verwiesen.

Tabelle 3-4: Maximale schiffserzeugte Belastungen im derzeitigen Ist-Zustand entlang der Untereibe gem. [9] am Fahrwasserrand

Bereich	Absunk z_a [m]	Primär- wellenhöhe H_P [m]	Sekundär- wellenhöhe H_{Sek} [m]
Bereich I <i>Hamburger Hafen bis Schwarztonnensand</i> ($v_s = 10 \text{ kn}$)	0,5 - 1,1	0,5 - 1,1	1,0
Bereich II <i>Schwarztonnensand bis Brunsbüttel</i> ($v_s = 12 \text{ kn}$)	1,2	1,4	1,1
Bereich III <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

Für die drei Messlokationen im Bereich II ist entsprechend der Tabelle 3-4 mit folgenden maximalen schiffserzeugten Belastungen am Fahrwasserrand zu rechnen:

- maximaler Absunk z_A von 1,2 m,
- maximale Primärwellenhöhe H_P von 1,4 m und
- maximale Sekundärwellenhöhe H_{Sek} von 1,1 m.

Infolge der tidebedingten Wasserstandsveränderungen und der Unterwassertopografie (vgl. Abbildung 3-2) unterliegen diese Schiffswellen auf dem Weg vom Fahrwasser zum Ufer den bekannten Flachwassereffekten wie Shoaling und Refraktion, so dass an der Messstation selbst geringere Schiffswellenparameter zu erwarten sind. Wasserstandsbedingt können die Schiffswellen auch brechen oder als gebrochene Wellen weiter auf das Ufer zulaufen. Entsprechende Erläuterungen wurden im Zuge der Abschlusspräsentation (Anlage 12) unter Verweis auf das umfangreiche Fotomaterial (siehe Anlage 13) gegeben.

Die in Tabelle 3-4 zusammengefassten Angaben beruhen maßgeblich auf durchgeführten Untersuchungen und Naturmessungen, die in den vergangenen Jahren entlang der Untereibe durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 3-6).

Die analysierten Maximalwerte schiffserzeugter Wellen entlang der Untereibe werden in der folgenden Tabelle 3-5 zusammengestellt.

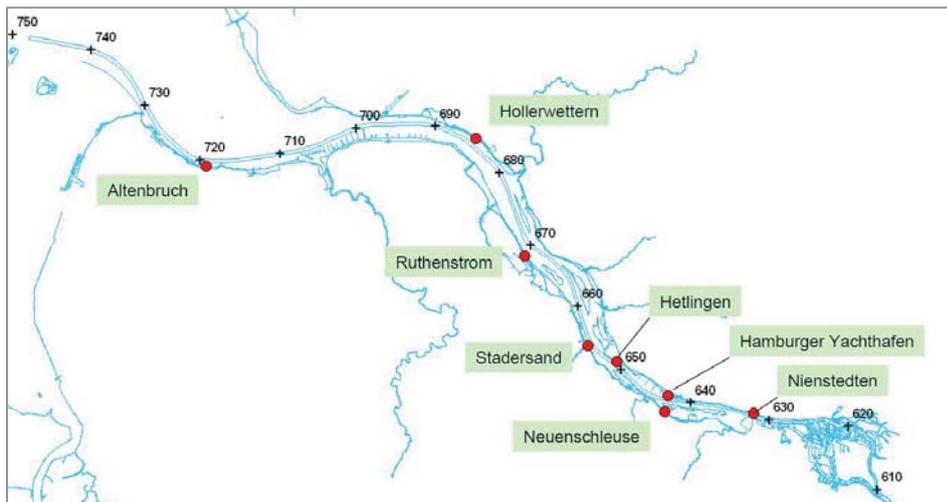


Abbildung 3-6: Übersicht durchgeführter Naturmessungen zur Erfassung der Schiffswellen [9]

Tabelle 3-5: Zusammenstellung von Maximalwerten schiffserzeugter Wellen aus Naturmessungen entlang der Unterelbe [9]

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

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

3.2.6 Schiffsverkehr

Die Unter- und Außenelbe ist das meistbefahrene Revier Deutschlands. Die WSD Nord² dokumentiert mit Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 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.

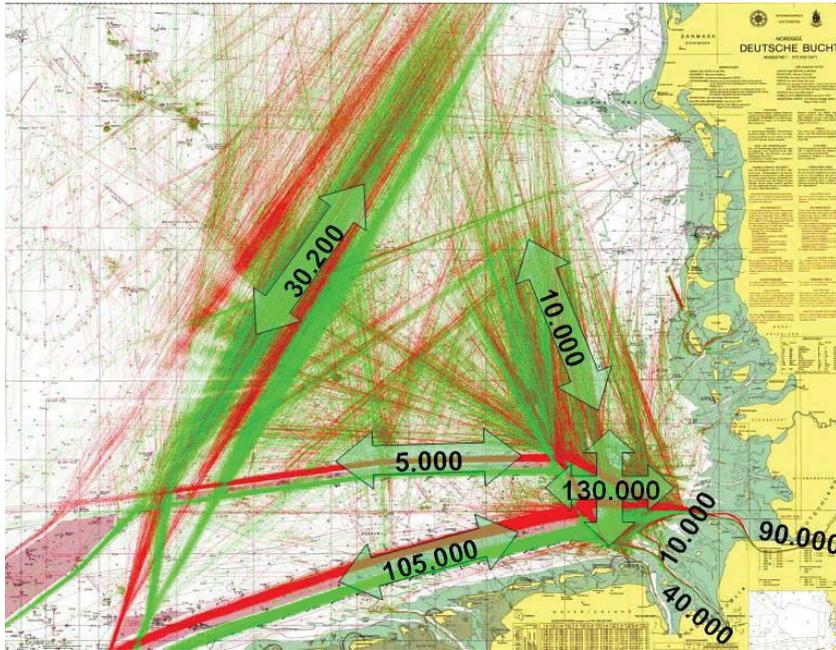


Abbildung 3-7: Schiffsbewegungen in 2009 (WSD Nord)

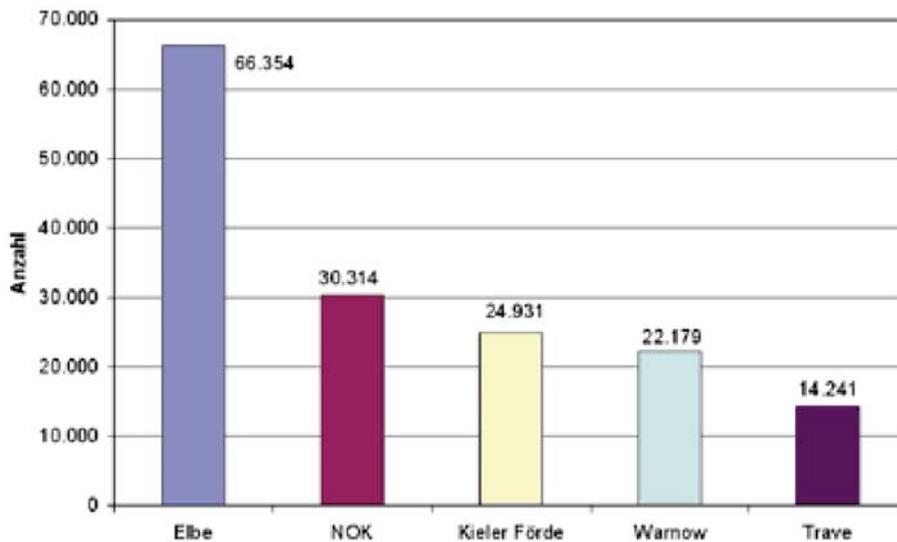


Abbildung 3-8: Anzahl der Schiffsbewegungen in 2009 im Vergleich (www.wsv.de)

Zusätzlich liegt dem Bericht die Verkehrsstatistik für das Jahr 2008 und 2015 (rund. 63.000 Schiffsbewegungen) als Anlage 3.5 bei.

² *jetzt*: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt –Standort Kiel-

3.2.7 Eisverhältnisse

Obwohl die Messkampagne 2015 nicht durch Eisbedingungen beeinträchtigt wurde, soll hier zur Vervollständigung der Revierbedingungen in aller Kürze auf die Eisverhältnisse in der Unterelbe eingegangen werden. Detaillierte Erläuterungen und Statistiken zu den Eisverhältnissen an der Nordseeküste und auf der Elbe sind vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in [21] dokumentiert. Die Häufigkeit des Eisvorkommens auf der Elbe kann Abbildung 3-9 und detailliert Anlage 3.6 entnommen werden.

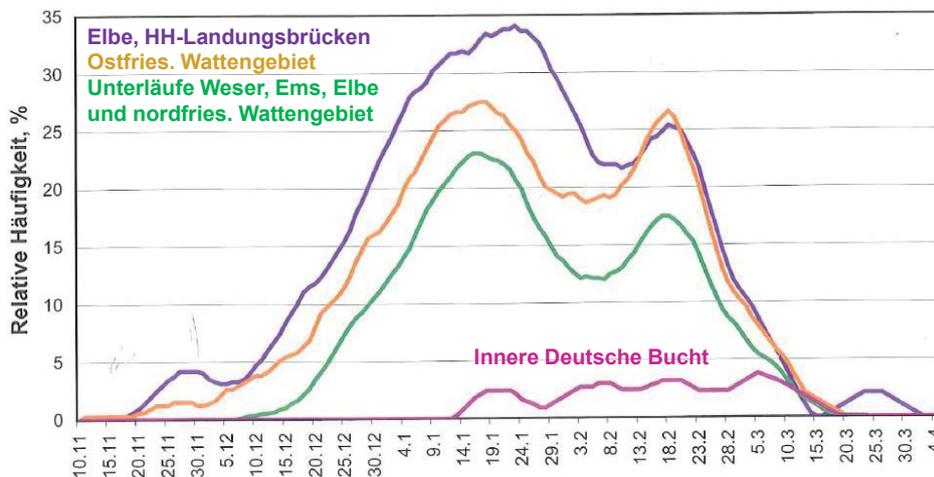


Abbildung 3-9: Häufigkeit des Eisvorkommens im deutschen Nordseeküstengebiet im Zeitraum 1961 bis 2000 nach [21]

Kontinuierliche Tideströme und der intensive Schiffsverkehr sorgen dafür, dass auf der Elbe fast nur Treibeisformen vorkommen. Im Fall westlicher Winde wird das Eis dann zusammengeschoben, was in Stromengen zu Behinderungen der Schifffahrt führen kann. Die folgende Abbildung 3-10 verdeutlicht exemplarisch die Eisverhältnisse im Bereich Lühesand. Schiffswellen unterliegen bei derartigen Bedingungen einer sehr starken Dämpfung und breiten sich nur begrenzt und stark gedämpft aus.



Abbildung 3-10: Fahrendes Schiff (Abgänger) bei Eisgang auf Höhe Lühesand
Fotoquelle: Hamburger Abendblatt vom 13.02.2012)

3.2.8 Strömungen im Fahrwasser

Die Tideströmungen entlang der Unterelbe werden an verschiedenen Stationen aufgezeichnet. Die nachfolgende Abbildung 3-11 setzt die Messlokationen A1, B1 und C1 und die entlang der Unterelbe vorhandenen Dauermessstationen grafisch in Bezug. Für die Messlokation A1 – Hollerwettern wird dafür die Dauermessstation D4 herangezogen. Für die Messlokationen B1 – Bielenberg und C1 – Schwarztonnensand wird auf die Dauermessstation D3 Bezug genommen.

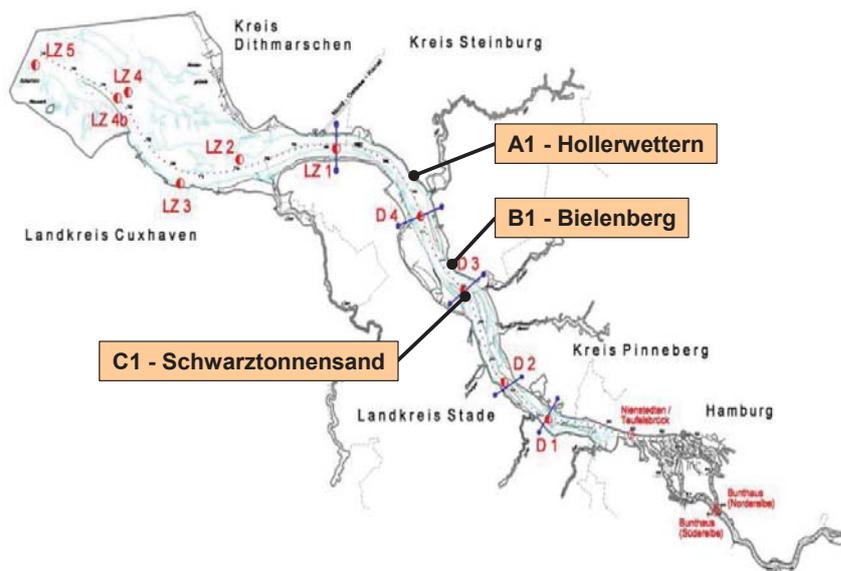


Abbildung 3-11: Dauermessstationen für die Erfassung von Tideströmungen in der Unterelbe mit Kennzeichnung der drei Messlokationen A1, B1 und C1

In Anlage 3.7 wird auf die zu berücksichtigenden Übertragungsfaktoren zwischen der jeweiligen Messstation und der Fahrwassermitte ausführlich eingegangen, was für die spätere Auswertung der Schiffswellenereignisse und die richtige Korrektur der vom WSA Hamburg bereitgestellten Strömungsdaten zur Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser von Bedeutung ist.

3.3 Messkonzept und Instrumentierung

Das Messkonzept wurde von der Fa. ARGUS entwickelt. Unter Verweis auf Abbildung 3-12, die Präsentation in Anlage 12 und die Unterlagen zur Messtechnik in Anlage 4 wird nachfolgend das Messkonzept und die Instrumentierung erläutert.

Alle Messstationen A1, B1 und C1 wurden als autarke Stationen mit eigener Stromversorgung (Batteriecontainer) konzipiert. Die Besonderheit dieser autarken Messstation liegt darin, dass die Messungen in der Wasserwechselzone auszuführen waren, d.h. dass die Messstation bei Tidehochwasser überspült ist und bei Tideniedrigwasser trockenfällt. Entsprechend sind die Anforderungen an die Messtechnik gesetzt.

Es wurde ein sog. Messkäfig in der Größe eines Würfels mit der Kantenlänge 1 m gebaut (vgl. Abbildung 3-12). Die längeren Beine (0,5 m) dienen als Verankerung im Boden. Auf die Zeichnung 0219-S-05 mit Darstellung des Messkäfigs wird verwiesen.

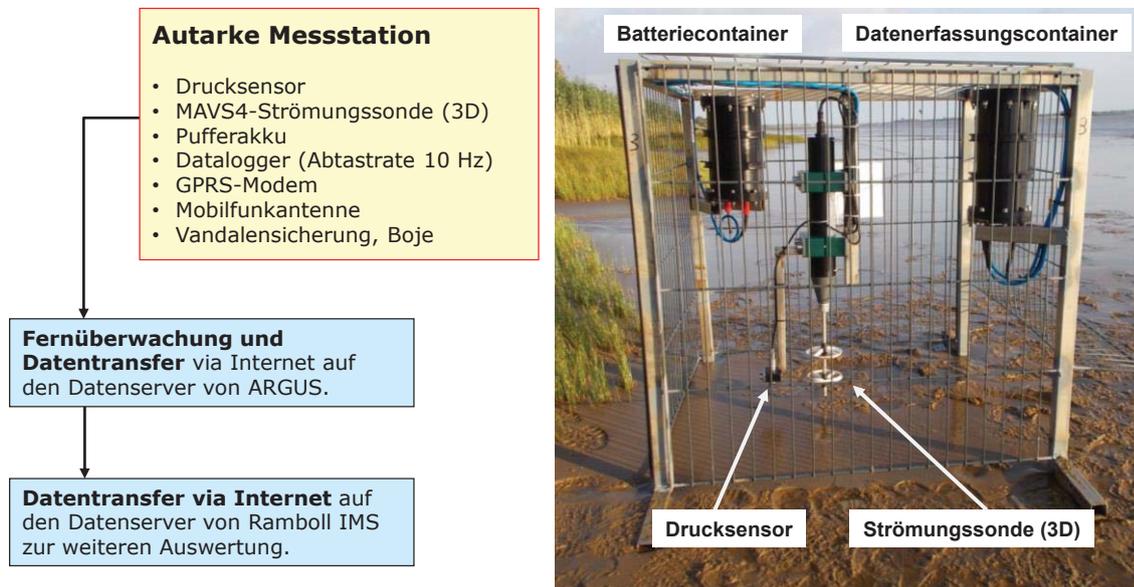


Abbildung 3-12: Messkonzept

In dem Messkäfig wurden folgende Messgeräte und Komponenten (Detailbeschreibungen siehe Anlage 4) installiert:

- Drucksonde
zur Erfassung der Wasserspiegelauslenkungen
Messebene 10 cm über der Sohle
- 3D-Strömungssonde (MAVS4)
zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten
Messebene 10 cm über der Sohle
- Batteriecontainer (Eigenbau)
- Datenerfassungscontainer (Eigenbau)
mit der Datenerfassung (Datenlogger), dem GPRS-Modem und der Antenne.

Alle Komponenten wurden entsprechend miteinander verbunden. Zum Schutz vor Vandalismus wurde der Messkäfig mit einem Zaunelement geschützt.

Da der Batteriecontainer die Stromversorgung nur zeitlich begrenzt sicherstellen konnte, wurden in regelmäßigen Abständen Service-Fahrten zu den Messstationen unternommen und die Batterien entsprechend ausgetauscht.

Alle Messstationen wurden identisch aufgebaut und ausgestattet. Um Passanten auf die Messungen aufmerksam zu machen, wurde ein Hinweisschild installiert. Weiterhin wurden kleine gelbe Bojen zur Markierung der Messstation im überstauten Fall verwendet. Auf weitere Detailunterlagen in Anlage 4 wird verwiesen.

Datenerfassung und -übertragung

Die Messdaten wurden von einem Datalogger mit der Abtastrate von 10 Hz aufgezeichnet und gespeichert. Wenn die Messstation tidebedingt trockenfällt, dann wurden die Messdaten 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 dieser eingesetzten Messtechnik stehen zeitsynchrone Messdaten der Messlokationen A1, B1 und C1 zur Verfügung.

Nach erfolgter Datenübertragung der Messstation schaltete sich diese solange ab, bis tidebedingt wieder Messdaten aufgezeichnet werden konnten. Auf diese Weise wurde entsprechend Strom gespart.

Neben der reinen Messdatenübertragung wurden die Messstationen auch fernüberwacht (vgl. Abbildung 3-12), d.h. es wurde u.a. sichergestellt, dass eine ausreichende Batteriespannung vorhanden war, um den Messbetrieb zu gewährleisten. Weiterhin wurden die aufgezeichneten Messdaten von der Fa. ARGUS tageweise auf Plausibilität geprüft.

Weitere Gerätedetails können Anlage 4 entnommen werden.

Installation und Demontage

Die Messstationen wurden am 08. und 09.09.2015 installiert. Die Messlokationen A1 und B1 waren fußläufig zu erreichen. Für die Messlokation C1 auf Schwarztonnensand wurde Schiffsunterstützung in Anspruch genommen. Die Demontage der drei Messstationen erfolgte nach 6 Wochen Messzeit am 04. und 06.11.2015.

Projektprotokoll

Der zeitliche Projektverlauf, wichtige Details und zwischenzeitliche Ereignisse können dem Projektprotokoll in Anlage 2 entnommen werden.

3.4 Messzeitraum und Übersicht verfügbarer Messdaten

Messzeitraum

Als offizieller Messzeitraum wurde in der Folge der Zeitraum zwischen dem 20.09.2015 und dem 01.11.2015 (insgesamt 6 Wochen) festgelegt.

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 01.11.2015 wurden insgesamt für alle drei Messstationen A1, B1 und C1 über 6 Wochen zeitsynchrone Messdaten der Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen in einem Messtakt von 10 Hz aufgezeichnet.

Bei einem Datenvolumen von rd. 50 Mbyte pro Tag und Messlokation ergab sich damit eine Gesamtdatenmenge von rd. 2,1 GByte.

Folgende Messdaten wurden vom WSA Hamburg zur Verfügung gestellt:

- Hydrologische Messdaten der Pegel Brokdorf, Glückstadt und Kollmar als Minutenwerte
- Meteorologische Messdaten der Wetterstationen Itzehoe und Ruthenstrom als 10-Minutenwerte
- Tidenströmungen in Betrag und Richtung an den Dauermessstationen D3 und D4
- Schiffspassagedaten für die Messlokationen A1, B1 und C1.

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 Messlokalen A1, B1 und C1 erfassten Messdaten (Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen) sind als ASCII-Datensätze in der Anlage 14 *Messdaten der Messlokalen A1, B1 und C* tageweise, in dem entsprechenden Aufnahmeblatt und einzeln für jede Messlokation abgelegt.

Alle weiteren Messdaten (Wasserstände, meteorologische Daten, Schiffspassagen, etc.) sind entweder im ASCII-Format oder als EXCEL-Dateien in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/02 Messdaten* abgelegt.

Die grafische Darstellung aller Messdaten erfolgt thematisch geordnet in Anlage 13 *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 Brokdorf, Glückstadt und Kollmar vom WSA Hamburg zur Verfügung gestellt. Die Messdaten sind im ASCII-Format und als EXCEL-Dateien in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/02 Messdaten/Hydrologie* abgelegt.

Der Drucksensor an jeder Messstation hat den Wasserstand für den Zeitraum des Überstaus bis zum Trockenfallen aufgezeichnet. Diese hydrologischen Messdaten sind sowohl in die Darstellung zusammen mit den meteorologischen Daten (vgl. Abbildung 3-13) als auch in die Darstellung als Tagesplot (vgl. Abbildung 3-14) mit den Messdaten der Lokationen A1, B1 und C1 eingegangen.

Für weitere Darstellungen wird auf Anlage 13 *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 meteorologischen Messdaten sind im ASCII-Format und als EXCEL-Dateien in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/02 Messdaten/Meteorologie* abgelegt. Diese Messdaten werden in aufbereiteter Form zusammen mit den Wasserstandsdaten an A1, B1 und C1 und dem analysierten Seegang in Abbildung 3-13 dargestellt.

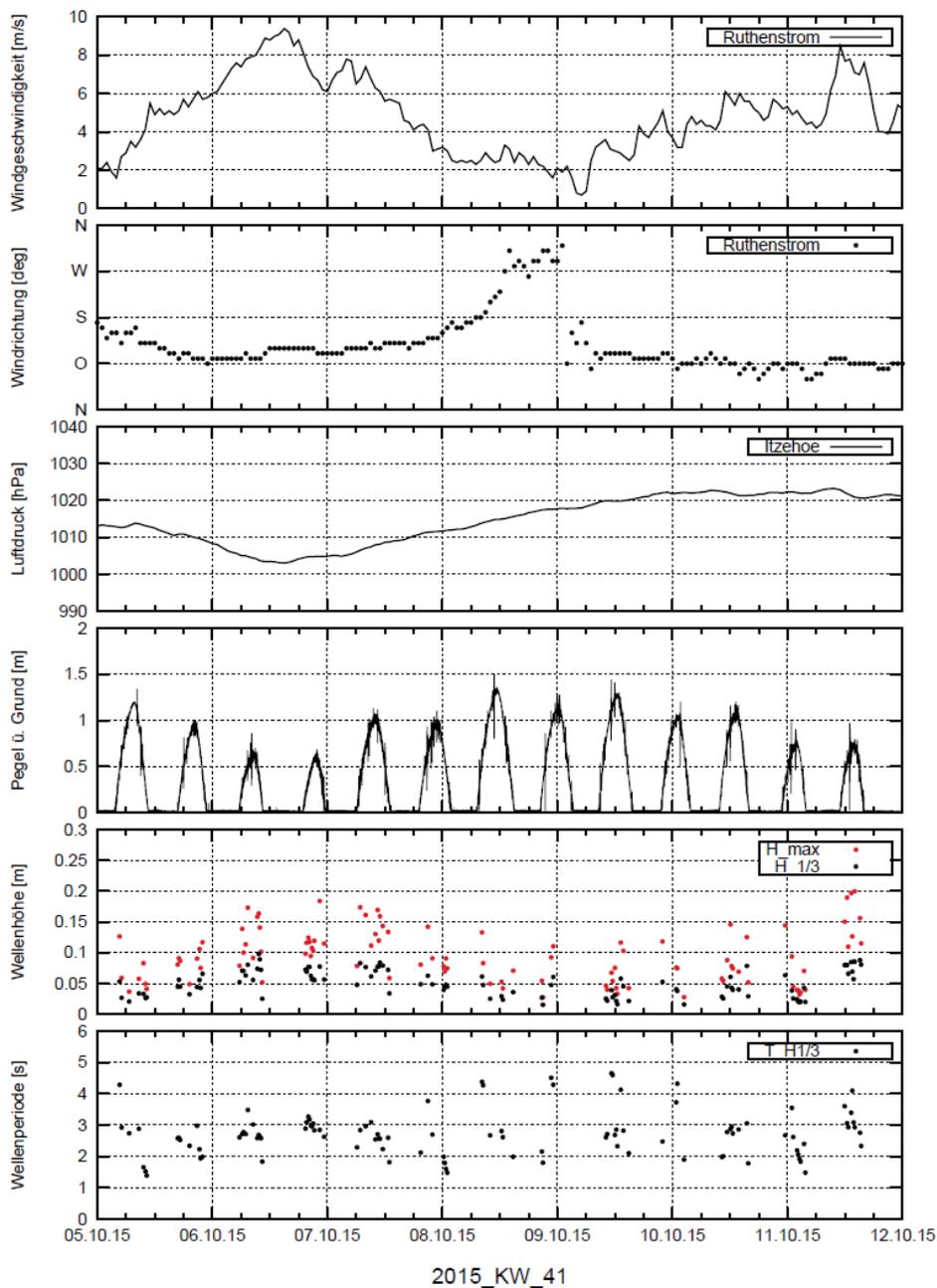


Abbildung 3-13: Exemplarische Darstellung der meteorologischen Parameter, der hydrologischen Daten und der analysierten Seegangsbedingungen für die 41. KW 2015 an der Messlokation A1

Für weitere Darstellungen wird auf Anlage 13 *Daten und Auswertungen/03 Bilder-Zeitreihen* oder Anlage 8 verwiesen.

3.5.4 Schiffspassagen

Die Schiffspassagendaten wurden vom WSA Hamburg als EXCEL-Dateien zur Verfügung gestellt. Diese Messdaten sind in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/02 Messdaten/Schiffspassagen* abgelegt.

Diese Schiffspassagen werden in aufbereiteter Form (als rote Punkte) zusammen mit den gemessenen Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen im Tagesplot exemplarisch in Abbildung 3-14 dargestellt. Diese Tagesplots sind in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/03 Bilder-Zeitreihen/Tagesplots* für alle Messlokationen abgelegt.

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 3-14). 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 3-14).

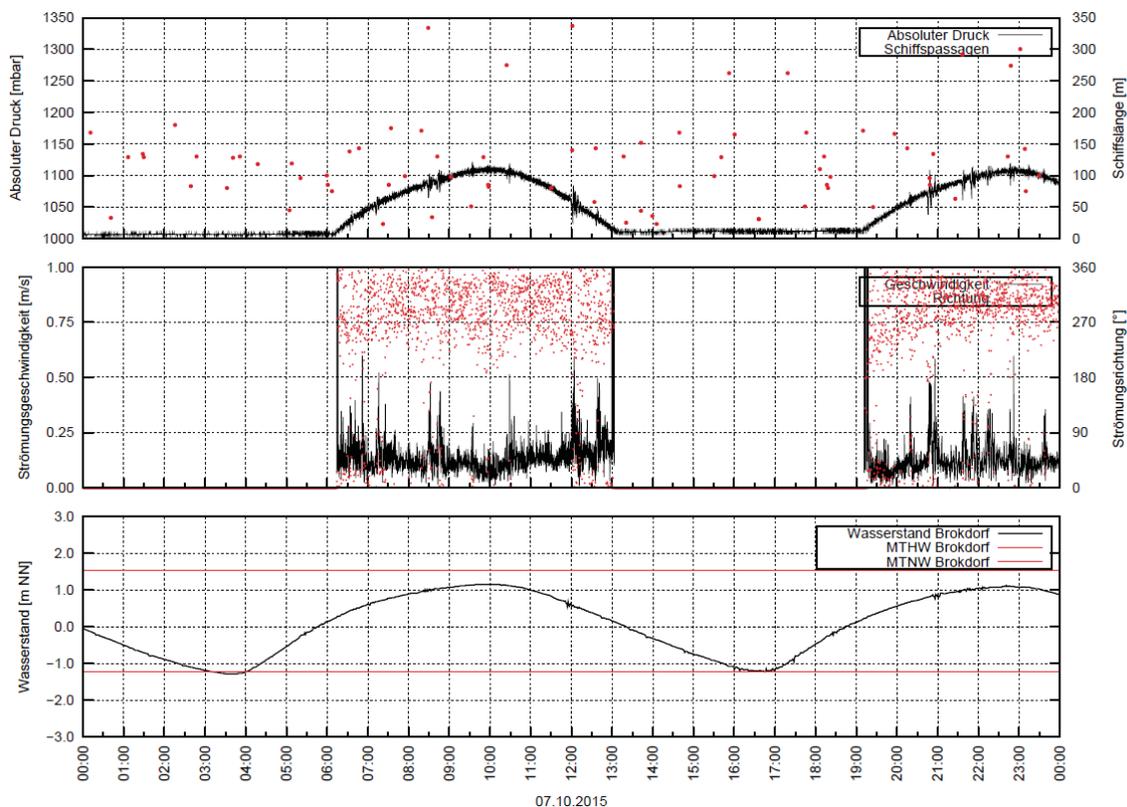


Abbildung 3-14: Exemplarische Zeitreihe für die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen und Strömungen zusammen mit registrierten Schiffspassagen als Tagesplot an der Messlokation A1

Diese Tagesplots für die Messdaten an den Messlokationen A1, B1 und C1 sind in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/03 Bilder-Zeitreihen/Tagesplots* abgelegt.

Für die Strömungen im Fahrwasser wird auf die Daten der Dauermessstationen D3 und D4 zurückgegriffen. Deren Verfügbarkeit wird in Anlage 5 dargestellt. Auf die Übertragung der gemessenen Strömungsmessdaten an den Dauermessstationen D3 und D4 auf die Fahrwassermitte geht die Anlage 3.7 ein.

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 13 als aufbereite Daten und Anlage 14 mit Messdaten als Rohdaten gesichert. Nachfolgend werden einige Hinweise zur Struktur der Datenablage gegeben.

Anlage 13 - Daten und Auswertungen

- *01 Zeichnungen*
- *02 Messdaten*
Messdaten zu Hydrologie, Meteorologie, Schiffspassagen
- *03 Bilder-Zeitreihen*
Zeitreihen zu Hydrologie, Meteorologie und Seegang sowie Tagesplots für die Messungen an A1, B1 und C1
- *04 Auswertung*
Datensätze zu Schiffspassagen, Schiffsstatistik, Schiffswellenereignissen und zum Seegang
- *05 Auswertung-Zeitreihen*
Zeitreihen von Schiffswellenereignissen und analysiertem Seegang
- *06 Fotos*
zur Messkampagne.

Anlage 14 - Messdaten der Messlokationen A1, B1 und C

Die ASCII-Datensätze der Messdaten (Rohdaten) sind tageweise abgelegt nach Messlokation A1, B1 und C1. Bei einem Datenvolumen von rd. 50 Mbyte pro Tag und Messlokation ergibt sich eine Gesamtdatenmenge von 2,1 GByte.

Die Rohdaten sind pro Messlokation in Anlage 14 abgelegt.

4. Auswertung der Schiffswellenereignisse

4.1 Auswertungskonzept

Für die Messkampagne Unterelbe 2015 wurde ein erprobtes Auswertungskonzept (vgl. [3], [4], [5] und [6]) für die Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse aufgestellt und durchgeführt, welches in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt und nachfolgend kurz erläutert wird. Im Vergleich zu den bisherigen Messkampagnen musste das Auswertekonzept wegen der zeitweise trockenfallenden Messsensoren angepasst werden. Für detaillierte Erläuterungen zur Analyse der Schiffswellen wird auf die Unterlagen in Anlage 6 verwiesen.

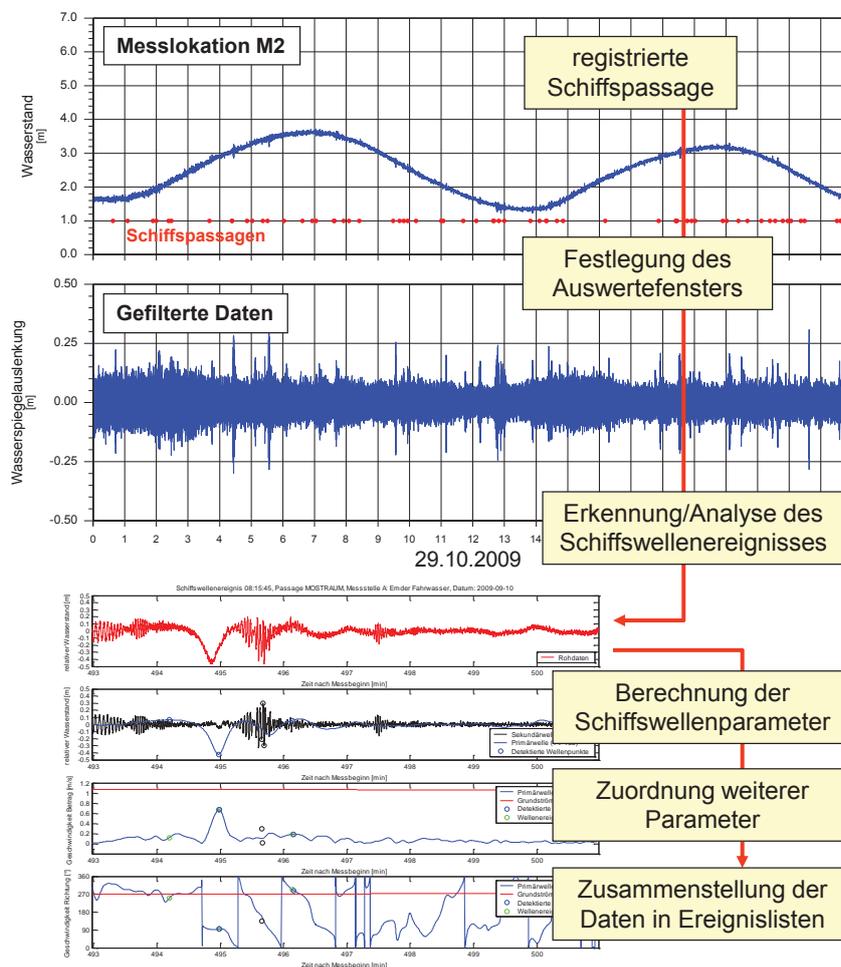


Abbildung 4-1: Auswertungskonzept zur Erkennung und Analyse der Schiffswellenereignisse und zugehöriger Parameter

Folgende Arbeitsschritte wurden für jede der Messlokationen 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 Messlokationen wird in dem zeitlich aufgespannten Passagefenster nach einem zugehörigen Schiffswellenereignis gesucht. In Abstimmung mit der BAW handelt sich um ein Schiffswellenereignis, wenn
 - ein Absunk $z_A \geq 0,10$ 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 Unterelbe wurden folgende Definitionen getroffen (vgl. Anlage 5):

- offizieller Messzeitraum:
20.09.2015 bis 01.11.2015

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, erfolgten 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 Schiffswellenereignisse

In Anlage 5 sind alle relevanten Informationen zur Messkampagne und zu den erfassten Messdaten für die Messlokationen zusammengefasst.

5. Darstellung der Ergebnisse

5.1 Allgemeines

In Anlehnung an das vorgestellte Auswertungskonzept wurden die Messdaten systematisch ausgewertet und weitergehend analysiert. Die folgende Tabelle 5-1 gibt einen Überblick der im Messzeitraum registrierten Schiffspassagen und der analysierten Schiffswellenereignisse an den Messlokalationen A1, B1 und C1.

Tabelle 5-1: Übersicht der analysierten Schiffswellenereignisse an den Messlokalationen A1, B1 und C1 in der Messkampagne 2015

Messlokation	A1	B1	C1
registrierte Schiffspassagen im Messzeitraum (20.09.2015 – 01.11.2015)	3.282	3.472	3.381
Anzahl der im Messzeitraum (6 Wochen) analysierten Schiffswellenereignisse	896	569	937
Anteil Schiffswellenereignisse in [%]	27 %	16 %	28 %
Mittlere Anzahl Schiffswellenereignisse pro Tag	22	14	23
Höhenlage Messstation [mNHN]	NHN +0,13 m	NHN +0,20 m	NHN +0,07 m
Entfernung Messstation – Fahrwassermitte [m]	750 m	1.100 m	700 m

Für die in Tabelle 5-1 ausgewiesenen Schiffswellenereignisse an den Messlokalationen A1, B1 und C1 ist anzumerken, dass sich diese nur auf die Zeiträume beziehen, in denen die Messstation tidebedingt und entsprechend der lokalen Höhenlage (vgl. Tabelle 3-1) vollständig oder zeitweise überstaut war.

Aus der Tabelle 5-1 wird deutlich, dass in Hollerwettern und Schwarztonensand der Anteil der Schiffspassagen, die ein Schiffswellenereignis verursachen, vergleichbar ist mit 27 % an A1 und 28 % an C1. In Bielenberg hingegen ist die Häufigkeit der Belastung infolge Schiffswellen um rd. 11 % geringer, was u.a. der flachen Unterwasserböschung sowie dem größeren Abstand zur Fahrrinne zugeschrieben werden kann.

Schiffswellenereignisse

Die Schiffswellenereignisse wurden lokationsweise mit Hilfe einer eigenen IMS-Software (MATLAB-Anwendung) analysiert sowie in separaten EXCEL-Dateien zusammengefasst und weiter aufbereitet (vgl. Erläuterungen zur Vorgehensweise in Anlage 6). 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 Absinks),
- 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 ($= H_{1/3}$) und die Wellenperiode $T_{H1/3}$,
- 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. Die vom WSA Hamburg übergebenen Strömungsdaten wurden unter Verwendung von Korrekturfaktoren bearbeitet, um diese vom Fahrrinnenrand auf Fahrrinnenmitte zu übertragen. Für weitere Details wird auf Anlage 3.7 verwiesen. Bei der Ermittlung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser an den Messlokalationen A1, B1 und C1 wurden in der Folge die vom WSA Hamburg übergebenen Strömungsmessdaten auf das jeweilige Schiffswellenereignis unter Verwendung der abgeleiteten Korrekturfaktoren übertragen.

Statistische Auswertung der Schiffswellenereignisse

Die statistische Auswertung der analysierten Schiffswellenereignisse orientiert sich sowohl an der Leistungsbeschreibung [1] als auch an den analysierten Ergebnissen und Erfahrungen (vgl. [3], [4], [5] und [6]). 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.

In der Regel reduziert sich der Parameter dem Betrag nach vom Maximum (1. Rang) auf 50 % des Maximalwertes beim zugehörigen Ereignis im 50. Rang.

Seegang

Die Seegangparameter an den Messlokalationen A1, B1 und C1 sind geprägt von den maßgebenden hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen. Eine Einschätzung der Seegangsverhältnisse wurde in Abschnitt 3.2.4 gegeben. Während der Messkampagne 2015 traten keine besonderen Seegangereignisse auf. Der natürliche Seegang wies im Messzeitraum überwiegend signifikante Wellenhöhen in der Größenordnung von 10 cm bis 15 cm auf (vgl. Zeitreihen in Anlage 8).

Hinweise

Im nachfolgenden Abschnitt 5.2 wird zunächst auf die Schiffspassagen an den einzelnen Messlokalen Bezug genommen. In den folgenden Abschnitten 5.3 bis 5.6 wird auf die Schiffswellenereignisse an den Messlokalen A1, B1 und C1 und deren Analyse eingegangen.

Auf Passagen des *HALUNDER JET* wird in Abschnitt 5.7 gesondert eingegangen.

Im Abschnitt 5.8 werden die Untersuchungen zu den Überstaudauern und -höhen vorgestellt und erläutert.

Auf die Ergebnispräsentation in Anlage 12 wird für alle nachfolgenden Erläuterungen verwiesen.

Auch dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass im Nachgang zu der gemeinsamen Besprechung am 20.04.2016 die Analyse der Schiffswellenereignisse nochmals verfeinert und qualitätsgesichert wurde. So wurden beispielsweise die Filterkriterien weitergehend optimiert. Aus diesem Grunde können geringfügige Unterschiede in der Ergebnisdarstellung zwischen Abschnitt 5 und Anlage 12 auftreten, wie z.B. in der Auflistung der maximalen Sekundärwellenereignisse. Die statistische Verteilung und die getroffenen Aussagen zu den Schiffswellenbelastungen an den untersuchten Messlokalen insgesamt bleiben weiterhin gültig.

5.2 Schiffspassagen

Die vom WSA Hamburg bereitgestellten Daten der Schiffspassagen für die Messlokalen A1, B1 und C1 wurden für den Messzeitraum statistisch aufbereitet. Auf die Erläuterungen in Abschnitt 3.5.4 wird verwiesen. Die Aufbereitung dieser Messdaten ist in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/04 Auswertung/Schiffspassagen* getrennt für die Messlokalen A1, B1 und C1 abgelegt. Nachfolgend wird auf einzelne Details dieser Auswertung näher eingegangen.

5.2.1 Statistik der Schiffspassagen

Die Messlokalen A1, B1 und C1 liegen in dem Bereich II der Unterelbe. In der folgenden Tabelle 5-2 wird stellvertretend für die seeseitige Zufahrt nach Hamburg die Statistik der Schiffspassagen für den definierten Messzeitraum von 6 Wochen an der Messlokation A1 zusammengestellt.

Tabelle 5-2: Statistik der Schiffspassagen an der Messlokation A1 für den Messzeitraum (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	3.282	100	1.552	1.730		10	400	3	59	0,1	14,2	0,8	13,5	37,3	305	794	1.355
Aufkommer	1.552	47				10	400	3	59	0,1	14,2	3,2	13,3	37,3	453	931	1.355
Abgänger	1.730	53				10	400	3	59	0,2	14,1	0,8	13,7	37,1	305	671	1.309
Häufigkeitsverteilung nach Schiffstyp						Schiffslänge		Schiffsbreite		Tiefgang		SOG			Passierabstand		
Schiffstyp	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
Undefined	0	56	1,7	26	30	17	396	4	59	0,3	12,9	5,0	12,2	21,4	368	812	1.185
WING IN GROUND (WIG)	20	7	0,2	3	4	80	85	8	9	2,1	2,5	6,2	9,0	13,4	529	752	1.107
DREDGING OR UNDERWATER OPERATION	33	480	14,6	150	330	20	143	7	28	1,4	9,5	4,1	13,3	17,3	517	748	1.181
MILITARY OPERATIONS	35	3	0,1	1	2	130	144	14	17	6,0	7,5	14,9	16,2	18,6	623	703	773
SAILING	36	7	0,2	5	2	21	48	4	8	1,4	3,0	4,4	7,3	9,1	434	869	1.122
HIGH SPEED CRAFT (HSC) ALL TYPES	40	86	2,6	43	43	19	51	7	12	1,6	2,4	16,3	33,1	37,3	583	878	1.116
PILOT VESSEL	50	3	0,1	1	2	16	16	6	6	1,2	1,2	8,2	10,9	12,6	494	683	1.048
SAR VESSEL	51	2	0,1	1	1	10	10	4	4	1,0	1,0	9,3	9,3	9,3	305	305	305
TUG	52	54	1,6	27	27	18	33	6	12	2,4	6,5	5,7	10,5	14,4	546	866	1.177
LAW ENFORCEMENT VESSEL	55	65	2,0	33	32	12	44	3	10	1,2	2,6	5,2	12,2	25,9	407	848	1.229
PASSENGER SHIP ALL TYPES	60	29	0,9	14	15	29	326	6	55	1,6	8,9	7,6	13,6	17,1	545	771	1.119
PASSENGER SHIP NO ADD. INFORMATION	69	3	0,1	1	2	16	221	5	31	0,5	7,9	7,5	12,6	15,4	684	928	1.309
CARGO SHIP ALL TYPES	70	749	22,8	376	373	40	400	7	59	1,0	14,2	4,0	12,4	19,8	503	797	1.153
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. A	71	558	17,0	280	278	88	400	12	59	3,6	13,9	8,6	15,6	21,2	575	776	1.115
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. B	72	55	1,7	26	29	138	366	22	52	6,1	12,7	8,9	15,2	18,5	625	772	948
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. C	73	28	0,9	14	14	140	295	23	32	7,0	13,1	8,2	15,3	18,6	616	767	978
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. D	74	61	1,9	30	31	133	398	19	54	6,3	13,3	10,3	14,4	19,1	620	772	1.034
Cargo ships reserved for future use	77	8	0,2	4	4	96	96	14	14	1,8	1,8	7,5	9,9	11,9	503	846	1.123
CARGO SHIP NO ADDITIONAL INFORMATION	79	277	8,4	137	140	62	400	8	59	1,0	13,5	5,6	12,2	19,7	497	807	1.153
TANKER ALL TYPES	80	324	9,9	163	161	32	244	6	42	1,2	11,7	6,5	11,7	16,5	442	820	1.171
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. A	81	70	2,1	37	33	38	228	7	32	1,2	10,6	5,8	12,1	16,7	573	834	1.115
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. B	82	90	2,7	45	45	90	184	11	32	3,4	9,8	8,5	12,8	17,9	571	811	1.053
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. C	83	21	0,6	10	11	84	183	13	32	3,7	11,0	9,8	12,4	16,7	604	781	973
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. D	84	34	1,0	18	16	99	150	15	24	4,5	9,6	8,4	12,7	17,2	634	815	1.075
Tanker reserved for future use	87	1	0,0	1	0	103	103	16	16	4,6	4,6	13,4	13,4	13,4	850	850	850
TANKER NO ADDITIONAL INFORMATION	89	158	4,8	79	79	58	189	8	36	0,4	11,7	6,3	12,3	18,7	412	804	1.261
OTHER TYPE OF SHIP	90	25	0,8	11	14	14	368	4	51	1,0	10,3	5,5	11,2	16,0	545	796	1.355
OTHER TYPE OF SHIP NO ADDITIONAL INFORMATION	99	28	0,9	16	12	19	85	5	14	1,8	3,7	4,1	11,6	16,5	453	815	1.223
Schiffe gesamt	3.282	100	1.552	1.730													

In dem Messzeitraum wurden insgesamt 3.282 Schiffspassagen an der Messlokation A1 registriert. Mit Hilfe der schiffsbezogenen AIS-Daten ist es möglich, weitergehende Statistik zu betreiben, in der bezogen auf den Schiffstyp die Anzahl der Passagen sowie bezogen auf

- die Schiffslänge,
- die Schiffsbreite,
- den Tiefgang,
- die Geschwindigkeit über Grund (SOG³) und
- den Passierabstand

minimale, mittlere und maximale Parameter ausgegeben werden können. Aus der Tabelle 5-2 lässt sich für den Auswertungszeitraum u.a. ablesen, dass

- Schiffe vom Typ *Cargo Ships all Type* den Hauptanteil der Schiffspassagen darstellen vor Passagen von Baggerschiffen (*Dredging or Underwater Operation*) und dem Typ *Tanker all Type*,
- die maximale Schiffslänge von 400 m zu einem Containerschiff gehört,
- die maximale Schiffsbreite von 59 m ebenso wie
- der größte Tiefgang mit 14,2 m zu einem Containerschiff gehört,
- maximale Geschwindigkeiten von 37,3 kn stammen von dem *HALUN- DER JET* und
- ein mittlerer Passierabstand von rd. 800 m für beide Richtungen (Abgänger und Aufkommer) registriert wurden.

SOG - ³ speed over ground

Die Auswertung der Schiffspassagen für die Messlokationen B1 und C1 kann analog in Anlage 10 und Anlage 11 nachgeschlagen werden. Einen Vergleich der Messlokationen A1, B1 und C1 zeigt die folgende Abbildung 5-1.

Statistik über alle Passagen						A1 - Hollerwettern					B1 - Bielenberg					C1 - Schwarztonnensand				
	Kz	Anzahl	%	Aufk	Abg	Anzahl	%	Aufk	Abg	Anzahl	%	Aufk	Abg	Anzahl	%	Aufk	Abg			
Schiffspassagen gesamt	-	3.282	100	1.552	1.730	3.472	100	1.745	1.727	3.381	100	1.696	1.685							
Aufkommer	-	1.552	47			1.745	50			1.696	50									
Abgänger	-	1.730	53			1.727	50			1.685	50									
Häufigkeitsverteilung nach Schiffstyp																				
Schiffsanzahl für Zeitraum																				
Schiffstyp	Kz	Anzahl	%	Aufk	Abg	Anzahl	%	Aufk	Abg	Anzahl	%	Aufk	Abg	Anzahl	%	Aufk	Abg			
Undefined	0	56	1,7	26	30	80	2,3	38	42	76	2,2	39	37							
WING IN GROUND (WIG)	20	7	0,2	3	4	12	0,3	5	7	12	0,4	5	7							
DREDGING OR UNDERWATER OPERATION	33	480	14,6	150	330	582	16,8	292	290	540	16,0	271	269							
MILITARY OPERATIONS	35	3	0,1	1	2	3	0,1	1	2	3	0,1	1	2							
SAILING	36	7	0,2	5	2	12	0,3	9	3	8	0,2	6	2							
HIGH SPEED CRAFT (HSC) ALL TYPES	40	86	2,6	43	43	87	2,5	43	44	87	2,6	43	44							
PILOT VESSEL	50	3	0,1	1	2	6	0,2	3	3	9	0,3	3	6							
SAR VESSEL	51	2	0,1	1	1	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0							
TUG	52	54	1,6	27	27	56	1,6	28	28	56	1,7	28	28							
LAW ENFORCEMENT VESSEL	55	65	2,0	33	32	72	2,1	39	33	56	1,7	29	27							
PASSENGER SHIP ALL TYPES	60	29	0,9	14	15	34	1,0	17	17	34	1,0	17	17							
PASSENGER SHIP NO ADD. INFORMATION	69	3	0,1	1	2	10	0,3	4	6	4	0,1	1	3							
CARGO SHIP ALL TYPES	70	749	22,8	376	373	732	21,1	369	363	728	21,5	367	361							
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. A	71	558	17,0	280	278	559	16,1	281	278	557	16,6	280	277							
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. B	72	55	1,7	26	29	55	1,6	26	29	55	1,6	26	29							
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. C	73	28	0,9	14	14	28	0,8	14	14	28	0,8	14	14							
CARGO SHIP CARRYING DG, HS, OR MP CAT. D	74	61	1,9	30	31	61	1,8	30	31	61	1,8	30	31							
Cargo ships reserved for future use	77	8	0,2	4	4	8	0,2	4	4	8	0,2	4	4							
CARGO SHIP NO ADDITIONAL INFORMATION	79	277	8,4	137	140	287	8,3	144	143	290	8,6	145	145							
TANKER ALL TYPES	80	324	9,9	163	161	326	9,4	163	163	326	9,6	163	163							
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. A	81	70	2,1	37	33	70	2,0	37	33	70	2,1	37	33							
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. B	82	90	2,7	45	45	90	2,6	45	45	90	2,7	45	45							
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. C	83	21	0,6	10	11	21	0,6	10	11	21	0,6	10	11							
TANKER CARRYING DG, HS, OR MP CAT. D	84	34	1,0	18	16	34	1,0	18	16	33	1,0	18	15							
Tanker reserved for future use	87	1	0,0	1	0	1	0,0	1	0	1	0,0	1	0							
TANKER NO ADDITIONAL INFORMATION	89	158	4,8	79	79	157	4,5	80	77	157	4,6	79	78							
OTHER TYPE OF SHIP	90	25	0,8	11	14	59	1,7	28	31	42	1,2	20	22							
OTHER TYPE OF SHIP NO ADDITIONAL INFORMATION	99	28	0,9	16	12	30	0,9	16	14	29	0,9	14	15							
Schiffe gesamt		3.282	100	1.552	1.730	3.472	100	1.745	1.727	3.381	100	1.696	1.685							

Abbildung 5-1: Vergleich der Statistiken der Schiffspassagen an den Messlokationen A1, B1 und C1 im Messzeitraum

Der Vergleich in Abbildung 5-1 zeigt auf den ersten Blick, dass die Anzahl der registrierten Schiffspassagen von A1 nach C1 zunimmt. Wird dieser Anteil der Schiffspassagen von Baggerschiffen (Typ 33) jedoch herausgerechnet, so ergibt sich, dass die Schiffspassagen nahezu konstant sind.

Im Vergleich zu anderen Bundeswasserstraßen und Messkampagnen ordnen sich die Schiffspassagen auf der Unterelbe in 2015 mit 560 Schiffspassagen pro Woche wie folgt ein:

- Lühesand/Unterelbe (2012): rd. 650 Schiffspassagen/Woche [5]
- Außenweser (2014): rd. 450 Passagen/Woche [6]
- Unterweser (2005): rd. 200 Passagen/Woche [3]
- Außenems (2009): rd. 200 bis 350 Passagen/Woche [4].

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 (vgl. auch Folien 45 der Anlage 12). Am häufigsten treten Schiffe mit einem Tiefgang von 6 m auf. Oberhalb von 9 m Tiefgang nimmt die Häufigkeit der Passagen deutlich ab. 123 Schiffspassagen werden mit einem Tiefgang größer 12 m angegeben. Für weiterge-

hende Analysen wird auf die Messdaten und Auswertungen in Anlage 13 verwiesen.

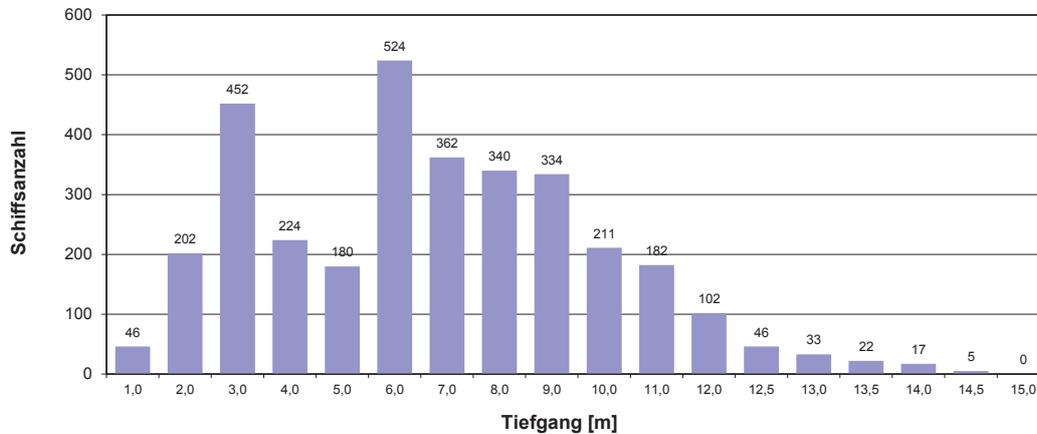


Abbildung 5-2: Häufigkeitsverteilung der Schiffstiefgänge an der Messlokation A1 im Messzeitraum

5.2.3 Statistik der Schiffsgeschwindigkeit

Die Daten der Schiffspassagen können weitergehend auch hinsichtlich der Schiffsgeschwindigkeiten analysiert werden. Abbildung 5-3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Schiffsgeschwindigkeit; Abbildung 5-4 zeigt den Zusammenhang zwischen Schiffsgeschwindigkeit SOG und Tiefgang an der Messlokation A1 (vgl. auch Folie 46 bis 48 in Anlage 12).

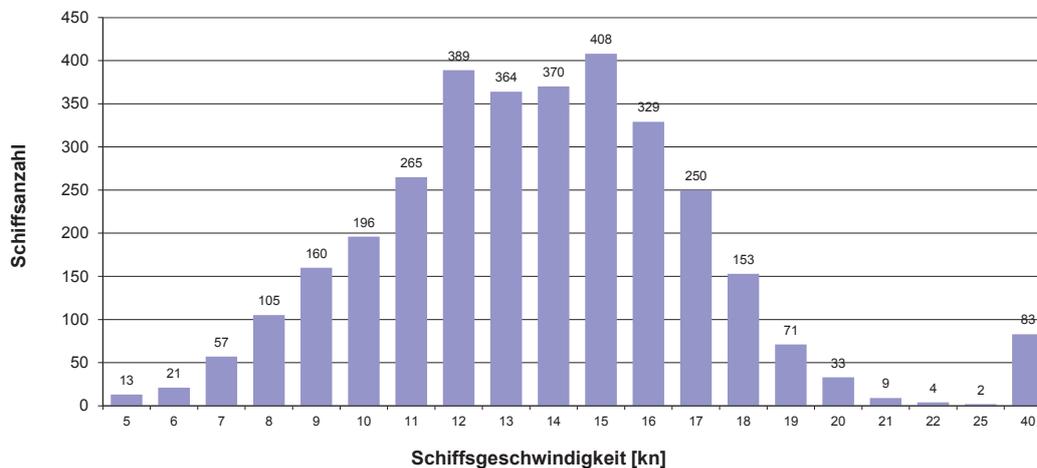


Abbildung 5-3: Häufigkeitsverteilung der Schiffsgeschwindigkeit an der Messlokation A1

Schiffsgeschwindigkeiten von 15 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.

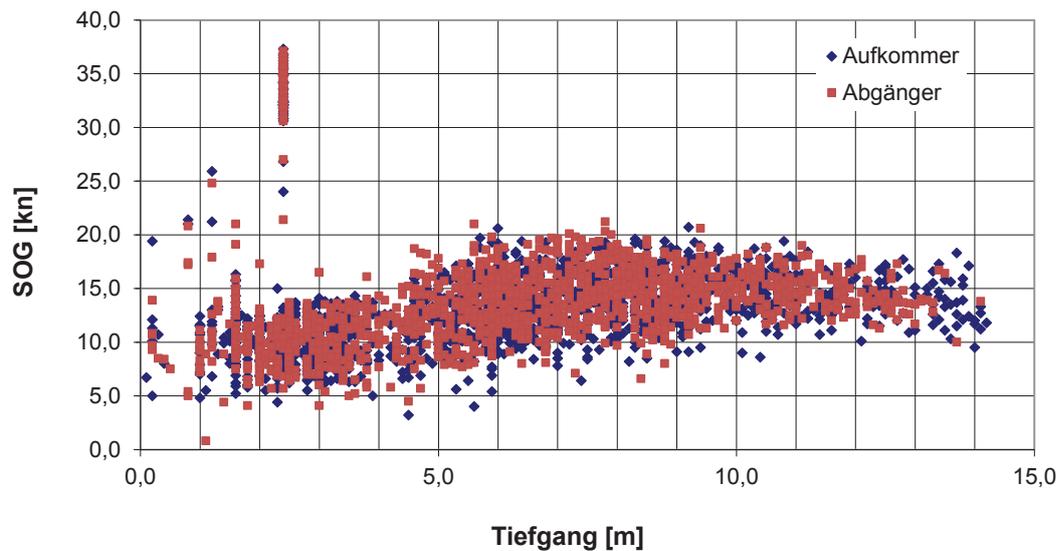


Abbildung 5-4: Zusammenhang zwischen der Schiffsgeschwindigkeit SOG und dem Tiefgang aus den Schiffspassagen an der Messlokation A1

Die räumliche Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten im Querprofil bei Hollerwettern (Messlokation A1) wird in der folgenden Abbildung 5-5 dargestellt. Abgesehen von den Passagen des *HALUNDER JET* werden tendenziell die maximalen Schiffsgeschwindigkeiten in der Fahrrinnenmitte gefahren; im äußeren Bereich des Fahrwassers nehmen die Schiffsgeschwindigkeiten sehr stark ab. Weiterhin sind tendenziell leichte Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den Abgängern und den Aufkomern festzustellen.

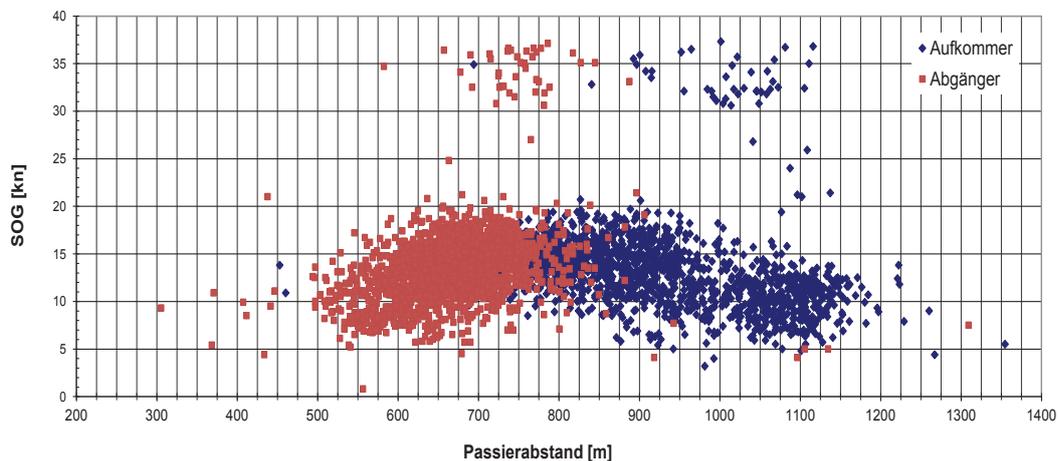


Abbildung 5-5: Verteilung der Schiffsgeschwindigkeiten SOG im Querprofil der Messlokation A1

5.3 Messlokation A1 - Hollerwettern

Im Auswertungszeitraum wurden an der Messlokation A1 insgesamt 3.382 Schiffspassagen registriert und 896 Schiffswellenereignisse detektiert und ausgewertet (vgl. Tabelle 5-1). Im Folgenden wird auf die analysierten Schiffswellenereignisse im Messzeitraum eingegangen.

5.3.1 Darstellung der maximalen Schiffswellenereignisse

Das gesamte Datenkollektiv sämtlicher analysierten Schiffswellenereignisse ist in der EXCEL-Datei in Anlage 13 Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse zu finden. Die zugehörigen Abbildungen eines jeden Schiffswellenereignisses finden sich in dem Verzeichnis Anlage 13 Daten und Auswertungen\05 Auswertung-Zeitreihen.

Absunk und Primärwellenhöhe

Die folgende Abbildung 5-6 stellt beispielhaft die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für ein extremes Schiffswellenereignis (maximaler Absunk $z_A = 0,73$ m und maximale Primärwellenhöhe $H_p = 1,07$ m) bei Flutstrom und einem Wasserstand von NN +0,97 m dar. Dieses Ereignis konnte dem Schiff *YM-WITNESS* zugeordnet werden, welches als Abgänger gegen den Flutstrom mit 18,1 kn fährt. Weitere Details sind Anlage 9 zu entnehmen.

YM-WITNESS (L: 368 m, B: 51 m)

- Abgänger
- T = 12,2 m
- FdW = 18,1 kn
- Abst.: 680 m
- Wst.: NN + 0,97 m
- Flutstrom

- $z_A = 0,73$ m
- $H_p = 1,07$ m
- Hsek = 0,28 m
- $v_R = 1,72$ m/s
- $v_{HP} = 0,94$ m/s
- $v_{Sek} = 0,80$ m/s

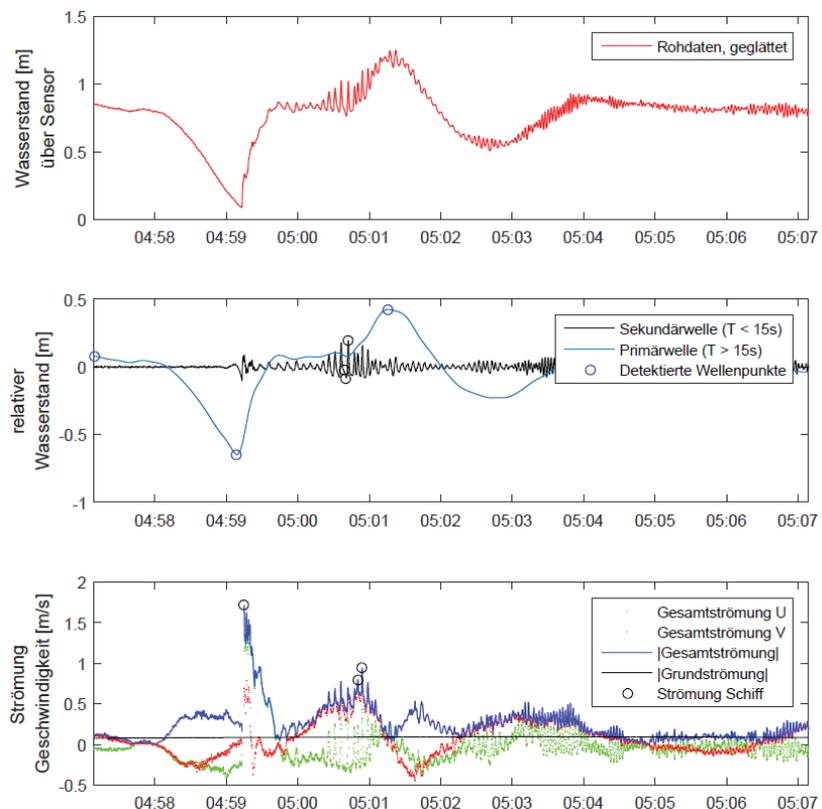


Abbildung 5-6: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation A1 mit maximalem Absunk und maximaler Primärwellenhöhe (vgl. Anlage 9)

Sekundärwellenhöhe

Die folgende Abbildung 5-7 stellt beispielhaft die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für ein extremes Schiffswellenereignis mit maximaler Sekundärwellenhöhe $H_{\text{sek}} = 0,51 \text{ m}$ bei Ebbstrom und einem Wasserstand von NN +1,33 m dar (vgl. Anlage 9). Dieses Ereignis konnte dem Schiff *PANTONIO* zugeordnet werden, welches als Aufkommer gegen den Ebbstrom fährt.

PANTONIO (L: 129 m, B: 21 m)

- Aufkommer
- $T = 6,1 \text{ m}$
- $FdW = 16,9 \text{ kn}$
- Abst.: 958 m
- Wst.: NN + 1,33 m
- Ebbstrom

- $z_A = 0,08 \text{ m}$
- $H_p = 0,08 \text{ m}$
- $H_{\text{sek}} = 0,51 \text{ m}$
- $v_R = 0,13 \text{ m/s}$
- $v_{HP} = 0,22 \text{ m/s}$
- $v_{\text{Sek}} = 0,71 \text{ m/s}$

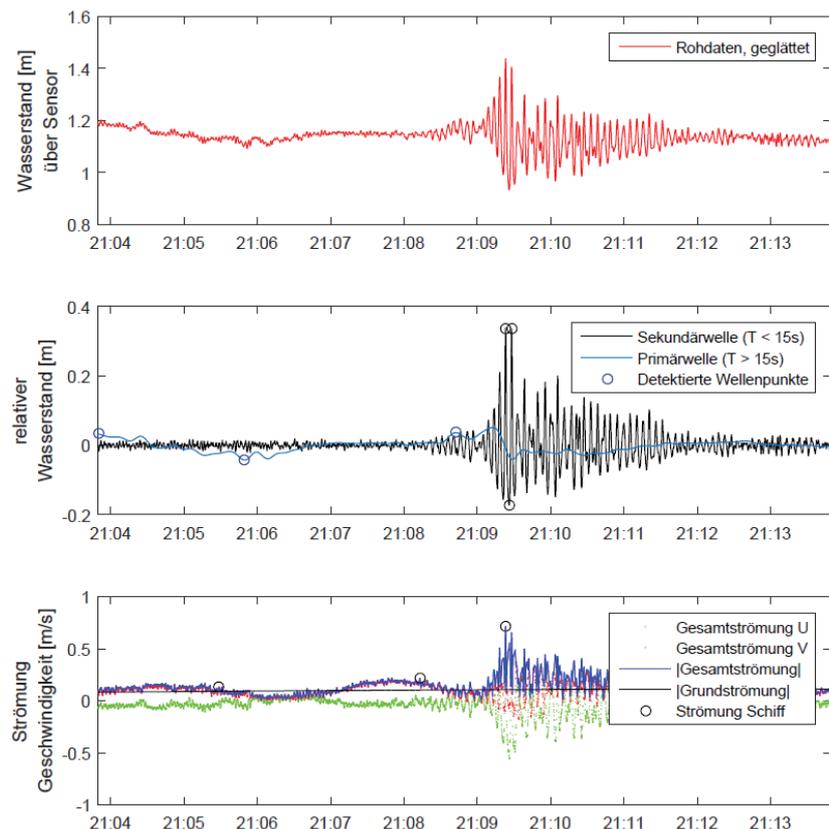


Abbildung 5-7: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation A mit maximaler Sekundärwellenhöhe H_{sek} (vgl. Anlage 9)

Schiffswellenereignisse bei begrenzter Wassertiefe

Aus der tabellarischen Zusammenstellung der maximalen Schiffswellenereignisse in Anlage 9 geht hervor, dass unter den 50 höchsten Schiffswellenereignissen für den maximalen Absenk und die maximale Primärwellenhöhe lediglich jeweils acht Ereignisse sind, die bei einer reduzierten Wassertiefe an der Messlokation A1 auftraten.

Unter den Schiffswellenereignissen der 50 höchsten Sekundärwellenhöhen findet sich kein Ereignis bei einer reduzierten Wassertiefe.

5.3.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse

5.3.2.1 Gesamtstatistik

Statistische Kenngrößen

Das Kollektiv der analysierten Schiffswellenereignisse an der Messlokation A1 wurde tageweise über den gesamten Zeitraum der Messkampagne analysiert. Tagesmittelwerte und Tagesmaximalwerte werden in Anlage 9 dokumentiert. Die folgende Tabelle 5-3 fasst die ermittelbaren statistischen Kenngrößen (Minimum, Mittelwert, Maximum) über die tageweise analysierten mittleren und maximalen Schiffswellenereignisse zusammen.

Tabelle 5-3: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation A1

Messlokation A1 Hollerwettern Zeitraum		Gesamtanzahl registrierter Schiffspassagen	Anzahl analysierte Schiffswellenereignisse	Analyse der Schiffswellen								Analyse schiffserzeugter Strömungen				Seegang	
				Mittlere Parameter								Mittlere Parameter				Mittlere Parameter	
				z_A	H_p	H_{sek}	T Hp	T Su	T St	T Hsek	v_0	vRS	vHp	$vHsek$	H_s	T_{m02}	
KW	Datum	[1]	[1]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]	[s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m]	[s]	
	Minimum	54	11	0,07	0,09	0,15	84,0	75,9	72,9	2,5	0,07	0,25	0,25	0,39	0,01	1,93	
	Mittelwert	78	21	0,13	0,17	0,21	97,6	85,3	93,2	3,0	0,09	0,36	0,34	0,49	0,04	2,80	
	Maximum	98	34	0,19	0,25	0,27	112,0	93,5	109,3	3,5	0,14	0,54	0,49	0,60	0,07	4,02	
	Minimum	54	11	0,16	0,23	0,27	128,2	117,1	124,6	3,6	0,11	0,40	0,52	0,61	0,04	2,78	
	Mittelwert	78	21	0,41	0,59	0,40	155,4	119,9	157,1	5,0	0,16	1,10	0,81	0,85	0,07	4,00	
	Maximum	98	34	0,73	1,07	0,51	200,8	120,0	180,0	6,4	0,26	2,51	1,13	1,48	0,13	5,31	
Summe der Schiffspassagen		3.282	896														

Häufigkeitsverteilungen

Die nachfolgende Abbildung 5-8 stellt die Unterschreitungshäufigkeiten und relativen Häufigkeiten für die Schiffswellenparameter an der Messlokation A1 dar. Folgende Aussagen sind ableitbar:

- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit des Absunks verläuft sehr steil. 90 % der Ereignisse zeigen einen Absunk z_A kleiner 0,25 m.
- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit der Primärwellenhöhe verläuft analog zum Absunk ebenfalls sehr steil, flacht jedoch dann eher ab. Rund 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Primärwellenhöhe H_p kleiner 0,40 m.
- Für die Sekundärwellenhöhe kann eine vergleichsweise breite Verteilung festgestellt werden. Mehr als 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Sekundärwellenhöhe H_{sek} kleiner 0,35 m.

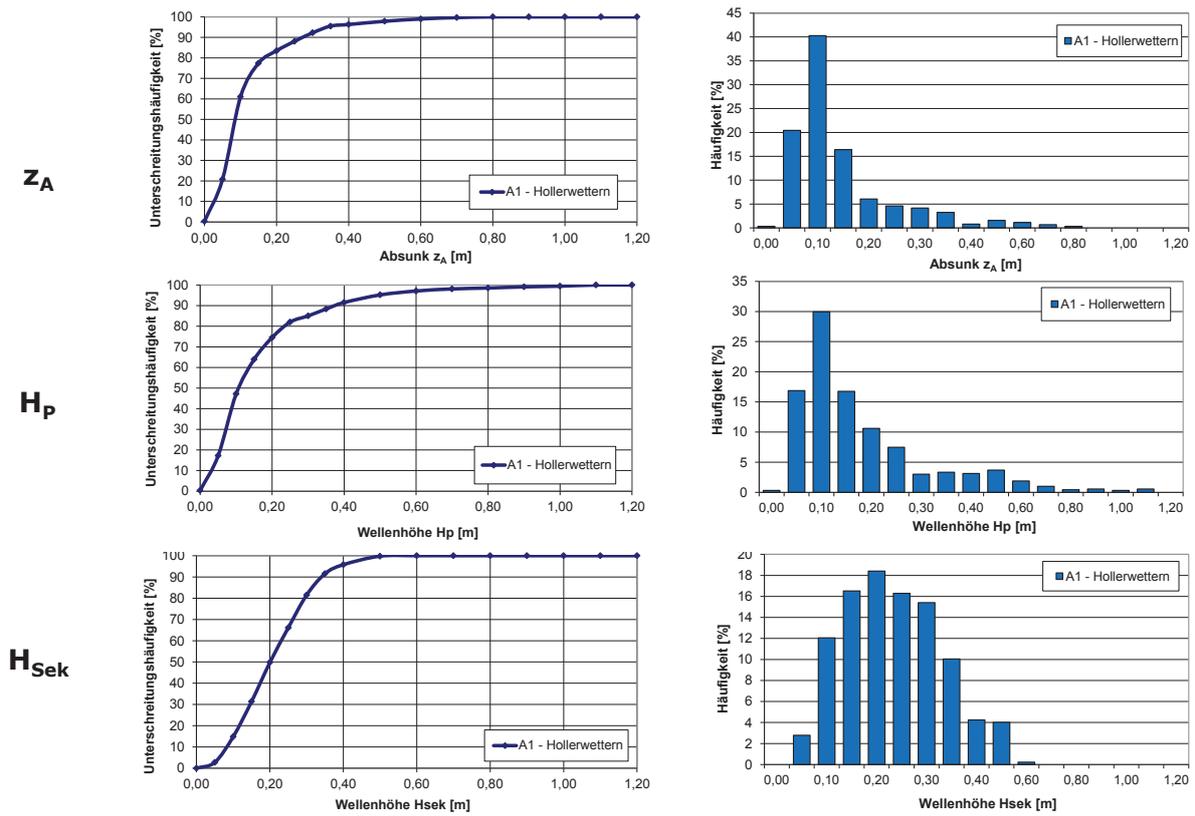


Abbildung 5-8: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk z_A (oben), Primärwellenhöhe H_p (Mitte) und Sekundärwellenhöhe H_{Sek} (unten) an der Messlokation A1

Weitere Häufigkeitsverteilungen für die ausgewerteten Parameter sind in der EXCEL-Datei in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/04 Auswertung / Schiffswellenereignisse* abgelegt.

g:\dat\prj\0219_schiffswellen makrophyten\08 plan-erg\82_endbericht\0219-05 abschlussbericht rev-01\0219-05 abschlussbericht_rev-01.docx, F.8-10a

5.3.2.2 Einzelauswertung

Die nachfolgenden Ergebnisse der Einzelauswertung beziehen sich auf die 50 höchsten Schiffswellenereignisse bezogen auf die Parameter Absunk z_A , Primärwellenhöhe H_p und die Sekundärwellenhöhe H_{sek} .

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Einzelauswertung für die 50 höchsten Schiffswellenereignisse an der Messlokation A1 liefert die folgende Tabelle 5-4. Die dort in Rot hinterlegten Zellen deuten darauf hin, dass diese dem jeweiligen maximalen Schiffswellenereignis zugeordnet sind, d.h. zu demselben Schiffswellenereignis gehören.

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation A1 (Statistik der jeweils 50 höchsten Schiffswellenereignisse)

Kriterium		Parameter Analyse Schiffswelle							Parameter schiffserz. Strömung			
		z_A [m]	H_p [m]	H_{sek} [m]	T H_p [s]	T S_u [s]	T S_t [s]	T H_{sek} [s]	v_0 [m/s]	v_{RS} [m/s]	v_{H_p} [m/s]	$v_{H_{sek}}$ [m/s]
max z_A A1	min	0,33	0,23	0,11	74,8	56,9	42,3	1,2	0,02	0,35	0,30	0,41
	mittel	0,48	0,66	0,29	99,8	99,5	101,5	3,6	0,09	1,02	0,68	0,73
	max	0,73	1,07	0,49	138,5	120,0	126,9	6,4	0,09	1,72	1,13	1,48
max H_p A1	min	0,24	0,49	0,17	74,8	56,9	50,3	1,6	0,02	0,34	0,38	0,35
	mittel	0,46	0,69	0,30	102,7	102,1	105,8	3,7	0,08	1,06	0,69	0,74
	max	0,73	1,07	0,51	84,1	120,0	151,2	6,4	0,09	2,51	0,94	1,48
max H_{sek} A1	min	0,05	0,06	0,38	41,6	42,1	55,9	1,5	0,04	0,13	0,12	0,56
	mittel	0,22	0,32	0,43	107,1	98,1	94,8	4,0	0,10	0,43	0,42	0,73
	max	0,56	0,79	0,51	153,4	120,0	172,7	4,9	0,10	1,32	1,13	0,71

5.3.2.3 Weitergehende Analysen

Für weitergehende Analysen wird auf die Präsentation der Ergebnisse in Anlage 12 sowie die EXCEL-Datei in Anlage 13 Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse verwiesen. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen den maximalen Schiffswellenparametern und den maßgebenden schiffsdynamischen Parametern vertiefend dargestellt.

5.4 Messlokation B1 – Bielenberg

Im Auswertungszeitraum wurden an der Messlokation B1 insgesamt 3.472 Schiffspassagen registriert und 569 Schiffswellenereignisse detektiert und ausgewertet (vgl. Tabelle 5-1). Im Folgenden wird auf die analysierten Schiffswellenereignisse im Messzeitraum eingegangen.

5.4.1 Darstellung der maximalen Schiffswellenereignisse

Das gesamte Datenkollektiv sämtlicher analysierten Schiffswellenereignisse ist in der EXCEL-Datei in Anlage 13 Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse zu finden. Die zugehörigen Abbildungen eines jeden Schiffswellenereignisses finden sich in dem Verzeichnis Anlage 13 Daten und Auswertungen\05 Auswertung-Zeitreihen.

Absunk

Die folgende Abbildung 5-9 stellt beispielhaft die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für ein extremes Schiffswellenereignis (maximaler Absunk $z_A = 0,54$ m bei Flutstrom und einem Wasserstand von NN +0,63 m dar. Dieses Ereignis konnte dem Schiff *MSC SORAYA* zugeordnet werden, welches als Aufkommer mit dem Flutstrom mit 15,4 kn (Fahrt durchs Wasser) fährt. Weitere Details sind Anlage 10 zu entnehmen.

MSC SORAYA (L: 277 m, B: 40 m)

- Aufkommer
- $T = 9,2$ m
- $FdW = 15,4$ kn
- Abst.: 1.134 m
- Wst.: NN + 0,63 m
- Flutstrom

- $z_A = 0,54$ m
- $H_p = 0,36$ m
- $H_{sek} = 0,32$ m
- $v_R = 0,71$ m/s
- $v_{HP} = 0,56$ m/s
- $v_{Sek} = 0,91$ m/s

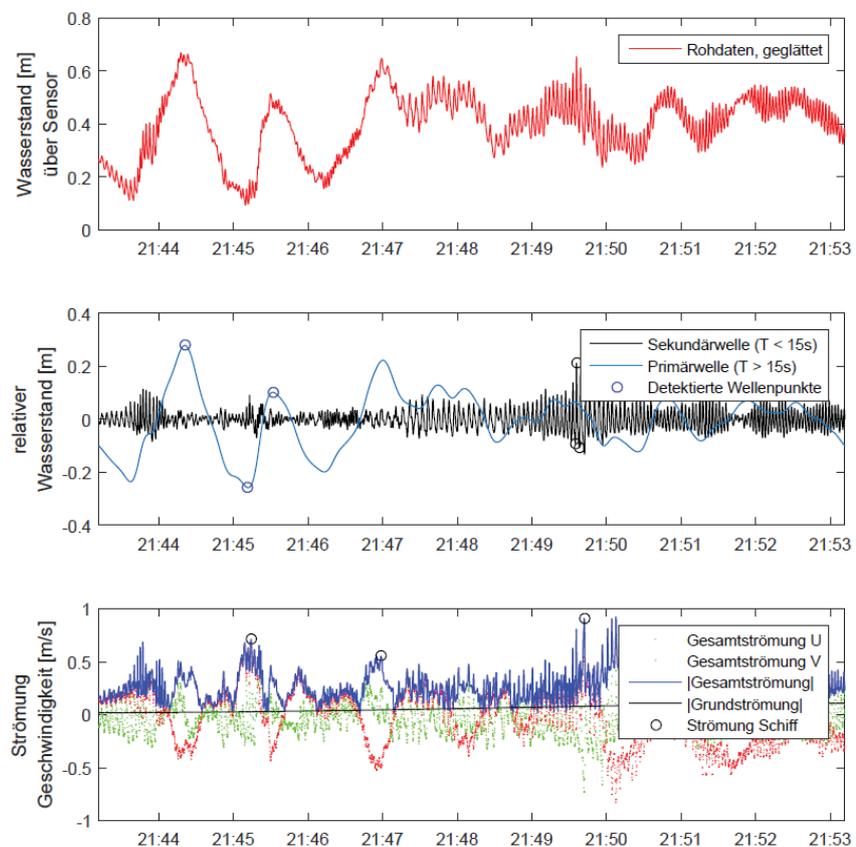


Abbildung 5-9: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation B1 mit maximalem Absunk (vgl. Anlage 10)

Primärwellenhöhe

Die folgende Abbildung 5-10 stellt die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für das extreme Schiffswellenereignis (maximale Primärwellenhöhe $H_p = 0,53$ m) bei Flutstrom und einem Wasserstand von NN +0,67 m dar. Dieses Ereignis konnte dem Schiff *YM-WITNESS* zugeordnet werden, welches als Abgänger gegen den Flutstrom mit 15,8 kn fährt. Weitere Details sind Anlage 10 zu entnehmen.

Auf der weiteren Fahrt Richtung stromab erzeugt diese Schiff ebenfalls an der Messlokation A1 in Hollerwettern maximale Schiffswellenereignisse für den Absunk und die Primärwellenhöhe, dort mit einer Fahrt durchs Wasser von 18,1 kn (vgl. Abschnitt 5.3.1).

YM-WITNESS (L: 368 m, B: 51 m)

- Abgänger
- T = 12,2 m
- FdW = 15,8 kn
- Abst.: 1.042 m
- Wst.: NN + 0,67 m
- Flutstrom

- zA = 0,34 m
- **$H_p = 0,53$ m**
- Hsek = 0,22 m
- vR = 0,30 m/s
- vHP = 0,44 m/s
- vSek = 0,60 m/s

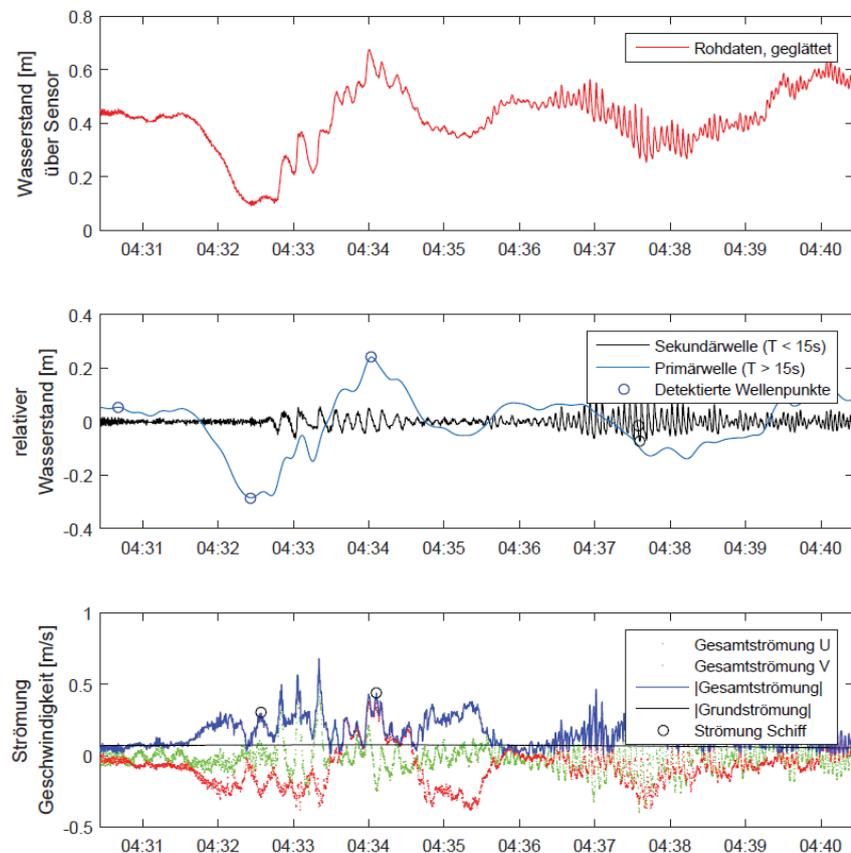


Abbildung 5-10: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation B1 mit maximaler Primärwellenhöhe (vgl. Anlage 10)

Sekundärwellenhöhe

Die folgende Abbildung 5-11 stellt die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für das extreme Schiffswellenereignis mit maximaler Sekundärwellenhöhe $H_{\text{sek}} = 0,55 \text{ m}$ bei Ebbstrom und einem Wasserstand von NN +1,36 m dar (vgl. Anlage 10). Dieses Ereignis konnte dem Schiff *ANL WARRINGA* zugeordnet werden, welches als Aufkommer gegen den Ebbstrom fährt.

ANL-WARRINGA (L: 260 m, B: 32 m)

- Aufkommer
- $T = 11,1 \text{ m}$
- $F_dW = 15,8 \text{ kn}$
- Abst.: 902 m
- Wst.: NN + 1,36 m
- Ebbstrom

- $zA = 0,17 \text{ m}$
- $H_p = 0,16 \text{ m}$
- **$H_{\text{sek}} = 0,55 \text{ m}$**
- $v_R = 0,28 \text{ m/s}$
- $v_{HP} = 0,16 \text{ m/s}$
- $v_{\text{Sek}} = 0,95 \text{ m/s}$

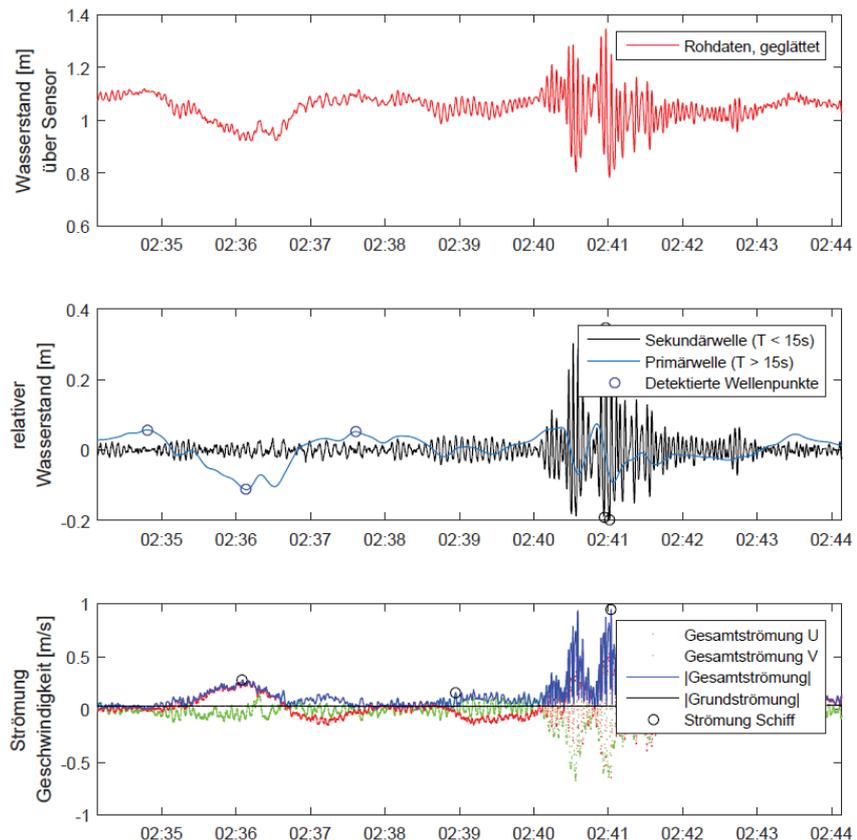


Abbildung 5-11: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation B1 mit maximaler Sekundärwellenhöhe H_{sek} (vgl. Anlage 10)

Schiffswellenereignisse bei begrenzter Wassertiefe

Aus der tabellarischen Zusammenstellung der maximalen Schiffswellenereignisse in Anlage 10 geht hervor, dass unter den 50 höchsten Schiffswellenereignissen für den maximalen Absenk und die maximale Primärwellenhöhe lediglich fünf bzw. sieben Ereignisse sind, die bei einer reduzierten Wassertiefe an der Messlokation B1 auftraten.

Unter den Schiffswellenereignissen der 50 höchsten Sekundärwellenhöhen finden sich keine Ereignisse bei einer reduzierten Wassertiefe.

5.4.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse

5.4.2.1 Gesamtstatistik

Statistische Kenngrößen

Das Kollektiv der analysierten Schiffswellenereignisse an der Messlokation B1 wurde tageweise über den gesamten Zeitraum der Messkampagne analysiert. Tagesmittelwerte und Tagesmaximalwerte werden in Anlage 10 dokumentiert. Die folgende Tabelle 5-5 fasst die ermittelbaren statistischen Kenngrößen (Minimum, Mittelwert, Maximum) über die tageweise analysierten mittleren und maximalen Schiffswellenereignisse zusammen.

Tabelle 5-5: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation B1

Messlokation B1 Bielenberg		Gesamtanzahl registrierter Schiffspassagen	Anzahl analysierte Schiffswellenereignisse	Analyse der Schiffswellen								Analyse schiffserzeugter Strömungen				Seegang	
				Mittlere Parameter								Mittlere Parameter				Mittlere Parameter	
				z_A	H_P	H_{sek}	T Hp	T Su	T St	T Hsek	v_0	vRS	vHp	$vHsek$	H_s	T_{m02}	
KW	Datum	[1]	[1]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]	[s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m]	[s]	
	Minimum	59	6	0,04	0,07	0,13	53,9	52,3	49,1	2,5	0,02	0,16	0,18	0,35	0,02	1,80	
	Mittelwert	83	14	0,09	0,11	0,18	92,2	77,3	79,8	3,1	0,05	0,28	0,28	0,46	0,04	2,49	
	Maximum	101	32	0,14	0,18	0,21	116,4	92,7	108,1	3,9	0,07	0,41	0,41	0,63	0,06	4,16	
	Minimum	59	6	0,08	0,14	0,23	102,5	100,7	97,7	3,9	0,03	0,29	0,29	0,54	0,02	2,25	
	Mittelwert	83	14	0,23	0,30	0,34	154,8	118,1	145,8	5,0	0,12	0,63	0,66	0,87	0,06	3,25	
	Maximum	101	32	0,54	0,53	0,55	204,9	120,0	180,0	7,5	0,22	0,99	1,38	1,29	0,12	5,15	
Summe der Schiffspassagen		3.472	569														

Häufigkeitsverteilungen

Die nachfolgende Abbildung 5-12 stellt die Unterschreitungshäufigkeiten und relativen Häufigkeiten für die Schiffswellenparameter an der Messlokation B1 dar. Folgende Aussagen sind ableitbar:

- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit des Absunks verläuft sehr steil. 90 % der Ereignisse zeigen einen Absunk z_A kleiner 0,18 m (mehr als 0,05 m geringer als bei A1).
- Die Kurve der Unterschreitungshäufigkeit der Primärwellenhöhe verläuft analog zum Absunk ebenfalls sehr steil. 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Primärwellenhöhe H_P kleiner 0,22 m (rund 0,2 m geringer als bei A1).
- Für die Sekundärwellenhöhe kann eine vergleichsweise breite Verteilung festgestellt werden. Mehr als 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Sekundärwellenhöhe H_{sek} kleiner 0,30 m (rund 0,05 m geringer als bei A1).

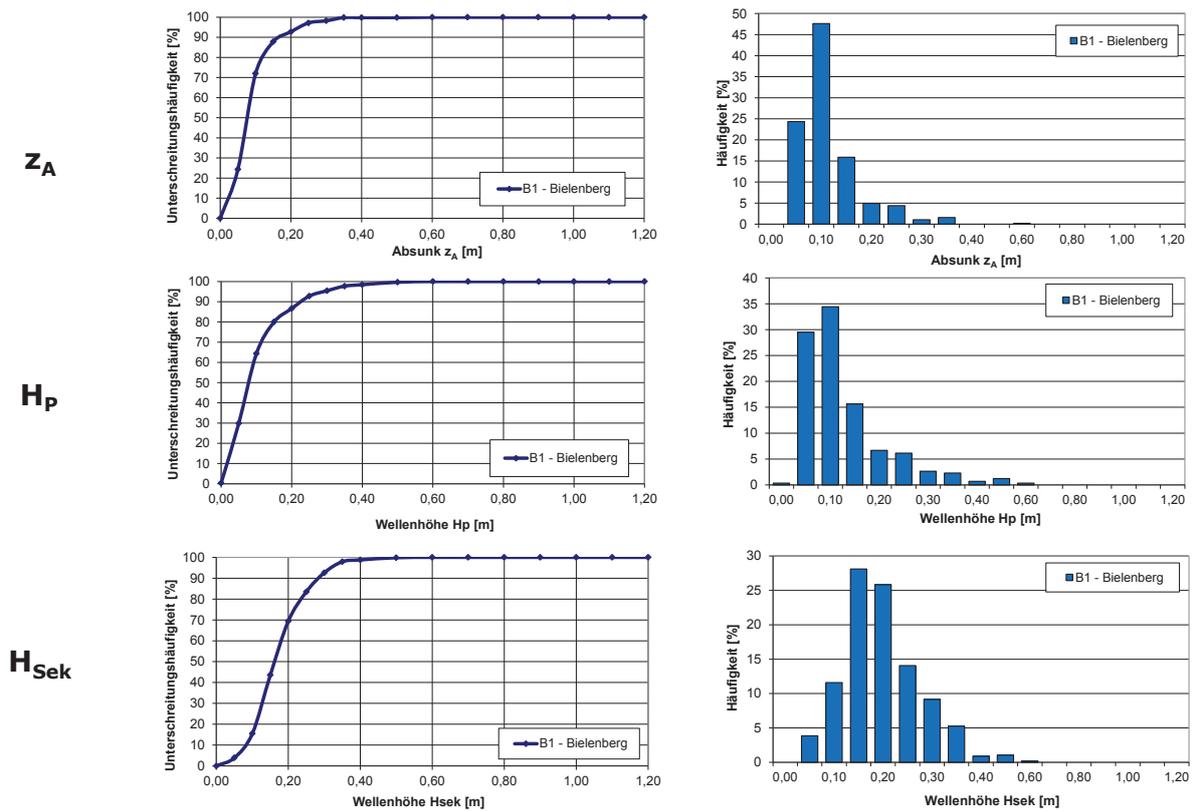


Abbildung 5-12: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk z_A (oben), Primärwellenhöhe H_p (Mitte) und Sekundärwellenhöhe H_{Sek} an der Messlokation B1

Weitere Häufigkeitsverteilungen für die ausgewerteten Parameter sind in der EXCEL-Datei in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/04 Auswertung / Schiffswellenereignisse* abgelegt.

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 die Sekundärwellenhöhe H_{sek} .

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Einzelauswertung für die 50 höchsten Schiffswellenereignisse an der Messlokation B1 liefert die folgende Tabelle 5-6. Die dort in Rot hinterlegten Zellen deuten darauf hin, dass diese dem jeweiligen maximalen Schiffswellenereignis zugeordnet sind, d.h. zu demselben Ereignis gehören.

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation B1 (Statistik der jeweils 50 höchsten Schiffswellenereignisse)

Kriterium		Parameter Analyse Schiffswelle							Parameter schiffserz. Strömung			
		z_A	H_p	H_{sek}	T Hp	T Su	T St	T Hsek	v_0	v_{RS}	v_{Hp}	v_{Hsek}
		[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]	[s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
max z_A B1	min	0,19	0,08	0,08	43	28,0	15,1	1,0	0,01	0,11	0,09	0,17
	mittel	0,25	0,29	0,22	109	85,3	88,6	3,3	0,06	0,43	0,33	0,57
	max	0,54	0,53	0,42	187	50,9	19,9	5,3	0,05	0,71	0,77	0,91
max H_p B1	min	0,05	0,24	0,05	1,5	10,0	6,9	1,0	0,01	0,11	0,10	0,17
	mittel	0,21	0,32	0,22	84,8	76,6	75,5	3,5	0,06	0,40	0,41	0,61
	max	0,54	0,53	0,42	100,8	120,0	178,1	6,5	0,07	0,99	0,44	1,09
max H_{sek} B1	min	0,02	0,02	0,29	4,6	10,2	7,1	1,4	0,01	0,08	0,07	0,41
	mittel	0,12	0,15	0,34	94,4	75,9	75,1	3,9	0,06	0,29	0,31	0,71
	max	0,54	0,42	0,55	196,0	120,0	175,1	4,4	0,03	0,88	1,29	0,95

5.4.2.3 Weitergehende Analysen

Für weitergehende Analysen wird auf die Präsentation der Ergebnisse in Anlage 12 sowie die EXCEL-Datei in Anlage 13 Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse verwiesen. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen den maximalen Schiffswellenparametern und den maßgebenden schiffsdynamischen Parametern vertiefend dargestellt.

5.5 Messlokation C1 – Schwarztonnensand

Im Auswertungszeitraum wurden an der Messlokation C1 insgesamt 3.381 Schiffspassagen registriert und 937 Schiffswellenereignisse detektiert und ausgewertet (vgl. Tabelle 5-1). Im Folgenden wird auf die analysierten Schiffswellenereignisse im Messzeitraum eingegangen.

5.5.1 Darstellung der maximalen Schiffswellenereignisse

Das gesamte Datenkollektiv sämtlicher analysierten Schiffswellenereignisse ist in der EXCEL-Datei in Anlage 13 Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse zu finden. Die zugehörigen Abbildungen eines jeden Schiffswellenereignisses finden sich in dem Verzeichnis Anlage 13 Daten und Auswertungen\05 Auswertung-Zeitreihen.

Absunk

Die folgende Abbildung 5-13 stellt beispielhaft die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für ein extremes Schiffswellenereignis (maximaler Absunk $z_A = 0,52$ m bei Ebbstrom und einem Wasserstand von NN +0,93 m dar. Dieses Ereignis konnte dem Schiff *OOCL CHONGQING* zugeordnet werden, welches als Aufkommer gegen den Ebbstrom mit 14,1 kn (Fahrt durchs Wasser) und einem Passierabstand von 578 m direkt an Schwarztonnensand entlang fährt. Weitere Details sind Anlage 11 zu entnehmen.

OOCL CHONGQING (L: 366 m, B: 48 m)

- Aufkommer
- $T = 12,4$ m
- $FdW = 14,1$ kn
- Abst.: 578 m
- Wst.: NN + 0,93 m
- Ebbstrom

- $z_A = 0,52$ m
- $H_p = 0,64$ m
- $H_{sek} = 0,23$ m
- $v_R = 0,64$ m/s
- $v_{HP} = 0,38$ m/s
- $v_{Sek} = 0,50$ m/s

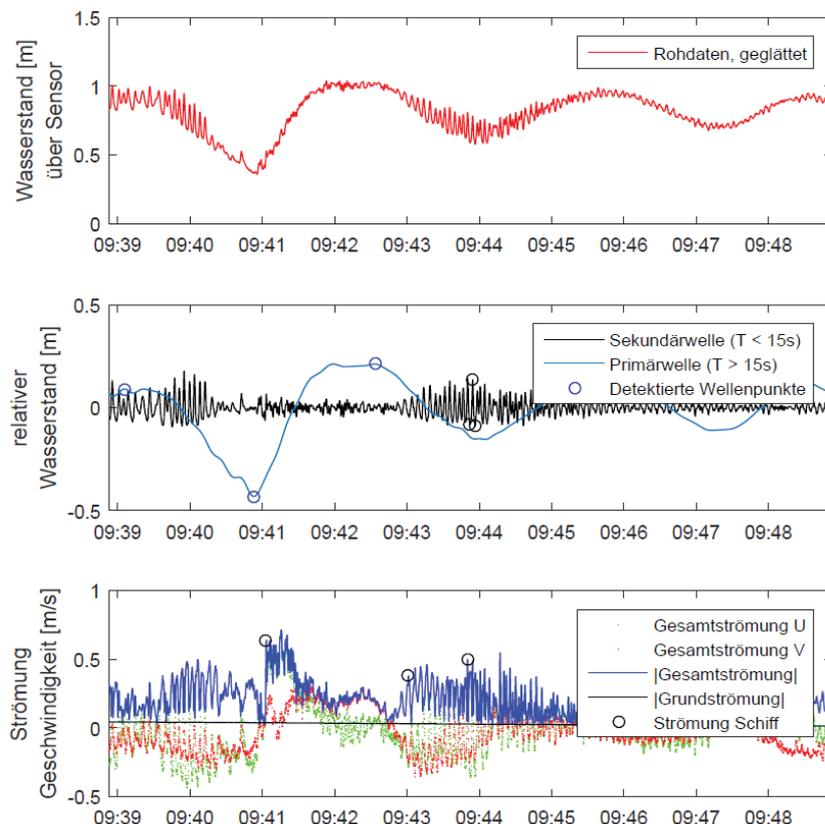


Abbildung 5-13: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation C1 mit maximalem Absunk (vgl. Anlage 11)

Primärwellenhöhe

Die folgende Abbildung 5-14 stellt die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für das extreme Schiffswellenereignis (maximale Primärwellenhöhe $H_p = 0,82$ m) bei Flutstrom und einem Wasserstand von NN +0,47 m dar. Dieses Ereignis konnte dem Schiff *OOCL SINGAPORE* zugeordnet werden, welches als Abgänger gegen den Flutstrom mit 14,4 kn fährt. Zudem zeigt Abbildung 5-14, dass dieses Maximalereignis bei begrenzter Wassertiefe eingetreten ist, was an dem konstanten Signalverlauf vor Eintreten der Primärwelle deutlich wird. Weitere Details sind Anlage 11 zu entnehmen.

OOCL SINGAPORE (L: 366 m, B: 48 m)

- Abgänger
- T = 12,3 m
- FdW = 14,4 kn
- Abst.: 665 m
- Wst.: NN + 0,47 m
- Flutstrom

- zA = 0,47 m
- **Hp = 0,82 m**
- Hsek = 0,18 m
- vR = 0,89 m/s
- vHP = 1,00 m/s
- vSek = 0,63 m/s

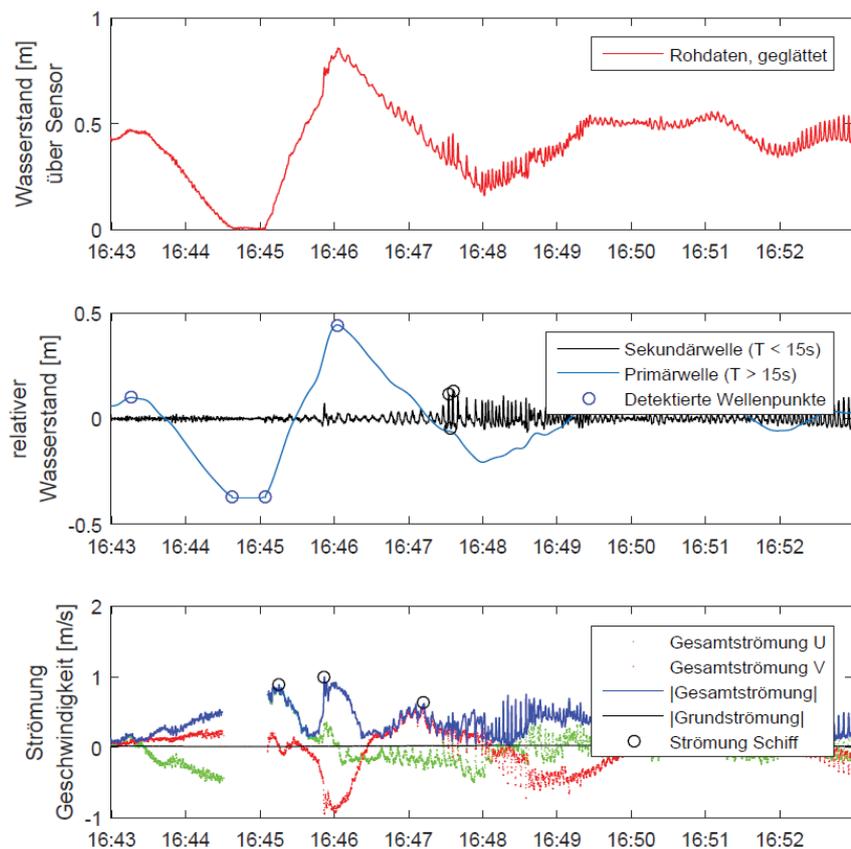


Abbildung 5-14: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation C1 mit maximaler Primärwellenhöhe (vgl. Anlage 11)

Sekundärwellenhöhe

Die folgende Abbildung 5-15 stellt die Zeitreihen der Schiffswellenanalyse für das extreme Schiffswellenereignis mit maximaler Sekundärwellenhöhe $H_{\text{sek}} = 0,57 \text{ m}$ bei Flutstrom und einem Wasserstand von NN +1,65 m dar (vgl. Anlage 11). Dieses Ereignis konnte dem Schiff *BALTIC KLIPPER* zugeordnet werden, welches als Aufkommer mit dem Flutstrom fährt.

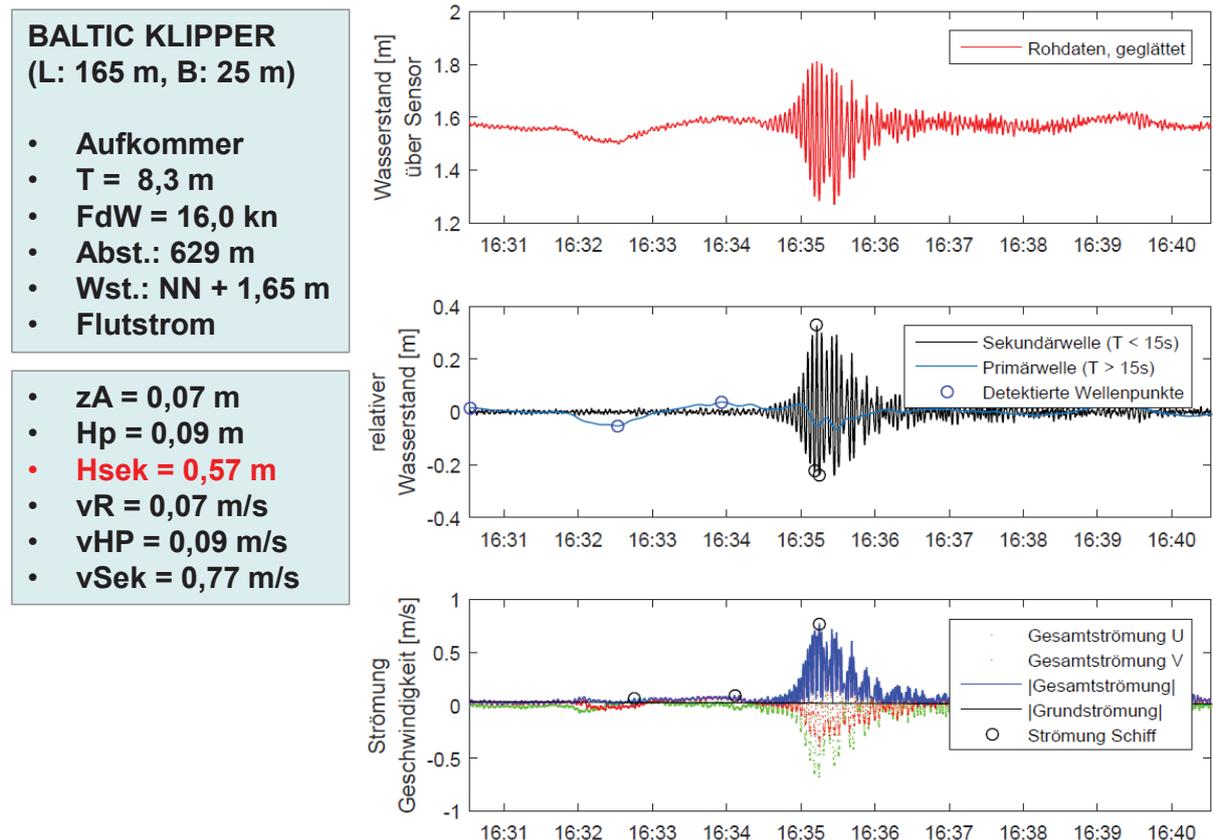


Abbildung 5-15: Extremes Schiffswellenereignis an der Messlokation C1 mit maximaler Sekundärwellenhöhe H_{sek} (vgl. Anlage 11)

Schiffswellenereignisse bei begrenzter Wassertiefe

Aus der tabellarischen Zusammenstellung der maximalen Schiffswellenereignisse in Anlage 11 geht hervor, dass unter den 50 höchsten Schiffswellenereignissen für den maximalen Absenk und die maximale Primärwellenhöhe sechs bzw. sieben Ereignisse sind, die bei einer reduzierten Wassertiefe an der Messlokation C1 auftraten.

Unter den Schiffswellenereignissen der 50 höchsten Sekundärwellenhöhen finden sich keine Ereignisse bei einer reduzierten Wassertiefe.

5.5.2 Statistische Analyse der Schiffswellenereignisse

5.5.2.1 Gesamtstatistik

Statistische Kenngrößen

Das Kollektiv der analysierten Schiffswellenereignisse an der Messlokation C1 wurde tageweise über den gesamten Zeitraum der Messkampagne analysiert. Tagesmittelwerte und Tagesmaximalwerte werden in Anlage 11 dokumentiert. Die folgende Tabelle 5-7 fasst die ermittelbaren statistischen Kenngrößen (Minimum, Mittelwert, Maximum) über die tageweise analysierten mittleren und maximalen Schiffswellenereignisse zusammen.

Tabelle 5-7: Zusammenstellung der statistischen Kennwerte Minimum, Mittelwert und Maximum für die analysierten mittleren (oben) und maximalen (unten) Schiffswellenparameter an der Messlokation C1

Messlokation C1 Schwarztonne nsand		Gesamtanzahl registrierter Schiffspassagen	Anzahl analysierte Schiffswellenereignisse	Analyse der Schiffswellen								Analyse schiffserzeugter Strömungen				Seegang	
				Mittlere Parameter								Mittlere Parameter				Mittlere Parameter	
				z_A	H_P	H_{sek}	T Hp	T Su	T St	T Hsek	v_0	vRS	vHp	$vHsek$	H_s	T_{m02}	
KW	Datum	[1]	[1]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]	[s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m]	[s]	
	Minimum	60	11	0,07	0,08	0,13	85,6	69,1	75,2	2,2	0,02	0,16	0,15	0,33	0,01	1,83	
	Mittelwert	81	22	0,11	0,15	0,18	95,3	82,5	84,3	2,7	0,04	0,25	0,24	0,41	0,03	2,44	
	Maximum	99	34	0,15	0,22	0,26	112,1	91,9	96,5	3,3	0,07	0,37	0,37	0,49	0,07	3,73	
	Minimum	60	11	0,15	0,23	0,27	108,9	112,4	109,6	3,2	0,05	0,29	0,31	0,53	0,01	2,14	
	Mittelwert	81	22	0,32	0,49	0,40	151,2	119,7	132,0	4,7	0,08	0,65	0,59	0,74	0,06	3,16	
	Maximum	99	34	0,52	0,82	0,57	184,6	120,0	177,9	7,6	0,13	1,24	1,00	1,21	0,10	4,88	
Summe der Schiffspassagen		3.381	937														

Häufigkeitsverteilungen

Die nachfolgende Abbildung 5-16 stellt die Unterschreitungshäufigkeiten und relativen Häufigkeiten für die Schiffswellenparameter an der Messlokation B1 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, flacht aber im oberen Bereich ähnlich wie bei A1 stärker ab. 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Primärwellenhöhe H_P kleiner 0,30 m (0,1 m geringer als bei A1).
- Für die Sekundärwellenhöhe kann eine vergleichsweise breite Verteilung festgestellt werden. Mehr als 90 % der Schiffswellenereignisse zeigen eine Sekundärwellenhöhe H_{sek} kleiner 0,30 m (0,05 m geringer als bei A1).

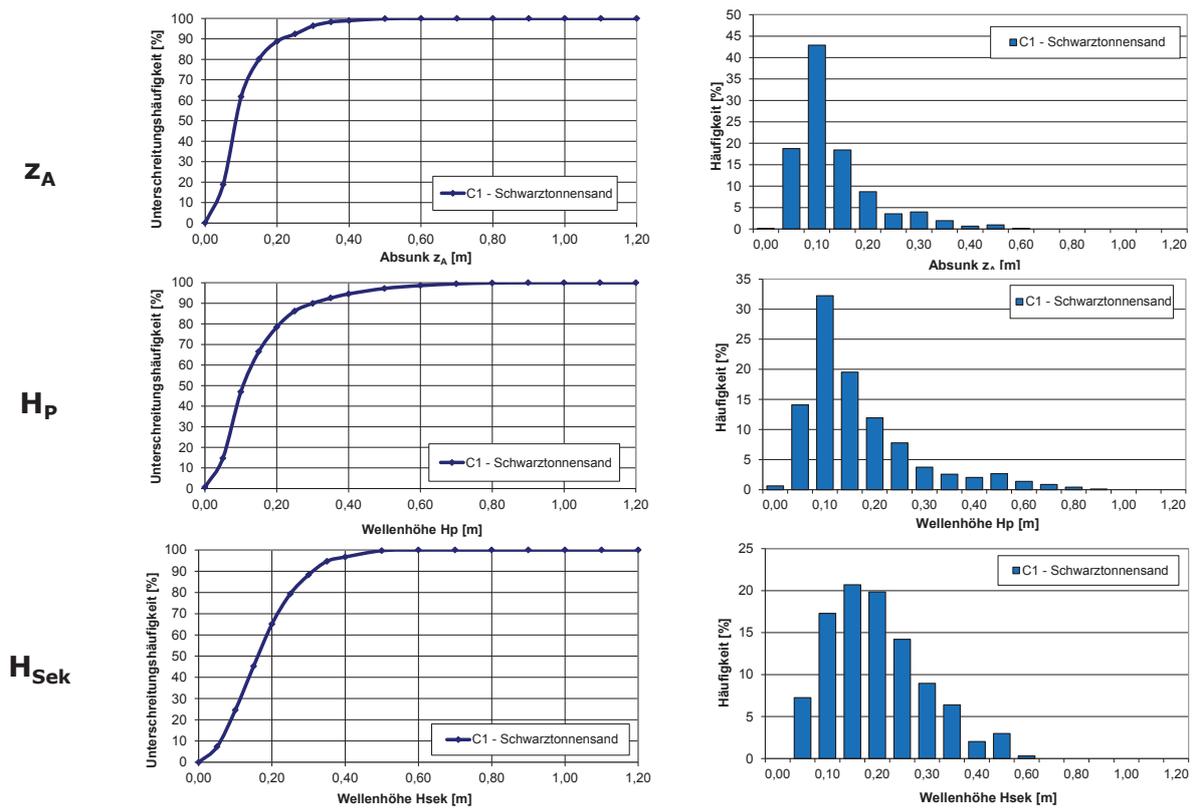


Abbildung 5-16: Unterschreitungshäufigkeiten (links) und Einzelhäufigkeiten (rechts) für die Schiffswellenparameter Absunk z_A (oben), Primärwellenhöhe H_P (Mitte) und Sekundärwellenhöhe H_{Sek} an der Messlokation C1

Weitere Häufigkeitsverteilungen für die ausgewerteten Parameter sind in der EXCEL-Datei in Anlage 13 *Daten und Auswertungen/04 Auswertung / Schiffswellenereignisse* abgelegt.

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 die Sekundärwellenhöhe H_{sek} .

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Einzelauswertung für die 50 höchsten Schiffswellenereignisse an der Messlokation C1 liefert die folgende Tabelle 5-8. Die dort in Rot hinterlegten Zellen deuten darauf hin, dass diese dem jeweiligen maximalen Schiffswellenereignis zugeordnet sind, d.h. zu demselben Ereignis gehören.

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokation C1 (Statistik der jeweils 50 höchsten Schiffswellenereignisse)

Kriterium		Parameter Analyse Schiffswelle							Parameter schiffserz. Strömung			
		z_A	H_p	H_{sek}	T Hp	T Su	T St	T Hsek	v_0	v_{RS}	v_{Hp}	v_{Hsek}
		[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]	[s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
max z_A C1	min	0,28	0,27	0,11	65	51,6	45,3	0,9	0,01	0,26	0,15	0,39
	mittel	0,35	0,51	0,24	103	93,7	86,3	2,9	0,05	0,51	0,49	0,60
	max	0,52	0,82	0,50	139	107,2	100,4	4,5	0,03	0,64	1,00	0,97
max H_p C1	min	0,11	0,40	0,09	64,5	52,2	48,9	0,9	0,01	0,26	0,21	0,36
	mittel	0,33	0,53	0,22	107,2	92,2	84,3	2,8	0,05	0,54	0,52	0,62
	max	0,52	0,82	0,50	104,9	120,0	110,0	4,5	0,02	1,12	1,00	1,21
max H_{sek} C1	min	0,02	0,04	0,36	34,3	38,0	50,6	2,1	0,00	0,06	0,05	0,52
	mittel	0,14	0,19	0,42	99,6	92,0	86,9	3,6	0,04	0,23	0,20	0,68
	max	0,31	0,42	0,57	147,2	120,0	129,8	3,8	0,02	0,82	0,56	0,77

5.5.2.3 Weitergehende Analysen

Für weitergehende Analysen wird auf die Präsentation der Ergebnisse in Anlage 12 sowie die EXCEL-Datei in Anlage 13 Daten und Auswertungen\04 Auswertung\ Schiffswellenereignisse verwiesen. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen den maximalen Schiffswellenparametern und den maßgebenden schiffsdynamischen Parametern vertiefend dargestellt.

5.6 Vergleichende Betrachtung der Messlokationen A1, B1 und C1

Die analysierten Unterschreitungshäufigkeiten für die maßgebenden Schiffswellenparameter Absunk, Primär- und Sekundärwellenhöhe an den Messlokationen A1, B1 und C1 (vgl. Abschnitte 5.3 bis 5.5) werden nachfolgend zusammenfassend betrachtet und verglichen.

Häufigkeitsverteilungen

Ein Vergleich der Unterschreitungshäufigkeiten der Schiffswellenparameter Absunk, Primär- und Sekundärwellenhöhe wird nachfolgend in Abbildung 5-17 gezeigt.

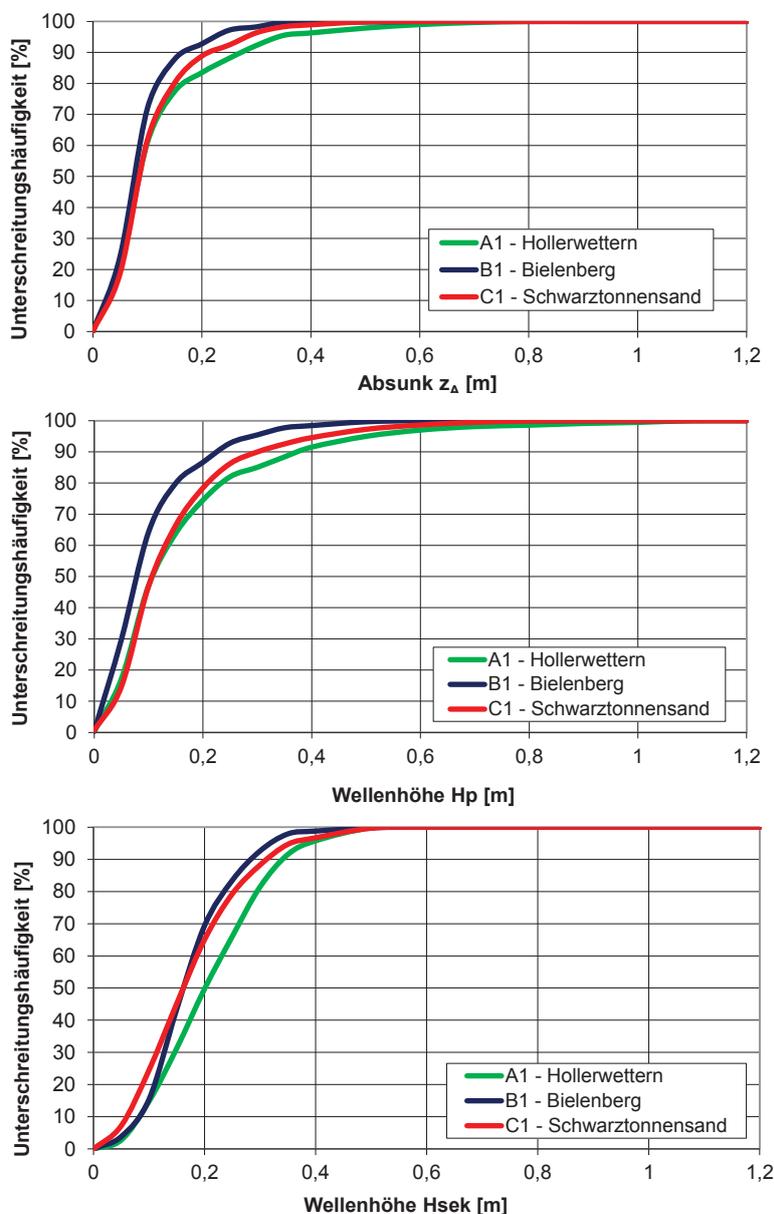


Abbildung 5-17: Vergleich der Unterschreitungshäufigkeiten für die Parameter Absunk (oben), Primärwellenhöhe (Mitte) und Sekundärwellenhöhe (unten) an den Messlokationen A1, B1 und C1

Folgende Ergebnisse können aus den Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 5-17 abgeleitet werden:

– **Absunk**

Die Häufigkeitsverteilungen zeigen für die drei Messlokationen ähnliche Verläufe. Erst oberhalb der Unterschreitungshäufigkeit von 70 % laufen die Kurven etwas auseinander.

Es wird deutlich, dass im Vergleich die größten Belastungen infolge Absunk in A1 vor C1 vorhanden sind. In Hollerwettern sind 90 % der Absunkereignisse kleiner als 0,25 m. Ursächlich dafür sind die vergleichsweise höheren Schiffsgeschwindigkeiten in A1 gegenüber C1 sowie die Steilheit der Unterwasserprofile in A1 und C1 gegenüber B1.

– **Primärwellenhöhe**

Die Häufigkeitsverteilungen für die Primärwellenhöhe zeigen erwartungsgemäß einen ähnlichen Verlauf wie beim Parameter Absunk. Allerdings sind die einzelnen Kurven für die Messlokationen A1, B1 und C1 deutlicher differenzierbar.

Für Bielenberg werden vergleichsweise die geringsten Primärwellenbelastungen erwartet, da die blaue Kurve ganz links liegt. 90 % der Primärwellen in Bielenberg sind kleiner als 0,22 m.

Für Hollerwettern werden hingegen die größten Belastungen infolge Primärwellen ausgewiesen. 90 % der Primärwellen in Hollerwettern sind kleiner als 0,40 m.

Die Messlokation C1 Schwarztonnensand ordnet sich mittig dazu ein.

– **Sekundärwellenhöhe**

Die Häufigkeitsverteilungen für die Sekundärwellenhöhe zeigen vergleichsweise dicht beieinander verlaufende Kurven.

Es wird ferner deutlich, dass für die Lokation Bielenberg mit dem sehr flachen Unterwasserprofil, die Häufigkeitsverteilung einen S-förmigen Verlauf annimmt und die geringsten Belastungen infolge Sekundärwellen ausweist. 90 % der Schiffswellenereignisse in B1 sind kleiner als 0,30 m.

Die Verteilungen für die Messlokationen C1 und A1 liegen überwiegend parallel zueinander mit den größeren Belastungen für die Lokation Hollerwettern. 90 % der Schiffswellenereignisse in Hollerwettern zeigen Sekundärwellenhöhen kleiner als 0,35 m, d.h. rund 0,05m mehr als für Bielenberg.

Vergleich der Einzelauswertungen

In der folgenden Tabelle 5-9 werden die Ergebnisse der Einzelauswertung der schiffserzeugten Wellenparameter Absunk, Primär- und Sekundärwellenhöhe basierend auf den 50 höchsten Ereignissen für die drei Messlokationen zusammengetragen. Für die einzelnen Parameter lässt sich jeweils die Spanne innerhalb der 50 höchsten Schiffswellenereignisse ablesen.

– Absunk

Die Aufstellung zeigt für A1 eine Bandbreite von 0,33 m bis 0,73 m mit einem Mittelwert der 50 höchsten Absunkereignisse bei 0,48 m. Im Mittel sind die 50 höchsten Absunkereignisse in Hollerwettern 0,23 m (92%) größer als bei B1 und 0,13 m (37%) größer als an C1.

– Primärwellenhöhe

Die 50 höchsten Primärwellenhöhenereignisse bei A1 zeigen eine Spannweite von 0,49 m bis 1,07 m mit einem Mittelwert von 0,69 m. Im Vergleich zu Hollerwettern liegt in Bielenberg der Mittelwert 0,37 m (54%) niedriger und in Schwarztonnensand 0,16 m (23%) niedriger.

– Sekundärwellenhöhe

Für die 50 höchsten Sekundärwellenereignisse kann festgestellt werden, dass die Messlokationen A1 und C1 eine ähnliche Spannweite aufzeigen jeweils mit einem Mittelwert von 0,43 m bzw. 0,42 m. Im Vergleich dazu sind in Bielenberg umgerechnet 20% kleinere Sekundärwellenhöhen vorhanden.

Tabelle 5-9: Vergleich der Ergebnisse der Einzelauswertung für schiffserzeugte Wellen und Strömungen für die Messlokationen A1, B1 und C1 (Statistik der 50 höchsten Schiffswellenereignisse)

Kriterium		Parameter Analyse Schiffswelle							Parameter schiffserz. Strömung			
		z _A [m]	H _P [m]	H _{sek} [m]	T _{Hp} [s]	T _{Su} [s]	T _{St} [s]	T _{Hsek} [s]	v ₀ [m/s]	v _{RS} [m/s]	v _{Hp} [m/s]	v _{Hsek} [m/s]
max z _A A1	min	0,33	0,23	0,11	74,8	56,9	42,3	1,2	0,02	0,35	0,30	0,41
	mittel	0,48	0,66	0,29	99,8	99,5	101,5	3,6	0,09	1,02	0,68	0,73
	max	0,73	1,07	0,49	138,5	120,0	126,9	6,4	0,09	1,72	1,13	1,48
max z _A B1	min	0,19	0,08	0,08	43	28,0	15,1	1,0	0,01	0,11	0,09	0,17
	mittel	0,25	0,29	0,22	109	85,3	88,6	3,3	0,06	0,43	0,33	0,57
	max	0,54	0,53	0,42	187	50,9	19,9	5,3	0,05	0,71	0,77	0,91
max z _A C1	min	0,28	0,27	0,11	65	51,6	45,3	0,9	0,01	0,26	0,15	0,39
	mittel	0,35	0,51	0,24	103	93,7	86,3	2,9	0,05	0,51	0,49	0,60
	max	0,52	0,82	0,50	139	107,2	100,4	4,5	0,03	0,64	1,00	0,97
max H _p A1	min	0,24	0,49	0,17	74,8	56,9	50,3	1,6	0,02	0,34	0,38	0,35
	mittel	0,46	0,69	0,30	102,7	102,1	105,8	3,7	0,08	1,06	0,69	0,74
	max	0,73	1,07	0,51	84,1	120,0	151,2	6,4	0,09	2,51	0,94	1,48
max H _p B1	min	0,05	0,24	0,05	1,5	10,0	6,9	1,0	0,01	0,11	0,10	0,17
	mittel	0,21	0,32	0,22	84,8	76,6	75,5	3,5	0,06	0,40	0,41	0,61
	max	0,54	0,53	0,42	100,8	120,0	178,1	6,5	0,07	0,99	0,44	1,09
max H _p C1	min	0,11	0,40	0,09	64,5	52,2	48,9	0,9	0,01	0,26	0,21	0,36
	mittel	0,33	0,53	0,22	107,2	92,2	84,3	2,8	0,05	0,54	0,52	0,62
	max	0,52	0,82	0,50	104,9	120,0	110,0	4,5	0,02	1,12	1,00	1,21
max H _{sek} A1	min	0,05	0,06	0,38	41,6	42,1	55,9	1,5	0,04	0,13	0,12	0,56
	mittel	0,22	0,32	0,43	107,1	98,1	94,8	4,0	0,10	0,43	0,42	0,73
	max	0,56	0,79	0,51	153,4	120,0	172,7	4,9	0,10	1,32	1,13	0,71
max H _{sek} B1	min	0,02	0,02	0,29	4,6	10,2	7,1	1,4	0,01	0,08	0,07	0,41
	mittel	0,12	0,15	0,34	94,4	75,9	75,1	3,9	0,06	0,29	0,31	0,71
	max	0,54	0,42	0,55	196,0	120,0	175,1	4,4	0,03	0,88	1,29	0,95
max H _{sek} C1	min	0,02	0,04	0,36	34,3	38,0	50,6	2,1	0,00	0,06	0,05	0,52
	mittel	0,14	0,19	0,42	99,6	92,0	86,9	3,6	0,04	0,23	0,20	0,68
	max	0,31	0,42	0,57	147,2	120,0	129,8	3,8	0,02	0,82	0,56	0,77

Fazit

Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass

- an der Messlokation A1 in Hollerwettern die größten schiffserzeugten Belastungen auftreten,
- an der Messlokation B1 in Bielenberg die geringsten schiffserzeugten Belastungen auftreten und
- die Situation auf Schwarztonnensand (C1) zwischen A1 und B1 liegt.

5.7 Schiffspassagen des HSC *HALUNDER JET*

Auf der Unterelbe verkehrt auch der HSC *HALUNDER JET* zweimal täglich auf dem Weg von und nach Helgoland. Grundsätzlich generieren HSC-Schiffe (*High Speed Craft*) aufgrund der überkritischen Fahrtgeschwindigkeit ein anderes Wellenbild als sogenannte Verdränger. Auf die allgemeinen Erläuterungen im Abschnitt 2 wird verwiesen.

Übersicht der Schiffswellenereignisse des *HALUNDER JET*

Im Messzeitraum wurden 28 bis 34 Schiffswellenereignisse infolge der Passagen des *HALUNDER JET* analysiert. Dies entspricht einem Anteil des HSC an den Schiffswellenereignissen insgesamt von 3,3 % an C1 bis 4,9 % an B1. Die folgende Tabelle 5-10 gibt dazu eine Übersicht.

Tabelle 5-10: Übersicht der analysierten Schiffswellenereignisse an den Messlokalationen A1, B1 und C1 in der Messkampagne 2015 mit Kennzeichnung der Passagen des *HALUNDER JET*

Messlokation	A1	B1	C1
registrierte Schiffspassagen im Messzeitraum (20.09.2015 – 01.11.2015)	3.282	3.472	3.381
Anzahl der im Messzeitraum (6 Wochen) analysierten Schiffswellenereignisse (Verdränger + HSC)	896	569	937
Anzahl der im Messzeitraum (6 Wochen) analysierten Schiffswellenereignisse (<i>nur</i> HSC)	34	28	31
Anteil Schiffswellenereignisse infolge HSC bezogen auf alle Schiffswellenereignisse in [%]	3,8 %	4,9 %	3,3 %
Höhenlage Messstation [mNHN]	NHN + 0,13 m	NHN + 0,20 m	NHN + 0,07 m
Entfernung Messstation – Fahrwassermitte [m]	750 m	1.100 m	700 m

Analyse der Schiffswellenereignisse des *HALUNDER JET*

Vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung wurden die Schiffswellenereignisse des *HALUNDER JET* der Auswerteroutine für Verdränger folgend ausgewertet. Auf eine gesonderte Analyse des HSC-Wellenbildes wurde verzichtet, da die Wellenhöhe als Sekundärwelle und damit als Belastung für die Makrophyten hinreichend erfasst wird.

Beispielhafte Darstellung der Schiffswellenereignisse bei einer Fahrt des *HALUNDER JET*

Nachfolgend wird exemplarisch für den Schiffstyp die zeitliche Abfolge von Schiffswellenereignissen verursacht durch den *HALUNDER JET* am 25.10.2015 an den Messlokalationen A1 (Abbildung 5-18), B1 (Abbildung 5-19) und C1 (Abbildung 5-20) dargestellt.

Die Analyseergebnisse der Schiffswellenereignisse sind in der folgenden Tabelle 5-11 auszugsweise zusammengestellt.

Tabelle 5-11: Auswertungsergebnis der Passage des *HALUNDER JET* am 25.10.2015 an den Messlokalen C1, B1 und A1

	Schiffswelleneignis			Analyse Schiffswelle			Abstand	Tidewasserstand		Schiff
	No.	Datum	Eintrittszeit	Absunk z _A [m]	Höhe PW H _p [m]	Höhe SW H _s [m]		Pegel umgerechnet [mNN]	Tidestieg/ Tidefall [1]	FdW Schiff [kn]
		[TT.MM.JJJJ]	[hh:mm:ss]				[m]			
C1	826	25.10.2015	10:13:08	0,05	0,19	0,19	759	1,06	Tidestieg	34,8
B1	513	25.10.2015	10:17:34	0,07	0,21	0,21	776	1,16	Tidestieg	35,6
A1	764	25.10.2015	10:28:39	0,09	0,22	0,22	771	1,46	Tidestieg	35,8

Die Abbildungsserie macht deutlich, dass trotz der konstanten Fahrtgeschwindigkeit und des konstanten Passierabstandes sich das Wellenbild lokal den hydraulischen und morphologischen Randbedingungen anpasst. An der Messlokation A1 zeigt das Wellenbild noch unterschiedliche Wellenhöhen, und es sind noch die gemäß Definition (vgl. Folie 86 in Anlage 12) erkennbaren Wellenfolgen differenzierbar.

An der Messlokation B1 verändert sich dieses Wellenbild in eine Tropfenform, und die nachlaufenden Sekundärwellen sind weiterhin gut zu erkennen. An der Messlokation C1 vergleichmäßigte sich das Wellenbild im ersten überkritischen Teil und die nachlaufenden Sekundärwellenhöhen steigen an.

In der Analyse wird Tabelle 5-11 folgend ein minimaler Absunk im Zentimeterbereich analysiert. Primär- und Sekundärwellenhöhe liegen in der gleichen Größenordnung von 0,2 m an allen drei Messlokalen. Dieses Ergebnis ist als repräsentativ für alle untersuchten Passagen anzusehen. Auf die Anlage 9, Anlage 10 und Anlage 11 wird verwiesen.

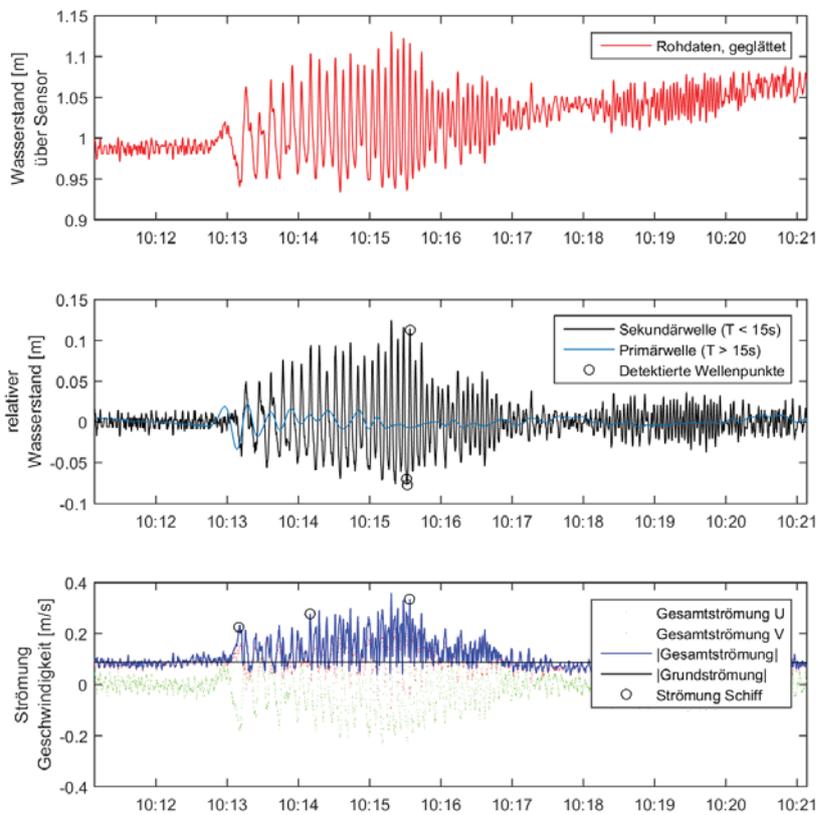


Abbildung 5-18: Beispielhaftes Schiffswellenereignis des *HALUNDER JET* an der Messlokation C1 am 25.10.2015 um 10:13

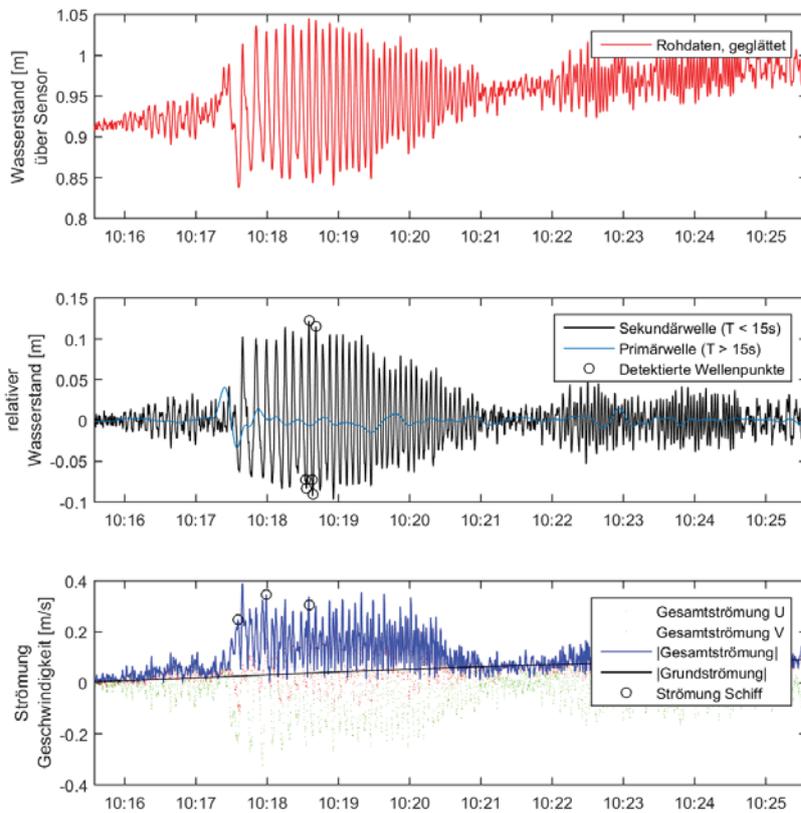


Abbildung 5-19: Beispielhaftes Schiffswellenereignis des *HALUNDER JET* an der Messlokation B1 am 25.10.2015 um 10:17

g:\dat\prj\0219_schiffswellen\makrophyten\08 plan-erg\82_endbericht\0219-05 abschussbericht_rev-01\0219-05 abschussbericht_rev-01.docx, F.8-10a

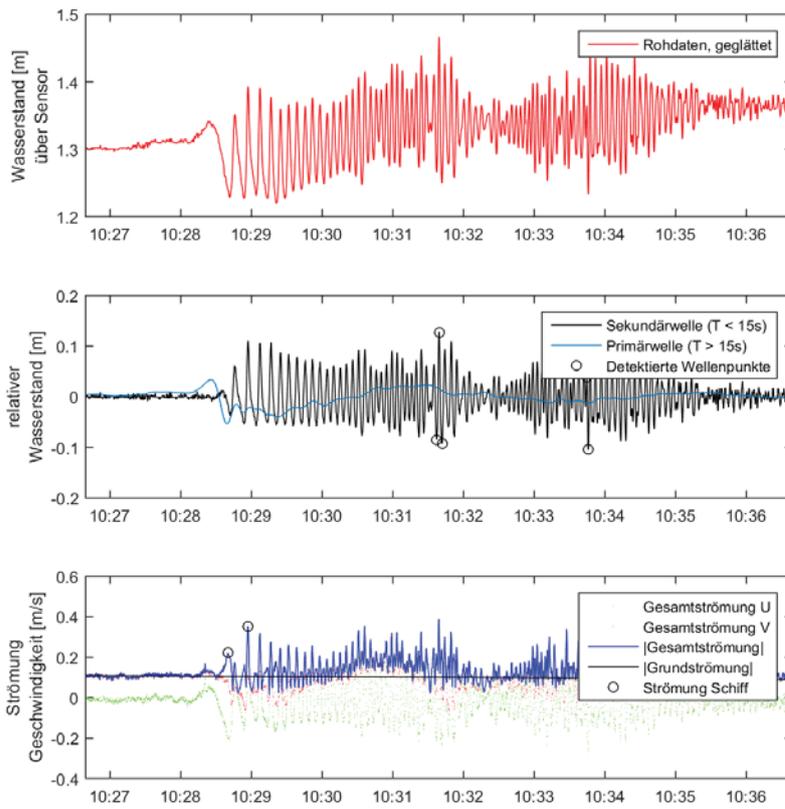


Abbildung 5-20: Beispielhaftes Schiffswellenereignis des *HALUNDER JET* an der Messlokation A1 am 25.10.2015 um 10:28

g:\dat\prj\0219_schiffswellen\makrophyten\08 plan-erg\82_endbericht\0219-05 abschussbericht rev-01\0219-05 abschussbericht_rev-01.docx, F 8-10a

5.8 Überstaudauern und -höhen

Durch die Anordnung der Messlokation im Tidewechselbereich wurde der Messkäfig und die Messgeräte tidebedingt überstaut, bis der fallende Tidewasserstand unter das Niveau der Sohle am Einbauort gesunken ist, und die Messgeräte für längere Zeit trockengefallen sind, ehe der Tidedstieg wieder für einen Überstau sorgte. Dieser Überstau zeigt sich in den Messzeitreihen der Drucksonde für die Messlokationen A1, B1 und C1 in Anlage 8 sowie vergleichend in Abbildung 5-21 für die zeitsynchronen Messdaten, deren charakteristische Verläufe übereinstimmend gut zu erkennen sind.

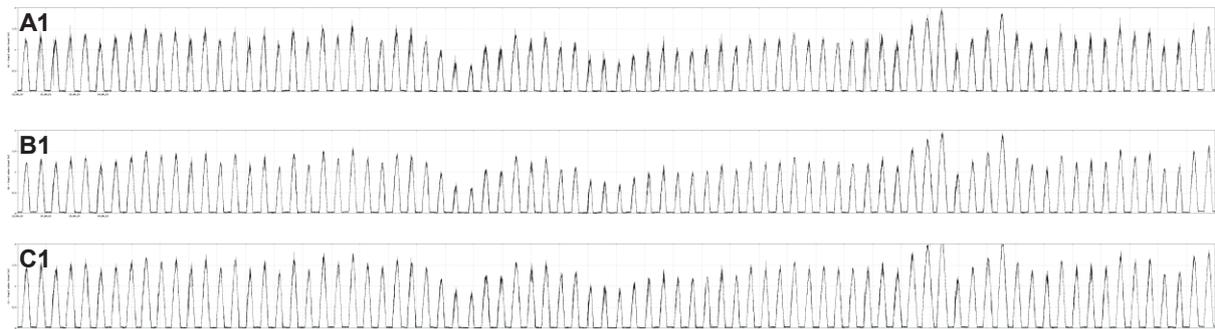


Abbildung 5-21: Ganglinien der zeitsynchronen Druckmessungen an den Messlokationen A1, B1 und C1 über den gesamten Messzeitraum von 6 Wochen (20.09.2015 – 01.11.2015)

Gemäß Leistungsbeschreibung [1] waren die Überstaudauer sowie die Überstauhöhe weitergehend zu untersuchen. Die Untersuchungsergebnisse werden nachfolgend und Bezug nehmend auf Anlage 12, Seite 93 ff. erläutert.

Definition

Die Definition der Überstaudauer und die Überstauhöhe wird in Abbildung 5-22 dargestellt.

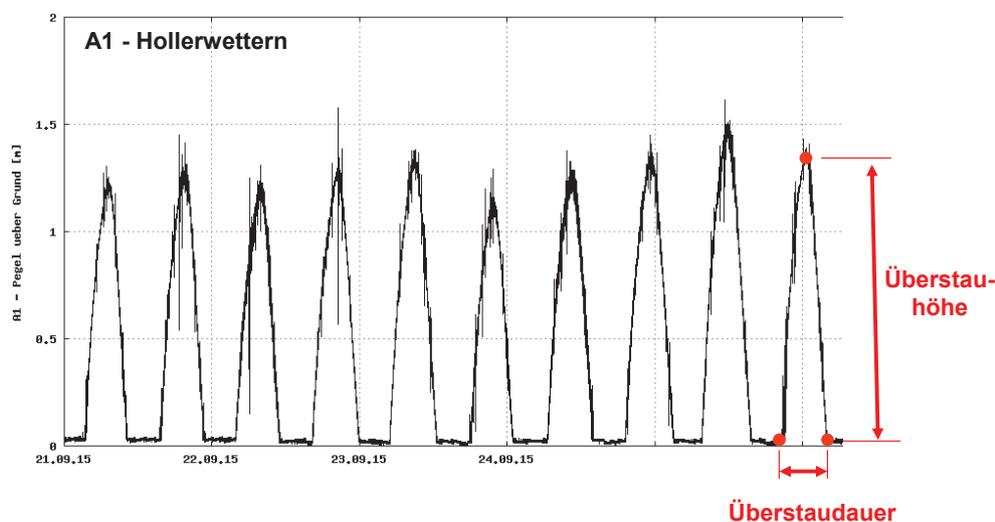


Abbildung 5-22: Definition der Parameter Überstaudauer und -höhe

Als Überstaudauer gilt die Dauer zwischen den Zeitpunkten des Wasser-
spiegelanstieges über und des –abfalls unter das Sohlniveau.

Als Überstauhöhe gilt die Höhendifferenz zwischen dem Höhenniveau des
Drucksensors und dem jeweiligen Tidehochwasserscheitel.

Daten der Überstaudauern und –höhen

Für den sechswöchigen Messzeitraum (42 Tage) ergeben sich insgesamt
81 Überstauereignisse mit Angaben zu der Überstaudauer und –höhe für
jeden der drei Messlokationen. Die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte
werden in der folgenden Tabelle 5-12 zusammengestellt.

Tabelle 5-12: Überstauereignisse an den Messlokationen A1, B1 und C1

		A1	B1	C1	
Überstauereignisse	Anzahl	[1]	81	81	81
Überstaudauer	min	[h]	4,6	4,0	5,1
	mittel	[h]	6,6	6,4	7,0
	max	[h]	10,0	9,2	10,2
Überstauhöhe	min	[m]	0,57	0,56	0,76
	mittel	[m]	1,18	1,18	1,38
	max	[m]	1,89	1,88	2,09

Auswertung

Die ermittelten Daten der Überstaudauern und -höhen wurden statistisch
weitergehend untersucht.

Da die Messlokationen an unterschiedlichen Standorten entlang der Elbe
und Höhenlagen installiert wurden und dort jeweils andere Tidewasser-
stände die Überstaudauer und –höhe bewirken, werden in der Tabelle
5-13 die Differenzen zwischen der Messebene des Drucksensors und dem
mittleren Tidehochwasser ermittelt. Qualitativ ausgedrückt werden die
Überstaukurven damit normiert.

Tabelle 5-13: Ableitung der mittleren Überstauhöhe

Messlokation	A1 Hollerwettern	B1 Bielenberg	C1 Schwarz- tonnensand
Höhenlage Messstation	NHN +0,13 m	NHN +0,20 m	NHN +0,07 m
Abstand Sohle - Drucksensor	0,10 m	0,10 m	0,10 m
MThw (2006/2015) Bezugspegel	NHN +1,54 m Brockdorf	NHN +1,60 m Glückstadt	NHN +1,67 m Kollmar
Differenz Messebene - MThw	1,31 m	1,30 m	1,40 m

Aus der Tabelle 5-13 wird deutlich, dass die Differenzen an den Messlo-
kationen A1 und B1 nahezu gleich sind, d.h. eine ähnliche Überstauhöhe
zu erwarten ist, und an der Messlokation C1 – Schwarztonnensand eine
etwa 10 cm höhere Überstauhöhe und damit auch eine größere Über-

staudauer erkennbar sein sollte. Genau dieser Effekt zeigt sich auch in den Häufigkeitsverteilungen, die in der folgenden Abbildung 5-23 dargestellt werden.

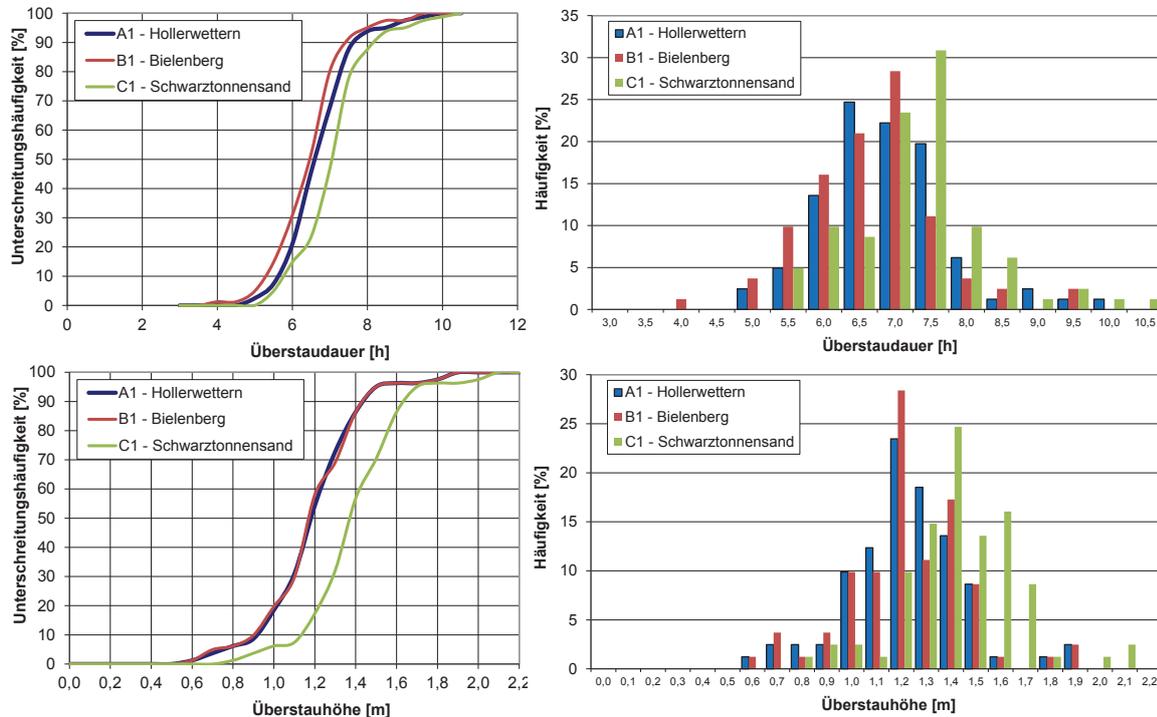


Abbildung 5-23: Häufigkeitsverteilungen der Überstaudauern (oben) und -höhen (unten)

Für die Überstaudauer zeigen die Summenhäufigkeiten in Abbildung 5-23 ähnliche Verläufe, wobei die Kurven für die Messlokationen A1 und B1 enger zusammenliegen, und die Kurve für C1 im Mittel eine um 30 Minuten längere Überstaudauer zeigt.

Ähnlich verhält es sich mit der Überstauhöhe. Die Kurven der Summenhäufigkeiten zeigen systematisch ähnliche Verläufe. Für die Messlokationen A1 und B1 liegen die Summenhäufigkeiten quasi übereinander, während die Kurve für die Messlokation C1 deutlich weiter rechts liegt, und eine um rd. 20 cm höhere Überstauhöhe verdeutlicht.

Fazit

Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Makrophyten

- an A1 und B1 ähnlich lange ($\bar{\sigma}$ 6,5 h) und hoch ($\bar{\sigma}$ 1,18 m) und
- an C1 vergleichsweise um 30 Minuten länger und um rund 20 cm höher

durch die normale Tide überstaut werden.

6. Zusammenfassung

Im Auftrage des WSA Hamburg wurden Wellen- und Strömungsmessungen im Rahmen von Makrophytenuntersuchungen durchgeführt. Dabei wurde der Ist-Zustand der schiffserzeugten Belastungen in den Uferbereichen der Unterelbe an den drei Lokationen Hollerwettern, Bielenberg und Schwarztonnensand jeweils im Tidewechselbereich erfasst. Die Höhenlagen der Gewässersohle lagen bei NHN + 0,07 m bis NHN + 0,2 m.

Für die Durchführung der Messungen wurden baugleiche Messkäfige entwickelt und messtechnisch mit jeweils einem Strömungsmesser und Drucksensor ausgestattet. Über den Messzeitraum von 6 Wochen wurden an den drei Messlokalationen insgesamt rd. 10.000 Schiffspassagen registriert, von denen rd. 2.400 ein Schiffswellenereignis generiert haben.

Im Zuge der Analyse dieser rd. 2.400 Schiffswellenereignisse wurde deutlich, dass

- an der Messlokation Hollerwettern die größten Belastungen auftreten bezüglich schiffserzeugter Wellen und Strömungen,
- an der Messlokation Bielenberg die geringsten Belastungen auftreten,
- die Belastungen infolge Sekundärwellenhöhen an allen Messlokalationen annähernd vergleichbar sind.

Die folgende Tabelle 6-1 fasst die Bandbreite der jeweils 50 höchsten Schiffswellenereignisse für die Parameter der schiffserzeugter Wellen und Strömungen zusammen.

Tabelle 6-1: Maximale Schiffswellenparameter der jeweils 50 höchsten Ereignisse

Kriterium	maximale Parameter Analyse Schiffswelle			Parameter schiffserz. Strömung				
	Z_A [m]	H_P [m]	H_{sek} [m]	v_0 [m/s]	v_{RS} [m/s]	v_{Hp} [m/s]	v_{Hsek} [m/s]	
A1	min	0,33	0,49	0,38	0,16	0,84	0,75	0,77
	mittel	0,48	0,69	0,43	0,19	1,23	0,88	0,89
	max	0,73	1,07	0,51	0,26	2,51	1,13	1,48
B1	min	0,19	0,24	0,29	0,11	0,55	0,52	0,78
	mittel	0,25	0,32	0,34	0,14	0,70	0,70	0,91
	max	0,54	0,53	0,55	0,22	0,99	1,38	1,29
C1	min	0,28	0,40	0,36	0,08	0,61	0,52	0,71
	mittel	0,35	0,53	0,42	0,09	0,75	0,64	0,78
	max	0,52	0,82	0,57	0,13	1,24	1,00	1,21

Hamburg, 6. Dezember 2016

Ramboll IMS Ingenieurgesellschaft mbH

gez. Peters

gez. Stahlmann