

# **ERKENNTNISSE ZUR KOLKBILDUNG AN TRIPOD OWEA-TRAGSTRUKTUREN**

## **AUS DEM GROSSSKALIGEN PHYSIKALISCHEN MODELL UND DER NATUR**

von

Arne Stahlmann<sup>1</sup>  
Torsten Schlurmann<sup>2</sup>

### **ABSTRACT**

Regarding foundations for offshore wind energy converters in deep water it is well known that in most cases scour phenomena occur around the structures. Due to the complexity of investigated tripod foundations, significant knowledge gaps in scour progression and its probable effects are given. Therefore, investigations on scour processes around complex foundation structures like the tripod are carried out. The investigation method consists of a unique combination of local scour monitoring as well as physical and numerical modeling, whereas the physical modeling part is carried out by means of 1:40 laboratory tests and 1:12 large-scale physical model tests in wave flumes. The latter ones are briefly described within this paper. Compared to first in-situ measured scours in the test site, at least a good qualitative agreement of the modeled scour depths and evolutions could be shown.

### **1. EINLEITUNG**

Im Rahmen des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland erfolgte im Sommer 2009 die finale Inbetriebnahme des ersten deutschen Offshore-Windparks alpha ventus 45 km nördlich der Insel Borkum. Zur Erlangung wichtiger Erkenntnisse zur Strukturoptimierung für zukünftige Offshore-Windparks widmet sich das an der Leibniz Universität Hannover angesiedelte und im Rahmen der Forschungsinitiative RAVE (Research at Alpha Ventus) vom BMU (Förderkennzeichen 0325032) geförderte interdisziplinäre Verbundforschungsprojekt GIGAWIND alpha ventus der Testfeldforschung und wissenschaftlichen Begleitforschung in alpha ventus. Innerhalb des Gigawind-Projektes befasst sich das hier skizzierte Teilprojekt 5 der Untersuchung und wissenschaftlichen Interpretation der im Testfeld auftretenden Kolkphänomene um die Gründungsstrukturen der OWEA, mit dem Schwerpunkt der Kolkbildungen an den vergleichsweise geometrisch komplexen Tripod-Gründungen im Testfeld.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, stahlmann@fi.uni-hannover.de

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing. habil., Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, schlurmann@fi.uni-hannover.de

## **2. FORSCHUNGSHINTERGRUND UND METHODIK**

### **2.1 Kolkproblematik an Offshore-Bauwerken**

An den Gründungsstrukturen von Offshore-Bauwerken im Allgemeinen und von Offshore-Windenergieanlagen im Speziellen kommt es, je nach Einflussrandbedingungen, meist zu einer mehr oder minder ausgeprägten Kolkbildung, die in Abhängigkeit von der Ausbildungsform, der Größenordnung und den Strukturparametern zu einer Gefährdung der Standsicherheit der gesamten Anlagen führen kann. Hervorgerufen werden Kolkphänomene meist durch lokale Änderungen im natürlichen Strömungsregime im Bereich des Meeresbodens an und im nahen Umfeld einer Struktur, bedingt durch eine hochkomplexe Interaktion zwischen dem Seegang, tide- und welleninduzierter Strömung, dem Meeresboden und der Struktur selbst, welche wiederum zu lokal erhöhten Bodenschubspannungen und einer erhöhten Sediment-Mobilität im Strukturbereich führen.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden bereits zahlreiche Untersuchungen zu Kolkphänomenen an Offshore-Strukturen unternommen, aus denen meist empirische Formulierungen zur Kolkgenese entwickelt wurden. Daten wurden hier vornehmlich aus Laborversuchen in Wellen- und Strömungskanälen oder kombinierten Einrichtungen erhalten, siehe z.B. SUMER & FREDSE (2002). Aufgrund des Fehlens von Naturmessdaten war eine Validierung der Ergebnisse aus den kleinskaligen Laborversuchen im Bezug auf den Naturmaßstab jedoch nur selten möglich. Des Weiteren lag der Fokus der Untersuchungen hier zumeist auf vergleichsweise einfachen Strukturen wie dem Monopile oder Pfahlgruppen.

### **2.2 Methodik und Zielsetzung**

Ein Hauptziel des hier behandelten Teilprojektes ist es, vertiefte Erkenntnisse über die Kolkentwicklung an komplexen OWEA-Gründungsstrukturen wie dem Tripod zu erlangen und die Vorhersagemöglichkeiten zu verbessern, um so zukünftig Unsicherheiten bei der Bemessung zu verringern und effiziente Gründungsabmessungen zu erzielen, die ggf. mit entsprechenden Kolksicherungsmaßnahmen einhergehen. Aufgrund der vergleichsweise komplexen geometrischen Struktur des Tripods können bisherige empirische Berechnungsansätze für die zeitliche und räumliche Kolkgenese hier nur sehr bedingt angesetzt und allenfalls für erste, sehr vereinfachende Abschätzungen herangezogen werden.

Die Methodik im Teilprojekt besteht aus einem kombinierten Untersuchungsprogramm, das physikalische Modellversuche in Wellenkanälen in den Maßstäben 1:40 und 1:12, anschließende numerische Untersuchungen anhand von CFD-Simulationen sowie die wissenschaftliche Interpretation und der Abgleich mit Naturmessdaten zur Kolkentwicklung aus dem Testfeld alpha ventus beinhaltet.

## **3. KOLKPHÄNOMENE AN TRIPOD-GRÜNDUNGSSTRUKTUREN**

### **3.1 Physikalische Modellversuche, Versuchsaufbau und Durchführung**

Die Laborversuche im Maßstab 1:40 erfolgten bereits in 2009 im Wellenkanal des Franzius-Instituts (WKS) zur qualitativen und phänomenologischen Untersuchung der auftretenden Strömungs- und Kolkbildungsprozesse. Hierbei wurde ein aus Aluminium gefertigtes Tripod-

Modell innerhalb einer in den Wellenkanal eingebrachten beweglichen Sohle (Feinsand,  $d_{50}=0,15$  mm) befestigt und mit regelmäßigen Wellen und Wellenspektren gemäß skalierten Seegangsrandbedingungen von der sich im Bereich des Testfeldes befindlichen FINO1 Plattform belastet. Die Messung der Kolkentwicklungen um die Struktur erfolgte mittels eines unter Wasser arbeitenden, verfahrbaren Laser-Distanzmessers als räumliche Tiefenaufnahme nach definierten Wellenzügen. Die Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten um die Struktur erfolgten punktuell mittels verfahr- und positionierbarer ADV-Sonde. Die Ergebnisse der Versuche gingen hierbei, neben der phänomenologischen Untersuchung, auch in die Bestimmung der Eingangsparameter für die großskaligen Modellversuche ein. Detaillierte Informationen zu Aufbau, Versuchsdurchführung und Ergebnissen der Laborversuche sind STAHLMANN & SCHLURMANN (2010) zu entnehmen.

Zur vertieften Analyse der Kolkphänomene um die Tripod-Struktur unter minimierten Laboreffekten, insbesondere im Bezug auf die Skalierungsproblematik des Modellsedimentes, wurden in 2010 großskalige physikalische Modellversuche im Maßstab 1:12 im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste in Hannover durchgeführt. Hierzu wurde eine bewegliche Sohle (ebenfalls Feinsand,  $d_{50}=0,15$  mm) in einer Schichtdicke von 1,2 m und einer horizontalen Fläche von 175 m<sup>2</sup> in den Kanal in Kombination mit entsprechenden Anrampungen vor und hinter dem Untersuchungsgebiet (Neigungen 1:20 und 1:15) eingebaut (Abbildung 1). Das Tripod-Modell (mit ähnlichen Strukturabmessungen wie der Prototyp) wurde dabei in der Mitte des horizontalen Untersuchungsgebietes der beweglichen Sohle bei einer Fixierung an der Kanalsohle eingebunden. Zur Untersuchung zweier Anströmrichtungen der drei Standbeine bzw. Gründungspfähle des Tripods im Bezug auf die Haupt-Wellenangriffsrichtung (0°: ein Bein, 60°: zwei Beine zur Wellenangriffsrichtung) konnte das Modell in zwei Positionen um die vertikale Achse gedreht eingebaut werden.



Abbildung 1: Tripod-Modell im Maßstab 1:12 im GWK mit Unterkonstruktion (links), Messbühne und Fächerecholot (Mitte), Teil der Mess-Sensorik (rechts)

Zur Untersuchung der Kolkentwicklung und der Strömungsbilder um die Struktur wurde das Modell mit umfangreicher Mess-Sensorik ausgestattet. Wellenhöhen wurden mittels Wellendrahtpegeln, Orbitalbahnen der Wellenzüge zum späteren Abgleich mit numerischen Modellen mittels elektromagnetischer Sonden (2D) an den Kanalwänden aufgezeichnet. Zur Messung der Strömungsverhältnisse um die Struktur dienten permanent installierte Flügelsonden (Schiltknecht, 1D) sowie vier an einem vertikalen Profil installierte ADV Messsonden (Nortek Vector und Vectrino+, 3D). Letztere konnten über die Befestigung des Profils an einer Messbühne über dem Kanal in drei Achsen und so an verschiedene Positionen um die

Struktur herum verfahren werden. Die Messung der Porenwasserdruckentwicklungen im Sediment erfolgte anhand von Drucksensoren, die an unterschiedlichen Stellen um und im nahen Umfeld der Gründungsrohre appliziert wurden. Zur Messung der zeitlichen und räumlichen Kolkentwicklung wurden zum einen an verschiedenen Positionen installierte und permanent messende Punktecholote verwendet. Zum anderen erfolgten die großflächigen Kolktaufnahmen mittels eines an der Messbühne befestigten Fächerecholotsystems (Reson SeaBat) nach definierten Wellenzyklen, welches um die Struktur herum verfahren wurde. An den Gründungsrohren des Tripods und damit in Bereichen in denen die zuvor genannten Messverfahren aufgrund ihrer Funktionsprinzipien nicht eingesetzt werden konnte, erfolgte die Kolkmessung über in die Rohre integrierte und durch Plexiglas-Fenster nach außen gerichtete Kameras. Durch alle Messverfahren wurde erreicht, dass das Wasser für die Messungen im Kanal verbleiben konnte, um so eine Nicht-Beeinflussung des Sedimentes zu gewährleisten.

Als Randbedingungsparameter für die durchgeführten Testserien dienten ausgewählte, skalierte Randbedingungen aus den vorherigen Experimenten im Maßstab 1:40. Die Wellenrandbedingungen lagen dabei in einem Bereich von  $H_m/H_s = 0,51-0,77$  m und  $T_m/T_p = 2,78-5,52$  s. Es wurden regelmäßige Wellen und Wellenspektren (JONSWAP) für die Drehrichtungen  $0^\circ$  und  $60^\circ$  bei einem konstanten Wasserstand von 2,5 m untersucht. Die maximale Wellenzahl für die insgesamt zwölf Versuchsserien betrug 4000 Wellen pro Serie, abhängig von den eingesteuerten Wellenrandbedingungen.

### 3.2 Versuchsergebnisse

Ausgewählte Messergebnisse beispielhafter Versuchsserien sind Abbildung 2 zu entnehmen, für Versuche mit regelmäßigen Wellen und JONSWAP Spektren sowie Drehrichtungen der Standbeine von  $0^\circ$  und  $60^\circ$  nach jeweils 3000 Wellenzyklen. Für ausgewählte Punkte sind die Kolkiefen an bzw. unter der Struktur als relative Tiefen  $S/D$  angegeben, mit  $D$ =Durchmesser der Gründungspfähle. Werte sind als maximale Tiefen angegeben. Riffelbildungen im Modell sind aufgrund der Maßstabszahl als vernachlässigbar anzusehen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Charakteristik der lokalen und globalen Kolkentwicklung stark von der Drehrichtung der Struktur im Bezug auf die Welleneinlaufrichtung abhängt. Lokale Kolkiefen an den Pfählen weisen im Bereich hinter der Struktur leicht höhere Werte als vor der Struktur auf. Regelmäßige Wellen mit Werten von  $H_m/T_m$  gleich der Werte von  $H_s/T_p$  der untersuchten JONSWAP Spektren führten zu einer vergleichsweise höheren Sediment-Mobilität um die Struktur. Dennoch liegen die Kolkiefen an den Pfählen und unterhalb der Struktur in einem vergleichbaren Wertebereich.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Kolke aufgrund der Komplexität der Tripod-Struktur nicht ausschließlich an den Gründungspfählen auftreten, sondern auch im nahen Umfeld bzw. unterhalb der Struktur. Letztgenannte Kolkstellen können dabei zudem größere Tiefen erreichen, als direkt an den Gründungspfählen gemessen. Im Bezug auf die Laborversuche im kleinskaligen 1:40 Modelle lassen sich bei direktem Vergleich der gemessenen Kolkiefen für gleiche, skalierte Wellenrandbedingungsparameter nach einem (nahezu) Erreichen der Gleichgewichtskolkiefe lokal bis zu 50 Prozent höhere Tiefen im großskaligen Modell feststellen. Diese Größenordnungsunterschiede können durch die bekannte Skalierungsproblematik der Sedimente im physikalischen Modell, einschließlich beeinflussender Riffelbildungen im kleinskaligen Modell erklärt werden.

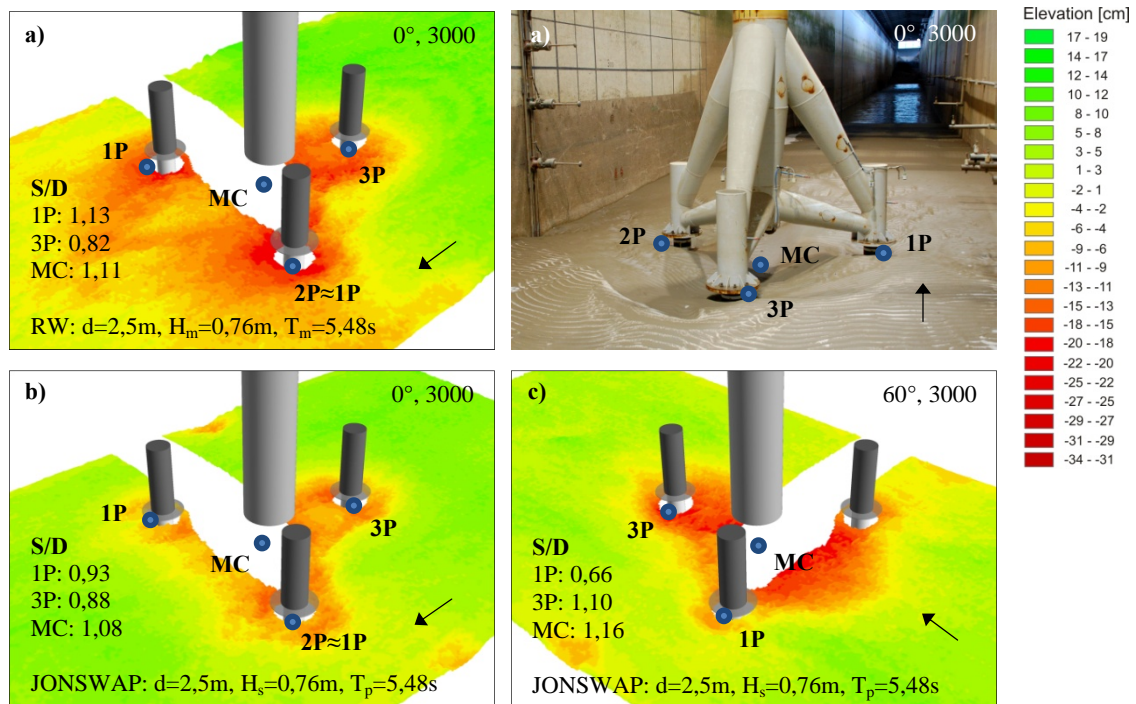


Abbildung 2: Sohlhöhen und rel. Kolk-tiefen S/D für drei Testserien im GWK nach 3000 Wellen für a) regelmäßige Wellen, Drehrichtung 0°, b) JONSWAP Spektrum, Drehrichtung 0°, c) JONSWAP Spektrum, Drehrichtung 60°. Wellenparameter und S/D Werte sind den Abbildungen zu entnehmen.

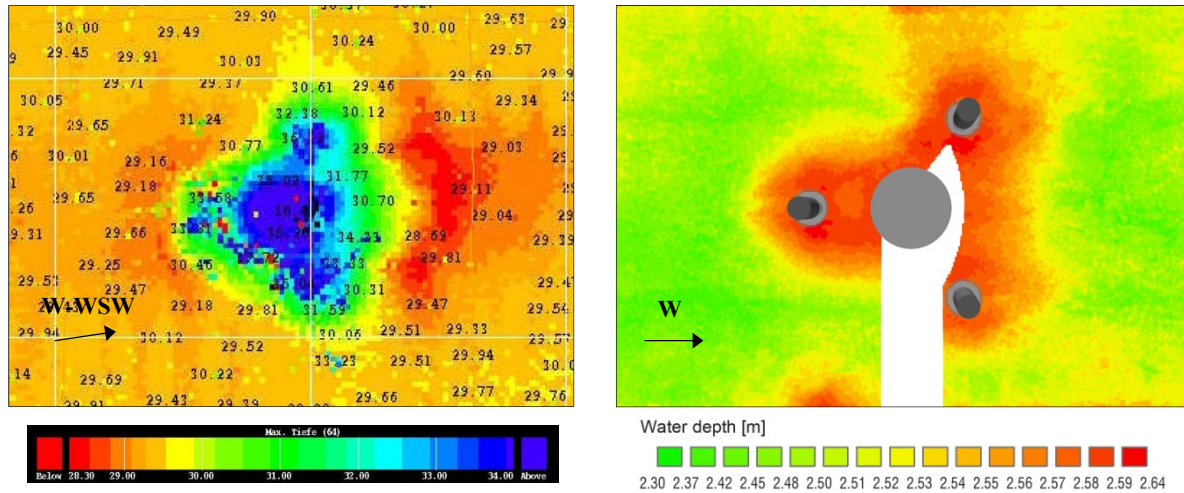
### 3.3 Kolkmessungen im Testfeld alpha ventus

Im Rahmen der RAVE Initiative werden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Kolkmessungen um die Tripod-Struktur M7 im Testfeld alpha ventus durchgeführt. Die Messungen erfolgen dabei zum einen über in Intervallen von wenigen Minuten messende Punktecholote, die an den Standrohren und unterhalb des Zentralrohres der Anlage installiert sind, zum anderen über mehrmals jährlich durchgeführte Messfahrten zur Aufnahme der Kolk- und Sohlveränderungen im nahen Umfeld der Struktur mittels Fächer-Echolotsystem.

Abbildung 3 zeigt einen qualitativen Vergleich realer, im Testfeld gemessener Kolk-tiefen an der Tripod-Struktur M7 und einer Testserie im GWK im Maßstab 1:12. Die Naturmessdaten wurden im April 2010 im Zuge einer Messkampagne des BSH erhoben sind als unkorrigierte 1x1 m Tiefenwerte dargestellt (Wassertiefe rund 30 m). Die maximal gemessenen Kolk-tiefen an den Gründungspfählen der M7 liegen hierbei zwischen rund 2,5 und 3,3 m sowie zwischen 5,5 und 5,8 m unterhalb des Zentralrohres. Nach LAMBERS-HUESMANN & ZEILER (2010) sind diese Tiefen als (momentane) Endkolk-tiefen anzusehen. Hieraus ergeben sich relative Kolk-tiefen S/D von 1,1-1,4 an den Gründungspfählen und maximale Werte von 2,5 unterhalb des Zentralrohres, mit D = Durchmesser der Gründungspfähle. Die S/D Werte der Modellversuche weisen damit geringere Größenordnungen auf, vor allem im Bereich unterhalb des Zentralrohres. Als Gründe hierfür sind Vereinfachungen in den Modellversuchen zu nennen, insbesondere im Bezug auf die Seegangbelastungen (reale Bedingungen inkl. Tidenströmung vs. 2D Wellenkanal) und generelle Skalierungseffekte. Diese werden nun mithilfe



numerischer Untersuchungen weiter erforscht. Insgesamt lässt sich im Bezug auf die Messungen im großskaligen Modellversuch jedoch feststellen, dass eine zumindest qualitativ gute Übereinstimmung zwischen den Messergebnissen bei der lokalen und globalen Kolkentwicklung vorliegt. Unabhängig von den Modellskalen treten maximale Kolke und Sediment-Akkumulationen an gleichen Stellen an und im nahen Umfeld der Tripod-Struktur auf.



Multibeam Survey April 2010, 1x1 m, unkorrigierte Werte.  
Quelle: Lambers-Huesmann & Zeiler, BSH 2010

JONSWAP Spektrum:  $d=2,5$  m,  $H_S=0,72$  m,  $T_p=5,52$  s

Abbildung 3: Qualitativer Vergleich realer Tiefenmessungen am M7 Prototypen im alpha ventus Testfeld (links) und Tiefenwerte aus den 1:12 Modellversuchen (rechts). Haupt-Wellenangriffsrichtungen sind den Abbildungen zu entnehmen.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Untersuchungen zu Kolkphänomenen an Tripod OWEA Gründungsstrukturen anhand großskaliger physikalischer Modellversuche im GWK im Rahmen des hier beschriebenen Teilprojektes in GIGAWIND alpha ventus haben gezeigt, dass die Ausbildung und Entwicklung der Kolke an der Struktur direkt durch die Wellenparameter und die Ausrichtung der Struktur im Bezug auf eine Haupt-Wellenangriffsrichtung beeinflusst werden. Kolke treten hierbei nicht nur direkt an den Gründungspfählen, sondern auch im Umfeld bzw. unterhalb der Struktur auf. Dieser Umstand muss bei Betrachtung der bodenmechanischen Eigenschaften und einer Boden-Bauwerk-Interaktion berücksichtigt werden. Trotz vereinfachter Randbedingungen und Skalierungseffekte konnten die bisher im Testfeld aufgenommenen Kolkentwicklungen qualitativ gut im Modell reproduziert werden.

#### 5. SCHRIFTTUM

LAMBERS-HUESMANN, M., ZEILER, M.: Personal communication on scours measured in the German offshore test site alpha ventus, 2010  
 STAHLMANN, A., SCHLURMANN, T.: Physical Modeling of Scours around Tripod Foundation Structures for Offshore Wind Energy Converters. Proc. of the International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, 5. Juli 2010  
 SUMER, B.M., FREDSE, J.: The Mechanics of Scour in the Marine Environment. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2002