

EINFLUSS ZYKLISCHER BAUWERKSBEWEGUNGEN AUF DIE STABILITÄT DER SANDGRÜNDUNG UNTER EINEM CAISSON-WELLENBRECHER

von

Matthias Kudella¹
Hocine Oumeraci²

ABSTRACT

Some results of large-scale model experiments, performed in the Large Wave Flume (GWK) in Hanover are discussed. These experiments are concerned with the study of the generation of transient and residual pore pressure in a seabed beneath a caisson breakwater subject to both pulsating and breaking wave loads. The simulated seabed and drainage conditions correspond to those encountered in a loose sand bed with thin clay or silt layers. Even under such unfavourable conditions, total liquefaction due to residual pore pressure could not occur during the experiments. It is shown that the residual pore pressure is essentially generated by the caisson motions due to breaking wave loads and that they are closely related to residual soil deformation, which may lead to the collapse of the breakwater.

1 EINLEITUNG

Bodenverflüssigung kann eine der Ursachen für das Versagen von monolithischen Wellenbrechern und anderen Seebauwerken sein (Zen et al. 1986, Chaney & Fang 1991).

Bei der totalen Verflüssigung gehen die Effektivspannungen im Korngerüst gegen Null und das Mehrphasensystem Boden-Flüssigkeit-Gas verhält sich wie eine Flüssigkeit. In diesem Zustand erreicht der Wert des Porenwasserüberdrucks den Wert der vertikalen Anfangseffektivspannung.

Bei der partiellen Bodenverflüssigung reduzieren sich die Effektivspannungen nur teilweise und es verbleibt eine Restscherfestigkeit des Bodens. Für die Gründung maritimer Strukturen sind hierbei zwei verschiedene Mechanismen zu beachten:

1. *Zur Bodenoberfläche gerichteter Druckgradient unter einem Wellental:* Der Druckunterschied bewirkt eine zur Sandoberfläche wirkende Kraft. Erreicht sie den Wert der

¹ Dipl.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

² Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

Anfangseffektivspannung, erfolgt eine vorübergehende Verflüssigung beim Durchgang des Wellentales. Dieser Mechanismus ist besonders für die Grenzschicht relevant.

2. *Anstieg des mittleren Porenwasserdrucks:* Bei behinderter Drainage kann der bei jedem Belastungszyklus induzierte Porenwasserdruck zu einem Anstieg des mittleren Porenwasserdruck führen. Dieser Mechanismus spielt im Sanduntergrund unter monolithischen Strukturen eine besondere Rolle, da hier hohe Scherspannungen auch in größerer Tiefe auftreten können.

Wellenbelastung allein kann kaum zur vollständigen Verflüssigung des Bodens unterhalb eines Bauwerks führen (Oumeraci 1994). Allerdings kann die Kombination von Wellen und welleninduzierten Bauwerksbewegungen Bodenverformungen hervorrufen, die zu einem deutlichen Anstieg des mittleren Porenwasserdruck unterhalb des Bauwerks und somit zu einer Reduzierung der Scherfestigkeit in der Gründung führen können (Oumeraci 1994, Oumeraci et al. 2001).

Dieser Betrag stellt einige Ergebnisse von großmaßstäblichen Untersuchungen an einem Caisson-Wellenbrecher vor, die 2001 im Großen Wellenkanal (GWK) in Hannover durchgeführt wurden. Im Mittelpunkt steht die Diskussion von Prozessen, welche zu einem Anstieg des mittleren Porenwasserdrucks und somit zu einer Verminderung der Scherfestigkeit des Sanduntergrunds führen. Eine detaillierte Ausführung der Ergebnisse ist in Kudella und Oumeraci (2004) sowie in Kudella et al. (2005) zu finden.

2 RELEVANTE PROZESSE UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Der Anstieg des mittleren Porenwasserdruckes hängt sowohl von den Parametern der angreifenden Wellen als auch von Eigenschaften ab, welche den Wellenbrecher und seine Gründung beschreiben. Die Interaktionsprozesse zwischen Welle, Bauwerk und Gründung bestimmen hierbei die Anforderungen, welche an den Modellaufbau gestellt werden müssen.

Prozesse und Parameter: Die Belastung der Sandgründung unterhalb des Bauwerks erfolgt auf zwei Arten: Beim *Wellenmodus* wirken die welleninduzierten Druckänderungen im Wasser auf den Seeboden und beim *Bauwerksmodus* wirken die welleninduzierten Bauwerksbewegungen als oszillierende Gesamtspannung auf den Seeboden. Die Überlagerung beider Modi stellt die resultierende Belastung der Gründung dar. Die Belastung beim Wellenmodus ist im Wesentlichen durch die Wellenparameter und die Wassertiefe bestimmt. Die Belastung beim Bauwerksmodus ist durch die Wellenbelastung auf das Bauwerk und die dynamischen Eigenschaften des Bauwerks und seiner Gründung charakterisiert.

Anforderungen an das Modell: Die Realisierung des Modells erfolgte unter Berücksichtigung von vier Bedingungen, unter denen ein Anstieg des mittleren Porenwasserdrucks zu erwarten ist: i) hohe Sättigung und ii) mittlere Lagerungsdichte ($D_r \approx 0.4$) des Sanduntergrunds, iii) reduzierte Drainage des Untergrunds durch Einbringen einer undurchlässigen Schicht (realisiert durch Polyethylenfolien mit kleinen Fugen) und iv) hohe Scherspannungen im Untergrund, hervorgerufen durch ausreichend große Bauwerksbewegungen bei Belastung durch brechende Wellen.

Versuchsaufbau und Durchführung: Versuchsaufbau sowie die Anordnung der installierten Meßaufnehmer sind in Abbildung 1 dargestellt. Druckmeßdosen registrieren die Wellenbe-

lastung auf den Caisson und 3 Wegtaster die Bewegungen des Caissons. Im Sand unterhalb des Wellenbrechers wird an 22 Positionen der Porenwasserdruck und an 4 Positionen die mittlere Totalspannung aufgezeichnet. Leitfähigkeitsmessungen erlauben Rückschlüsse auf Änderungen in der Porosität des Sandes. Das Versuchsprogramm umfaßte regelmäßige Wellen und Wellenspektren mit Wellenhöhen zwischen 0.4 und 0.9 m und Wellenperioden zwischen 4.5 und 8 s. In den Versuchen wurden 30 bis 690 Wellenereignisse generiert.

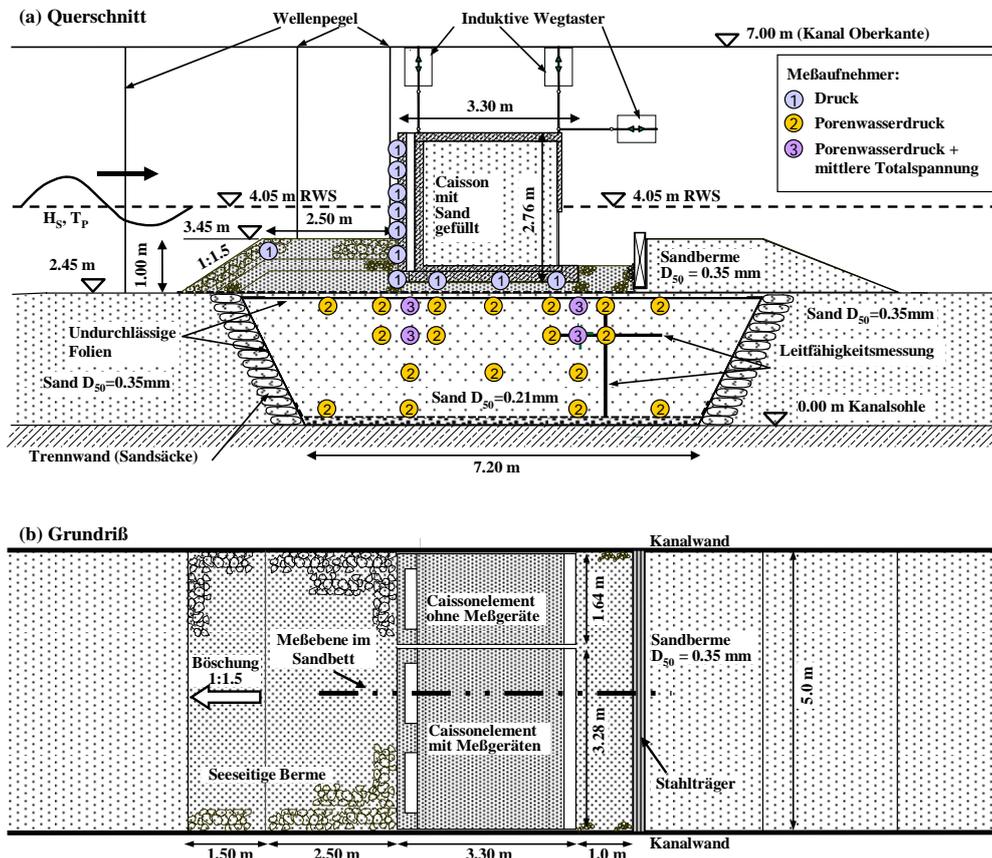


Abbildung 1: Modell des Wellenbrechers mit Anordnung der Meßgeräte

3 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

Eine detaillierte Analyse der Zeitreihen von Wasserspiegelauslenkung, Caissonbewegung und induziertem Porenwasserdruck führte zu dem Ergebnis, daß für den untersuchten Modellaufbau in erster Linie die Bauwerksbewegungen Porenwasserdrücke erzeugen (siehe Kudella & Oumeraci, 2004). Deshalb wird im Folgenden der Einfluß der Bauwerksbewegung auf die Entstehung von transientem Porenwasserdruck und dem Anstieg des mittleren Porenwasserdrucks für regelmäßige Wellen diskutiert.

Transienter Porenwasserdruck: Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang zwischen den vertikalen Caissonbewegungen $d_{v,f}$ bzw. $d_{v,b}$ und der Amplitude des induzierten transienten Porenwasserdrucks u_t im Sanduntergrund nahe der Oberfläche. Sowohl für quasistatische Wellenbelastung als auch für dynamische Belastungen durch Druckschläge ist ein klarer Zusammenhang erkennbar. Die Entwicklung der negativen Druckamplitude aufgrund der Entlastung des Untergrunds unter der seeseitigen Kante des Caissons ist durch die sehr geringe Zugfestigkeit des wassergesättigten Sandes und der Steinschüttung begrenzt. Unter

der wellenabgewandten Seite des Caissons erreicht der Absolutwert der Porendruckamplitude u_t deutlich höhere Werte, was auf die hohe Verdichtung des Sandkörpers zurückzuführen ist.

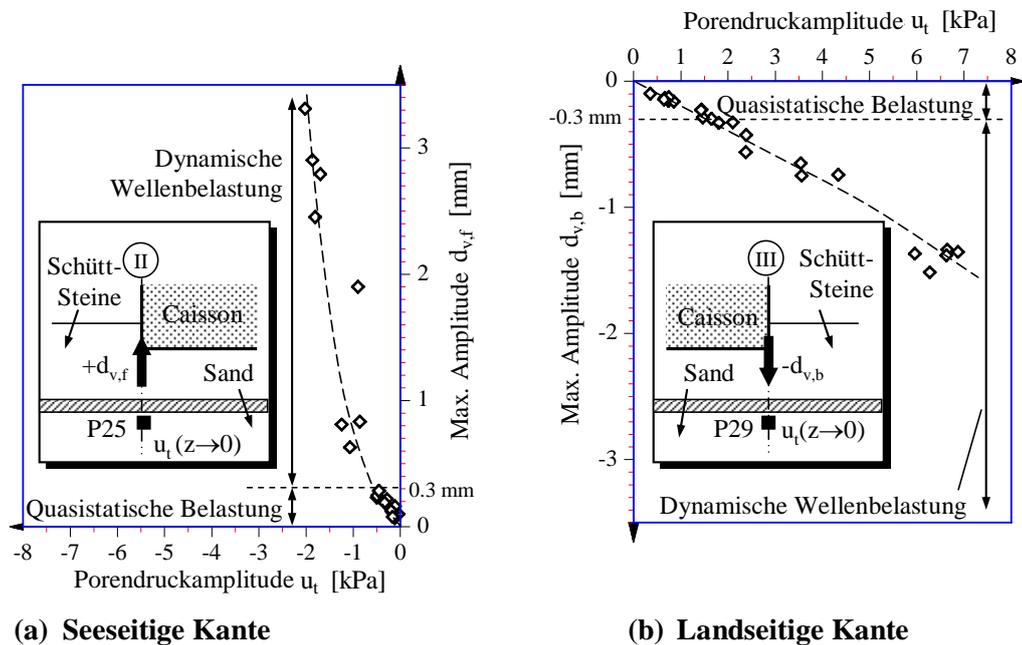


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen vertikalen Caissonbewegungen und transienten Porendruckamplituden unter beiden Caissonkanten nahe der Oberfläche

Anstieg des mittleren Porenwasserdrucks: Um den Zusammenhang zwischen den vertikalen Caissonbewegungen und dem Anstieg des mittleren Porenwasserdrucks zu verdeutlichen, sind in Abbildung 3 der mittlere Porenwasserdruck u_r nach 53 Belastungszyklen (alle Werte innerhalb der Anstiegsphase des mittleren Porendrucks) und die abwärts gerichtete Bewegung der hinteren Caissonkante $d_{v,b}$ für verschiedene Lagerungsdichten ($D_r = 0.31 - 0.45$) dargestellt.

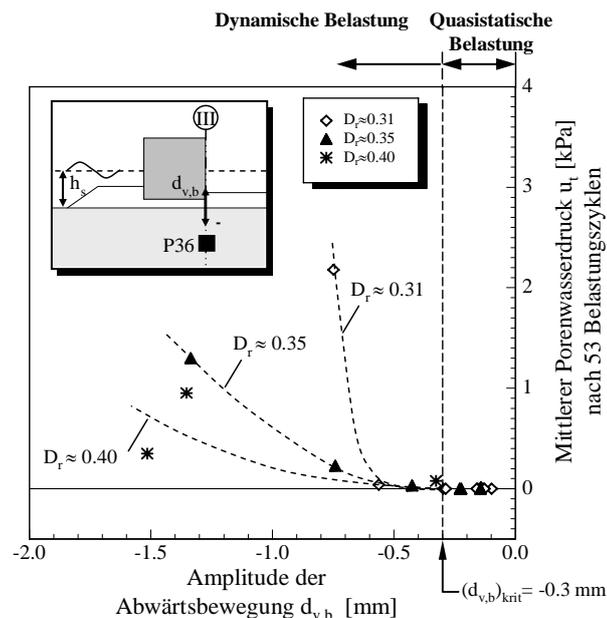


Abbildung 3: Einfluß der Caissonbewegung auf den Anstieg des mittleren Porenwasserdrucks für verschiedene Lagerungsdichten D_r unter quasistatischer und dynamischer Wellenbelastung

Die kritische Amplitude der Vertikalbewegung liegt bei etwa -0.3 mm und entspricht der Grenze zwischen quasistatischer und dynamischer Wellenbelastung (siehe Abbildung 2). Bei Überschreitung dieses Grenzwertes wird der Anstieg des mittleren Porendrucks in starkem Maße von der Lagerungsdichte des Sanduntergrundes bestimmt. Je geringer die Lagerungsdichte, um so größer der Gradient des Druckanstiegs.

Stabilität der Sandgründung: Abbildung 4 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Wellenbelastung (M_t = resultierendes Moment um den hinteren Caissonfuß), vertikalen Oszillationen des Caissons $d_{v,b}$, transienter Porendruckamplitude u_t und Anstieg des mittleren Porendrucks u_r mit den Bauwerkssetzungen $\bar{d}_{v,b}$.

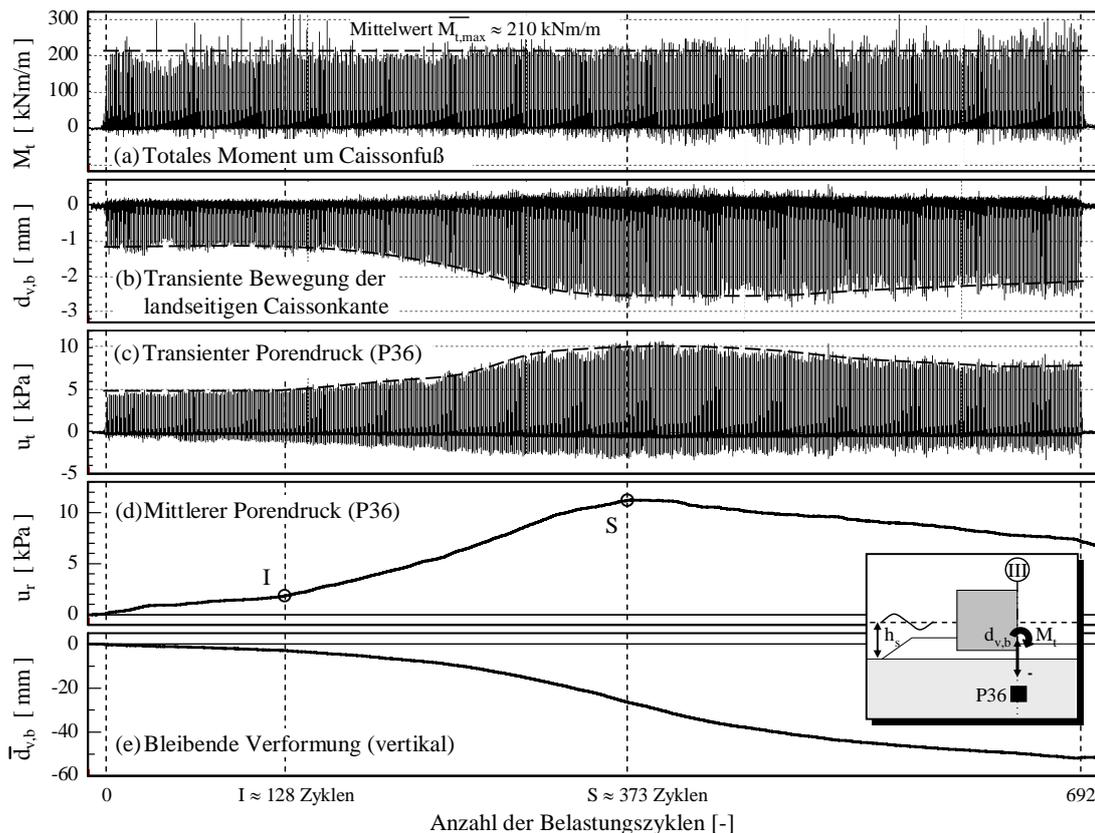


Abbildung 4: Wellenbelastung, Porendruckentwicklung und Bodenverformungen ($H = 0.9$ m, $T = 6.5$ s, $h_s = 1.6$ m)

Obwohl die Belastung relativ konstant bleibt, beginnen die transienten Komponenten des Porendrucks und der Caissonbewegung nach ca. 128 Belastungszyklen deutlich anzusteigen. Nach diesem Wendepunkt I steigt die Generierungsrate des mittleren Porendrucks an, was gleichzeitig von einem Anstieg der Bauwerkssetzung begleitet ist. Im Punkt S ist das Gleichgewicht zwischen Porendruckgenerierung und -dissipation erreicht. Das Verhältnis zwischen mittlerem Porendruck u_r und vertikaler Anfangseffektivspannung σ'_{v0} beträgt hier ca. 0.25 (keine totale Verflüssigung). Im Anschluß daran sinkt aufgrund der zunehmenden Verdichtung des Sanduntergrundes die Generierungsrate des mittleren Porendrucks unter seine Dissipationsrate. Der klare Zusammenhang zwischen der Änderung des mittleren Porendrucks und der Änderung in der Amplitude der transienten Bauwerksbewegung weist auf den starken Einfluß des mittleren Porendrucks auf die Stabilität der Sandgründung hin.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Auch bei der simulierten ungünstigen Drainagesituation und den hohen Bauwerksbelastungen durch brechende Wellen wurde totale Verflüssigung nicht erreicht. Die Untersuchungen zeigten, daß

1. transienter Porendruck und Anstieg des mittleren Porendrucks in erster Linie von den Bauwerksbewegungen erzeugt werden und daß für einen Anstieg des mittleren Porendrucks Amplitude und Frequenz der Bauwerksbewegungen hoch genug sein müssen
2. große und hochfrequente Bauwerksbewegungen nur durch brechende Wellen erzeugt werden
3. ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem mittleren Porenwasserdruck und den Bodensetzungen als auch der Stabilität des Sanduntergrundes existiert.

Kritische Bodenverformungen, die zum Versagen des Wellenbrechers führen können, entstehen auch bei einem geringen relativen mittleren Porenwasserdruck u_r/σ'_{v0} . Weitere Untersuchungen richten sich deshalb auf das Verhältnis zwischen Porendruckgenerierung und -dissipation, um Bemessungsrichtlinien zu entwickeln, die auf zulässigen Bodenverformungen basieren.

SCHRIFTTUM

- CHANEY, R.C. & FANG, H.Y.: Liquefaction in the coastal environment: An analysis of case histories. *Marine Geotechnology*, Vol. 10, 347-370, 1991
- OUMERACI, H.: Review and analysis of vertical breakwater failures: Lessons learned. *Coastal Engineering. Special Issue on Vertical Breakwaters*, Editors: OUMERACI, H. et al., Vol. 22(1/2), 3-29, 1994
- KUDELLA, M. & OUMERACI, H.: Wave-Induced Pore Pressure in the Sandy Seabed Underneath a Caisson Breakwater – Experimental Results of Large Scale Model Tests. *Technical Report*, Technical University Braunschweig, Leichtweiss-Institute, 119p. and Annex, 2004
- KUDELLA, M. OUMERACI, H., DEGROOT, M.B., MEIJERS, P.: Large-Scale Experiments on Pore Pressure Generation Underneath a Caisson Breakwater. In: Liquefaction Around Marine Structures, *Special Issue in ASCE J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 1, USA, 2005 (im Druck)
- OUMERACI, H.; KORTENHAUS, A.; ALLSOP, N.W.H.; DEGROOT, M.B.; CROUCH, R.S.; VRIJLING, J.K.; VOORTMAN, H.G.: Probabilistic design tools for vertical breakwaters. Lisse, The Netherlands: Balkema, 373p, 2001
- ZEN, K.; UMEHARA, Y.; LIAM FINN, W.D.: A case study of the wave-induced liquefaction of sand layers under the damaged breakwater. Proceedings of the 3rd Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, St. John's, Newfoundland; pp 505-520, 1986