

WELLENINDUZIERTER SEDIMENTTRANSPORT AN SENKRECHTEN PFEILERN

von

Oliver Göthel¹
Werner Zielke²

ABSTRACT

Placing a cylindrical foundation into waves will cause an increase of the near bed velocities. This will lead to an increased sediment transport near the structure and most probably to a scour. Shape and depth are heavily dependent on the KC number. Only waves with $KC > 6$ will lead to a relevant scour, because of the presence of the horseshoe vortex and vortex shedding.

A numerical model is presented that is able to simulate waves and sediment transport with low as well as with high KC numbers. Shape and depth of the calculated scours are in good agreement with laboratory experiments.

1. MOTIVATION

Küstennahe wie auch Offshore-Bauwerke sind Strömung und Seegang dauerhaft ausgesetzt. Dies hat einen Einfluss auf das umgebende Geschwindigkeitsfeld und folglich auch auf den Sedimenttransport und die Bodentopographie, sofern keine Schutzmaßnahmen getroffen wurden (Kolkschutz). Da im maritimen Bereich vorwiegend zylindrische Strukturen Anwendung finden, beschäftigt sich der wesentliche Teil der Literatur und Forschung mit dieser Bauart. Wellen, die einen zylindrisches Bauwerk passieren, werden durch die dimensionslose KC (Keulegan-Carpenter) Zahl beschrieben ($KC = U_m T_w / D$). U_m ist hier die maximale Orbitalgeschwindigkeit am Boden, T_w die Wellenperiode und D der Bauwerksdurchmesser. Hohe KC Werte bedeuten entsprechend, dass es sich um eine Welle mit großer Länge bzw. hohen Orbitalgeschwindigkeiten und einen kleinen Bauwerks-

¹ Dipl.-Ing., Institut für Strömungsmechanik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover

² Prof. Dr.-Ing., Institut für Strömungsmechanik, Appelstraße 9A, 30167 Hannover

durchmesser handelt. Im Folgenden werden Versuche mit verschiedenen KC Werten und den daraus resultierenden unterschiedlichen Strömungs- und Kolkcharakteristika vorgestellt.

2. LABOR- UND FELDUNTERSUCHUNGEN

Untersuchungen zeigen, dass für kleine Pfahldurchmesser im Vergleich zur Wellenlänge ($D/L < 0.2$) die am Bauwerk auftretende Diffraktion vernachlässigbar ist. Es kommt allerdings zu einer Einschnürung der Strömung und als Folge zu erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten. Bei $KC > 6$ ist die Länge

der Welle bzw. sind die Orbitalgeschwindigkeiten groß genug, dass sich am Fuß des Bauwerks ein Wirbelsystem ausbilden kann, das wesentlich für einen starken Sedimenttransport und damit für relevante Kolkiefen verantwortlich ist (Sumer und Fredsøe, 1997). Hier ist zum einen der Hufeisenwirbel zu nennen, der das Sediment am Pfahl in Bewegung versetzt. Zum anderen auch die Wirbelablösungen stromab, die das Sediment vom Bauwerk wegtragen (Sumer und Fredsøe, 2002). Das Wirbelsystem ist weniger als die halbe Wellenperiode präsent. Mit größer werdender KC Zahl steigen auch Größe und Lebensdauer des Hufeisenwirbels und der Ablösewirbel,

so dass eine größere Region in das Geschehen mit einbezogen ist. Der Kolk wird dadurch insgesamt tiefer (Whitehouse, 1998). Abbildung 1 zeigt den anhand von Laborversuchen ermittelten Zusammenhang zwischen KC und der zu erwartenden dimensionslosen Gleichgewichtskolkiefe S_e/D . Für hohe KC Werte ($KC > 100$) wird ein ähnlicher Zustand erreicht, wie bei einer stationären Anströmung. Die Endkolkiefe beträgt hier etwa $1.3 \cdot D$. Tests mit $KC > 1000$ von Sumer et al. belegen dies.

Ist der Zylinderdurchmesser im Vergleich zur Wellenlänge groß ($D/L > 0.2$), kommt es zu Diffraktionseffekten (Isaacson, 1979) und eventuell zu Wellenbrechen (Abbildung 2). Dies führt zwangsläufig zu kleinen KC Zahlen ($KC < 6$), so dass der auftretende Sedimenttransport und der resultierende Kolk gering sind, da Hufeisenwirbel und Wirbelablösungen nicht gebildet werden. In diesem Fall sind die welleninduzierten Strömungen in der Nähe des Zylinders für die Kolkbildung verantwortlich.

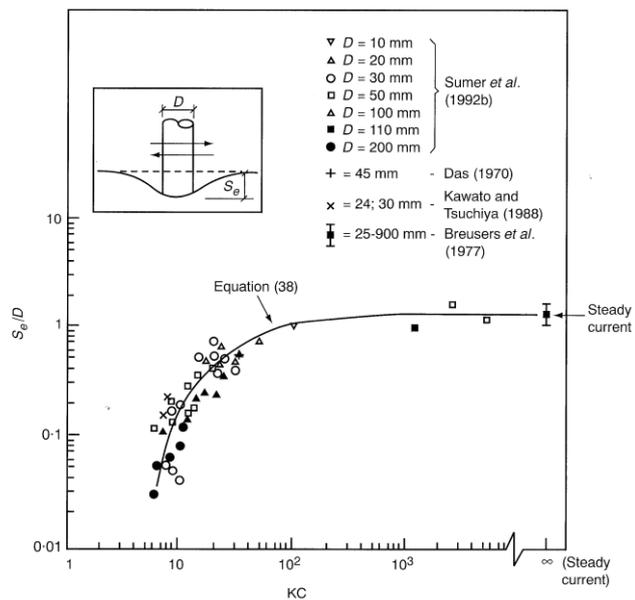


Abbildung 1: Korrelation zwischen KC und S/D (Sumer et al., 1992)

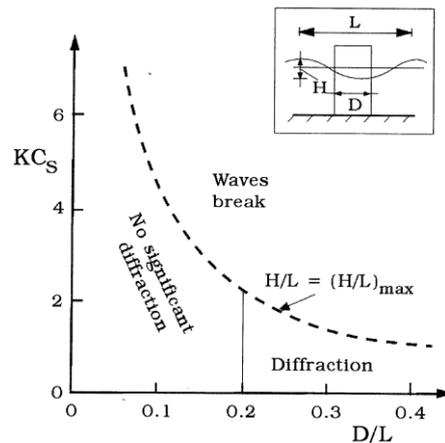


Abbildung 2: Wellenbrechen in Abhängigkeit von KC und D/L
(Sumer und Fredsøe, 2002)

Wellenbrechen ist eine zusätzliche Quelle für Turbulenz in der Wassersäule. Bei geringen Wassertiefen bewirkt dies eine zusätzliche Mobilisation von Sediment und eine Erhöhung der maximalen Schwebstofffracht. Bei einer Überlagerung von brechenden Wellen und einer Strömung wurde von Bijker und de Bruyn (1988) ein 46% tieferer Kolk gemessen ($S/D=1.9$), als bei reiner Strömung.

3. ERGEBNISSE NUMERISCHER MODELLVERSUCHE

Das verwendete Strömungs- und Sedimenttransportmodell wird ausführlich in Göthel und Zielke (2006) vorgestellt und lehnt sich an der Arbeit von Roulund et al. (2005) an. Die Strömung wird mit einem dreidimensionalen Reynolds gemittelten Navier-Stokes Löser berechnet. Die Turbulenzmodellierung erfolgt mit einem nach Menter (1992) modifizierten k-omega Modell. Für die Simulation von Wellen wird die freie Oberfläche über eine Höhenfunktion im Modell berücksichtigt.

In den vorgestellten Beispielen werden die Wellen über den Rand durch Vorgabe der Wasserspiegelauslenkung und der Strömungsgeschwindigkeiten nach linearer Wellentheorie in den simulierten Kanal eingeleitet.

Der Sedimenttransport wird durch Berechnen einer geeigneten Transportrate und dem anschließenden Lösen der Bodenevolutionsgleichung durchgeführt. Auftretende steile Gradienten werden in der Sedimenttransportrate berücksichtigt. Außerdem werden Sedimentrutschungen simuliert, falls das Gefälle des Bodens den Reibungswinkel des vorliegenden Materials überschreitet.

Als Beispiel für einen Kolk mit kleiner KC Zahl wurde ein Versuch von Sumer und Fredsøe (2001) nachgerechnet. Ein Zylinder von 1m Durchmesser wurde in einem Wellenkanal mit 10.6m Breite und 8m Länge installiert und in diesen ein Sediment mit 0.2mm Korndurchmesser eingebaut. In den durchgeführten Kolkexperimenten wurden Wellen mit $KC=0.08 - 0.61$ erzeugt. Abbildung 3 zeigt links die Form des Kolks im Laborexperiment und rechts das Ergebnis des numerischen Modells.

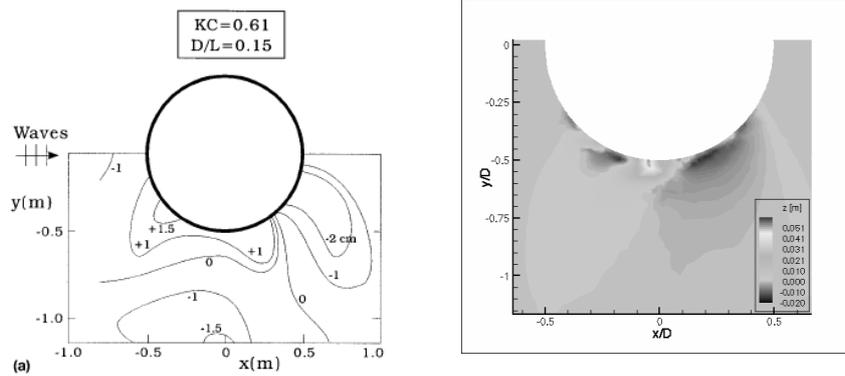


Abbildung 3: Laborexperiment (Sumer & Fredsøe 2001) (links) und numerisches Modell (rechts) ($KC=0.61$)

Die sehr kleine KC Zahl hat im Laborexperiment wie auch im numerischen Modell zur Folge, dass kein Hufeisenwirbel und Wirbelablösungen gebildet werden. Die Sedimenttransportraten sind sehr klein und der auftretende Kolk gering. Die Form des Kolks im numerischen Modell ist ähnlich dem Laborexperiment. Seitlich am Zylinder entstehen Auflandungen während stromab ein Kolk geformt wird.

Für einen Versuch mit einer hohen KC Zahl wurden die von Sumer und Fredsøe (1992) durchgeführten Untersuchungen ausgewählt. Dabei wurde ein Zylinder mit 10cm Durchmesser benutzt, der in einem Kanal mit 24m Länge und 4m Breite eingebaut wurde. Bei $KC=24$ wird der Hufeisenwirbel jeweils beim Durchlauf des Wellenbergs und -tals gebildet (Abbildung 4 u. 5). Die folglich hohen Sedimenttransportraten führen zu einem Kolkbild (Abbildung 6), das einem Strömungskolk wesentlich ähnlicher ist als einem Kolk mit $KC < 6$. Die dimensionslose Gleichgewichtskolktiefe betrug im Laborexperiment 0.31, während sie im numerischen Modell 0.32 erreichte.

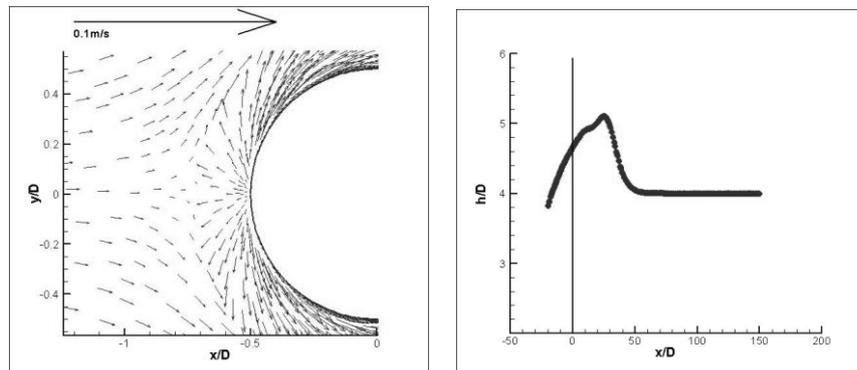


Abbildung 4: Strömung am Boden (links) und Wellenposition (rechts)

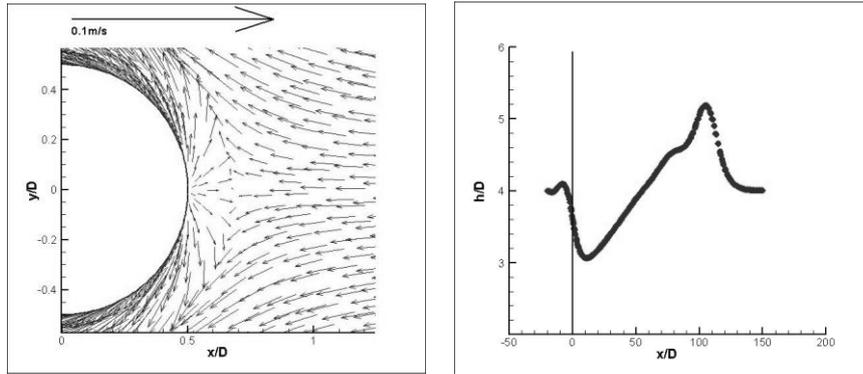


Abbildung 5: Strömung am Boden (links) und Wellenposition (rechts)

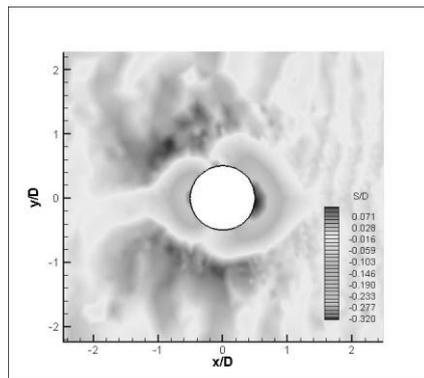


Abbildung 6: Welleninduzierter Kolk im numerischen Modell (KC=24)

4. ZUSAMMENFASSUNG

Laborexperimente, wie auch numerische Simulationen zeigen, dass der Sedimenttransport unter Welleneinfluss an zylindrischen Bauwerken und der daraus entstehende Kolk maßgeblich von der KC Zahl, d.h. von der Wellenperiode, Orbitalgeschwindigkeit und dem Bauwerksdurchmesser, bestimmt wird. Kleine KC Werte führen aufgrund des fehlenden Hufeisenwirbels und Strömungsablösungen zu sehr geringen Transportraten und der entstehende Kolk ist nahezu vernachlässigbar. Wird KC größer als etwa sechs, entsteht ein Wirbelsystem am Fuß des Bauwerks und sorgt für eine starke Auskolkung, die die an die Werte eines reinen Strömungskolks heranreichen kann.

Das vorgestellte numerische Modell ist in der Lage, die welleninduzierte Strömung an Bauwerken und den daraus resultierenden Sedimenttransport und Kolk zu berechnen. Simulationen mit großen sowie mit kleinen KC Werten wurden erfolgreich durchgeführt. Tiefe und Form des Kolks sind im Vergleich zu Ergebnissen aus Laborexperimenten gut getroffen.

SCHRIFTTUM

- BIJKER, E.W., DE BRUYN, C.A.: Erosion around a pile due to current and breaking waves. Proc. 21st. Int. Conf. Coastal Engng., Vol. 2, Malaga, 1988.
- GÖTHEL, O, ZIELKE, W.: Numerical Modelling of Scour at Offshore Wind Turbines, 30th International Conference on Coastal Engineering (ICCE) in San Diego, USA 2006.
- ISAACSON, M.: Wave-induced forces in the diffraction regime. In: Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinders, (Ed T.L. Shaw). Pitman Advanced Publishing Program.
- MENTER, F.R.: Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. NASA technical memorandum 103975. NASA, Ames Research Center, California, 1992.
- ROULUND, A., SUMER, B.M., FREDSE, J., MICHELSEN, J.: Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, J. Fluid Mech., Vol. 534, 2005.
- SUMER, B.M., FREDSE, J., CHRISTIANSEN, N.: Scour around vertical piles in waves. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 118(1), ASCE, 1992.
- SUMER, B.M., FREDSE, J.: Hydrodynamics around Cylindrical Structures. World Scientific, xviii + 530p, 1997.
- SUMER, B.M., FREDSE, J.: Wave Scour around a Large Vertical Circular Cylinder, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 127, No. 3, 2001.
- SUMER, B.M., FREDSE, J.: The mechanics of scour in the marine environment. Advanced Series in Ocean Engineering Vol. 17, World Scientific, 2002.
- WHITEHOUSE, R.J.S.: Scour at marine structures. Thomas Telford Publications, Thomas Telford Ltd., London, 1998.