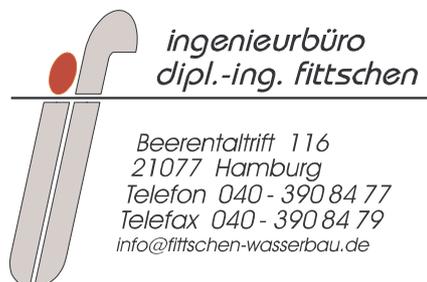
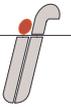




## Wellenmessungen an der Unterelbe - Schiffswellenmessungen -

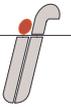
März 2003



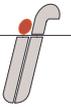


## Inhaltsverzeichnis

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG</b>    | <b>3</b>  |
| <b>2</b>   | <b>VORAUSSETZUNGEN UND RANDBEDINGUNGEN</b> | <b>4</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Messgerät</b>                           | <b>4</b>  |
| <b>2.2</b> | <b>Messpositionen</b>                      | <b>7</b>  |
| 2.2.1      | Messposition Wedel                         | 9         |
| 2.2.2      | Messposition Hetlingen                     | 11        |
| 2.2.3      | Messposition Stadersand                    | 13        |
| 2.2.4      | Messposition Ruthenstrom                   | 14        |
| <b>3</b>   | <b>DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN</b>          | <b>16</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Geräteeichung</b>                       | <b>16</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Umrechnung der Messdaten</b>            | <b>17</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Messzeitraum</b>                        | <b>17</b> |
| 3.3.1      | Messposition Wedel                         | 18        |
| 3.3.2      | Messposition Hetlingen                     | 18        |
| 3.3.3      | Messposition Stadersand                    | 18        |
| 3.3.4      | Messposition Ruthenstrom                   | 18        |
| <b>3.4</b> | <b>Berechnung der Schiffspassagedaten</b>  | <b>19</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Tideströmung</b>                        | <b>20</b> |
| <b>4</b>   | <b>AUSWERTUNG DER WELLENMESSDATEN</b>      | <b>21</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Auswertungsverfahren</b>                | <b>21</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Typische Wellenbilder</b>               | <b>23</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Statistik der Wellenparameter</b>       | <b>27</b> |
| 4.3.1      | Tagesmaxima                                | 27        |
| 4.3.2      | Wochenmaxima                               | 27        |
| <b>5</b>   | <b>STATISTISCHE DARSTELLUNG</b>            | <b>27</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Tagesmaxima</b>                         | <b>27</b> |
| 5.1.1      | Messposition Wedel                         | 27        |
| 5.1.2      | Messposition Hetlingen                     | 29        |
| 5.1.3      | Messposition Stadersand                    | 31        |
| 5.1.4      | Messposition Ruthenstrom                   | 33        |
| <b>5.2</b> | <b>Wochenmaxima</b>                        | <b>34</b> |



|          |                                    |           |
|----------|------------------------------------|-----------|
| <b>6</b> | <b>ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN</b>   | <b>35</b> |
| 6.1      | Messposition Wedel                 | 35        |
| 6.2      | Messposition Ruthenstrom           | 37        |
| <b>7</b> | <b>ZUSAMMENFASSUNG UND WERTUNG</b> | <b>39</b> |
| <b>8</b> | <b>LITERATUR</b>                   | <b>42</b> |
| <b>9</b> | <b>VERZEICHNIS DER ANLAGEN</b>     | <b>43</b> |



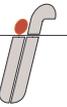
## 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Mit Schreiben vom 6. Februar 2002 beauftragte das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg Wellenmessungen an der Elbe mit dem Ziel, schiffserzeugte Wellen an vier verschiedenen Positionen an der Unterelbe zu erfassen.

Anlass dieser Wellenmessungen war die Beobachtung, dass in letzter Zeit ein erhöhter Wellenauflauf und eine Zunahme der Belastung an Bau- und Deckwerken festgestellt wurde und daher die Ursachen bzw. Verursacher genauer ermittelt werden sollten.

Da der Auftraggeber nach dem vorliegenden Kenntnisstand davon ausgeht, dass die erhöhten Schiffsgeschwindigkeiten kurz- und mittelfristig zu erheblichen Schäden an Hafenanlagen und Ufern führen werden, sollten im Rahmen der hier dargestellten Untersuchung die schiffserzeugten Belastungen dokumentiert werden.

Hierzu sollten die erhobenen Messdaten mit den Schiffsdaten der Verkehrszentrale Brunsbüttel verknüpft werden, um die ermittelten Schiffswellen den verursachenden Schiffen und ihren Charakteristika (Länge, Breite, aktueller Tiefgang und Fahrgeschwindigkeit, Fahrtrichtung) zuordnen zu können. Unter Einbeziehung der Daten einer Untersuchung der Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste zu den tideabhängigen Strömungsverhältnissen in der Unterelbe sowie des Tidewasserstandes zum Zeitpunkt der Messungen sollten die Fahrgeschwindigkeiten über Grund auf Fahrgeschwindigkeiten durch das Wasser korrigiert werden.



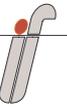
## 2 Voraussetzungen und Randbedingungen

### 2.1 Messgerät

Die Messungen wurden mit einem Gerät durchgeführt, das nach dem Schwimmerprinzip funktioniert. (Abbildung 1).



**Abbildung 1**  
**Messgerät mit Schwimmer neben einem Dalben**

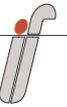


Es handelt sich um ein 8,10m langes vertikal eingebautes Edelstahlrohr, das der Führung eines Schwimmkörpers dient und die Messelektronik enthält. Das eigentliche Messprinzip beruht auf der Aufzeichnung des Wegs, den der Schwimmer vertikal zurücklegt. Die Positionsermittlung erfolgt dabei berührungsfrei durch einen Magneten im Schwimmkörper (Abbildung 2), die Auflösung des Messgeräts beträgt 1cm.



**Abbildung 2**  
**Schwimmer**

Die Speicherung der Messwerte erfolgte in einem Datenlogger (Abbildung 3) mit einer Abtastrate von 10 Werten pro Sekunde im Dauerbetrieb, lediglich um Mitternacht wurde ein System-Check durchgeführt, durch den dann für etwa 45 Sekunden keine Daten aufgezeichnet wurden.

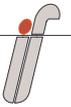


**Abbildung 3**  
**Datenlogger**

Die Wandlung der analogen Weggröße erfolgt im Messgerät; es erfolgt eine Umsetzung auf RS485, so dass Entfernungen bis zu etwa 2km bis zum Datenlogger überbrückt werden können. Durch die Umsetzung auf digitale Werte bereits im Messgerät wird der Einfluss von Störungen minimiert.

Die Montage der Geräte erfolgt mit Klemmschellen an einem Hilfsrohr (mit Ausnahme der Station Hetlingen), so dass eine individuelle, nachträgliche Justage der Höhenlage möglich war (Abbildung 4). Außerdem wurden die Befestigungspunkte des Messgeräts am Hilfsrohr so gewählt, dass die Geräte allein generell ohne Tauchereinsatz während etwa 1,5 Stunden bei mittlerem Tideniedrigwasser aus- oder eingebaut werden können, um bei Beschädigungen oder Ausfällen kurzfristige Reparaturarbeiten zu ermöglichen.

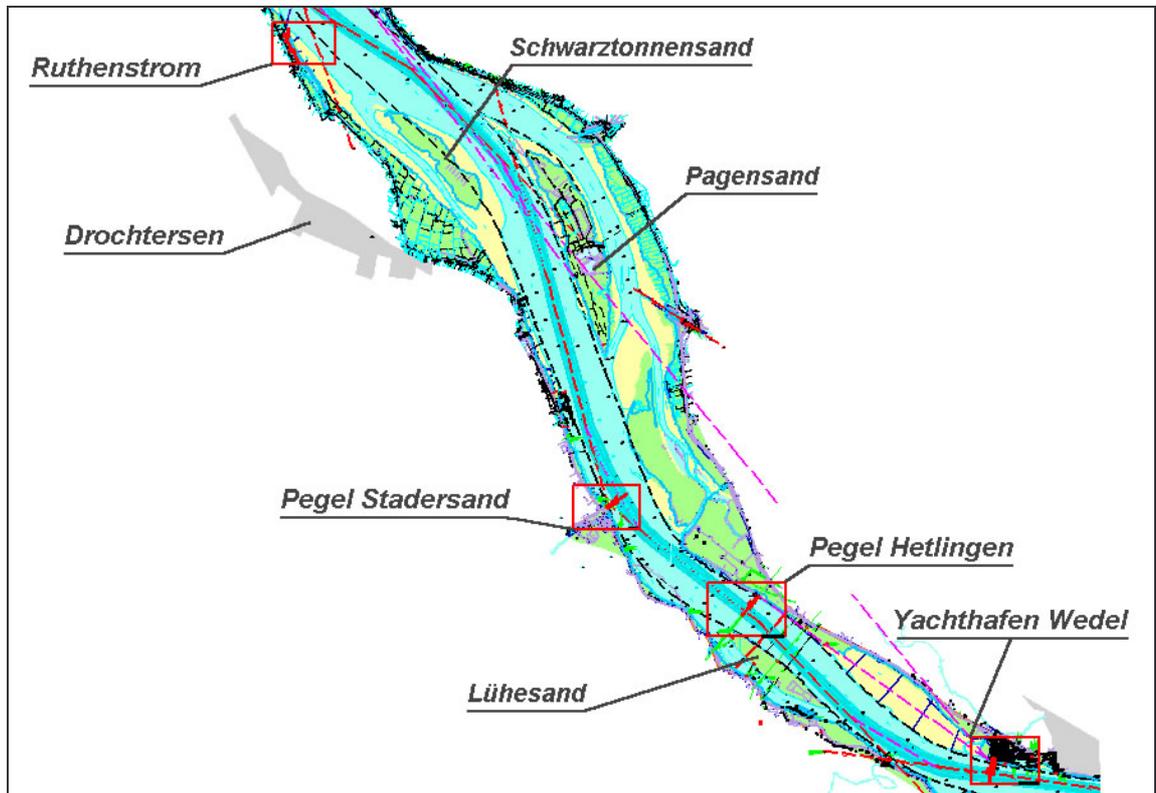
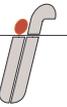
Für den Einbau des Hilfsrohres war nur an einer Position ein Tauchereinsatz erforderlich, da das Hilfsrohr dort nicht wie vorgesehen, neben dem vorhandenen Dalben in den Untergrund gedrückt werden, sondern knapp oberhalb der Hafensohle mit einem Abstandshalter am vorhandenen Dalben des Schwimmstegs verschraubt werden sollte.



**Abbildung 4**  
**Montage eines Hilfsrohrs**

## 2.2 Messpositionen

Die Messkampagne wurde an insgesamt 4 Messpositionen auf der Unterelbe zwischen Hamburg und Glückstadt durchgeführt, wie sie in Abbildung 5 dargestellt sind.



**Abbildung 5**  
**Messpositionen an der Unterelbe**

Ausgehend von Hamburg handelt es sich um folgende Positionen:

Pos. 1: Wedel

Innerhalb der westlichen Einfahrt des Hafens der Hamburger Yachthafengemeinschaft, Wedel.

Pos. 2: Hetlingen

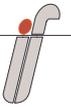
Am Schiffsanleger der Radarplattform an der Hetlinger Schanze.

Pos. 3: Stadersand

Am Lattenpegel des Pegels Stadersand neben dem Schiffsanleger.

Pos. 4: Ruthenstrom

Im Ruthenstrom am westlichen Dalben des Anlegers der Hatecke-Werft.

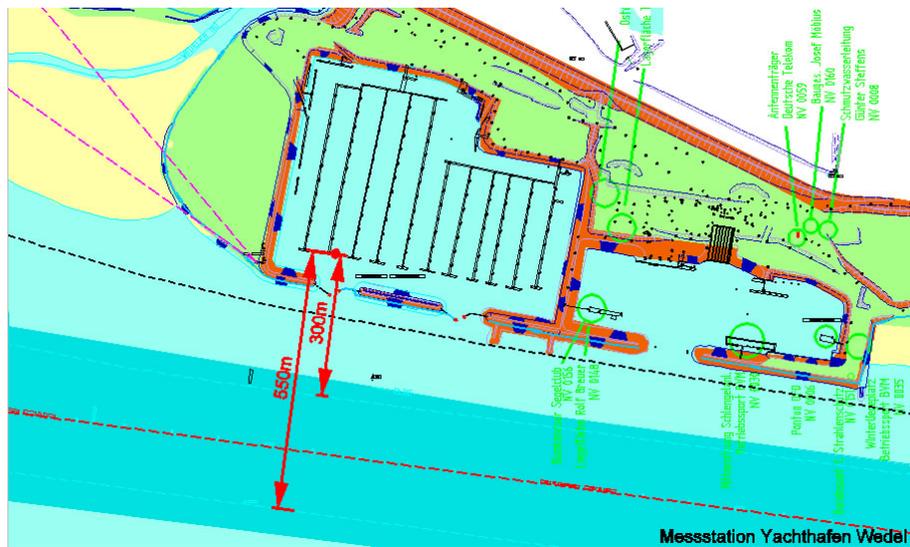
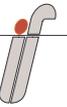


### 2.2.1 Messposition Wedel

Die Einbauposition des Messgeräts befindet sich am östlichen Dalben des Kopfstegs an Schlängel M in der Nähe der westlichen Hafeneinfahrt (Abstand etwa 80m) bei Elbe-km 643,0. Die Situation zwischen Einfahrt und Messposition gibt Abbildung 6 wieder, die Lage im Hafen ist zusammen mit den Abständen zu den Fahrrinnenrändern in der Abbildung 7 eingetragen.



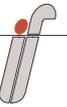
**Abbildung 6**  
**Blick von Schlängel M in Richtung westliche Hafeneinfahrt**



**Abbildung 7**  
**Messposition im Hafen Wedel**

Das in Abbildung 6 erkennbare Hilfsrohr musste in ausreichend großem Abstand zum Dalben montiert werden, um die Freigängigkeit der Schwimmstege zu gewährleisten. Die Befestigungspunkte des Hilfsrohrs wurden so gewählt, dass sie unterhalb des während der Messungen zu erwartenden niedrigsten Niedrigwassers und oberhalb des höchsten Hochwasser liegen.

Die Stromzuführung erfolgte über einen Kabelaufroller vom Schwimmsteg aus zum Dalbenkopf, an dem auch der Datenlogger in hochwasserfreier Höhe montiert war (Abbildung 8).

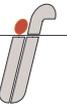


**Abbildung 8**  
**Meßgerät und Datenlogger am Schwimmsteg in Wedel**

### **2.2.2 Messposition Hetlingen**

Die Radarplattform Hetlinger Schanze, an deren Anleger das Messgerät installiert wurde, befindet sich am rechtsseitigen Ufer unter dem Hochspannungsmast bei Strom-km 650,6 (Abbildung 9).

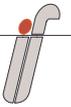
Der Mast ist im Wasser auf einer Pfahlrostgründung errichtet. Der Schiffsanleger für diese Plattform befindet sich auf der Fahrwasserseite im Bühnenstrich. Das Wellenmessgerät wurde an der oberstromigen Seite des Dalbens angebracht (Abbildung 10).



**Abbildung 9**  
**Messposition an der Radarplattform Hetlingen**



**Abbildung 10**  
**Blick elbabwärts auf den Anleger an der Radarplattform**

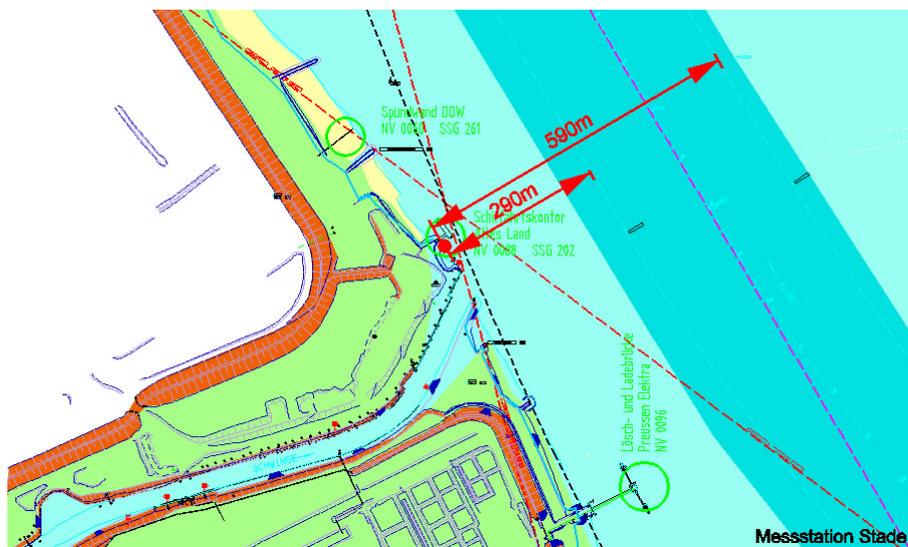


### 2.2.3 Messposition Stadersand

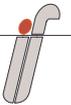
Entgegen der ursprünglich vorgesehenen Position am Anleger des Kraftwerks Stade wurde das Messgerät am Dalben des Lattenpegels zwischen der Schwingemündung und dem Anleger Stadersand montiert (Abbildung 11). Dies erfolgte aus Gründen der besseren Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten, vor allem aber wegen der insbesondere um die Zeiten der Tidekenterung an der ursprünglich geplanten Position auftretenden, erheblichen Strömungsgeschwindigkeiten.

Die Messposition liegt auf Höhe von Elbe-km 654,9.

Abbildung 12 zeigt die Örtlichkeit, aufgenommen vom Pegelgebäude stromabwärts Richtung Fähranleger Stadersand.



**Abbildung 11**  
**Messposition Stadersand**



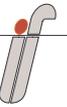
**Abbildung 12**  
**Blick vom Pegelgebäude über den Pegel in Richtung des Fähranlegers**  
**Stadersand**

#### **2.2.4 Messposition Ruthenstrom**

Anders als die bisher genannten Positionen befindet sich diese Messposition nicht nur in einer größeren Entfernung vom Fahrwasser (Talfahrer etwa 850m, Bergfahrer etwa 1150m auf der Elbe), sondern zusätzlich auch etwa 900m in einem Nebenarm der Elbe, dem Ruthenstrom (Abbildung 13). Für die Bestimmung der Schiffspassagedaten wurde der Elbe-km 670,3 zu Grunde gelegt.

Der Ruthenstrom verläuft in unmittelbarer Nähe zur Elbe, ist aber bei normalen Wasserständen oberhalb der Mündung in die Elbe von dieser getrennt und besitzt einen trapezförmigen Querschnitt. Die Wassertiefen sind auf Grund der recht hohen Verschlickungsrate bei Niedrigwasser nur gering.

Das Messgerät wurde wie in Wedel mit einem Hilfsrohr am westlichen Dalben der Steganlage der Hatecke-Werft befestigt. Der Fußpunkt des Hilfsrohres wurde in den Boden gedrückt, das obere Rohrende mit einer Schelle am Dalben



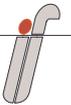
befestigt (Abbildung 14). An der oberen Schelle wurde auch der Datenlogger montiert.



**Abbildung 13**  
**Messposition Ruthenstrom**



**Abbildung 14**  
**Messgerät im Ruthenstrom (Blick in Richtung Mündung)**



### 3 Durchführung der Messungen

Für die Untersuchungen standen zwei Messgeräte zur Verfügung, daher wurden die Messungen zunächst in Wedel und in Hetlingen durchgeführt und in einer zweiten Phase dann in Stadersand und Drochtersen.

#### 3.1 Geräteeichung

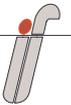
Beide Messgeräte wurden vor und nach der Messung geeicht.

Aufgrund des mechanischen Aufbaus sind Messwertabweichungen nur durch Nichtlinearitäten des AD-Wandlers und des Widerstandsnetzwerks möglich. Daher wird für die Eichung die Linearität des Geräts überprüft, indem der Schwimmer in festgelegten Intervallen bewegt und der zugehörige Messwert aufgezeichnet wird. Für die Eichung werden die Messwerte genauso wie im Messbetrieb mit 10Hz aufgezeichnet.

Für die Eichung wurde am Gerät ein Bandmaß befestigt und der Schwimmer manuell im 0,50m-Raster zunächst vom Tiefpunkt nach oben und dann wieder nach unten bewegt. An jeder Stufe wurde der Schwimmer für einige Sekunden (etwa 2s entsprechend etwa 20 Messwerten) festgehalten, bevor er weiter bewegt wurde.

Für die Auswertung dieser Eichdaten wurden die Daten einer Stufe jeweils gemittelt. Die Auswertung dieser Werte über lineare Regression ergab für beide Messgeräte ein Bestimmtheitsmaß  $R=1$ , d.h. es gibt bei einer Auflösung von 1cm keine messbaren Linearitätsabweichungen. Dies entspricht vollkommen den Erwartungen, da der verwendete AD-Wandler mit 16Bit (=65536 Schritte) Auflösung eine rund 80x bessere Auflösung als das Messgerät selbst hat.

Die nach Abschluss der Messungen durchgeführte Eichung ergab keine messbaren Veränderungen der Regressionsfaktoren.



## 3.2 Umrechnung der Messdaten

Über die bei der Eichung ermittelte Regressionsgleichung kann ein Messwert in eine physikalische Höhe ab Fußpunkt des Geräts umgerechnet werden, so dass das Messgerät bei Einmessung auf Pegelnull auch als Pegel verwendet werden könnte.

Diese Einmessung erfolgte nicht.

Durch Vergleich mit benachbarten Pegeln wurde daher die jeweilige Einbauhöhe der Messgeräte abgeschätzt, so dass die Ergebnisse bezogen auf Pegelnull berechnet wurden. Aufgrund der fehlenden Höheneinmessung ist mit einer Abweichung dieser Werte von etwa +/- 5cm zu rechnen. Eine Einschätzung der jeweils zutreffenden Tidephase für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit ist aber in jedem Fall mit ausreichender Genauigkeit möglich.

## 3.3 Messzeitraum

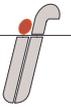
Die ausgewerteten Zeiträume der Stationen betragen jeweils 28 Tage. Aufgrund von Stromausfällen und anderen Störungen des Messbetriebs mussten teilweise auch nicht zusammenhängende Zeiträume (Stadersand) betrachtet werden:

Wedel: von Fr 17.05.2002 bis Do 13.06.2002

Hetlingen: von Di 30.04.2002 bis Di 28.05.2002 (1 Tag Störungen)

Stadersand: von Mo 01.07.2002 bis So 14.07.2002 und  
von Mo 22.07.2002 bis Mo 29.07.2002 und  
von Mo 12.08.2002 bis So 18.08.2002

Ruthenstrom: von Di 02.07.2002 bis Mo 29.07.2002



### **3.3.1 Messposition Wedel**

Nachdem zunächst die Montage der Halterung am Dalben wegen Passproblemen verschoben werden musste, und die Endmontage des Messgeräts auch tidebedingt erst mit etwa 2,5 Wochen Verzögerung erfolgte, liefen die Messungen bis auf kurze Ausfälle während der Wartungsarbeiten störungsfrei.

### **3.3.2 Messposition Hetlingen**

Nach Montage des Messgeräts begann direkt der Messbetrieb, der bis auf eine längere Unterbrechung von etwa einem Tag störungsfrei verlief. Die Unterbrechung des Messbetriebs war auf den erforderlichen Austausch eines Schnittstellenwandlers zurückzuführen.

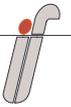
### **3.3.3 Messposition Stadersand**

Die Messungen in Stadersand verliefen zunächst für etwa 2 Wochen, von sehr kurzen Ausfällen im Minutenbereich abgesehen, weitgehend störungsfrei. Dann allerdings kam es innerhalb kurzer Zeit zu mehreren längerdauernden Ausfällen, deren Ursachen zunächst nicht zu ermitteln waren, da die Ausfälle nicht reproduzierbar waren. Abschließend stellte sich heraus, dass eine Lötstelle (im digitalen Bereich des Messgeräts) offensichtlich fehlerhaft war und bei den teilweise hohen Temperaturen im Pegelgebäude zu Unterbrechungen führte.

Nach der Reparatur verlief die letzte Woche der Messungen wieder vollkommen störungsfrei.

### **3.3.4 Messposition Ruthenstrom**

Nach der Inbetriebnahme stellte sich am nächsten Werktag heraus, dass die Stromversorgung der Steganlage aus versicherungsrechtlichen Gründen an den Betriebsstrom der Werft gekoppelt ist und damit nur von etwa 5:30 bis 20:00



zur Verfügung steht. In Absprache mit der Hatecke-Werft konnte kurzfristig eine getrennte Leitung mit Dauerstrom zur Verfügung gestellt werden, so dass die Messungen im Anschluss an diesen Umbau störungsfrei, und nur durch Wartungsarbeiten unterbrochen, durchgeführt werden konnten.

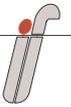
### 3.4 Berechnung der Schiffspassagedaten

Die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Schiffsdaten stellen einen Datenbankauszug der Schiffspeditionen im 5-min-Raster um den Bereich der Messstelle dar. Aufgrund des 5-min-Rasters, das nicht unterschritten werden konnte, musste der überwachte Raum sehr groß gewählt werden, um auch für schnelle Schiffe (Katamaranfahren  $\geq 30\text{kn}$ ) mindestens einen Messpunkt ober- bzw. unterhalb der jeweiligen Messposition zu erhalten.

Die Schiffspeditionen sind nicht durch kartesische Koordinaten, sondern lediglich durch den Elbe-km gespeichert. Dadurch ist die genaue Passageentfernung leider nicht genau bestimmbar; auf Grund der Fahrtrichtung und unter Berücksichtigung der nautischen Situation (Tidewasserstand, Tiefgang, Überholer, Begegnung) kann lediglich der wahrscheinliche Kurs im Fahrwasser abgeschätzt werden.

Zusätzlich zur Schiffspedition und dem Zeitpunkt der Aufnahme ist u.a. Schiffsname, Länge, Breite, Tiefgang und die aktuelle Fahrgeschwindigkeit über Grund gespeichert.

Aus diesen Daten wurden die jeweils nächsten Positionen eines Schiffes direkt ober- und unterstromig ermittelt und durch Interpolation der Passagezeitpunkt an der Messstelle ermittelt. Die für die Passage zu Grunde gelegte Geschwindigkeit wurde als Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen den beiden Berechnungsgrenzen ermittelt. Die so errechneten Geschwindigkeiten wurden durch Vergleich mit der Rumpfgeschwindigkeit (nur bei Verdrängerschiffen) und den Geschwindigkeiten, die zu den beiden Berechnungspunkten gespeichert waren, auf Plausibilität geprüft.



Im Schnitt ergaben sich so für die Messpositionen zwischen 100 und 120 registrierte Passagen pro Tag.

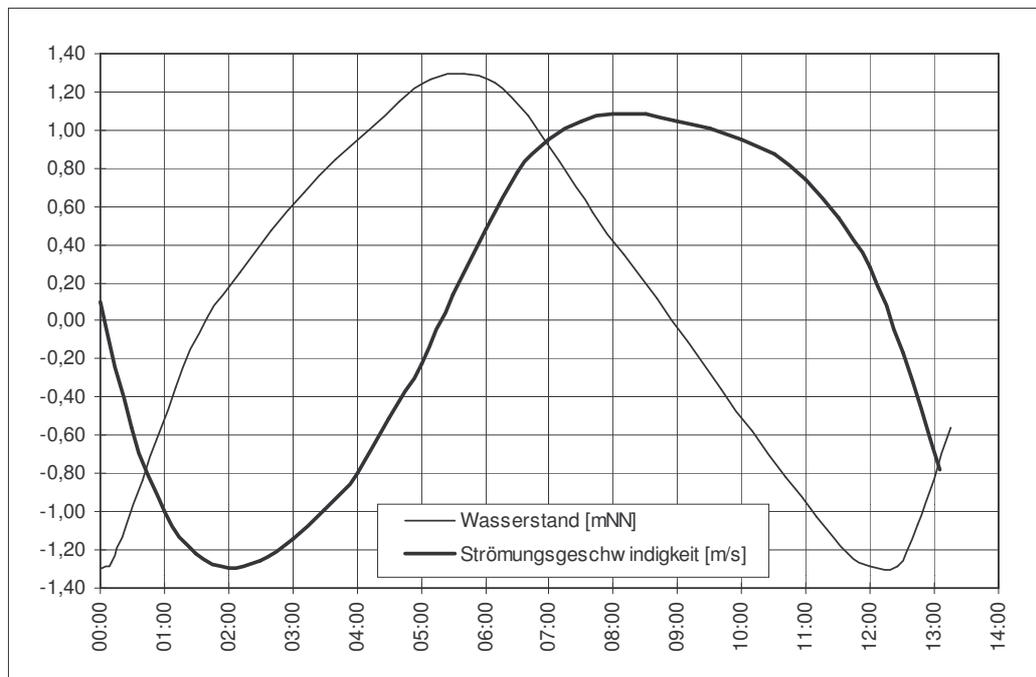
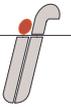
### 3.5 Tideströmung

Die zum jeweiligen Messzeitpunkt herrschenden Strömungsverhältnisse werden benötigt, um die tatsächlich gegenüber dem Wasser gefahrene Geschwindigkeit zu ermitteln.

Da keine zeitgleich durchgeführten Strömungsmessungen im Fahrwasserquerschnitt vorliegen, wurden stattdessen die Geschwindigkeiten auf der Basis der von der Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste durchgeführten Untersuchung zur Tidedynamik des Elbeästuars (CD, BAW 1997) abgeschätzt. Hierzu wurden für jede Messposition aus den flächenhaften Darstellungen die im Zeitraster von einer Stunde verfügbaren Strömungsdaten für den Bereich der Fahrrinne aus der Daten-CD ermittelt. Nachdem ein Vergleich der so ermittelten Werte ergab, dass die Geschwindigkeitsdifferenzen im Fahrwasser der vier Querschnitte gering sind, wurde für alle Positionen eine mittlere Funktion der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrwasser über eine Tide gebildet (Abbildung 15).

Die Zuordnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit zur Wellenmessung erfolgte über die Tidephase, also den Zeitraum seit dem letzten Tideniedrigwasser.

Eine Unterscheidung für unterschiedlich hoch auflaufende Tiden wurde nicht vorgenommen.



**Abbildung 15**  
**Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fahrwasser (Basis: BAW 1997)**

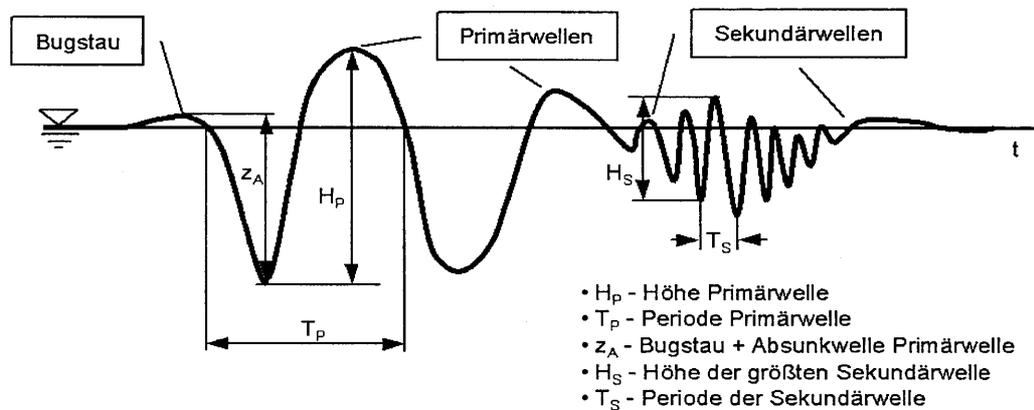
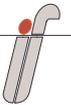
## 4 Auswertung der Wellenmessdaten

### 4.1 Auswertungsverfahren

Die Wellenmessungen stellen eine Überlagerung von Windwellen und den von vorbeifahrenden Schiffen erzeugten Wellen dar.

Da die Windwellen durch überwiegend lokal erzeugten Seegang entstehen, ist ihre Periodendauer kurz und beträgt auf Grund der in Frage kommenden Windwirklängen und -dauern  $T_p \leq 2s$ .

Die schiffserzeugten Wellen stellen selbst eine Überlagerung unterschiedlicher Wellensysteme dar, beispielsweise charakterisiert durch die Darstellung in Abbildung 16.

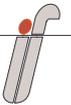


**Abbildung 16**  
**Definition der von einem fahrenden Schiff erzeugten Wellen**

Grundsätzlich ist das erzeugte Wellensystem als Überlagerung von Bugstau, Primär- und Sekundärwellen vorstellbar, deren jeweilige Größe in jedem Fall von der Fahrtgeschwindigkeit beeinflusst wird.

Die Höhe des Bugstaus hängt dabei in erster Linie von der Bugform und dem Verhältnis von Fahrtgeschwindigkeit im Wasser zur Rumpfgeschwindigkeit ab. Die Ausbildung des Primärwellensystems wird außer von der Fahrtgeschwindigkeit vor allem von Rumpflänge und -form und dem Verhältnis von Rumpf zu Gewässerquerschnitt geprägt, während der Antrieb und die Heckform großen Einfluss auf das Sekundärwellensystem haben, insbesondere bei Geschwindigkeiten in der Nähe der Rumpfgeschwindigkeit.

Die vorgenannte Darstellung bezieht sich nur auf Schiffe in Verdrängerfahrt; für Schiffe in Gleitfahrt, beispielsweise die Katamaranföhren bei Reisegeschwindigkeit, ergeben sich andere Wellenausbildungen. Prinzipiell ist in Gleitfahrt so gut wie kein Absunk festzustellen, außerdem sind die Perioden des vom Rumpf erzeugten „Primärwellensystems“ um Größenordnungen kleiner als in Verdrängerfahrt.



Die Wellenmessungen wurden entsprechend den vorstehenden Definitionen für die Parameter Bugstau  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  ausgewertet.

Dazu wurde die gemessene Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkungen einer Tiefpassfilterung unterzogen, um die langen Wellen des Primärsystems zu identifizieren. Durch entsprechende Filterung wurde außerdem das um den Tideeinfluss bereinigte Signal verwendet, um zusätzlich Ereignisse mit hohen Sekundärwellen zu identifizieren. Die Auswertung der Wellenhöhenparameter erfolgte anschließend an den ungefilterten Signalen zu den vorher identifizierten Zeitpunkten.

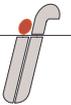
Durch Vergleich der bereits ermittelten Passagedaten wurden die ermittelten Wellenereignisse unter Berücksichtigung der geschätzten Laufzeiten bis zur Messstelle einem oder gegebenenfalls (bei Überholern oder Begegnungen) auch mehreren Schiffen zugeordnet.

## 4.2 Typische Wellenbilder

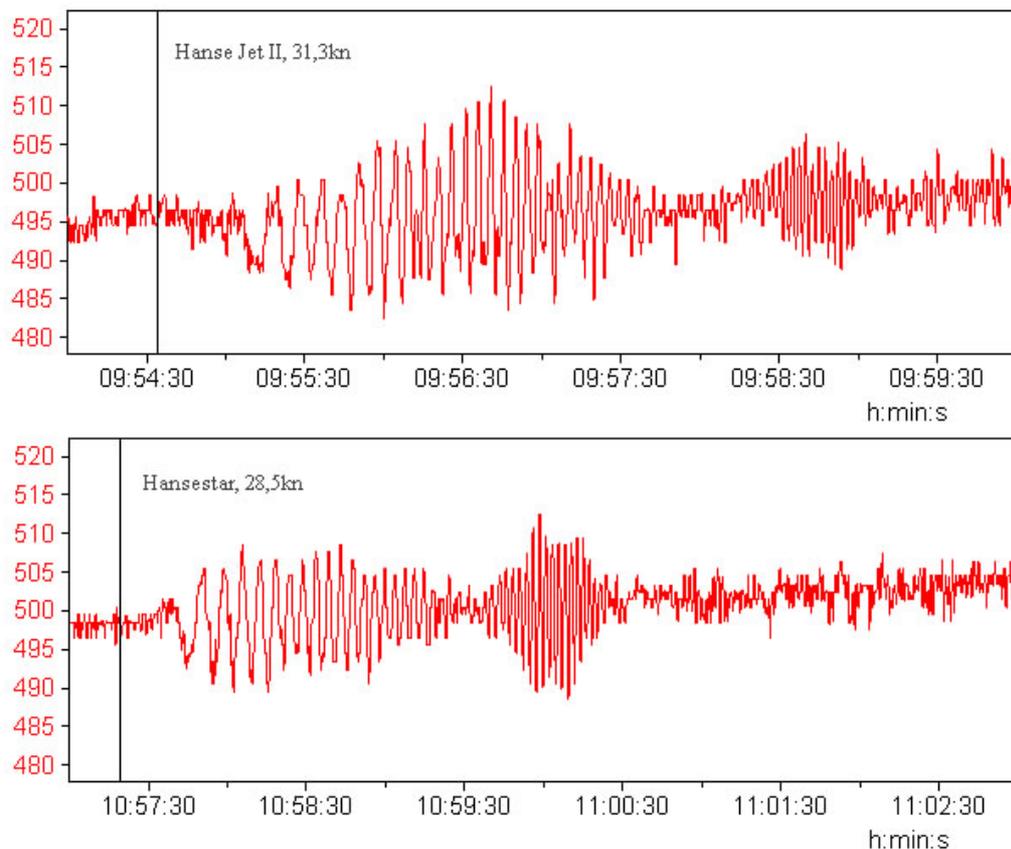
Wie bereits erläutert, entstehen qualitativ sehr unterschiedliche Wellenbilder bei der Passage verschiedener Schiffstypen. Dies soll im Folgenden mit vier beispielhaften Messungen an der Position Hetlingen erläutert werden:

- Schnellfähren in Gleitfahrt (Abbildung 17)
- Bagger (Abbildung 18)
- Post-Panmax-Klasse (Abbildung 19)
- Feederschiff (Abbildung 20)

Bei der Vorbeifahrt von Schnellfähren in der Gleitphase wird ein sehr geringer Bugstau und Absunk sowie das typische System von kurzperiodischen ( $T \approx 5s$ ) Wellen beobachtet (Abbildung 17). An diese je nach Rumpflänge und

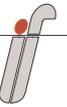


Geschwindigkeit 1,5-2,5 Minuten lange Wellengruppe schließt sich dann das Sekundärwellensystem, mit teilweise auch deutlich höheren Wellen als sie vom Rumpf herrühren (insbesondere bei „Hansestar“ und „Vargoey“), an. Aus dem genannten Beispiel ergeben sich folgende Parameter: „Hanse Jet II“:  $z_A=0\text{cm}$ ,  $H_p=30\text{cm}$   $H_s=17\text{cm}$  und „Hansestar“:  $z_A=0\text{cm}$ ,  $H_p=30\text{cm}$   $H_s=30\text{cm}$ .

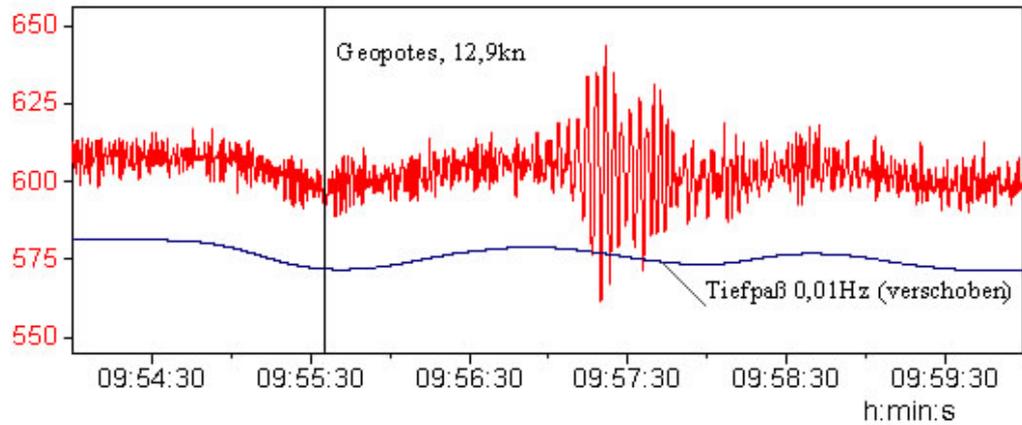


**Abbildung 17**  
**Wellenbild der Schnellfähren**  
**„Hanse Jet II“:  $L/B/T=41/10,1/2,4\text{m}$ ,  $v=31,3\text{m/s}$  und**  
**„Hansestar“:  $L/B/T=33/19,3/1,8\text{m}$ ,  $v=27,0\text{m/s}$**

Das in Abbildung 18 dargestellte Wellenbild eines Baggers ist dagegen in Folge der ungünstigeren Bugform durch einen deutlichen Bugstau und einen anschließenden Absink gekennzeichnet; die Periode der Primärwelle liegt bei  $T=130\text{s}$ . Sehr deutlich ist der Einfluß des starken Antriebs am Sekundärwellensystem zu

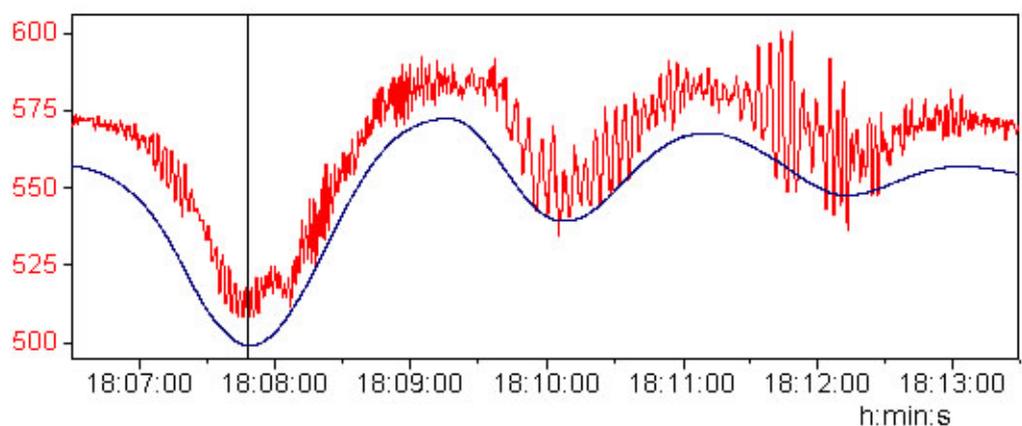


erkennen, dessen Wellenhöhen bei  $H_s=90\text{cm}$  liegen; sie betragen damit ein Mehrfaches der Primärwellenhöhe.

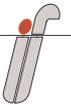


**Abbildung 18**  
**Wellenbild eines Baggers**  
 „Geopotes“:  $L/B/T=124/20,6/7,9\text{m}$ ,  $v=12,9\text{kn}$

Das dritte Beispiel (Abbildung 19) zeigt ein Schiff der Post-Panmax-Klasse mit über 40m Breite.



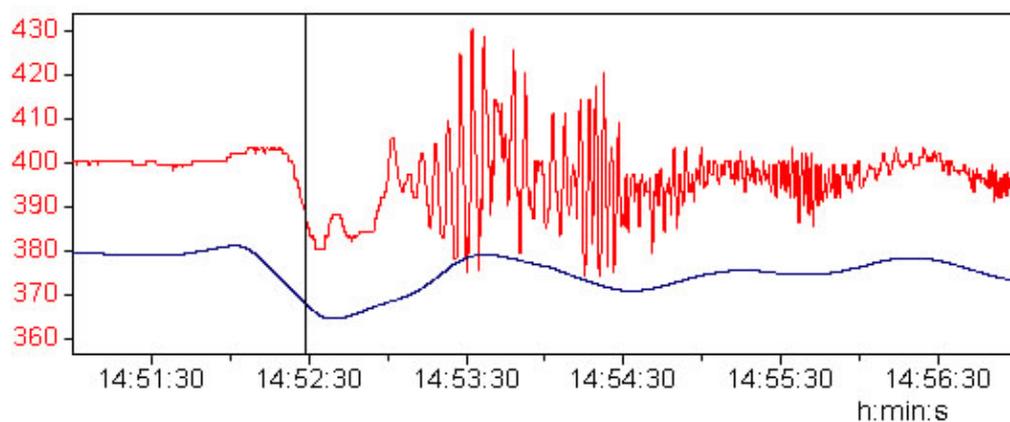
**Abbildung 19**  
**Wellenbild der Post-Panmax-Klasse**  
 „P&O Nedlloyd Kowloon“:  $L/B/T=299/42,8/12,7$ ,  $v=15,5\text{kn}$



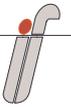
Gut erkennbar ist der große Absenk von etwa 60cm, der auf Grund der langen Dauer beispielsweise zu hohen Strömungsbelastungen von Deckwerken führen kann. Demgegenüber ist hier das Sekundärwellensystem mit einer Wellenhöhe von etwa  $H_s=45\text{cm}$  vergleichsweise klein.

Teilweise noch größere Wellenhöhen im Sekundärwellensystem (im Beispiel:  $H_s=55\text{cm}$ ) erreichen durchaus auch kleinere Feederschiffe (Abbildung 20), bei denen aber generell der Absenk auf Grund des kleineren Rumpfquerschnitts geringer ist. Die verhältnismäßig starke Ausprägung des Sekundärwellensystems ist häufig auf die hohe Motorleistung zurückzuführen, die erforderlich ist, um die gemessen an der Rumpfgeschwindigkeit hohe Reisegeschwindigkeit erreichen zu können.

Gegenüber den vorgenannten (Post-)Panmax-Schiffen, die soweit der Schiffsverkehr dies zulässt, die Fahrrinnenmitte benutzen, können die Feederschiffe bei Tiefgängen von 7-9m deutlich weiter unter Land fahren. Da die Wellenwirkung bei verringertem Abstand zunimmt, können auch diese Schiffe einen spürbaren Beitrag zur Wellenbelastung der Ufer leisten.



**Abbildung 20**  
**Wellenbild eines Feederschiffs**  
**„Ingrid“: L/B/T=117/18,1/6,8m, v=17,2kn**



## **4.3 Statistik der Wellenparameter**

### **4.3.1 Tagesmaxima**

Aus den an jeder Messposition ermittelten Wellenereignissen wurden getrennt für Absenk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s$  täglich die Maximalereignisse bestimmt. Diese wurden tabellarisch und grafisch zusammengefasst.

### **4.3.2 Wochenmaxima**

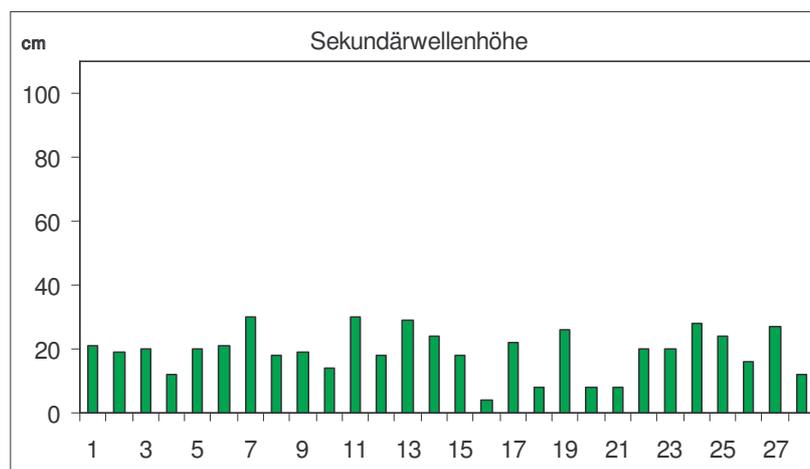
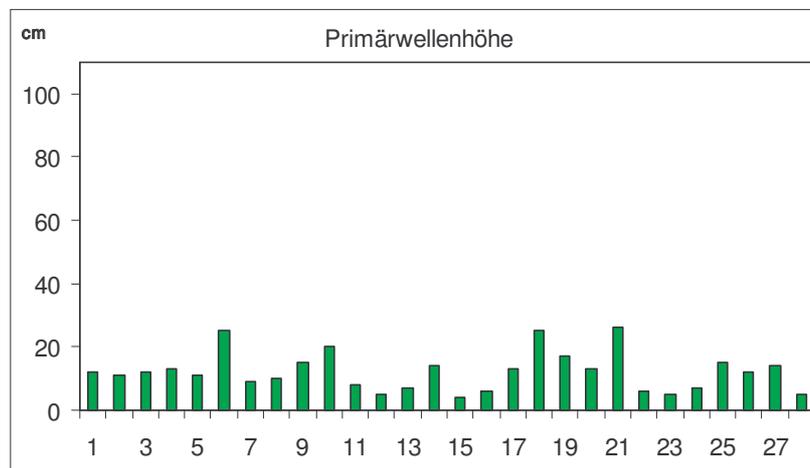
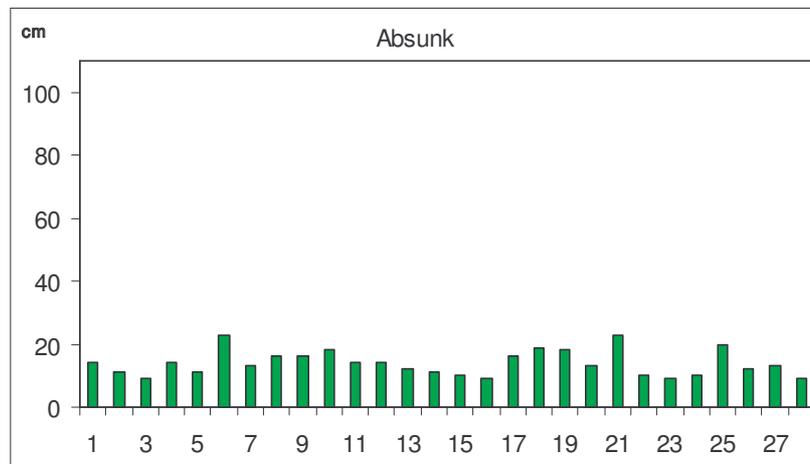
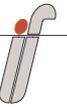
Neben den Tagesmaxima wurden für dieselben Parameter auch die jeweils 10 höchsten Ereignisse einer Woche bestimmt, um den Einfluss größerer Tageschwankungen zu eliminieren. Diese Werte wurden tabellarisch zusammengefasst

## **5 Statistische Darstellung**

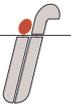
### **5.1 Tagesmaxima**

#### **5.1.1 Messposition Wedel**

Für die Größen Absenk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  wurde für jeden Tag der Maximalwert ermittelt und grafisch dargestellt (Abbildung 21). Die Daten zu den Schiffen, aus deren Passage diese Wellenereignisse resultierten, finden sich in Anlage 1.



**Abbildung 21**  
**Wedel Tagesmaxima**  
**Absunk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s$**



Die Höchstwerte der Tagesmaxima betragen für den Absunk 25cm, für die beiden anderen Wellenhöhen etwa je 30cm. Die Streuung der täglichen Maxima ist insbesondere für Primär- und Sekundärwellenhöhen groß. Eine Abhängigkeit von den Wochentagen bzw. der Zahl der täglichen Passagen kann nicht hergestellt werden.

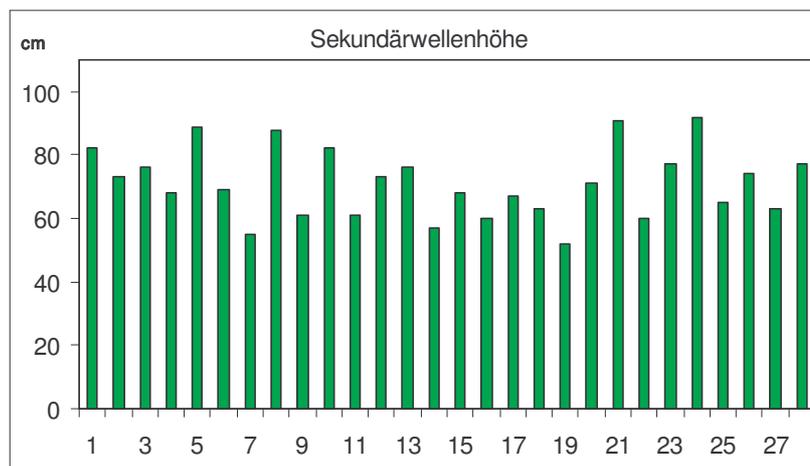
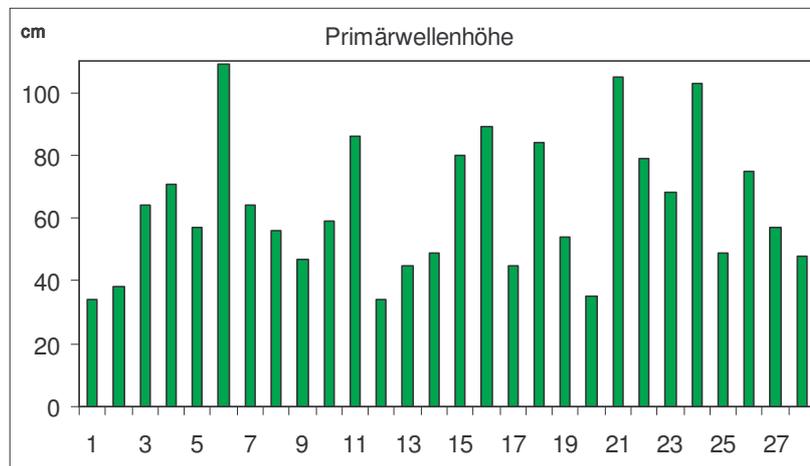
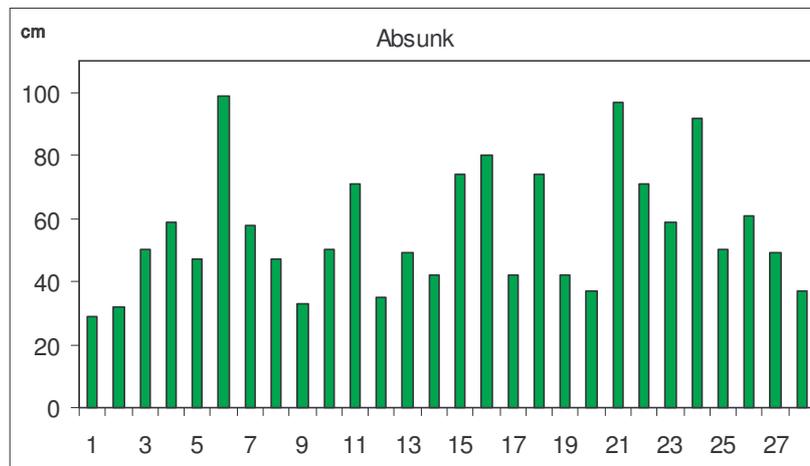
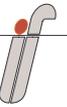
Die Maxima des Absunks im Hafen werden überwiegend von Schiffen der Panmax- und Post-Panmax-Klasse erzeugt. Allerdings können in Einzelfällen auch Schiffsbegegnungen kleinerer Schiffe zu einem großen Absunk führen; die beiden höchsten Tagesereignisse mit  $z_A=23\text{cm}$  wurden durch Schiffsbegegnungen verursacht.

Die Maximalwerte der Primärwellenhöhe werden zwar überwiegend ebenfalls durch große Schiffe erzeugt, allerdings werden etwa ein Drittel von Schiffen mit einer Länge von 100-170m verursacht.

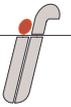
Die Wellenbelastung aus dem Sekundärwellensystem wird im Yachthafen nur selten von großen Schiffen verursacht (<25%), es überwiegen die Wellen schneller Katamarane (50%). Gerade bei diesen kurzen Wellen muss aber beachtet werden, dass die Messposition direkt hinter dem Einfahrtbereich - also stark exponiert - liegt. Für diese kurzen Wellenlängen ist die Diffraktionswirkung der Hafeneinfahrt für weniger exponierte Bereiche erheblich stärker einzuschätzen als für lange Wellen, so dass mit einer schnellen Abnahme der Sekundärwellen hinter der Einfahrt zu rechnen ist.

### 5.1.2 Messposition Hetlingen

Für die Größen Absunk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und die Sekundärwellenhöhe  $H_s$  wurden die Maximalwerte für jeden Tag in Abbildung 21 grafisch dargestellt. Die Daten sind mit den Schiffsdaten in tabellarischer Form in Anlage 2 zusammengefasst.



**Abbildung 22**  
**Hetlingen: Tagesmaxima**  
**Absunk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s$**



Gegenüber der Messposition in Wedel ist die Lage in Hetlingen ungeschützt neben dem Fahrwasser erheblich exponierter; dies spiegelt sich natürlich auch in den Messwerten wider. Der maximale Absenk betrug 99cm, die Primärwellenhöhe 109cm und die Sekundärwellenhöhe 92cm.

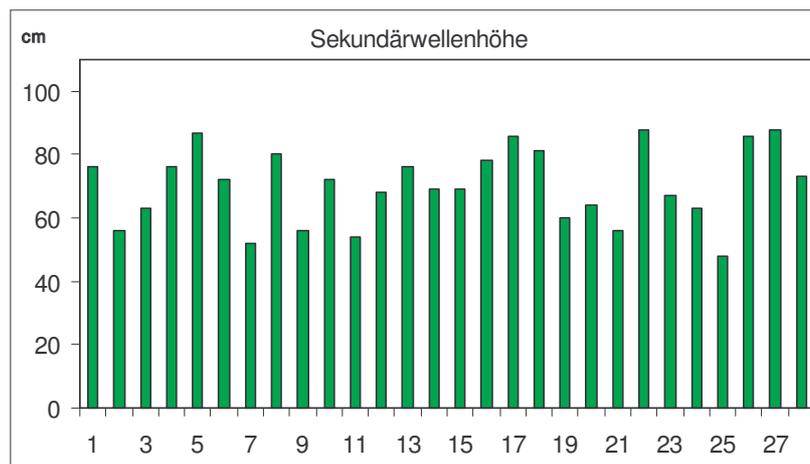
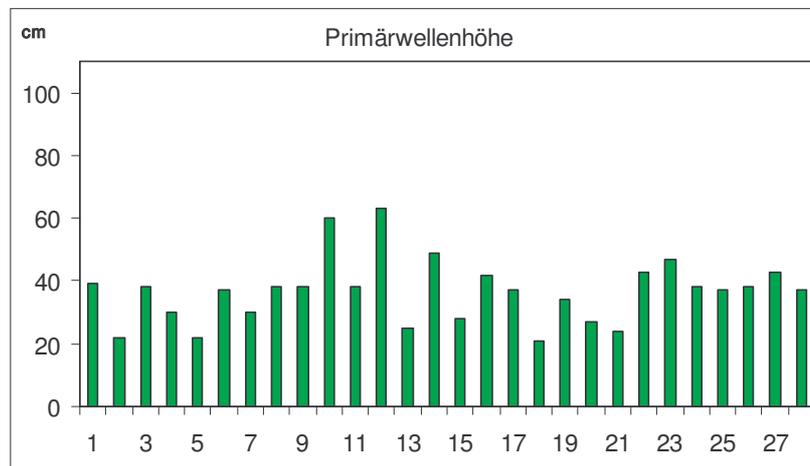
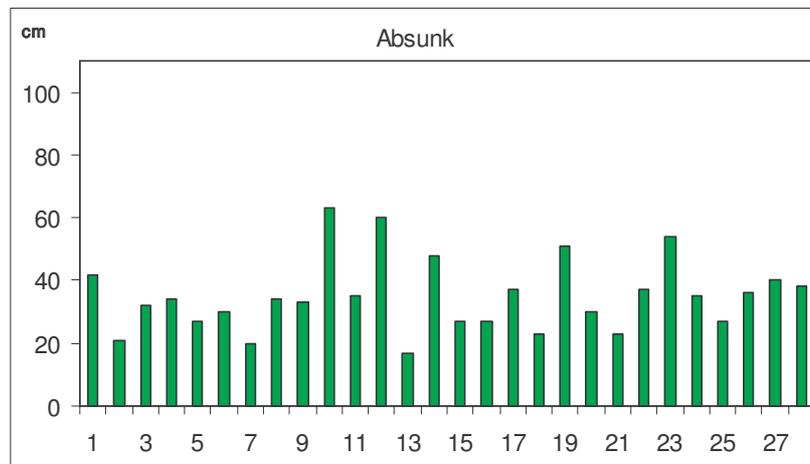
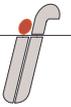
Die Maximalbelastungen durch Absenk und Primärwellenhöhe werden ausschließlich von Schiffen der Panmax-Klasse oder größer erzeugt, mit einer Ausnahme: eins der niedrigsten Tagesmaxima ( $H_p=38\text{cm}$ ) wurde durch einen Bagger verursacht.

Die Sekundärwellenbelastung wird wesentlich durch Schiffe in der Größenordnung 100-200m geprägt. Der Maximalwert von 92cm stammt, wie auch der zweithöchste Wert ( $H_s=91\text{cm}$ ) von Schiffen mit Längen von 89m und 117m. Schiffe mit einer Breite von mehr als 30m verursachten nur ein Drittel der Tagesmaxima, an 5 Tagen entstanden die jeweiligen Maxima durch den Bagger „Geopotes“.

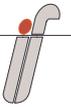
### 5.1.3 Messposition Stadersand

Die Messungen am Pegel Stadersand liefern im Vergleich zur Position Hetlingen geringere Maxima (Anlage 3 und Abbildung 23): Absenk  $z_A=63\text{cm}$ , Primärwellenhöhe  $H_p=63\text{cm}$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s=88\text{cm}$ . Dies ist unter anderem auf die etwas geringeren Fahrgeschwindigkeiten in diesem Bereich zurückzuführen.

Die Verteilung der verursachenden Schiffstypen ist dagegen mit der von Hetlingen vergleichbar: die Maximalwerte für  $z_a$  und  $H_p$  werden - außer bei Schiffsbegegnungen - durch die großen Schiffe verursacht, mit der Ausnahme eines schnell fahrenden kleineren Schiffs (2x „Containership IV“,  $v=16,2\text{kn}$  und  $v=16,7\text{kn}$ ). Gerade bei diesem kleinen Schiff wird aber auch der Passierabstand zum Messgerät geringer gewesen sein.



**Abbildung 23**  
**Stadersand: Tagesmaxima**  
**Absunk  $z_A$ , Primärwellenhöhe  $H_p$  und Sekundärwellenhöhe  $H_s$**

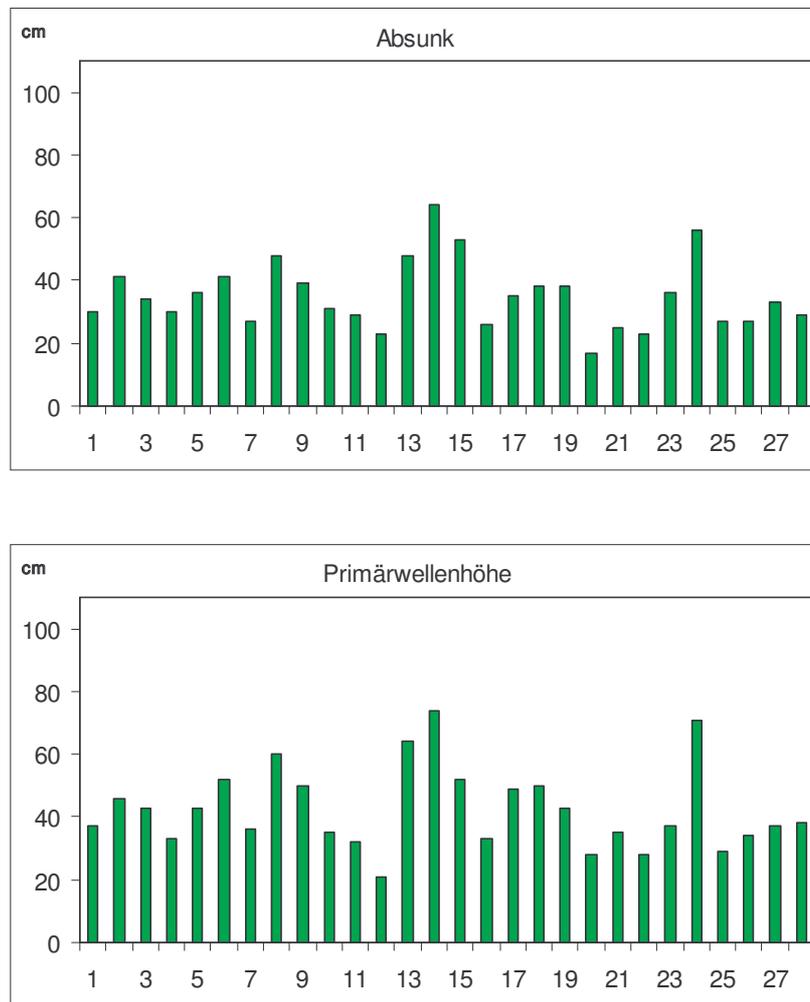
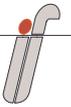


Die Sekundärwellen erreichten mit 88cm ähnliche Größenordnungen wie an der Position Hetlingen, auch die Verteilung der verursachenden Schiffe ist vergleichbar: wiederum wurde die höchste Belastung von einem kleinen, schnellen Schiff verursacht und etwa ein Drittel der Maximalwerte wurden von Schiffen mit Breiten ab 30m erzeugt.

#### **5.1.4 Messposition Ruthenstrom**

Bedingt durch die entfernte Lage und die Querschnittsausbildung des Ruthenstroms sind an der Messposition keine Sekundärwellen von Schiffen, die die Elbe befahren, messbar. Daher wurden hier nur die Parameter für Absunk und Primärwellenhöhe ermittelt (Abbildung 24 und Anlage 4).

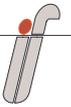
Generell geht die ermittelte Wellenbelastung auf Passagen von großen und sehr großen Schiffen mit Tiefgängen von überwiegend 11-13m zurück. Die größten Einzelbelastungen wurden von Schiffen verursacht, die mit einer Geschwindigkeit von mehr als 18kn fuhren. Der größte Absunk ( $z_A=64\text{cm}$ ) und die höchste Primärwellenhöhe ( $H_p=74\text{cm}$ ) wurde von der „Pohang Senator“ (Panmax), die die Elbe mit  $v=20,4\text{kn}$  aufwärts befuhr, verursacht.



**Abbildung 24**  
**Ruthenstrom: Tagesmaxima**  
**Absunk  $z_A$  und Primärwellenhöhe  $H_p$**

## 5.2 Wochenmaxima

Die für die vier Messpositionen in den Anlage 1 bis Anlage 4 zusammengestellten, wöchentlichen 10 größten Werte liefern natürlich die gleichen Maximalwerte, führen aber zu einer etwas verringerten Streubreite der Ergebnisse gegenüber der Tagesstatistik, da Einzeltage mit extrem niedrigen Werten entfallen. Die Angaben zu den verursachenden Schiffstypen werden nicht beeinflusst.



## 6 Ergänzende Untersuchungen

### 6.1 Messposition Wedel

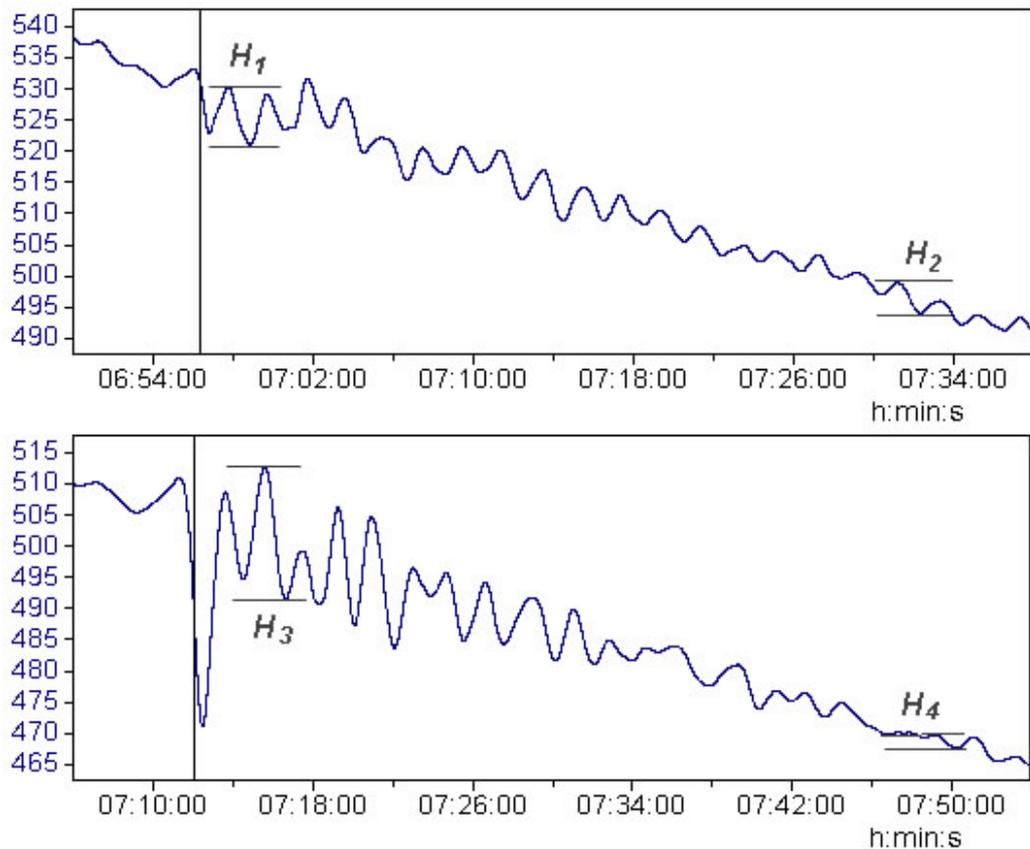
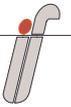
Bei der Auswertung des Primärwellensystems im Hafen Wedel fiel auf, dass es teilweise recht lange dauert, bis nach einer Schiffspassage eine Beruhigung eintritt. Als Folge davon konnten hier relativ viele Ereignisse nur mehreren Schiffen gleichzeitig zugeordnet werden.

Da dies insbesondere das Primärwellensystem mit seinen langen Wellen betraf, wurde untersucht, ob als Ursache Hafenresonanz in Frage kommt. Da direkt außerhalb des Hafens keine vergleichenden Messungen durchgeführt worden waren, wurde versucht, im Messzeitraum eine geeignete Schiffspassage an Wedel und Hetlingen vorbei zu finden. Ziel sollte eine Abschätzung des Beckeneinflusses durch den Vergleich der Messungen sein.

Geeignete Passage heißt in diesem Zusammenhang, dass ein Schiff stromabwärts fährt, beide Positionen mit etwa der gleichen Geschwindigkeit passiert, kein anderer Schiffsverkehr in diesem Zeitintervall stattfindet und außerdem wenig oder kein Wind herrscht. Nur unter diesen Randbedingungen können die resultierenden Schwingungen eindeutig dieser Schiffspassage zugeordnet und beide Positionen verglichen werden.

Das Ergebnis einer solchen Passage enthält Abbildung 25, dargestellt ist nur der Anteil der langen Wellen. Es handelt sich um die Passage der „Hanjin Praha“, die beide Positionen auslaufend gegen 7:00 und 7:15 morgens bei etwa  $T_{mw}$  (fallend) passierte. Die Geschwindigkeit betrug vor Wedel 13,0kn und steigerte sich vor Hetlingen auf 15,6kn.

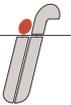
Das letzte Schiff vor dieser Passage befuhr die Elbe bei Wedel gegen 6:00 („Planet V“,  $L/B/T=116/19,5/6,6$ ,  $v=15kn$ ) und passierte Hetlingen gegen 6:20. Nach der untersuchten Passage wurde die Elbe vor Wedel erst wieder gegen 8:45 von einem registrierten Schiff befahren.



**Abbildung 25**  
**Resonanzproblem des Yachthafens Wedel**  
**Wedel (oben) und Hetlingen (unten)**

Deutlich ist zunächst einmal die Reduktion der Wellenhöhe hinter der Hafeneinfahrt zu erkennen. Wenn man die zweite Wellenhöhe nach der Passage betrachtet, beträgt die Ausgangswellenhöhe auf der Elbe bei Hetlingen  $H_3=22\text{cm}$ , im Hafen liegt sie dagegen bei  $H_1=10\text{cm}$ . Die Wellenperiode beträgt  $121\text{s}$ .

Interessant ist in diesem Zusammenhang aber die unterschiedlich starke Abnahme der Wellenhöhe im Verlauf der nächsten halben Stunde. In Wedel halbiert sich die Höhe in dieser Zeit auf etwa  $H_2=5\text{cm}$ , auf der Elbe ist eine Halbierung der Wellenhöhe aber bereits nach etwa 10-12min sichtbar, nach einer halben Stunde beträgt die Höhe  $H_4$  nur noch etwa 2-3cm und liegt damit bei nur 10% der Ausgangshöhe. Dies bedeutet also, dass die Dämpfung der Wellenbewegung auf der freien Elbe erheblich besser ist als im Yachthafen.



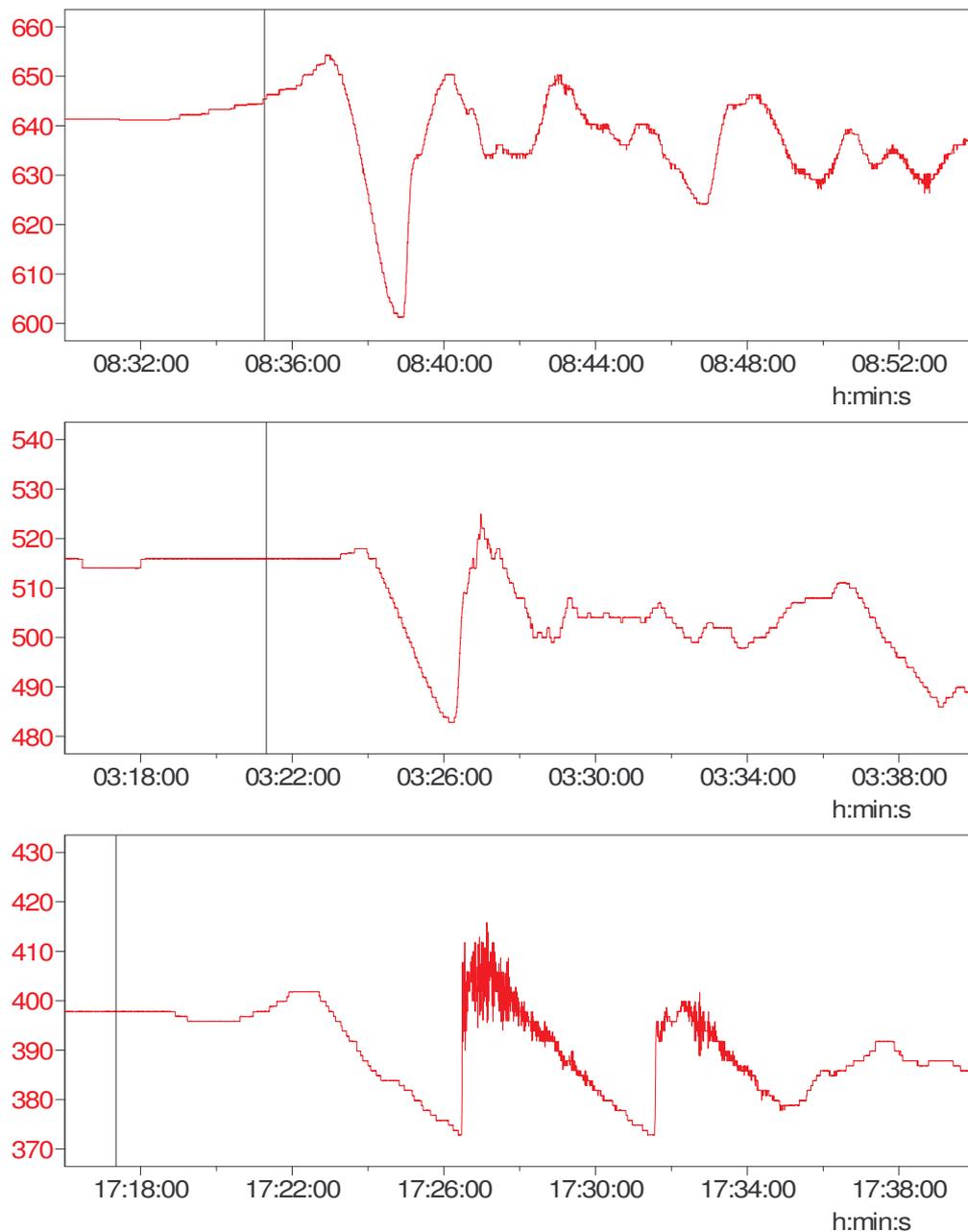
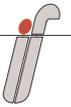
Auf Grund der unterschiedlichen Elbquerschnitte in Wedel und Hetlingen stellt die hier geschilderte Herangehensweise natürlich nur eine grobe Näherung dar und kann keine Messungen ersetzen. Die deutlich voneinander abweichende Schwingungsdämpfung ist aber ein starkes Indiz für die Ausbildung einer Hafenresonanz im Yachthafen Wedel für Perioden um 120s.

Eine stichprobenartige Untersuchung der 28 Tagesmaxima der höchsten Primärwellenereignisse für Wedel ergab eine mittlere Wellenperiode von 117s.

## 6.2 Messposition Ruthenstrom

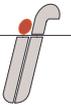
Die Absunk- und Primärwellen, die in den Ruthenstrom einlaufen, werden insbesondere bei niedrigen Wasserständen stark verformt. Dieser grundsätzlich als Bore bekannte Effekt soll durch die Abbildung 26 illustriert werden.

Zur Veranschaulichung wurden Passagen ausgewählt, bei denen die Schiffe jeweils zu unterschiedlichen Tidephasen die Mündung des Ruthenstroms passierten. Idealerweise sollte es sich dabei um das gleiche Schiff mit der gleichen Geschwindigkeit und Abladetiefe handeln. Eine solche Auswahl war im untersuchten Zeitraum nicht möglich, daher wurden Schiffe mit sehr ähnlichen Hauptabmessungen ausgewählt, diese betragen  $L/B/T=280/40,0/12,2\text{m}$ , die Geschwindigkeiten lagen zwischen 16,1kn und 17,7kn.

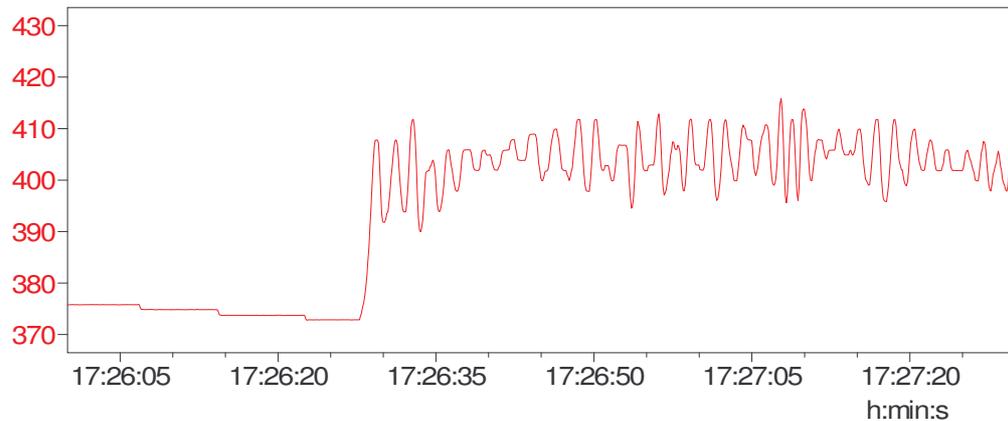


**Abbildung 26**  
**Einlaufen des Primärwellensystems in den Ruthenstrom**  
**Einfluß des Tidewasserstandes (Thw: oben, Tmw: Mitte, Tnw: unten)**

Die Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss der abnehmenden Wassertiefe, die zu geringeren Wellenhöhen im Ruthenstrom führt. Weiterhin bewirkt sie eine Abflachung der fallenden Flanke der Welle und gleichzeitig einen immer



steileren Wiederanstieg. Im genannten Beispiel erfolgt der Anstieg bei Tideniedrigwasser um etwa 40cm in nur 1s; Abbildung 27 stellt den Anstieg gegen 17:26:28 als Ausschnitt dar (1 Teilstrich = 5s).

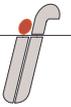


**Abbildung 27**  
**Anstieg nach dem ersten Absink bei Tideniedrigwasser**

Es ist leicht nachzuvollziehen, dass hierdurch sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten können. Bei einer solchen Situation während Wartungsarbeiten am Meßgerät konnten Strömungsverhältnisse bei abfließendem Wasser beobachtet werden, die zeitweilig zu einem Wechselsprung hinter dem Messgerät (Querschnitt  $5 \times 5 \text{cm}^2$  und Schwimmer) führten.

## 7 Zusammenfassung und Wertung

Die Wellenmessungen wurden an vier Positionen an der Unterelbe durchgeführt: Wedel, Hetlingen, Stadersand und im Ruthenstrom; die Netto-Messdauer betrug an jeder Position vier Wochen. Für die Messungen wurden zwei Wellenmessgeräte eingesetzt, die nach dem Schwimmerprinzip funktionieren.



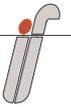
Die Messdaten wurden mit einer Taktung von 10Hz erfasst und kontinuierlich gespeichert.

Die Identifizierung von Schiffswellen erfolgte durch entsprechende Filterung der Messzeitreihe. Die Auswertung hatte zum Ziel, für die Größen Absenk, Primärwellenhöhe und Sekundärwellenhöhe jeweils die täglichen Maxima und die wöchentlich 10 höchsten Werte zu ermitteln. Weiterhin sollten diesen Ereignissen die Schiffe (einzeln oder gegebenenfalls auch Schiffsgruppen) zugeordnet werden, die diese Wellen verursacht haben.

Für die Bestimmung der zugehörigen Schiffe wurde auf Daten der Verkehrszentrale zurückgegriffen, so dass neben dem Schiffsnamen auch die Hauptabmessungen (Länge, Breite, aktueller Tiefgang) bekannt waren. Aus den vorliegenden Daten wurde außerdem die Geschwindigkeit des Schiffes zum Zeitpunkt der Passage ermittelt. Da die Wellenerzeugung eines fahrenden Schiffes von der durchs Wasser gefahrenen Geschwindigkeit abhängt, wurde die ermittelte Geschwindigkeit über Grund um die Tideströmung korrigiert. Mangels zeitgleicher Messungen erfolgte diese Korrektur auf der Basis eines BAW-Gutachtens zum Tidegeschehen in der Unterelbe (BAW, 1997) mit einer mittleren, tidephasenabhängigen Strömungsverteilung.

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass es für die Beurteilung von Belastungen, die von schiffserzeugten Wellen ausgehen, sehr auf den Einzelfall ankommt. Die Art und Größe der Schiffswellen hängt neben Schiffsform und -größe stark von der Fahrtgeschwindigkeit im Wasser ab. Die Ausbreitung der langen Schiffswellen hängt im Wesentlichen von der Wassertiefe und bei Seitenarmen auch von deren Querschnitt ab (Beispiel Ruthenstrom); insbesondere bei Häfen können Beckenresonanzen ein Problem darstellen.

Die Beurteilung der vorstehenden, beispielhaft aufgeführten Problemstellungen ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung, sie dienen lediglich der Illustration, dass nicht notwendigerweise die höchste Welle auch die größte Belastung im Einzelfall ergibt, sondern dass auch die vorliegenden Messergebnisse einer Interpretation für die Anwendung auf bestimmte Einzelmaßnahmen bedürfen.



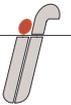
Die Messungen zeigen jedoch, dass die Belastung aus Absunk und Primärwellenhöhe vor allem von Schiffen der Panmax-Klasse oder größeren verursacht wird. Insbesondere in Abschnitten, in denen das Fahrwasser in geringer Entfernung zum Ufer verläuft, können aber auch kleinere Schiffe erheblich zur Wellenunruhe beitragen, da sie auf Grund des geringeren Tiefgangs weit am Fahrwasserrand fahren können und dies in Folge ihrer teilweise starken Motorisierung durchaus auch mit hohen Geschwindigkeiten geschieht.

Gerade letzteres ist zusammen mit der Tatsache, dass die kleineren Schiffe näher an ihrer kritischen Rumpfgeschwindigkeit fahren außerdem dafür verantwortlich, dass die Belastung durch Sekundärwellen überwiegend von den kleineren Schiffen verursacht wird.

Im Bereich vor Wedel fahren die Schnellfähren bereits mit ihrer Reisegeschwindigkeit von etwa 30kn und fallen daher durch ihren großen Anteil an der kurzperiodischen Wellenbelastung im Bereich der Hafeneinfahrt auf. Da alle anderen Schiffe weiter stromab vor Hetlingen schneller fahren und erheblich höhere Wellen verursachen, nimmt dort der Anteil der Wellenbelastung durch die Schnellfähren signifikant ab.

Hamburg, im März 2003

Dipl.-Ing. Thomas Fittschen



## 8 Literatur

BAW (1997):

Untersuchung zur Tidedynamik des Elbeästuars.  
Daten-CD.

BISHOP, C.T., DONELAN, M.A. und KAHMA, K.K. (1992):

Shore Protection Manual's Wave Prediction Reviewed.  
Coastal Engineering, 17, S. 25ff.

CERC (1984):

Shore Protection Manual.  
US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.

DEAN, R.G. and DALRYMPLE, R.A. (1984)

Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists.  
Prentice Hall, Inc. Eaglewood Cliffs, New Jersey.

FRÖHLE, P. (2000)

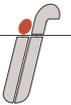
Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den  
Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenbaus.  
Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, Heft 2,  
Rostock.

GODA, Y. (1985):

Random Seas and Design of Maritime Structures.  
University of Tokio Press.

Kohlhase, S. (1983):

Ozeanographisch-seebauliche Grundlagen der Hafenanplanung.  
Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover, Heft 57.



## 9 Verzeichnis der Anlagen

| Anlage   | Ort         | Anlagenseite                            |    |
|----------|-------------|---|----|
| Anlage 1 | Wedel       | Absunk $z_A$ , Tagesmaxima              | 1  |
|          |             | Absunk $z_A$ , Wochenmaxima             | 2  |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Tagesmaxima    | 4  |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Wochenmaxima   | 5  |
|          |             | Sekundärwellenhöhe $H_s$ , Tagesmaxima  | 7  |
|          |             | Sekundärwellenhöhe $H_s$ , Wochenmaxima | 8  |
| Anlage 2 | Hetlingen   | Absunk $z_A$ , Tagesmaxima              | 10 |
|          |             | Absunk $z_A$ , Wochenmaxima             | 11 |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Tagesmaxima    | 13 |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Wochenmaxima   | 14 |
|          |             | Sekundärwellenhöhe $H_s$ , Tagesmaxima  | 16 |
|          |             | Sekundärwellenhöhe $H_s$ , Wochenmaxima | 17 |
| Anlage 3 | Stadersand  | Absunk $z_A$ , Tagesmaxima              | 19 |
|          |             | Absunk $z_A$ , Wochenmaxima             | 20 |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Tagesmaxima    | 22 |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Wochenmaxima   | 23 |
|          |             | Sekundärwellenhöhe $H_s$ , Tagesmaxima  | 25 |
|          |             | Sekundärwellenhöhe $H_s$ , Wochenmaxima | 26 |
| Anlage 4 | Ruthenstrom | Absunk $z_A$ , Tagesmaxima              | 28 |
|          |             | Absunk $z_A$ , Wochenmaxima             | 29 |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Tagesmaxima    | 31 |
|          |             | Primärwellenhöhe $H_p$ , Wochenmaxima   | 32 |