

**UNTERSUCHUNGEN ZUR STABILITÄT VON GEOTEXILEN  
SANDCONTAINERN UNTER SEEGANG UND DIE ANWENDUNG FÜR DEN  
KOLKSCHUTZ VON TRAGKONSTRUKTIONEN FÜR OFFSHORE-  
WINDENERGIEANLAGEN**

von

Joachim Grüne<sup>1</sup>  
Uwe Sparboom<sup>2</sup>  
Hocine Oumeraci<sup>3</sup>  
Reinold Schmidt-Kopenhagen<sup>4</sup>  
Zeya Wang<sup>5</sup>

**ABSTRACT**

Monopile structures for offshore wind turbines founded in movable sand bed are affected by scour mainly due to waves. An innovative scour protection was proposed by using geotextile sand containers. A research programme on the stability of such alternative scour protection has been started recently. Large-scale model tests are being performed in the Large Wave Channel (GWK) of the Coastal Research Centre (FZK). Basic test series were performed with single geotextile sand containers and container groups with different container weights, varied in sizes and percentages of filling. First results are reported, which demonstrate the influences of the percentage of filling and the wave approach direction. Further, a first approximation on the design of sand containers is proposed as an empirical approach depending on wave height, percentage of filling and wave approach.

**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 in Folge des zunehmenden globalen Energieverbrauchs eine Rolle.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Betriebsleiter, Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstrasse 11, Hannover, Germany

<sup>2</sup> Dr.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK)

<sup>3</sup> Prof. Dr.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK)

<sup>4</sup> Dipl.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK)

<sup>5</sup> M.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK)

Die vergangenen Jahre waren geprägt von einem starken Ausbau der Windenergie. In einigen Ländern stehen bereits kaum noch Standorte mit ausreichender Windaktivität 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 Windenergieanlagen im Offshore-Bereich. 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.

Eine innovative Lösung für den Kolkenschutz ist die Verwendung Geotextiler Sandcontainer. Abb. 1 zeigt im Querschnitt den großmaßstäblichen Modell-Aufbau eines solchen Kolkenschutzes aus Geotextilen Sandcontainern im GWK. Im Vergleich zu einem herkömmlichen Kolkenschutz aus Wasserbausteinen 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 Kolkenschutzes mit Geotextilen Sandcontainern (vgl. u.a. Pilarczyk, 2000).

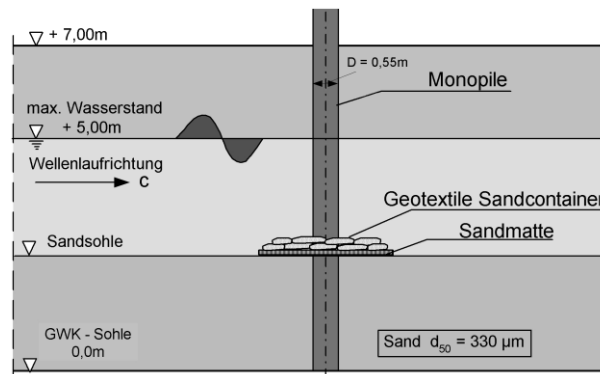


Abb. 1 Schema einer Kolkicherung mit Geotextilen Sandcontainern und Modell-Aufbau für großmaßstäbliche Untersuchungen im GWK

Zur Erforschung der Stabilität solcher alternativen Kolkenschutzlösungen wurde im FZK ein gemeinsam vom Bundesumweltministerium BMU und dem Betreiber des geplanten Windparks Butendiek finanziertes Forschungsprogramm initiiert. 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 ein Modellaufbau dieser Größenordnung.

Im ersten Teil der Untersuchungen wurden umfangreiche Vorversuche zur Stabilität einzelner Geotextiler Sandcontainer und von Containergruppen mit mehreren Containern

durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Experimente bildeten die Grundlage der Dimensionierung des Kolksschutzes aus Geotextilen Sandcontainern an einem Monopile für die Hauptuntersuchungen im GWK.

## 2. TESTPROGRAMM

Da bisher noch keine brauchbaren Bemessungsansätze für Geotextile Sandcontainer existierten, wurden Pilotuntersuchungen mit vier verschiedenen Containergrößen durchgeführt, um einen ersten Anhaltspunkt für eine Dimensionierung zu bekommen. Alle Sandcontainer wurden für die Tests auf einer horizontalen Sandsohle angeordnet, die mit einem Geotextilen Filter (Sandmatte) abgedeckt war. Sandmatten sind mehrlagige Geotextile Vliese, in die bereits während der Herstellung Sand eingearbeitet wird mit dem Ziel, das Gewicht und damit die Lagestabilität zu erhöhen. Sandmatten kommen z.B. beim Bau eines Kolksschutzes, auch für konventionelle Bauweisen, als untere Filterschicht zum Einsatz.

Abb. 2 zeigt einen Längsschnitt des Versuchseinbaus im GWK mit dem eingebrachten Sandbett und der Position des Monopiles. Bei den Vorversuchen wurden die Sandcontainer auf der horizontalen Sandsohle im Bereich des Monopiles, der erst später eingebaut wurde, platziert. Neben unterschiedlichen Gewichten der Sandcontainer wurden auch einige Tests 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.

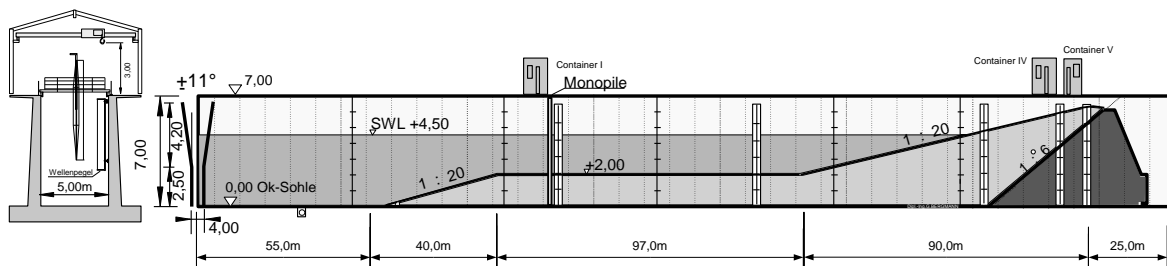


Abb. 2 Längsschnitt des GWK mit dem eingebauten Sandprofil und dem Monopile

Dieser ausgeprägte Einfluss des Füllungsgrades hat dazu geführt, dass vor den eigentlichen Kolksschutz-Untersuchungen umfangreiche Grundagentests mit unterschiedlichen Containergrößen und -gewichten und verschiedenen Füllungsgraden durchgeführt werden mussten. 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.

Die verschiedenen Containergrößen wurden wieder im horizontalen Bereich der Sandsohle auf der Sandmatte platziert. Dabei wurden sowohl 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

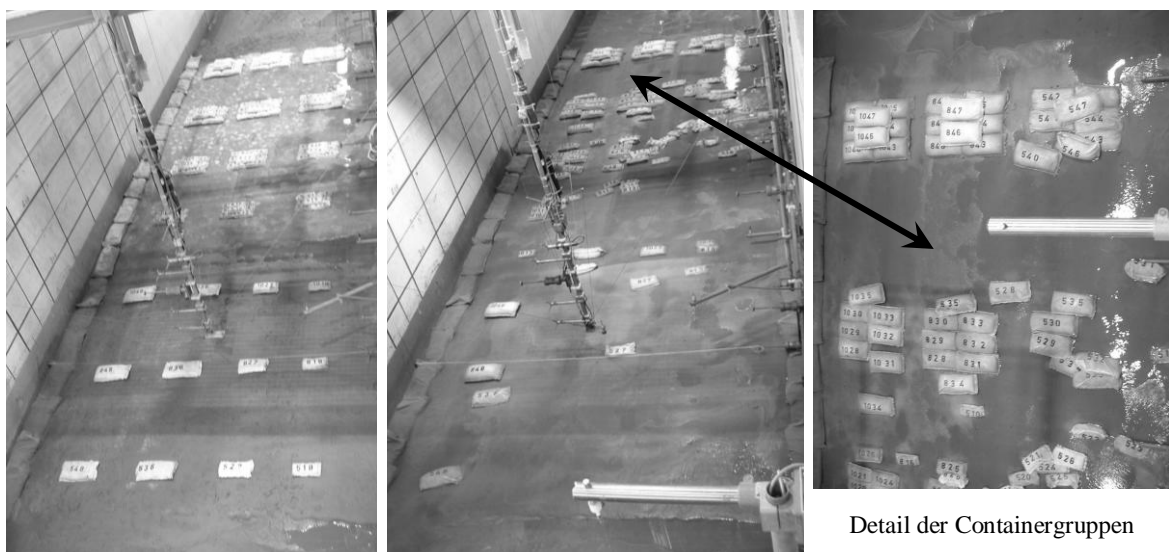
gelegt wurden (vgl. Abb. 7 und 8). Die Containergruppen sollten den Einfluss eines möglichen Verzahnungseffektes der Sandcontainer untereinander deutlich machen.

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 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. 3 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.

Die Wassertiefe im Bereich der Testsektion oberhalb des Sandbettes betrug für alle Tests 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 Verschiebungen jedes Sandcontainers vermessen. Für den nächsten Test wurde jeweils der Ausgangszustand wieder hergestellt.



Sandcontainer vor dem Test, Quer zum Wellenangriff angeordnet

Verschiebungen der Sandcontainer nach dem Test mit  $H_{1/3} = 1,0$ m,  $T_p = 5,0$ s

Abb. 3 Anordnung der Geotextilen Sandcontainer auf dem mit einer Sandmatte abgedeckten horizontalen Sandbett

### 3. ERGEBNISSE

Die Abb. 5 bis 8 zeigen exemplarisch die nach einer Wellenbelastung mit  $H_{1/3} = 1,13$  m aufgemessenen Verschiebungen der Sandcontainer. 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 (vgl. Abb. 4).

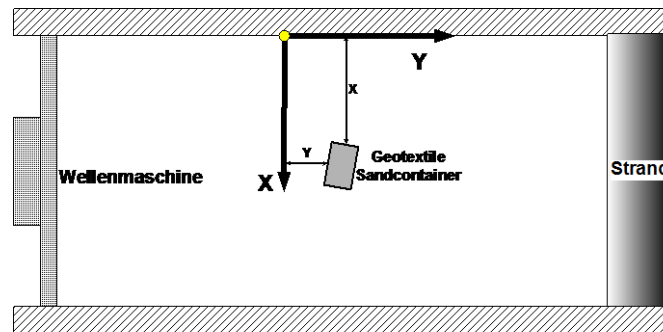


Abb.4 Definition der gemessenen Verschiebungen

In Abb. 5 bis 8 kennzeichnen die offenen Quadrate die Anfangsposition der Sandcontainer zum Beginn des Tests und die schattierten Quadrate die ermittelte Endposition am Ende eines Tests entsprechend der Definition in Abb. 4. Vor jedem Test wurden alle verschobenen Sandcontainer wieder an ihre Ausgangsposition gelegt. In Abb. 5 und 6 sind die Verschiebungen einzeln liegender Sandcontainer angegeben, Abb. 5 zeigt die Ergebnisse für die längs (inline) und Abb. 6 für die quer (transverse) zur Wellenfortschrittsrichtung eingebauten Sandcontainer. Entsprechend dazu enthalten Abb. 7 und Abb. 8 die Ergebnisse für die Sandcontainer-Gruppen.

Die in Abb. 5 dargestellten Verschiebungen zeigen deutlich den Einfluss des Füllungsgrades auf die Lagestabilität der Sandcontainer. 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. Die Ergebnisse in Abb. 6 für quer zur Wellenfortschrittsrichtung eingebaute Sandcontainer lassen den gleichen Trend erkennen, jedoch ist dieser nicht so ausgeprägt wie in Abb. 5.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit Sandcontainergruppen werden in Abb. 7 und 8 exemplarisch für eine Sandcontainer-Größe (ungefüllt  $L \times B = 36 \times 18,5$  cm), jeweils für die drei unterschiedlichen Füllungsgrade, dargestellt. In Abb. 7 liegen die Sandcontainer längs zur Wellenangriffsrichtung, in Abb. 8 quer dazu. Wie schon bei den einzeln liegenden Sandcontainern ist auch hier der Einfluss des Füllungsgrades auf die Lagestabilität deutlich zu erkennen.

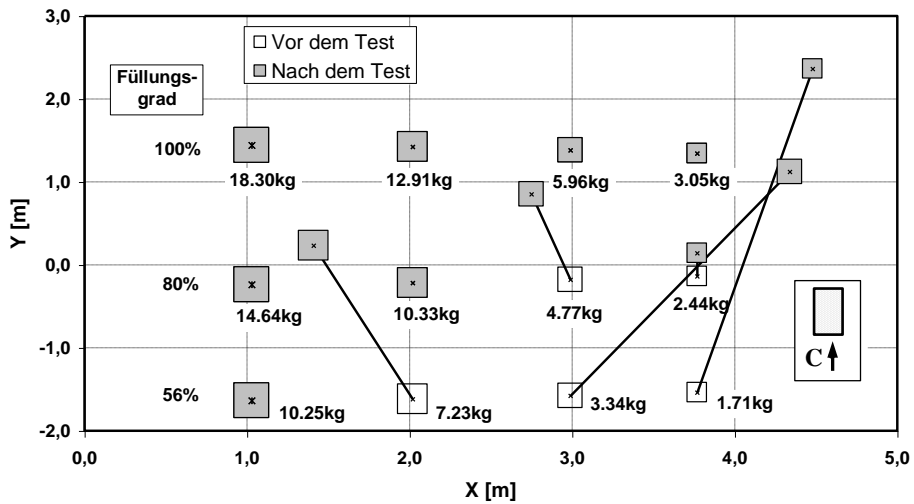


Abb. 5 Verschiebungen nach einem Versuch mit einzelnen Sandcontainern und mit Wellenangriffsrichtung längs zur Wellenforschritts-geschwindigkeit

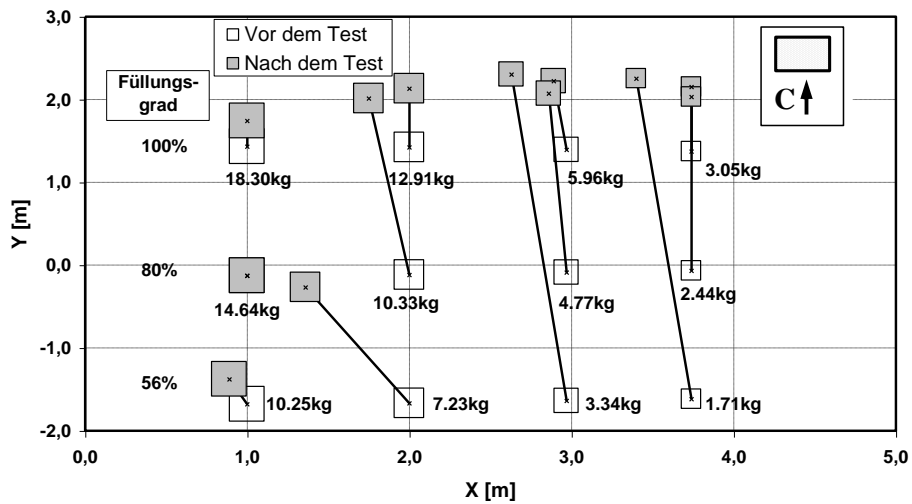


Abb. 6 Verschiebungen nach einem Versuch mit einzelnen Sandcontainern und mit Wellenangriffsrichtung quer zur Wellenforschritts-geschwindigkeit

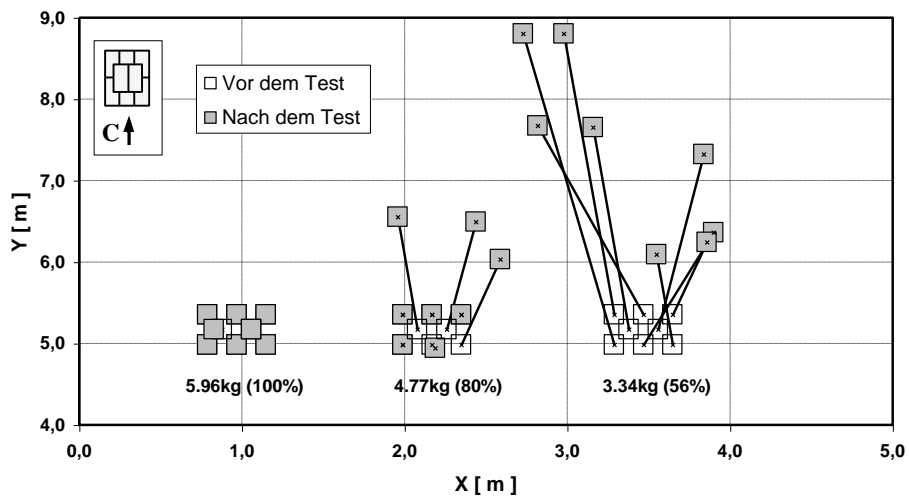


Abb. 7 Verschiebungen nach einem Versuch mit Containergruppen und mit Wellenangriffsrichtung längs zur Wellenforschritts-geschwindigkeit

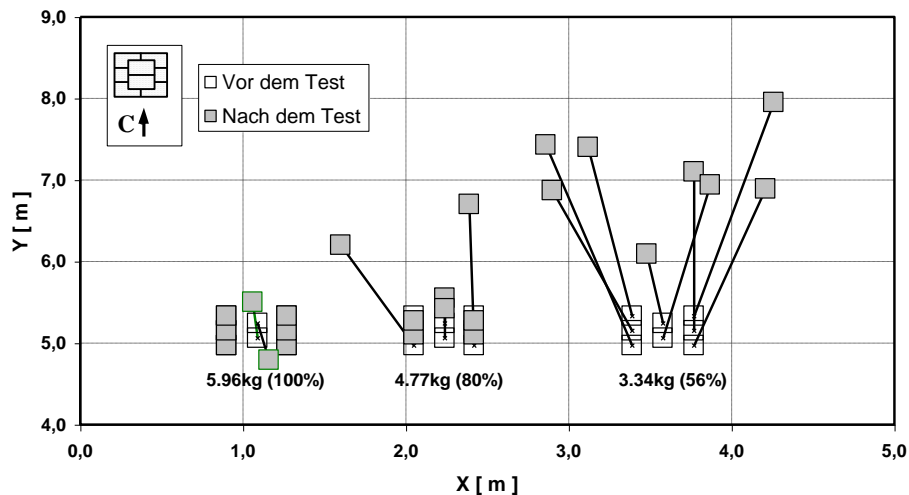


Abb. 8 Verschiebungen nach einem Versuch mit Containergruppen und mit Wellenangriffsrichtung quer zur Wellenforschriftsgeschwindigkeit

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.

Die in Abb. 5 gezeigten Verlagerungen einzeln liegender und in Wellenfortschrittsrichtung ausgerichteter Sandcontainer werden in Abb. 9 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.

Abb. 10 zeigt für jeden Füllungsgrad die Verlagerungen in Y-Richtung für ebenfalls in Wellenfortschrittsrichtung ausgerichtete Sandcontainergruppen in Abhängigkeit von der Wellenhöhe  $H_{1/3}$ . Die durchgezogene Linie gibt die mittlere Entfernung für alle 8 Sandcontainer einer Gruppe an, die unterbrochene Linie die maximale Entfernung eines Containers aus der Gruppe. Dabei zeigt sich die gleiche Tendenz wie bei den einzeln liegenden Sandcontainern. Die starken Unterschiede zwischen mittlerer und maximaler Verschiebung begründen sich daraus, dass sich die unteren Sandcontainer gegenseitig stützen und zusätzlich durch die obere Lage geschützt sind. Die in zweiter Lage eingebauten oberen Sandcontainer sind dagegen wesentlich stärker der Strömung ausgesetzt. Oft sind es nur Sandcontainer aus der oberen zweiten Lage, die sich verschieben (vgl. Abb. 3).

Der Einfluss der Wellenangriffsrichtung auf die Verlagerung der Sandcontainer wird exemplarisch erkennbar bei einem Vergleich der Ergebnisse des oberen Diagramms aus Abb. 11 mit denjenigen des mittleren Diagramms aus Abb. 9. Die Umlagerungen für die

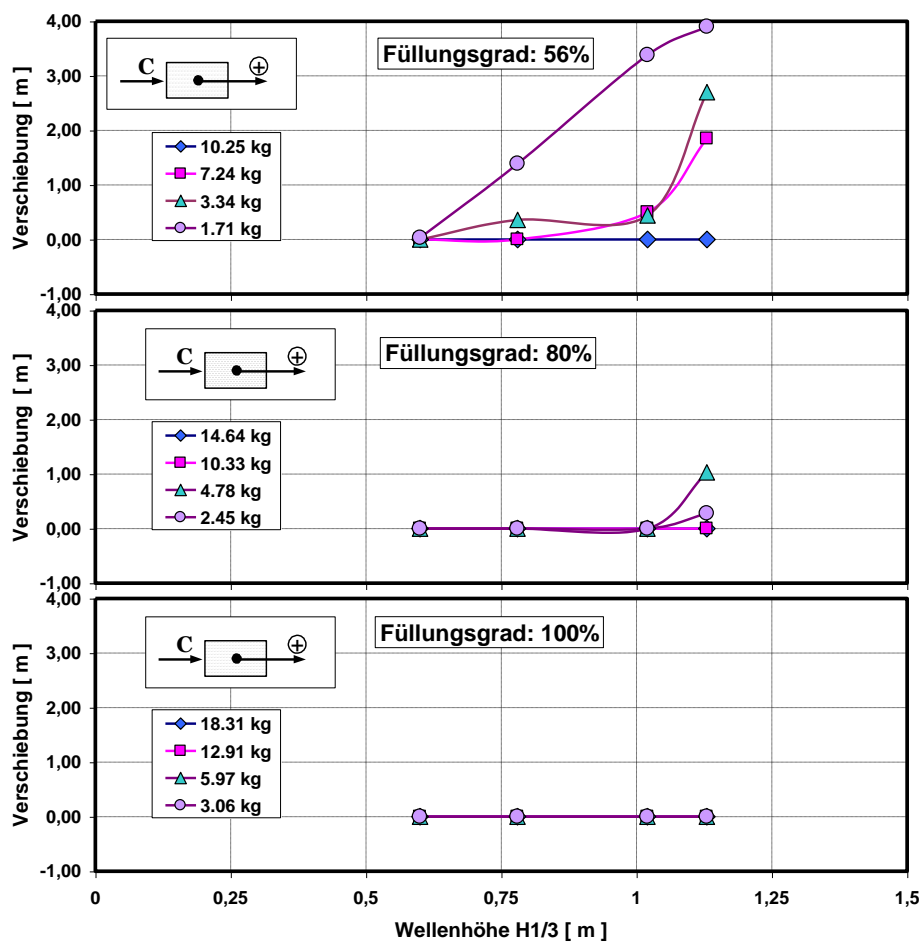


Abb. 9 Gemessene Verschiebungen in Abhängigkeit der Wellenhöhen (einzelne Container längs zur Wellenanlaufichtung)

einzelnen quer zur Wellenfortschrittsrichtung verlegten Sandcontainer beginnen bereits bei kleineren Wellenhöhen  $H_{1/3}$  als bei denjenigen längs zur Wellenfortschrittsrichtung ausgerichteten Sandcontainern. Bei Containergruppen ist dieser Einfluss nicht so deutlich, wie in Abb. 13 gezeigt.

Bei den im GWK erzeugten langkämmigen Wellen (zweidimensionaler Seegang) sind die welleninduzierten Strömungen quer zur Wellenfortschrittsrichtung im Allgemeinen sehr klein und zu vernachlässigen. Trotzdem wurden Verlagerungen der Sandcontainer quer zur Wellenfortschrittsrichtung (X-Komponente, vgl. Abb. 4) aufgezeichnet, wie exemplarisch im unteren Diagramm von Abb. 11 dargestellt. Größere Verschiebungen in Y-Richtung führen auch zu größeren Umlagerungen quer zur Wellenfortschrittsrichtung.



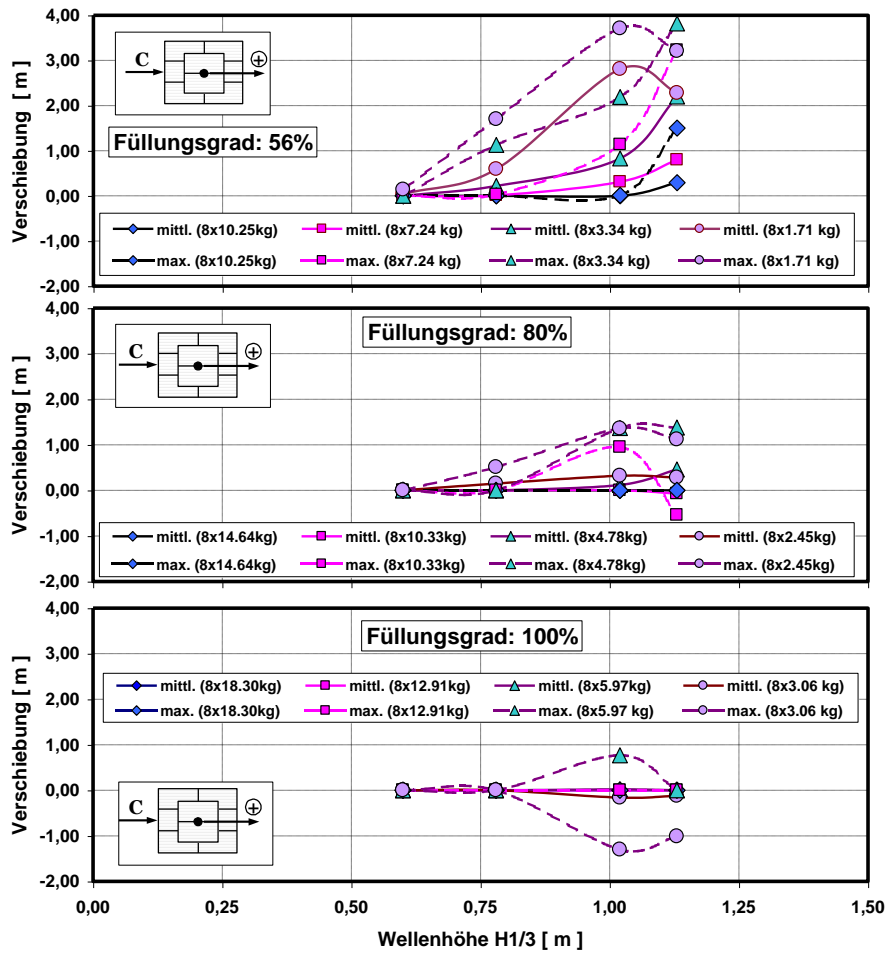


Abb. 10 Gemessene Verschiebungen in Abhängigkeit der Wellenhöhen (Containergruppen längs zur Wellenanlafrichtung)

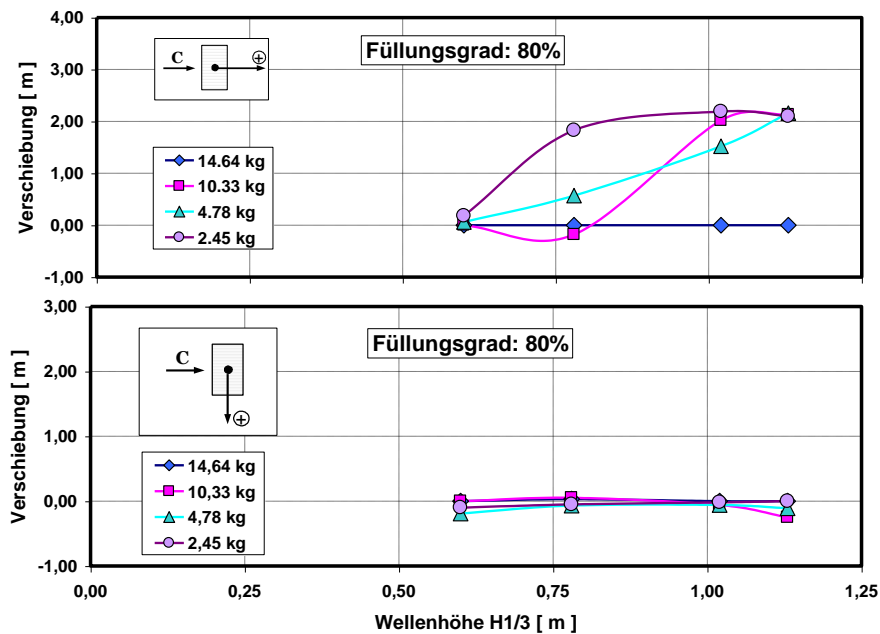


Abb. 11 Gemessene Verschiebungen längs und quer zur Wellenanlafrichtung in Abhängigkeit der Wellenhöhen (Einzelne Container quer zur Wellenanlafrichtung)

Alle Diagramme beruhen auf Daten, die erst am Ende eines Versuchs aufgenommen wurden. Möglicherweise stellen die aufgemessenen Umlagerungen nur die Wirkung der letzten Wellen eines Wellenzuges dar und es sind vorher schon größere Verschiebungen infolge höherer Wellen im Wellenzug aufgetreten; Aussagen darüber lassen die Ergebnisse nicht zu. Damit ergeben sich keine direkten Korrelationen zwischen Verschiebung und Wellenhöhe. Dennoch ist ein klarer Trend erkennbar. Für die praktische Anwendung sind ohnehin nur zwei Zustände von Bedeutung: Stabil (Verlagerung = 0), oder instabil (Verlagerung > 0).

Einige Ergebnisse im Sinne von stabiler oder instabiler Lage sind exemplarisch in Abb. 12 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 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 Näherungsansatz beschreiben:

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

Der Koeffizient A hängt vom Füllungsgrad und der Wellenangriffsrichtung ab.

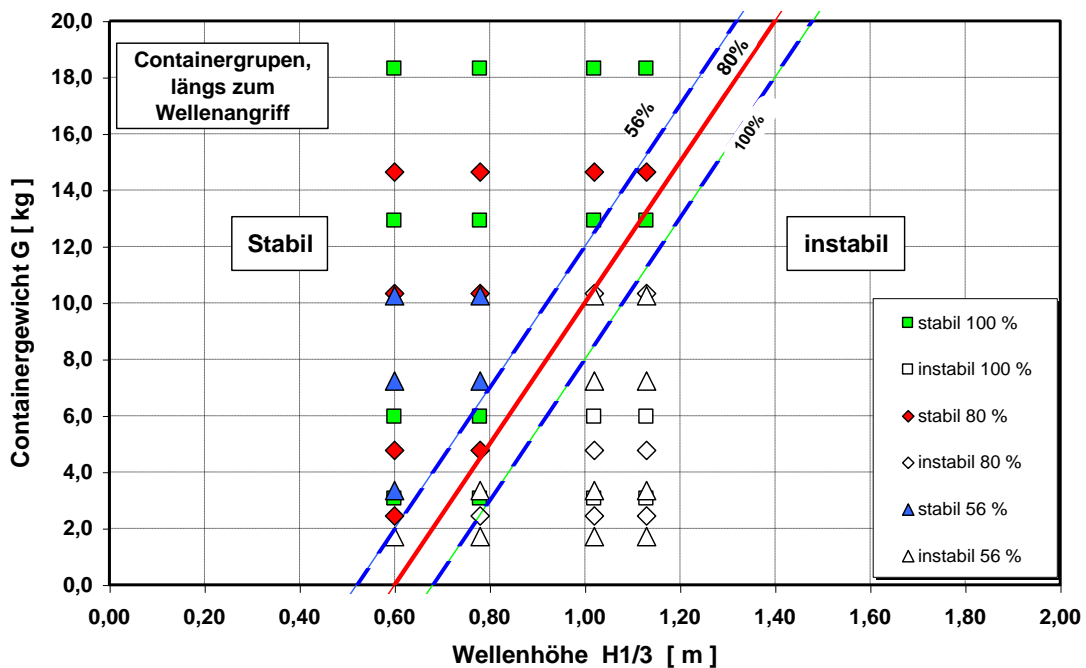


Abb. 12 Stabilitätsbedingungen ermittelt aus Versuchen mit Containergruppen längs zur Wellenanlaufichtung

Dabei ist zu beachten, dass diese erste Annäherung nur für eine Wellenperiode von  $T_p = 5$  s gültig ist, die bei diesen durchgeführten Grundlagentests 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. 13 in Abhängigkeit vom Füllungsgrad aufgetragen. Dabei zeigt sich für einzeln liegende Sandcontainer sowohl eine größere Abhängigkeit von der Wellenangriffsrichtung als auch 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.

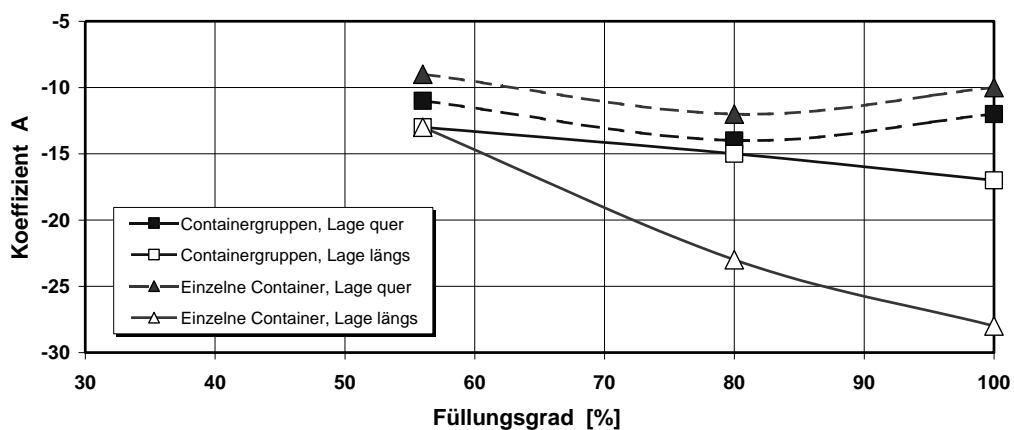


Abb.13 Koeffizient A in Abhängigkeit des Füllungsgrades für einzelne Container und Containergruppen und für Lagerung längs und quer zur Wellenanlaufichtung

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 die später in der Natur tatsächlich eingesetzten Sandcontainer.

Um dies herauszufinden, wurde ein Sandcontainer aus dem gleichen Material wie es später auf der Baustelle zum Einsatz kommt, im Maßstab 1:1 befüllt und die Dehnungen protokolliert. Anschließend wurde aus verschiedenen Materialien für die Modell-Sandcontainer ein passendes Vlies ermittelt. Abb. 14 zeigt die horizontale Dehnung über den Umfang in Abhängigkeit vom jeweiligen Füllungsgewicht beim Füllungsvorgang. Die Dehnung wurde in einer Höhe von rd. 40% der Gesamthöhe des Sandcontainers gemessen. Verglichen sind in Abb. 14 die Dehnungen des Prototyps und eines Modell-Sandcontainers im Maßstab 1:10, der aus einem Material gefertigt ist, das am besten mit dem Dehnungsverhalten des Prototyps übereinstimmt.

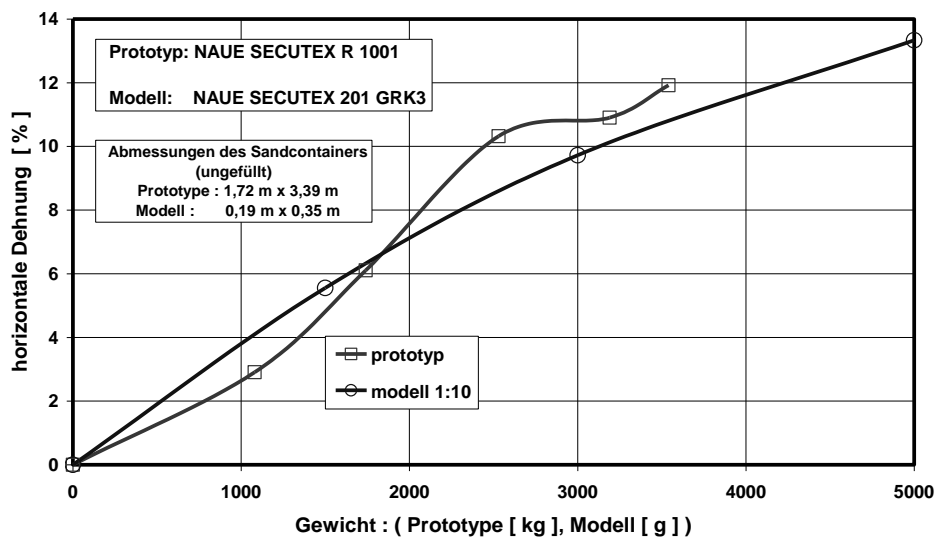


Fig. 14 Vergleich der horizontalen Dehnungen in Abhängigkeit vom Füllgewicht der Container (Prototyp und Modellcontainer)

Für die Stabilitätsuntersuchungen eines vollständigen Kolksschutzes an einem Monopile aus Geotextilen Sandcontainern wurden insgesamt 4 Testreihen untersucht. Der Kolksschutz ist vorgesehen für eine Monopile-Struktur mit einem Durchmesser von 5,50 m in einer Wassertiefe von 21 m. Die Untersuchungen im GWK wurden 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: Einmal im Trockenen, dann bei einer Wassertiefe während des Einbaus von 0,50 m und von 2,10 m. Abb. 15 zeigt den unbelasteten Kolksschutz im GWK unmittelbar nach dem Einbau, links im Bild mit regelmäßig ausgelegten Sandcontainern, rechts im Bild mit einer unregelmäßigen Anordnung.

Tabelle 2 Versuchsserien im GWK mit einem Kolksschutz 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

Nachfolgend werden exemplarisch einige Ergebnisse aus der Versuchsserie II mit unregelmäßig eingebauten Sandcontainern beschrieben. In Abb. 16 sind einige während der Versuche gemessene statistische Parameter für die Wellenhöhen und die Strömungsge-

schwindigkeit an der Sohle in Abhängigkeit der Anzahl der Belastungswellen in der Versuchsserie aufgetragen. Oben im Diagramm ist die Anzahl der Sandcontainer angegeben, die sich jeweils insgesamt nacheinander außerhalb des Kolkenschutzbereichs verlagert haben. Nach 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 keine Beeinträchtigung der Stabilität des Kolksschutzes dar.



Abb.15 1:10 Modell von Kolkschutzvarianten mit Geotextilen Sandcontainern im GWK (links regelmäßige Verlegung, rechts unregelmäßige Verlegung)

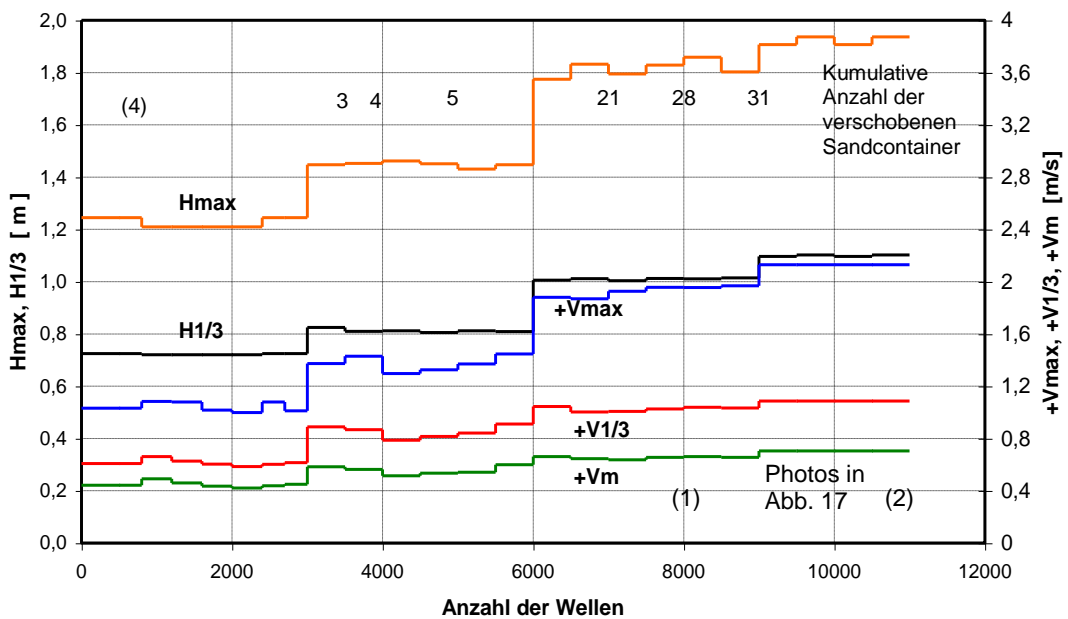


Abb. 16 Parameter der Wellenhöhen und der Sohlgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der kumulativen Anzahl der Wellen während der Versuchsserie II

Für die weiteren Tests wurden signifikante Wellenhöhe und Peakperiode schrittweise erhöht. Umlagerungen von mehr als 5% der Gesamtanzahl der eingebauten Sandcontainer traten erst ab einer signifikanten Wellenhöhe von 1,00 m auf. Abb. 17 zeigt zwei Aufnahmen mit den jeweiligen Umlagerungen der Sandcontainer nach Belastung mit unterschiedlich hohen Wellenspektren mit jeweils 2000 Wellen.

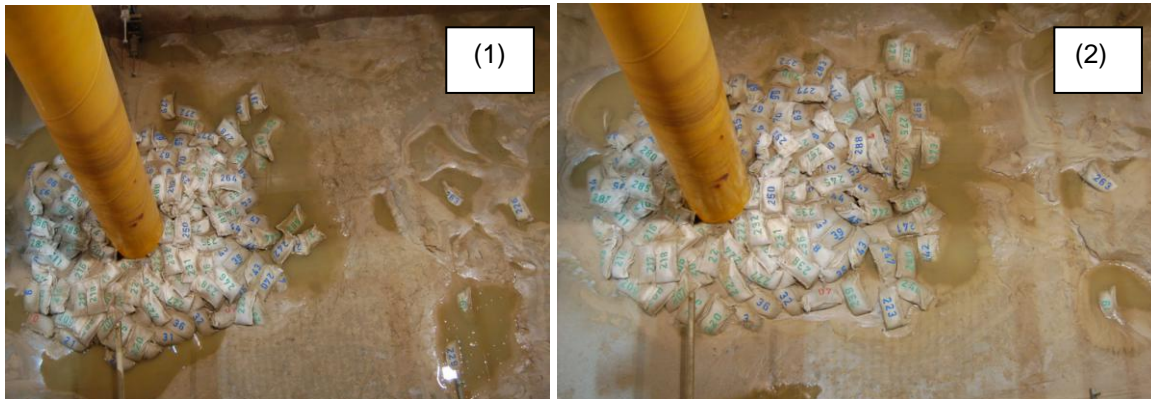


Abb. 17 Photos des Kolkschutzes nach Tests mit verschiedenen Wellenspektren (jeweils nach 2000 Wellen) während der Versuchsserie II

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK) wurden Untersuchungen zur Stabilität Geotextiler Sandcontainer als innovativer Kolkschutz für Monopile-Tragstrukturen durchgeführt.

Dazu wurden großmaßstäbliche Grundlagenuntersuchungen mit einzeln und in Gruppen angeordneten Geotextilen Sandcontainern sowie mit unterschiedlichen Containergewichten und Füllungsgraden durchgeführt. Die ersten Ergebnisse ermöglichen folgende Aussagen:

- Die Lagestabilität der Sandcontainer ist nicht allein eine Funktion des Gesamtgewichtes.
- Weitere Einflüsse ergeben sich aus dem Füllungsgrad und der Wellenangriffsrichtung, wobei diese für Containergruppen weniger ausgeprägt sind als für einzeln liegende Sandcontainer.
- Die Lagestabilität der Sandcontainer steigt mit dem Füllungsgrad an.
- Aus den Messdaten lässt sich eine erste empirische Näherungslösung in Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe und dem Füllungsgrad angeben. Die weiteren künftigen Arbeiten betreffen weitere Analysen der durchgeführten Grundsatzuntersuchungen mit einzelnen Sandcontainern und Containergruppen unter Einbeziehung der gemessenen welleninduzierten Strömungen an der Sohle.

Im Anschluss an die Grundsatzuntersuchungen wurden Tests an einem vollständig aufgebauten Kolkschutz mit Geotextilen Sandcontainer durchgeführt. Untersucht wurden um eine Monopile-Struktur herum angeordnete Sandcontainer. Die ersten Aussagen aus diesen Tests sind:

- Es wurden keine signifikanten Stabilitätsunterschiede zwischen einer regelmäßigen und einer unregelmäßigen Anordnung der Sandcontainer ermittelt. Jedoch zeigt 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 1<sup>st</sup> 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 3<sup>rd</sup> International Conference on Scour and Erosion, Amsterdam, Niederlande, 2006.
- PILARCZYK, K.W.: Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering. A.A. Balkema, Rotterdam, 2000.