

## Seewasserstraßen, Seehafenzufahrten, Küsteningenieurwesen (2.2)

### Schiffserzeugte Belastungen von Ästuardeichen am Beispiel der Elbe

**Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf**  
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

**Dr.-Ing. Martin Pohl**  
Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

#### Einführung

Schäden an Deichen, Uferdeckwerken, Buhnen und anderen Ufersicherungswerken können in Ästuaren im wesentlichen auf die Belastung durch Wasserstandsänderungen, Strömungen, Wind- und Schiffswellen zurückgeführt werden. Für die Bemessung dieser Bauwerke ist daher die Kenntnis der dynamischen Wechselwirkungen zwischen hydraulischen Belastungen und



**Bild 1:** Containerschiff vor dem Deich im Altenbrucher Bogen

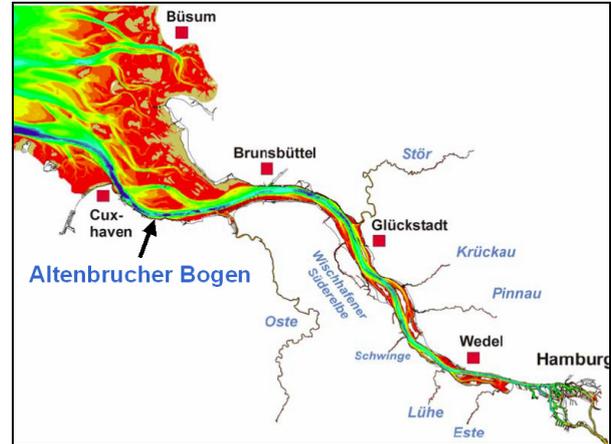
geotechnischen Widerständen von Bedeutung. Ziel dieser Arbeit ist es, die dynamischen Wechselwirkungen zwischen den schiffsinduzierten hydraulischen Belastungen und den geotechnischen Widerständen auf der Grundlage von Naturmessungen und theoretischen Betrachtungen zu beschreiben. Ein Schwerpunkt wird dabei auf die schiffsinduzierten Belastungen von Deichen gelegt. Schiffsinduzierte Belastungen von Bauwerken an Seeschifffahrtsstraßen gewinnen in Zusammenhang mit früheren und geplanten Ausbauprojekten und den zunehmenden Schiffsgrößen an Bedeutung (Bild 1).

Veranlassung für die Untersuchungen sind die aufgetretenen Deichsetzungen und Deckwerksschäden im Untersuchungsgebiet an der Unterelbe, für die vom verantwortlichen Unterhaltungsverband schiffsinduzierte Belastungen verantwortlich gemacht werden. Dies hat die Bundesanstalt für Wasserbau in Zusammenarbeit mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern Cuxhaven und Hamburg veranlasst, die Wirkung schiffserzeugter Belastungen auf den Deich im Altenbrucher Bogen an der Unterelbe zu untersuchen.

#### Untersuchungsgebiet

##### Lage

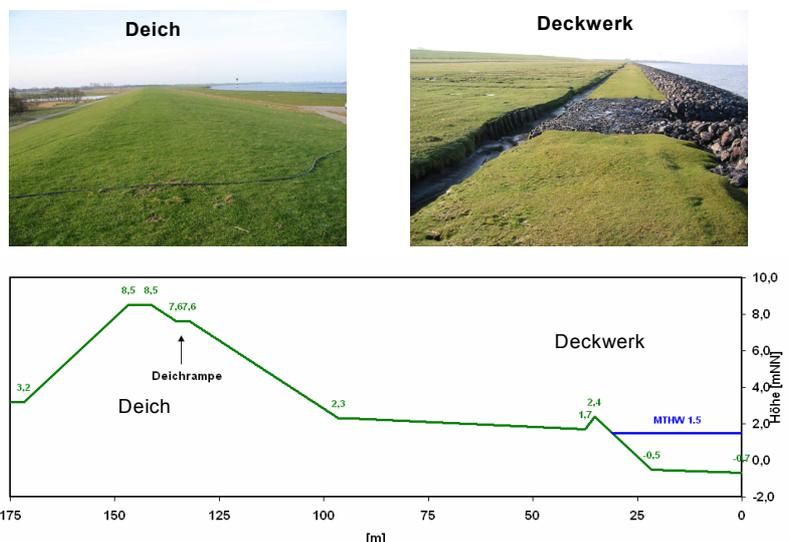
Das Untersuchungsgebiet Altenbruch zwischen Cuxhaven und Otterndorf befindet sich sowohl hinsichtlich der Windwellenbelastung, der Strömungsbelastung als auch der Schiffswellenbelastung in exponierter Lage (Bild 2). Der Abstand der Fahrrinne zum Deckwerk beträgt für den Messquerschnitt rd. 500 m.



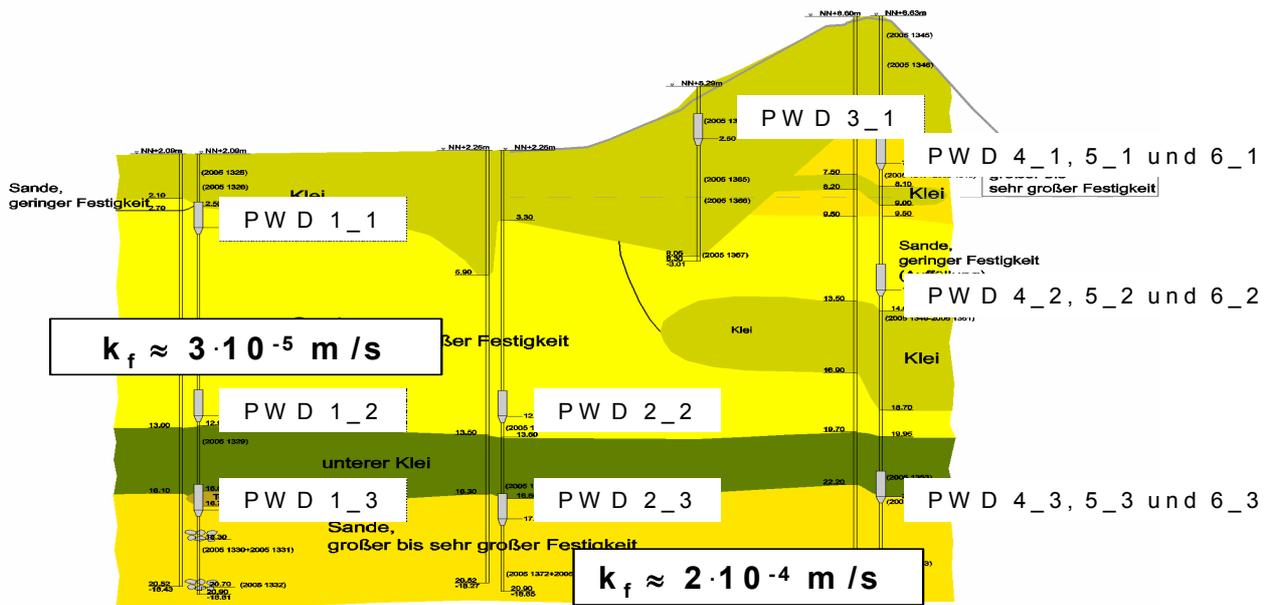
**Bild 2:** Lageplan

##### Deichaufbau

Das Deichsystem im Altenbrucher Bogen besteht aus einem Fußdeckwerk mit anschließender Verwallung, einem rd. 100 m breiten Vorland und dem anschließenden Deich. Das Fußdeckwerk wurde mit einer Neigung von 1:3 bis auf NN +1,70 m sowie einer anschließenden Verwallung bis auf rd. NN +2,50 m hergestellt. Das Deckwerk wurde aus Wasserbausteinen der Größenklassen II und III auf einer 15 cm bis 20 cm starken Schotterschicht aufgebaut. Ein Geotextil ist nicht vorhanden. Das Deckwerk wurde im oberen Bereich als vergossenes Deckwerk und im unteren Bereich als geschüttetes Deckwerk ausgeführt. Das Vorland hat eine Geländehöhe zwischen 1,7 m und 2,3 m. Der Deich hat im Untersuchungsquerschnitt eine Kronenhöhe zwischen NN +8,60 m und NN +8,85 m (Bild 3).



**Bild 3:** Deich im Altenbrucher Bogen (Messquerschnitt)



Anmerkung: Die PWD-Sonden 5\_x und 6\_x befinden sich in einer Entfernung von rd. 100m zu beiden Seiten des Messquerschnitts.

**Bild 4:** Baugrundmodell mit Durchlässigkeitsbeiwerten

Die Deiche bestehen aus einem Sandkern, der mit Klei abgedeckt ist. Örtlich wurde im Deichkern Klei angetroffen, der bei großer Mächtigkeit einem Altdeich zuzuordnen ist. An der Deichbasis sowie im Deichvorland steht als obere Bodenschicht vorwiegend oberer Klei an, örtlich an der Deichbasis auch Sande. Im Liegenden folgen obere Sande, in denen lokal bindige Partien eingelagert sind. Die oberen Sande sind vom unteren Klei unterlagert. Örtlich ist von Sandeinlagerungen bzw. Durchbrüchen im unteren Klei auszugehen. Die unterste erkundete Bodenschicht bilden die unteren Sande (Bild 4).

#### Messaufbau

Zur Ermittlung tide- und schiffswelleninduzierter Porenwasserdruckänderungen wurden im Deich und Deichuntergrund insgesamt 15 Porenwasserdruckgeber in die wasserführenden Schichten eingebaut. Die Bezeichnungen sowie die Positionen der einzelnen Porenwasserdruckgeber sind Bild 4 zu entnehmen. Zusätzlich wurden die Schiffswellen auf dem Vorstrand als Eingangsgrößen für die Prozesse im Deichuntergrund erfasst (Schütterumpf et al., 2005). Für die Zuordnung der identifizierbaren Schiffereignisse zu den passierenden Schiffe wurde ein AIS-Empfänger-System eingesetzt. Auf diese Weise konnten die erforderlichen AIS-Daten wie u.a. Schiffstyp, Schiffslänge und -breite, Schiffstiefgang, Schiffsgeschwindigkeit und Passageabstand ermittelt werden.

#### Hydrologie im Untersuchungsgebiet

Die maßgebenden Wasserstände für den Bereich des Altenbrucher Bogens können dem Gewässerkundlichen Jahrbuch (2001) entnommen werden:

HHThw: +5,42 mNN (03.01.1976)  
MThw: +1,50 mNN (10-jährlicher Mittelwert)

MTnw: -1,43 mNN (10-jährlicher Mittelwert)

MThb: 2,93 m (10-jährlicher Mittelwert)

Der Bemessungswasserstand für den Bereich Altenbrucher beträgt (Siefert, 1998):

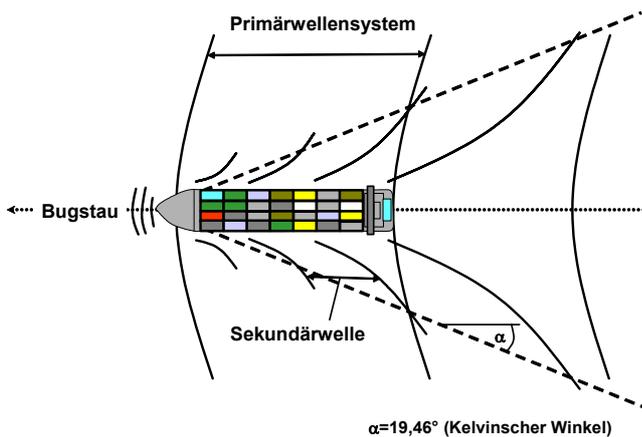
BWS: +5,90 mNN

#### Schiffsinduzierte Belastungen von Ästuardeichen

Das fahrende Schiff überträgt zur Überwindung des Schiffswiderstandes Energie in den Wasserkörper und verursacht damit eine Verdrängungsströmung. Aus Gründen der Energieerhaltung kann dem Schiff in Schiffsängsachse eine Druck- und eine Wasserstandsverteilung in Abhängigkeit der lokalen Verdrängungsströmung zugeordnet werden. Wegen der hohen Verdrängungsströmungen am Schiff kommt es hier zu einem Absink  $z_A$  und an Bug und Heck jeweils zu einem Aufstau.

Bugstau, Absink und Heckstau erzeugen eine vom Schiff ausgehende Schiffswelle, die als Primärwellensystem bezeichnet wird und der Verdrängungsströmung zugeordnet werden kann. Dieses Primärwellensystem läuft senkrecht zum Schiff und wird auch als Transversalwelle bezeichnet. Aufgrund unterschiedlicher Druckwerte an Bug und Heck werden zusätzliche Sekundärwellen generiert, die schräg zum Schiff laufen. Beispielhaft sind das Primär- und das Sekundärwellensystem für Tiefwasserverhältnisse in Bild 5 dargestellt. Durch Interferenzen kommt es zu einer Überlagerung der Primär- und der Sekundärwellen mit maximalen Wellenhöhen in den Schnittpunkten der Wellenkämme.

Aufgrund der größeren Wellenperiode von mehreren Minuten und der damit verbundenen Wellenlänge breitet sich das Primärwellensystem mit einer größeren Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  $c$  als die Sekundärwellen aus. Die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit  $c$  des



**Bild 5:** Entstehung von Schiffswellen im Tiefwasser

Primärwellensystems kann in Ästuaren nach der Lagrange'schen Gleichung aus der Wassertiefe  $d$  ermittelt werden. Durch die Unterwassertopographie wird das Primärwellensystem in Richtung und Höhe entsprechend den Flachwassereffekten (Shoaling, Refraktion, Diffraktion, Wellenbrechen) bis zum Deckwerk transformiert. Am Deckwerk selber erzeugt das Primärwellensystem zuerst einen Wasserspiegelanstau (infolge Bugstau), dann einen Wasserspiegelabsenk (infolge Absenk) und dann einen Wasserspiegelanstieg (infolge Heckstau). Aufgrund des Wasserspiegelabsenks am Deckwerk kommt es im Deichuntergrund zu einem seeseitigen Porenwasserdruckgefälle und zu einer seewärts gerichteten Grundwasserströmung.

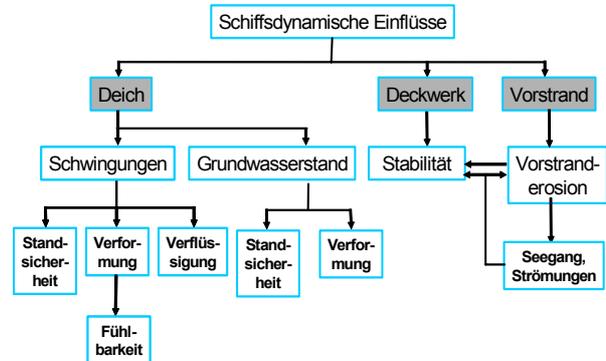
Nach dem Primärwellensystem treffen die Sekundärwellen (Bild 6) auf das Deckwerk, die aufgrund ihrer Wellenperiode von rd. 3 bis 5 Sekunden erst später Grundberührung bekommen und damit erst ufernah durch die Flachwassereffekte transformiert werden. Die Sekundärwellen brechen wegen ihrer kurzen Wellenlänge bei ausreichender Wassertiefe auf dem Vorstrand erst am Deckwerk.



**Bild 6:** Sekundärwellen

Die schiffsinduzierten Einflüsse auf den Deich, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung betrachtet wurden, sind in Bild 7 dargestellt. Es wurden sowohl die schiffsdynamischen Einflüsse auf den Deich, das Deckwerk und den Vorstrand untersucht. Die schiffsdynamischen Einflüsse auf den Deich wurden weiterhin in schiffsinduzierte Porenwasserdruckschwankungen und schiffsinduzierte Schwingungen unterschieden, um den Einfluss dieser Prozesse auf Standsicherheit und Ver-

formung des Deiches zu ermitteln. Die Deckwerksstabilität wurde unter Berücksichtigung der sich verändernden Vorstrandtopographie ermittelt. Beispielhaft soll im Folgenden der Einfluss von Schiffswellen auf Porenwasserdruckveränderungen im Deichuntergrund und im Deichkern dargestellt werden.



**Bild 7:** Schiffsdynamische Einflüsse

### Wasserstandsänderungen im Deich

#### Tidewasserstände

Die Tidewelle breitet sich im Deichuntergrund aus. Bei ansteigendem Tidewasserstand kommt es zu einem landwärts gerichteten Porenwasserdruckgefälle und damit zu einer landwärts gerichteten Sickerströmung. Bei fallendem Tidewasserstand sind Porenwasserdruckgefälle und Sickerströmung seewärts gerichtet. Der anstehende Boden führt zu einer Dämpfung der Tidewelle sowie zu einer Phasenverschiebung. Die Dämpfung der Tidewelle im Deichuntergrund hängt im wesentlichen von der Durchlässigkeit des Bodens ab. Beispielhaft wurde die Dämpfung der Tidewelle im Deichuntergrund in den Bild 8 und Bild 9 (siehe Anlage) für den oberen und unteren Grundwasserleiter dargestellt. Der Tidehub von  $Th_b = 3,10$  m wird bereits unmittelbar hinter dem Deckwerk (PWD 1\_1 und PWD 1\_2) im oberen Grundwasserleiter auf rd. 1,7 m reduziert. Bis zum Deich findet eine weitere Reduktion der Tidewelle bis auf rd. 0,3 m statt (PWD 4\_2, 5\_2 und 6\_2). Grund hierfür ist die geringe Durchlässigkeit des oberen Grundwasserleiters mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 3 \cdot 10^{-5}$  m/s. Im unteren Grundwasserleiter ist die Reduktion der Tidewelle aufgrund der größeren Durchlässigkeit des anstehenden feinsandigen Mittelsandes mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 2 \cdot 10^{-4}$  m/s geringer. Dies führt zu einer Reduktion des Tidehubs bis auf rd. 1,2 m unter dem Deich (PWD 4\_3, 5\_3 und 6\_3). Auch im Deichkern wurden Porenwasserdrücke gemessen (Bild 10, siehe Anlage). Die Messergebnisse zeigen hier keine tidebedingten Porenwasserdruckänderungen. Da die Messergebnisse durchgängig eine höhere Druckhöhe als im oberen Grundwasserleiter aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass durch den an der Deichbasis befindlichen Klei ein hydraulischer Kontakt zwischen Deichkern und oberem Grundwasserleiter verhindert wird und sich das Wasser im Deichkern aufgestaut hat.

#### Schiffsinduzierte Wellen

Die Wellenperiode des Primärwellensystems ist gering im Vergleich zur Tidewelle. Dies führt dazu, dass sich die Primärwelle aufgrund der vergleichsweise kurzen Belastungszeit und der starken Dämpfung durch den

Boden weniger weit im Untergrund ausbreiten kann als die Tidewelle. Eine gemessene Absunkhöhe von rd. 0,50 m an der Messposition LZ3 wird im Deichuntergrund stark gedämpft, so dass im oberen Grundwasserleiter noch Absunkhöhen von rd. 2 cm (PWD 4\_2, 5\_3 und 6\_3) und im unteren Grundwasserleiter nur noch Absunkhöhen von rd. 3 cm (PWD 4\_3, 5\_3, 6\_3) unter dem Deich gemessen werden konnten. Im Deichkern konnten keine schiffsinduzierten Porenwasserdruckschwankungen gemessen werden. Sekundärwellen, deren Wellenperioden klein im Vergleich zu den Wellenperioden des Primärwellensystems sind, konnten im Deichuntergrund mit Ausnahme der Messposition (PWD 1\_1) unmittelbar hinter dem Deckwerk nicht gemessen werden. Aufgrund der Größenordnung dieser Messergebnisse können schiffsinduzierte Einflüsse auf die Verformung und die Standsicherheit des Deiches ausgeschlossen werden.

### **Zusammenfassung**

Tide-, Wind- und Schiffswellen stellen die wesentlichen dynamischen Belastungsgrößen von Deckwerken und Deichen im Ästuargebiet dar. Die Kenntnis der Wechselwirkungen zwischen hydrodynamischer Belastung und bodenmechanischen Prozessen stellt eine wichtige Grundlage für die Bemessung der Deiche und die Vermeidung von Deichschäden dar.

Die vorliegende Arbeit umfasst erste Ergebnisse eines Untersuchungsprogramms zur Wirkung schiffserzeugter Belastungen auf Deiche und Deckwerke im Tideästuar am Beispiel des Altenbrucher Bogen. Im Rahmen dieses Untersuchungsprogramms, veranlasst durch aufgetretene Schäden am Deich und am Deckwerk, wurde der Einfluss von Schiffswellen auf das Vorland, das Deckwerk und den Deich untersucht. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit werden erste Ergebnisse zum Einfluss schiffsinduzierter Wellen auf den Grundwasserstand im Deich und im Deichuntergrund vorgestellt. Weitere Untersuchungen zum Einfluss von Schiffswellen auf die Deckwerksstabilität und die Vorstranderosion sowie zum Einfluss schiffsinduzierter Schwingungen werden z.Zt. an der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführt.

Der Einfluss von Schiffswellen auf die Porenwasserdrücke im Deich wurde am Beispiel von Naturmessungen vor Altenbruch dargestellt. Es wurde gezeigt, dass bei Normalwasserständen die schiffsinduzierten Porenwasserdruckschwankungen im Deichuntergrund gering im Verhältnis zu tideinduzierten Porenwasserdruckschwankungen sind. Daraus kann gefolgert werden, dass schiffsinduzierte Einflüsse auf die Verformung und die Standsicherheit des Deiches ausgeschlossen werden können.

### **Literatur**

EAK, 2002: Empfehlungen A 2002 - Äußere Belastung als Grundlage für Planung von Küstenschutzwerken. Die Küste H. 63

SCHÜTTRUMPF, H.; POHL, M.; ZIERACH, R. (2005): Wirkung schiffserzeugter Belastungen auf den Deich im Altenbrucher Bogen (BAW-Kolloquium 2005). <http://www.baw.de/downloads/veranst/vortraege/Vortrag1.pdf>

SIEFERT, W. (1998): Bemessungswasserstände 2085 A entlang der Elbe. Ergebnisse einer Überprüfung der Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren (1995/96). Die Küste. H. 60. S. 227-256

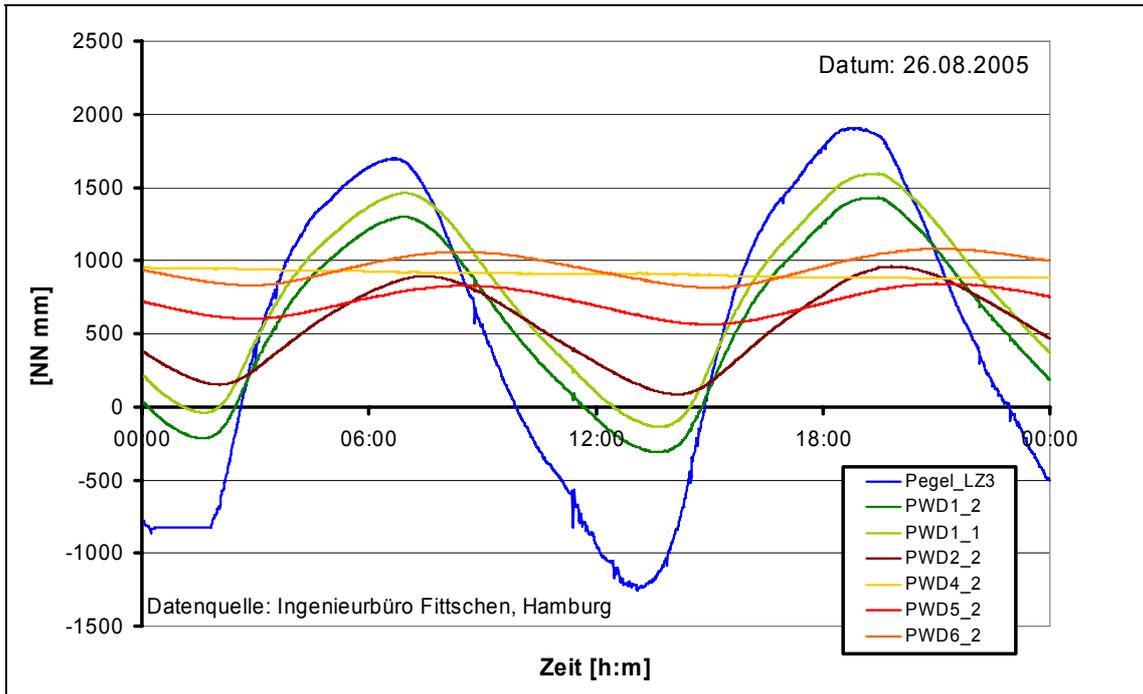
### **Verfasser**

Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf  
Referat Ästuarsysteme I  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), DSt Hamburg  
Wedeler Landstrasse 157, 22559 Hamburg  
Tel.: 040 81908 – 332  
E-Mail: [schuettrumpf@hamburg.baw.de](mailto:schuettrumpf@hamburg.baw.de)

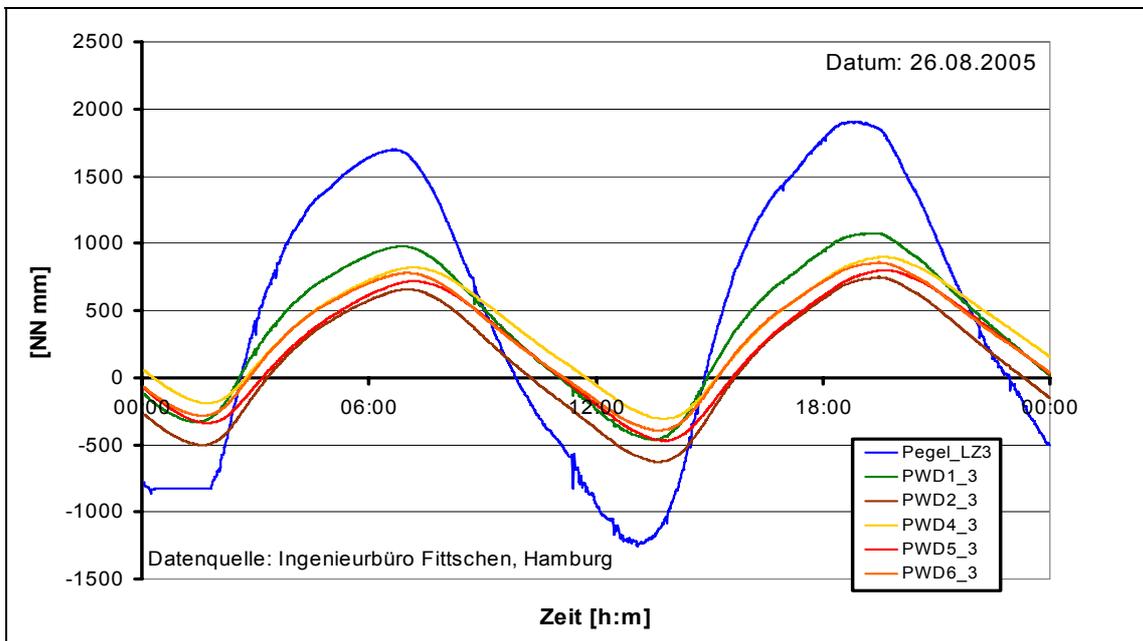
Dr.-Ing. Martin Pohl  
Referat Geotechnik Nord  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), DSt Hamburg  
Wedeler Landstrasse 157, 22559 Hamburg  
Tel.: 040 81908 – 310  
E-Mail: [pohl@hamburg.baw.de](mailto:pohl@hamburg.baw.de)

**Seeschifffahrt, Seewasserstraßen und Seehäfen (2)**  
Schiffserzeugte Belastungen von Ästuardeichen am Beispiel der Elbe

**Anlage**

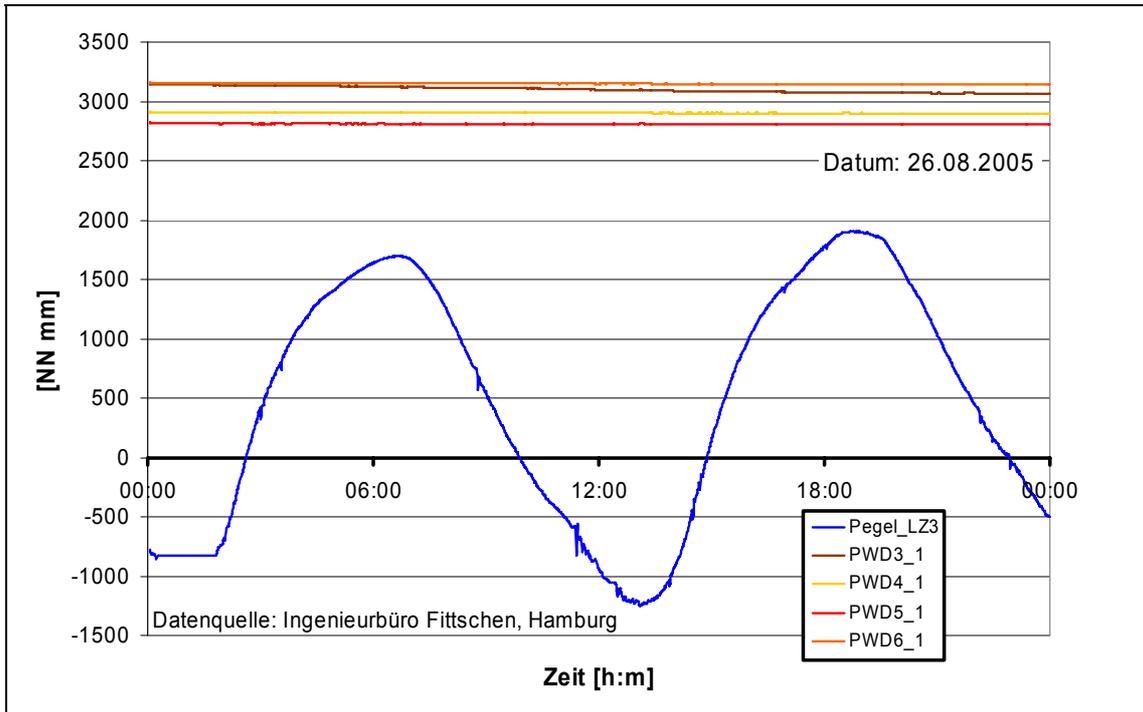


**Bild 8:** Tidebedingte Wasserstandsänderungen – oberer Grundwasserleiter

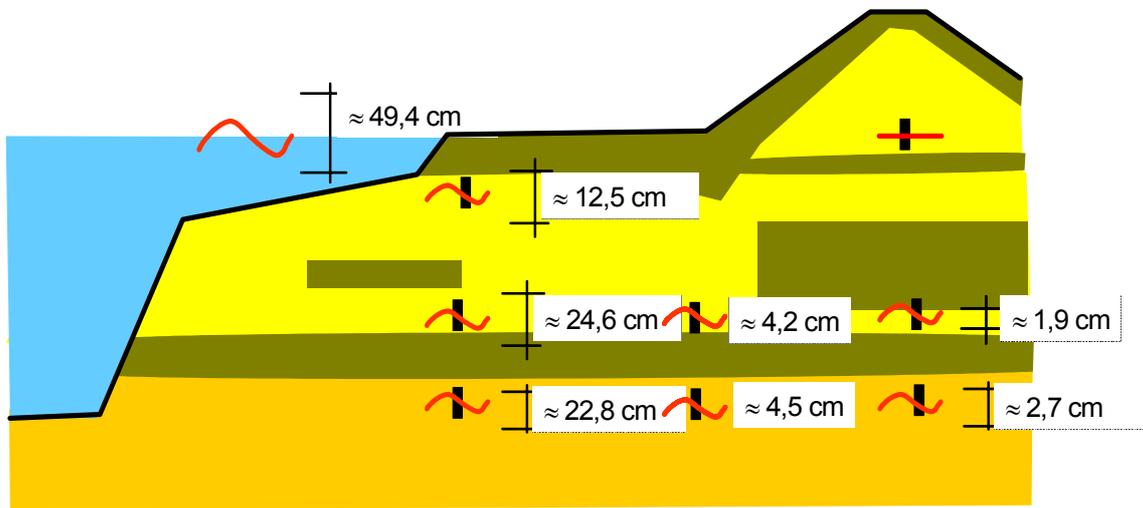


**Bild 9:** Tidebedingte Wasserstandsänderungen – unterer Grundwasserleiter

**Anlage**



**Bild 10:** Wasserstände im Deichkern und in der Böschung



**Dargestellt sind die Größtereignisse / PWD im Untersuchungszeitraum**

**Bild 11:** Entwicklung der Schiffswelle (hier: Absunk, Größtereignisse) im Untergrund (schematisch)