

WELLENINDUZIERTE KOLKUNG UM EINEN MONOPILE

von

Ulrike Preper nau¹
Joachim Grüne²
Zeya Wang³
Hocine Oumeraci⁴

ABSTRACT

First results of large-scale model experiments on scour around monopiles exposed to irregular waves are discussed. The tests were carried out in the Large Wave Channel (GWK) of the Coastal Research Centre (FZK) and were focussed on the development of scour under live-bed conditions with varying intensities of spectra (Jonswap) and with or without grading the mobile bed surface. For several wave spectra the corresponding scour depth was determined and the temporal development of the scour was observed. Furthermore, the results are used in order to validate the formula for predicting scour depth (Sumer and Fredsøe, 2001). However, the test results present certain variations compared to small-scale test results of Sumer and Fredsøe (2001) probably due to scale effects.

1. EINLEITUNG

Auskolkungen am Meeresboden durch Seegang und Strömung können die Stabilität von Offshore-Windenergieanlagen beeinträchtigen. Die vorliegende Studie untersucht die Kolkbildung um vertikale Monopile-Gründungen durch irreguläre Wellen.

Kolkbildung um Monopile-Strukturen im marinen Umfeld wurde von einigen Wissenschaftlern untersucht, beispielsweise von Sumer et al. (1992), Carreiras et al. (2000), Sumer und Fredsøe (2001) und Rudolph und Bos (2006).

Kleinmaßstäbliche Experimente von Sumer et al. (1992) mit regelmäßigen Wellen zeigen, dass der wichtigste Parameter für die welleninduzierte Kolkentwicklung die dimensionslose Keulegan-Carpenter Nummer (KC) ist. Diese ist wie folgt definiert:

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

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

³ M. Eng., Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstraße 11, 30419 Hannover

⁴ Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

$$KC = \frac{v * T}{D} \quad (1)$$

mit v = maximale ungestörte orbitale Geschwindigkeit [m/s], T = Wellenperiode [s] und D = Durchmesser des Monopiles [m].

Laut Sumer et al. (1992) verhält sich die durch regelmäßige Wellen induzierte relative Kolkentiefe S/D in Abhängigkeit von KC wie folgt:

$$\frac{S}{D} = 1.3 \{1 - \exp(-0.03(KC - 6))\} \quad (2)$$

mit S = Kolkentiefe [m].

Mit weiteren kleinmaßstäblichen Versuchen haben Sumer und Fredsøe (2001) die Gültigkeit der Formel für unregelmäßige Wellen und kombinierte Wellen und Strömungen überprüft. Die Kolkiefenberechnung aus Formel (2) wurde dabei bestätigt, wenn für die Berechnung von KC folgende Parameter verwendet werden:

$$KC = \frac{v_{rms} * T_p}{D} \quad (3)$$

mit T_p = Peakperiode des Wellenspektrums [s] und v_{rms} = Partikelgeschwindigkeit am Meeresboden [m/s], die folgendermaßen definiert ist:

$$v_{rms} = \sqrt{2} \sigma_v \quad (4)$$

mit σ_v = quadratisches Mittel der orbitalen Geschwindigkeit v , definiert durch:

$$\sigma_v = \int_0^{\infty} S_v(f) df \quad (5)$$

mit $S_v(f)$ = Power Spektrum der orbitalen Geschwindigkeit v und f = Wellenfrequenz [s^{-1}].

Mit den im GWK durchgeführten großmaßstäblichen Versuchen soll die Parameterwahl zur Bestimmung des KC -Wertes und die Formel von Sumer et al. (2001) (Formel 2) auf die Gültigkeit für Wellenspektren überprüft werden. Weiterhin dienen sie zur Bestimmung von Kolkiefen in Abhängigkeit von der Wellenenergie, zur Beobachtung des zeitlichen Verlaufes der Kolkbildung und zur Identifikation von Maßstabs- und Modelleffekten.

2. EXPERIMENTELLER AUFBAU

Die großmaßstäblichen Versuche wurden im Großen Wellenkanal GWK (Länge 307m, Breite 5m, Tiefe 7m) des Forschungszentrums Küste FZK durchgeführt. Der Monopile ($D = 0,55m$) wurde im Sandbett (Korndurchmesser $d_{50} \approx 0,30$ mm) in einer Entfernung von 111 m von der Wellenmaschine installiert (Abb. 1).

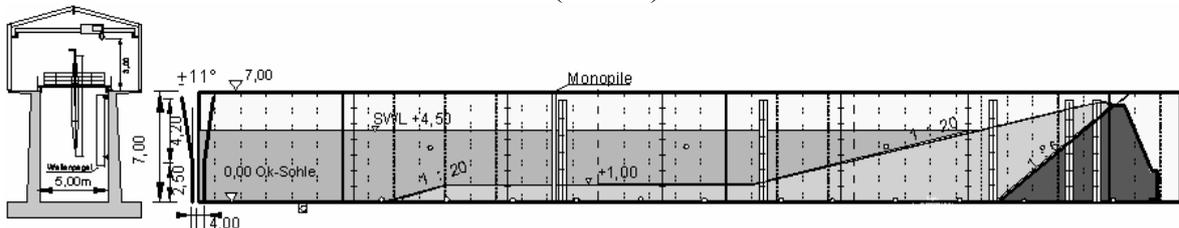


Abb. 1: Experimenteller Aufbau im Großen Wellenkanal GWK (Versuchsserie 2)

Es wurden zwei Versuchsserien durchgeführt. Während der ersten Versuchsserie wurde das Sandbett vor jedem Versuch mit unterschiedlichen Spektren geebnet. In der zweiten Serie wurden unterschiedliche Spektren erst mit zunehmender und später mit abnehmender Wellenenergie, ähnlich wie bei einem Sturmflutverlauf in der Nordsee, generiert. In dieser Testreihe wurde jeweils der bestehende Kolk aus dem vorhergehenden Test belassen. Das Versuchsprogramm ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Für jede Versuchsserie sind

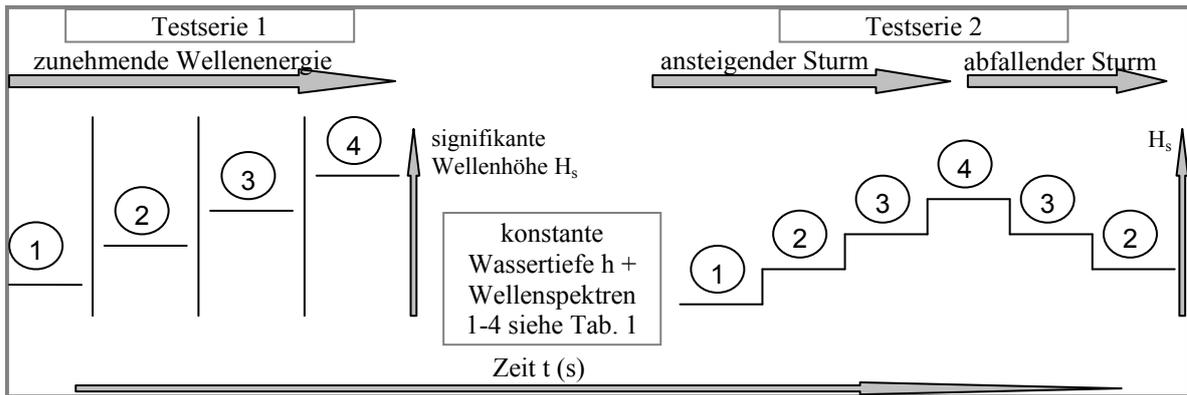


Abb. 2: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung

Tabelle 1: Wellenspektren und Parametervariation

Spektrum	sig. Wellenhöhe H_s [m]	Peakperiode T_p [s]	Wassertiefe h [m]	Pfahldurchmesser D [m]
Versuchsserie 1				
1	0,75	5,04	2,10	0,55
2	0,80	6,66	2,10	0,55
3	0,90	7,60	2,10	0,55
4	1,00	8,60	2,10	0,55
Versuchsserie 2				
1	0,90	7,60	3,20	0,55
2	1,00	8,00	3,20	0,55
3	1,10	8,40	3,20	0,55
4	1,20	8,80	3,20	0,55

vier verschiedene Wellenspektren generiert worden. Die entsprechenden Parametervariationen sind aus Tabelle 1 ersichtlich. Für das Spektrum 1 der ersten Versuchsserie wurde der Bemessungsseegang eines geplanten Offshore-Windkraft-Parks in der Nordsee verwendet. Zur Kolktafentmessung ist wäh-

wend der ersten Versuchsserie die Umgebung des Monopiles mehrmals nivelliert worden. Mit den Daten des entstandenen Nivellements wurde ein dreidimensionales Profil des Sandbettes (Abb. 3) erzeugt.

Während der zweiten Versuchsserie wurde die Kolktafentiefe fortlaufend durch ein installiertes Sichtfenster beobachtet. Im Monopile war eine höhenverstellbare Kamera eingebaut, die im Abstand von einigen Minuten das Sandbett aufnahm (Abb. 4).

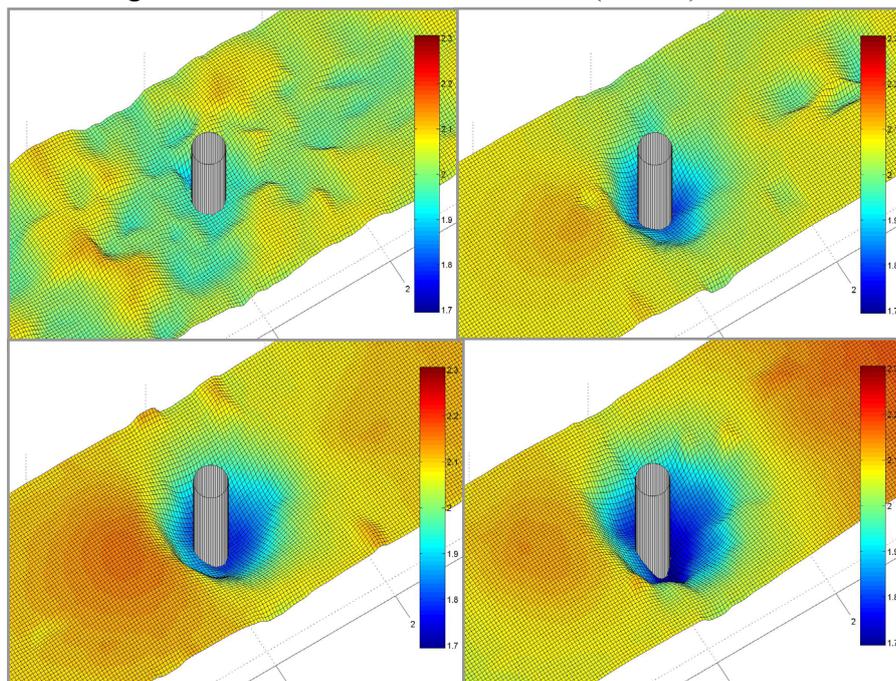


Abb. 3: Sohlenprofil um den Monopile nach Beendigung der Versuche (Serie 1) (o.l.: Test 1 nach 6000 Wellen, o.r.: Test 2 nach 6000 Wellen, u.l.: Test 3 nach 6000 Wellen, u.r.: Test 4 nach 6500 Wellen)

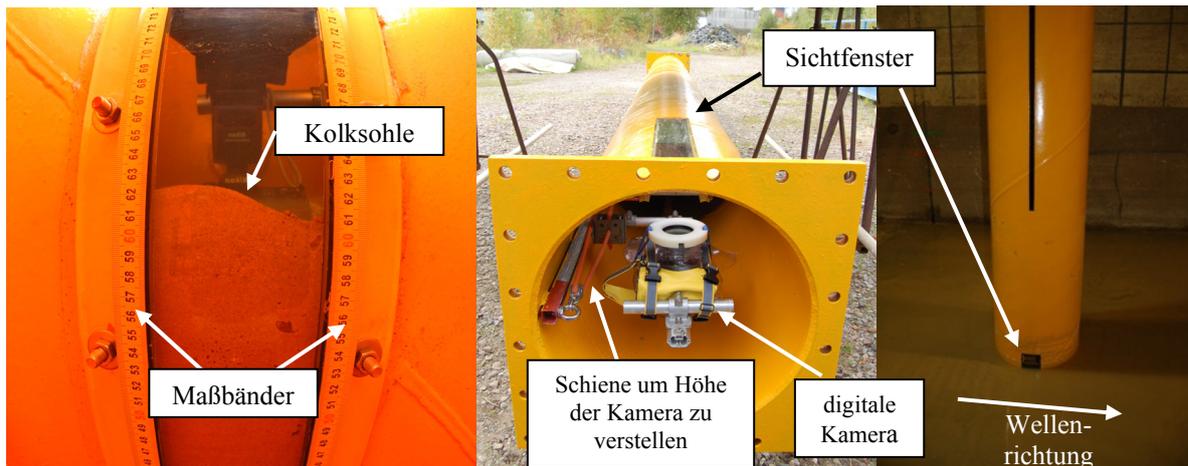


Abb. 4: (a) Sohle des Kolkes; (b) Digitale Kamera und vertikales Zugsystem; (c) Monopile mit Sichtfenster.

3. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die während der zwei Versuchsserien gemessenen Wellenparameter und Kolk-tiefen sind in Tabelle 2 ersichtlich. Wie erwartet, steigt die Kolk-tiefe mit wachsender Wellenenergie an (Preper-nau et al., 2008(b)). Auffällig ist außerdem, dass die relativen Kolk-tiefen der zweiten Versuchsserie für zunehmende Wellenenergie größer sind als für abnehmende Wellenenergie (Spektrum 2 und 3, Tabelle 1 rechts).

Bei der Untersuchung des zeitlichen Verlaufs wurde beim ersten Versuch der ersten Testserie festgestellt, dass ca. nach 3.000 Wellen ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Auch für die folgenden Tests sind nur leichte Schwankungen der Kolk-tiefe nach 3.000 Wellen beobachtet worden. Für die zweite Versuchsserie mit bereits existierendem Kolk sind jedoch weitere Sandtransporteffekte aufgetreten, die den zeitlichen Verlauf verlängern, insbesondere für Tests mit gegenüber dem vorherigen Test abnehmender Wellenenergie (Preper-nau et al., 2008(a)).

Tabelle 2: Wellenparameter und Kolk-tiefen (Spektren siehe Tab. 1)

Test Serie 1	Anzahl Wellen N	$H_{1/3}$	$v_{+1/3}$	T_p	Kolk-tiefe S/D	Test Serie 2	Anzahl Wellen N	$H_{1/3}$	$v_{+1/3}$	T_p	Kolk-tiefe S/D
	[-]	[m]	[m/s]	[s]	[-]		[-]	[m]	[m/s]	[s]	[-]
Spektrum 1	Sandbett zurück in den Ausgangszustand					Spektrum 2	Sandbett geebnet - Vortest				
	3,000	0.84	0.83	5.31	0.1500		5.456	[-]	0.95	7.89	0.29
	6,000	0.86	0.86	5.01	0.1495		Sandbett geebnet – Start des Versuchsprogramms				
Spektrum 2	Sandbett zurück in den Ausgangszustand					Spektrum 1	Start mit existierendem Kolk – zunehmende Wellenenergie				
	3,000	1.03	1.05	6.39	0.3986		5.472	[-]	0.82	7.47	0.32
	6,000	1.03	1.02	6.90	0.4264	Spektrum 2	Start mit existierendem Kolk – abnehmende Wellenenergie				
Spektrum 3	Sandbett zurück in den Ausgangszustand					Spektrum 3					
	3,000	1.21	1.22	8.16	0.5214		7.137	[-]	0.83	7.91	0.33
	6,000	1.21	1.21	7.60	0.4977	Spektrum 4					
Spektrum 4	Sandbett zurück in den Ausgangszustand					Spektrum 3					
	6,500	1.40	1.44	8.93	0.6023		7.290	1,20	1.10	8.84	0,36
						Spektrum 4					
							6.432	1,41	1.23	8.78	0,40
						Spektrum 2					
							5.940	1,18	1.08	8.70	0,24
							13.908	1,09	0.83	7.84	0,22

Im weiteren Verlauf der Auswertung wurden für die einzelnen Tests die KC -Werte (Formel 1) mit verschiedenen charakteristischen Parametern der Strömungsgeschwindigkeit und Wellenperiode bestimmt. Im ersten Schritt wurden die von Sumer und Fredsøe (2001) definierten Parameter v_{rms} and T_p verwendet (Formeln 3 und 4). Außerdem wurden die KC -Werte mit den Geschwindigkeitsparametern v_{+max} , $v_{+1/3}$ oder v_{+m} und den

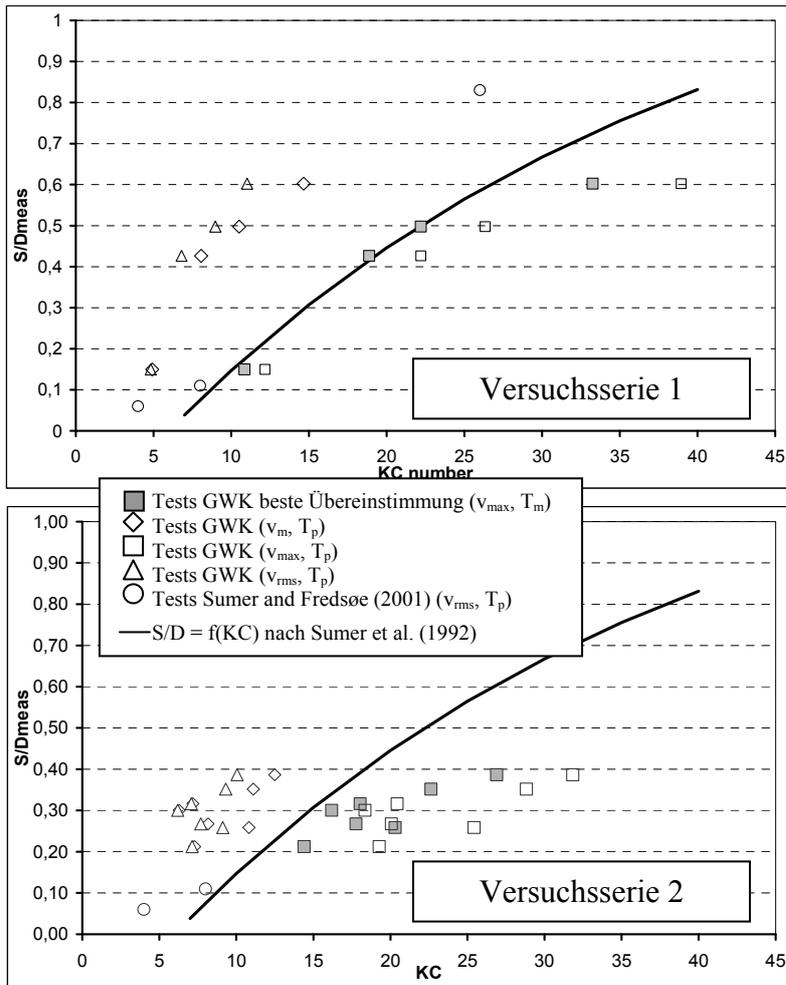


Abbildung 5: Gemessene relative Kolkiefen S/D_{meas} der GWK Tests und der kleinmaßstäblichen Tests von Sumer und Fredsøe (2001) für verschiedene Definitionen der KC Nummer

Wellenperioden T_m oder T_p berechnet. Einige ermittelte KC -Werte sind in Abhängigkeit der gemessenen relativen Kolkiefen S/D_{meas} in Abb. 5 dargestellt.

Für die Versuchsserie 1 ergibt sich mit der maximalen Geschwindigkeit v_{+max} und der mittleren Wellenperiode T_m die beste Übereinstimmung mit der

Formel (2) von Sumer und Fredsøe (2001). Die Parameterwahl von Sumer und Fredsøe unterschätzt die auftretende Kolkentwicklung.

Auch in der zweiten Versuchsserie sind die Kolkiefen mit der Parameterwahl von Sumer und Fredsøe unterschätzt, während die Parameterkombination von v_{+max} und T_m die beste Übereinstimmung mit der Formel (2) von Sumer et al. (1992) bietet. Jedoch treten hier stärkere

Abweichungen auf und die Kolktiefe ist leicht überschätzt.

Derzeit werden weitere Untersuchungen durchgeführt, die nicht nur eine alternative Parameterwahl zur Bestimmung des KC -Wertes in Betracht ziehen, sondern auch die Untersuchung weiterer Einflussparameter und die Variation der Koeffizienten in der Formel (2). Weiterhin werden auf Grund der Abweichungen zu den Testergebnissen von Sumer und Fredsøe (2001) Maßstabeffekte vermutet, die weiter untersucht werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die großmaßstäblichen Versuche im GWK ergaben folgende Ergebnisse:

- Die Kolktiefe wächst mit zunehmender Wellenenergie.
- Für Versuche mit bereits existierendem Kolk ist die Kolktiefe bei zunehmender Wellenenergie größer als bei abnehmender Wellenenergie.
- Die Dauer zur Erreichung eines Gleichgewichtskolks ist für die Randbedingung „ebene Sohle“ kürzer als für den „existierenden Kolk“ um den Monopile.
- Für Versuche mit bereits existierendem Kolk ist die Dauer zum Erreichen der Gleichgewichtskolkentiefe für Seegang mit zunehmender Wellenenergie kürzer als für Seegang mit abnehmender Wellenenergie.

- Die beste Übereinstimmung mit der Formel von Sumer und Fredsøe ergab sich für die KC -Werte mit den Parametern v_{+max} und T_m anstatt mit den von Sumer und Fredsøe (2001) verwendeten Parametern v_{rms} und T_p .

5. DANKSAGUNG

Die in dieser Arbeit beschriebenen großmaßstäblichen Versuche waren Teil der Forschungsprojekte „CoMIBBS“ (Teilprojekt der European Community's Sixth Framework Programme Integrated Infrastructure Initiative HYDRALAB III, Contract no. 022441 (RII3)) und „Untersuchungen zur Kolkbildung und zum Kolkschutz bei Monopile-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen“ (gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und die Offshore-Bürger-Windpark Butendiek GmbH & Co. KG, Referenz Nr. 0329973).

6. SCHRIFTTUM

- CARREIRAS, J., LARROUNDE, P., SEABRA-SANTOS, F. und MORY, M.: Wave scour around piles. Proceeding of the International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2000), Sydney, pp 1860-1871, 2000.
- PREPERNAU, U., GRÜNE, J., SCHMIDT-KOPPENHAGEN, R., WANG, Z. und OUMERACI, H.: Large-scale model tests on scour around slender monopile under live-bed conditions. Proceedings on the second International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (CoastLab 2008), Bari, 2008(a).
- PREPERNAU, U., GRÜNE, J., SPARBOOM, U., SCHMIDT-KOPPENHAGEN, R., WANG, Z. und OUMERACI, H.: Large-scale model study on scour around slender monopiles induced by irregular waves. Proceeding on the International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2008), Hamburg, 2008(b).
- RUDOLPH, D. und BOS, K.J.: Scour around a monopile under combined wave-current conditions and low KC -numbers. Proceedings of the International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2006), Amsterdam, 2006.
- SUMER, B.M. und FREDSOE, J.: Scour around pile in combined waves and current. Journal of Hydraulic Engineering, 127, 5, pp 403-411, 2001.
- SUMER, B.M., WHITEHOUSE, R.J.S. und TORUM, A.: Scour around coastal structures: a summary of recent research. Journal of Coastal Engineering, 44, pp 153-190, 2001.
- SUMER, B.M. und FREDSOE, J.: Hydrodynamics around cylindrical structures'. Technical University of Denmark, Advanced Series on Ocean Engineering, 12, World Scientific, Singapore, 1999.
- SUMER, B.M., FREDSOE, J. und CHRISTIANSENEN, N. Scour around vertical pile in waves. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 118, 1, pp 15-31, 1992.