

Kolkschutz an Monopile – Tragkonstruktionen von OWEA

Dipl.-Ing. Joachim Grüne
Dr.-Ing. Uwe Sparboom
Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci
Dipl.-Ing. Reinold Schmidt-Kopenhagen
M.-Ing. Zeya Wang

Forschungszentrum Küste der Universität Hannover und der Technischen
Universität Braunschweig
Merkurstrasse 11, D-30419 Hannover

Fon: +49 511 762 9227
Fax: +49 511 762 9219
E-mail: gruene@fzk.uni-hannover.de
www.hydrolab.de

1. Einführung

In den vergangenen Jahren hat sich der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien stark beschleunigt. Dafür sind maßgeblich Umweltaspekte verantwortlich, speziell das Anwachsen der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre (Treibhauseffekt). Zunehmend spielen aber auch ökonomische Gründe wie steigende Energiepreise und der Mangel fossiler Brennstoffe infolge des zunehmenden globalen Energieverbrauchs eine Rolle. Die vergangenen Jahre waren geprägt von einem starken Ausbau der Windenergie. In einigen Ländern stehen bereits kaum noch Standorte mit ausreichender Windintensität zur Verfügung. Ein Ausweg ist der Aufbau küstennaher Offshore - Windparks. Allerdings sind die technischen Randbedingungen im Vergleich zu herkömmlichen Windparks an Land ungleich komplexer, was sich auch in ökonomischer Hinsicht auswirkt.

Eine dieser komplexen und schwierigen Randbedingungen ist die Gründung der Tragstruktur der Offshore-Windenergieanlagen (OWEA). Diese wird häufig als Monopile-Struktur ausgeführt. Werden diese Pfahlgründungen in Gebieten mit einer beweglichen Sandsohle errichtet, bildet sich vor allem infolge welleninduzierter Strömungen an der Sohle ein Kolk aus, dessen Ausbildung bisher zumindest quantitativ nicht hinreichend sicher vorhergesagt werden kann. Wegen dieser Unsicherheiten werden für die Gründungsbemessung von OWEA Lösungen mit Kolkschutz bevorzugt, die eine Ausbildung von Kolken dauerhaft verhindern soll.

Ein üblicher Kolkschutz wird als Steinschüttung hergestellt, dessen Unterbau nach den bekannten Filterregeln und deren Deckschicht nach Stabilitätskriterien bemessen wird. Entsprechende Verfahren sind z.B. der Shields-Ansatz oder der Ansatz von Izbash und Khaldre (1970), siehe auch Pilarczyk (2000), wobei diese Bemessungsansätze nur unzureichend abgesichert sind. So liegen keine Überprüfungen durch großmaßstäbliche Labor- oder Naturuntersuchungen vor.

Eine innovative Lösung für einen Kolkschutz ist die Verwendung Geotextiler Sandcontainer. Im Vergleich zu einem herkömmlichen Kolkschutz aus Schüttsteinen mit darunter liegenden Filterschichten haben Geotextile Sandcontainer viele Vorteile. Das weiche Material verringert die Gefahr von Schäden an der Kabeleinführung und am Monopile selbst. Hinzu kommen geringere Kosten und die Möglichkeit, die Sandcontainer am Ende der Lebensdauer der Windenergieanlage vergleichsweise einfach zurückbauen zu können. Allerdings gibt es bisher wenig Erfahrung über Aufbau und Bemessung eines Kolkschutzes mit Geotextilen Sandcontainern (vgl. Pilarczyk, 2000).

Zur Überprüfung der Stabilität solcher Kolkschutzlösungen wurde im FZK ein gemeinsam vom Bundesumweltministerium BMU und dem Betreiber des geplanten Windparks Butendiek finanziertes Forschungsprogramm „Untersuchungen zur Kolkbildung und zum Kolkschutz bei Monopile-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen“ initiiert (Grüne et al., 2005). Um den Einfluss von Maßstabeffekten zu minimieren, wurden die Untersuchungen in einem

großmaßstäblichen physikalischen Modell im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK) durchgeführt. Die Simulation der welleninduzierten hydrodynamischen Prozesse und speziell die Skalierung des in der Deutschen Bucht häufig zu findenden Feinsandes erfordern einen Modellaufbau dieser Größenordnung.

Zunächst wurden sowohl mit Geotextilen Sandcontainern als auch mit Schüttsteinen umfangreiche Grundlagenversuche zur Stabilität einzelner Container bzw. Steine und von Containergruppen bzw. Steingruppen durchgeführt. Mit den Ergebnissen dieser Experimente wurden die Kolkschutzsysteme an einem Monopile für die Untersuchungen im GWK dimensioniert.

2. Grundlagenuntersuchungen

2.1 Versuchsprogramm

Da bisher noch keine brauchbaren Bemessungsansätze für Geotextile Sandcontainer und nur unzuverlässige Ansätze für Schüttsteine existierten, wurden zunächst Grundlagenuntersuchungen durchgeführt. Die Sandcontainer bzw. Steine wurden für die Tests auf einer horizontalen Sandsohle (siehe Abb. 1) im Bereich des Monopiles, der erst später eingebaut wurde, angeordnet. Dieser Bereich war mit einem geotextilen Filter (Sandmatte) abgedeckt.

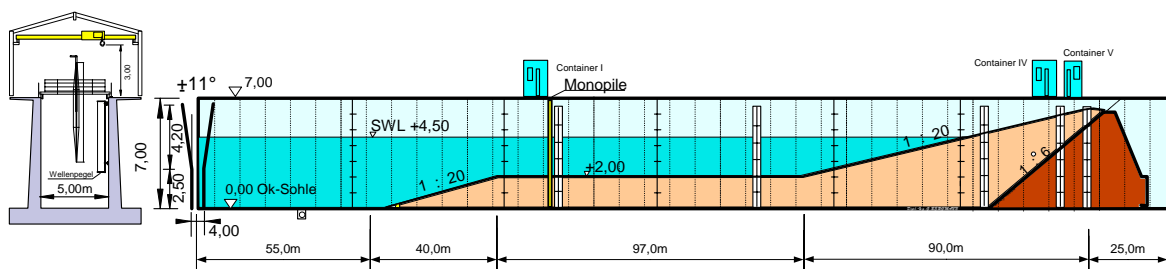


Abb. 1 Längsschnitt des GWK mit dem eingebauten Sandprofil und dem Monopile

Die ersten Pilotversuche mit unterschiedlichen Gewichten der Sandcontainer wurden auch mit unterschiedlichen Füllungsgraden durchgeführt. Ein überraschendes Ergebnis war die starke Abhängigkeit der Lagestabilität vom Füllungsgrad der Sandcontainer. Teilgefüllte größere und damit auch schwerere Sandcontainer waren z.T. deutlich instabiler als kleinere "optimal" gefüllte Container. Das bedeutet, dass die Stabilität nicht allein als Funktion des Gewichts der Sandcontainer definiert werden kann.

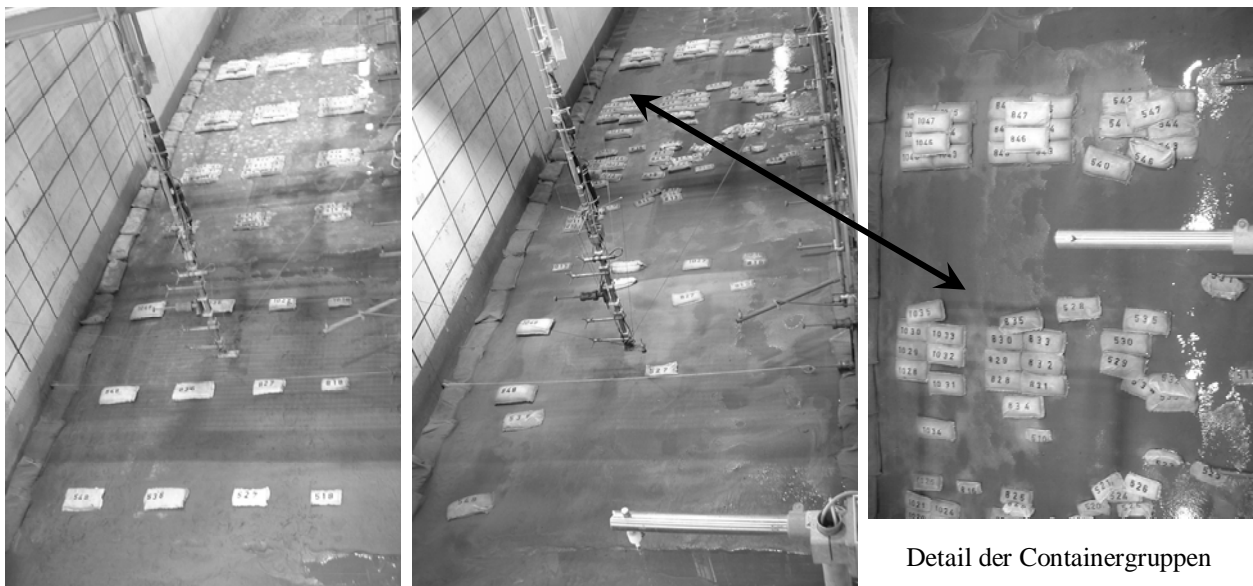
Dieser ausgeprägte Einfluss des Füllungsgrades hat zu weiteren umfangreichen Grundlagentests mit unterschiedlichen Containergrößen und -gewichten und verschiedenen Füllungsgraden geführt. Verglichen wurden vier Containergrößen jeweils gefüllt zu 56%, 80% und 100%. In Tabelle 1 sind die Gewichte und die Containergrößen (L x H x B) für die 12 getesteten unterschiedlichen Container zusammengefasst.

Tabelle 1 Dimensionierung der Geotextilen Sandcontainer

Größe der Geotextilen Container (ungefüllt) l x w [cm]	Füllungsgrad [%]											
	56				80				100			
	Gewicht G [kg]	Dimension [cm]			Gewicht G [kg]	Dimension [cm]			Gewicht G [kg]	Dimension [cm]		
l		w	h	L		w	h	l		w	h	
29,5 x 14,5	1,71	28,2	14,4	3,3	2,45	27,2	13,6	5,0	3,06	27,3	13,3	6,6
36,0 x 18,5	3,34	35,6	17,7	3,9	4,78	34,2	17,2	6,0	5,97	35,4	16,9	7,5
47,0 x 23,0	7,24	45,2	22,8	5,2	10,33	44,0	22,1	7,8	12,91	43,9	22,3	10,2
48,0 x 26,0	10,25	51,3	24,8	6,9	14,64	51,3	25,3	9,0	18,31	48,7	25,2	11,8

Die verschiedenen Containergrößen wurden sowohl als einzeln liegende als auch in Gruppen angeordnete Sandcontainer untersucht. Eine Gruppe bestand aus 6 Sandcontainern (3x2) in der unteren Schicht und 2 Containern, die als zweite Schicht mittig auf die untere Schicht gelegt wurden (vgl. Abb. 2). Die Containergruppen sollten den Einfluss eines möglichen Verzahnungseffektes der Sandcontainer untereinander deutlich machen.

Die Containergruppen und die einzeln liegenden Container wurden sowohl längs in Wellenfortschrittsrichtung (inline) als auch quer dazu (transverse) positioniert. In jedem Test kamen 108 Sandcontainer zum Einsatz. Abb. 2 zeigt die Testkonfiguration mit den quer zur Wellenfortschrittsrichtung angeordneten Sandcontainern. Das linke Bild zeigt die Sandcontainer im Einbauzustand, auf den beiden rechten Abbildungen sind die Umlagerungen nach der Belastung mit Wellen im GWK zu sehen.



Sandcontainer vor dem Test,
Quer zum Wellenangriff angeordnet

Verschiebungen der Sandcontainer nach dem Test
mit $H1/3 = 1,0\text{m}$, $Tp = 5,0\text{s}$

Detail der Containergruppen

Abb. 2 Anordnung der Geotextilen Sandcontainer im GWK

Für die Tests mit Schüttsteinen wurden 18 verschiedene Einzelsteine mit Gewichten von 1,0 bis 18,9 kg auf einer Sandmatte ausgelegt. Die Steine wurden in 4 Reihen in Abständen von

jeweils 2,0 m angeordnet (Abb. 3 links). Die Abstände der jeweils benachbarten Steine betragen mindestens 0,6 m, sodaß eine gegenseitige Beeinflussung vernachlässigt werden konnte. Für die Tests mit Steingruppen wurden vier unterschiedliche Gewichte verwendet: 0,5 / 1,0 / 2,0 und 3,0 kg (Abb. 3 rechts). Die Einzelsteine und die Steingruppen nach einem Test sind in Abb. 3 dargestellt.



Abb. 3 Anordnung der Schüttsteine im GWK (links die 18 Einzelsteine, rechts die 4 Steingruppen, jeweils nach einem Versuch mit einzelnen Steinverlagerungen)

Die Wassertiefe im Bereich der Testsektion oberhalb des Sandbettes betrug für alle Tests mit Sandcontainern und Schüttsteinen konstant 2,50 m. Generiert wurde unregelmäßiger Seegang (Jonswap-Spektrum) von jeweils 120 Wellen mit Wellenhöhen zwischen $H_{1/3} = 0,6$ m und 1,13 m und einer Peak-Periode von $T_p = 5$ s. Im Anschluss an jeden Test wurde das Wasser abgelassen und die Verlagerungen vermessen. Für den nächsten Test wurde jeweils der Ausgangszustand wieder hergestellt.

2.2. Ergebnisse

2.2.1 Geotextile Sandcontainer

Abb. 4 zeigt exemplarisch die nach einer Wellenbelastung mit $H_{1/3} = 1,13$ m aufgemessenen Verschiebungen einzelner Sandcontainer, die längs zur Wellenfortschrittsrichtung angeordnet waren. Dargestellt sind die Verschiebungen in horizontaler Richtung als Draufsicht, wobei die Y-Achse in Längsrichtung des GWK, positiv in Wellenfortschrittsrichtung, definiert ist. Die X-Achse ist quer zur Wellenfortschrittsrichtung über die gesamte Breite des GWK von 5 m definiert mit Ausgangspunkt (Null) an der linken Wand des Wellenkanals. Die offenen Quadrate kennzeichnen die Anfangsposition der Sandcontainer zum Beginn des Tests und die schattierten Quadrate die ermittelte Endposition am Ende eines Tests. Vor jedem Test wurden alle verschobenen Sandcontainer wieder an ihre Ausgangsposition gelegt. Die dargestellten Verschiebungen zeigen deutlich den Einfluss des Füllungsgrades auf die Lagestabilität der Sandcontai-

ner. Es lässt sich ein ausgeprägter Trend erkennen, wonach Sandcontainer mit zunehmendem Füllungsgrad auch deutlich lagestabiler sind. So ist beispielsweise ein 3,05 kg schwerer Container mit einem Füllungsgrad von 100% stabil, während sich ein 7,32 kg Container mit 56% Füllungsgrad verschoben hat

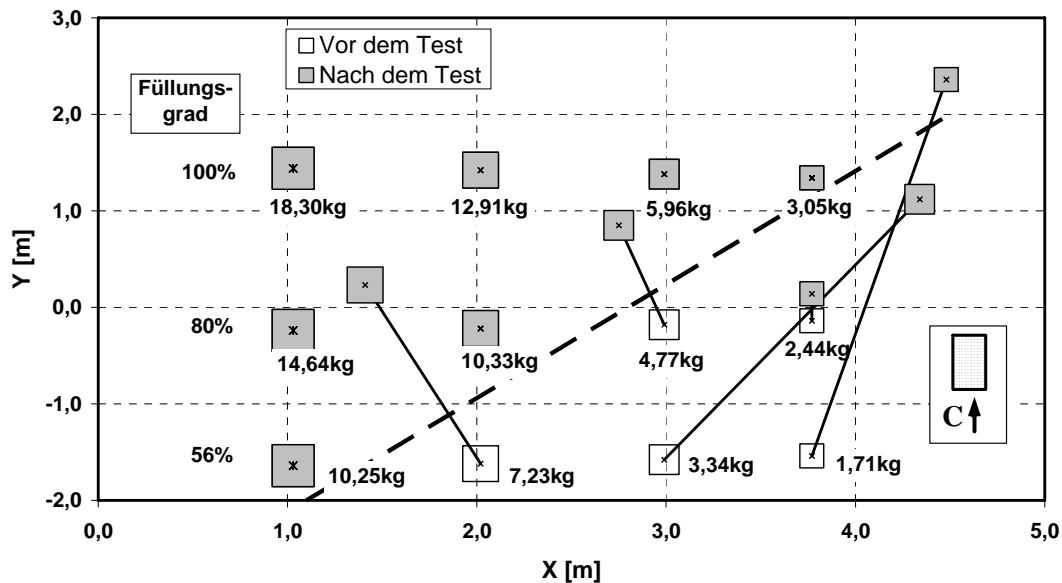


Abb. 4 Verschiebungen nach einem Versuch mit einzelnen Sandcontainern

Die in Abb. 4 gezeigten Verlagerungen einzeln liegender und in Wellenfortschrittsrichtung ausgerichteter Sandcontainer werden in Abb. 5 in Abhängigkeit der Wellenhöhe, getrennt für jeden der drei untersuchten Füllungsgrade, aufgetragen. Angegeben ist die Verlagerung in Y-Richtung über $H_{1/3}$. Die Daten bestätigen, dass der Füllungsgrad einen wichtigen Einfluss auf die Stabilität der Sandcontainer hat.

Eine mögliche Erklärung für die geringere Stabilität nicht vollständig gefüllter Sandcontainer ist, dass sich die durch Wellenbewegung hervorgerufenen Strömungen auch innerhalb der nur locker gefüllten Geotextilen Sandcontainer auswirken und der Sand dort umgelagert wird. Dadurch verändert sich die äußere Form des Containers und damit der Formwiderstand. Nach einer Anfangsbewegung vergrößert sich die Fläche für den Strömungsangriff infolge der schlaffen Füllung. Damit nimmt die Angriffskraft bedingt durch die relativ vergrößerte Strömungsangriffsfläche im Verhältnis zum konstanten Gewicht zu und konsequenterweise die Stabilität ab, bis es zu einer Verlagerung des Sandcontainers kommt.

Einige Ergebnisse im Sinne von stabiler oder instabiler Lage sind exemplarisch in Abb. 6 in Form einer Matrix aufgetragen. Für Containergruppen, die längs zur Wellenfortschrittsrichtung ausgerichtet waren, wird für unterschiedliche Füllungsgrade und Containergewichte G eine Ausgleichsgerade angegeben, bis zu welcher Wellenhöhe $H_{1/3}$ keine Verschiebungen stattgefunden haben. Die Ausgleichsgeraden stellen eine erste Näherung der Grenzlinie zwischen

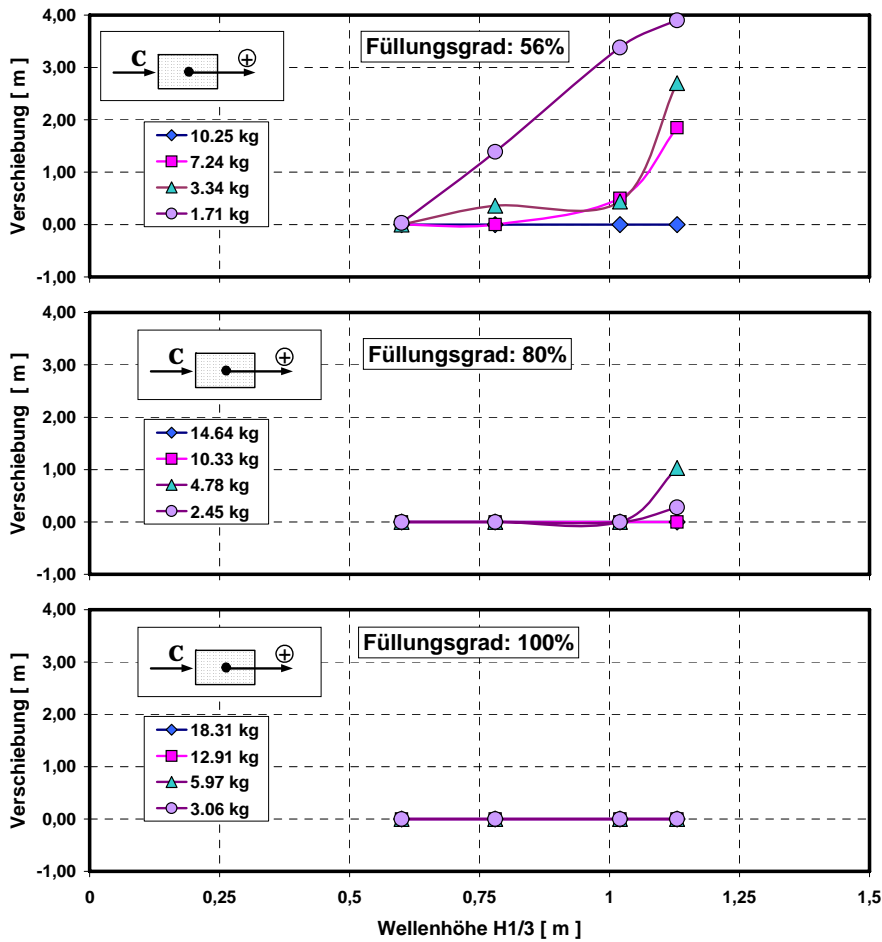


Abb.5 Gemessene Verschiebungen in Abhängigkeit von der Wellenhöhe

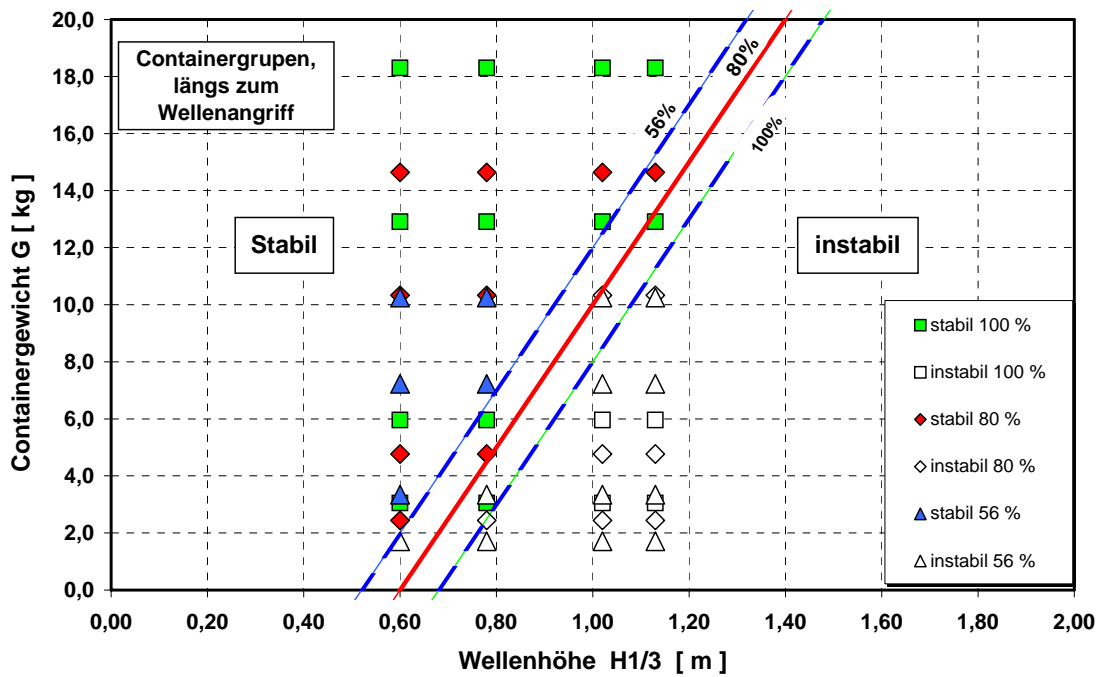


Abb. 6 Stabilitätsbedingungen ermittelt aus Versuchen mit Containergruppen, ausgerichtet längs zur Wellenanlaufichtung

stabiler und instabiler Lage der Container dar. Die durchgezogene Linie steht für einen Füllungsgrad von 80%, die gestrichelten Linien für einen Füllungsgrad von 56% bzw. 100%. Diese aus den Versuchsergebnissen hergeleiteten Grenzlinien lassen sich mit einem ersten dimensionsbehafteten empirischen groben Näherungsansatz beschreiben:

$$G \text{ [kg]} > A \text{ [-]} + 25 H_{1/3} \text{ [m]}$$

Der Koeffizient A hängt ab vom Füllungsgrad und der Wellenangriffsrichtung. Dabei ist zu beachten, dass diese erste Annäherung nur für eine Wellenperiode von $T_p = 5 \text{ s}$ gültig ist, die bei den durchgeführten Grundagentests nicht variiert wurde. Im Verlauf weiterer Forschungsarbeiten ist vorgesehen, einen dimensionslosen Ansatz auf der Basis der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten an der Sohle zu entwickeln.

Der aus allen durchgeführten Versuchen ermittelte empirische Koeffizient A ist in Abb. 7 in Abhängigkeit vom Füllungsgrad aufgetragen. Dabei zeigt sich für einzeln liegende Sandcontainer eine größere Abhängigkeit von der Wellenangriffsrichtung und vom Füllungsgrad als dies für Containergruppen der Fall ist. Andererseits ist das Kriterium stabil/instabil nicht unmittelbar vergleichbar, da bereits ein einziger verschobener Sandcontainer für die ganze Containergruppe das Attribut instabil zur Folge hat.

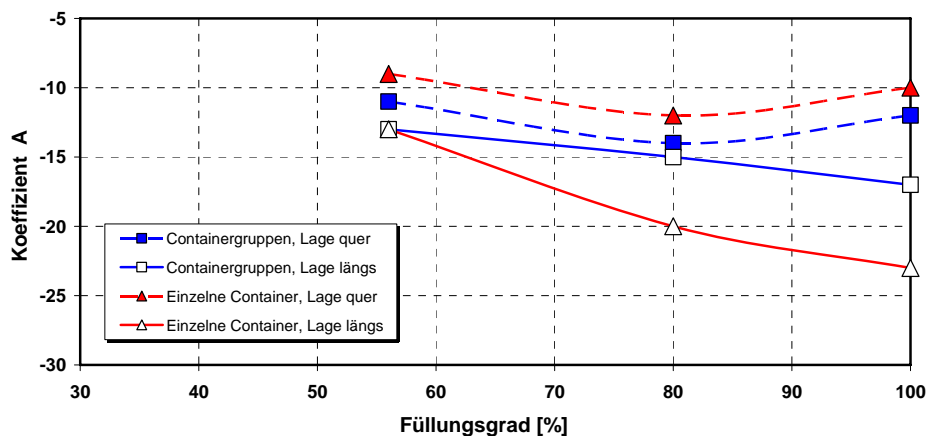


Abb. 7 Koeffizient A in Abhängigkeit des Füllungsgrades

2.2.2 Schüttsteine

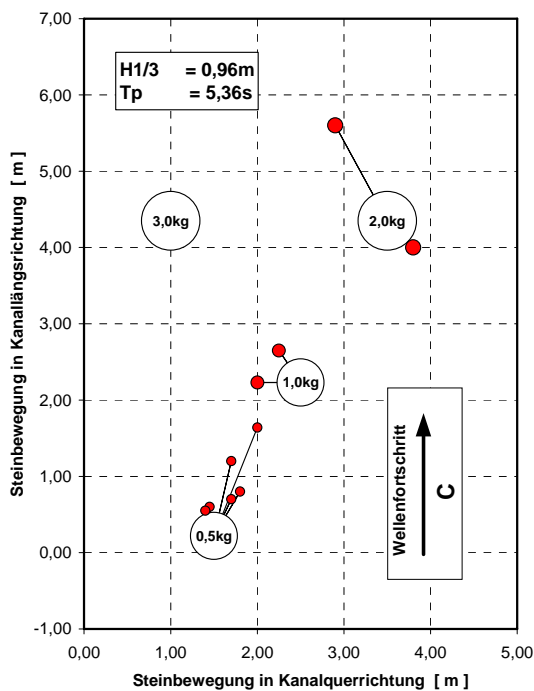
In Abb. 8 sind exemplarisch die nach einer Wellenbelastung mit $H_{1/3} = 0,96 \text{ m}$ aufgemessenen Verschiebungen einzelner Steine aus den Steingruppen in gleicher Weise wie die Sandcontainer in Abb. 4 dargestellt. Die offenen Kreise kennzeichnen die Anfangsposition der Steingruppen zum Beginn des Tests und die dunklen Kreise die aufgemessenen Endpositionen einzelner Steine aus den Steingruppen am Ende eines Tests. Vor jedem Test wurden alle verschobenen Steine wieder an ihre Ausgangsposition gelegt.

In gleicher Form wie für die Sandcontainer wurden die Ergebnisse der Tests mit den Steingruppen im Sinne von stabiler oder instabiler Lage in Abb. 9 in Form einer Matrix aufgetra-

gen. Die gestrichelt dargestellte Ausgleichsgerade stellt eine grobe Näherung der Grenzlinie zwischen stabiler und instabiler Lage der Container dar und läßt sich mit dem folgenden dimensionsbehafteten empirischen groben Näherungsansatz beschreiben:

$$G \text{ [kg]} > A \text{ [-]} + 10 H^{1/3} \text{ [m]} \quad \text{mit } A = -6$$

Wie bei dem Näherungsansatz für die Sandcontainer ist zu beachten, daß dieser nur für eine Wellenperiode von $T_p = 5 \text{ s}$ gültig ist.



Weiterhin ist zu beachten, daß die Versuchsergebnisse der Tests mit den Schüttsteinen im Vergleich mit denjenigen für die Sandcontainer stärker streuen und die Trends nicht so ausgeprägt sind, womit die Aussagegüte eingeschränkt ist. Dies gilt in noch stärkerem Maße für die Einzelsteine, hier hat neben dem Gewicht auch die Form einen wesentlichen Einfluß auf die Stabilität. Bei den Steinen erfolgt dieser Einfluß direkt über die äußere Form, bei den Sandcontainern indirekt über den Füllungsgrad.

Abb. 8 Verschiebungen nach einem Versuch mit Steingruppen

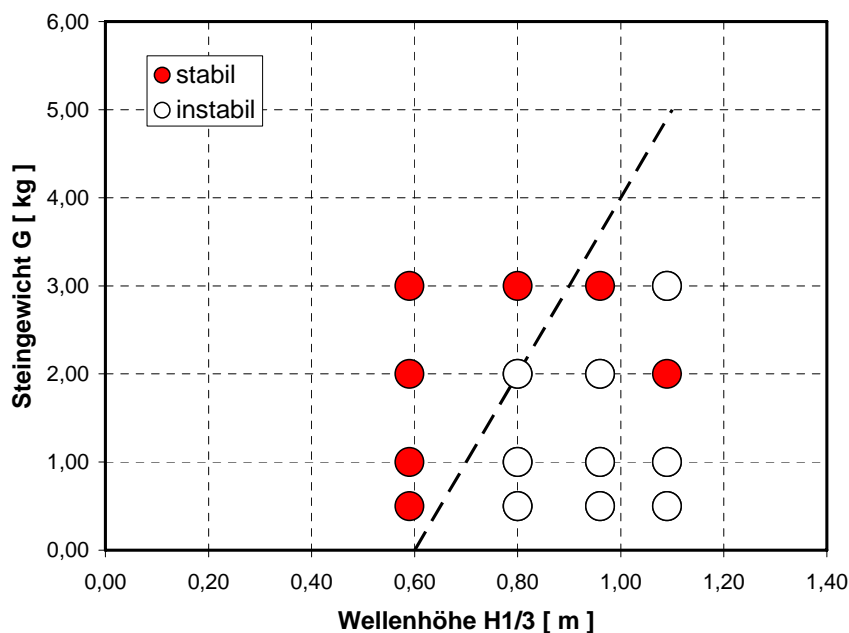


Abb. 9 Stabilitätsbedingungen ermittelt aus Versuchen mit Steingruppen

3. Untersuchungen mit Kolkenschutzsystemen an einem Monopile

3.1 Kolkenschutzsystem mit Geotextilen Sandcontainern

3.1.1 Versuchsprogramm

Der starke Einfluss des Füllungsgrades auf die Lagestabilität der Sandcontainer wird im Wesentlichen durch das Dehnungsverhalten des geotextilen Containermaterials bestimmt. Deshalb war es für die Untersuchungen im GWK notwendig, für die Modell-Sandcontainer ein Vlies zu finden, das skaliert ähnliche Dehnungseigenschaften aufweist wie das der später in der Natur tatsächlich eingesetzten Sandcontainer. Durch Füllversuche mit einem Prototyp und mit Modellcontainern aus verschiedenen Vliesmaterialien wurde das Dehnverhalten ermittelt. Nach den Ergebnissen wurde das Material ausgewählt, das am besten mit dem Dehnungsverhalten des Prototyps übereinstimmt.

Für die Stabilitätsuntersuchungen wurden insgesamt 4 Testreihen mit einem vollständigen Kolkenschutz aus Geotextilen Sandcontainern an einem Monopile untersucht. Der Kolkenschutz mit einem Durchmesser von 24 m ist vorgesehen für eine Monopile-Struktur mit einem Durchmesser von 5,5 m in einer Wassertiefe von 21 m. Die Höhe der Bemessungswelle für den Kolkenschutz beträgt $H_{1/3} = 7,5$ m. Für die Untersuchungen im GWK wurden diese Randbedingungen im Maßstab 1:10 skaliert.

Die Parameter der verschiedenen Versuchsvarianten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Geotextilen Sandcontainer wurden im ersten Test regelmäßig angeordnet und ohne Wasser im Trockenen eingebaut. Bei den anderen drei Versuchen wurden die Sandcontainer unregelmäßig verlegt: Im Trockenen und im Nassen mit Wassertiefen von 0,50 m und von 2,10 m. Abb. 10 zeigt den unbelasteten Kolkenschutz im GWK unmittelbar nach dem Einbau, im linken Bild mit regelmäßig ausgelegten Sandcontainern, im rechten Bild mit einer unregelmäßigen Anordnung.

Tabelle 2 Versuchsserien im GWK mit einem Kolkenschutz an einem Monopile

Versuchs- serie	Lagen	Anzahl der Sandcontainer		Verlegungsbedingungen		
		untere Lage	obere Lage	Gesamt		Wassertiefe [m]
I	2	87	66	153	regelmäßig	0 (trocken)
II	2	97	92	189	unregelmäßig	0 (trocken)
III	2	95	94	189	unregelmäßig	0,5
IV	2	100	96	196	unregelmäßig	2,1



Abb. 10 1:10 Modell von Kolkschutzvarianten mit Geotextilen Sandcontainern im GWK
(links regelmäßige Verlegung, rechts unregelmäßige Verlegung)

3.1.2 Erste Ergebnisse

Nachfolgend werden exemplarisch einige Ergebnisse aus der Versuchsserie II mit unregelmäßig eingebauten Sandcontainern beschrieben. In Abb. 11 sind einige während der Versuche gemessene statistische Parameter für die Wellenhöhen und die Strömungsgeschwindigkeiten an der Sohle in Abhängigkeit der kumulativen Anzahl der Belastungswellen in der Versuchsserie aufgetragen. Oben im Diagramm ist die Anzahl der Sandcontainer angegeben, die sich jeweils insgesamt nacheinander außerhalb des Kolkschutzbereichs verlagert haben. Nach

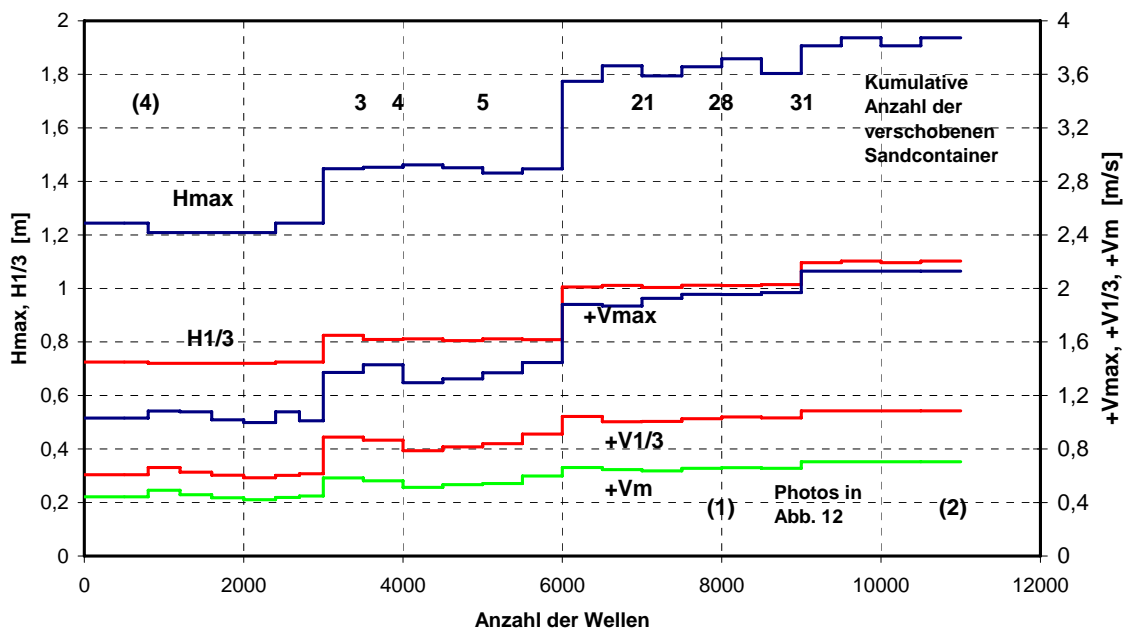


Abb. 11 Parameter der Wellenhöhen und der Sohlgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der kumulativen Anzahl der Wellen während der Versuchsserie II

den ersten Tests mit Wellenhöhen, die der Bemessungswellenhöhe entsprechen, haben sich 4 Sandcontainer innerhalb des Kolksschutzes umgelagert. Dies kann als selbstkorrigierende Umlagerung und damit als Stabilitätserhöhung nach dem Einbau interpretiert werden und stellt daher keine Beeinträchtigung der Stabilität des Kolksschutzes dar

Für die weiteren Tests wurden die signifikante Wellenhöhe und die Peakperiode schrittweise erhöht. Umlagerungen von mehr als 5% der Gesamtzahl der eingebauten Sandcontainer traten erst ab einer signifikanten Wellenhöhe von 1,00 m auf. Abb. 12 zeigt zwei Aufnahmen mit den jeweiligen Umlagerungen der Sandcontainer nach Belastung mit unterschiedlich hohen Wellenspektren mit jeweils 2000 Wellen.

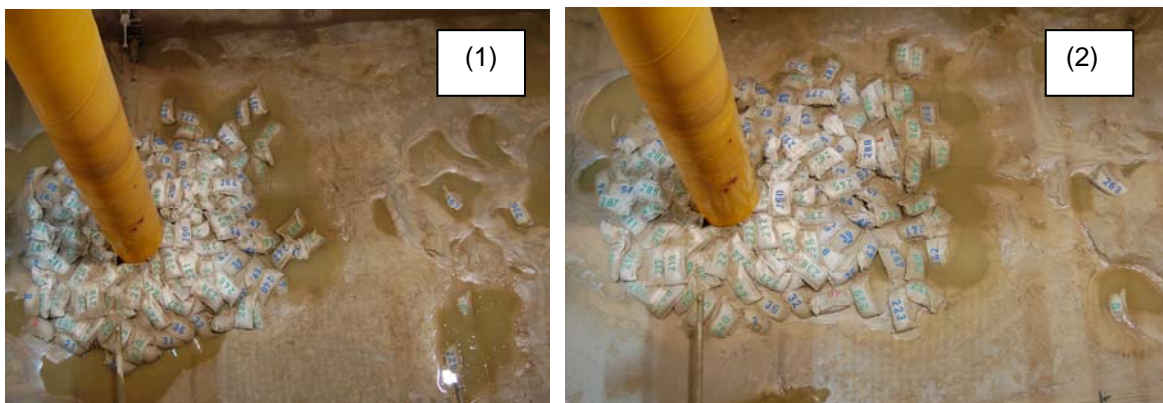


Abb. 12 Photos des Kolksschutzes nach Tests mit verschiedenen Wellenspektren, jeweils nach 2000 Wellen während der Versuchsserie II

3.2 Kolksschutzsystem mit Schüttsteinen

3.2.1 Versuchsprogramm

Für die Stabilitätsuntersuchungen eines Kolksschutzes mit Schüttsteinen an einem Monopile wurde eine Testreihe untersucht. Der Kolksschutz mit einem Durchmesser von 23,5 m der Deckschicht und von 33,5 m der unteren Filterschicht wurde für die Untersuchungen im GWK mit den gleichen Randbedingungen wie für die Sandcontainer im Maßstab 1:10 skaliert.

Nach den Ergebnissen aus den Grundlagenversuchen wurde für die Deckschicht eine Steinmischung mit unterschiedlichen Gewichtsanteilen aus 5 verschiedenen Gewichtsklassen hergestellt (0,4 – 0,6 kg: 10%; 0,6 – 0,8 kg: 20%; 0,8 – 1,0 kg: 20%; 1,0 – 1,2 kg: 20%; 1,2 – 1,4 kg: 30%). Der eingebaute Kolksschutz mit insgesamt 2.577 Steinen vor Beginn der Versuche ist in Abb. 13 dargestellt. Es wurden 4 Sektoren von jeweils 90 Grad mit verschiedenen Farben gekennzeichnet, damit Steinverschiebungen infolge der Wellenwirkung nach den Tests aufgemessen werden konnten.



Abb. 13 Foto des eingebauten Kolk schutzes mit Schüttsteinen im GWK

3.2.2 Erste Ergebnisse

Abb. 14 zeigt einige während der Versuche gemessene statistische Parameter für die Wellenhöhen und die Strömungsgeschwindigkeiten an der Sohle in Abhängigkeit von der kumulativen Anzahl der Belastungswellen in der Versuchsserie. Oben im Diagramm ist die kumulative Anzahl der außerhalb des Kolk schutzbereichs verschobenen Steine der Deckschicht angegeben. Während der Versuchsreihe wurden die signifikante Wellenhöhe und die Peakperiode schrittweise erhöht und nach den Versuchen die jeweils verlagerten Steine aufgemessen.

Bis zu einer Wellenhöhe von $H_{1/3} = 0,86$ m ($T_p = 5,08$ s) wurden insgesamt nur 6 Steine nach außerhalb des Kolk schutzsystems verlagert, dies entspricht 0,3 % der eingebauten Steine

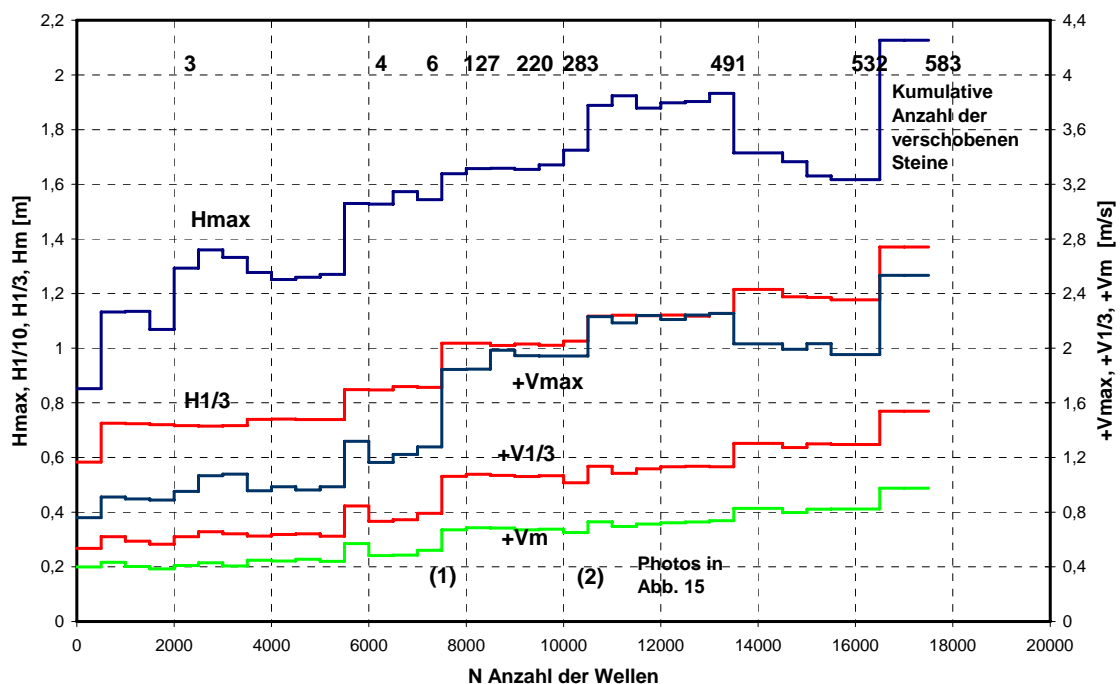


Abb. 14 Parameter der Wellenhöhen und der Sohlgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der kumulativen Anzahl der Wellen während der Versuchsserie

der Deckschicht. Mit einer Wellenhöhe von $H_{1/3} = 1,02$ m ($T_p = 6,75$ s) nimmt die Anzahl der verschobenen Steine deutlich zu, nach insgesamt 3000 Wellen mit diesen Parametern beträgt die Anzahl 277 Steine, dies entspricht 9,3 % der eingebauten Steine und ist daher als instabiler Zustand zu bezeichnen. Abb. 15 zeigt exemplarisch zwei Aufnahmen nach den Tests mit diesen Parametern. Das linke Photo in Abb. 15 zeigt den Zustand nach insgesamt 7500 Wellen (Verlagerung von insgesamt 6 Steinen, 0,3%), das rechte den Zustand nach weiteren 3000 Wellen (Verlagerung von weiteren 277 Steinen, 9,3%).

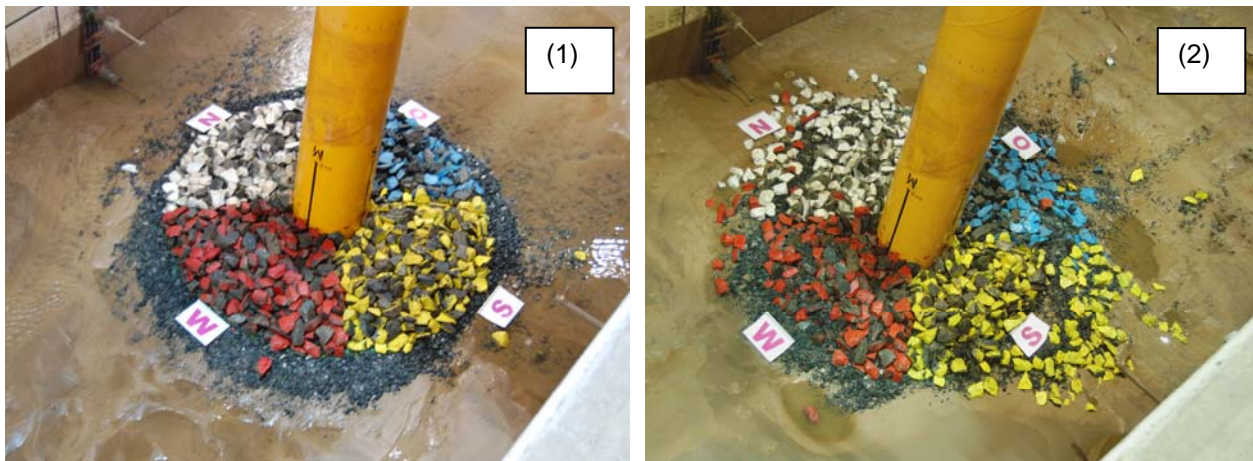


Abb. 15 Photos des Kolkschutzes nach Tests mit verschiedenen Wellenspektren
(links: nach insgesamt 7500 Wellen, rechts nach weiteren 3000 Wellen)

4. Zusammenfassung

Im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK) wurden Untersuchungen zur Stabilität von Kolkschutzsystemen mit Geotextilen Sandcontainern und mit Schüttsteinen für Monopile-Tragstrukturen durchgeführt.

Dazu wurden großmaßstäbliche Grundlagenuntersuchungen mit einzelnen Sandcontainern bzw. Steinen und mit Sandcontainergruppen bzw. Steingruppen durchgeführt. Es wurden empirische Näherungslösungen in Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe und für die Sandcontainer auch vom Füllungsgrad angegeben.

Im Anschluss an die Grundlagenuntersuchungen wurden Tests mit einem vollständig aufgebauten Kolkschutz an einem Monopile durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten weitgehend die aus den Grundlagenuntersuchungen im GWK abgeleiteten empirischen Näherungslösungen, die für die Bemessungen der untersuchten Kolkschutzsysteme mit Sandcontainern und mit Schüttsteinen verwendet wurden.

Für die Kolkschutzvarianten mit Geotextilen Sandcontainern wurden keine signifikanten Stabilitätsunterschiede zwischen einer regelmäßigen und einer unregelmäßigen Anordnung der Sandcontainer festgestellt. Jedoch zeigte sich, dass nach Auftreten eines Anfangsschadens dieser bei einer regelmäßigen Anordnung der Sandcontainer schneller fortschreitet als bei einer

unregelmäßigen Anordnung. Bei unregelmäßig eingebauten Sandcontainern wurden zu Beginn der Testserien selbstkorrigierende Umlagerungen einzelner Container innerhalb des Kolkschutzes beobachtet.

5. Danksagung

Das FZK bedankt sich beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und der Offshore-Bürger-Windpark-Butendiek GmbH & Co. KG für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes (Nr. 0329973). Das Material für die Geotextilen Sandcontainer wurde uns freundlicherweise von der Fima NAUE Fasertechnik GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellt.

6. Schrifttum

Grüne, J., Sparboom, U., Schmidt-Koppenhagen, R., Oumeraci, H., Mitzlaff, H. A., Peters, K.: Untersuchungen zum Kolkschutz für Offshore-Monopile-Gründungen. Tagungsband 5. FZK-Kolloquium „Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke“, Forschungszentrum Küste, Hannover, 2005

Grüne, J., Sparboom, U., Schmidt-Koppenhagen, R., Wang, Z., Oumeraci, H.: Scour Protection for Offshore Wind Energy Monopile Structures, Proc. of the 1st International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Porto, Portugal, 2006.

Grüne, J., Sparboom, U., Schmidt-Koppenhagen, R., Oumeraci, H., Mitzlaff, H. A., Uecker, J., Peters, K.: Innovative Scour Protection with Geotextile Sand Containers for Offshore Monopile Foundations of Wind Energy Turbines, Proc. of the 3rd International Conference on Scour and Erosion, Amsterdam, Niederlande, 2006.

Grüne, J., Sparboom, U., Oumeraci, H., Schmidt-Koppenhagen, R., Wang, Z.: Untersuchungen zur Stabilität von Geotextilen Sandcontainern unter Seegang und die Anwendung für den Kolkschutz von Tragkonstruktionen für Offshore-Windenergieanlagen. Tagungsband 6. FZK-Kolloquium „Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke“, Forschungszentrum Küste, Hannover, 2007

Izbash, S.V., Khaldre, K.Y.: Hydraulics of River Channel Closure. Butterworth, London, 1970 (translated from the Russian by CAIRNS, G.L.)

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

Sparboom, U., Grüne, J., Oumeraci, H., Schmidt-Koppenhagen, R., Wang, Z.: Untersuchungen zur Stabilität von Schüttsteinen unter Seegang und die Anwendung für den Kolkschutz von Tragkonstruktionen für Offshore-Windenergieanlagen. Tagungsband 6. FZK-Kolloquium „Seegang, Küstenschutz und Offshorebauwerke“, Forschungszentrum Küste, Hannover, 2007