

**PORENWASSERDRÜCKE IM SANDUNTERGRUND MARITIMER  
STRUKTUREN -  
GROSSMASSTÄBLICHE MODELLVERSUCHE AN EINEM CAISSON-  
WELLENBRECHER**

von

Matthias Kudella<sup>1</sup>  
Hocine Oumeraci<sup>2</sup>

**ABSTRACT**

Liquefaction of soil supporting marine structures is still a comparatively unknown process and not yet implemented satisfyingly in design formulae. The European research project "Liquefaction Around Marine Structures" (LIMAS, Contract No. EVK3-CT-2000-00038) aims at the investigation of potential risks for failure of marine structures due to liquefaction and the dissemination of practical guidelines for their design and maintenance.

Total or partial liquefaction may lead to complete failures of the foundation of shore protection structures like reported by ZEN et al. (1986) in the case of a caisson breakwater. Within "LIMAS" large scale model tests have been performed at the Large Wave Flume (GWK), a facility of the FZK (Forschungszentrum Küste) run by the University of Hannover and the Technical University of Braunschweig, to investigate processes susceptible to lead to liquefaction inside the sand-bed below a caisson breakwater.

The occurrence of significant residual pore water pressure in the subsoil has the most important influence on the liquefaction potential of the structure foundation. Therefore main focus was set on the observation and analysis of instantaneous and residual pore pressure in the sandy subsoil. A sophisticated procedure for preparing the sand bed was used to meet the conditions for the generation of residual pore pressure. First results show the generation of residual pore pressure due to impact loads on the structure and the important influence of the pre-shearing effect on the liquefaction potential of the soil.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

## **EINLEITUNG**

Das Phänomen der Bodenverflüssigung im Umfeld maritimer Bauwerke ist ein noch relativ unbekannter Prozess und dementsprechend bisher noch unzureichend in Bemessungsverfahren eingearbeitet. Innerhalb des 5. EU-Rahmenprogramms wurde deshalb das Forschungsvorhaben „Liquefaction Around Marine Structures“ (LIMAS, Vertrag Nr. EVK3-CT-2000-00038) realisiert, um potentielle Versagensrisiken maritimer Strukturen aufgrund Verflüssigungserscheinungen zu untersuchen und - darauf aufbauend – Richtlinien für deren Bemessung und Unterhalt zu entwerfen.

Vollständige oder partielle Verflüssigung kann bis zum kompletten Versagen eines Bauwerks führen, wie es bei ZEN et al. (1986) für den Fall eines Caisson-Wellenbrechers dokumentiert ist. Unter Leitung des Leichtweiß-Instituts wurden gemeinsam mit GeoDelft (Delft, Niederlande) großmaßstäbliche Modellversuche an einem Caisson Wellenbrecher im Großen Wellenkanal (GWK) in Hannover durchgeführt, einer Einrichtung des FZK (Forschungszentrum Küste). Die Tests dienten der Untersuchung aller relevanten Prozesse im Sand unterhalb des Bauwerks, die zu Bodenverflüssigung führen können. Hauptaugenmerk lag auf der Generierung akkumulativen Porenwasserüberdrucks, der einen entscheidenden Einfluß auf das Verflüssigungspotential des Bodens hat.

## **RELEVANTE PROZESSE**

Die Sandoberfläche wird direkt durch welleninduzierten Druck belastet sowie indirekt durch die Bewegungen des Bauwerks, welche durch den Schüttsteinunterbau geleitet werden und als effektive Spannungen auf die Sandoberfläche wirken. Die direkte Belastung ist hierbei im Wesentlichen von den Wellenparametern und dem Auftriebsdruck an der Caissonunterseite abhängig, während bei der indirekten Belastung die dynamischen Strukturparameter – sie beeinflussen die Caissonbewegungen – und die Kennwerte des Schüttsteinunterbaus die Totalspannungen an der Sandoberfläche beeinflussen. Abbildung 1 zeigt einen Überblick über alle Einflußfaktoren und deren Abhängigkeiten.

Neben der Initialbelastung der Sandoberfläche sind die Parameter des Sanduntergrunds für die Entstehung des akkumulativen Porenwasserüberdrucks von entscheidender Bedeutung. Porenwasserdruck und Bodenparameter stehen in direkter Wechselbeziehung zueinander. So wird z.B. der sukzessive Anstieg des Porenwasserdrucks von plastischen Verformungen im Korngerüst verursacht, während simultan durch die Erhöhung der Lagerungsdichte der Widerstand des Bodens gegen einen weiteren Porenwasserdruckanstieg zunimmt. Erreicht der Porenwasserdruck die Größenordnung der effektiven Spannung, geht der Zusammenhalt im Korngerüst verloren, Schermodul und Elastizitätsmodul des Bodens werden ver-schwindend klein und der Boden kommt ins Fließen.

## **MODELLVERSUCHE**

Während der Konstruktionsphase des Modells lag der Schwerpunkt auf der Herstellung der Randbedingungen, unter denen akkumulativer Porendruck überhaupt erst entstehen kann:

- Hohe Sättigung des Porenraums mit Wasser, da die Ausbreitung von Porenwasserdrücken im Boden vom Gasgehalt abhängt (YAMAMOTO et al., 1978). Hierfür wurde vor dem Einbau des Wellenbrechers der Sand mit einer Spüllanze gespült.

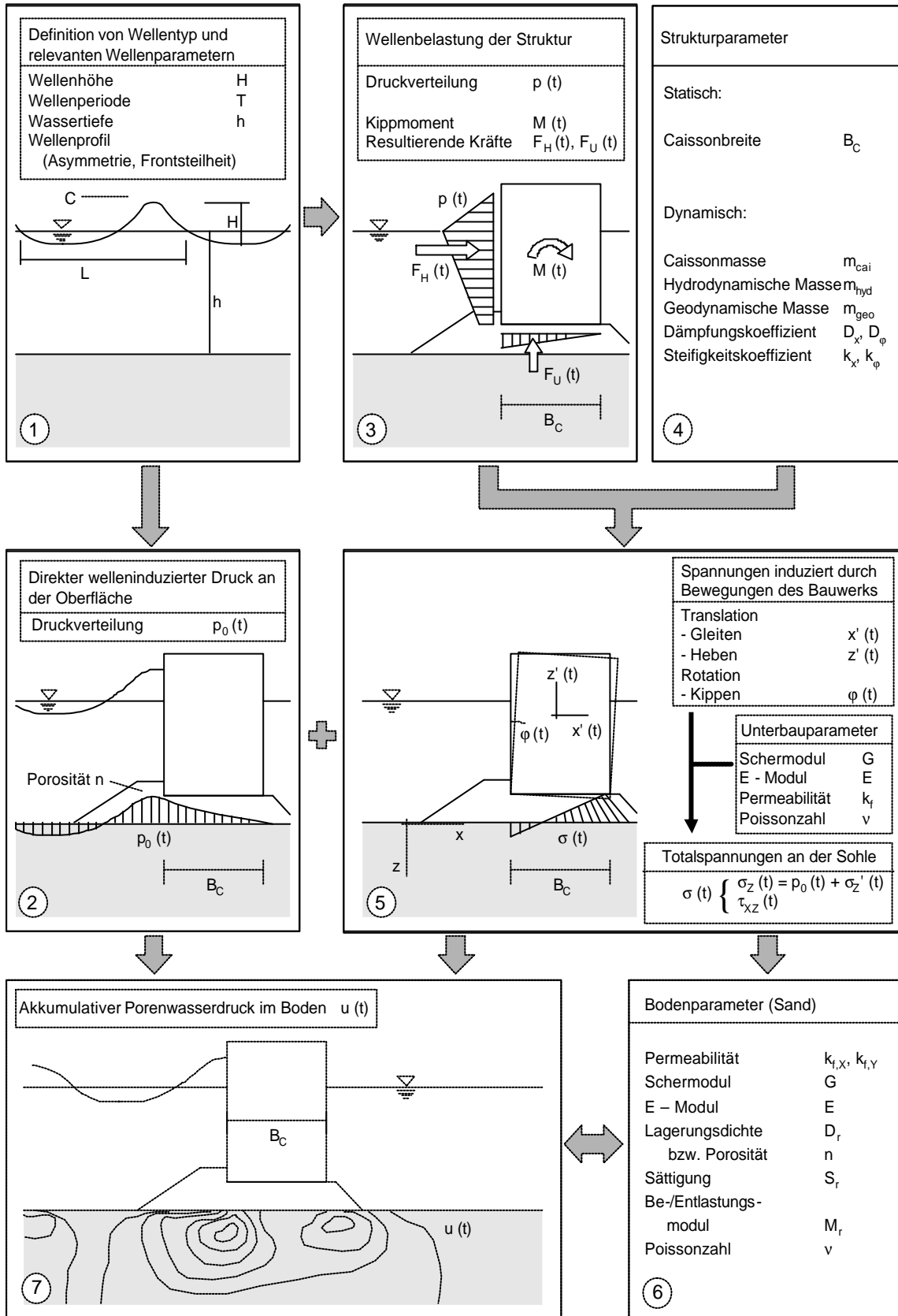


Abbildung 1: Überblick über die für die Entstehung akkumulativen Porenwasserdrucks verantwortlichen Prozesse und Parameter

- Die Lagerungsdichte des Sandes darf nicht zu hoch sein (nur ca. 40%). Eine erste Versuchsphase (ohne Bauwerk) direkt nach dem Spülen diente als Referenzfall für die direkte Belastung durch Wellen und einer leichten Verdichtung durch welleninduzierten Druck an der Sandoberfläche.
- Die charakteristische Drainageperiode des Sanduntergrundes muß sehr viel höher als die Periode der Belastung sein. Hierfür wurde zur Simulation horizontal undurchlässiger Schichten (z.B. Klei) der Sanduntergrund in eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB) eingehüllt (nach oben hin dicht, zu den Seiten mit reduzierter Dissipationsmöglichkeit).

Aus Abb. 1 läßt sich die notwendige Bestückung mit Meßgeräten bzw. die Bestimmung relevanter Parameter im Labor direkt ableiten (Abb. 2):

- 21 Wellenpegel vor dem Bauwerk für die Bestimmung der Seegangparameter sowie 1 Pegel dahinter für den Wasserspiegelanstieg
- 10 Druckmeßdosen am Caisson zur Bestimmung der Belastung durch Druckintegration
- 3 induktive Wegtaster für die Bestimmung der oszillatorischen und translatorischen Bewegungen des Caissons
- 23 Porendruckaufnehmer im Sand unter dem Caisson
- 2 Stäbe mit je 7 Meßpositionen für die kontinuierliche Aufzeichnung der elektrischen Leitfähigkeit zur Bestimmung der Porosität
- 4 Druckaufnehmer zur Messung der isotropen Totalspannung und 2 Erddruckkissen

Die Bodenparameter des Sandes werden im Labor von GeoDelft bestimmt (Kornverteilung, Permeabilität, minimale und maximale Porenzahl bzw. Lagerungsdichte, statische und dynamische Triaxialtests).

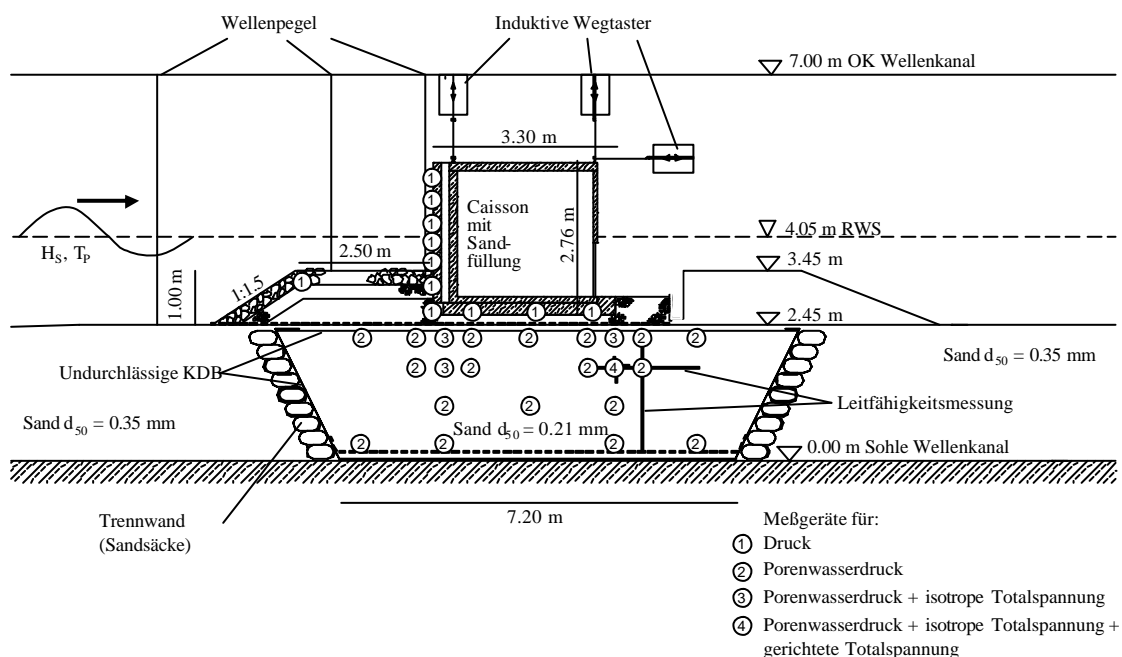


Abbildung 2: Querschnitt des Modellaufbaus im GWK mit Positionierung der Meßgeräte

Eine weitere Bedingung für die Entstehung akkumulativen Porenwasserdrucks sind hohe zyklische Belastungen des Caissons. Theoretische Voruntersuchungen zeigten, daß mit den gewählten Seegangparametern ausreichend hohe dynamische Belastungen durch brechende Wellen erzeugt werden konnten. Bei einer konstanten Wassertiefe von 60 cm auf der Berme wurden 24 Versuche mit regelmäßigen Wellen und 21 Versuche mit TMA-Spektren im Bereich von 4,5 und 8,0 s mittlerer Wellenperiode bzw. Peakperiode und 0,4 bis 0,9 m signifikanter Wellenhöhe durchgeführt.

## ERSTE ERGEBNISSE

Unter dynamischer Belastung (Druckschläge am Caisson) zeigt sich deutlich der Zusammenhang zwischen plastischen Verformungen im Korngerüst, erkennbar an den verbleibenden Setzungen des Caisson, und dem Anstieg des akkumulativen Porenwasserüberdrucks (Abb. 3). Nach einer gewissen Zeit ist - bei gleichbleibender Belastung - eine Stagnation sowohl in der Setzung als auch, korrespondierend hierzu, in der Generierung von Porenüberdrücken feststellbar, was auf eine Stabilisierung im Korngerüst hinweist. Die Amplituden des oszillierenden Porendrucks werden mit zunehmender Entfernung von dem druckinduzierenden Phänomen (der Vertikalschwingung der Caissonhinterkante) durch das poröse Medium gedämpft. Die Drainagebedingung des Sanduntergrunds (nur seitliche Dissipation möglich) bewirken einen gleichverteilten Anstieg des akkumulativen Porenüberdrucks über das gesamte Profil.

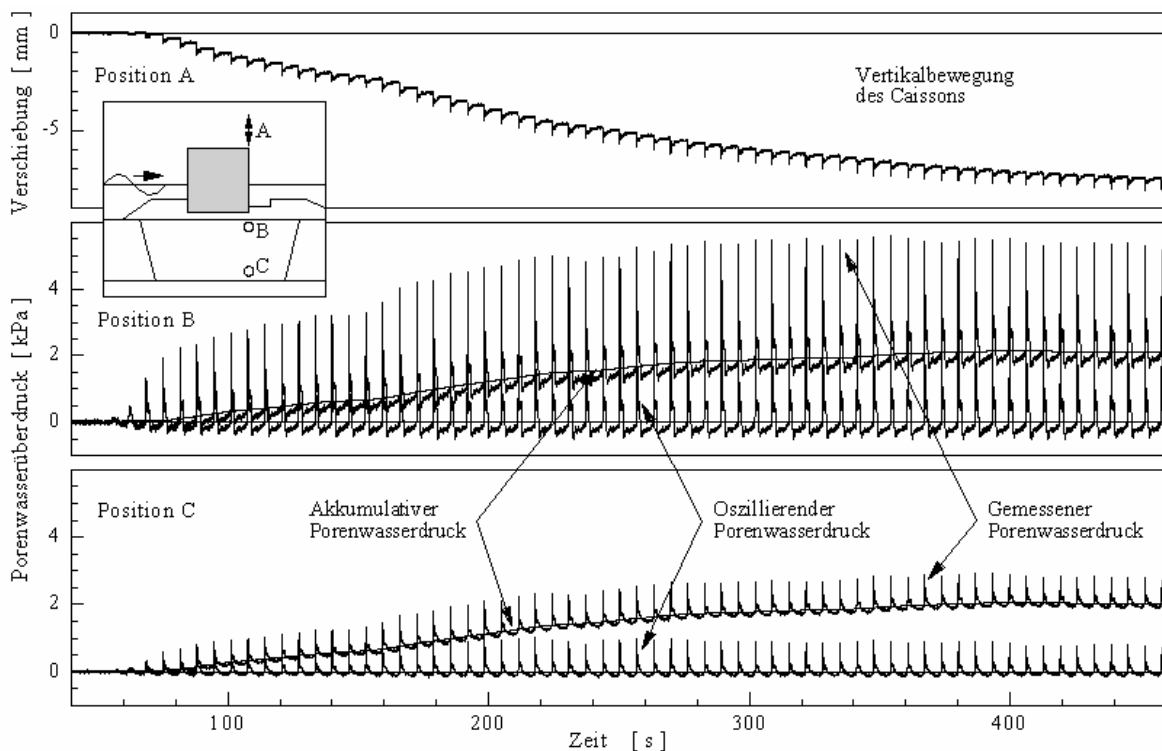


Abbildung 3: Verlauf der Vertikalbewegung des Caissons und des Porenwasserüberdrucks im Sand bei Belastung des Bauwerks durch regelmäßige Wellen ( $H = 0,7$  m,  $T = 6,5$  s)

Vorbelastungen verringern die Anfälligkeit des Sandes für die Entstehung akkumulativen Porenüberdrucks, wie in Abb. 4 dargestellt. Bei gleichen Versuchsparametern und ähnli-

chen Druckamplituden fällt der Anstieg nach einer Woche Versuchsbetrieb deutlich geringer aus. Dies korrespondiert mit einer ebenso deutlich reduzierten Setzung des Caissons. Im weiteren Verlauf des Versuchs nahmen Setzungen und Porenüberdrücke zwar noch zu, der Porenwasserüberdruck stieg aber auch nach doppelt so langer Versuchsdauer nur auf knapp 50 % der zuvor erreichten Werte.

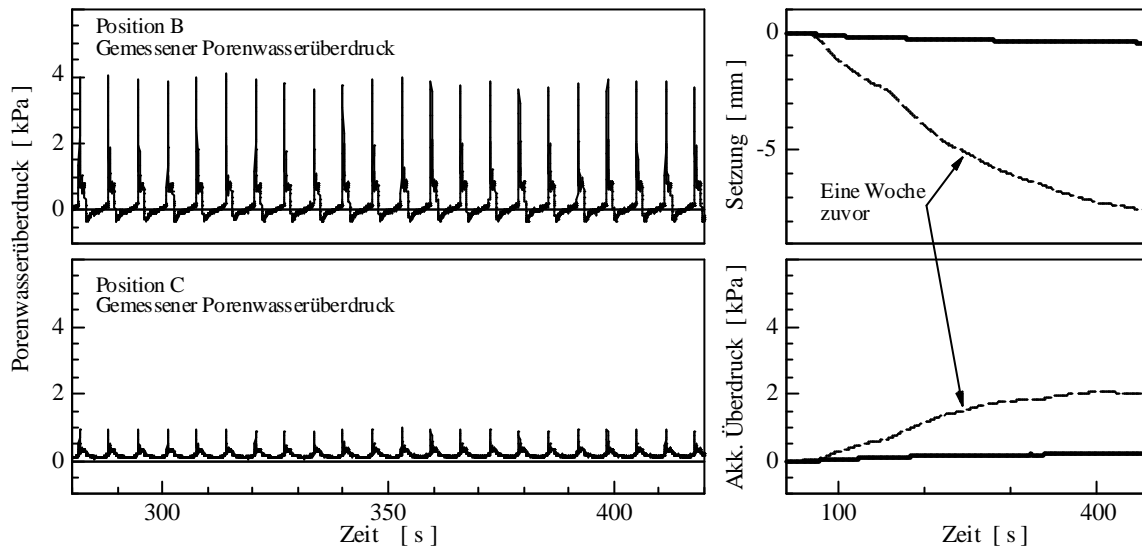


Abbildung 4: Porenüberdrücke und Setzungen eine Woche später bei gleichen Versuchsparametern. Links die Amplituden der gemessenen Drücke, rechts die beobachtete Setzung und der Verlauf des akkumulativen Porenüberdrucks.

## AUSBLICK

Bei den durchgeführten Versuchen konnte in naturähnlichem Maßstab die Entwicklung von oszillierenden und akkumulativen Porenüberdrücken unter einem Caisson-Wellenbrecher beobachtet und dokumentiert werden. Durch die gleichzeitige Bestimmung aller weiteren wesentlichen Einflußfaktoren kann ein vollständiges Bild aller relevanten Prozesse erstellt werden. Die weitere Analyse der Meßdaten, der Vergleich mit theoretischen Ansätzen und die Verwendung in numerischen Modellen verspricht insbesondere für den akkumulativen Porenüberdruck eine Steigerung der Genauigkeit existierender Bemessungsverfahren.

## SCHRIFTTUM

YAMAMOTO, T.; KONING, H.L.; SELMEIJER, H.; VAN HIJUM, E.: On the response of a poro-elastic bed to water waves. Great Britain. J. of Fluid Mechanics, Vol. 87, part 1, pp 193-206, 1978

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 3<sup>rd</sup> Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, St. John's, Newfoundland; pp 505-520, 1986