

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Pohl, Martin; Schüttrumpf, Holger

Naturmessungen zur Erfassung der Wasser-Boden-Interaktion bei Deichen in Ästuarien

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100751>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pohl, Martin; Schüttrumpf, Holger (2006): Naturmessungen zur Erfassung der Wasser-Boden-Interaktion bei Deichen in Ästuarien. In: Inst. für Geotechnik, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (Hg.): Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen, 2. Symposium 'Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen', Universität Siegen, 10. Februar 2006. Siegen: Universitätsverlag Siegen. S. 129-138.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Naturmessungen zur Erfassung der Wasser-Boden-Interaktion bei Deichen in Ästuarien

Dr.-Ing. M. Pohl
Dr.-Ing. H. Schüttrumpf

Bundesanstalt für Wasserbau
Wedeler Landstrasse 157, 22559 Hamburg

1 Einleitung

Schäden an Deichen, Uferdeckwerken, Buhnen und anderen Ufersicherungswerken können in Ästuarien 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 geotechnischen Widerständen von Bedeutung. Ziel der dieser Arbeit zugrundeliegenden Naturmessungen war es daher, die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Wasserstandsänderungen infolge Tide sowie Schiffswellen und dem Deich sowie dem Deckwerk zu erfassen.

Im Bereich Altenbruch an der Elbe wurde ein Messquerschnitt definiert, um an zwei Messpositionen vor dem Deich Wellen-, Strömungs- und Trübungsmessungen durchzuführen. Durch die Verwendung des Automatischen Schiffsidentifizierungssystems (AIS) war eine direkte Zuordnung von Schiffen und Schiffswellen möglich. Weiterhin wurden an 6 Positionen am Deckwerk, im Deichvorland und im Deich in bis zu 3 Tiefenlagen Porenwasserdruckmessgeber bis in eine Tiefe von 27 m eingebaut, um Wasserdruckänderungen in den Grundwasserleitern sowie im Deich zu erfassen.

Die vorliegenden Naturmessungen dienen somit der grundlegenden Erfassung von Wasserdruckänderungen im Untergrund sowie im Deichkern durch Wellen- und Tideschwankungen in der Elbe. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt, der ausschließlich die Interaktion Wasser-Boden für den Deich beinhaltet, und die Deichstandsicherheit und -gebrauchstauglichkeit beurteilt.

2 Lage und Bodenaufbau im Messbereich

Der im Altenbrucher Bogen gelegene Messquerschnitt (Abb. 1) befindet sich in einer exponierten Lage. Tide und Schiffsbelastungen können wegen der Nähe der Fahrrinne der Elbe zum Ufer mit einem minimalen Abstand von 500 m wenig beeinflusst auf das Deckwerk, das Deichvorland und den Deich treffen. Die Breite der Fahrrinne beträgt 400 m.

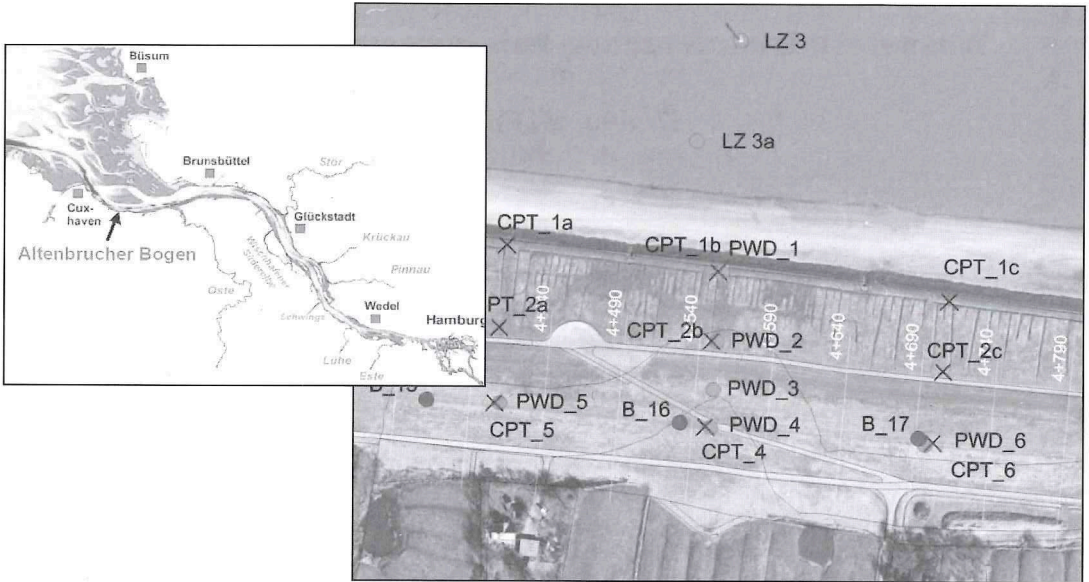


Abb. 1: Lage des Messbereichs

In Deichquerrichtung beinhaltet der Messbereich die Langzeitmessstationen LZ3 und LZ3a in der Elbe zur Erfassung von Wellen, Strömung und Trübungen in der Elbe (Abb. 1). Im Zuge von Bohrungen wurden am Deckwerk, am Deichfuß, in der Deichböschung und an der Deichkrone in der Flucht von LZ3 Porenwasserdruckaufnehmer (PWD) in bis zu 3 Tiefenlagen im Untergrund - im Deichkern sowie im oberen und unteren Grundwasserleiter - eingebaut (siehe Abb. 1, Tab. 1, Abb. 2). Zur Erfassung dreidimensionaler Untergrund- und Strömungsverhältnisse wurden weitere PWD im Untergrund unterhalb der Deichkrone in Deichlängsachse positioniert. Der Messquerschnitt umfasst somit einen Bereich von etwa 300 m Ausdehnung in Deichlängs- und 325 m in Deichquerrichtung.

Zuvor durchgeführte Spitzendrucksondierungen (CPT-U) erlaubten eine Vorbestimmung der Einbaulagen der PWD in den wasserführenden Schichten und im Deichkern. Aufgrund der CPT-U und der Bohrungen ist von folgendem generellen Bodenaufbau im Messbereich auszugehen (Abb. 2):

Die Deiche bestehen aus einem Sandkern, der mit Klei abgedeckt ist. Örtlich wurde im Deichkern Klei angetroffen, der bei großer Mächtigkeit dem 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.

Tab. 1: Einbaulagen der PWD

Deichkern		oberer Sand		unterer Sand	
PWD Nr	m NN	PWD Nr	m NN	PWD Nr	m NN
-	-	1_1	-1,31	-	-
-	-	1_2	-10,21	1_3	-14,71
-	-	2_2	-10,25	2_3	-15,15
4_1	+1,73	4_2	-4,27	4_3	-14,27
5_1	+1,00	5_2	-8,20	5_3	-14,20
6_1	+0,45	6_2	-3,65	6_3	-14,05

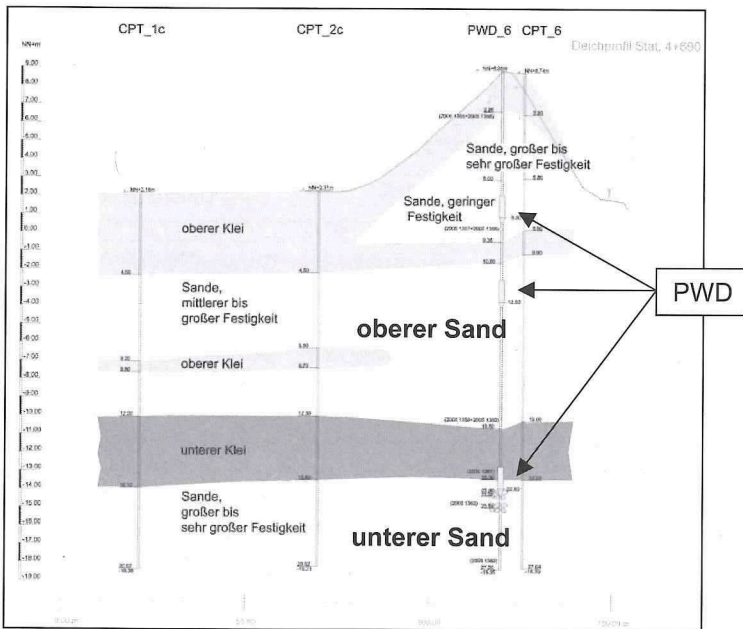


Abb. 2: Bodenaufbau im Messbereich

Gemäß der durchgeführten bodenmechanischen Untersuchungen bestehen die oberen Sande im Untersuchungsbereich vorwiegend aus enggestuften Feinsanden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert k von $3 \cdot 10^{-5}$ m/s. Die unteren Sande haben aufgrund größerer Bodenanteile die vorwiegend im Bereich von feinsandigem Mittelsand liegen mit $k = 2 \cdot 10^{-4}$ m/s eine größere Durchlässigkeit.

Der obere und der untere Klei können mit Durchlässigkeitsbeiwerten von $k = 1 \cdot 10^{-8}$ bzw. $5 \cdot 10^{-9}$ m/s als hydraulisch undurchlässig angenommen werden. Örtliche Sandeinschlüsse / -bänder erlauben jedoch ggf. einen hydraulischen Kontakt. Kompressions- und Triaxialversuche an Sonderproben aus den jeweiligen bindigen Schichten wurden durchgeführt, um das Spannungs-Dehnungsverhalten für anschließende numerische Simulationen (Abschnitt 4) zu erfassen.

3 Wasserstandsmessungen

3.1 Tidewasserstände

Die Wasserstände im Deichuntergrund ändern sich in Abhängigkeit der tidebedingten Wasserstände in der Elbe. Diese werden durch den anstehenden Boden hinsichtlich Amplitude (Tidehub) und zeitlichem Verlauf gedämpft (Abb.3, Abb.4). Die ARGE Harms, Fittschen hat die Daten messtechnisch erfasst und aufbereitet.

In Abb. 3 und Abb.4 sind beispielhaft die Tideverläufe am 26.08.2005 dargestellt. Unmittelbar hinter dem Deckwerk ist im oberen Grundwasserleiter (PWD 1_1, 1_2 - Abb. 3) die Tideamplitude im Untergrund bereits gedämpft, der zeitliche Verlauf ist jenem in der Elbe ähnlich, tritt aber etwa 30 Minuten später ein. Im unteren Grundwasserleiter ist die Tideamplitude im gleichen Schnitt (PWD 1_3 – Abb. 4)) geringer als im oberen Grundwasserleiter, der zeitliche Versatz ist identisch.

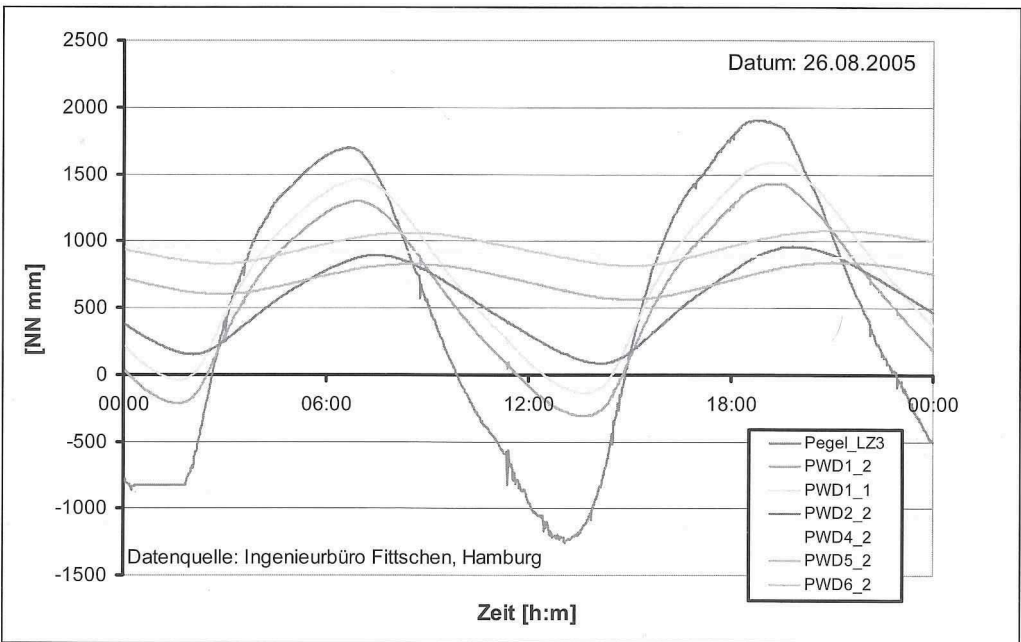


Abb. 3: Tidebedingte Wasserstandsänderungen – oberer Grundwasserleiter

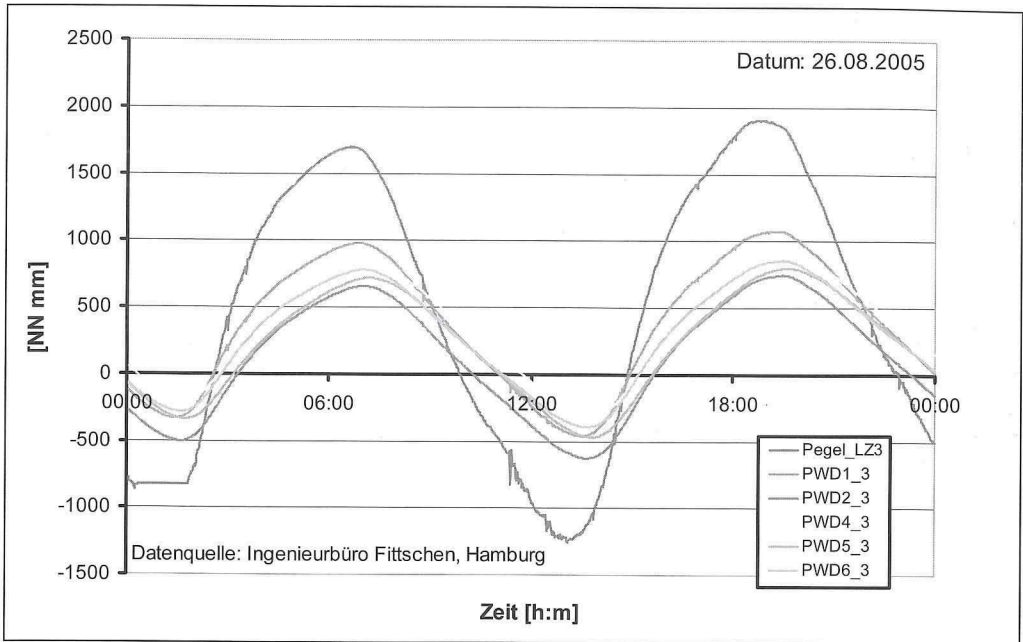


Abb. 4: Tidebedingte Wasserstandsänderungen – unterer Grundwasserleiter

Wegen der feineren Kornanteile im oberen Grundwasserleiter nimmt die Dämpfung des Tideinflusses hinsichtlich zeitlichem Verlauf und Amplitude mit zunehmender Entfernung vom Fahrwasser zu. Im unteren Grundwasserleiter bleiben beide Parameter aufgrund des wasserdurchlässigeren Bodens annähernd konstant.

Die Messergebnisse sind in sich plausibel. Die auf NN bezogenen Wasserstände zeigen zwischen ähnlich angeordneten PWD jedoch mitunter Abweichungen. Beispielsweise müssten die Druckhöhen an redundanten PWD (z.B. PWD 1_1, 1_2) im selben Vertikalschnitt der selbigen Bodenschicht gleich sein; die Druckhöhen der PWD 2_2 und 2_3 sollten aufgrund ihrer geometrischen Lage zwischen denen von PWD 1 und 4 / 5 / 6 liegen. Als Ursache für die unterschiedlichen Wasserdruckhöhen sind einerseits Abweichungen in den PWD-Lagen von den protokollierten Einbaulagen zu vermuten, andererseits können diese auf lokale Feinschichtungen im Boden zurückgeführt werden.

Da der PWD 4_2 in einer Kleimulde eines verfüllten Wehls positioniert ist, erfährt dieser keine Druckänderungen.

Durch das Anschneiden des oberen und unteren Grundwasserleiters durch die Elbe ist ein hydraulischer Kontakt gegeben. Die Wasserdruckhöhen sind folglich sehr ähnlich.

Die PWD im Deichkern (Abb. 5) weisen eine größere Druckhöhe auf als im oberen Grundwasserleiter sowie in der Elbe vorherrschend. Es ist folglich davon auszugehen, dass der an der Deichbasis befindliche Klei durchgängig einen hydraulischen Kontakt zwischen Deichkern und oberem Grundwasserleiter verhindert und sich Wasser im Deichkern aufgestaut hat. Wegen der in den Grundwasserleitern herrschenden Druckhöhe (bei $Thw \geq NN +1,0$ m) und der geometrischen Lage der Unterkante des oberen Kleis (bei

etwa NN $\pm 0,0$ m) sind die Grundwasserleiter zeitweilig gespannt. Die Druckhöhe des PWD 3_1 in der Böschung (siehe Abb. 1) verhält sich abhängig vom Wasserstand im Deichkern.

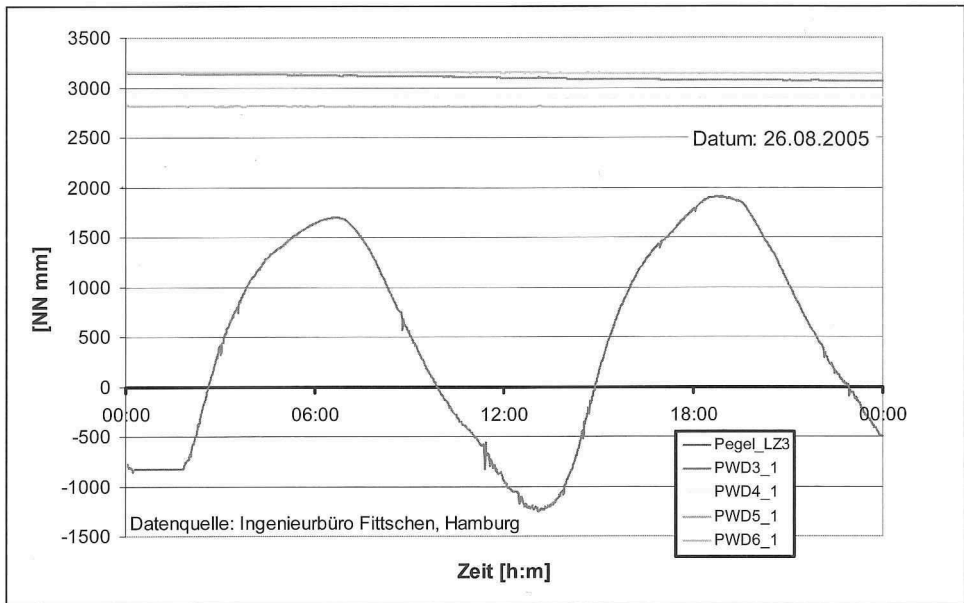


Abb. 5: Wasserstände im Deichkern und in der Böschung

Der räumliche und zeitliche Versatz der Maximal- und Minimalwerte der Wasserstände im oberen und unteren Grundwasserleiter erfordert eine Betrachtung zu unterschiedlichen maßgebenden Zeitpunkten in der numerischen Simulation (Abschnitt 4), um die Wasserstände realitätsgetreu zu simulieren.

3.2 Schiffsinduzierte Wellen

In Abb. 6 ist der durch Schiffe verursachte charakteristische Wellenverlauf schematisch dargestellt. Dieser ist durch einen Bugstau, nachfolgenden Absink, Wiederanstieg des Wassers (Primärwelle) und Einpendeln auf die Ausgangswasserlage mit einer Überlagerung durch Sekundärwellen gekennzeichnet.

Mit Hilfe der Porenwasserdruckmessungen wird die Ausbreitung der Schiffswellen im Untergrund verfolgt. Die Laufzeit der Schiffswellen von der Langzeitmessstation LZ3 bis zu den PWD 1 dauert etwa 15 Sekunden. Eine exakte Zuordnung der Wellenfortpflanzung im Untergrund an den verschiedenen PWD zu einem Schiff war nicht immer möglich. Infolgedessen wurden die Größtereignisse an den jeweiligen PWD für die numerische Simulation (Abschnitt 4) berücksichtigt, obwohl diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten und von verschiedenen Schiffen verursacht wurden. In Abb. 7 sind beispielhaft die gemessenen Größtereignisse infolge Bugstau dargestellt. Mit zunehmender Entfernung von der Elbe werden die Wellen zunehmend gedämpft, so dass unter dem Deich im oberen Grundwasserleiter die Maximalereignisse überwiegend in der Größenordnung der Messgenauigkeit der PWD (± 12 mm) liegen.

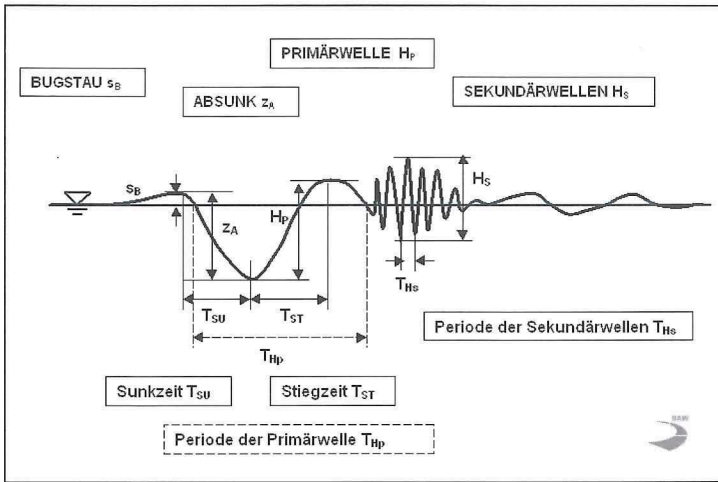


Abb. 6: Schiffswellencharakteristik

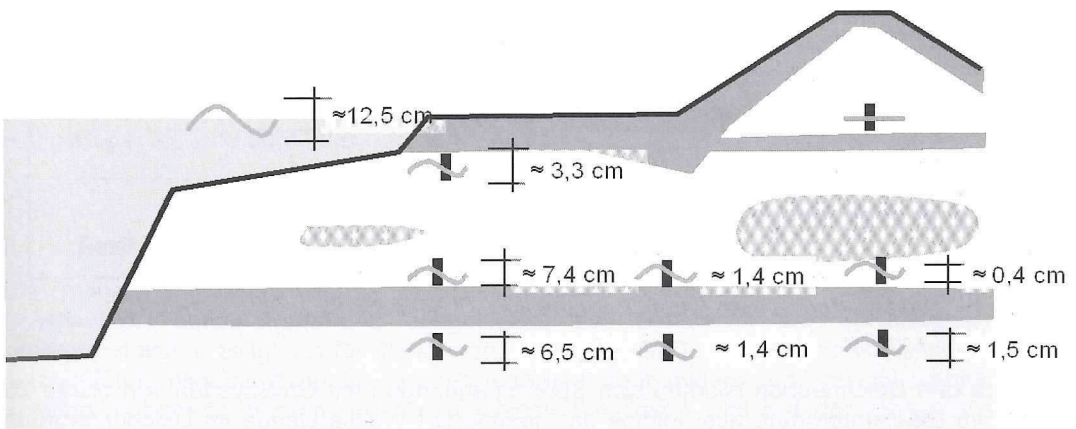


Abb. 7: Fortpflanzung der Schiffswelle (hier: Bugstau, Größtereignisse) im Untergrund (schematisch)

4 Numerische Simulationen

Die Auswirkungen von tidebedingten Wasserstandsänderungen und einlaufenden Schiffswellen in den Untergrund auf die Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit werden mit einem Programm basierend auf der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt.

Die Simulation beginnt mit dem Deichneubau (1980) ohne vorherige Belastung durch einen Altdeich. Der obere Klee steht an der Deichbasis an. Anschließend wird der im Messzeitraum ermittelte größte Tidehub (20.09.2005 3,64 m) sowie die Größtereignisse infolge Schiffswellen simuliert.

Die Simulation der Tidewelle führt zu einer zyklischen Beanspruchung des Deiches und des Deichuntergrundes. Infolge der geänderten Wasserdrücke und somit geänderten Wichten im Untergrund hebt und setzt sich der Deich in Abhängigkeit der Tide (Abb. 8, Vorzeichen: positiv = Setzungen, negativ = Hebungen). Es treten maximale rechnerische Setzungen von 0,745 mm an der Deichkrone und Deichbasis bei Tideniedrigwasser (Tnw) gegenüber der Ausgangssituation auf. Die Hebungen betragen bei Tidehochwasser (Thw) etwa 0,12 mm.

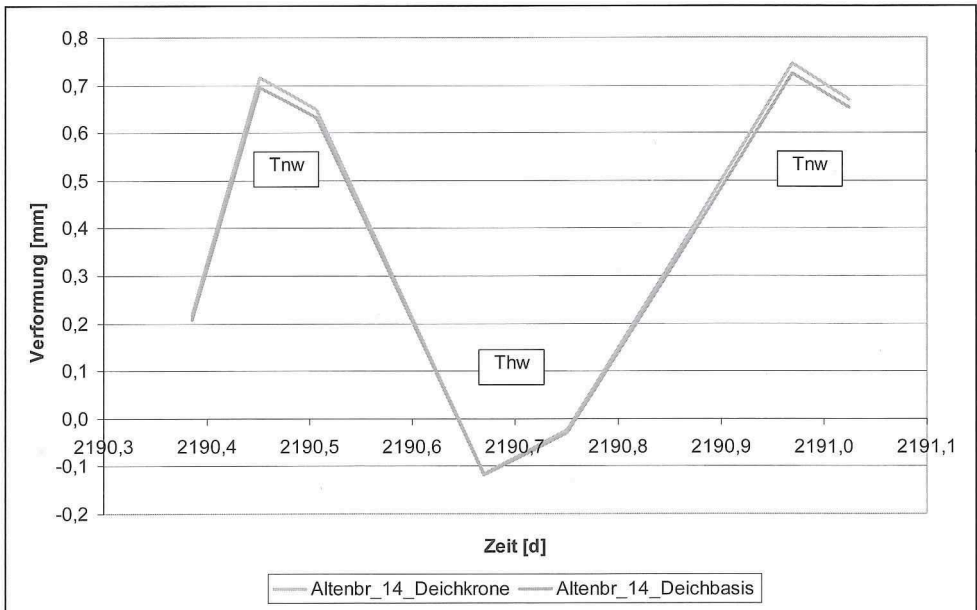


Abb. 8: Deichverformungen durch Tideeinfluss

Durch den Deichneubau bildeten sich Spreizspannungen mit Größtwerten von bis zu 26 kPa im Deichuntergrund aus. Infolge der geänderten Wasserstände im Deichuntergrund schwanken die Maximalspannungen um maximal 0,8 kPa.

Die Deichsetzungen an der Deichkrone infolge schiffsinduzierter Wellen sind etwa 14 mal kleiner als die durch die Tide verursachten Deichverformungen (Abb. 9). Zu beachten ist, dass für die Simulation die Randbedingungen zeitgleich simuliert wurden - d.h. gleichzeitiger Schiffswelleneinfluss unter Berücksichtigung der Größtereignisse unterschiedlicher Schiffe hinsichtlich Amplitude und Zeitdauer an verschiedenen PWD - und somit weit auf der sicheren Seite liegen.

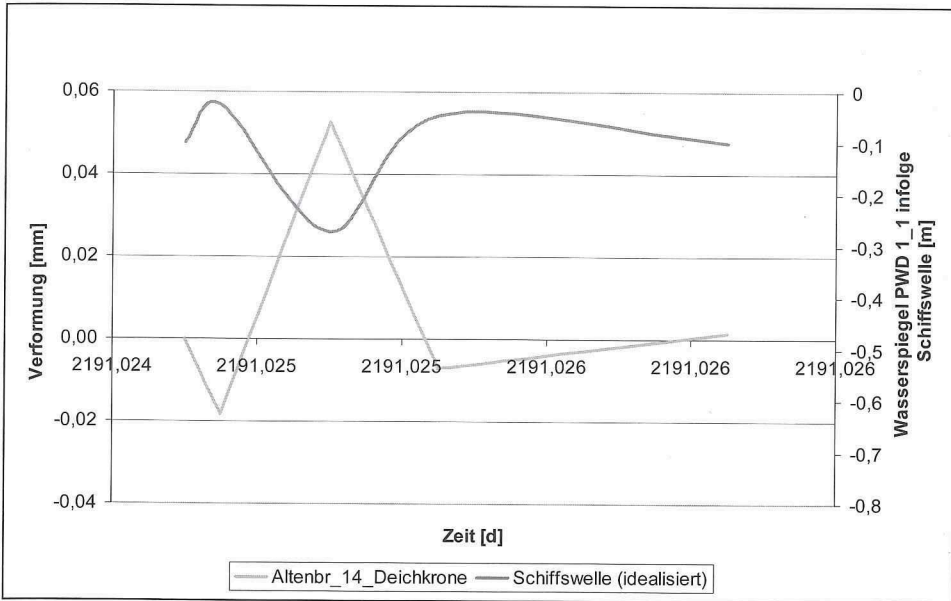


Abb. 9: Deichverformungen durch Schiffseinfluss

Die auftretenden Spreizspannungen infolge Schiffswellen im Deichuntergrund sind etwa 8 mal geringer als jene durch die Tide verursachten.

5 Fazit

Die numerischen Simulationen wurden für die Größtereignisse infolge Tide und Schiffswellen durchgeführt und ausgewertet. Die Simulation der Schiffswellen im Untergrund wurde zeitgleich für die an den jeweiligen PWD gemessenen Größtereignisse durchgeführt, obwohl diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten und von verschiedenen Schiffen verursacht wurden. Insofern ist diese Simulation weit auf der sicheren Seite liegend.

Eine Gegenüberstellung der untersuchten Einflussfaktoren Tide und Schiffswellen mit den Deichverformungen aus Konsolidation (Abb. 10) zeigt, dass schiffsinduzierte Wellen keinen nennenswerten Einfluss auf die Deichstandsicherheit und –gebrauchstauglichkeit haben.

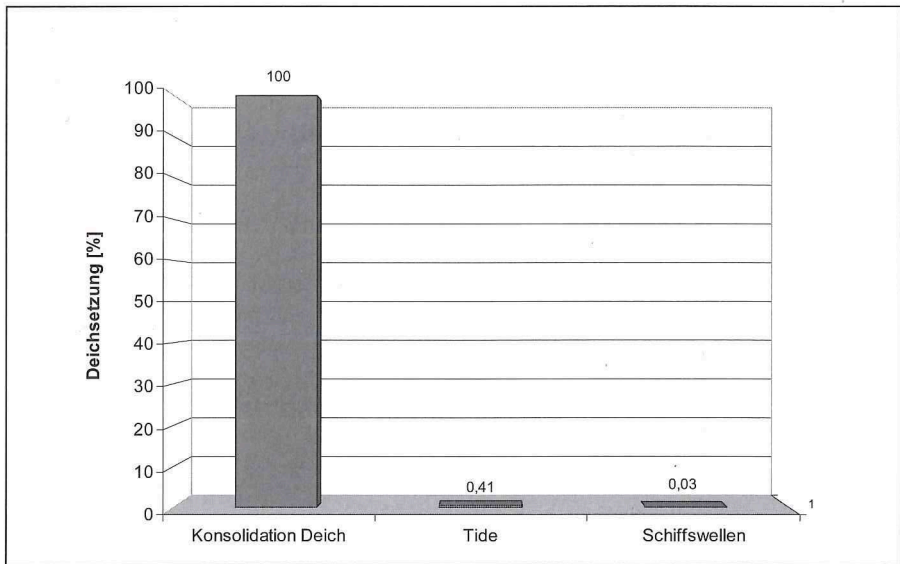


Abb. 10: Gegenüberstellung der Einflussfaktoren auf die Deichverformungen

6 Danksagung

Wir danken dem WSA Cuxhaven und dem WSA Hamburg für die gute Zusammenarbeit sowie dem Bohrunternehmen Harms Brunnenbau, Cuxhaven-Oxstedt und dem Ingenieurbüro Fittschen, Hamburg zusätzlich für die durchgeführten Arbeiten und die Aufbereitung der Daten.

7 Referenz

SCHÜTTRUMPF, POHL, ZIERACH (2005): Wirkung schiffserzeugter Belastungen auf den Deich im Altenbrucher Bogen, Vortrag beim BAW-Kolloquium am 10.11.2005 in Hamburg (<http://www.baw.de/vip/veranstaltungen1.php?jahr=2005&art=kolloquium>)



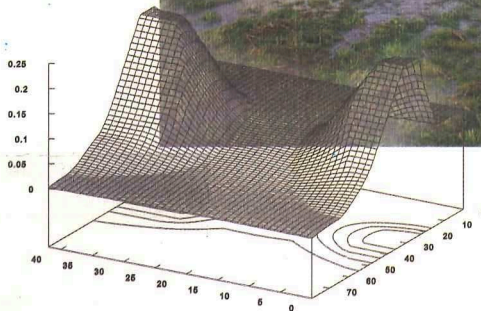
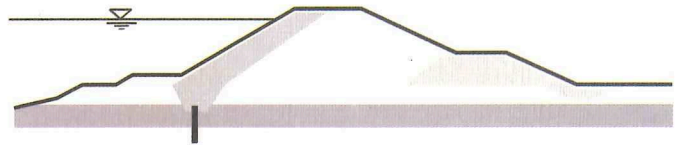
Institut für
Geotechnik



Forschungsinstitut
Wasser und Umwelt

Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen

Handbuch für Theorie und Praxis
Vol. II · 2006



4.54

52345

Verleger:

Richard A. Herrmann · Jürgen Jensen



UNIVERSITÄT
SIEGEN