

ANALYSE GROSSMASSSTÄBLICHER WELLENVERSUCHE MIT SCHLANKEN LOTRECHTEN PFAHLGRUPPEN

von

Arndt Hildebrandt¹
Uwe Sparboom²
Hocine Oumeraci³

ABSTRACT

Within the basic research program „Investigations on Wave Loadings of Cylindrical Marine Structures” large-scale experiments were performed in the Large Wave Channel of the Coastal Research Centre. One task of the program was to investigate interaction effects of slender cylinders arranged in different group configurations. This paper presents some results of an extended analysis of regular waves focussing on hydrodynamic processes.

1. EINLEITUNG

Im See- und Hafenanbau werden Zylindergruppen bei Konstruktionen für die Öl- und Gasförderung und für Kaianlagen verwendet. Die aufgelösten Strukturen bestehen häufig aus Pfählen, die mit unterschiedlichen Abständen und Richtungen zueinander angeordnet werden. Mit geringer werdendem Abstand beeinflussen sich benachbarte Zylinder zunehmend, wobei sich das Zusammenspiel der hydrodynamischen Prozesse auf die Seegangbelastung der Zylinder auswirkt (CHAKRABARTI, 1979; SMITH & HARITOS, 1995 und 1996). Um den gegenseitigen Einfluss für wellenbelastete Zylinder zu untersuchen, wurden im GWK großmaßstäbliche Versuche und Analysen durchgeführt (OUMERACI, 2004; SPARBOOM, et al., 2005; SPARBOOM & OUMERACI, 2006; SPARBOOM et al., 2006). Im Folgenden werden weiterführende Ergebnisse der Analysen mit regelmäßigen Wellen vorgestellt.

2. ANALYSE DER VERSUCHE

2.1 Versuchsstand

In Abb. 1 ist der Versuchsaufbau für den einzelnen Zylinder, der als Referenzfall (K_0) verwendet wurde, im Querschnitt skizziert. In dem 309m langen, 5m breiten und 7m tiefen Wellenkanal wurden die Zylinder an einem Stahlträgerrost ca. 105m vor dem Wellener-

¹ Dipl.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstraße 11, 30419 Hannover

² Dr.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstraße 11, 30419 Hannover

³ Univ.-Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

zeuger montiert. Alle Zylinder wurden mit einem Durchmesser von 32,4cm als hängende Kragarme ausgebildet. Im Bereich des Messzylinders wurden die Orbitalgeschwindigkeiten in 2,5m bzw. 3,5m Höhe über der Sohle gemessen. Die Wasserpiegelauslenkung wurde mit mehreren Wellenpegeln registriert. Zeitsynchron wurden in Längs- und Querrichtung die Biegemomente am Zylinderkopf des Referenzpfahls erfasst. Bei konstant gehaltener Wassertiefe von 4,26m wurden die Zylinderkonfigurationen durch jeweils 15 verschiedene regelmäßige Wellen belastet, deren Wellenperioden 4, 5, 6, 7, 8s und deren Wellenhöhen 0,8, 1,0 und 1,1m betragen. Von allen getesteten Konfigurationen wurden im Rahmen dieses Berichts die in Abb. 2 dargestellten Anordnungen vorzugsweise untersucht. Eine ausführlichere Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Konfigurationen sowie Angaben zu weiteren Versuchswellen (Spektrern und brechende Wellen) sind der Anlage D in OUMERACI (2004) zu entnehmen.

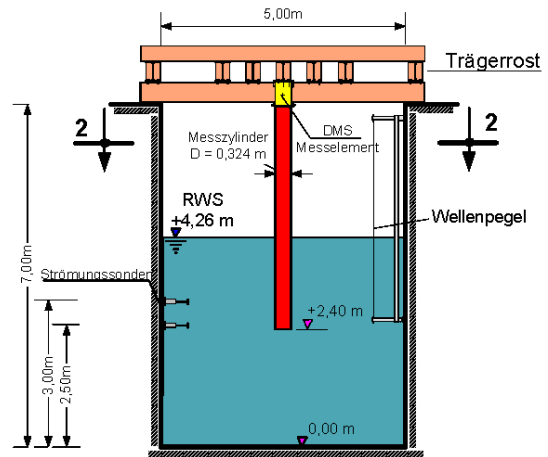


Abb. 1: Querschnitt des Versuchsaufbaus für den einzelnen Zylinder (SPARBOOM et al., 2005)

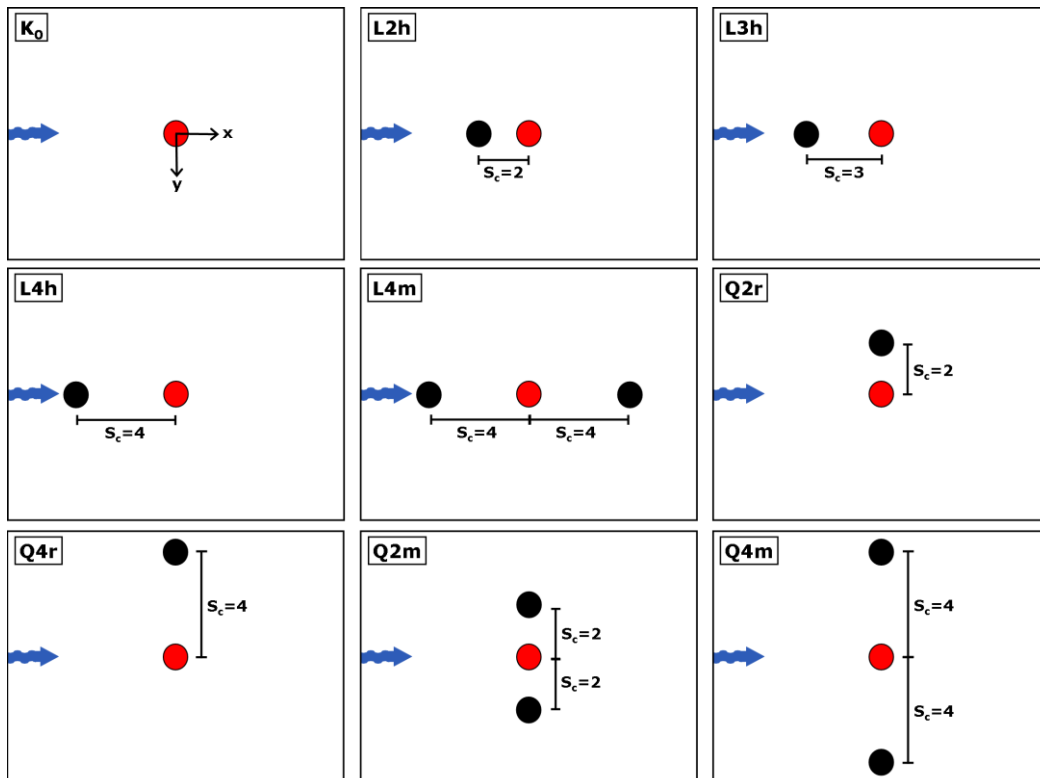


Abb. 2: Bezeichnung der untersuchten Konfigurationen:
 K_0 (Referenzfall), Q = Queranordnung, L = Längsanordnung,
 S_c = Zylinderachsabstand/Durchmesser der Zylinder,
h/m/r = Position des Messzylinders (hinten/mittig/rechts)

2.2 Belastungen von Zylindern in Gruppenanordnungen

Die Analyse der Belastungen von Gruppenpfählen hat ergeben, dass die Momentenänderungen in Längsrichtung in erster Linie von den veränderten Querkräften abhängig sind. In den Abb. 3 und 4 sind beispielsweise Wellen mit Perioden von 6 s und Wellenhöhen von 0,80m bzw. 1,10m dargestellt. Weiterhin sind die Amplituden der Biegemomente längs und quer zur Wellenrichtung sowohl für die Gruppenanordnung Q2r als auch für die Referenzkonfiguration K_0 (gestrichelte Linie) dargestellt. Es lässt sich beiden Abbildungen entnehmen, dass die Belastungsunterschiede für den positiven Momentenverlauf mit dem Nulldurchgang der Querkräfte zusammenfallen. Im Vergleich zu der Querkraft am einzelnen Zylinder zeigen sich dagegen am beeinflussten Messzylinder deutlich intensivere Querkräfte. Diese entstehen durch die veränderte Grenzschichtentwicklung und die damit verbundene erhöhte Wirbelstärke (sog. „vorticity supply“).

Weiterhin fällt auf, dass die relative Momentenzunahme ($M_{Q2r,max}/M_{K0,max}$) davon abhängt, in welcher Wellenphase sich der Wirbel ablöst. Während der positive Querkraftsprung für die 0,80m hohe Welle in Abb. 3 ca. 65% vom Längskraftmoment erreicht, erzeugt die prozentual geringere Querkraft unter der 1,10m hohen Welle in Abb. 4 dennoch einen stärkeren Momentenzuwachs. Dies liegt an dem zeitlichen Versatz Δt zwischen dem maximalen Moment und dem Querkraftsprung, der für die niedrigere Welle ca. 0,9s beträgt und für die höhere Welle mit ca. 0,5s nur noch halb so groß ist. Der Nulldurchgang der Querkraft liegt immer kurz vor oder unter der maximalen Wasserspiegelauslenkung η (Abb. 3, 4) bzw. kurz vor oder unter der maximalen horizontalen Orbitalgeschwindigkeit. Dagegen setzt sich das maximale Längskraftmoment sowohl aus der Orbitalgeschwindigkeit als auch aus der dazu 90° phasenverschobenen Orbitalbeschleunigung zusammen. Deshalb erzeugen „Drag“-dominante Wellen einen stärkeren Momentenzuwachs als „Inertia“-dominante Wellen, da bei erstgenannten Wellen die Wirbelablösung mit der Position des maximalen Momentes nahezu zusammenfällt.

Unabhängig von den Wirbelablösungen ergeben sich an dem durch Nachbarpfähle beeinflussten Messzylinder auch größere Längskraftmomente auf Grund des erhöhten Strömungswiderstandes. Dies wird beispielsweise in Abb. 4 während der Rückströmung im Wellental deutlich, wo die negative Momentenlinie der Q2r-Konfiguration unter der K_0 -Linie liegt und keine sprunghafte Änderung erfährt. In den Bereichen, wo die horizontale Orbitalgeschwindigkeit wieder abnimmt und die Orbitalbeschleunigung überwiegt, decken sich die Momentenlinien der beiden Konfigurationen.

Für die Queranordnungen haben sich generell erhöhte maximale Längsmomente von ca. 25-30% für Q2r und bis zu 50-60% für Q2m ergeben. In den beiden Queranordnungen mit größerem Zylinderabstand (Abb. 2, Q4r und Q4m) erreichen die relativen Zunahmen noch bis zu 20%. Bei den längs angeordneten Zylinderkonfigurationen ergaben sich durchschnittliche Steigerungen der maximalen Momente unter 10% und nur vereinzelt Belastungszunahmen von bis zu 20%. Bemerkenswert ist hierbei, dass keine signifikanten Momentenreduzierungen festgestellt werden konnten.

Die Querkräfte unterliegen großen Streuungen. Tendenziell haben sich für die Q2r-Anordnung die größten Querkraftmomente mit Werten bis zu 80% vom jeweiligen maximalen Längskraftmoment ergeben. Auf Grund der beidseitig veränderten Umströmung liegen die Querkräfte für den mittig positionierten Messpfahl mit 50-60% vom maximalen Längsmoment unter denjenigen für engere Zylinderabstände.

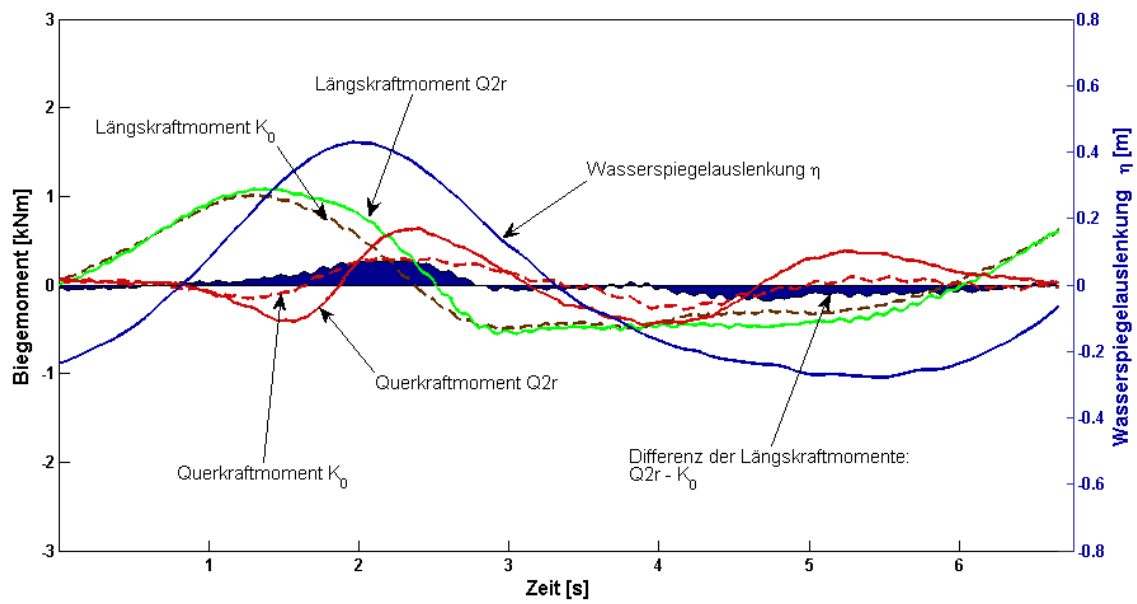


Abb. 3: Wasserspiegelauslenkung, Längs- und Querkraftmomente der Q2r-Konfiguration und K_0 , sowie deren Längsmomentendifferenz für $T=6s$ und $H=0,80m$

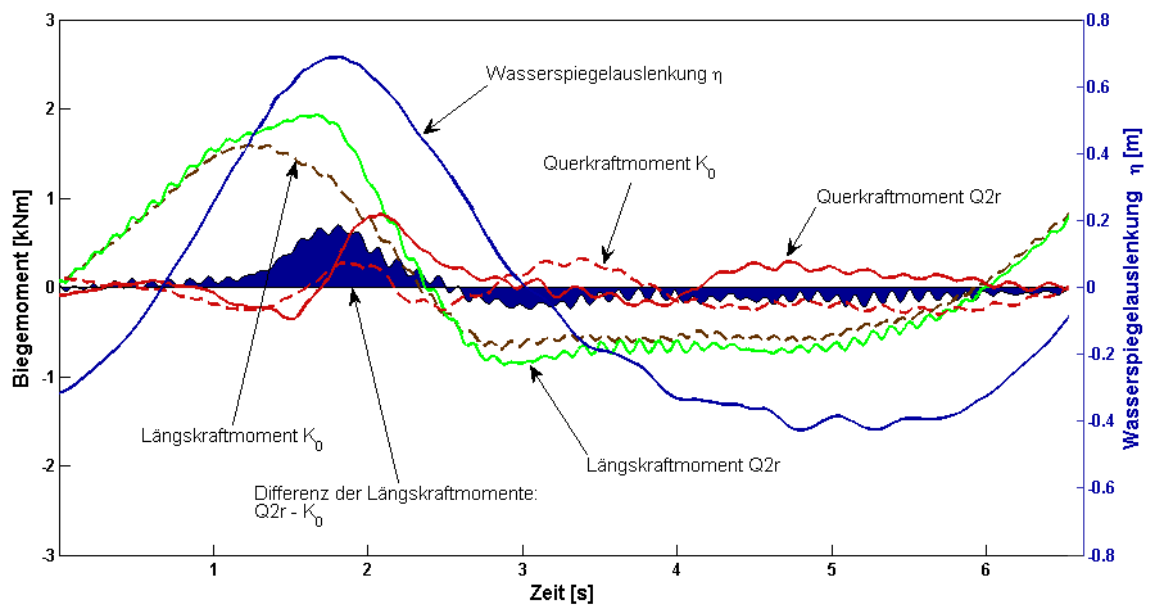


Abb.4: Wasserspiegelauslenkung, Längs- und Querkraftmomente der K0-Konfiguration und K_0 , sowie deren Längsmomentendifferenz für $T=6s$ und $H=1,10m$

2.3 C_D - und C_M -Werte

Die betrachteten Messungen haben gezeigt bzw. bestätigt, dass die relativen Momentenveränderungen über die Periodendauer von einigen nicht-linearen Parametern abhängig sind. Um die relativen Momenteneinflüsse (M_{Gruppe}/M_{K0}) der Gruppenkonfigurationen zeitabhängig mit einer empirischen Formel beschreiben zu können, wird ein Ansatz benötigt, der die Differenzen der Momentenverläufe (dunkelblaue Flächen in Abb. 3 und 4) über die Periodendauer erfasst. Alternativ könnte ein Lasterhöhungsfaktor für den Einzelzylinder bestimmt werden, bei welchem allerdings die zeitabhängigen Unterschiede unberücksichtigt bleiben.

Im Rahmen der Messanalyse wurden unter Verwendung höherer Wellentheorien die C_D - und C_M -Beiwerte für den Ansatz nach MORISON (1950) mit der Methode der kleinsten quadratischen Fehler bestimmt (mit N = Anzahl der Messwerte innerhalb einer Periode).

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (M_{\text{Theorie}}(t) - M_{\text{Messung}}(t))^2$$

Es hat sich herausgestellt, dass die Momentenlinien nach MORISON über die Zeit eine gute Näherung an die gemessenen Momente ergeben (Abb. 5). Somit lassen sich mit Hilfe der angepassten C_D - und C_M -Beiwerte die zugehörigen Momentenverläufe berechnen, die die relativen Unterschiede über die Periodendauer berücksichtigen. Zusätzliche Erläuterungen zur C_D - und C_M -Berechnung sowie zu den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Prozessen der betrachteten Konfigurationen (Abb. 2) sind in HILDEBRANDT (2006) beschrieben.

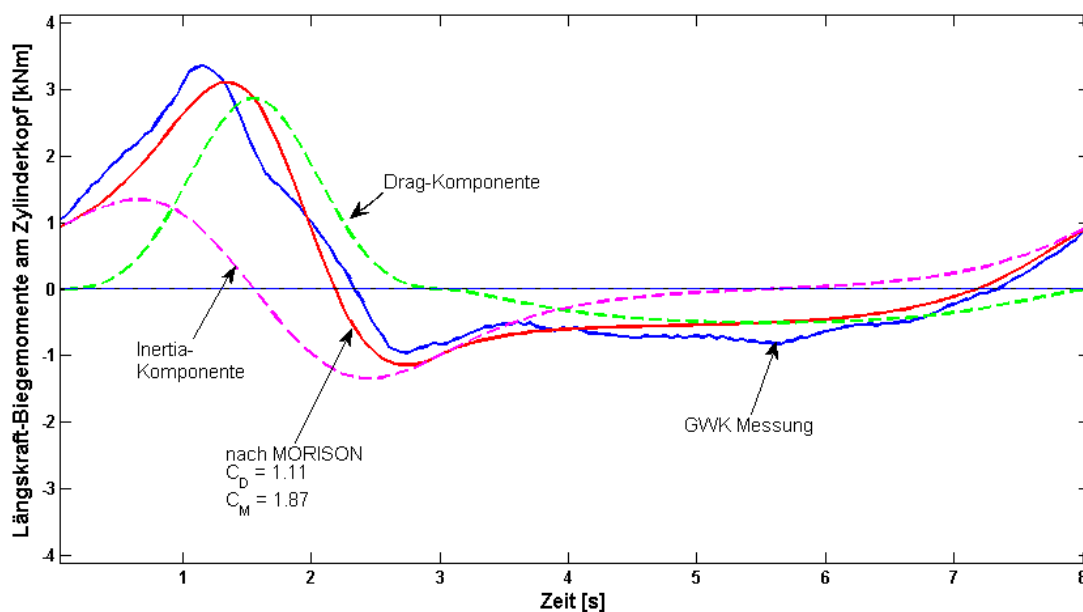


Abb. 5: Vergleich der GWK-Messung mit der berechneten Momentenbelastung nach MORISON unter Verwendung der *Fenton 9th Order Streamfunction Theory* für Q2r mit $H=1,40\text{m}$ und $T=8\text{s}$

3. ZUSAMMENFASSUNG

- Die erhöhten Momente in Gruppenkonfigurationen werden durch veränderte Wirbelablösungen und in Queranordnungen zusätzlich durch einen erhöhten Strömungswiderstand verursacht.
- Wellen im „*Drag-Regime*“ erfahren eine stärkere Momentenzunahme als Wellen im „*Inertia-Regime*“.
- Die angepassten C_D - und C_M -Beiwerte bieten die Möglichkeit, die Belastung eines Gruppenpfahles in guter Näherung zu bestimmen.

4. DANKSAGUNG

Das Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Seegangsbelastung zylindrischer Seebaustrukturen“ wurde von der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG) gefördert (Ou 1/4-1 und Ou 1/4-2).

5. SCHRIFTTUM

CHAKRABARTI, S. K.: Wave forces on vertical array of tubes, Civil Engineering in the Oceans IV, ASCE, pp. 241-259, 1979

HILDEBRANDT, A.: Seegangsbelastung schlanker lotrechter Pfähle in Gruppenanordnungen. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig, Forschungszentrum Küste (FZK), Bergische Universität Wuppertal (unveröffentlicht), 2006

MORISON, J.R., O'BRIEN, M.P., JOHNSON, J.W., SCHAAF, S.A.: The force exerted by surface waves on piles. Petroleum Transactions, AIME, Vol. 189, 1950

OUMERACI, H.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Seegangsbelastung zylindrischer Seebaustrukturen“, Anlage D, DFG-Geschäftszeichen: Ou 1/4-1 und Ou 1/4-2, Forschungszentrum Küste, 2004 (unveröffentlicht)

SMITH, D., HARITOS, N.: The effect of spacing transverse to the wave direction on the Morsion force coefficients in two cylinder groups. Proc. 14th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Artic Engineering (OMAE), Vol.1, Part A, pp. 163-170, 1995

SMITH, D., HARITOS, N.: The effect of in-line spacing of two cylinder groups on the Morsion force coefficients. Proc.15th Int. Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering (OMAE), Vol. 1, Part A, pp. 345-352, 1996

SPARBOOM, U., HILDEBRANDT, A., OUMERACI, H.: Group interaction effects of slender cylinders under wave attack. Proc. 30th Int. Conference on Coastal Engineering (ICCE), ASCE, 2006 (in press)

SPARBOOM, U., SCHMIDT-KOPPENHAGEN, R., GRÜNE, J., OUMERACI, H.: Wellenbelastung von Zylindergruppen – Experimentelle Untersuchungen im Großen Wellenkanal. Tagungsband 5. FZK-Kolloquium „Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke“, FZK Hannover, 2005

SPARBOOM, U., OUMERACI, H.: Wave loads of slender marine cylinders depending on interaction effects of adjacent cylinders. Proc. 25th Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), ASME, ISBN 0-7918-3777-7, Order No. I 744CD, 2006