

**NATURMESSUNGEN ZUR BESTIMMUNG
SCHIFFSINDUZIERTER BELASTUNGEN
IM HAFEN EINES TIDEFLUSSES**

***FIELD MEASUREMENTS FOR THE
DETERMINATION OF SHIP-INDUCED LOADS
IN A TIDAL RIVER PORT***

von

Andreas Matheja, Lutz Schweter

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS	75
SYMBOLVERZEICHNIS	77
ZUSAMMENFASSUNG	79
ABSTRACT	79
1 PROBLEMSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE	81
2 HYDRAULISCHE VORGÄNGE BEI DER PASSIERFAHRT EINES SCHIFFES	83
2.1 Fahrwasserverhältnisse	83
2.2 Schiffsinduziertes Wellensystem (primäres und sekundäres Wellensystem)	84
3 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN	87
3.1 Messzeitraum	87
3.2 Messpositionen	87
3.3 Messgeräte	90
3.3.1 Wasserstandsmessgerät	90
3.3.2 Strömungsmessgerät	92
3.4 Montage der Messgeräte	93
3.5 Datenspeicherung und Datenlücken	93
4 AUSWERTUNG DER MESSDATEN	95
4.1 Auswerteverfahren	95
4.2 Zuordnung der Schiffspassagen	97
5 ERGEBNISSE	101
5.1 Feederschiffe und Schnellfähren	101
5.2 Post-Panmax Schiffe	103
5.3 Zusätzliche Untersuchungen	106
5.3.1 An- und Ablegemanöver im Hafen Stade-Bützfleth	106
5.3.2 Resonanzeffekt im Hafenbecken	109
6 ZUSAMMENFASSUNG	111
7 SCHRIFTTUM	113

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1-1:	Lageplan des Hafens Stade-Bützfleth [Kartengrundlage: Topographische Übersichtskarte Niedersachsen, M 1:1.000.000; © LGN HANNOVER, 2004]	81
Abbildung 1-2:	Draufsicht auf den Hafen Stade-Bützfleth [NIEDERSACHSEN PORTS, 2006]	82
Abbildung 2-1:	Überhöhte Darstellung der Wasserspiegeländerung bei Passage eines Schiffes [SPINGAT, 1999]	84
Abbildung 2-2:	Schematisiertes Sekundärwellensystem [SCHNEEKLUTH, 1988]	85
Abbildung 3-1:	Lage der Messpositionen 1 bis 4 [Kartengrundlage: Topographische Übersichtskarte Niedersachsen, M 1:25.000; © LGN HANNOVER, 2004]	87
Abbildung 3-2:	Messposition 1	88
Abbildung 3-3:	Messposition 2	88
Abbildung 3-4:	Messposition 3	89
Abbildung 3-5:	Messposition 4	89
Abbildung 3-6:	Aufbau der Pegel	90
Abbildung 3-7:	Pegellogger P-LOG520-PR	91
Abbildung 3-8:	Acoustic Doppler Current Profiler [RD INSTRUMENTS, 2006]	92
Abbildung 3-9:	Einbau der Pegel	93
Abbildung 3-10:	Defekter Pegel	93
Abbildung 4-1:	Bestimmung der Wellenparameter	95
Abbildung 4-2:	Parameter zur Bestimmung der Druckänderung in der Wassersäule beim Durchgang einer Welle	96
Abbildung 4-3:	Druckreduktionsfaktor am Pegel 3 für MThw und MTnw	97
Abbildung 4-4:	Ausschnitt aus dem Plot der Schiffspositionen um den Hafen Stade-Bützfleth	98
Abbildung 4-5:	Passage eines Post-Panmax Schiffes am 18.10.2006	99
Abbildung 5-1:	Typisches Wellenbild eines schnell fahrenden Feederschiffes (Feederschiff 1: Fahrtgeschwindigkeit über Grund: 14,7 kn, Fahrtrichtung: stromauf, Abmessungen: $L_{\text{Schiff}} \cdot b \cdot T = 117 \cdot 18,1 \cdot 6,5$)	101
Abbildung 5-2:	Typisches Wellenbild einer Schnellfähre (Schnellfähre 1: Fahrtgeschwindigkeit über Grund: 18,5 kn, Fahrtrichtung: stromab, Abmessungen: $L_{\text{Schiff}} \cdot b \cdot T = 50 \cdot 12 \cdot 2,6$)	102

Abbildung 5-3:	Darstellung der durch die Passage der Feederschiff 4 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen	103
Abbildung 5-4:	Darstellung der durch die Passage der Post-Panmax 4 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen	104
Abbildung 5-5:	Darstellung der durch die Passage der Post-Panmax 2 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen	104
Abbildung 5-6:	Darstellung der durch die Passage der Post-Panmax 3 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen	105
Abbildung 5-7:	Starker Absunk an Pegel 4 (Molenkopf)	106
Abbildung 5-8:	Wasserstandsänderungen bei An- und Ablegemanövern im Nordhafen (Vorgang 3429: Tiefgang: 3,55 m, BRZ: 3086)	108
Abbildung 5-9:	Beeinflussung des Wasserstandes durch den Einsatz eines Querruders	108
Abbildung 5-10:	Absunk am Pegel 3 (Stromkaje außen), verursacht durch ein Anlegemanöver (Vorgang 3411: Tiefgang: 12,68 m, BRZ: 37661)	109
Abbildung 5-11:	Dämpfung schiffsinduzierter Wellen im Hafenbecken und an der Stromkaje (außen)	110
Tabelle 3-1:	Lage und Höhe der Pegel	90
Tabelle 4-1:	Ausgewählte Schiffspassagedaten der Verkehrszentrale Brunsbüttel [WSA BRUNSBÜTTEL, 2006]	98
Tabelle 4-2:	AIS – Daten ausgewählter Schiffspassagen während der Messkampagne vom 18.10.2006 – 20.10.2006	99
Tabelle 5-1:	Daten der drei maximalen gemessenen Wellenhöhen im Hafen Stade-Bützfleth	103
Tabelle 5-2:	Schiffsliegezeiten im Hafen Stade-Bützfleth für den Zeitraum der Messkampagne [NIEDERSACHSEN PORTS, 2006]	107
Tabelle 5-3:	Dämpfung der maximalen Wellenereignisse	110

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung des Symbols	Einheit
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler	
AIS	Automatic Identification System	
DGPS	Differential Global Positioning System	
A	Querprofilfläche des Fahrwassers	[m ²]
A _S	eingetauchter Hauptspantquerschnitt	[m ²]
B	Wasserspiegelbreite	[m]
B _S	Sohlbreite	[m]
F _{nh}	FROUDE'sche Tiefenzahl	[-]
H	Wellenhöhe	[m]
H _P	Primärwellenhöhe	[m]
H _S	Sekundärwellenhöhe	[m]
L	Passierabstand	[m]
L _{Schiff}	Schiffslänge	[m]
L _{Welle}	Wellenlänge	[m]
R	Druckreduktionsfaktor	[-]
T	Schiffstiefgang	[m]
T _p	Periodendauer Primärwelle	[s]
T _s	Periodendauer Sekundärwelle	[s]
T _T	Periodendauer Tide	[s]
T _W	Periodendauer Windwellen	[s]
b	Schiffsbreite	[m]
c	Stauwellengeschwindigkeit	[m/s]
d	Wassertiefe (Ruhewasserspiegel)	[m]
g	Gravitationskonstante = 9,81	[m/s ²]
h	Wassertiefe	[m]
k	Wellenzahl	[1/m]
p	Druck	[Pa]
s _B	Bugstau	[m]
v _{krit}	kritische Geschwindigkeit	[m/s]
v _S	Schiffsgeschwindigkeit	[m/s]
z	Einbautiefe der Druckmessdose	[m]
z _A	Absenk des Wasserspiegels	[m]
η	Wasserspiegelauslenkung	[m]
ρ	Dichte	[kg/m ³]

Zusammenfassung

Im Hafen Stade-Bützfleth des Tideflusses Elbe wurden Wasserstandsmessungen über einen Zeitraum von ca. 6 Wochen durchgeführt. Anlass dieser Messungen war die Beobachtung, dass auf Grund der in jüngster Vergangenheit realisierten Schiffgrößen und –geschwindigkeiten ein erhöhter Wellenauf-
lauf und dadurch eine Zunahme der Belastungen bis hin zum Versagen des Vertäuungssystems im Hafen liegender Großschiffe festgestellt wurden.

Zur Ermittlung und Dokumentation der schiffsinduzierten Belastungen und deren Verursacher wurden die gemessenen Wellen mit den dazugehörigen Schiffspassagedaten (Schiffsname, Länge, Breite, Tiefgang, Position, Passierabstand und Fahrgeschwindigkeit über Grund) verknüpft.

Die Auswertungen zeigten, dass die höchsten Belastungen durch Post-Panmax Schiffe in Verdränger-
fahrt während der Abend- und Nachtstunden bzw. am frühen Morgen verursacht werden.

Auch durch schnell fahrende Feederschiffe bzw. Schnellfähren in Gleitfahrt werden hohe kurzperiodi-
sche Wellen erzeugt, die jedoch für vertäute Großschiffe nicht wirksam werden.

Schlussfolgerung ist daher, dass die höchsten gemessenen Wellenereignisse von Schiffen der Post-
Panmax Klasse als Bemessungsereignis für eine spätere Berechnung der Trossenkräfte maßgebend
sein sollten.

Abstract

In the port of Stade-Bützfleth at the tidal river Elbe water level measurements were accomplished over
a period of approx. 6 weeks. Motivation for these measurements was the observation that due to the
ship-sizes and –speeds in recent past an increase of the wave attack and thus an increase of loads up
to failures of the mooring system of large ships moored in the port of Stade-Bützfleth was observed.

To determinate the ship-induced loads and their origin, wave measurements were linked with the cor-
responding ship passage data (ship name, length, width, draught, position, passing distance and
speed over ground).

Evaluations showed that highest loads are caused by Post-Panmax ships at subcritical speed during
the evening and night hours and in the early morning respectively.

Also fast feederships and high-speed ferries at supercritical speed induce larger short period waves
but do not affect moored large ships.

Conclusion is that the observed highest waves are from ships of the Post-Panmax class and should
be considered as standard load for computations of mooring forces.

1 Problemstellung und Vorgehensweise

Die historisch gewachsenen Seehäfen der Nordrange wurden an den relativ geschützten Ästuaren angelegt, um die Schiffe dem rauen Seegangsklima im Küstenbereich zu entziehen und die Transporte unmittelbar zum Empfänger zu leiten, z.B. in den Großraum Hamburg.

Dies bedingt eine Revierfahrt, bei der es durch die in der jüngsten Vergangenheit realisierten Schiffsgößen und -geschwindigkeiten zu einer erheblichen Belastung der Gewässersohle und der Deckwerke kommt.

Diese schiffsinduzierten Belastungen können sich auch in angrenzenden Hafenbereichen bemerkbar machen, die eine direkte Anbindung an den Strom haben. Dort kann es zu einer verstärkten Wellenruhe und einer langperiodischen Absenkung des Wasserstandes führen, dem das vertäute Schiff folgt, bis hin zum Versagen des Vertäuungssystems.

Zur Bestimmung solcher schiffsinduzierten Belastungen und ihren Verursachern wurden in einem Zeitraum von 6 Wochen Naturmessungen im Hafen Stade-Bützfleth (Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2) durchgeführt. Der Hafen befindet sich am westlichen Ufer der Unterelbe, bei Elbe-km 657-658, rund 66 Strom-km oberstrom Cuxhavens.

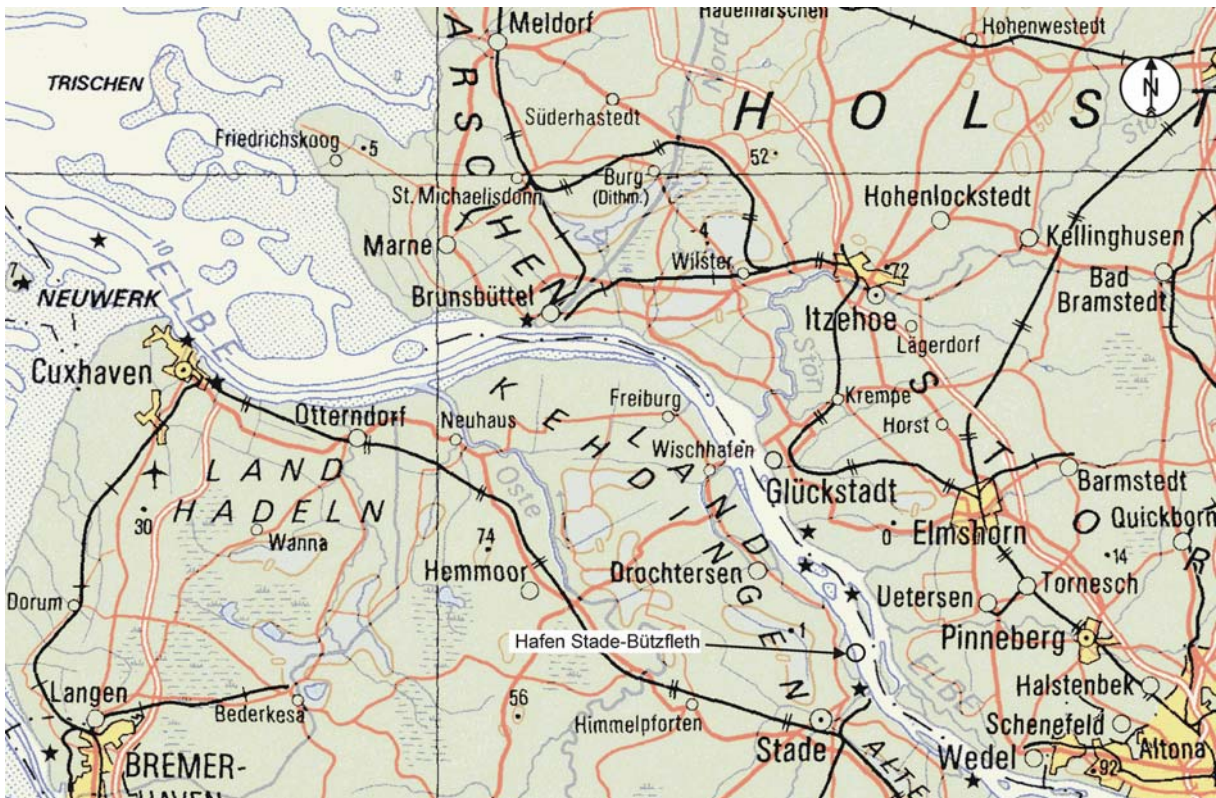


Abbildung 1-1: Lageplan des Hafens Stade-Bützfleth [Kartengrundlage: Topographische Übersichtskarte Niedersachsens, M 1:1.000.000; © LGN HANNOVER, 2004]

Da nach dem vorliegenden Kenntnisstand davon auszugehen ist, dass die erhöhten Schiffsgeschwindigkeiten weiterhin zu erheblichen Schäden an Hafenanlagen bzw. Trossen führen werden, sollten im Rahmen der hier dargestellten Untersuchung die schiffserzeugten Belastungen dokumentiert werden. Die erhobenen Messdaten wurden mit den Schiffspassagedaten der Verkehrszentrale Brunsbüttel verknüpft, um die ermittelten Schiffswellen den verursachenden Schiffen und ihren Charakteristika (Länge, Breite, Tiefgang, Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung) zuordnen zu können.

In einer abschließenden dreitägigen Messkampagne wurden zusätzlich zu den Wasserstandsmessungen Strömungsmessungen in der Hafeneinfahrt und im Hafenbecken durchgeführt, die mit Schiffspassagedaten aus einem stationären AIS¹-System verknüpft wurden.



Abbildung 1-2: Draufsicht auf den Hafen Stade-Bützfleth [NIEDERSACHSEN PORTS, 2006]

¹ AIS: Automatic Identification System

2 Hydraulische Vorgänge bei der Passierfahrt eines Schiffes

2.1 Fahrwasserverhältnisse

Zur Beschreibung der Fahrwasserverhältnisse muss ein Zusammenhang zwischen Schiff und Wassertiefe hergestellt werden. Hierzu wird das dimensionslose Verhältnis der Wassertiefe h zum mittleren Schiffstiefgang T verwendet. Der Schiffstiefgang beschreibt in Kombination mit h wie groß das vorhandene Wasserpolster unter dem Schiff ist [GRONARZ, 1997].

Bei Betrachtung des Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnisses h/T , gelten folgende Anhaltswerte für den Bereich FROUDE'sche Tiefenzahl $F_{nh} < 0,65$:

$$2 < \frac{h}{T} < 4 \quad \text{begrenzte Wassertiefe} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

$$1,5 < \frac{h}{T} < 2 \quad \text{Flachwasser} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

$$F_{nh} = \frac{v_s}{\sqrt{g * h}} = \frac{v_s}{c} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

mit v_s Schiffsgeschwindigkeit [m/s]
 g Erdbeschleunigung [9,81 m/s²]
 c Stauwellengeschwindigkeit [m/s]

Bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten wird das Verhältnis h/T zusammen mit der FROUDE'schen Tiefenzahl betrachtet, um festzustellen ob Flachwassereinfluss vorliegt.

Während Gleitboote (z.B. Schnellfähren) Tiefenzahlen F_{nh} von mehr als 1 erreichen können, bewegen sich Binnen- und Seeschiffe in Verdrängerfahrt maximal im Bereich $F_{nh} = 0,7$. Die der FROUDE'schen Tiefenzahl $F_{nh} = 1$ entsprechende Schiffsgeschwindigkeit wird als kritische Geschwindigkeit v_{krit} bezeichnet. Folgende Anhaltswerte können zur Beurteilung der Geschwindigkeitsbereiche herangezogen werden:

$$\text{unterkritischer Geschwindigkeitsbereich} \quad \text{Gleichung 2-4}$$
$$0,5 - 0,6 \leq F_{nh} \leq 0,7 - 0,9$$

$$\text{trans- und überkritischer Geschwindigkeitsbereich} \quad \text{Gleichung 2-5}$$
$$0,7 - 0,9 \leq F_{nh} \leq \text{unendlich}$$

Nach Ausführungen der VBD (Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschiffahrt (Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V.), Duisburg) gilt ein Fahrwasser als seitlich begrenzt, aber nicht tiefenmäßig, dessen Breite kleiner als etwa die Schiffslänge ist ($B < L_{\text{Schiff}}$). Des Weiteren wird die Tiefe unbegrenzt angenommen, sofern sie größer als der 6-fache Schiffstiefgang ist ($h > 6 * T_{\text{Schiff}}$). Diese Situation ist in Binnengewässern praktisch nicht anzutreffen, so dass diese als tiefenmäßig begrenzt anzunehmen sind. Als Flachwasserfahrt werden daher Fahrten bei Wassertiefen-Tiefgangs-Verhältnissen von $h/T < 2$ bezeichnet.

Eine Wassertiefenbeschränkung tritt ein, sobald die Wassertiefe den Betrag:

$$h = \frac{v_s^2}{2,45} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

unterschreitet, während mit einer seitlichen Einengung gerechnet werden muss, sobald die Fahrwasserbreite einen geringeren Wert als drei Schiffslängen einnimmt ($B < 3 * L_{\text{Schiff}}$) [FÜHRER, 1985].

Bei den an der Unterelbe vorliegenden Verhältnissen ist somit von einer tiefenmäßigen (Flachwasserfahrt), aber nicht von einer seitenmäßigen Begrenzung auszugehen. Die Schiffsgeschwindigkeiten liegen im unterkritischen (Feederschiffe, Post-Panmax Schiffe) und im überkritischen Bereich (Schnellfähren).

2.2 Schiffsinduziertes Wellensystem (primäres und sekundäres Wellensystem)

Ein fahrendes Schiff erzeugt infolge der verursachten Verdrängungsströmung und der auftretenden Druck- und Wasserspiegeländerungen an Bug, Heck und Schiffslängsseite dynamische Wellensysteme, die den Ausbreitungsgesetzen einer Welle unterliegen. Am Bug sowie am Heck des Schiffes entsteht jeweils ein Druckmaximum und an den Längsseiten ein Druckminimum. Das primäre Wellensystem äußert sich in einer Wasserspiegelhebung am Bug und am Heck sowie einer Wasserspiegelsenkung mittschiffs. Die Wasserspiegelhebung am Heck wird durch Ablösungswirbel unterdrückt und ist daher im Allgemeinen nicht sehr ausgeprägt. Das sekundäre Wellensystem wird durch die Druckmaxima des primären Wellensystems verursacht. Es besteht aus einzelnen Rollwellen (Quer- und Schrägwellen). Während die Primärwellen über lange Zeiträume als langperiodische Wasserspiegelschwankungen wirken, treten Sekundärwellen nur über relativ kurze Zeiträume auf [SPINGAT, 1999].

Die dynamischen Wellensysteme sind gekennzeichnet durch:

- die langperiodischen Schwallwellen,
- den Bugstau (s_B) direkt am Schiffskörper,
- den Absenk (z_A) seitlich am Schiff,
- die Heckwelle als Teil des langperiodischen Primärwellensystems (H_P),
- die kurzperiodischen Sekundärwellen (H_S).

Abbildung 2-1 zeigt überhöht die Wasserspiegeländerung, die bei Passage eines Schiffes für einen ortsfesten Betrachter zu erkennen ist.

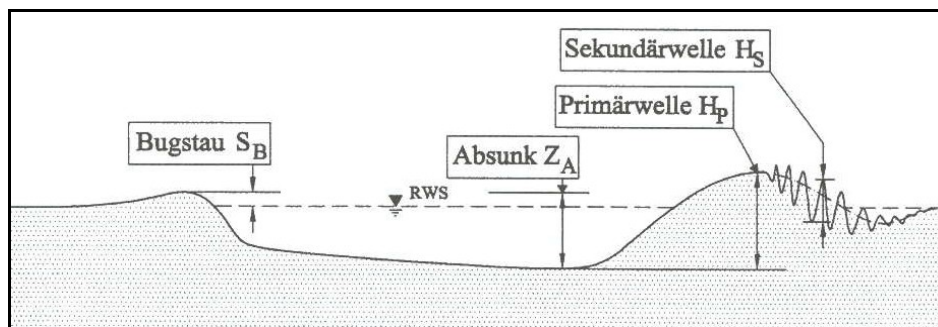


Abbildung 2-1: Überhöhte Darstellung der Wasserspiegeländerung bei Passage eines Schiffes [SPINGAT, 1999]

Die Größen der von fahrenden Schiffen erzeugten Wasserspiegelschwankungen und Strömungen sind u.a. abhängig von:

- der Schiffsgeschwindigkeit v_s und dem Passierabstand L ,
- den Schiffsabmessungen (Länge L_{Schiff} , Breite b , Tiefgang T , eingetauchter Hauptspantquerschnitt AS und der Schiffsform),
- den Fahrwasserverhältnissen (Wasserspiegelbreite B und Sohlbreite BS , Wassertiefe h , Querprofilform und -fläche A , Uferform und Böschungsneigung 1:m),

- den Strömungsverhältnissen in der Wasserstraße und
- von Krümmung, Antriebsart und Dichte des Wassers.

Die maßgeblichen Parameter für die schiffserzeugte Belastung auf Ränder sind v_s , L , A_s , B und h .

Bei Flachwasserfahrt beeinflusst insbesondere das primäre Wellensystem die hydrodynamischen Vorgänge am Schiff. Die lokale Wasseroberflächenverformung besteht hauptsächlich aus einer Wasserspiegelabsenkung. Eine Ausbreitung dieser langperiodischen Wellensysteme wird infolge Grundberührung in erster Linie durch das geometrische System und die Unterwassertopographie bestimmt. So bildet sich bei geringen Wassertiefen-Tiefgangsverhältnissen die lokale Wasseroberflächenverformung infolge der Verdrängungsströmung verstärkt aus und führt zu erheblichen Druckänderungen in der Nähe des Schiffskörpers.

Der Schiffswiderstand, d.h. die zur Erzeugung des Schiffswellensystems und zur Überwindung der auftretenden Reibungskräfte erforderliche Energieabgabe wächst bei Fahrt auf flachem, seitlich unbegrenztem Fahrwasser und in noch stärkerem Maße im Kanal mit der Schiffsgeschwindigkeit steil an und kann nach Erreichen des Maximums unter die entsprechenden Tiefwasserwerte abfallen [FUEHRER, 1985]. In seitlich begrenztem Wasser entwickeln sich in der Nähe des Schiffskörpers zusätzliche, instationäre Querwellen, die mit erhöhter Geschwindigkeit nach vorne ablaufen, so genannte Solitons. Das Schiff fährt gewissermaßen seinen eigenen Wellen hinterher [ERTEKIN ET AL., 1985].

Die Druckmaxima des primären Wellensystems am Bug und am Heck des Schiffes sind verantwortlich für die Diagonal- und Querwellen (Abbildung 2-2), welche bei jeder Krümmungsänderung an der Schiffsaußenhaut entstehen.

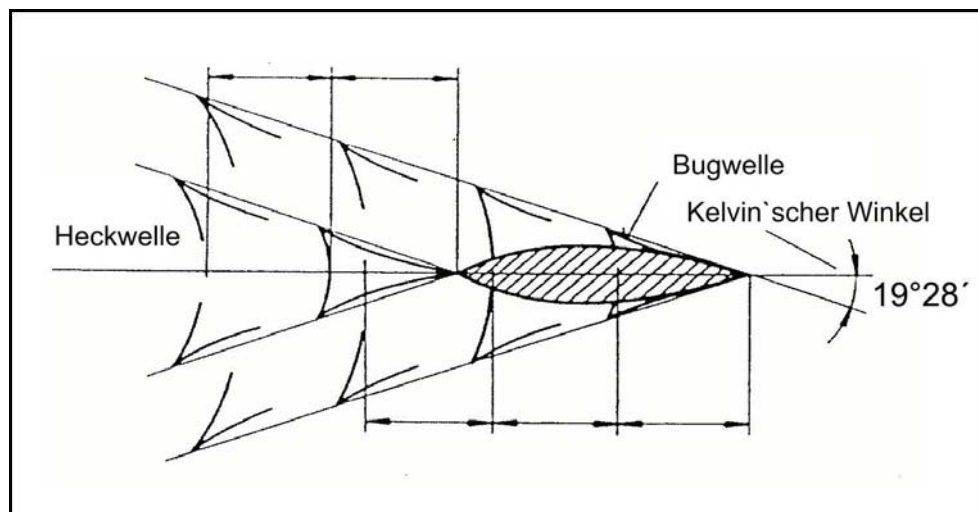


Abbildung 2-2: Schematisiertes Sekundärwellensystem [SCHNEEKLUTH, 1988]

Die Sekundärwellenbildung zwischen Schiff und Fahrwasser wird bei einer Wassertiefenbeschränkung (Flachwasserfahrt) bzw. bei hohen Schiffsgeschwindigkeiten v_s bedeutend und muss zusätzlich zum primären Wellensystem betrachtet werden. Die Wellenkämme von Primär- und Sekundärwelle treffen in unbeschränktem Fahrwasser im unterkritischen Geschwindigkeitsbereich unter einem Winkel von $\alpha = 19,3^\circ$ zur Schiffslängsachse aufeinander (Abbildung 2-2), während der Winkel α in begrenztem Fahrwasser und im transkritischen Geschwindigkeitsbereich bis auf $\alpha = 90^\circ$ ansteigen kann.

Auf die Verhältnisse am Hafen Stade-Bützfleth übertragen, heißt dies:

Passiert ein Schiff ein liegendes Großschiff, so resultiert die Belastung des liegenden Großschiffes in dem in diesem Zusammenhang relevanten Geschwindigkeitsbereich praktisch ausschließlich aus der hydrodynamischen Wechselwirkung der Schiffskörper, die durch die Primärwelle des passierenden Schiffes bedingt ist. Das sekundäre Wellensystem wird daher hier nicht genauer untersucht.

3 Durchführung der Messungen

3.1 Messzeitraum

Der Messzeitraum begann am 07.09.2006 18:00:00 und sollte mindestens 24 Tage verwertbare Daten aller Wasserstandsmessgeräte liefern. Der Messzeitraum endete am 20.10.2006 12:00:00. In der Zeit vom 18.10.2006 – 20.10.2006 wurden zusätzlich Strömungsmessungen in der Hafeneinfahrt und im Hafenbecken durchgeführt.

3.2 Messpositionen

Die vier zur Verfügung stehenden Pegel wurden an hydrodynamisch wichtigen Punkten des Hafens positioniert (Lageplan: Abbildung 3-1, Detailbilder: Abbildung 3-2 bis Abbildung 3-5):

- Messposition 1: Westseite der Einfahrt in den Nordhafen (Hafeneinfahrtsfeuer)
- Messposition 2: Nordseite der Zufahrtsbrücke innerhalb des Nordhafens
- Messposition 3: Liegewanne vor der Stromkaje auf der Höhe des Betriebsgebäudes
- Messposition 4: Westseite des nördlichen Leitwandkopfes

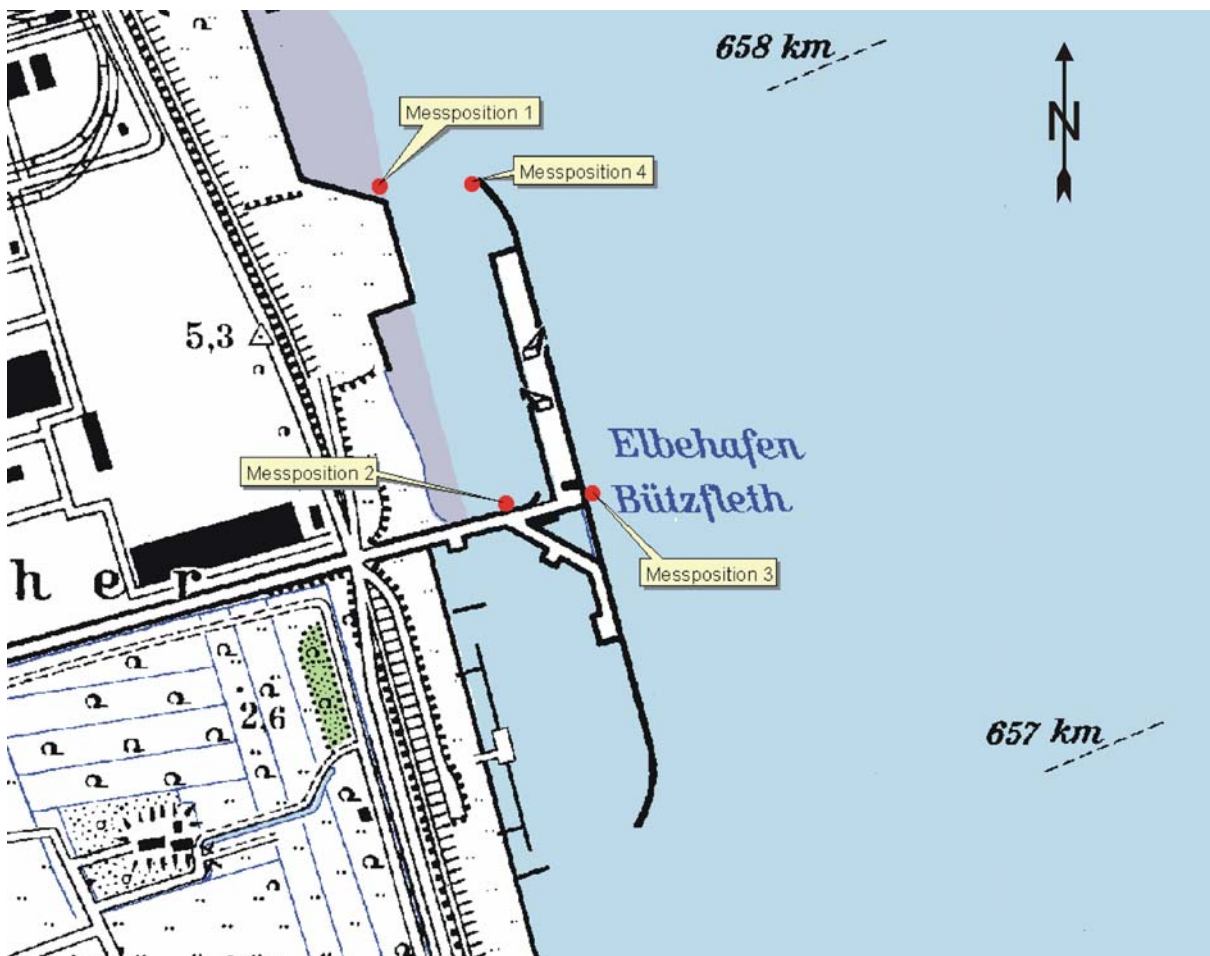


Abbildung 3-1: Lage der Messpositionen 1 bis 4 [Kartengrundlage: Topographische Übersichtskarte Niedersachsen, M 1:25.000; © LGN HANNOVER, 2004]



Abbildung 3-2: Messposition 1



Abbildung 3-3: Messposition 2



Abbildung 3-4: Messposition 3



Abbildung 3-5: Messposition 4

Die Einmessung der Pegel auf mNN (Tabelle 3-1 und Abbildung 3-6) erfolgte mittels DGPS²-Messung mit einer Genauigkeit von $\Delta H = 0,01$ m und $\Delta V = 0,02$ m.

Tabelle 3-1: Lage und Höhe der Pegel

Pegel	Position [Gauß-Krüger]		Höhenlage Kaje [mNN]	Höhenlage Pegel [mNN]
1	3533660,58	5947347,92	6,53	-3,63
2	3533832,02	5946916,84	6,44	-3,77
3	3533927,23	5946924,15	6,32	-3,85
4	3533778,83	5947329,50	6,30	-3,89

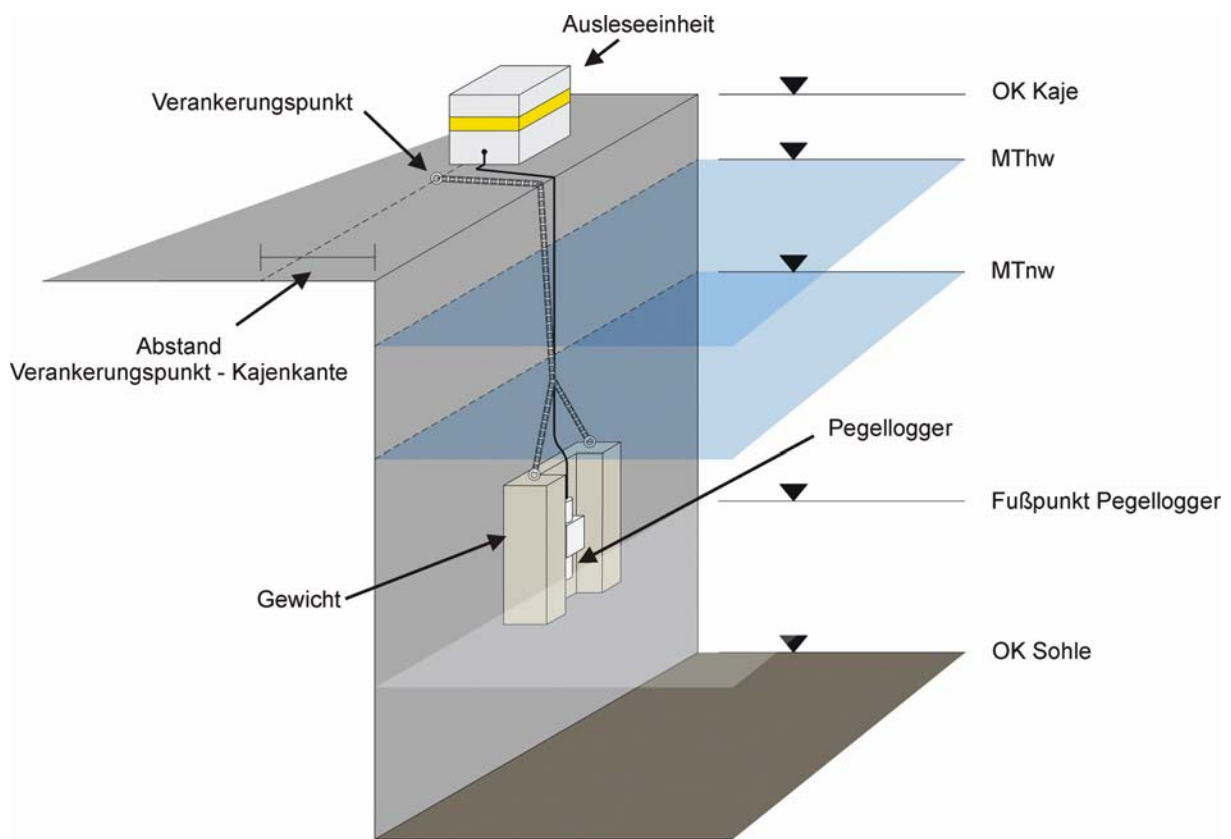


Abbildung 3-6: Aufbau der Pegel

3.3 Messgeräte

3.3.1 Wasserstandsmessgerät

Zur Messung der durch die passierenden Schiffe hervorgerufen Wellen wurden Druckmessdosen (Bauart: P-LOG520-PR, Abbildung 3-7) der Firma DRIESEN + KERN verwendet.

² DGPS: Differential Global Positioning System

Die Druckmessdose misst den Relativdruck, der ausschließlich durch die über dem Sensor stehende Wassersäule verursacht wird. Dies wird dadurch erreicht, dass ein Relativdrucksensor verwendet wird, dessen eine Seite über eine im Kabel integrierte Kapillare mit dem Umgebungsdruck beaufschlagt wird.



Abbildung 3-7: Pegellogger P-LOG520-PR

Die andere Seite wird mit der Summe aus barometrischem Druck und Wasserstandsdruck beaufschlagt. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, dass der gemessene Druck ein direktes Maß für den Wasserstand nach Gleichung 3-1 ist.

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g}$$

Gleichung 3-1

mit h Wassertiefe [m]
p Druck [Pa]
ρ Dichte des Wassers [kg/m³]

Die Umrechnung der gemessenen Drücke in den Wasserstand kann auch über eine mitgelieferte Software automatisch durchgeführt werden. Der Messbereich der Druckmessdose liegt zwischen 0 und 1000 mBar, was einer Wassersäule von 10 m entspricht. Die Toleranz liegt bei +/- 0,1 % des Messbereichs [DRIESEN + KERN, 2006].

Technische Daten:

Modell: P-LOG520-PR, Firma DRIESEN + KERN
Messintervalle: 0,05 s bis 24 h
Speicherkapazität: ca. 4 Mio. Messwerte

Messwerte	Toleranz	Messbereich
Temperatur (Kanal 1)	+/- 0,2°C	-20...+80°C
Relativdruck (Kanal 2)	+/- 0,1 % (vom Messbereich)	0...1 Bar

3.3.2 Strömungsmessgerät

Für die Strömungsmessungen wurde ein ADCP³ Modell Workhorse Rio Grande (600 kHz, Abbildung 3-8) der Firma RD INSTRUMENTS verwendet.

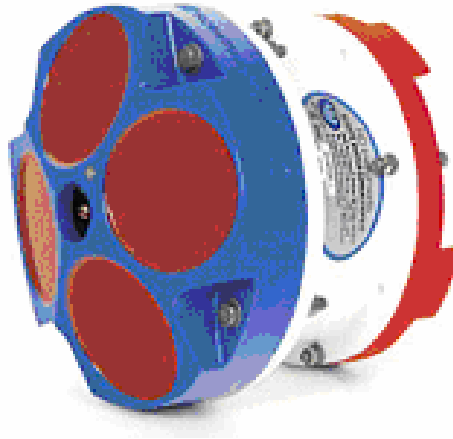


Abbildung 3-8: Acoustic Doppler Current Profiler [RD INSTRUMENTS, 2006]

Mit Hilfe des ADCP's können Strömungsgeschwindigkeiten dreidimensional über die Tiefe gemessen werden. Das Messprinzip basiert auf dem „Doppler-Effekt“. Dieser besagt, dass sich die beobachtete Schallfrequenz je nach relativer Bewegung von Sender und Empfänger zueinander ändert. Bei der Messung wird vom ADCP ein Ultraschallimpuls mit einer bekannten Frequenz von 600 kHz ausgesandt und von den Schwebstoffteilchen im Wasser reflektiert. Die Wassertiefe wird in diskrete Tiefenzellen unterteilt, für welche dann jeweils eine Mittelung der gemessenen Geschwindigkeiten vorgenommen wird. Die Frequenzverschiebung der reflektierten Impulse verhält sich proportional zur Strömungsgeschwindigkeit, wobei sich die Zuordnung zu einer Tiefenzelle aus der Laufzeit des reflektierten Impulses ergibt.

Das Gerät kann sowohl stationär als auch vom bewegten Boot aus eingesetzt werden. Sofern das ADCP an Bord eines Bootes, an einem Schwimmer oder an einer Seilanlage einer Pegelstation installiert wird, kann mit ihm das Geschwindigkeitsprofil entlang des Schiffskurses bzw. des Regelquerschnittes an der Messstation bestimmt werden.

Technische Daten:

Modell: Workhorse Rio Grande (600 kHz), Firma RD Instruments

Gewicht in Luft: 7,6 kg

Gewicht in Wasser: 2,2 kg

max. Betriebstiefe: 200 m

Betriebstemperatur: -5 bis 45 °C

Datenübertragung: I/O RS232 und RS422

Baud Rate: 9.600 (standard), 115.200 (download)

Geschwindigkeitsprofile:

Größe der Tiefenzellen: 0,1 - 8,0 m

Anzahl der Tiefenzellen: 1 – 256

Messbereich: < 5 m/s (default), < 20 m/s (max.)

³ ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler

Programm-Modi	Zellengröße [m]	min. Tiefe [m]	max. Tiefe [m]
General Profiling	1,0	4,0	53,0
Shallow Water	0,1	0,5	7,0
Shallow+Slow	0,1	0,9	7,0

3.4 Montage der Messgeräte

Zur Vermeidung von unerwünschten Bewegungen und zum Schutz der Druckmessdose im Wasser, wurde eine Betonvorrichtung erstellt, an der die Druckmessdose befestigt wurde. Diese Vorrichtung wiegt ca. 75 kg und ist U-förmig ausgeführt worden (Abbildung 3-9).



Abbildung 3-9: Einbau der Pegel

Sie wurde über Ringschrauben und Schäkkel an einer Rundstahlkette (nach DIN 5685, ND 7) befestigt. Die Kette wurde über Innengewindeanker und Ringschrauben in der Kaje verankert. Die Versorgungsspannung und die Ausleseeinheit befinden sich in einer Alu-Kombibox auf der Kaje.

3.5 Datenspeicherung und Datenlücken

Die Speicherung der Messwerte erfolgte mit 4 Hz im Dauerbetrieb. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Schiffswellen (primäres und sekundäres Wellensystem) korrekt erfasst werden. Der Pegel hat eine Speicherkapazität von rund 4 Millionen Messwerten und kann somit einen Messzeitraum von 11,5 Tagen abdecken. Die Pegel wurden während der Messkampagne insgesamt 5 – mal ausgelesen (12.09.2006, 21.09.2006, 02.10.2006, 12.10.2006 und 20.10.2006).

Von den insgesamt 20 Datensätzen waren 4 unbrauchbar bzw. nicht vorhanden, bedingt durch Schiffsstoß und einem damit verbundenem Defekt der Druckmessdosen (Abbildung 3-10) und durch einen Softwarefehler.



Abbildung 3-10: Defekter Pegel

4 Auswertung der Messdaten

4.1 Auswerteverfahren

Die gemessenen Wasserstände stellen eine Überlagerung von Tidewellen, Windwellen und Schiffswellen dar. Die Tide hat eine im Vergleich zu den beiden anderen Wellensystemen sehr lange Periode ($T_T \approx 12,5$ h). Windwellen entstehen überwiegend aus lokal erzeugtem Seegang und haben eine kurze Periode, die auf Grund der in Frage kommenden Windwirklängen und –dauern $T_W \leq 2$ s beträgt. Die Schiffswellen stellen eine Überlagerung mehrerer unterschiedlicher Wellensysteme dar. Auf Grund dieser unterschiedlichen Perioden der drei Wellensysteme sind die zu untersuchenden Schiffswellen einfach zu erkennen. Daher erfolgte die Auswertung der Wasserspiegelauslenkungen anhand der ungefilterten Messdaten.

Für vertäut liegende große Schiffe werden kurzperiodische Belastungen auf Grund ihrer Eigenfrequenz nicht wirksam. Dagegen wirken schiffserzeugte langperiodische Anteile in Abhängigkeit beider Schiffslängen (Festlieger und Vorbeifahrer) auf die Trossen. Die Trossenkräfte sind somit von der Amplitude des Absunks abhängig [BAW, 2006]. Aus diesem Grund wurde bei Post-Panmax Schiffen auf die Auswertung des sekundären Wellensystems verzichtet. Die Messungen wurden anhand der in Abbildung 4-1 dargestellten Parameter ausgewertet.

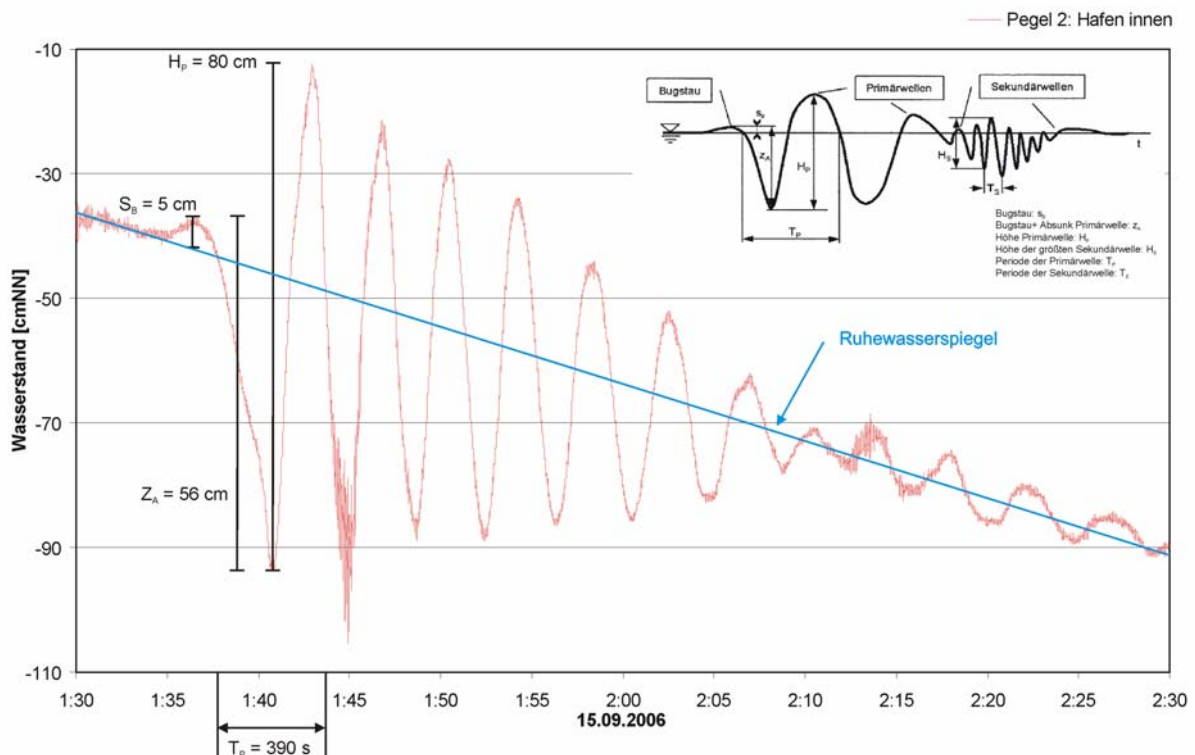


Abbildung 4-1: Bestimmung der Wellenparameter

- Bugstau: s_B ,
- Bugstau + Absink Primärwelle: z_A ,
- Primärwellenhöhe: H_P ,
- Periode der Primärwelle: T_P .

Bei der Auswertung an ungefilterten Messdaten ist zu beachten, dass es bei kurzperiodischen Wellen (bei den in diesem Fall vorliegenden Randbedingungen ab ca. $T < 20$ s) zu Ungenauigkeiten bei der

Umrechnung des gemessenen Druckes in einen Wasserstand nach Gleichung 3-1 kommen kann. Diese resultieren aus dem hydrodynamischen Druckanteil, der beim Durchgang einer Welle entsteht. Die Druckänderung in der Wassersäule beim Durchgang einer Welle lässt sich aus Gleichung 4-1 berechnen (siehe auch Abbildung 4-2):

$$p(t) = \rho \cdot g \cdot [\eta(t) \cdot \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} - z] \quad \text{Gleichung 4-1}$$

- mit H Wasserspiegelauslenkung (entspricht H/2) [m]
 k Wellenzahl [1/m] $\rightarrow k = \frac{2 \cdot \pi}{L_{\text{Welle}}}$
 L_{Welle} Wellenlänge
 D Wassertiefe (Ruhewasserspiegel) [m]
 Z Einbautiefe der Druckmessdose [m]

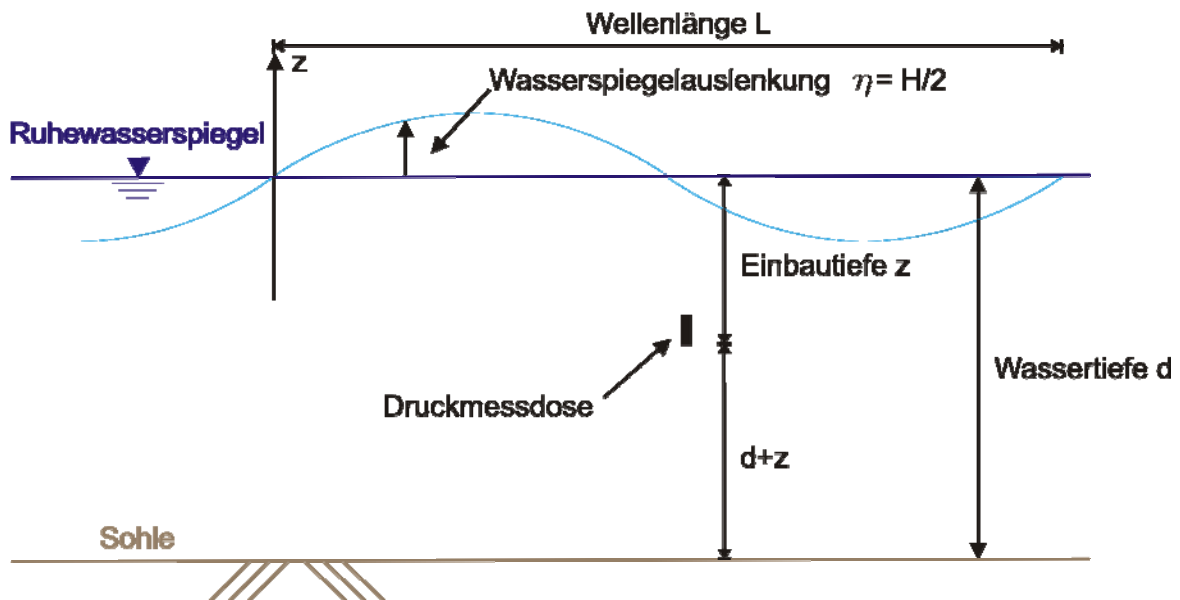


Abbildung 4-2: Parameter zur Bestimmung der Druckänderung in der Wassersäule beim Durchgang einer Welle

Dabei ist

$$R = \frac{\cosh[k \cdot (d + z)]}{\cosh(k \cdot d)} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

der Druckreduktionsfaktor. Er bezeichnet das Verhältnis von dynamischer Druckänderung zur Wasserspiegelauslenkung. Wie aus Abbildung 4-3 zu ersehen ist, wird dieser Faktor mit zunehmender Einbautiefe der Druckmessdose und mit abnehmender Wellenperiode geringer [EAK, 2002].

Da für die Bearbeitung dieses Projektes langperiodische Belastungen maßgebend waren, ($T > 120 \text{ s} \rightarrow R > 0,999$ bei MThw am Pegel 3) ist dieser Faktor nicht maßgebend und wurde daher nicht berücksichtigt.

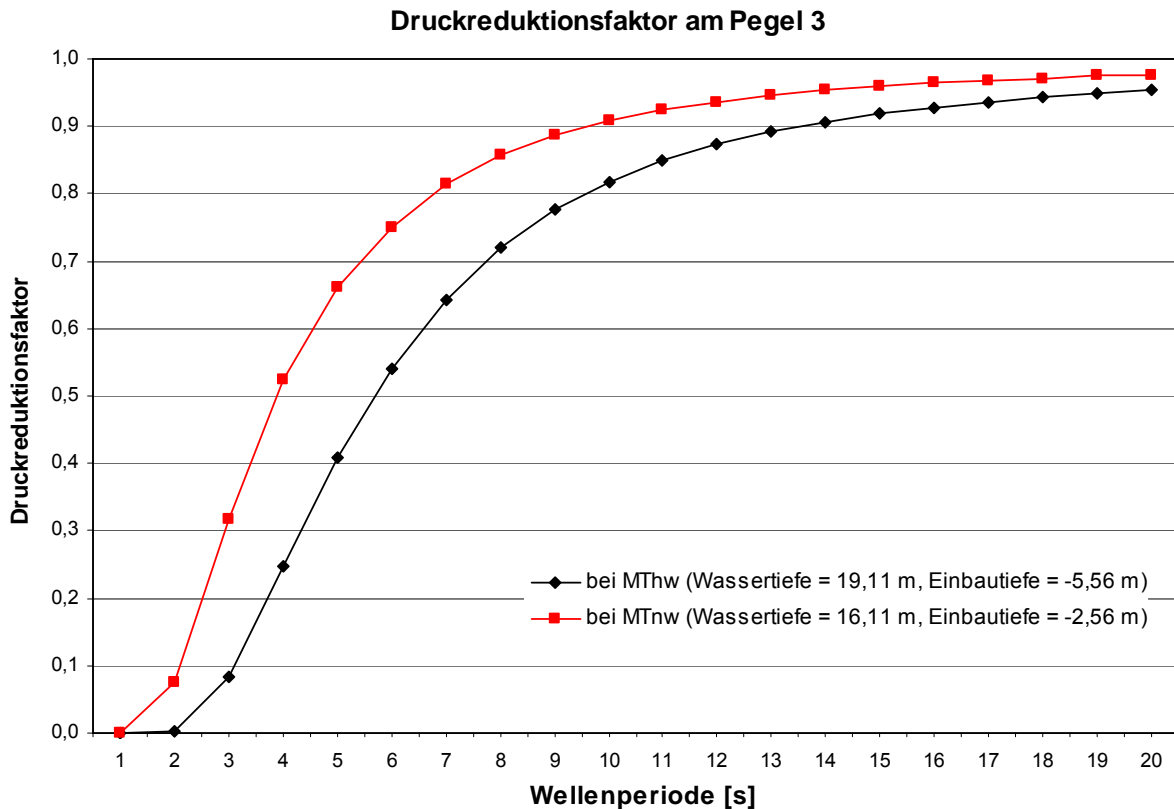


Abbildung 4-3: Druckreduktionsfaktor am Pegel 3 für MThw und MTnw

Der Resonanzeffekt im Hafenbecken wurde ebenfalls untersucht. Hierbei wurde das Dämpfungsverhalten der durch die Schiffspassagen verursachten Wellen untersucht. Es erfolgte eine Auswertung der Wellenhöhen an den Pegel 3 (Stromkaje außen) und 2 (Hafenbecken innen) jeweils zum Zeitpunkt der Schiffspassage und 20 Minuten später.

4.2 Zuordnung der Schiffspassagen

Nach der Identifikation der höchsten schiffsbedingten Wellen aus den ungefilterten Messdaten wurden für ausgewählte Ereignisse die Schiffspassagedaten für den in Frage kommenden Zeitraum von der Verkehrszentrale Brunsbüttel zur Verfügung gestellt. Diese Daten stellen einen Datenbankauszug der Schiffspassagen im 1-min-Raster um den Bereich des Hafens Stade-Bützfleth dar (Tabelle 4-1). Sie enthalten folgende Informationen:

- Schiffsname, Kennzeichen und Rufzeichen
- Länge, Breite und Tiefgang
- Fahrtrichtung (stromauf, -ab), Bestimmungshafen
- Fahrtgeschwindigkeit (über Grund), Kurs und Position (Elbe-km)

Die abdeckt. Auf diesem sind die Schiffspassagen in einem 1-min-Raster geplottet. Anhand dieser Karte wurden die Passageabstände ermittelt (Abbildung 4-4).

Tabelle 4-1: Ausgewählte Schiffspassagedaten der Verkehrszentrale Brunsbüttel [WSA BRUNSBÜTTEL, 2006]

Name	Richtung	Fahrtgeschwindigkeit v_s (über Grund) [kn]		Abmessungen $L_{\text{Schiff}} * b * T$ [m]	Uhrzeit	Pas- sierabstan- d L [m]
		x km vor dem Hafen	am Hafen			
08.09.2006						
Feederschiff 1	stromauf	2,0 km: 16,4	14,7	117 * 18,1 * 6,5	23:52:00	ca.230
Panmax 1	stromab	2,0 km: 14,5	12,3	260 * 32,3 * 9,2	23:52:00	ca. 320
09.09.2006						
Feederschiff 2	stromab	2,0 km: 15,3	14,3	177 * 27,3 * 8,0	00:06:00	ca. 285
10.09.2006						
Feederschiff 3	stromab	1,0 km: 17,7	17,4	99 * 18,4 * 6,2	00:05:00	ca. 395
Post-Panmax 1	stromauf	1,8 km: 14,0	9,4	299 * 40,0 * 11,6	00:08:00	ca. 250
14.09.2006						
Post-Panmax 2	stromauf	2,0 km: 16,5	16,9	334 * 42,8 * 12,7	18:02:00	ca. 230
20.09.2006						
Feederschiff 4	stromab	1,5 km: 18,8	14,3	117 * 18,1 * 6,5	10:35:00	ca. 395
Post-Panmax 3	stromauf	2,0 km: 14,4	11,5	300 * 40 * 12,8	20:30:00	ca. 215
21.09.2006						
Post-Panmax 4	stromauf	2,0 km: 14,2	14,2	334 * 42,8 * 12,3	20:35:00	ca. 285

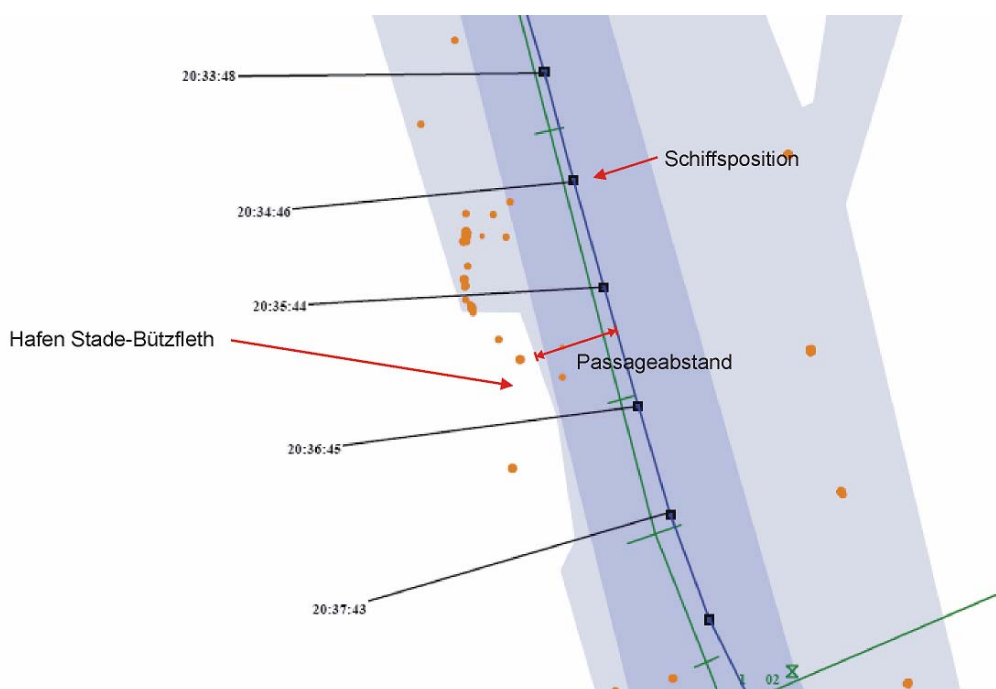


Abbildung 4-4: Ausschnitt aus dem Plot der Schiffspeditionen um den Hafen Stade-Bützfleth

Für den Zeitraum der Strömungsmessungen in der Hafeneinfahrt (18.10.2006 bis 20.10.2006) wurden die AIS-Daten der Schiffspassagen simultan zu den Messungen aufgezeichnet und ausgewertet (Tabelle 4-2). Zusätzlich wurden diese Schiffspassagen mit Digitalfotos dokumentiert (Abbildung 4-5).



Abbildung 4-5: Passage eines Post-Panmax Schiffes am 18.10.2006

Tabelle 4-2: AIS – Daten ausgewählter Schiffspassagen während der Messkampagne vom 18.10.2006 – 20.10.2006

Name	Richtung	Fahrtgeschwindigkeit v_s (über Grund)		Abmessungen $L_{\text{Schiff}} * b * T$ [m]	Uhrzeit	Pas- sierabstan- d L [m]
		x km vor dem Hafen [kn]	am Hafen [kn]			
18.10.2006						
Feederschiff 5	stromauf	1,0 km: 13,2	11,8	80 * 9 * 1,3	13:34:00	260
Post-Panmax 5	stromauf	3,0 km: 12,9	8,8	293 * 40 * 12,0	13:50:00	264
Feederschiff 6	stromab	4,0 km: 8,7	8,4	60 * 10 * 3,6	13:53:00	544
Feederschiff 7	stromab	2,0 km: 11,2	9,2	96 * 18 * 4,0	14:11:30	485
Feederschiff 8	stromauf	3,0 km: 10,6	10,8	114 * 13 * 2,8	14:15:00	196
Feederschiff 9	stromab	2,5 km: 12,7	12,8	183 * 28 * 8,5	14:15:00	500
Feederschiff 10	stromab	2,0 km: 17,2	16,2	136 * 20 * 7,3	14:31:30	454
Baggerschiff 1	stromab	2,0 km: 11,0	11,3	118 * 18 * 8,0	15:06:00	389
Feederschiff 11	stromab	1,5 km: 9,7	9,9	185 * 22 * 10,5	15:15:00	391
Feederschiff 12	stromab		11,8	126 * 18 * 6,4	15:19:00	334
Schnellboot 1	stromab		10,9	k.A. * k.A. * 0,8	15:26:00	128
Feederschiff 13	stromab		19,6	138 * 22 * 6,4	15:32:00	496
Post-Panmax 6	stromauf	2,0 km: 14,6	12,3	274 * 40 * 12,1	15:56:00	337
Panmax 2	stromab	3,0 km: 16,7	11,4	211 * 32 * 8,9	ca. 16:15:00	389
Feederschiff 14	stromab	3,5 km: 16,2	12,0	116 * 19 * 6,1	ca. 16:17:00	395
Post-Panmax 7	stromab	1,5 km: 12,0	14,7	275 * 40 * 11,2	ca. 16:42:00	336
Panmax 3	stromab	3,5 km: 17,3	15,0	207 * 29 * 10,7	17:32:00	396

19.10.2006						
Panmax 4	stromauf	2,0 km: 11,6	11,9	207 * 30 * 9,5	11:55:00	289
Post-Panmax 8	stromab	4,0 km: 12,4	7,9	332 * 43 * 12,7	12:40:30	350
Baggerschiff 2	stromauf	2,5 km: 13,8	9,2	118 * 18 * 8,0	12:42:30	187
Feederschiff 15	stromab	4,0 km: 12,5	12,3	111 * 16 * 6,6	13:01:00	523
Baggerschiff 3	stromab	3,0 km: 9,6	9,3	118 * 18 * 8,0	13:53:00	435
20.10.2006						
<i>Panmax 5</i>	<i>stromauf</i>	<i>1,5 km: 9,7</i>	<i>9,8</i>	<i>239 * 32 * 10,9</i>	<i>ca. 08:40:00</i>	<i>334</i>
Feederschiff 16	stromauf	k.A.	k.A.	99 * 17 * 5,4	09:02:00	291
Feederschiff 17	stromauf	4,0 km: 10,3	7,1	148 * 24 * 6,2	09:05:00	245
Feederschiff 18	stromauf	2,0 km: 13,5	8,7	100 * 19 * 5,6	09:15:30	190
Baggerschiff 4	stromab	2,0 km: 13,3	13,0	118 * 18 * 8,0	09:18:00	475
Post-Panmax 9	stromab	1,0 km: 14,1	14,1	290 * 45 * 10,4	09:37:00	389
Feederschiff 19	stromab	2,0 km: 16,8	14,0	98 * 16 * 4,5	09:53:00	405
Schnellfähre 1	stromab	2,0 km: 36,7	18,5	50 * 12 * 2,6	10:01:30	375

Name: kein Foto vorhanden

Name: keine AIS – Daten direkt am Hafen vorhanden

5 Ergebnisse

5.1 Feederschiffe und Schnellfähren

Schnell fahrende, stark motorisierte Feederschiffe (Abbildung 5-1) bzw. Schnellfähren (Abbildung 5-2) zeigen ein typisches Wellensystem kurzperiodischer hoher Wellen ($T = \text{ca. } 5 \text{ s}$, $H = 60 \text{ bis } 70 \text{ cm}$, ohne Berücksichtigung des Druckreduktionsfaktors). Weitere Charakteristika sind ein sehr geringer bis nicht vorhandener Bugstau und Absenk auf Grund des kleinen Rumpfquerschnittes und der schnellen Fahrt, die bei Schnellfähren schon als Gleitfahrt zu bezeichnen ist. Dies führt zu einer fast vollständigen Unterdrückung des primären Wellensystems. Auch ist die Dauer bis zum Abklingen des Ereignisses mit 2 bis 5 Minuten relativ gering.

Diese Charakteristika wurden jeweils am Pegel 3 (Stromkaje außen) gemessen. Auf die gemessenen Wasserstände der übrigen Pegel haben diese Ereignisse nur einen sehr geringen Einfluss.

Stromauf fahrende Schiffe erzeugen jedoch auf Grund der nach oberstrom gerichteten Hafeneinfahrt und des geringeren Passierabstandes eine größere Wellenunruhe im Nordhafen als stromab fahrende Schiffe.

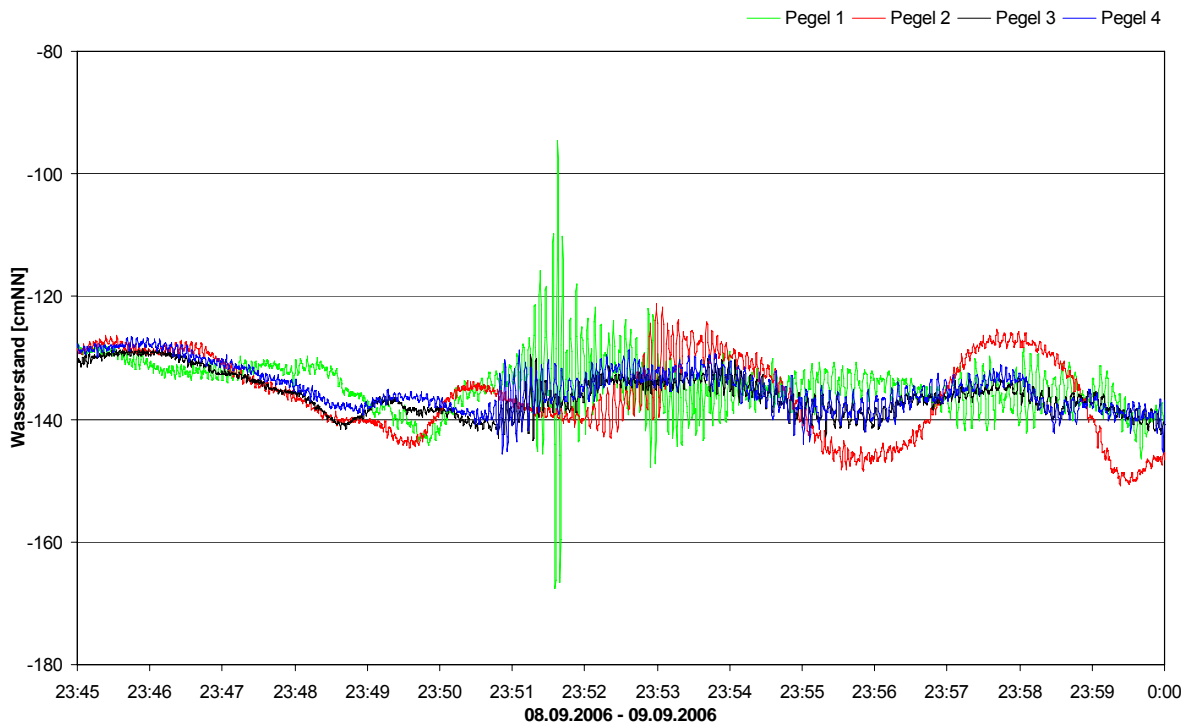


Abbildung 5-1: Typisches Wellenbild eines schnell fahrenden Feederschiffes (Feederschiff 1: Fahrtgeschwindigkeit über Grund: 14,7 kn, Fahrtrichtung: stromauf, Abmessungen: $L_{\text{Schiff}} \cdot b \cdot T = 117 \cdot 18,1 \cdot 6,5$)

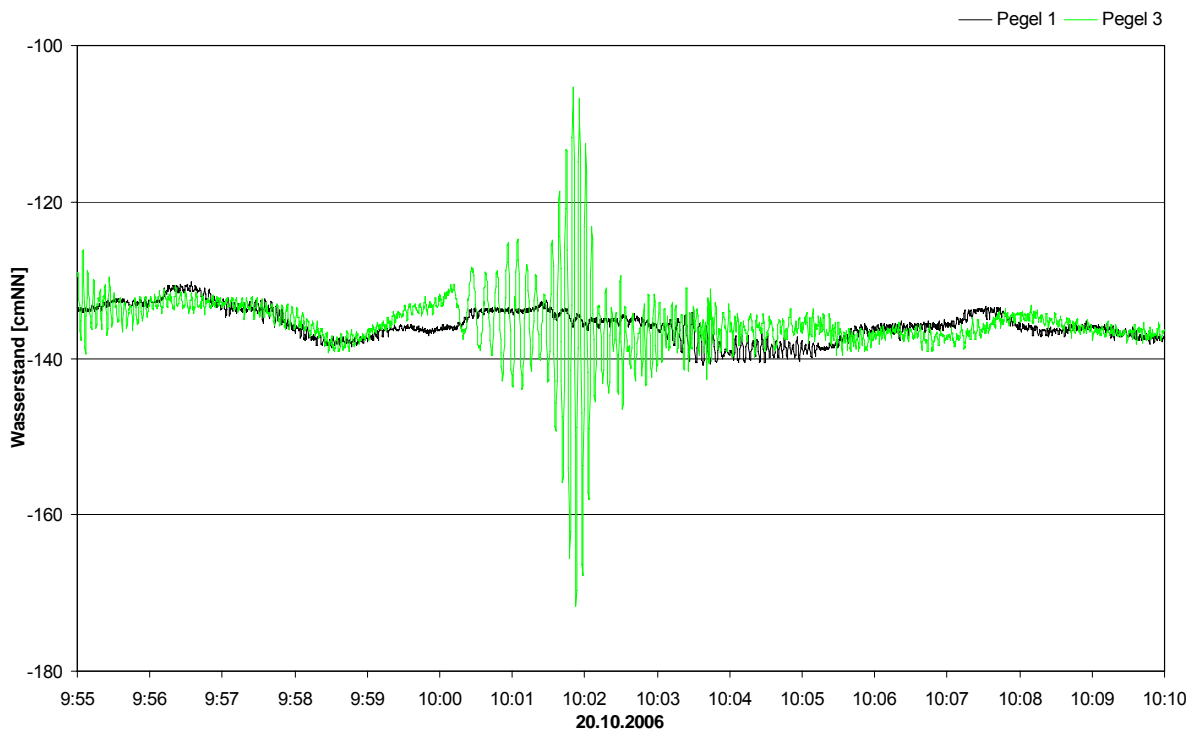


Abbildung 5-2: Typisches Wellenbild einer Schnellfähre (Schnellfähre 1: Fahrtgeschwindigkeit über Grund: 18,5 kn, Fahrtrichtung: stromab, Abmessungen: $L_{\text{Schiff}} * b * T = 50 * 12 * 2,6$)

Eine genauere Betrachtung der während der dreitägigen Strömungsmesskampagne aufgezeichneten AIS-Daten zeigt, dass Schnellfahrer im Bereich des Hafens Stade-Bützfleth die Fahrtgeschwindigkeit über Grund teilweise deutlich reduzieren. Die durchschnittliche Geschwindigkeitsreduzierung der zehn (bei der Passage des Hafens) schnellsten Feederschiffe bzw. Schnellfähren betrug 3,6 kn.

Abbildung 5-3 zeigt, beispielhaft für die Passage eines Schnellfahrers, die Auswertung der schiffsinduzierten Belastungen durch die Passage des Feederschiffes 4.

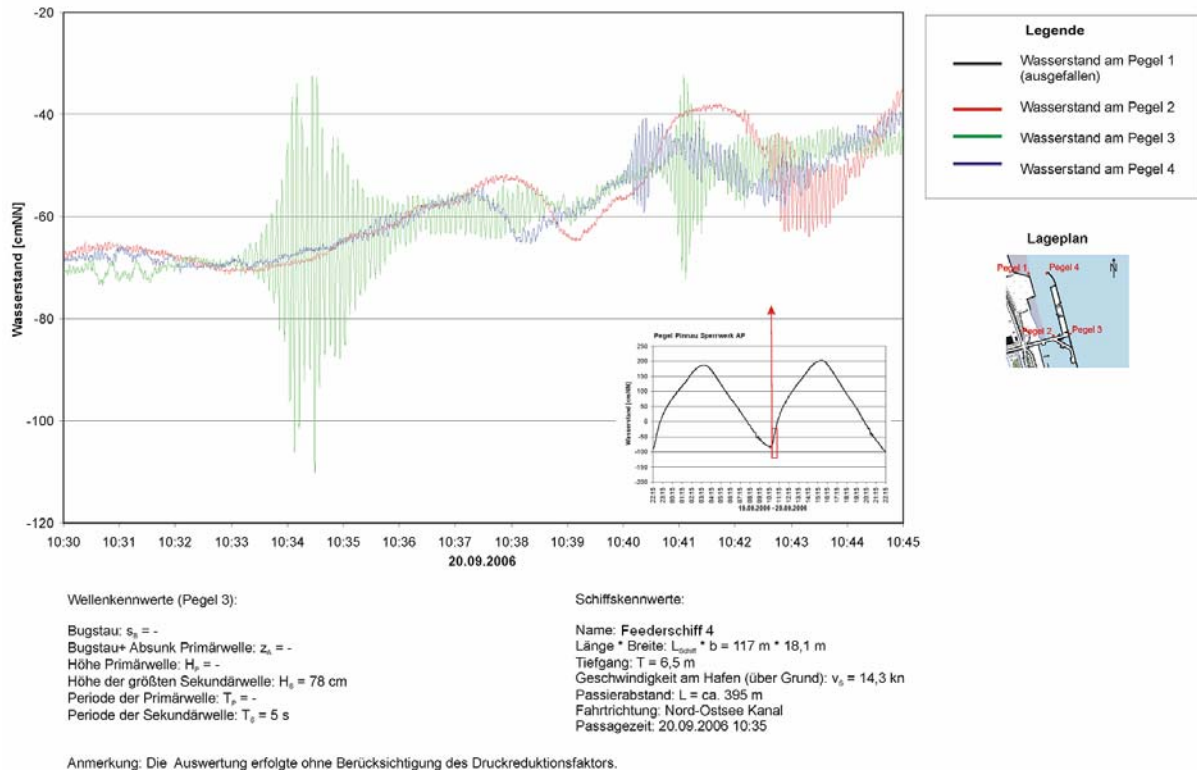


Abbildung 5-3: Darstellung der durch die Passage der Feederschiff 4 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen

5.2 Post-Panmax Schiffe

Bei der Zuordnung der maximal gemessenen primären Wellenhöhen an Pegel 2 (Hafenbecken) zu den Schiffspassagedaten ergab sich, dass diese jeweils von derselben Schiffsklasse hervorgerufen wurden (Post-Panmax Schiffe, Verdrängerfahrt). Diese Ereignisse fanden jeweils in den Abend- und Nachtstunden bzw. am frühen Morgen statt. Auffällig ist auch, dass die maximalen Ereignisse meist bei ablaufendem Wasser kurz vor Tideniedrigwasser stattfinden. Die verursachenden Schiffe sind vorwiegend stromauf (Richtung Hamburg) fahrende Schiffe. Sie passieren daher den Hafen Stade-Bützfleth in ca. 200-300 m Abstand. Charakteristisch für Wellenbilder von Post-Panmax Schiffen ist der große Absunk, der auf Grund der langen Dauer (Periode des Primärwellensystems: ca. 4-5 Minuten) zu hohen Strömungsbelastungen führen kann. Die Höhe der Wellen infolge des Bugstaus beträgt an Pegel 2 ca. 3 bis 10 cm.

Tabelle 5-1 fasst die wichtigsten Daten der drei maximalen Ereignisse zusammen. In Abbildung 5-4 bis Abbildung 5-6 befinden sich die detaillierten Auswertungen zu diesen drei Ereignissen.

Tabelle 5-1: Daten der drei maximalen gemessenen Wellenhöhen im Hafen Stade-Bützfleth

Ereignis	Primärwellenhöhe [cm]	Uhrzeit	Tidezeit	Name	Abmessungen [m]	Passierabstand [m]
1	142	20:35	Thw+4 h	Post-Panmax 4	334 * 42,8 * 12,3	ca. 285
2	112	18:02	Tnw+2 h	Post-Panmax 2	334 * 42,8 * 12,7	ca. 230
3	103	20:30	Thw+5 h	Post-Panmax 3	300 * 40,0 * 12,8	ca. 215

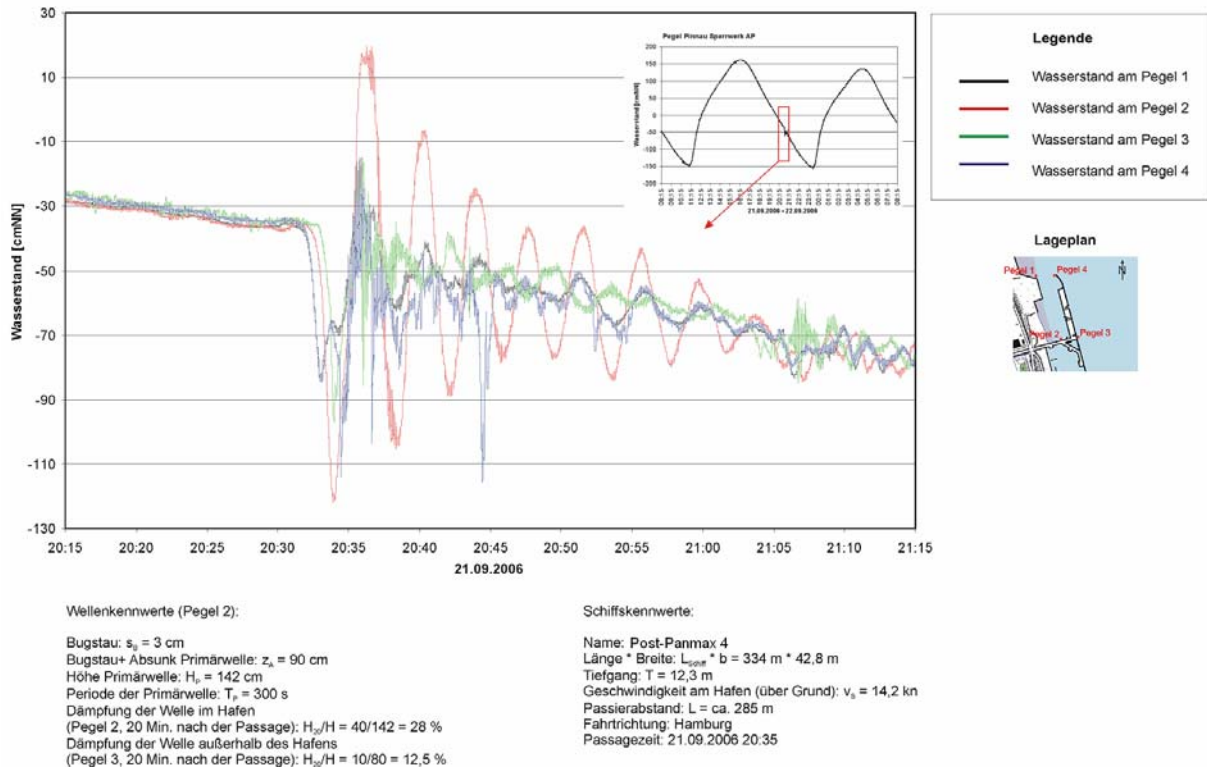


Abbildung 5-4: Darstellung der durch die Passage der Post-Panmax 4 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen

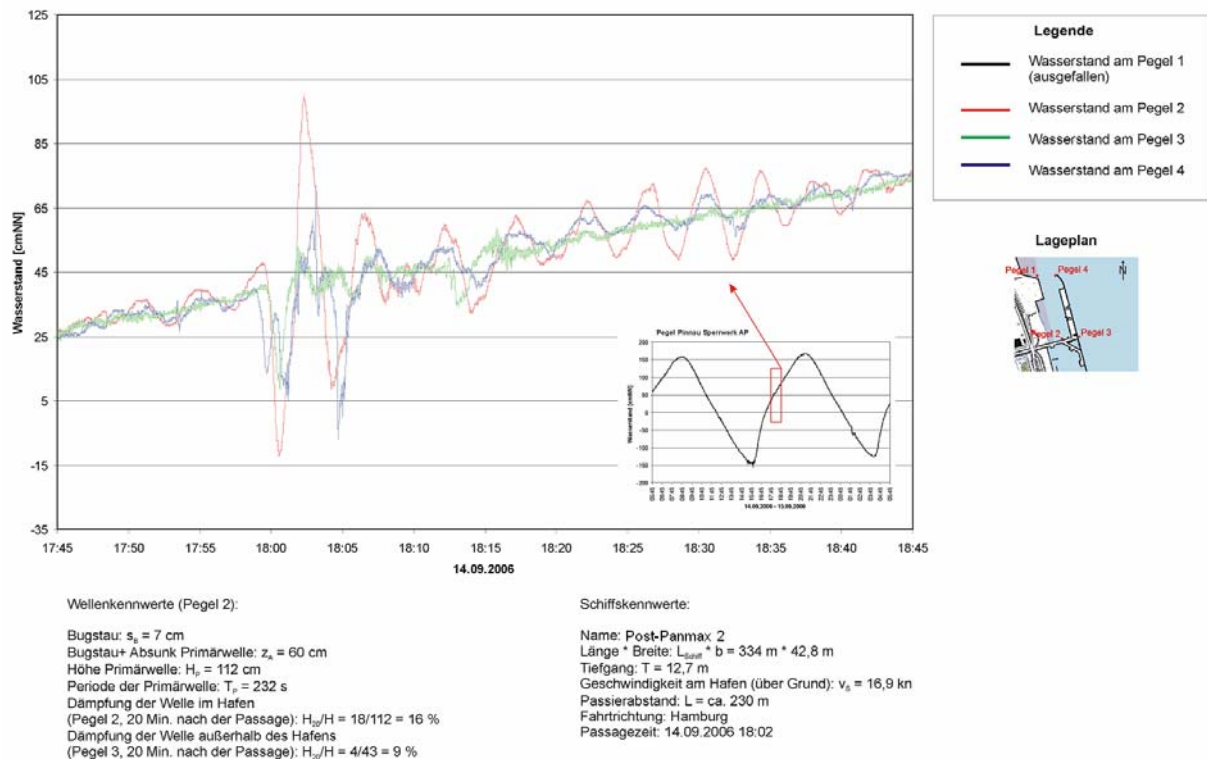


Abbildung 5-5: Darstellung der durch die Passage der Post-Panmax 2 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen

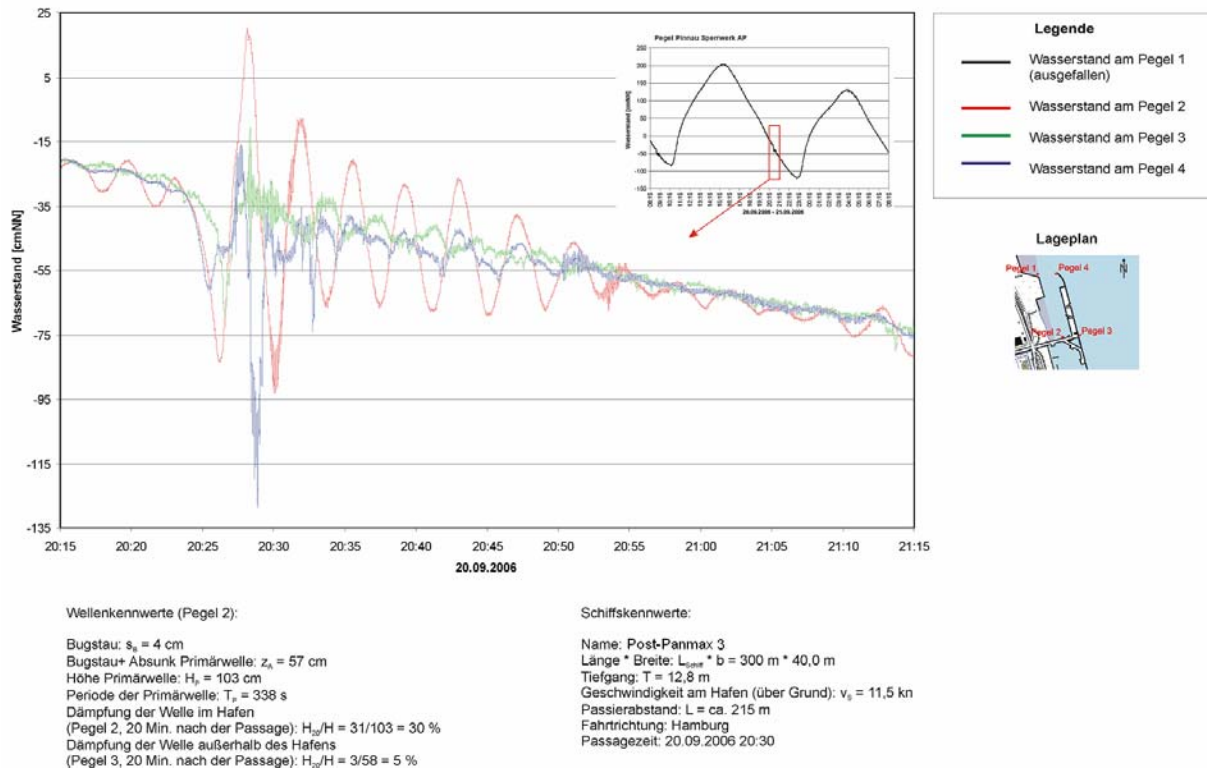


Abbildung 5-6: Darstellung der durch die Passage der Post-Panmax 3 am Hafen Stade-Bützfleth verursachten Wellen

Aus den gemessenen Daten ist abzuleiten, dass bei einem maximalen Ereignis im Hafenbecken des Nordhafens (Pegel 2) nicht zugleich ein maximales Ereignis an der elbseitigen Stromkaje (Pegel 3) aufgezeichnet wurde. Zwar werden auch an Pegel 3 deutliche Ausschläge gemessen, die Maximalereignisse sind aber anderen Ursachen zuzuordnen (Anlegemanöver an der Liegeposition „Außen“, siehe Kapitel: 5.3.1).

Ungewöhnlich sind die langperiodischen Wellen ($T = 4\text{-}5$ Minuten) an Pegel 2, die der Primärwelle folgen. Diese könnten Reflexionserscheinungen im Nordhafen zuzuschreiben sein.

An Pegel 1 und 4 finden die maximalen Ereignisse während der maximalen Ereignisse an Pegel 2 statt. Hierbei ist bei Pegel 4 zu beobachten, dass der Wasserstand zunächst früher sinkt (Absunk des Primärwellensystems) als an Pegel 2, da er an der Hafeneinfahrt positioniert ist. Der Absunk ist aber nicht so groß wie an Pegel 2. Danach erfolgt ein leichter Anstieg des Wasserstandes. Erst dann folgt der größte Absunk der an Pegel 4 gemessen wird (gleichbedeutend mit der höchsten an Pegel 4 gemessenen Welle, Abbildung 5-7). Dieser ist vermutlich eine lokale Erscheinung, deren Ursache die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im Nahbereich des Molenkopfes sind.

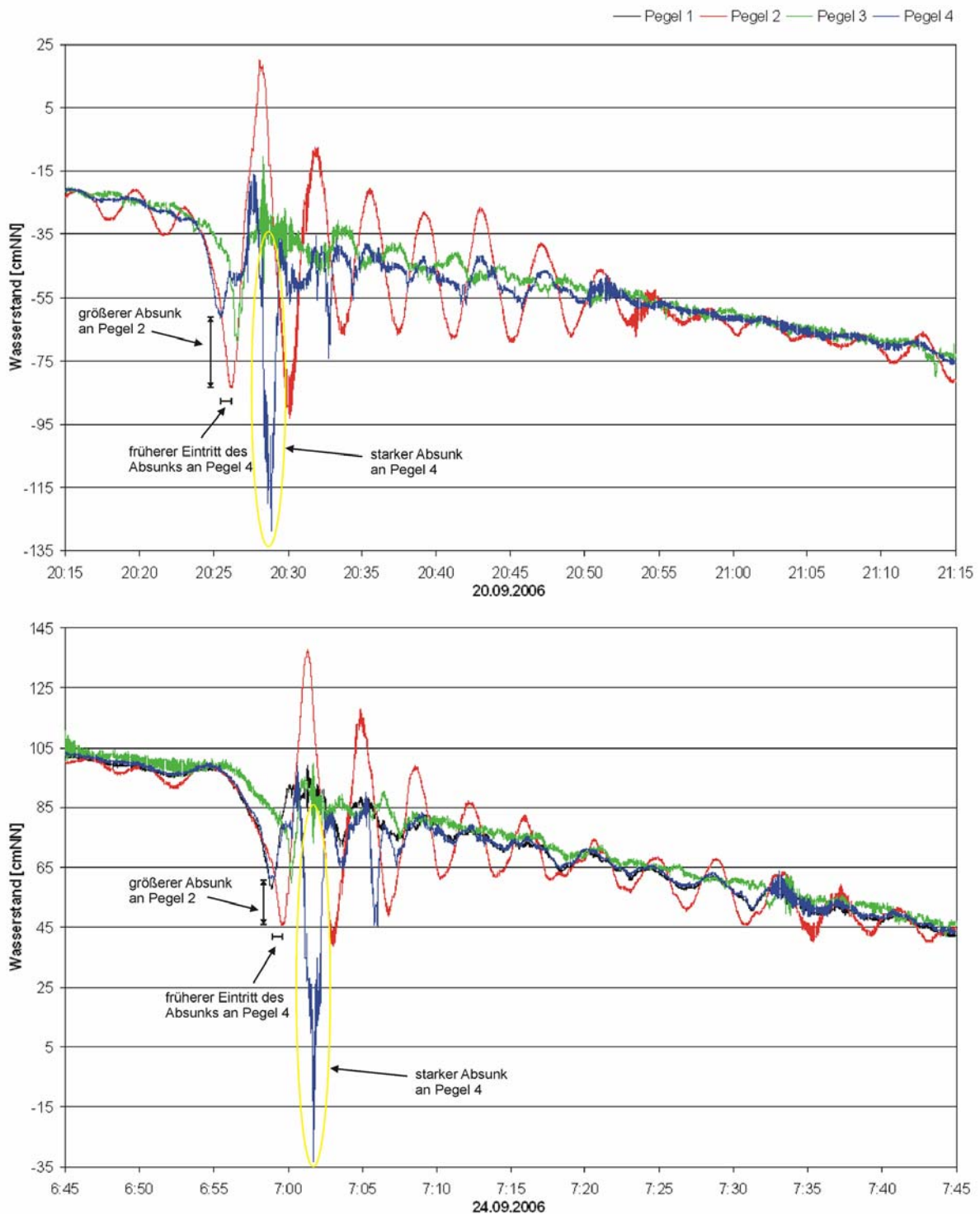


Abbildung 5-7: Starker Absunk an Pegel 4 (Molenkopf)

5.3 Zusätzliche Untersuchungen

5.3.1 An- und Ablegemanöver im Hafen Stade-Bützfleth

Es wurde untersucht, ob es bei An- und Ablegemanövern an den verschiedenen Liegeplätzen des Hafens Stade-Bützfleth zu erhöhten Wellenbelastungen kommt. Dazu wurden die Pegelmessungen jeweils eine halbe Stunde vor und nach dem Ein- bzw. Auslaufen der Schiffe (Tabelle 5-2) im Hafen untersucht.

Tabelle 5-2: Schiffs Liegezeiten im Hafen Stade-Bützfleth für den Zeitraum der Messkampagne [NIEDERSACHSEN PORTS, 2006]

Vorgang	Datum/Ein	Zeit /Ein	Datum/Aus	Zeit /Aus	Liegeplatz	BRZ	Tiefgang
3390	07.09.2006	01:30	07.09.2006	18:00	innen	3448	5,1
3411	09.09.2006	06:52	13.09.2006	20:00	außen	37661	12,68
3404	11.09.2006	15:40	12.09.2006	17:00	innen	1959	4,6
3397	12.09.2006	07:25	12.09.2006	20:30	ufer	5939	4,5
3424	15.09.2006	05:45	15.09.2006	23:15	außen	4061	6,84
3429	15.09.2006	15:30	16.09.2006	13:00	innen	3086	3,55
3430	15.09.2006	20:34	16.09.2006	19:30	ufer	5581	7,45
3428	17.09.2006	07:40	17.09.2006	12:00	innen	1264	3,7
3444	20.09.2006	23:00	20.09.2006	14:00	ufer	861	3,97
3454	22.09.2006	18:00	23.09.2006	03:00	innen	1373	4,3
3447	22.09.2006	05:10	22.09.2006	14:40	ufer	6944	8,56
3464	25.09.2006	18:20	27.09.2006	14:15	außen	16807	9,6
3471	27.09.2006	06:30	28.09.2006	00:00	innen	1275	3,85
3470	28.09.2006	08:50	02.10.2006	01:00	außen	36636	12,5
3480	29.09.2006	19:35	30.09.2006	10:20	ufer	7556	8,9
3495	01.10.2006	15:20	02.10.2006	03:00	innen	2516	3
3500	02.10.2006	12:00	06.10.2006	14:00	außen	40605	13,15
3504	06.10.2006	13:40	06.10.2006	05:00	innen	1156	3,55
3508	06.10.2006	15:15	07.10.2006	08:00	innen	1780	4,3
3522	07.10.2006	02:10	10.10.2006	16:20	ufer	2466	5,6

Generell haben die An- und Ablegemanöver keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf den Wasserstand. Abbildung 5-8 zeigt die Pegelaufzeichnungen am Pegel 2 für den Zeitraum des An- bzw. Ablegens eines Schiffes am Liegeplatz „Innen“. Es sind keine Auffälligkeiten auszumachen. Dasselbe gilt für den Liegeplatz „Ufer“ und „Außen“.

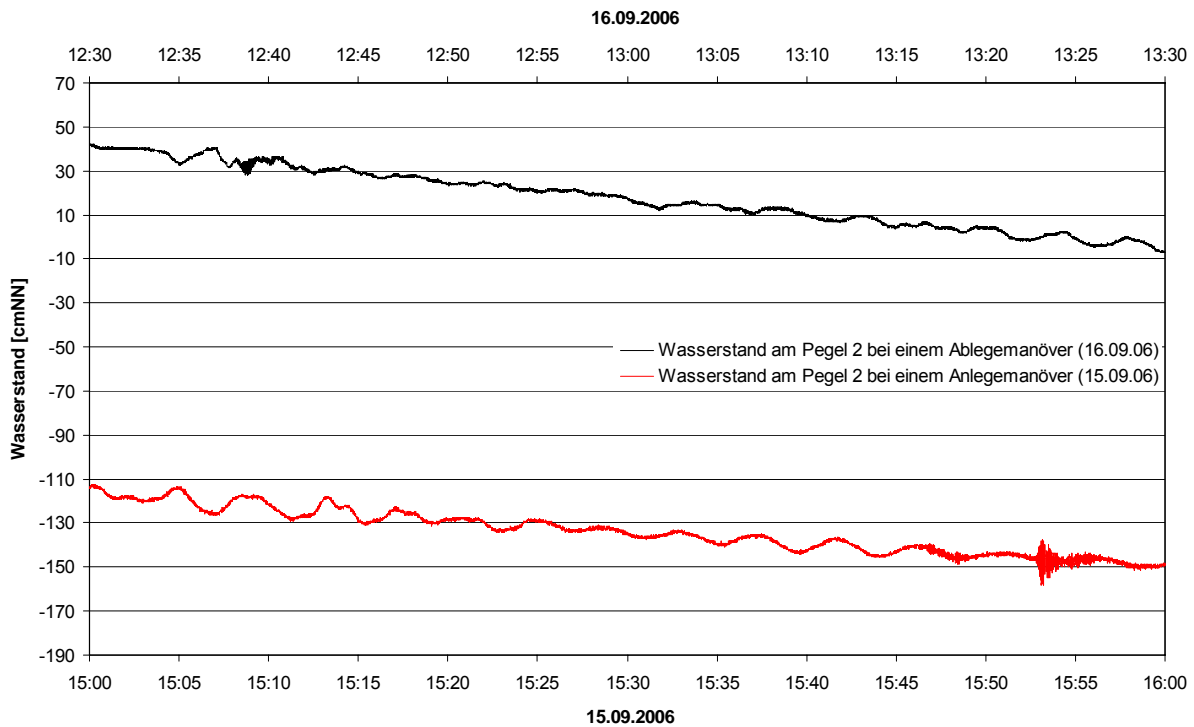


Abbildung 5-8: Wasserstandsänderungen bei An- und Ablegemanövern im Nordhafen (Vorgang 3429: Tiefgang: 3,55 m, BRZ: 3086)

Abweichend von diesen Erkenntnissen konnte bei den Auswertungen ein Ereignis identifiziert werden, bei dem es zu einem großen Absink während eines Anlegemanövers kam. Dieses Ereignis ist in Abbildung 5-10 (Anlegemanöver am Liegeplatz „Außen“, Absink $z_A = 148$ cm) dargestellt. Auffällig ist, dass der Absink nur an dem direkt neben dem Liegeplatz liegenden Pegel 3 zu verzeichnen ist. An den anderen drei Pegeln werden keine Ausschläge aufgezeichnet. Die Ursache dieses Effektes ist vermutlich der Einsatz eines oder mehrerer Querstrahlruder (Abbildung 5-9).

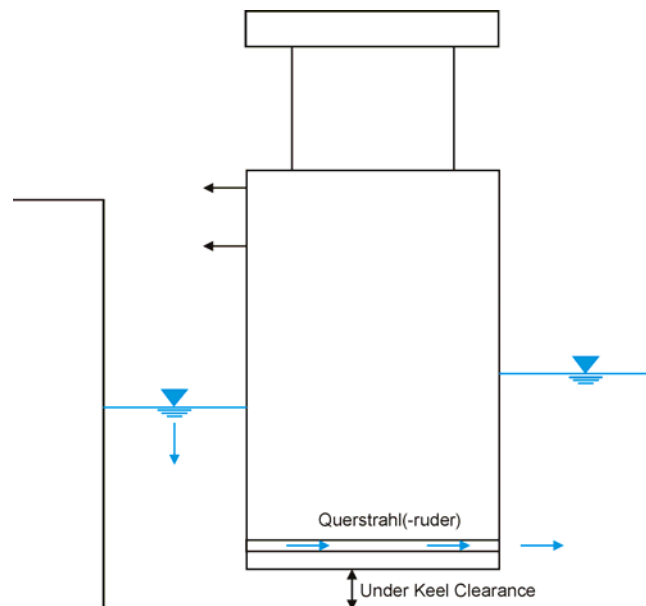


Abbildung 5-9: Beeinflussung des Wasserstandes durch den Einsatz eines Querruders

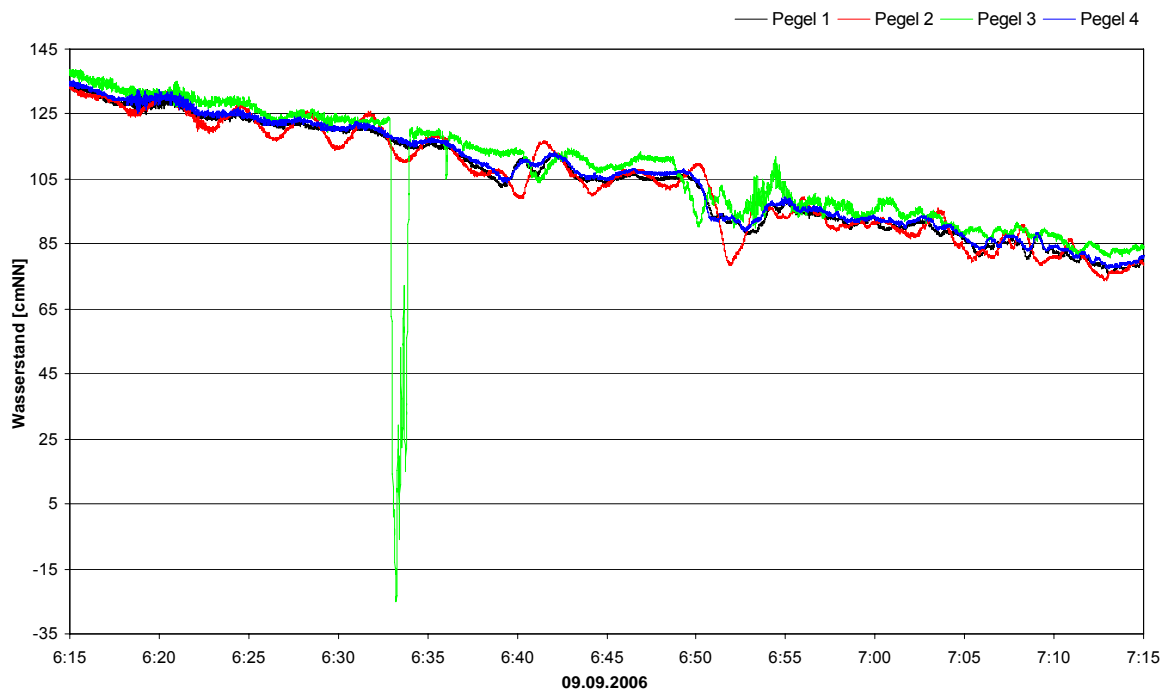


Abbildung 5-10: Absink am Pegel 3 (Stromkaje außen), verursacht durch ein Anlegemanöver (Vorgang 3411: Tiefgang: 12,68 m, BRZ: 37661)

5.3.2 Resonanzeffekt im Hafenbecken

Bei der Auswertung der Wellenereignisse an Pegel 2 fiel auf, dass es teilweise sehr lange dauert bis nach der Passage eines Post-Panmax Schiffes eine Beruhigung der Wellen im Hafenbecken eintritt. Daher wurde zusätzlich zu den charakteristischen Wellenparametern die Dämpfung des Schiffswellensystems im Hafenbecken untersucht. Um diese mit vom Hafenbecken unbeeinflussten Wellen vergleichen zu können, wurde bei demselben Ereignis auch die Dämpfung der Welle an der Stromkaje (Pegel 3) untersucht.

Abbildung 5-11 zeigt die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Parameter. In diesem Beispiel ergibt sich ein Verhältnis von:

$$\frac{H_{\text{Pegel 2}, t=20\text{Min}}}{H_{\text{Pegel 2}, t=0}} = x_2 = \frac{34}{80} = 42,5\% ,$$

und
$$\frac{H_{\text{Pegel 3}, t=20\text{Min}}}{H_{\text{Pegel 3}, t=0}} = x_3 = \frac{5}{44} = 11,4\% .$$

Damit berechnet sich die Dämpfung der Wellen an den Pegeln 2 und 3 zu:

$$D_{\text{Pegel 2}} = 1 - x_2 = 57,5\% ,$$

und
$$D_{\text{Pegel 3}} = 1 - x_3 = 88,6\% .$$

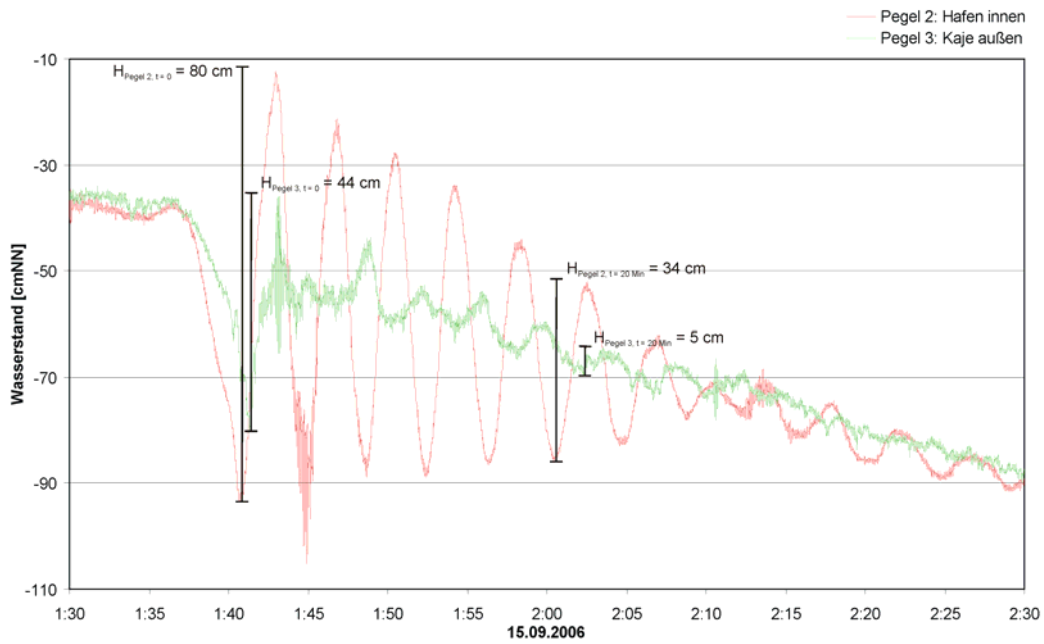


Abbildung 5-11: Dämpfung schiffsinduzierter Wellen im Hafenbecken und an der Stromkaje (außen)

Für die drei maximalen Ereignisse ergeben sich folgende Wellendämpfungen (Tabelle 5-3):

Tabelle 5-3: Dämpfung der maximalen Wellenereignisse

Ereignis	1	2	3
Höhe der Welle an Pegel 2 zum Zeitpunkt $t = 0$	142 cm	112 cm	103 cm
Höhe der Welle an Pegel 2 zum Zeitpunkt $t = 20$ Min	40 cm	18 cm	31 cm
Dämpfung	72 %	84 %	70 %
Höhe der Welle an Pegel 3 zum Zeitpunkt $t = 0$	80 cm	43 cm	58 cm
Höhe der Welle an Pegel 3 zum Zeitpunkt $t = 20$ Min	10 cm	4 cm	3 cm
Dämpfung	87,5 %	91 %	95 %

Bei Ereignis 2 fällt auf, dass die Dämpfung an Pegel 2 nach 20 Minuten deutlich größer ist, als bei den übrigen Ereignissen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass dieses Ereignis als einziges bei auflaufendem Wasser gemessen wurde.

6 Zusammenfassung

Im Hafen Stade-Bützfleth des Tideflusses Elbe wurden an vier Positionen Wasserstandsmessungen über einen Zeitraum von ca. 42 Tagen durchgeführt. Für die Messungen wurden Druckmessdosen mit einer Messgenauigkeit von +/- 0,1 % des Messbereiches eingesetzt. Die Messdaten wurden mit 4 Hz erfasst und kontinuierlich gespeichert.

Auf Grund der klar voneinander zu trennenden Wellensysteme (Tide-, Wind- und Schiffswellen) wurde die Auswertung anhand der Rohdaten vorgenommen. Die Messungen hatten das Ziel, die schiffsinduzierten Belastungen und deren Verursacher zu ermitteln und zu dokumentieren. Die Verknüpfung der gemessenen Wellen mit den dazugehörigen Schiffspassagedaten (Schiffsname, Länge, Breite, Tiefgang, Position, Passierabstand und Fahrgeschwindigkeit über Grund) geschah mit Hilfe der Verkehrszentrale Brunsbüttel, die für ausgewählte Extremereignisse die entsprechende Daten zur Verfügung stellte. Des Weiteren wurden an drei Tagen zusätzlich Strömungsmessungen in der Hafeneinfahrt mit gleichzeitiger Dokumentation der Schiffspassagedaten anhand eines AIS-Systems durchgeführt.

Die Auswertungen zeigten, dass die höchsten Belastungen durch Post-Panmax Schiffe in Verdrängerfahrt während der Abend- und Nachtstunden bzw. am frühen Morgen verursacht werden.

Als maximales Ereignis (Primärwellenhöhe: 142 cm, Wellenperiode: 5 Minuten) konnte die Passierfahrt der Post-Panmax 4, stromauf fahrend bei einem Passierabstand von ca. 285 m und einer Fahrgeschwindigkeit über Grund von 14,2 kn, identifiziert werden.

Auch durch schnell fahrende Feederschiffe bzw. Schnellfähren in Gleitfahrt werden hohe kurzperiodische Wellen erzeugt (Periode: ca. 5 Sekunden, Sekundärwellenhöhe: 60-70 cm, ohne Berücksichtigung des Druckreduktionsfaktors), die jedoch für vertäute Großschiffe nicht wirksam werden.

Daher sind die höchsten gemessenen Wellenereignisse von Schiffen der Post-Panmax Klasse als Bemessungsereignis für eine spätere Berechnung der Trossenkräfte maßgebend.

Für eine dauerhafte Kontrolle der schiffsinduzierten Belastungen und deren Verursacher könnten kontinuierlich messende, kontaktfreie Pegel (z.B. Radarpegel) an den Messpositionen 2 und 3 (Hafenbecken Nordhafen und Stromkaje außen, auf Höhe des Betriebsgebäudes) eingerichtet und zusätzlich ein AIS-System betrieben werden, dessen Software ein kontinuierliches Aufzeichnen der Schiffspassagedaten ermöglicht. Mit diesen kostengünstigen Einrichtungen ist es jederzeit möglich, einem Wellenereignis einen Verursacher zuzuordnen.

7 Schrifttum

DRIESEN + KERN

P-LOG520-PR Pegellogger Rev.2.05 1.7, Bad Bramstedt, 2006

EAK

EAK 2002 - Empfehlungen für Küstenschutzwerke, Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen

Ertekin, R.C. et al

Ship Generated Solitons, 15th Symposium of Naval Hydrodynamics, Proceedings, 1985

FUEHRER, M.

Wechselbeziehungen zwischen Schiff und beschränktem Fahrwasser, Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin, Heft 49, 1985

GRONARZ, A.

Rechnerische Simulation der Schiffsbewegung beim Manövrieren unter besonderer Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Wassertiefe, Dissertation, Universität-Gesamthochschule Duisburg, 1997

LGN Hannover

Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen: Top50, 2004

NIEDERSACHEN PORTS

Kontrollpeilung, 2006

SCHNEEKLUTH, H.

Vorlesung Hydromechanik zum Schiffsentwurf, Verlag Koehler, 3. Auflage, 1988

Spingat, F.

Methodik zur Auswertung schiffserzeugter Belastungen aus Langzeitmessungen, Oldenburg, 1999

Uliczka, K. (BAW)

Weitere Informationen unter: <http://www.weseranpassung.de/>

Gutachten zur ausbaubedingten Änderung schiffserzeugter Belastungen, Gutachten der BAW, 5.02.10048.00-3, Hamburg, 2006

Internetquellen (Stand: Oktober 2006):

<http://www.rdinstruments.com/>

RD Instruments

<http://www.weseranpassung.de/>

Projektgruppe Weseranpassung

