Primäre Schallminderung bei Offshore-Pfahlrammungen: Zusammenspiel von Pfahl und Hammer.

Elin Klages, Stephan Lippert, Otto von Estorff
Technische Universität Hamburg, Institut für Modellierung und Berechnung
Denickestr. 17, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: mub@tuhh.de

Einleitung

Im Jahr 2020 wurden in Europa mit 80,5% hauptsächlich Monopiles als Fundamente für Offshore-Windenergieanlagen verwendet [1]. Werden diese in den Meeresboden gerammt, strahlt der Pfahl Schall in das umliegende Wasser ab. Die so entstehenden Unterwasser-Schalldrücke können für Meereslebewesen gefährlich hohe Werte annehmen [2]. In Deutschland existieren, ebenso wie in zahlreichen anderen Ländern weltweit, aus diesem Grund Grenzwerte für resultierende Schalldruckpegel. Um diese Vorgaben zu erfüllen, wurden bisher vor allem sekundäre Schallminderungsmaßnahmen eingesetzt, deren Ziel es ist, die Schallausbreitung im Wasser zu vermindern. Motiviert durch die Entwicklung hin zu größeren Pfählen, welche häufig zu höheren Schallpegeln führen, wächst das Interesse an Alternativen und Ergänzungen zur sekundären Schallminderung. [3]

Zur Pfahlrammung trifft der beschleunigte Fallkörper des Hammers wiederholt auf die darunter liegende Schlaghaube, welche die Energie an den Pfahl überträgt. Dadurch werden Schallwellen im Pfahl angeregt, welche wiederum in das umliegende Wasser abstrahlen. Die Energieübertragung vom Hammer zum Pfahl wird in diesem Kontext häufig durch den Rammimpuls dargestellt, d.h. als Kraft- oder Geschwindigkeitskurve über der Zeit. Es ist bekannt, dass eine Verlängerung dieses Impulses, bei gleicher übertragener Energie, tendenziell zu geringeren Schalldruckpegeln führt, auch wenn sich die Quellen bezüglich der Abschätzung des Ausmaßes der Schallminderung widersprechen [4, 5, 6]. Auf dem Prinzip der Impulsverlängerung basiert auch das MNRU, Blue Piling und IHC Pulse [3].

In dem vorliegenden Beitrag wird der Einfluss von Hammer- und Pfahldesign auf die Schallentstehung, Ausbreitung und Abstrahlung diskutiert. Insbesondere der Einfluss der Interaktion von Hammer und Pfahl auf den Rammimpuls werden anschließend anhand eines analytischen sowie eines Finite-Elemente-Modells (FE-Modells) genauer betrachtet.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Überlegungen bauen auf Beobachtungen aus dem Projekt SilentHammer (FKZ 0324262A) auf [7]. Die verwendeten Beispiele beziehen sich alle auf einen zylindrischen Pfahl, den Hammerentwurf dargestellt in Abbildung 1 [8] und Untersuchungen mithilfe eines umfangreich validierten FE-Modells [9]. Beim Letzteren handelt es sich um ein rotationssymmetrisches Modell, wodurch sich auch alle folgenden Diskussionen auf rotationssymmetrische Beobachtungen beziehen. Alle Betrachtungen beziehen sich auf eine konstante Rammenergie E_0 von 3500 kJ. Im Folgenden dargestellte Veränderungen der Rammimpulse und Schalldruckpegel sind dadurch nicht auf eine Veränderung der Rammenergie zurückzuführen.

Theoretische Vorüberlegungen

Sowohl der Pfahl als auch die Hammerkomponenten sind am Stoß beteiligt, ihre Interaktion wirkt sich damit auf den Rammimpuls, d.h. die Anregung von Schallwellen im Pfahl, aus. Hierbei spielen mindestens Masse und Steifigkeit des Hammers sowie die Steifigkeit des Pfahls eine Rolle.

Durch die Verformung des Pfahls in axialer Richtung, im Folgenden mit z bezeichnet, ist auch eine Wellenausbreitung in axialer Richtung naheliegend. Zwangsläufig verformt sich der Pfahl auch in radialer Richtung, wodurch überhaupt Schall in das umliegende, schubspannungsfreie Wasser abgestrahlt werden kann. Im Folgenden wird angenommen, dass Quasilongitudinalwellen die dominant auftretende Wellenform sind. Die Geschwindigkeit der Schallwellen ist demnach unabhängig von der Frequenz und ergibt sich zu $c_z = \sqrt{E/\rho}$ [10].

Abbildung 1: Modifizierter Hammerentwurf basierend auf dem Entwurf aus [8] mit vergrößerter Schlaghaube zur Möglichkeit der Untersuchung des Einflusses unterschiedlich großer Pfähle. Der Pfahl (d = 6,5 m) ist geschnitten dargestellt um eine vollständige Ansicht der Schlaghaube zu ermöglichen.

Am Fuß und anschließend am Kopf des Pfahls werden die Wellen reflektiert. Dadurch überlagern sich Wellen und Eigenmoden können auftreten. Durch die Einschränkung der Rotationssymmetrie sind für diesen Beitrag ausschließlich axiale Eigenmoden relevant.

Die Abstrahlung der sich im Pfahl ausbreitenden Wellen hängt von der Frequenz und der Form des Pfahls ab. Die gekrümmte Oberfläche des zylindrischen Pfahls führt dazu, dass niedrige Frequenzen schlechter abgestrahlt werden als höhere. Eine Anregung von Schallwellen in das den Pfahl umgebende Wasser findet für niedrige Frequenzen zwar auch statt, d.h. dass die Fluidpartikel an der Grenzschicht durch die schwingende Oberfläche zu Schwingungen angeregt werden, diese klingen allerdings zumindest teilweise in der Nähe des Pfahls wieder ab, werden also nicht vollständig abgestrahlt.

Die Abstrahlung lässt sich dabei über das Abstrahlmaß ($10\log_{10}(\sigma)$) beschreiben, wobei der Abstrahlgrad σ die abgestrahlte Leistung im Verhältnis zu einer konphas schwingenden ebenen Fläche gleicher Oberfläche und gleicher mittlerer Schnelle darstellt [10].

Wird der Einfachheit halber, ein unendlich langer, zylindrischer Pfahl, der in Abhängigkeit von z harmonisch schwingt, dessen Verformungen also rotationssymmetrisch sind, angenommen, hängt das Abstrahlmaß von der radialen Wellenzahl k_r und dem Radius des Pfahls r_P ab [10]. Der Zusammenhang ist in Abbildung 2 dargestellt. Über $k_z = \sqrt{k_0^2 - k_r^2}$, [10], und bei gegebenen Schallgeschwindigkeiten, lässt sich die Abhängigkeit auch auf $k_z\, r$ und bei dem erwähnten Beispielpfahl auch auf die Frequenz beziehen. Hier bezieht sich k_z auf die Wellenzahl der sich im Pfahl in $z-$Richtung ausbreitenden Wellen, k_r auf die Wellenzahl der radialen Komponente der abgestrahlten Welle, k_0 auf die abgestrahlte Welle und r auf den Zylinderradius des unendlich langen Zylinders.

Aus Abbildung 2 lässt sich schließen, dass die Abstrahlung bis über 100 Hz für den hier verwendeten Pfahl, nur unvollständig erfolgt. Diese Beobachtung unterstützt die Annahme, dass kürzere Impulse zu höherer Schallabstrahlung führen dahingehend, dass längere Impulse eher niedrige Frequenzen anregen, welche nur unvollständig abgestrahlt werden. Analog bestätigt die gezeigte Abhängigkeit auch, dass Pfähle größeren Durchmessers tendenziell besser abstrahlen, da sich der Bereich der nur unvollständig abgestrahlten Frequenzen weiter nach unten verschiebt. Anders ausgedrückt ließe sich auch sagen: Umso größer der Pfahldurchmesser, umso länger muss der Impuls sein damit das Frequenzspektrum im Bereich der schlecht abgestrahlten Frequenzen liegt.

Einfluss des Pfahlwiderstandes

Zur ersten Einschätzung des gekoppelten Einfluss des Hammer- und Pfahldesigns, werden in diesem Abschnitt Untersuchungen mithilfe eines einfachen analytischen Modells nach *Deeks und Randolph* diskutiert. Das Modell ist dargestellt in Abbildung 3 und lässt u.a. Untersuchungen bzgl. der Steifigkeit des Pfahls zu.

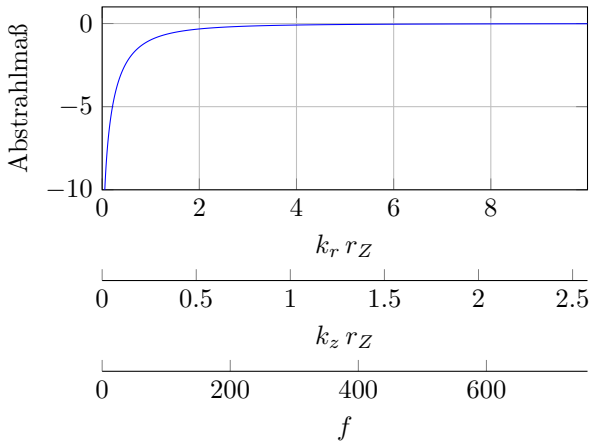

Abbildung 2: Abstrahlmaß für einen unendlich langen Zylinder dessen Schwingungsform nur von z abhängt, [10], übertragen auf die axiale Wellenzahl für Wasser (c_0=1500m/s) und auf die Frequenz f für den Beispielpfahl (d=6,5 m; c_z=6000 m/s).

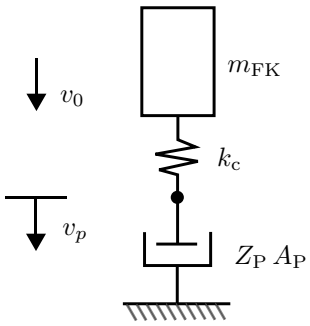

Abbildung 3: Analytisches Modell des Hammers und Pfahls [11]. Hier beziehen sich m_FK und v_0 auf die Masse und Anfangsgeschwindigkeit des Fallkörpers, k_c auf die Steifigkeit des Hammers und Z_P und A_P auf die spezifische Impedanz und den Querschnitt des Pfahlkopfes.

Der zugehörige Rammimpuls in Abhängigkeit vom Pfahlquerschnitt A_P ergibt sich zu, [11]

$$v_\mathrm{P}(t, A_\mathrm{P}) = v_0\, e^{-\frac{k_c}{2Z_\mathrm{P}A_\mathrm{P}}\,t}\, \frac{k_c m_\mathrm{FK}}{Z_\mathrm{P}^2 A_\mathrm{P}^2} \left(\sqrt{\frac{k_c m_\mathrm{FK}}{Z_\mathrm{P}^2 A_\mathrm{P}^2} - \frac{k_c^2 m_\mathrm{FK}^2}{4 Z_\mathrm{P}^4 A_\mathrm{P}^4}}\right)^{-1} \sin\left(\sqrt{\frac{k_c m_\mathrm{FK}}{Z_\mathrm{P}^2 A_\mathrm{P}^2} - \frac{k_c^2 m_\mathrm{FK}^2}{4 Z_\mathrm{P}^4 A_\mathrm{P}^4}}\, \frac{Z_\mathrm{P} A_\mathrm{P}}{m_\mathrm{FK}}\, t\right) \qquad (1)$$

solange $(k_c m_\mathrm{FK})/(Z_\mathrm{P}^2 A_\mathrm{P}^2) < 4$ ist. Dies ist für alle folgenden Untersuchungen gegeben. Die Masse m_FK des Fallkörpers entspricht mit 288 t dabei der Masse aus dem Hammerentwurf aus Abbildung 1. Die Anfangsgeschwindigkeit v_0 ergibt sich damit zu 4,93 m/s. Für die Steifigkeit des Hammers k_c wurden 20,78 GN/m verwendet um den Referenz-Rammimpuls des Hammers, bestimmt über das FE-Modell und dargestellt in Abbildung 1, nachzubilden. Die spezifische Pfahlkopfimpedanz Z_P lässt sich über die charakteristische Impedanz $Z_0 = c\,\rho_0$ abschätzen. Aufbauend auf diesen Werten wurde der Pfahlquerschnitt A_P und damit der Pfahlwiderstand um 50% erhöht bzw. verringert. Die Ergebnisse sind dargestellt in Abbildung 4.

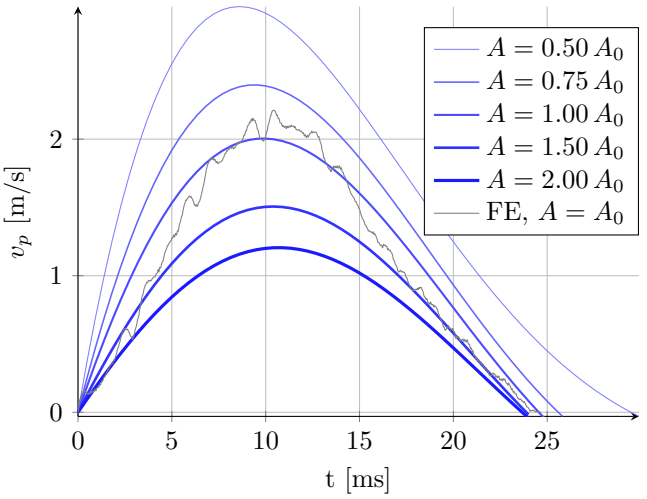

Abbildung 4: Rammimpuls in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Pfahls bestimmt über das analytische Modell. Der Referenzimpuls ist angenähert an den Impuls aus dem FE-Modell für den Hammerentwurf.

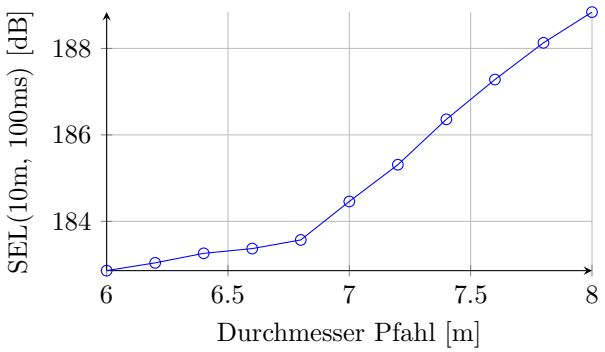

Abbildung 5: Der über die Wassertiefe gemittelte SEL in 10 m Entfernung zum Pfahl in Abhängigkeit vom Pfahldurchmesser.

Die hier beispielhaften Ergebnisse zeigen eine klare Entwicklung hin zu flacheren und kürzeren Impulsen bei einer Zunahme des Pfahlquerschnitts A_P. Da das hier verwendete Modell den Hammer und Pfahl stark vereinfacht, wird im nächsten Abschnitt der, hier nicht berücksichtigte, Einfluss der Kontaktfläche von Hammer und Pfahl anhand des FE-Modells untersucht.

Einfluss der Kontaktfläche

Die Kontaktfläche der Schlaghaube mit dem Pfahl nimmt Einfluss auf die Verformung der Schlaghaube und damit auf die Interaktion zwischen Pfahl und Hammer. Um diesen Effekt für den gezeigten Hammer zu untersuchen, wurde das oben eingeführte FE-Modell verwendet, [9], welches es ermöglicht das Hammer- und Pfahldesign detailliert zu berücksichtigen. Hierfür wurde der Pfahldurchmesser von $d = 6\,\mathrm{m}$ und $d = 8\,\mathrm{m}$ in 20 cm Schritten variiert und die zugehörigen Rammimpulse $v_p(t)$ sowie der über die Höhe gemittelte Schallereignispegel (SEL) in 10 m Entfernung zum Pfahl bestimmt. Der Kontakt des Pfahls mit der Schlaghaube, dargestellt in Abbildung 1, verschiebt sich durch den größer werdenden Durchmesser weiter nach außen. Aus Abbildung 5 lässt sich erkennen, dass der SEL mit wachsendem Pfahldurchmesser, trotz gleicher Rammenergie, teilweise erheblich ansteigt. Die resultierenden Rammimpulse der beiden Grenzfälle sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Abbildung enthält außerdem die zugehörigen Frequenzspektren, welches gerade im Zusammenhang mit dem ebenfalls dargestellten, frequenzabhängigen Abstrahlmaß wichtig ist.

Anhand der Ergebnisse lässt sich zum einen der Effekt aus Abbildung 4 erkennen: Mit zunehmendem Pfahldurchmesser verkürzt sich der Impuls und flacht, zumindest im Mittel, ab. Es wird aber auch deutlich, was sich über das analytische Modell nicht untersuchen ließ, dass lokale Schwankungen auftreten, die möglicherweise auf eine veränderte Bewegung der Schlaghaube zurückzuführen sind. Dadurch verändert sich das Frequenzspektrum, ebenfalls dargestellt in Abbildung 6, sodass mehr Energie im Bereich der höheren Frequenzen liegt welche nach Abbildung 2 im Vergleich effizienter abgestrahlt werden.

Diskussion der Ergebnisse

Der in Abbildung 5 gezeigte Anstieg des SELs durch zunehmende Pfahldurchmesser lässt sich möglicherweise durch die drei folgenden Ursachen erklären:

Erstens strahlen Pfähle größeren Durchmessers, vermutlich ähnlich zu unendlich langen Zylindern, niedrigere Frequenzen effektiver ab. Dies wird aus Abbildung 2 für $k_z\,r$ deutlich.

Zweitens führt der hier verwendete Hammer möglicherweise dazu, dass der veränderte Kontakt von Pfahl und Schlaghaube zu mehr Energie im höheren Frequenzbereich führt. Letzteres ist vermutlich auf das hier verwendete Schlaghaubendesign im Speziellen, welches für einen Pfahl mit $d = 6,5\,\mathrm{m}$ erfolgte, und nicht zwangsläufig auf einen höheren Durchmesser im Allgemeinen zurückzuführen. Diese Beobachtung verdeutlicht den Einfluss den der Pfahl bei der Verwendung eines bestimmten Hammers auf die Schallanregung hat.

Drittens deuten die Ergebnisse aus Abbildung 4, welche mithilfe des analytischen Modells erstellt wurden, darauf hin, dass ein größerer Pfahlquerschnitt durch den erhöhten Widerstand den Rammimpuls verkürzt, d.h. hin zu höheren Frequenzen verschiebt, welche wiederum effizienter abgestrahlt werden.

Ob und wenn ja welche der drei möglichen Ursachen ausschlaggebend für die dargestellte Zunahme des SELs ist, kann an dieser Stelle noch nicht gesagt werden. Auffällig ist allerdings auch, dass die Rammimpulse in Abbildung 3 sowie 6 abflachen. Um die Rammbarkeit des Pfahls sicherzustellen, müsste an dieser Stelle möglicherweise die Rammenergie erhöht werden, d.h. der Unterwasserschall würde sich zusätzlich erhöhen.

Fazit und Ausblick

Die diskutierten Beobachtungen bestätigen den signifikanten Einfluss des Rammimpulses und des Pfahldurch-

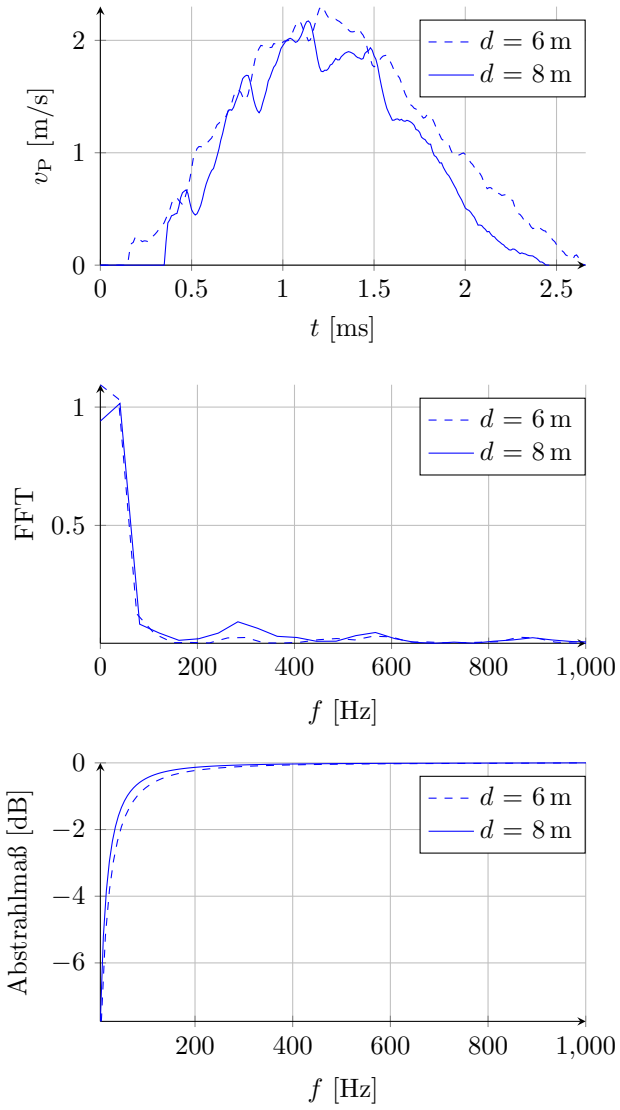

Abbildung 6: Die Rammimpulse bei einem Pfahldurchmesser von 6 m und 8 m sowie das dazugehörige Frequenzspektrum und Abstrahlmaß nach Abbildung 2.

messers auf die Höhe der Unterwasser-Schalldruckpegel trotz gleichbleibender Rammenergie und zeigen damit das Potential welches das gezielte Design von Hammer und Pfahl für die Schallminderung haben kann. Es zeigt sich allerdings auch die zunehmende Schwierigkeit der Schallminderung bei immer größer werdenden Pfählen, die sich möglicherweise sowohl auf die Schallentstehung als auch Schallabstrahlung negativ auswirken. Gerade wenn zusätzlich berücksichtigt wird, dass Pfähle größerer Dimension, durch mehr Masse und einen höheren Bodenwiderstand, mehr Rammenergie erfordern und auch dadurch schon tendenziell zu höheren Schallpegeln führen.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen außerdem deutlich, dass es für den Hammerentwurf relevant ist variable Pfahldurchmesser zu berücksichtigen, weil die Interaktion von Pfahl und Hammer sich ebenfalls auf den Rammimpuls auswirkt. Der Einsatz einer weiteren Hammerkomponente, welche unter anderem die Kontaktflächen mit Hammer und Pfahl für das jeweilige Szenario verbessern könnte, wäre ebenfalls denkbar.

Literatur

[1] Ramírez, L.; Fraile, D.; Brindley, G., Offshore wind in Europe: Key trends and statistics 2020, WindEurope, 2021.

[2] Thomsen, F.; Lüdemann, K,; Kafemann, R.; Piper, W., Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish, biola, Hamburg, Germany on behalf of COWRIE Ltd, 2006

[3] Koschinski, S.; Lüdemann, K., Noise mitigation for the construction of increasingly large offshore wind turbines, Bundesamt für Naturschutz (BfN), 2020

[4] Elmer, K.-H.; Betke, K.; Neumann, T., Standardverfahren zur Ermittlung und Bewertung der Belastung der Meeresumwelt durch die Schallimmission von Offshore-Windenergieanlagen SCHALL 2, Leibniz Universität Hannover, 2007

[5] Heitmann, K., Vorhersage des Unterwasserschalls bei Offshore-Rammarbeiten unter Berücksichtigung von Schallminderungsmaßnahmen. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2016.

[6] Klages, E.; von Pein, J.; Lippert, S.; von Estorff, O., Primäre Schallminderung bei Offshore-Pfahlrammungen durch Veränderung des Rammimpulses. DAGA 2019 Proceedings, 2019, pp. 787-790

[7] Klages, E.; Lippert, S.; von Estorff, O., Untersuchung primärer Maßnahmen zur Minderung der Unterwasser-Schallabstrahlung bei der Rammung von Gründungspfählen: Akustische Optimierung der Hammerkomponenten mittels numerischer Berechnungsmodelle (SilentHammer), Technische Universität Hamburg, 2021

[8] Klages, E.; Lippert, S., von Estorff, O., Formoptimierung eines Impulshammers zur Schallminderung bei Offshore-Pfahlrammungen. In 46. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2020), 588-591

[9] von Pein, J.; Lippert, S.; von Estorff, O., Validation of a finite element modelling approach for mitigated and unmitigated pile driving noise prognosis. The Journal of the Acoustical Society of America, 149(3) (2021), 1737-1748.

[10] Möser, M.; Kropp, W., Körperschall, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

[11] Deeks, A. J.; Randolph, M. F., Analytical modelling of hammer impact for pile driving. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 17.5 (1993), 279-302.