

KOLKBILDUNG UND DIMENSIONIERUNG DES KOLKSCHUTZES EINES OWEA-SCHWERKRAFTFUNDAMENTS

von

Holger Wahrmond¹
Mayumi Wilms²
Arne Stahlmann³
Claas Heitz⁴
Torsten Schlurmann⁵

ABSTRACT

The continuous development and installation of offshore wind turbines in the North and Baltic Sea raise questions concerning long-term usability and stability as well as efficiency of the support structures. Regarding costs the installation of complex support structures in water depths up to 40 meter still is a significant factor compared to onshore installations. The STRABAG gravity foundation is a further development of the classical, simple type of gravity foundation, consisting mainly of a reinforced and sand-filled concrete structure with a cross shaped base forming the foundation of the wind turbine. In order to investigate the scouring phenomena around the STRABAG gravity foundation for offshore wind turbines and scour protection systems, physical model tests in wave flumes on a scale of 1:50 and 1:17 are carried out by the Franzius-Institute. The experiments show that a scour protection system is necessary for the given wave boundary conditions; the performance of the selected protection system using geobags is verified.

¹ Dr.-Ing., Ed. Züblin AG, Zentrale Technik, TBT Stuttgart, Albstadtweg 3, 70567 Stuttgart, holger.wahrmond@zueblin.de

² Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, wilms@fi.uni-hannover.de

³ Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, stahlmann@fi.uni-hannover.de

⁴ Dr.-Ing., Ed. Züblin AG, Zentrale Technik, TBT Duisburg, Düsseldorfer Straße 181-185, 47053 Duisburg, claes.heitz@zueblin.de

⁵ Prof. Dr.-Ing. habil., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, schlurmann@fi.uni-hannover.de

1. EINLEITUNG

Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) stellen aufgrund des Standortes „auf hoher See“ besondere Anforderungen an die Planer und die Bauausführenden. Große, zyklische Belastungen aus Wind und Wellen und schwierige, hochgradig wetterabhängige Installationsbedingungen sind zwei der wesentlichsten zu berücksichtigenden Faktoren beim Entwurf. Aufgrund der in Zukunft geplanten hohen Anzahl von zu installierenden Windenergieanlagen bietet sich eine Serienfertigung mit Chancen und Risiken an.

Das von STRABAG entwickelte Schwerkraftfundament bietet eine innovative und wirtschaftliche Lösung für die Gründung von Offshore-Bauwerken. Das ca. 6.500 t schwere Fundament wird als Fertigteil in Kainähe gefertigt, mit einem speziellen Baugerät, einem Halbtaucher, zu seinem endgültigen Standort transportiert und dort auf dem Meeresgrund abgesetzt, siehe hierzu auch HARTWIG & PÖLLATH (2009). In der Produktionsstätte werden sowohl der Stahlmast als auch die Maschinengondel mitsamt den Rotorblättern auf dem Fundament montiert. Anschließend wird die gesamte Anlage in einem Stück verschifft. Der Umfang der wetterabhängigen Offshore-Installationsarbeiten kann hierdurch im Vergleich zu anderen Gründungskonzepten signifikant reduziert werden. Zur dauerhaften Erhaltung der Standsicherheit der Gründung eines STRABAG-Schwerkraftfundamentes gehört es, dass eine Kolkbildung bis unter die Aufstandsflächen sicher vermieden wird. Dazu ist eine möglichst genaue Kenntnis der durch Strömung und Wellen hervorgerufenen Sedimenttransporte am Meeresboden erforderlich. Zweifelsohne stellt das Fundamentkreuz mit einer Breite von 40 m und einer Höhe von 8 m abzüglich der Baugrubentiefe ein Strömungshindernis dar, das entsprechende Verwirbelungen hervorruft. Die Strömungsverhältnisse im Umgebungsbereich und damit verbunden auch der bodennahe Sedimenttransport werden durch das Fundament beeinflusst. Es war von vornherein davon auszugehen, dass für die Umgebungsbedingungen der angestrebten Standorte in der Nordsee ohne besondere Schutzmaßnahmen Kolke an den Bauwerksrändern entstehen, die unter Umständen die Standsicherheit beeinträchtigen können. Um die Strömungssituation und die Kolkvorgänge in der Umgebung des Fundamentes besser einschätzen und die Kolkschutzmaßnahmen gesichert planen zu können, entschied man sich nach eingehender Diskussion mit dem Franzius-Institut der Leibniz Universität Hannover für die Durchführung von Modellversuchen im kleinen und großen Wellenkanal in Kombination mit theoretischen Untersuchungen zur Validierung von Rechenmodellen.

In 2010 fanden die physikalischen Modellversuche im Wellenkanal des Franzius-Instituts (WKS) und im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK) statt. Die Modellversuche wurden ergänzt durch numerische Simulationsmodelle der Fa. FlowConcept GmbH, Hannover. Mit Hilfe der Untersuchungen konnten die Prozesse der Kolkbildung sowie die maßgebenden Einflussparameter quantifiziert und ein Kolkschutzsystem, basierend auf der Verwendung von geotextilen Sandcontainern, abgeleitet sowie dessen Wirksamkeit nachgewiesen werden. Die Versuchsergebnisse ermöglichten es, geeignete Materialien sowie Sandcontainergrößen und -geometrien zu finden bzw. ihre Eignung zu bestätigen.

2. DAS STRABAG-SCHWERKRAFTFUNDAMENT

Abbildung 1 zeigt eine Grafik des neuentwickelten STRABAG-Fundamentes mit einer OWEA nach der Installation am Standort. Das Fundamentdesign wurde auf Wassertiefen von ca. 40 bis 45 m ausgelegt. Die Oberkante des Betonfundamentes liegt ca. 20 m oberhalb LAT (Lowest Astronomical Tide), woraus sich eine Fundamenthöhe einschließlich der Hohlkästen von 60 bis 65 m ergibt. Die Nabe befindet sich bei einer 5-MW-Turbine ca. 130 m oberhalb des Meeresgrundes. Das Fundament besteht aus einem vorgespannten, hohlen Betonschaft, welcher mit einem Kreuz aus vorgespannten Stahlbeton-Hohlkästen verbunden ist. An den Enden der Beton-Hohlkästen sind insgesamt vier Fundamentplatten angeordnet, über welche die konzentrierte Lastübertragung in den Baugrund erfolgt.

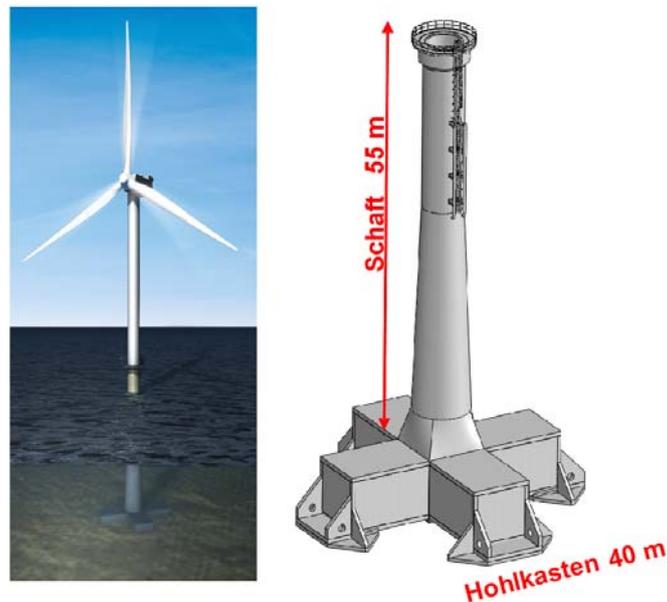


Abbildung 1: STRABAG-Schwerkraftfundament mit OWEA

Der Schaft und die kreuzförmig angeordneten Hohlkästen werden mit Sand gefüllt, um das Gesamtgewicht der Gründung zu erhöhen. Dadurch wird das Verhältnis zwischen der zyklisch wechselnden Belastung und der ständigen Belastung verringert und damit das Tragverhalten unter zyklischer Beanspruchung verbessert. Die Masse des Betonbauwerkes beträgt ca. 6.500 t. Mit Sandballast erhöht sich das Gewicht ohne Abzug des Auftriebs auf ca. 11.000 t. Unter den Fundamentplatten, die jede eine Grundfläche von ca. 100 m² besitzt, wirken Sohlspannungen aus Eigengewicht von ca. 200 kN/m². Das an Land vorgefertigte Fundament einschließlich der bereits aufgesetzten Windenergieanlage wird am Offshore-Standort in eine zuvor ausgehobene und planierte Baugrube abgesetzt. Die Baugrubentiefe beträgt je nach Baugrundverhältnissen ca. 3 bis 6 m. Der Einbau der Sohlsicherung auf der Baugrubensohle schließt sich unmittelbar an. Verwendet werden sollen geotextile Sandcontainer, die mit Aushubmaterial aus der Baugrube gefüllt sein werden. Oberhalb der Sohlsicherung wird die Baugrube mit dem restlichen Aushubmaterial wieder verfüllt. Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass die Sohlsicherung unter der Geländeoberfläche angeordnet ist und auf diese Weise an den Rändern der gesicherten Fläche keine über das Gelände ragenden Strukturen vorhanden sind, die Angriffsmöglichkeiten für eine weitere Kolkbildung bieten. Kolke von der Geländeoberfläche bis zur Sohlsicherung werden ggf. in Kauf genommen.

3.1 Versuchseinrichtung Großer Wellenkanal

Bei einer Breite von 5,0 m und einer Tiefe von 7,0 m beträgt die nutzbare Länge des GWKs 307 m. Die hydraulisch angetriebene Wellenmaschine ist als kombinierte Translations- und Rotationsmaschine mit einem maximalen Hub von $\pm 2,10$ m und einer aufgesetzten, um $\pm 10^\circ$ drehbaren Klappe ausgebildet. Mithilfe dieser Wellenmaschine können regelmäßige Wellen und Seegang unter Tief- und Flachwasser-Bedingungen simuliert werden. Es lassen sich regelmäßige Wellen mit Wellenhöhen bis 2,0 m und Wellenspektren mit signifikanten Wellenhöhen bis ca. 1,30 m erzeugen. Die Einsteuerung des Seegangs für die Wellenmaschine erfolgt über einen Regelkreis, der in der Lage ist, die am Bauwerk reflektierten Wellen an der Wellenmaschine zu absorbieren. Des Weiteren befindet sich am Ende des GWKs eine Böschung zur passiven Absorption der Wellen, um ungewollte Re-Reflexionen zu verhindern und somit typische Modelleffekte weitestgehend auszuschließen.

3.2 Versuchsaufbau

3.2.1 Allgemein

Im Rahmen der großmaßstäblichen Untersuchungen zur Kolkbildung und Dimensionierung des Kolkschutzes für das STRABAG-Schwerkraftfundament wird ein Modell im Maßstab 1:17 gefertigt und im GWK bei fester Verbindung mit der Kanalsohle in das bestehende Sandbett aus fein gestuftem Sand ($d_{50} = 0,15$ mm) eingebaut. Der horizontale Teil des Sandbetts hat dabei eine Schichtdicke von 1,20 m und eine Länge von 34,3 m. Vor und hinter dem horizontalen Teil des Sandbetts werden entsprechende Anrampungen mit Neigungen von etwa 1:20 hergestellt. In der nachfolgenden Abbildung 3 sind der Längs- und Querschnitt des Versuchsaufbaus im GWK schematisch dargestellt.

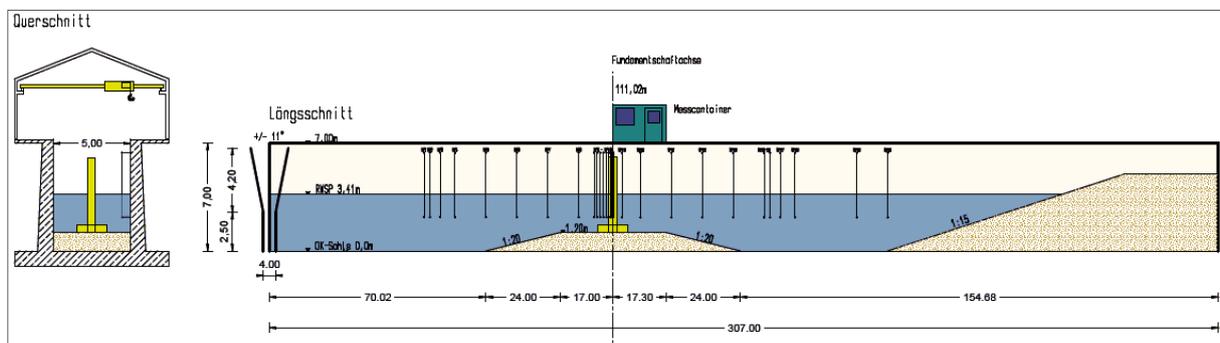


Abbildung 3: Querschnitt und Längsschnitt des Versuchsaufbaus im GWK

Zur Aufmessung des Sandbetts und des welleninduzierten Sedimenttransports kommt ein Multibeam Fächerecholot zum Einsatz. Die Wasseroberflächenauslenkung wird mit 24 Drahtwellenpegeln aufgenommen.

3.2.2 Varianten des Kolkschutzsystems

Die geotextilen Sandcontainertypen, die im Rahmen der Untersuchungen im GWK zur Dimensionierung eines Gesamtkolkschutzsystems für das Schwerkraftfundament verwendet werden, sind hinsichtlich ihres Volumens, des Seitenverhältnisses und der Art des zu verwendenden Textiles vom Auftraggeber vorgegeben. Es werden geotextile Sandcontainer der Fa. NAUE GmbH & Co. KG aus vernadeltem Stapelfaservliesstoff (Typ Secutex R201) mit dem Seitenverhältnis 1:1 verwendet. Als Füllstoff wird der gleiche Sand wie für das Sandbett eingesetzt ($d_{50} = 0,15$ mm). Die genauen Dimensionen dieses Sandcontainertyps sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Typ N1	Zuschnittabmessung	Füllvolumen	Gewicht
Natur 1:1	2,05 x 2,05 m	1,50 m ³	2700 kg
Modell 1:17	0,121 x 0,121 m	0,0003 m ³	0,550 kg

Tabelle 1: Ausgewählter Sandcontainertyp für die Untersuchungen zur Dimensionierung des Kolkschutzsystems im GWK

In separaten Versuchsreihen wird die Lagestabilität verschiedener geotextiler Sandcontainer untersucht, die sich in Zuschnittabmessungen, Füllvolumen, Material und Gewicht unterscheiden. Diese Untersuchungen zeigen, dass der Sandcontainer vom Typ N1 lagestabil ist und die Mindestgröße für Sandcontainer darstellt, die den gegebenen hydraulischen Randbedingungen widerstehen sollen. Die Anzahl der verwendeten Sandcontainer im Kolkschutzsystem wird über eine Flächenberechnung bestimmt. Bei der Berechnung wird von einem zweilagigen Einbau der Sandcontainer auf der vorgegebenen Fläche des Kolkschutzsystems mit einem Durchmesser von 52,5 m (in Natur) bei unregelmäßiger Anordnung ausgegangen. Insgesamt werden 1104 Sandcontainer für das Kolkschutzsystem des Schwerkraftfundaments eingesetzt.

Das Versuchsprogramm zur Dimensionierung des Kolkschutzsystems beinhaltet insgesamt drei verschiedene Versuchsvarianten, in denen die Wirksamkeit von drei unterschiedlichen Kolkschutzmaßnahmen untersucht wird. In Tabelle 2 sind die Parameter der verschiedenen Versuchsvarianten im Naturmaßstab zusammengefasst.

Variante	Geotextiler Sandcontainer Typ	Einbindetiefe des Fundaments	Kolkschutzmaßnahme
1	N1	0,00 m	Sandcontainer
2	N1	3,00 m	Sandcontainer + Vlies
3	N1	3,00 m	Sandcontainer

Tabelle 2: Übersicht der drei Varianten der Kolkschutzmaßnahme, Naturmaßstab

Die insgesamt 1104 geotextilen Sandcontainer werden in zwei Lagen innerhalb des vorgegebenen Kolkschutzkreises mit einem Durchmesser von 3,10 m (52,5 m in der Natur) um das Schwerkraftfundament direkt auf das Sandbett verlegt. Der Einbau der Sandcontainer erfolgt unter Wasser mit einer Wassertiefe von 0,45 m.

Die Sandcontainer werden zufällig verlegt, indem sie in das Wasser eingetaucht und anschließend losgelassen werden, so dass sie ihre endgültige Lage im freien Fall erreichen. Um eine gleichmäßige Verteilung der Sandcontainer um das Schwerkraftfundament zu erzielen, wird die kreisförmige Fläche des vorgesehenen Kolkenschutzkreises in 4 Segmente geteilt und es werden pro Segment 276 Sandcontainer in einem definierten Muster verteilt. In der Kolkenschutzmaßnahme Variante 2 kommt zusätzlich zu den geotextilen Sandcontainern ein Vlies zum Einsatz. Dieses Vlies wird zwischen den Hohlkästen und an den Prätzen (für eine Hälfte des Fundaments) befestigt und darauf die Sandcontainer nachfolgend verlegt. Anschließend wird die Baugrube verfüllt, sodass das Fundament 0,18 m (Modellmaßstab) in das Sandbett eingebunden ist. In Abbildung 4 (links) ist das Vlies nach der Installation dargestellt. Abbildung 4 (rechts) zeigt das Fundament mit einem fertig verlegten Segment des Kolkenschutzkreises.



Abbildung 4: Fundament mit angebautem Vlies (links) und Fundament während der Einbauphase des Kolkenschutzsystems (rechts)

3.3 Versuchsdurchführung

Die hydraulischen Randbedingungen für das hier vorgestellte Versuchsprogramm sind in Tabelle 3 sowohl im Naturmaßstab als auch im Modellmaßstab angegeben.

Parameter	Symbol	Natur	Modell (1:17)
Wellenangriffsrichtung	α	45°	
Wasserstand ⁶	d	37,50 m	2,21 m
Peakperiode	T_P	13,80 s	3,35 s
Signifikante Wellenhöhe	H_S	10,80 m	0,64 m
Wellenbelastung	50-jährliches Extremereignis		

Tabelle 3: Hydraulische Randbedingungen für das Versuchsprogramm im GWK

⁶ Für die Kolkenschutzmaßnahme Variante 1 beträgt der Wasserstand 2,21 m + 0,18 m = 2,39 m

Um die Verlagerung der Sandcontainer über die Zeit und die damit einhergehende Wirksamkeit des vollständigen Kolkenschutzsystems analysieren zu können, erfolgt das Aufmaß des Sandbetts nach

- 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 und 5000 Einzelwellen

des 50-jährlichen Extremereignisses mittels Fächerecholot. Die Versuchsreihe für die Kolkenschutzmaßnahme Variante 1 wird nach 4000 Wellen beendet, da bereits eine deutliche Verlagerung der Kolkgeschutzelemente eingetreten ist. Nach der Fächerecholot-Messung wird das Wasser langsam aus dem GWK abgelassen, um eine visuelle Bewertung des ungestörten Zustands vornehmen zu können.

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In Abbildung 5 sind der Zustand der Kolkentwicklung und die Ergebnisplots der Fächerecholot-Messungen nach 4000 bzw. 5000 Wellen für die Versuchsreihen ohne Kolkenschutz, Kolkenschutzmaßnahme Variante 1, Variante 2 und Variante 3 (von oben nach unten) dargestellt. Die Farbcodierung der Ergebnisplots des Fächerecholots wurden so gewählt, dass eine schwarze Färbung Sedimenterosionen und eine weiße Färbung Sedimentakkumulationen im Verhältnis zum Planum graphisch veranschaulichen. Die dunkle Färbung an den Kanalwänden wird durch Fehlechos des Fächerecholots an den Kanalwänden hervorgerufen. Die Breite dieser Fehlechos beträgt rd. 0,30 m und ist für die folgende Analyse der Ergebnisse zu vernachlässigen, da sie nicht im eigentlichen Untersuchungsbereich des Fundamentes liegen.

Es zeigt sich, dass für die Versuchsreihe ohne Kolkenschutz die deutlichsten Auskolkungen sowohl an den vier äußersten Aussteifungselementen (in Wellenangriffsrichtung gesehen) entstehen, als auch zwischen den dem Strom zu- und abgewandten Hohlkästen. Außerdem lässt sich eine leichte Sandakkumulation im vorderen Bereich zwischen den dem Strom zugewandten Hohlkästen und in den seitlichen Zwischenräumen beobachten.

Für die Versuchsreihen mit Kolkenschutzsystem ist festzustellen, dass die geotextilen Sandcontainer vom Typ N1 unter den gegebenen Randbedingungen des 50-jährlichen Extremereignisses lagestabil sind. In Variante 1 jedoch erodiert der Sand unter dem Fundament infolge des Freiraums an der Unterseite der Hohlkästen und die Sandcontainer rutschen in die entstehenden Vertiefungen nach. Für die Versuchsreihe mit der Kolkenschutzmaßnahme Variante 2 und 3 ist zu beobachten, dass durch die Wellenbelastung leichte Sedimenterosionen sowohl vor und hinter dem Schaft wie auch seitlich des Schaftes auftreten (jedoch nicht so tief wie in der Versuchsreihe ohne Kolkenschutzmaßnahme).

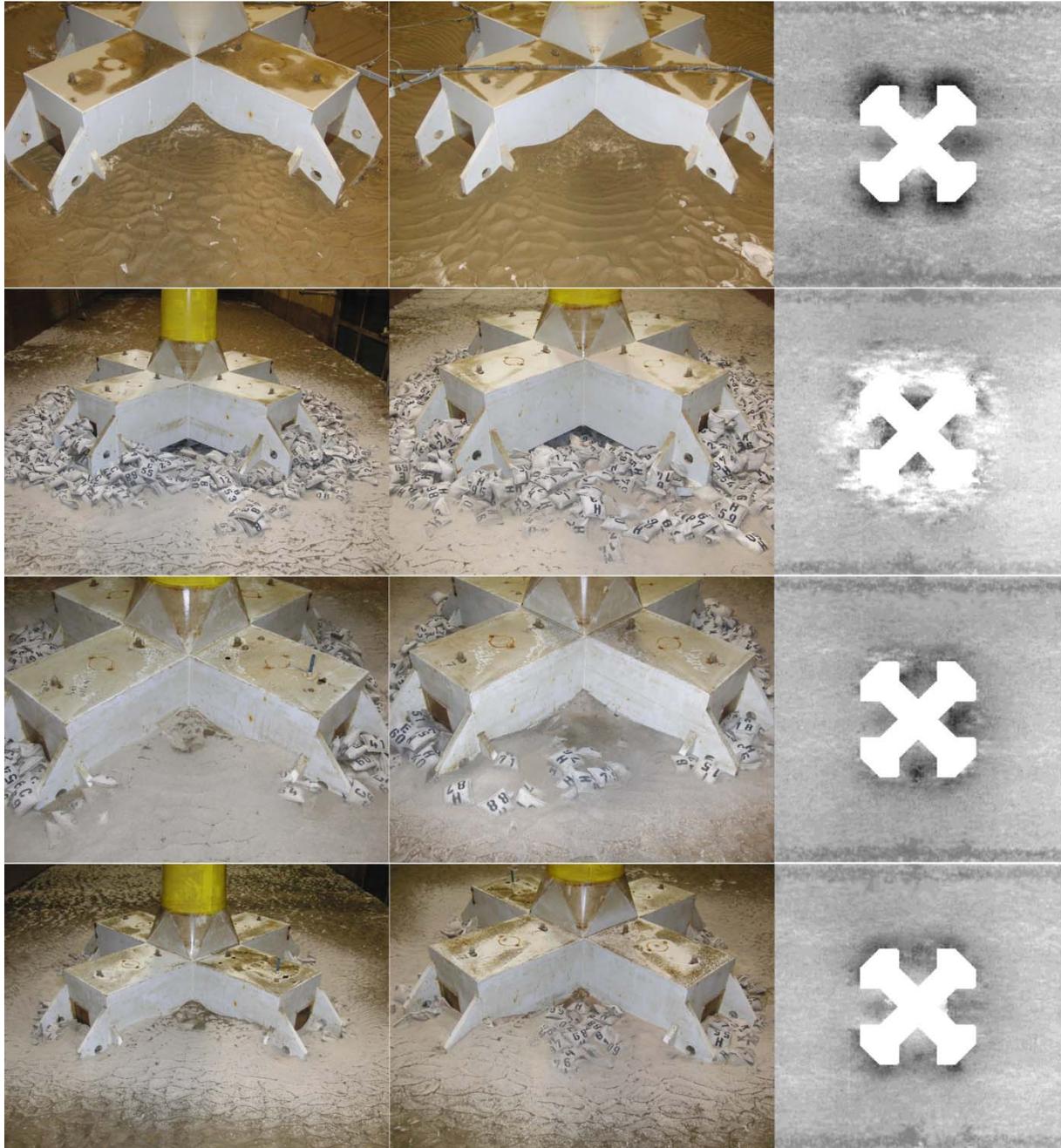


Abbildung 5: Zustand der Kolkentwicklung vor (links) und hinter (Mitte) dem Schaft, Ergebnisplot des Fächerecholots (rechts) nach 4000 (Variante 1) bzw. 5000 Wellen (Wellenangriffsrichtung erfolgt von links). Von oben nach unten: Versuch ohne Kolkschutz, Kolkschutzmaßnahme Variante 1, Variante 2 und Variante 3

Für die Diskussion und Bewertung der Messdaten wird die Entwicklung der gemessenen Kolkiefen für jede Versuchsreihe an repräsentativen Punkten über die Wellenzahl aufgetragen und miteinander verglichen. Bei der Ermittlung der Kolkverläufe wird die Kreisfläche mit Radius $r = 1,54 \text{ m}$ ($r = 26,25 \text{ m}$ in Natur) um das Schwerkraftfundament herum betrachtet. Dieser Radius entspricht dem Radius der für den Prototyp geplanten Kolkschutzfläche. Innerhalb dieser betrachteten Kreisfläche gelten die Bereiche als repräsentativ, die im Zustand nach der Belastung mit 4000 bzw. 5000 Wellen den tiefsten Kolk aufweisen. Die sich hieraus

ergebenden Kolkiefen werden mit dem Bauwerksdurchmesser D ($D = 1,91$ m im Modell) normiert und über die Wellenzahl aufgetragen, vgl. Abbildung 6 (links). In Abbildung 6 (rechts) ist das Fundament mit Markierung (Kreis) der repräsentativen Punkte und der Querschnitts-Achse dargestellt. Die repräsentativen Punkte befinden sich in einem Umkreis von 3,5 cm zueinander.

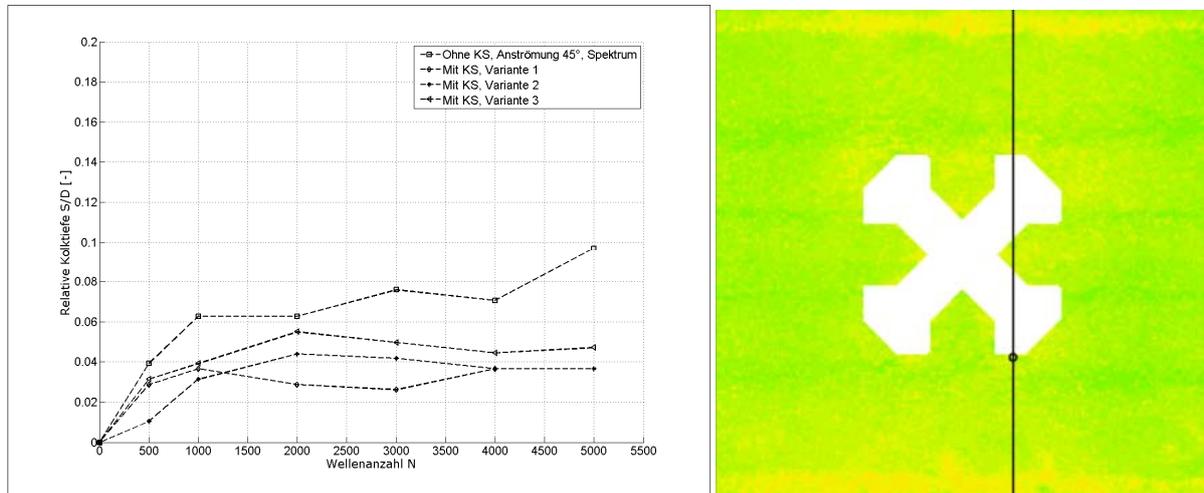


Abbildung 6: Verlauf der relativen Kolkiefe über die Wellenzahl (links) und Markierung der repräsentativen Punkte (rechts)

In der Versuchsreihe ohne Kolkschutz ist nach den ersten 500 Einzelwellen bereits 50 % der maximalen, relativen Kolkiefe erreicht. Die relative Kolkiefe nimmt anschließend nur noch langsam zu und beträgt nach 5000 Wellen rd. 10 %. In den Versuchsreihen mit Kolkschutz liegen die relativen Kolkiefen quantitativ unter den Ergebnissen der Untersuchung ohne Kolkschutz, mit rd. 5 % um die Hälfte kleiner. Die relativen Kolkiefen entwickeln sich rasch in den ersten 500 – 1000 Wellen und nehmen anschließend nicht mehr signifikant zu. Anhand der Ergebnisse für die Kolkschutzsysteme Variante 2 und 3 lassen sich keine signifikanten Unterschiede in der Kolkentwicklung durch den zusätzlichen Einsatz von Vlies als Kolkschutzmaßnahme feststellen. Unter den gegebenen Randbedingungen bewirkt der zusätzliche Einsatz von Vlies keinen signifikanten Vorteil für die Reduzierung der Auskolkung. Beide Varianten gewährleisteten jedoch eine Versperrung des Strömungsweges unter den Hohlkästen und verhindern dadurch das Auftreten von Erosionen unter dem Fundament.

Neben der zeitlichen Betrachtung der Kolkentwicklung wird auch die räumliche Kolkentwicklung betrachtet, indem Schnittdiagramme durch die o.g. repräsentativen Kolkbereiche entlang der y -Achse (Kanalbreite) gezogen werden. In Abbildung 7 ist der Querschnitt für die Untersuchungen mit und ohne Kolkschutzmaßnahme dargestellt; das Schwerkraftfundament ist dabei schematisch mit grauen Rechtecken abgebildet. Unter Berücksichtigung der Fehlechos an den Kanalwänden kann beobachtet werden, dass der Kolk von der Pratze aus gemessen maximal 0,50 m breit ist und nicht von der Kanalwand beeinflusst wird. Hieraus lässt sich schließen, dass der vorhandene Verbauungsgrad im Kanal keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Kolkausbildung hat.

Weiterhin lassen sich die in den vorgegangen Abschnitten getroffenen Beobachtungen bestätigen:

- der Kolk entwickelt sich rasch in den ersten 500 – 1000 Einzelwellen,
- der Kolk entsteht an den Prätzen und hinter dem Schaft zwischen den Hohlkästen,
- in Folge des Kolksschutzes entwickeln sich geringere Kolk-tiefen und –breiten.

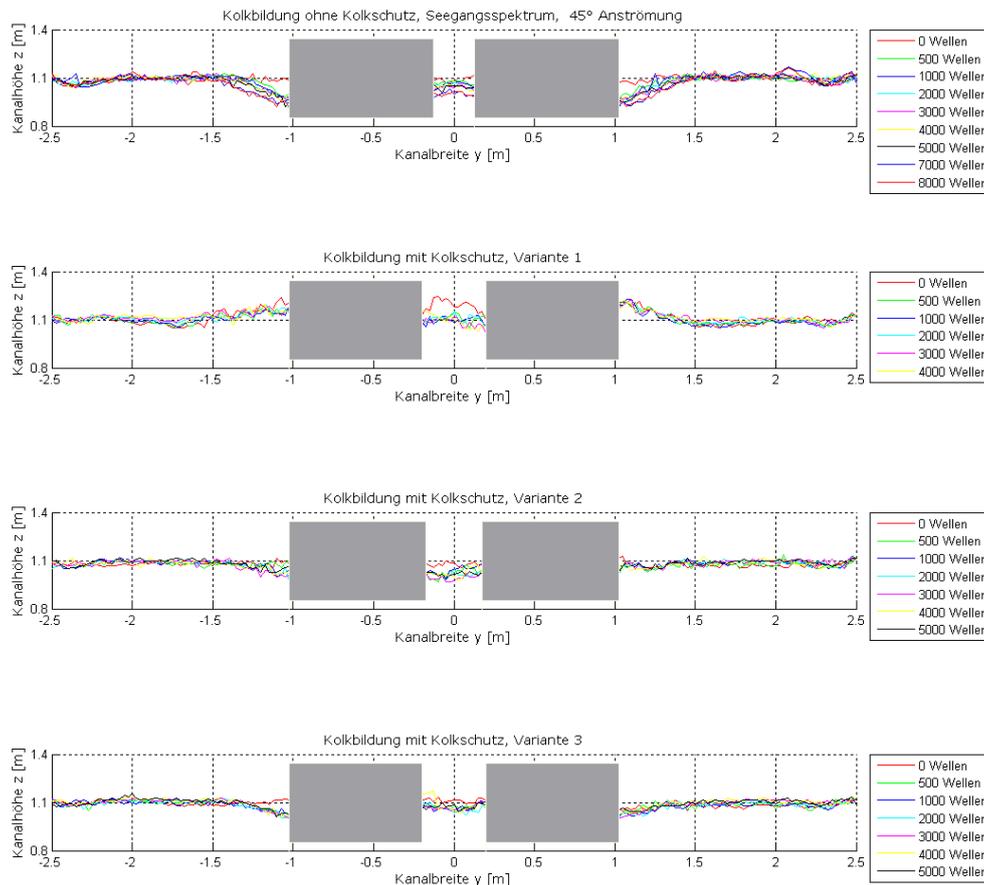


Abbildung 7: Schnittdiagramm der Kolkentwicklung entlang der Kanalbreite für die Position des tiefsten Kolks aus Abbildung 6

5. ZUSAMMENFASSUNG

Erfahrungen aus den zuletzt installierten Windkraftanlagen in der deutschen AWZ der Nordsee zeigen, dass die Kolkbildung bezogen auf die Standsicherheit der Anlagen ein sehr ernst zu nehmendes Phänomen darstellt. Die vorhandenen Berechnungsmöglichkeiten können bisher nicht alle Wirkungsmechanismen insbesondere bei geometrisch komplexen Fundamentstrukturen beschreiben. Für das STRABAG-Schwerkraftfundament lagen bisher keine praktischen Erfahrungen zur Kolkbildung vor, die als Grundlage für geeignete Bemessungsverfahren für den Kolksschutz hätten dienen können. Großmaßstäbliche Versuche waren daher unumgänglich, um ein ausreichendes Maß an Planungssicherheit zu erreichen.

Das Untersuchungsprogramm im GWK beinhaltete u.a. Versuchsreihen zum Nachweis eines Gesamtkolkschutzsystems für das STRABAG-Schwerkraftfundament. Für die Generierung der Messdaten wurden Versuchsreihen mit beweglicher Sohle, einer Wellenangriffsrichtung von 45° (bezogen auf die horizontale Fundamentausrichtung) und einem Seegangspektrum (50-jährliches Extremereignis) entsprechend den hydraulischen, natürlichen Randbedingungen durchgeführt. Eine Versuchsreihe ohne Kolkschutz diente dabei als Referenzmessung. Für den Nachweis des Gesamtkolkschutzsystems wurden drei Varianten von Kolkschutzmaßnahmen untersucht. In allen drei Varianten kam der Sandcontainer vom Typ N1 als geotextiler Sandcontainer zum Einsatz. Dieser wurde zweilagig und zufällig im vorgegebenen Kolk-schutzkreis mit dem Durchmesser 52,50 m (Naturmaßstab) eingebaut.

Die Versuchsreihe mit der Kolkschutzmaßnahme Variante 1 wurde aufgrund der bereits deutlich erkennbaren Verlagerung der Kolkschutzelemente nach 4000 Wellen beendet. Ursache der Verlagerung war eine Unterströmung des Freiraums an der Unterseite der Hohlkästen. Der Freiraum war durch die fehlende Einbindung des Fundamentes in Variante 1 besonders exponiert. Die Strömung führte zu einer Sedimentmobilisierung und zum Sedimentaustrag, die Sandcontainer rutschten in die entstehenden Vertiefungen nach.

In den Varianten 2 und 3 wurde der Strömungsweg unter den Hohlkästen durch die Einbindung des Fundamentes in das Sandbett versperrt. Erosionen unterhalb des Fundamentes konnten hierdurch vermieden werden. In Variante 2 wurden Vliese als Kolkschutzmaßnahme zwischen den Hohlkästen und - für eine Seite des Fundamentes - auch an den Prätzen befestigt und darauf die Sandcontainer eingebaut. Das Fundament wurde anschließend in das Sandbett eingebunden ($d = 3$ m in Natur). Nach der Belastung mit 5000 Wellen kam es zu keiner signifikanten Kolkbildung. Die geplante Kolkschutzkreisfläche ist somit als ausreichend anzusehen.

Im Unterschied zu Variante 2 wurde in Variante 3 auf ein Vlies zwischen den Hohlkästen und an den Prätzen verzichtet. Der übrige Aufbau von Variante 3 entsprach dem in Variante 2. Auch in Variante 3 kam es nach der Belastung mit 5000 Wellen des 50-jährlichen Extremereignisses zu keiner signifikanten Kolkbildung.

Die Untersuchungen im GWK im Maßstab 1:17 bestätigen insgesamt die Leistungsfähigkeit der Kolkschutzmaßnahmen Variante 2 und 3 aus geotextilen Sandcontainer vom Typ N1 unter Belastung durch 5000 Wellen des 50-jährlichen Extremereignisses.

6. SCHRIFTTUM

HARTWIG, U., PÖLLATH, K.: Das Züblin-Fundament: Eine innovative Flachgründung für Offshore-Windenergieanlagen in großen Wassertiefen. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 47, 2009, Vortrag zum 5. Hans Lorenz Symposium am 1.10.2009

WILMS, M., STAHLMANN, A., SCHLURMANN, T.: Untersuchungen zur Kolkbildung und Dimensionierung des Kolkschutzsystems für das STRABAG-Schwerkraftfundament. Abschlussbericht, Franzius-Institut, Hannover, 2011