

UNTERSUCHUNGEN ZUR STABILITÄT VON SCHÜTTSTEINEN UNTER SEEGANG UND DIE ANWENDUNG FÜR DEN KOLKSCHUTZ VON TRAGKONSTRUKTIONEN FÜR OFFSHORE – WINDENERGIEANLAGEN

von

Uwe Sparboom¹
Joachim Grüne²
Hocine Oumeraci³
Reinold Schmidt-Koppenhagen⁴
Zeya Wang⁵

ABSTRACT

Within the currently running research programme on monopile foundations for offshore wind energy farms one task is to investigate the stability of a proposed scour protection using dumped rock material. Preliminary tests with different stone sizes are used to design an economical solution for the physical model (scale 1 : 10) being placed in the Large Wave Channel (GWK) at the Coastal Research Centre (FZK). In this paper, the model set-up, the model procedure and tentative results of the measurements are reported.

1. VERANLASSUNG UND EINLEITUNG

Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) mit Pfahlgründungen können durch Auskolkungen im Bereich der beweglichen Meeressohle infolge von Seegang und Strömung in ihrer Stabilität gefährdet sein. Die Entstehung und Entwicklung von Kolkerscheinungen an OWEA-Gründungen sind bis heute nicht hinreichend vorherzusagen. Wegen dieser Unsicherheiten bei der Gründungsdimensionierung von OWEA werden Lösungen mit Kolk-schutz bevorzugt. Das am FZK laufende BMU-Forschungsvorhaben „*Untersuchungen zur Kolkbildung und zum Kolk-schutz bei Monopile-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen*“ beinhaltet in Phase 3 „GWK-Versuche zum Kolk-schutz mit Schüttsteinen“ an einer Monopile-Gründung, die für den OSB-Windpark Butendiek westlich der Insel Sylt vorgesehen ist (GRÜNE et al., 2005).

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

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

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

⁴ Dipl.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstraße 11, 30419 Hannover

⁵ M.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstraße 11, 30419 Hannover

Die herkömmliche Kolksicherung wird als Steinschüttung hergestellt, die nach den bekannten Filterregeln und den Stabilitätskriterien nach dem Shields-Ansatz bemessen werden. Hierzu gehört eine gesicherte Einschätzung der lokalen Seegangsverhältnisse, aus der sich die Strömungsbedingungen am Meeresboden ermitteln lassen. Großmaßstäbliche Laborversuche wie z.B. im Großen Wellenkanal (GWK) am FZK sind eine wesentliche zusätzliche Methode zur Absicherung der Bemessungsstrategie.

Nach der Dimensionierung auf der Basis des Shields-Ansatzes für den geplanten OSB-Windpark Butendiek sollen die erforderlichen Schüttsteine der Deckschicht Durchmesser von 1,10 bis 1,20 m aufweisen, wobei die Schüttsteine Gewichte von 1900 bis 2400 kg hätten (IMS, 2004). Die Bemessung des Kolkschutzes erfolgt nach dem Entwurfswellenkonzept mit $H = 12,5$ m, $T = 14,0$ s und $d = 21,0$ m. Der kritische Shields-Parameter wird dabei um 25 % und die Sohlströmung im Nahbereich des Monopiles um 70 % erhöht. Die Sohlströmung setzt sich zusammen aus welleninduzierter Strömung (3,60 m/s) sowie aus tide- und windinduzierter Strömung (0,53 m/s).

Eine Vergleichsberechnung mit dem Ansatz von SOULSBY (1997) ergibt *ohne* Erhöhungsfaktoren des Shields-Parameters und der Sohlströmung am Pfahl bereits einen kritischen Steindurchmesser von 1,40 m.

Eine weitere Vergleichsberechnung mit dem Ansatz von IZBASH und KHALDRE (1970), der auch von PILARCZYK (2000) zur Bemessung von Schüttsteinen empfohlen wird, ergibt für einzelne Steine einen kritischen Steindurchmesser von 0,38 m, sofern *ohne* Erhöhungsfaktor der Sohlströmung am Pfahl gerechnet wird. Bei einer Erhöhung der Sohlströmung am Pfahl um 70 % (auch Amplifizierungsfaktor genannt) ergibt sich ein kritischer Steindurchmesser von 1,10 m.

Weil die hier kurz aufgezeigten Unsicherheiten bei den vergleichbaren Bemessungsansätzen für einen Kolkschutz mit Schüttsteinen die Auslegung des Kolkschutzes im GWK-Modell beeinflussen, sind einfache Vorversuche über die hydraulische Stabilität von Einzelsteinen und Steingruppen mit verschiedenen Abmessungen bzw. Gewichten unverzichtbar. Eine relative Unsicherheit besteht zudem in der Berechnung des Steingewichts aus den mittleren kritischen Steindurchmessern. Mit den Ergebnissen der Vorversuche wird der Kolkschutz für die Untersuchungen im GWK (Maßstab 1 : 10) endgültig ausgelegt.

2. VORVERSUCHE MIT SCHÜTTSTEINEN

2.1 Versuchsaufbau

Eine geotextile Sandmatte (Terrafix 813, NAUE Fasertechnik) wird auf der horizontalen Sandsohle im GWK ausgelegt und an den Enden in den Sand eingegraben. Es werden 18 verschiedene Einzelsteine mit Gewichten von 1,0 bis 18,9 kg auf der Sandmatte ausgelegt. Die Steine werden in 4 Reihen in Abständen von jeweils 2,0 m angeordnet (Abb. 1). Die Abstände der jeweils benachbarten Steine betragen mindestens 0,6 m, sodass eine gegenseitige Beeinflussung vernachlässigt werden kann. Bei den Vorversuchen mit Steingruppen werden 4 verschiedene Gewichte verlegt; 0,5/1,0/ 2,0 und 3,0 kg.

2.2 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Die Wellenversuche werden mit Jonswap-Spektren durchgeführt, die eine Mindestanzahl von 150 Wellen aufweisen. Die Wellenparameter im verkleinerten Seegangmodell orientieren sich an dem lokalen Bemessungsspektrum für den OSB-Windpark Butendiek, die mit der signifikanten Wellenhöhe $H_s = 7,5$ m und der Peakperiode $T_p = 11,6$ s vorgegeben sind. Die Wassertiefe beträgt bei allen Vorversuchen 4,5 m an der Wellenplatte und 2,5 m im Bereich des horizontalen Sandbetts. In Tab.1 sind die gemessenen Wellenparameter und die maximale Sohlgeschwindigkeit zusammengestellt. Diese Sohlgeschwindigkeit wird als horizontale Komponente der Orbitalgeschwindigkeit in Wellenfortschrittsrichtung im Nahbereich der Wellenmessstelle registriert. Zudem sind in Tab.1 die Stabilitätszustände nach Versuche angegeben.

	H1/3 [m]	Tp [s]	Tm [s]	Hmax [m]	V+max [m/s]	stabile Lage	instabile Lage
Einzelsteine	0,59	4,70	4,68	0,79	0,85	alle	-
	0,80	5,00	4,54	1,20	1,05	alle	-
	0,96	5,36	4,82	1,34	1,19	alle	-
	1,34	5,00	4,54	1,92	1,36	übrige	2 / 3 Kg
	0,98	6,19	5,30	1,32	1,51	übrige	1 / 2 / 3 Kg
	1,16	5,97	5,39	1,42	1,37	übrige	1 / 2 / 3 Kg
	1,15	7,12	6,21	1,58	1,65	übrige	1 / 2 / 3 Kg
Stein- gruppen	0,59	4,69	4,71	0,81	0,78	alle	-
	0,80	5,00	4,53	1,21	1,04	3 Kg	0,5 / 1 / 2 Kg
	0,96	5,36	4,75	1,42	1,19	3 Kg	0,5 / 1 / 2 Kg
	1,09	5,00	4,50	1,46	1,31	2 Kg	0,5 / 1 / 3 Kg

Tab. 1 Ausgewählte gemessene Parameter der Vorversuche mit jeweils 150 Wellen

Abb. 1 und Abb. 2 zeigen die Steinanordnung im GWK nach einem Versuch (Abb. 1 für Einzelsteine und Abb. 2 für Steingruppen). Für einen Vorversuch mit den Steingruppen, dessen Wellenparameter größer als die des Bemessungsspektrums sind, ist das Aufmass der Steinbewegungen in Abb. 3 dargestellt.



Abb. 1 Einzelsteine nach 150 Wellen mit $H_{1/3} = 1,15$ m; $T_p = 7,12$ s; $d = 2,5$ m



Abb. 2 Steingruppen nach 150 Wellen mit $H_{1/3} = 0,96$ m; $T_p = 5,36$ s; $d = 2,5$ m

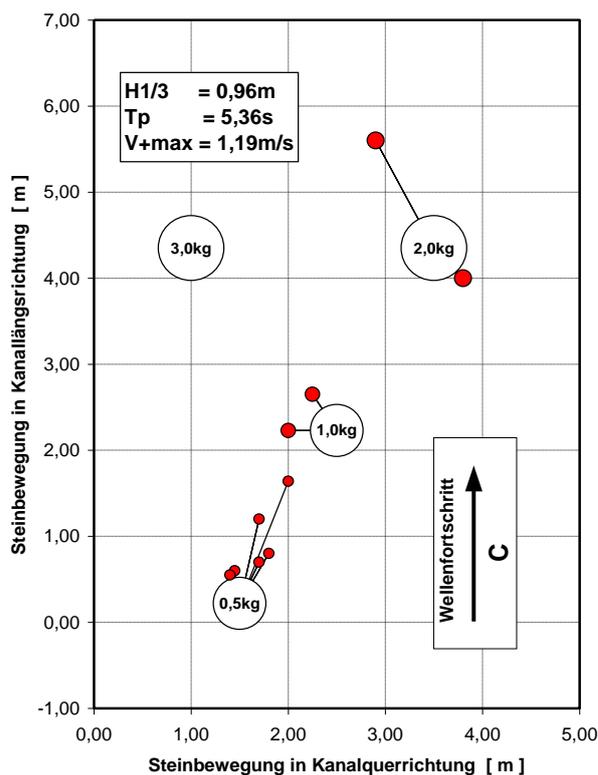


Abb. 3 Exemplarisches Aufmass der Steingruppen nach 150 Wellen

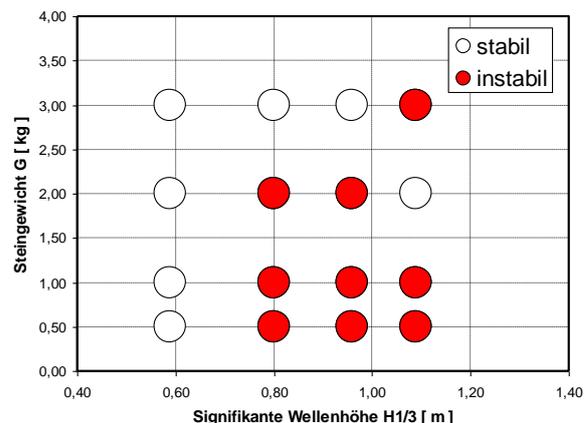


Abb. 4 Ergebnis der Vorversuche mit Steingruppen in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhen mit mittleren Perioden von 4,50 bis 4,75 s

Die Ergebnisse für die Lagestabilität der Steingruppen sind in Abb. 4 über die signifikante Wellenhöhe der Spektren mit 150 Wellen und mittleren Perioden von 4,50 bis 4,75 s aufgetragen. In einer ersten Schätzung kann aus dieser Auftragung abgelesen werden, dass für das Bemessungsspektrum (im 1 : 10 GWK-Modell: $H_{1/3} = 0,75$ m) ein Kolkschutz mit Steingewichten von maximal 1,4 kg hinreichend sein sollte. Für die Auslegung des Kolkschutzmodells muss bedacht werden, dass die Steine sehr kompakt angeordnet sind und somit höhere Verzahnungskräfte zwischen den einzelnen Steinen mobilisiert werden als bei den Steingruppen der Vorversuche. Weiterhin wird das Steingewicht für den Kolkschutz möglichst niedrig gehalten, damit sich während der Versuchsdurchführung auch tatsächlich ein Schaden einstellt. Im Falle einer Überbemessung, bei der kein Schaden auftritt, wird es nicht möglich sein Kriterien für einen Anfangsschaden zu bestimmen.

3. VERSUCHE ZUM KOLKSCHUTZ MIT SCHÜTTSTEINEN

3.1 Versuchsaufbau

Die Hauptabmessungen zum Durchmesser des Monopiles und des Kolkschutzes, zu den Schichtdicken der verschiedenen Steinmaterialien sowie zu den Steinfraktionen der beiden unteren Lagen werden nach den Vorgaben des Kolkschutzentwurfs der IMS (2004) nach dem Froude'schen Gesetz modelliert (Maßstab 1 : 10). Für die Deckschicht wird von dem einkörnigen Material einvernehmlich abgewichen. Unter Beachtung der Ergebnisse aus den Vorversuchen werden mehrere Steinmischungen mit unterschiedlichen Gewichtsanteilen aus den Gewichtsklassen 1-5 (vgl. Abb. 6) hergestellt. Für die Kolkschutzversuche

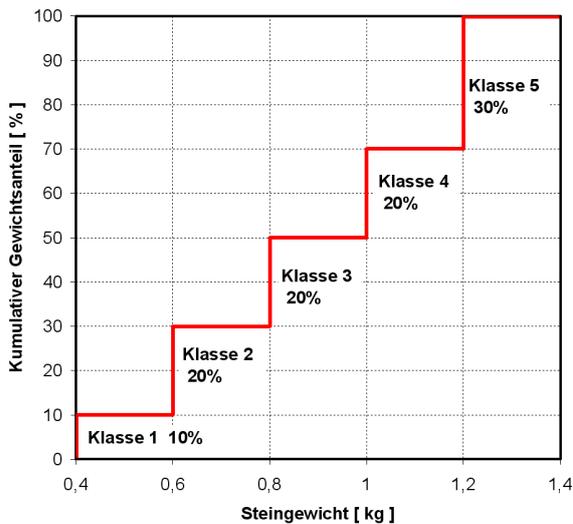


Abb. 5 Kumulative Gewichtsverteilung der Schüttsteine in der Deckschicht des Kolk schutzmodells

wird die hydraulisch optimale Mischung nach den kumulativen Gewichtsanteilen entsprechend Abb.5 ausgewählt. Der endgültige Kolk schutz mit insgesamt 2.577 Steinen ist in Abb. 6 als rotationssymmetrischer Querschnitt dargestellt. Es sind 4 Sektoren von jeweils 90 Grad mit verschiedenen Farben gekennzeichnet (s. Abb. 7), damit die etwaige Bewegung infolge der Wellenwirkung nachträglich verfolgt werden kann. Der Durchmesser des Monopiles beträgt 0,55 m und das Sandbett im GWK hat eine Einbaudicke von 2,05 m über der Sohle des Wellenkanals. Abb. 7 zeigt ein Foto von dem eingebauten Zustand vor Beginn der Wellenversuche.

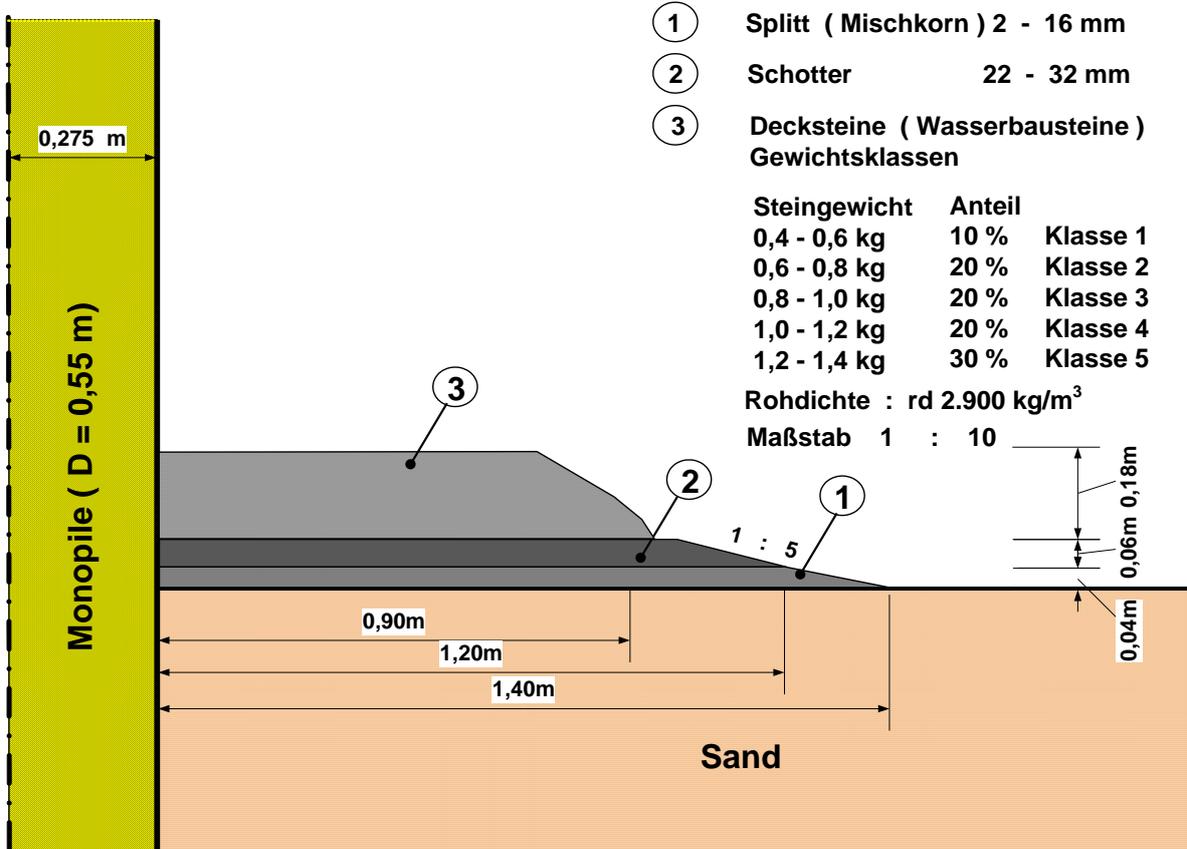


Abb. 6 Querschnitt des Kolk schutzmodells mit Schüttsteinen im GWK



Abb. 7 Foto des Kolkschutzmodells im GWK

3.2 Versuchsdurchführung und erste Messergebnisse

Die Wellenversuche werden mit Jonswap-Spektren durchgeführt, die eine Zeitsequenz von mindestens 500 Wellen aufweisen. Unter Berücksichtigung des Bemessungsspektrums für den OSB-Windpark Butendiek ($H_s = 7,5$ m und $T_p = 11,6$ s) beginnt die Versuchsreihe mit einem Spektrum $H_{1/3} = 0,58$ m und $T_p = 3,53$ s. Die Wassertiefe beträgt bei allen Versuchen 4,15 m an der Wellenplatte und 2,10 m im Bereich des horizontalen Sandbetts. Es werden die Wellenparameter und die horizontalen Sohlgeschwindigkeiten als Komponenten der Orbitalkinematik gemessen. Die Wellenparameter werden solange schrittweise erhöht, bis der Kolkschutz seine Funktion nicht mehr erfüllen kann. Die Zwischenzustände des Kolkschutzes werden registriert, indem jeder Stein außerhalb des Ausgangszustands eingemessen und gewogen wird. Weiterhin werden die Zwischenzustände fotografisch festgehalten. In Tab. 2 sind die wesentlichen Parameter der gewählten Spektren zusammengestellt, einschließlich der jeweiligen Wellenanzahl.

H1/3 [m]	Tp [s]	Tm [s]	V+max [m/s]	Anzahl Wellen	Summe Wellen	Schadenkriterium
0,58	3,53	2,95	0,76	500	500	stabil: geringe Bewegungen bis zu 7 Steinen
0,73	3,67	3,38	0,91	1.500	2.000	
0,72	3,56	3,30	1,08	1.500	3.500	
0,74	3,55	3,43	0,98	2.000	5.500	
0,86	5,08	4,49	1,32	2.000	7.500	
1,02	6,75	5,68	1,98	3.000	10.500	instabil: starke Zunahme der Bewegungen
1,12	6,75	5,68	2,24	3.000	13.500	
1,19	7,59	6,66	2,03	3.000	16.500	
1,37	7,99	7,66	2,53	1.000	17.500	

Tab. 2 Ausgewählte gemessene Parameter der Kolkschutzversuche

In diesem Bericht werden zwei charakteristische Zwischenzustände dargestellt: (i) Die quasi stabile Lage bis zu 7.500 Wellen (Abb. 8) und (ii) die quasi instabile Lage nach zusätzlichen 3.000 Wellen (Abb. 9). Die stabile Lage in Abb. 8 weist lediglich bis zu

7 Steinverschiebungen auf (0,3 % aller Steine). Für das Spektrum mit $H_{1/3} = 1,02$ m und $T_p = 6,75$ s gemäß Tab. 2 werden Aufmasse nach jeweils 1.000, 2.000 und 3.000 Wellen durchgeführt. Die Zunahme der Schädigungen des Kolksschutzes ergibt: + 5,0 % (130 Steine) nach 1.000 Wellen, + 4,3 % (110 Steine) nach 2.000 Wellen und + 2,2 % (56 Steine) nach 3.000 Wellen (Abb.9). Nach der Schädigung von insgesamt 11,8 % werden die Wellenparameter erneut erhöht (siehe Tab. 2), um eine totale Schädigung herbeizuführen.

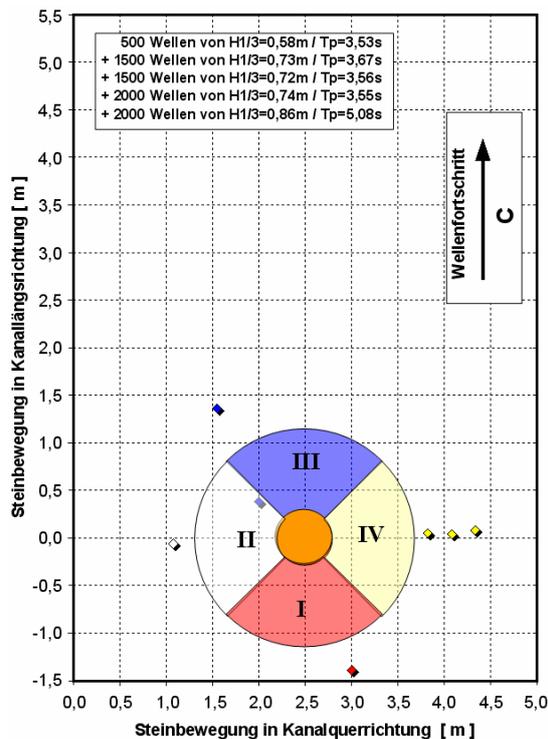


Abb. 8 Aufmass der Steinbewegungen bei stabilem Zustand des Kolksschutzes

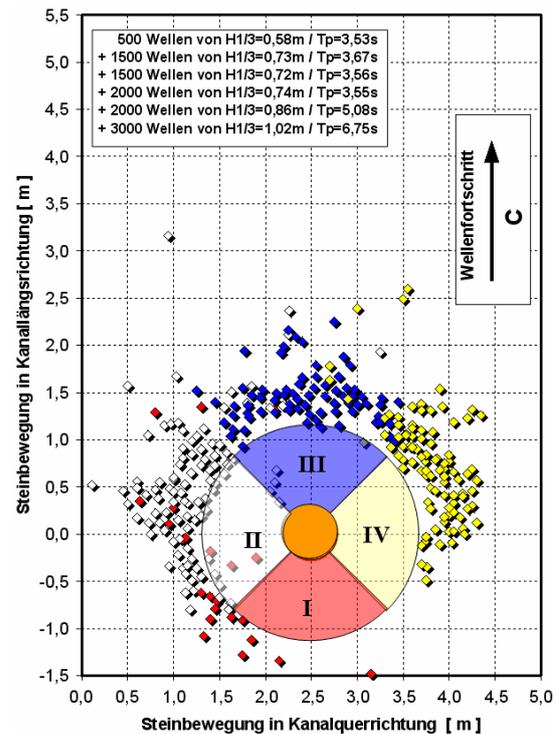


Abb. 9 Aufmass der Steinbewegungen bei instabilem Zustand des Kolksschutzes

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Ergebnisse aus den Vorversuchen haben die Auslegung des Kolksschutzes erheblich erleichtert, weil die Unsicherheiten bei den verschiedenen Bemessungskonzepten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Die Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchungen des Kolksschutzes nach Abb. 6 können nach dem Froude'schen Gesetz für den Prototyp des geplanten Monopiles im OSB-Windpark Butendiek abgeschätzt werden. Die Steingewichte der Deckschicht sollten nach den Klassenanteilen in Abb. 7 zwischen 400 und 1.400 kg liegen bei einer Rohdichte von rd. 2.900 kg/m^3 . Diese Decksteine könnten einem Seegang bis $H_{1/3} = 8,6$ m und $T_p = 16,0$ s standhalten. Dies gilt jedoch nur für die Decksteine. Die Versuchszeit für den stabilen Kolksschutz entspricht am Prototyp etwa einer Seegangsdauer von 25 Stunden und dürfte somit hinreichend gewählt sein. Die maximal am Prototyp auftretende Sohlgeschwindigkeit infolge der Wellenkinematik könnte rd. 4,0 m/s erreichen, ohne Amplifizierung durch das Vorhandensein des Monopiles.

Die Aufmasse des Kolkschutzes zeigen durchaus, dass die Steine der seitlichen Sektoren II und IV wie erwartet zuerst ihre Stabilität verlieren infolge der verstärkten Sohlgeschwindigkeit. Der vordere Sektor I weist im Vergleich zu den anderen Sektoren eine deutlich geringere Schädigung auf. Die Schadenskriterien für den Kolkschutz sind jedoch noch durch weiterführende Auswertungen der Aufmasse zu definieren. Hinweise zur Konstruktion des Kolkschutzes unter Einbeziehung der Filterlagen werden noch erarbeitet.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Ein vorgegebener Kolkschutz aus Schüttsteinen an einem Offshore-Monopile von 5,5 m Durchmesser wird in einem physikalischen Modell im Maßstab 1 : 10 im Großen Wellenkanal im Hinblick auf die Stabilität der Deckschicht unter Seegangseinwirkung getestet. Die Ausbildung der Deckschicht erfolgt aus einem Steingemisch verschiedener Gewichtsanteile. Nach den Ergebnissen der aufgemessenen Schädigungen bei fortschreitender Wellenzahl mit stufenweiser Erhöhung der Seegangparameter zeigt sich, dass der untersuchte Kolkschutz dem an der Lokation des Prototyps zu erwartenden maximalen Seegang mit $H_s = 7,5$ m und $T_p = 11,6$ s standhält.

6. DANKSAGUNGEN

Das Forschungsvorhaben wird vom BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) gefördert (FKZ: 0329973). Die OSB OFFSHORE-BÜRGER-WINDPARK GmbH & Co. KG ist maßgeblich an der Förderung des Forschungsvorhabens beteiligt. Die IMS Ingenieurgesellschaft mbH hat an der Dimensionierung des Kolkschutzes maßgeblich mitgewirkt und die NAUE Fasertechnik GmbH & Co. KG hat dankenswerterweise die notwendigen Geotextilien zur Verfügung gestellt.

7. SCHRIFTTUM

GRÜNE, J., OUMERACI, H., SPARBOOM, U., SCHMIDT-KOPPENHAGEN, R., MITZLAFF, A., PETERS, K.: Untersuchungen zum Kolkschutz für Offshore-Monopile-Gründungen. Tagungsband 5. FZK-Kolloquium „Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke“, Forschungszentrum Küste, Hannover, 2005

IMS-INGENIEURGESELLSCHAFT: OSB Offshore-Bürger-Windpark Butendiek - Monopile-Gründungsstrukturen des Offshore-Windparks Butendiek: Auslegung und Dimensionierung des Kolkschutzes mit Schüttsteindeckwerk. Berichts-Nr. 9076-02, Hamburg, 2004 (unveröffentlicht)

IZBASH, S.V., KHALDRE, Kh. Yu.: Hydraulics of River Channel Closure. Butterworth, London, 1970 (translated from the Russian by CAIRNS, G.L.)

PILARZCYK, K.W.: Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering, A. A. Balkema, Rotterdam, 2000

SOULSBY, R.: Dynamics of Marine Sands. Thomas Telford, London, 1997