
UNTERSUCHUNG VON SEEGANGSBELASTUNGEN UND KOLKEN AN OFFSHORE-WINDENERGIEANLAGEN IM TESTFELD ALPHA VENTUS

Dipl.-Ing. A. Stahlmann, Dipl.-Ing. A. Hildebrandt, Prof. Dr.-Ing. T. Schlurmann¹

ABSTRACT

With the goal to further develop the share of renewable energies on Germany's electricity supply, thousands of offshore wind energy converters are planned and will be constructed in the North- and Baltic Sea by 2030. As a first step, the first German offshore test site *alpha ventus* in the North Sea about 45 km north-east of the Island of Borkum, where experience shall be gained and made available for future offshore wind farms, is currently under construction and will be equipped with extensive measuring equipment. Within the framework of the research initiative RAVE, investigations are carried out on the first offshore wind energy converters (OWEC) here being installed in water depths of approximately 30 m. The associated research project GIGAWIND *alpha ventus* focuses on the efficient design and optimization process of OWEC supporting structures. Two of the work packages described here predominantly determine the wave-induced forces on the structure and monitor the development of scour phenomena at the toe of the structure in order to develop countermeasures to cope with these effects for adequate protection and maintenance. The overall objectives and already achieved first results of these two work packages are presented and encompass the installation of wave pressure gages on the tripod structure and highlight the in-situ monitoring programme. In addition, first preliminary laboratory investigations on the scour development are illustrated.

Einleitung und Forschungshintergrund

Die Bundesregierung beabsichtigt, bis zum Jahr 2030 Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee mit einer installierten Gesamtleistung von 20-25 GW zu errichten, mit dem vorrangigen Ziel, 15% des deutschen Stromverbrauchs allein durch Windenergie zu erzeugen. Den Startschuss für diese Entwicklung stellt das Offshore-Testfeld *alpha ventus* 45 km nördlich von Borkum dar, mit zwölf Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) mit einer Leistung von jeweils 5 MW, die in Wassertiefen um 30 m errichtet werden. Das Testfeld und einzelne der installierten OWEA werden dabei mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, um die an der im Rahmen der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungsinitiative *Research at alpha ventus* (RAVE) beteiligten Forschungsprojekte mit detaillierten Naturmessdaten versorgen zu können.

Ein im Rahmen von RAVE gefördertes Forschungsprojekt stellt das interdisziplinäre Verbundprojekt *GIGAWIND alpha ventus* dar, das Mitte 2008 an der Leibniz Universität Hannover (LUH) ins Leben gerufen wurde, in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Bremerhaven.

¹ Alle Autoren: Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

Erstautor: Dipl.-Ing. Arne Stahlmann
Tel. +49 (0)511.762-2584, Fax: +49 (0)511.762-4002,
Email: stahlmann@fi.uni-hannover.de

Im Fokus des Projektes steht die Entwicklung eines ganzheitlichen Dimensionierungskonzeptes für OWEA-Tragstrukturen anhand von Messungen im Offshore-Testfeld alpha ventus, mit dem vorrangigen Ziel der Kostenminimierung und Effizienzsteigerung von OWEA sowie einer Optimierung des Entwurfsprozesses. Das Projekt beinhaltet verschiedene Teilprojekte, die eine große Bandbreite unterschiedlicher, fachspezifischer Aufgabenstellungen hinsichtlich der Lasteinwirkungen, der Langlebigkeit und der Gründung umfassen und letztlich zur Erstellung des ganzheitlichen Dimensionierungskonzeptes dienen werden:

- TP1: Lastmodelle für Wind und Wellen und deren Korrelation
- TP2: Einfluss fertigungstechnischer Aspekte auf die Lebensdaueranalyse
- TP3: Korrosionsschutz für Stahlstrukturen im Offshore-Bereich
- TP4: Zuverlässige Beanspruchungsüberwachung an globalen und lokalen Tragelementen
- TP5: Entwicklung innovativer Kolkenschutzsysteme und lokales Kolkmonitoring
- TP6: Modellierung des Tragverhaltens von Offshore-Rammpfählen
- TP7: Automatisierte Validierung von Gesamtstrukturmodellen und
- TP8: Ganzheitliche Dimensionierung von OWEA-Tragstrukturen

Im Laufe der dreijährigen Projektlaufzeit sollen neue Bemessungs- und Berechnungsalgorithmen, Methoden und Software-Applikationen entwickelt werden, die vornehmlich anhand der Naturmessdaten aus dem Testfeld validiert werden sollen.

Von den oben dargestellten Schwerpunkten werden in diesem Beitrag nunmehr die vom Franzius-Institut federführend koordinierten und bearbeiteten Teilprojekte TP 1 und TP 5 näher dargestellt.

LASTMODELLE FÜR WIND- UND SEEGANGLASTEN

Vorhabensbeschreibung und Zielsetzung des Teilprojekts

Im Rahmen des ersten Teilprojektes wird ein Vergleich zwischen den Naturmessungen und den gängigen Berechnungsverfahren angestellt, die sowohl auf linearen als auch auf nichtlinearen Ansätzen basieren. Nicht-brechende Wellenlasten auf Strukturelemente einer OWEA werden im Allgemeinen mit der weit verbreiteten Morison-Gleichung (Morison 1952) bestimmt, die empirisch ermittelte Lastkoeffizienten für den Trägheits- und Zähigkeitsterm impliziert (C_D , C_M). Für brechende Wellen werden unter anderem Ansätze nach Goda (1966) oder Wienke (2005) verwendet, sowie die Morison-Gleichung mit dem „Slamming“ Koeffizienten (C_S). Die Übertragung bestehender Lastansätze, die vielfach auf Erkenntnissen aus Wellenkanälen beruhen, auf die Bedingungen in der Natur ist jedoch aufgrund der dreidimensionalen Struktur des natürlichen Seegangs (Mittendorf 2005) nur bedingt möglich, so dass die einwirkenden Lasten zumeist überschätzt werden. Mit Hilfe der im Testfeld speziell an der Tripod- und Jacketstruktur gewonnenen Messdaten sollen die bestehenden Lastmodelle validiert und für die Strukturen optimiert werden. Die Ergebnisse werden in einem später erfolgenden Schritt in ein modular aufgebautes Bemessungspaket (Teilprojekt 8) implementiert, das die Bemessung von OWEA unter serienproduktionstechnischen Gesichtspunkten als Zielsetzung hat.

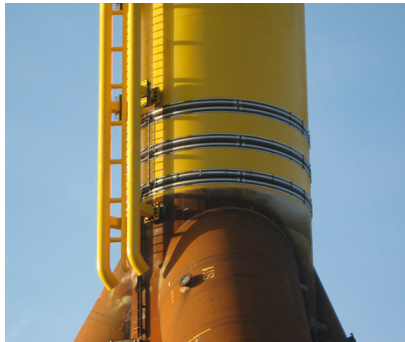
Weiterhin werden für die Kombination von Wind- und Seegangslasten Ansätze zur Ermittlung und Kombination beider Lasten mit dem Schwerpunkt der Berücksichtigung der Korrelation weiterentwickelt. Die hoch aufgelöste Wind- und Seegangsmessung bei gleichzeitiger Aufzeichnung der Lasteinwirkung bietet die Möglichkeit der Validierung und weit reichenden Verbesserung bestehender Modelle.

Untersuchung und Optimierung der Wellenlastmodelle

Die im vorausgehenden Abschnitt beschriebenen Vorhaben bezüglich der optimierten Lastmodelle werden anhand von Naturmessungen im Testfeld alpha ventus und mit skalierten physikalischen Modellversuchen sowie hydra-numerischen Simulationen erarbeitet, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Im Rahmen von RAVE werden an dem mit Mess-Sensorik bestückten Tripod M7, der von der Firma *areva Multibrid* errichtet und im Testfeld installiert wurde, unter anderem Strömungs-, Wind-, Wellen- und Wasserdruckmessungen vorgenommen, um die Belastungen der Struktur zu erfassen. Weiterhin wird mit Dehnungsmessstreifen und Beschleunigungssensoren die Reaktion der Struktur auf die Belastungen aufgezeichnet. Die Messdosen für die Wasserdruckerfassung wurden innerhalb des Projektes im Juli 2008 vom Franzius-Institut installiert (Abbildung 1). Sie erfassen zum einen die Wasserstände entlang des Zylinderumfangs und geben zum anderen Aufschluss über starke lokale Druckänderungen, wie sie im Bereich von Ablösestellen auftreten. Entlang des Zentralrohrumfangs und entlang der Zylinderspanne wurden 30 Druckmessdosen (ursprünglich 32) an 3 horizontal verlaufenden Gummimanschetten als Vertikal- und Horizontalprofil um das Zentralrohr des Zylinders fixiert. Eine detaillierte Beschreibung der Sensoranordnung ist Hildebrandt et al. (2009) zu entnehmen.

Die zu erwartenden Naturdaten bezüglich der Wind- und Wellenlasten werden durch gezielte Modellversuche ergänzt, um die in der Natur überlagert auftretenden Einflussgrößen im Modell unter idealisierten, aber kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Neben derzeitigen Modellversuchen am Zylinder im Schneiderbergkanal des Franzius-Instituts (Abbildung 2) sind weiterführende großmaßstäbliche Versuche am Tripod im Großen Wellenkanal (GWK) mit Seegangslasten durch brechende und nicht-brechende Wellen für Anfang 2010 geplant. Neben den Messungen zu den Seegangslasten werden ebenfalls Versuche mit Gummimanschetten durchgeführt, um den Einfluss der Halterung auf die Messsignale abzuschätzen.



**Abbildung 1: Drei Messmanschetten
am Tripod M7**

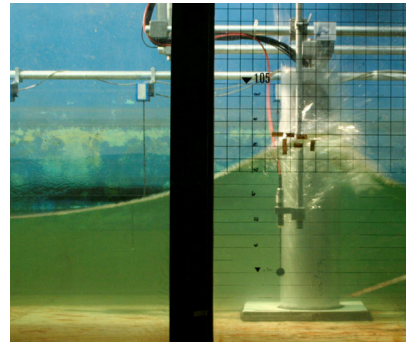


Abbildung 2: Wellenbrechen am Zylinder

Mit Hilfe der Versuche und Naturmessdaten werden CFD Modelle kalibriert, die kombiniert mit den Labor- und Testfeldergebnissen als hybrides Modell zur Weiterentwicklung der Berechnungsansätze dienen. Insbesondere mit den CFD Modellen lassen sich lokale Lasteinwirkungen für Detailuntersuchungen an der Tragstruktur untersuchen (Abbildung 3), um beispielsweise das Beulverhalten spezieller Bauteile oder den Spannungsverlauf in Knotenpunkten zu ermitteln. Dazu muss die Verteilung des dynamischen Drucks über den Umfang und die Höhe der Struktur bestimmt werden, um

möglichst genaue lokale Strukturmodelle erstellen zu können. Dies wird insbesondere auch für steile und brechende Wellen mit Berücksichtigung des Wellenaufbaus an der Tragstruktur untersucht. Letzteres ist beispielsweise für die Dimensionierung einer Zugangsplattform oder generell für auskragende Bauteile an der Anlage von entscheidender Bedeutung.

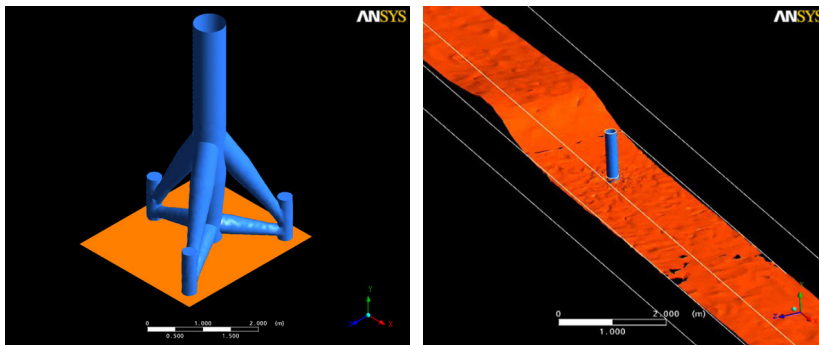


Abbildung 3: Tripod im Maßstab 1:10 im numerischen Modell zur Modellierung der Wellenlasten

UNTERSUCHUNG VON KOLKPHÄNOMENEN

Allgemeine Vorhabensbeschreibung und Zielsetzung

Am Fuße von Gründungsstrukturen von Offshore-Bauwerken kommt es bekanntermaßen in einer Vielzahl von Fällen zu Kolkphänomenen, welche durch das Vorhandensein der Struktur selbst und den daraus resultierende Veränderungen im natürlichen Strömungsregime im Bereich des Meeresbodens im Umfeld der Tragstruktur hervorgerufen werden. Die hochkomplexe Interaktion zwischen dem Seegang, durch Tide oder Wellen induzierte Strömungen, dem Meeresboden und der Struktur führen u.a. zu Effekten der Wirbelbildung, Turbulenzen und allg. lokal erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten, die letztlich zu einer Kolkbildungen um die Gründungsstruktur führen. Die bisher unzureichenden Kenntnisse über die genaue Entstehung und ggf. auftretenden Ausmaße von Kolken im Vorfeld der Installation meeres technischer Konstruktionen führen derzeit für die Bemessung von Gründungen für OWEA zu einer erheblichen Erhöhung der Sicherheitsfaktoren bei den Gründungsabmessungen.

Im Rahmen des Teilprojektes werden daher Untersuchungen zur lokalen Kolkentwicklung am Fuße der Gründungsstrukturen im Testfeld durchgeführt, ebenso wie Untersuchungen zur Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit der Offshore Rammpfähle sowie zu konstruktiven Maßnahmen zur Kolkreduktion. Letztlich sollen hierdurch Auswirkungen auf das Tragverhalten der Gesamtanlage ermittelt und ggf. geeignete Kolk-schutzmaßnahmen entwickelt werden, die zukünftig eine effizientere Gründung und nachhaltige Kolksicherung ermöglichen.

Untersuchung von Kolkphänomenen im Testfeld

Innerhalb des Forschungsvorhabens liegt der Fokus der Untersuchungen zur Kolkentwicklung auf den im Testfeld installierten OWEA vom Typ Tripod. Aufgrund der komplexen geometrischen Struktur dieses Gründungstyps können hier bisherige empirische Berechnungsansätze zur Kolkentwicklung, die in der Vergangenheit größtenteils für Monopiles oder Pfahlgruppen (vgl. Jacket-Plattform) entwickelt wurden, nur sehr

bedingt angesetzt werden und allenfalls für erste, sehr vereinfachende Abschätzungen herangezogen werden.

An dem mit Mess-Sensorik bestückten Tripod M7 werden neben o.g. auch Messungen der Kolkgenese an den Gründungspfählen sowie im näheren Umfeld der Anlage durch ein installiertes Messequipment des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt. Die Messungen erfolgen zum einen durch permanente Aufnahmen der Kolkiefen über insgesamt 19 Singlebeam-Echolote an der Struktur. Diese Messungen sollen zum anderen durch regelmäßig durchgeführte, großflächige Aufnahme des Meeresbodens im Nahbereich und im weiteren Umfeld der Anlagen mittels Multibeam-Echolot ergänzt werden.

Die Analyse und Bewertung der im Rahmen des Kolkmonitorings aufgenommenen Naturmessdaten erfolgen dann innerhalb des Teilprojektes 5 und dienen vornehmlich der Kalibrierung und späteren Validierung eines numerischen Simulationsmodells mittels CFD-Methoden zur Kolkentwicklung unter Wellen- und Strömungsbelastung an der Anlage, das im Rahmen dieses Teilprojektes weiterentwickelt wird. Weitere Untersuchungen zur Kolkentwicklung, die ebenfalls vornehmlich der Kalibrierung und Validierung des numerischen Modells dienen, erfolgen anhand physikalischer Modellversuche in zwei Modellmaßstäben. Zum einen wurden und werden Untersuchungen am Tripod sowie an vergleichsweise einfachen Strukturen wie dem Monopile im Wellenkanal des Franzius-Instituts (WKS) im Maßstab 1:40 durchgeführt, ebenso wie noch folgende Untersuchungen am Tripod im Großen Wellenkanal (GWK) im Maßstab 1:10.

Physikalische Modellversuche, derzeitige Untersuchungen

In bisherigen Modellversuchen wurden erste Untersuchungen zu Kolkvorgängen und Strömungsbildern am Modell-Tripod im WKS durchgeführt, ebenso wie Untersuchungen an Monopiles. Diese kleinskaligen Laborversuche dienen, neben der Gewinnung von Messdaten zur späteren Kalibrierung, ebenfalls zur Gewinnung von signifikanten Eingangsparametern zur Sensitivitätsanalyse für die darauf aufbauenden Modellversuche im GWK im großskaligen Maßstab.

Für die Untersuchungen wurde in den insgesamt 110 m langen Wellenkanal eine bewegliche Sohle (Sandbett) mit einer Fläche von 5,5 m² (2,50 m Länge x 2,20 m Breite des Kanals) und einer Tiefe von 0,4 m mit einer Anrampungen von 1:30 zur Gewährleistung eines nahezu ungestörten Welleneinlaufs über dem Untersuchungsbett eingebaut. Die Abbildung 4 verdeutlicht diesen Modellaufbau. Im Bereich der beweglichen Sohle können die zu untersuchenden Strukturen über eine feste Verbindung mit der Kanalsohle eingebaut werden.

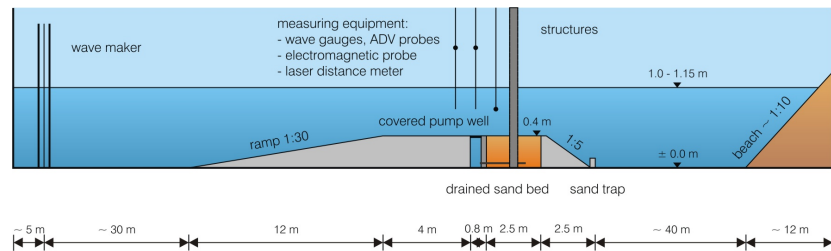


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus im 1:40 Modell im Wellenkanal, maßstabslos

Erste physikalische Vorversuche wurden mit zwei Monopiles mit Pfahldurchmessern von 150 mm und 50 mm durchgeführt, um Erfahrungswerte zu sammeln und um Ver-

gleiche mit den aus der einschlägigen Literatur bekannten Versuchsreihen zu gewinnen. Als Modellsand wurde ein eng gestufter Feinsand mit einer Korngröße von $d_{50} = 0,15$ mm verwendet, der auch für derzeitige und nachfolgende Untersuchungen im WKS eingesetzt wird. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Modellgranulaten und -größen sollen folgen.

Für die Untersuchungen zur Kolkbildung am Tripod unter Welleneinfluss wurde zunächst ein Modell aus Aluminium im Maßstab 1:40 gefertigt, das drehbar gelagert im Wellenkanal eingebaut wurde, um so die Drehrichtung der Standbeine zum Hauptwellenangriff zu variieren. Es wurden bisher zahlreiche Versuche zur Kolkbildung unter Wellen für die drei genannten Modelle durchgeführt, mit verschiedenen Konfigurationen von Wassertiefen d (60-75 cm), Wellenhöhen H und H_S (10-25 cm) und Wellenperioden T und T_P (1,0-3,0 s) für regelmäßige Wellen und Wellenspektren (JONSWAP).

Während der Versuche wurden die Strömungs- und Orbitalgeschwindigkeiten und die Veränderungen der Wellenhöhen an definierten Punkten permanent mittels ADV-Sonden, elektromagnetischer Sonden (EMS) und Wellendrahtpegeln aufgezeichnet. Die Kolkentwicklungen wurden jeweils nach einer definierten Wellenzahl mithilfe eines unter Wasser arbeitenden Laser-Distanzmessers aufgemessen. Das Messintervall beträgt hier, je nach Versuchsconfiguration, zwischen 500 und 1.000 Wellenzyklen, bei einer Gesamtversuchsdauer von jeweils 4.000-9.000 Wellenzyklen pro Versuch. Die Positionierung des Lasers erfolgt über eine programmierbare Messbühne (Abbildung 5), mit der das Messinstrument in drei Achsen automatisiert verfahren werden kann und so entweder kontinuierliche über der Sohle bewegte Bodenprofile aufnimmt oder an definierten Positionen punktweise Tiefenmessungen durchführt.

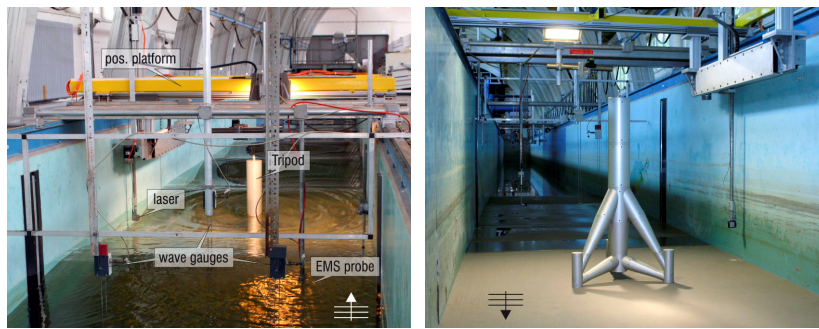
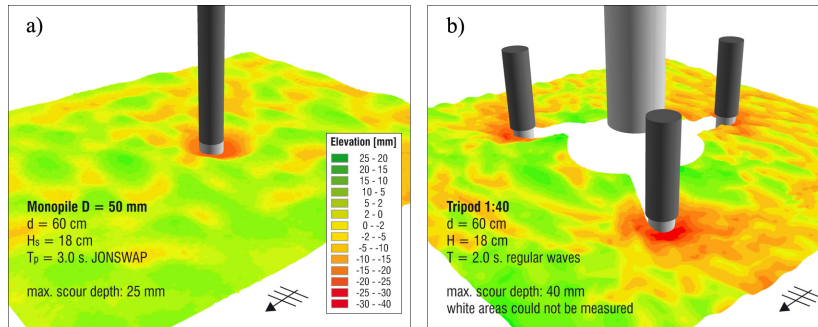


Abbildung 5: Messinstrumentierung und Modellaufbau für den Tripod im Wellenkanal

Die vertiefte Analyse der gemessenen welleninduzierten Kolkiefen und Ausmaße sowie der Strömungsvorgänge um den Tripod befindet sich derzeit in einer vertieften Bearbeitung. Dennoch lassen erste Ergebnisse der Untersuchungen mit den Monopiles auf eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Werten aus dem Modell und berechneten Kolkiefen schließen, wobei letztere auf empirischen Formeln aus der einschlägigen Literatur basieren.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft gemessene Kolkiefen und Sandprofile im Umfeld der Strukturen a) für einen Monopile mit $D=50$ mm und b) für den Tripod im Maßstab 1:40 nach jeweils 6.000 Wellenzyklen. Die jeweiligen Randbedingungen sind in den Abbildungen aufgeführt.



**Abbildung 6: Gemessene Kolke für zwei Testserien nach jeweils 6.000 Wellen:
a) Monopile D=50 mm und b) Tripod 1:40 (repräsentiert durch Turm und Standbeine).
Pfeile geben die Wellenrichtung im Kanal an.**

Entwicklung von Bodenmodellen und Kolkenschutzsystemen

Die Messungen im Testfeld und die Ergebnisse aus den Modellversuchen und den CFD-Simulationen dienen zur Verifizierung und Validierung von numerischen Bodenmodellen, die im Rahmen des Teilprojektes 5 vom Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE) der LUH neu entwickelt bzw. optimiert werden, und die die Berechnung der Tragfähigkeit von Offshore-Rammpfählen sowohl unter statischen als auch unter dem Einfluss zyklischer Lasten ermöglichen sollen.

Im Zuge der Entwicklung innovativer Kolkenschutzsysteme sollen weiterhin Kolkschutzketten aus mit Hochleistungsbeton gefüllten Körpern zum Einsatz kommen, die derzeit vom Institut für Baustoffe (IfB) der LUH erprobt werden. Hierfür werden spezielle textile Schalungen entwickelt, die eine kontinuierliche Betonage zusammenhängender Segmente ermöglichen. Im Zusammenhang mit den physikalischen Modellversuchen zur Kolkentwicklung soll die Wirksamkeit der Körpergeometrie analysiert und im Bezug auf eine Strömungsabschirmung und Minimierung der Kolkbildung optimiert werden

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des von der Leibniz Universität Hannover (LUH) in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Mitte 2008 gestarteten und vom BMU durch die Forschungsinitiative RAVE geförderten Forschungsprojektes GIGAWIND alpha ventus soll ein ganzheitliches Dimensionierungskonzept für OWEA-Tragstrukturen anhand von Messungen im Offshore-Testfeld alpha ventus erstellt werden, mit dem vorrangigen Ziel der Kostenminimierung und Effizienzsteigerung beim Bau der Anlagen. Zwei der insgesamt acht Teilprojekte wurden hier näher beschrieben und umfassen die Forschungsschwerpunkte Seegangbelastungen und Kolkphänomene an OWEA im Testfeld alpha ventus.

Für die Serienproduktion von OWEA werden im Rahmen des Forschungsprojektes Gigawind alpha ventus mit dem Teilprojekt 1 Methoden und Lastansätze für Seeganglasten analysiert und für die Teststrukturen optimiert. Anhand von Naturmessungen im Testfeld und mit Hilfe von Laborversuchen werden die maßgebenden Einflussparameter untersucht, um die Lastentwicklung an den Gründungsstrukturen genauer bestimmen zu können. Mit dem kombinierten Einsatz von numerischen Simulationen und Modellversuchen werden die Lastmodelle optimiert und diese schließlich mit Hilfe der Naturmessdaten validiert.

Im Rahmen des Teilprojektes 5 werden Untersuchungen zu Kolkphänomenen an Gründungsstrukturen für OWEA im Testfeld alpha ventus durchgeführt, die aus einer Kombination von Naturmessungen der Kolkiefen und -ausmaße, physikalischen Modellversuchen in zwei Maßstäben und der weiteren Entwicklung eines numerischen Modells zur Kolksimulation bestehen. Letztlich sollen hierdurch Auswirkungen auf das Tragverhalten der Gesamtanlage ermittelt und ggf. geeignete Kolkschutzmaßnahmen entwickelt werden, die zukünftig effizientere Gründungen ermöglichen.

Insgesamt wird angestrebt, den Bemessungsaufwand von OWEA durch die Integration unterschiedlicher Software-Tools mittels eines benutzerfreundlichen Simulations- und Bemessungspakets mit den erforderlichen Schnittstellen erheblich zu reduzieren. Die Implementierung von Erweiterungen wird durch einen modularen Aufbau im ganzheitlichen Dimensionierungskonzept ermöglicht.

FÖRDERRAHMEN UND DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung und Förderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Forschungsprojektes *GIGAWIND alpha ventus - LUH* (Förderkennzeichen 0325032).

SCHRIFTTUM

BMU: Neues Denken - Neue Energie, Roadmap Energiepolitik 2020 – Zehn Leitsätze, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Jan. 2009

GODA, Y., HARANAKA, S., KITAHATA, M.: Study on impulsive breaking wave forces on piles, Report Port and Harbour Technical Research Institute, 6 (5), 1– 30, 1966

HILDEBRANDT, A., STAHLMANN, A., SCHLURMANN, T.: Gigawind alpha ventus - Gesamtkonzept und Teilaspekte, 7. FZK-Kolloquium – Potentiale für die Maritime Wirtschaft, FZK, 2009

MITTENDORF, K., HABBAR, A., ZIELKE, W.: Zum Einfluss der Richtungsverteilung des Seegangs auf die Beanspruchung von OWEA. Gigawind Symposium Hannover, 2005

MORISON, J.R., O'BRIEN, M.P., JOHNSON, J.W., SCHAAF, S.A.: The force exerted by surface waves on piles. Petroleum Transactions, AIME, Vol. 189, 1950

SUMER, B.M., FREDSSØE, J.: The Mechanics of Scour in the Marine Environment. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002

WIENKE, J., OUMERACI, H.: Breaking wave impact force on a vertical and inclined slender Pile - theoretical and large-scale model investigations, Coastal Engineering 52 (2005), 435– 462., 2005