

## Untersuchungen zum primären Schallschutz bei Rammvorgängen von Tiefgründungen für Offshore-Bauwerke

Frank Dahlhaus<sup>1</sup>, Jochen Großmann<sup>2</sup>, Frank Adam<sup>1</sup>, Katja Dombrowski-Daube<sup>1</sup> Burkhard Schuldt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TU Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Deutschland, Email: Frank.Dahlhaus@mabb.tu-freiberg.de

<sup>2</sup> GICON - Großmann Ingenieur Consult GmbH, 01219 Dresden, Deutschland, Email: j.grossmann@gicon.de

### Einleitung

Bei der Errichtung von Offshore Bauwerken werden Pfähle mit Hilfe von Impulsrammen in den Meeresboden eingebracht. Aus Sicht des Naturschutzes ist es nötig, die Schallemissionen beim Herstellen von Offshore-Pfahlgründungen zu verringern. Um die geforderten Grenzwerte der Schalldrücke von 160 dB (Einzelereignis-Schalldruckpegel) in 750 m Entfernung einzuhalten [1], sind technische Schallschutzmaßnahmen, primärer oder sekundärer Natur, nötig. Als primärer Schallschutz sind konstruktive Maßnahmen direkt an der Schallquelle, die zu einer Reduktion der ausgesendeten Schallwellen führen, definiert. Sekundäre Schallschutzmaßnahmen vermindern die Ausbreitung der ausgesendeten Schallschwingungen. Stand der Technik sind sekundäre Maßnahmen wie der Blasenschleier, Schlauchhüllen oder der Kofferdamm [2].

Inhalt des Manuskripts ist ein, auf der Auswahl geeigneter Werkstoffe und Werkstoffkombinationen, basierender neuer Ansatz, zur primären Schallminderung. Bei der Entwicklung handelt es sich um einen Stahl-Beton-Verbund Rammpfahl. Um die Ergebnisse zu quantifizieren, werden theoretische und experimentelle Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie zur Entwicklung des neuartigen Pfahltragwerkes aus druck- und schlagfesten Verbundwerkstoffen präsentiert. Als Ergebnis der Studie kann festgehalten werden, dass der primäre Schallschutz ein großes Potential zur Verringerung der Schallemissionen im Offshore-Bereich besitzt [3].

### Primärer Schallschutz

Zielstellung der Maßnahmen zum primären Schallschutz ist es die hervorragenden Dämpfungseigenschaften des entwickelten Verbund-Rammpfahles zu nutzen, um die Schallemission bei der Rammung von Pfählen deutlich zu reduzieren. Zur Umsetzung dieses Ziels erfolgte der Entwurf eines Pfahltragwerkes mit einem äußeren und inneren Stahl-Mantelrohr als Tragkonstruktion für eine mit Fasern verstärkte Betonmischung. Verbesserte Schalldämpfungseigenschaften dieser Konstruktion im Vergleich zu klassischen Stahl-Rammpfählen sollen es ermöglichen ohne jegliche zusätzlichen sekundäre Schallschutzmaßnahmen die nach aktuellen Standards geforderten maximalen Schalldrücke einzuhalten.

Zur Umsetzung der beschriebenen Konstruktion erfolgten unterschiedliche Experimente zur Schallminderung als auch den sonstigen mechanischen Eigenschaften der Verbundkonstruktion. Primäres Ziel der Versuche war die Feststellung der Schallemission. Sekundär galt es zu

klären ob die Materialien mit guten bis sehr guten Dämpfungseigenschaften auch den, beim Rammschlag eingebrachten, Belastungen und den Belastungen bei einer Betriebsdauer von mindestens 20 Jahren des Offshore-Bauwerks standhalten.

### Hammerschlagversuch

Zur Validierung der Simulation erfolgte zusätzlich zu Ultraschallmessungen, welche die Schallemissionseigenschaften der Pfahlkonstruktion qualitativ erfassten, ein sogenannter Anschlagversuch im Wasserbecken (Abb. 2). Dieser Versuch bildete das Rammereignis im Labormaßstab nach. Drucksensoren erfassten dabei den Schalldruck. Genoppter Schaumstoff am Beckenrand verhinderte Reflektionen der Schallwellen und der Lasteintrag erfolgte mit einem Freifallhammer. Um die Vergleichbarkeit mit den Berechnungen vorauszusetzen galt es alle Randbedingungen im Versuche entsprechend dem Berechnungsmodell zu erfüllen.

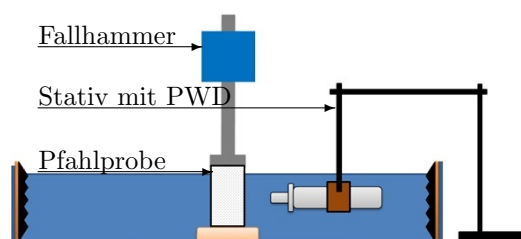


Abbildung 1: Versuchsaufbau des Hammerschlagversuchs

### Berechnungsmodell

Mit dem Programm ANSYS wurde ein 2D axialsymmetrisches Berechnungsmodell erstellt. Die Simulation eines einzelnen Rammschlages erfolgt zum Zeitpunkt  $t = 2\text{ s}$ . Als Ausgabegrößen werden die Dehnungs- und Spannungsverläufe im Pfahl sowie die Druckausbreitung im Fluid generiert.

Bei der Berechnung der Schwingungsantwort des Betonzylinders und des Schalldruckpegels in einem Abstand  $r$  zum Lasteintrag müssen die Wellengleichungen und die Bewegungsgleichungen der Struktur unter Ansatz der erforderlichen Rand- und Übergangsbedingungen gelöst werden.

Zur numerischen Berechnung erfolgte die Reduktion des Zylinders auf eine axialsymmetrische Eigenschwingungsform, woraus sich ein zweidimensionales Modell ergibt. Somit ist der Schall nur von der Wassertiefe  $z$  und dem Abstand  $r$  zur Schallquelle abhängig [4]. In Anlehnung

an den Hammerschlagversuch beschreibt das entwickelte Modell einen stehenden Kreiszyylinder in einem mit Wasser gefüllten Prüfbecken. Mithilfe der Messergebnisse aus dem Versuchs konnte eine Validierung als auch Kalibrierung der Berechnungen erfolgen. Das gesamte Berechnungsmodell besteht aus sogenannten Fluid 29, Fluid 129 und Plane 42 Elementen. Um die Pfahlstruktur mit dem Fluid zu verbinden, gilt es eine Übergangsbedingung zu generieren. Diese sogenannte Fluid-Struktur-Interaktion erfolgte mittels Koppellelementen zwischen den Plane 42 Elementen des Pfahles und den Fluid 29 Elementen des Wassers. Der Lasteintrag an der Oberkante der Plane 42 Elemente fand mittels eines transienten Stoßes statt. Der Betrag der Kraft und die Periodendauer sind dabei den Lastbedingungen des Validierungsexperiments nachempfunden.

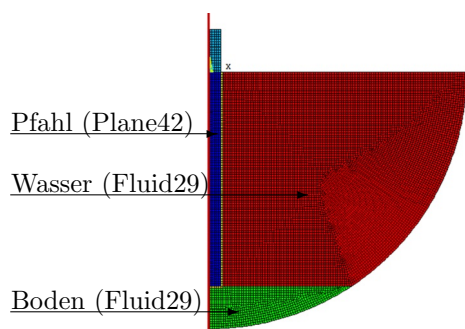


Abbildung 2: Berechnungsmodell

Der Pfahl selbst ist in  $y$ -Richtung gelagert und kann sich in radialer Richtung verformen. Durch diese radiale Verformung erfolgt eine Kompression des Wassers. Somit ist eine Übertragung von Druckkräften in das umgebende Medium durch Verformung des Pfahls möglich.

Zur Diskretisierung des Wassers fand das Fluid 29 Element Anwendung. Durch Variation der Elementdefinition kann das Element auch als Koppellelement zwischen Festkörperstruktur und Flüssigkeit selbst dienen. Typische Anwendungsbereiche des Fluid 29 Elements sind akustische Berechnungen. Die Materialeigenschaften des Elements sind als kompressibel und dünnflüssig definiert. Dichte und Druck sind innerhalb des Elementes einheitlich.

Fluid 129 ist ein Begleitelement zu Fluid 29. Es wird zur Simulation des Berechnungsrandes benutzt und definiert eine periodische Randbedingung ohne Effekte der Reflektion. Dabei wird die zweidimensionale Grenze des Fluidbereichs abgebildet. Fluid 129 ist durch eine symmetrische Steifigkeit und eine Dämpfungsmatrix definiert.

Die Modellierung des Rammpfahls erfolgte mit dem Plane 42 Element. Es kann sowohl als Flächenelement für ebene Spannungen, ebene Verzerrungen als auch als 2D-axialsymmetrisches Element genutzt werden.

## Zusammenfassung & Ausblick

Im Rahmen dieser Studie konnte die technische und wirtschaftliche Machbarkeit des neuartigen Pfahltragwerkes für die Gründung von Offshore Windenergieanlagen

gezeigt werden. Im Mittelpunkt der werkstofflichen Entwicklung stand die Auswahl geeigneter Materialien bzw. Kombinationen mit dem Ziel, einen schlagfesten und zugleich schallabsorbierenden Betonwerkstoff herzustellen.

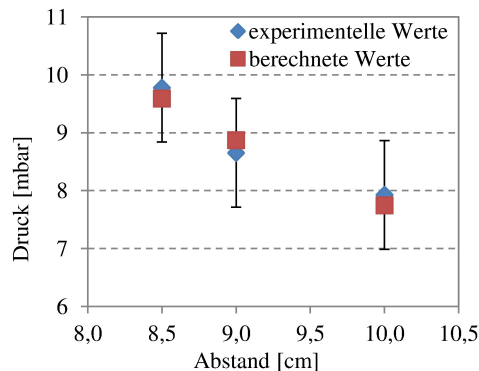


Abbildung 3: Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungen

Optimierungen mittels der Variation von Bindemitteltypen, Betonzusatzstoffen, Gesteinskörnungen sowie durch die Abstufung der Anteile bzw. Stoffverhältnisse waren erfolgreich und führten zu einer Balance zwischen der Festigkeit und der Schalldämpfung. Alle durchgeführten Untersuchungen und verfolgten Optimierungsansätze zeigen neue materialeitige Möglichkeiten auf, um größere Materialdämpfung bei zugleich hohen Druckfestigkeiten zu erreichen und damit eine höhere Schallminderung zu erzielen.

Durch den Einsatz eines neuartigen Betons, der auf einem zementfreien mineralischen Bindersystem beruht, kann nicht nur die Zielgröße Schallemission optimiert werden, sondern es lässt sich auch eine deutlich verbesserte  $\text{CO}_2$ -Bilanz des Werkstoffes und somit der gesamten Pfahlkonstruktion erreichen. Hervorzuheben ist, dass bei den neuen Materialkombinationen vorrangig Reststoffe zum Einsatz kommen. Dies eröffnet weitere ökologische Vorteile in Bezug auf den Reststoffverwertungsgrad bzw. die Ressourcenschonung.

## Literatur

- [1] BSH: Leitsätze für die Anwendung der Eingriffsregelung innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone und auf dem Festlandsockel im Rahmen von § 58 Abs. 1 Satz 2 BNatSchG (2010)
- [2] Bellmann M.; Gündert, S.; Remmers, P.: Offshore Messkampagne 1 (OMK 1) für das Projekt BORA im Windpark BARD Offshore 1 (2014), Ergebnisbericht PTJ-Projekt
- [3] Dahlhaus, F.; Großmann J.; Adam F.; Dombrowski-Daube K.; Schuldt, B.: Entwicklung von leichtbaugerechten Pfahltragwerken mit schallreduzierender Wirkung für Tiefgründungen von Offshore-Bauwerken (2014), Ergebnisbericht PTJ-Projekt
- [4] Möser, M.: Technische Akustik Springer, Berlin, 2007