Dynamische Probebelastungen Offshore – Erkenntnisse zur Datenerfassung und Auswertung

J. Fischer, M. Fritsch, P. Middendorp

1. Einleitung

Seit dem Beschluss der Bundesregierung zu Beginn des neuen Jahrtausends, den Ausbau der Offshore-Windenergie zu forcieren, wurden in den vergangenen rd. fünf Jahren zahlreiche Offshore-Windenergieanlagen (OWEAs) in der deutschen Nord- und Ostsee installiert. Mitte 2013 konnte in Deutschland durch die bereits installierten OWEAs eine Leistung von rd. 520 MW produziert werden. Für die kommenden Jahre bzw. Jahrzehnte existieren Zielvorgaben von rd. 10.000 bis 25.000 MW Leistung aus Windenergie offshore, gleichbedeutend mit einem Ausbau der OWEAs in der deutschen Nord- und Ostsee.

Um die Windenergieanlagen fest mit dem Baugrund zu verankern, wurden bisher als Verankerungselemente nahezu ausschließlich offene Stahlgroßrohrpfähle verwendet. Im Rahmen der Zertifizierung einer OWEA bzw. eines Offshore-Windparks (OWP) fordert das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in seinem Standard Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen – Anwendungshinweise: "Generell sind dynamische Pfahlprobebelastungen an mindestens 10 % der Anlagenstandorte durchzuführen, dabei mindestens an zwei Standorten jedes geotechnischen Standorttyps in dem Windparkareal einen Nachweis der axialen Pfahltragfähigkeit, aufgeteilt in Mantelreibung und Spitzendruck" [BSH, 2012].

Bei einer dynamischen Probebelastung wird ein Pfahl mit einem sehr kurzen Stoßimpuls belastet. Beispielsweise durch das Auftreffen des Rammhammers auf den Pfahlkopf, wird dieser kurzzeitig belastet. Der Rammimpuls läuft in der Folge als Dehnwelle vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß, wird hier reflektiert und läuft zurück zum Pfahlkopf. Auf der Grundlage der in dieser Zeit gemessenen Beschleunigung und Dehnung am Pfahlkopf kann in einem nachfolgenden Schritt die Tragfähigkeit des Pfahles mit einem erweiterten Verfahren mit Modellbildung (signal matching) berechnet werden.

2. Messtechnik

2.1. Sensoren

Zur Erfassung der Dehnwelle werden üblicherweise Sensoren am Pfahlkopf des Gründungspfahles installiert. Die Messgeber bestehen hierbei standardmäßig aus mindestens zwei fest mit dem Pfahl verbundenen Dehnungs- und Beschleunigungsaufnehmern, die gegenüberliegend (um 180° versetzt) angebracht werden. Abbildung 1a zeigt auf der linken Seite den Standardsensor der Firma Allnamics BV, bestehend aus einem Dehnungsmessstreifen (hinten bzw. oben rechts) und einem Beschleunigungssensor (vorne, bzw. unten rechts). Dieses Sensorenpaar ist nicht wasserdicht und somit ausschließlich über Wasser zu verwenden. Das Sensorenpaar wird üblicherweise über eine Schraubverbindung fest mit dem Stahlrohrpfahl verbunden. Alternativ kann das Sensorenpaar z. B. auf einer im Voraus aufgeschweißten Stahlplatte fixiert werden. Für weitere Details zur Sensoranbringung sei hier auf [Fischer et al., 2011] verwiesen.

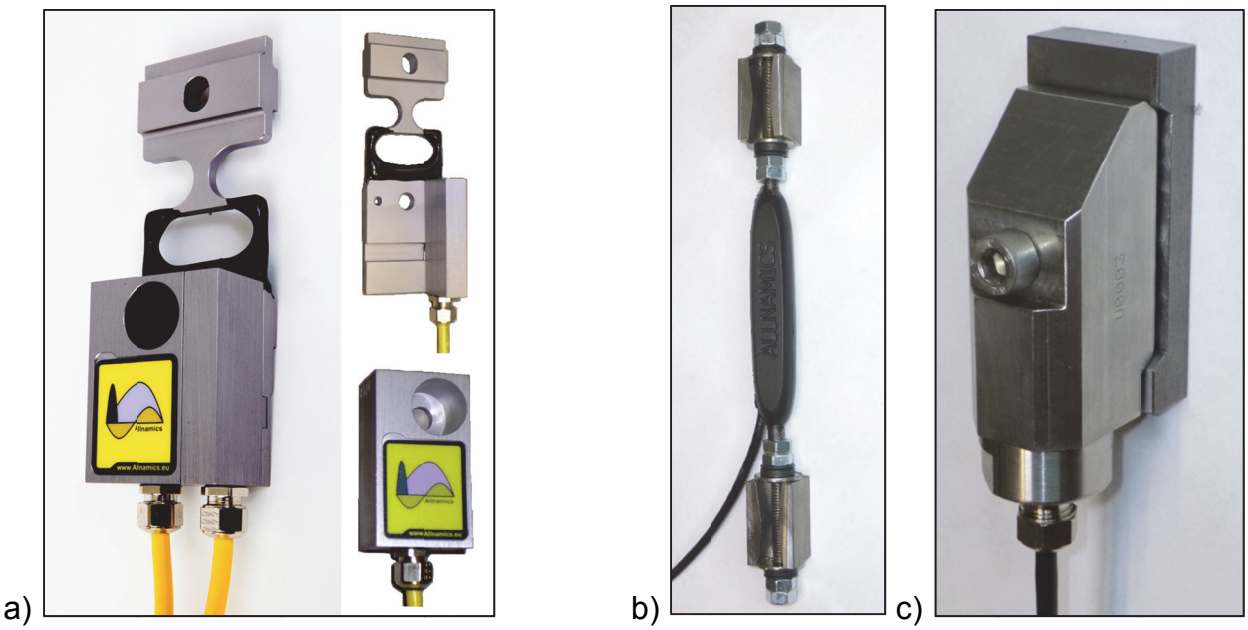

Abbildung 1: a) Kombinierter Dehnungs- und Beschleunigungssensor (Standardsensoren). b) UW-Dehnungssensor für große Wassertiefen, c) UW-Beschleunigungssensor für große Wassertiefen (System Allnamics BV, Niederlande)

Auf der rechten Seite von Abbildung 1 ist der jeweilige Sensor für den Unterwassereinsatz dargestellt (UW-Sensor). Beide Sensoren werden üblicherweise durch angeschweißte Stahlplatten fest mit dem Pfahl verbunden. Abbildung 2 zeigt die an einen Stahlgroßrohrpfahl applizierten Sensoren.

Abbildung 2: Sensoren für große Wassertiefen appliziert an einem Großrohrpfahl offshore (System TNO, Niederlande)

Üblicherweise wird bei einer mit den beschriebenen Sensoren bestückten Offshore-Pfahlrammung der gesamte Rammprozess gemessen/überwacht (rammbegleitende Messung). Somit könnte beispielsweise für jeden einzelnen, aufgezeichneten Rammschlag die Tragfähigkeit zu diesem Zeitpunkt der Rammung durch 'signal matching' ausgewertet werden.

Um den möglichen Ausfall einzelner Sensoren kompensieren zu können, sollte sinnvollerweise ein redundantes Messsystem installiert werden. Wie beschrieben, besteht ein Messsystem aus insgesamt zwei gegenüberliegend angebrachten Sensorpaaren. Bei einer Messkampagne offshore, sollten somit insgesamt vier Sensorenpaare, bestehend aus vier Beschleunigungsaufnehmern und vier Dehnungsmessstreifen, am Pfahl installiert werden. Die Sensorenpaare werden häufig an den Viertelspunkten des Pfahles (90° versetzt) angebracht. Um eine ebene Dehnwellenfront (siehe z. B. [Fritsch, 2008]) voraussetzen zu können, ist üblicherweise zwischen Pfahlkopf und Messebene ein Abstand von ≥ 1,5 · D (D = Durchmesser des Pahls) zu wählen. Bei der Rammung von Großrohrpfählen offshore hat sich jedoch gezeigt, dass bereits ab einem Abstand zwischen Pfahlkopf und Sensoren von ≥ 1,0 · D eine ebene Dehnwellenfront existiert. Die Lage der Messgeber an einem Offshore-Großrohrpfahl zeigt beispielhaft Abbildung 3. Die Kabel von jeweils zwei Sensorpaaren werden in einer Verteilerbox zusammengeführt. Von diesem Verteiler aus läuft ein Kabel beispielsweise bis an Deck des Installationsschiffes. Die gesamte in Abbildung 3 dargestellte Konfiguration ist für große Was-

sertiefen ausgelegt. An Deck des Installationsschiffes wird das Kabel über einen zweiten Verteiler an einen Messwertaufnehmer (PDR) angeschlossen.

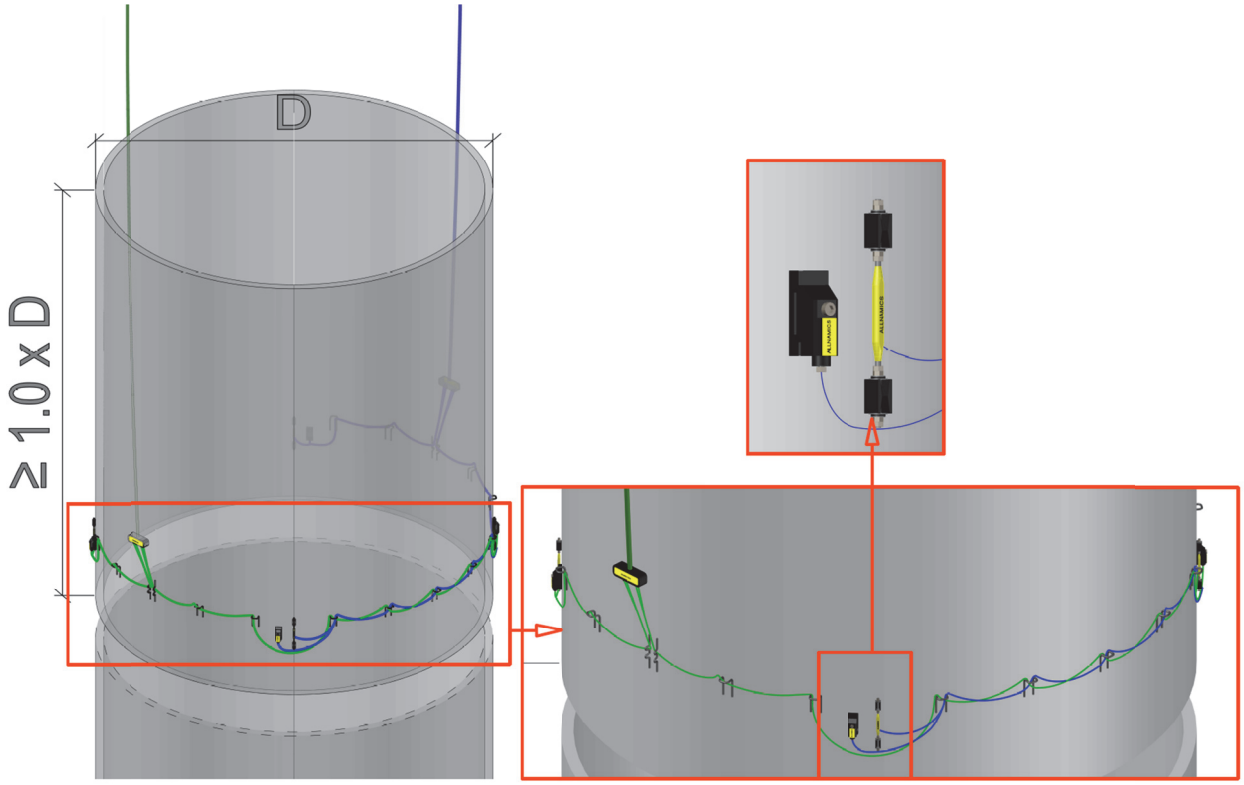

Abbildung 3: Lage der Sensoren an einem Großrohrpfahl offshore

2.2. Messwertaufnehmer (PDR)

Der Messwertaufnehmer (PDR) der Firma Allnamics (vgl. Abbildung 4) wurde als Vielzweck-Messgerät zur Durchführung aller gängigen dynamischen Pfahlprüfmethoden entwickelt. Aufgezeichnet werden kann:

- Der gesamte Rammprozess bei der Impuls-Pfahlrammung als sogenannte rammbegleitenden Messungen (PDA)
- Der gesamte Rammprozess bei der Vibrations-Pfahlrammung als sog. vibrationsbegleitende Messung (VDA)
- Jeder Einzelschlag bei einer dynamischen Probebelastung (DLT)
- Jeder Einzelschlag bei einem Rapid-Load-Tests (RLT)
- Die Pfahlkopfgeschwindigkeit v(t) bei einer 'low-strain' Integritätsprüfung
- Etc.

Im Aufzeichnungsmodus werden die Messdaten üblicherweise sowohl intern im Messgerät (PDR) als auch per Funk- oder Datenkabelübertragung auf einem Baustellencomputer gespeichert.

Abbildung 4: Messwertaufnehmer (PDR)

Die Eigenschaften des PDR können wie folgt beschrieben/aufgelistet werden:

- Funk- oder Kabelverbindung zu einem Computer (z. B. Laptop)
- 4-Kanal Messung je PDR
- Einstellbare Abtastrate bis zu 50 kHz pro Kanal
- 24-Bit A/D Wandlung
- Zusätzliche interne Festplatte zur Datensicherung
- Betriebsdauer im Batteriemodus: 6 Std. im Einsatz, 16 Std. im Ruhezustand
- Robuste Konstruktion, einfache Kabelfixierung, hohe Witterungsbeständigkeit
- Ausgestattet mit USID – Universal Sensor Information Device (Intelligentes Sensor-Informationen Gerät)
- Automatischer Sensor-Check (vor, während und nach der Rammung)
- PC-Erfassungssoftware mit umfangreichen Optionen zur Weiterverarbeitung der Daten im Lieferumfang enthalten

2.3. Messkonfigurationen

Je nach Anforderung bzw. Messaufgabe kann eine unterschiedliche Konfiguration zwischen Messwertaufnehmer (PDR), Sensoren und Baustellennotebook gewählt werden. Abbildung 5 zeigt vier verschiedene Konfigurationen für spezifische Messaufgaben.

Für den beschriebenen Zustand der Messung der Dehnwelle eines unter Wasser gerammten Offshore-Gründungspfahles ist die Konfiguration C zu wählen. Jeweils zwei Sensorenpaare werden an einem frei hängenden Unterwasserverteiler (Verteiler-Box) angeschlossen. Ein analoges Datenkabel führt von der unter Wasser Verteiler-Box zu einer zweiten und mit dem PDR verbundenen Verteiler-Box, beispielsweise an Deck

des Installationsschiffes. Die Übertragung zum Baustellencomputer (z. B. Notebook) kann sowohl per Funk als auch über ein Ethernet-Kabel (Standard) erfolgen.

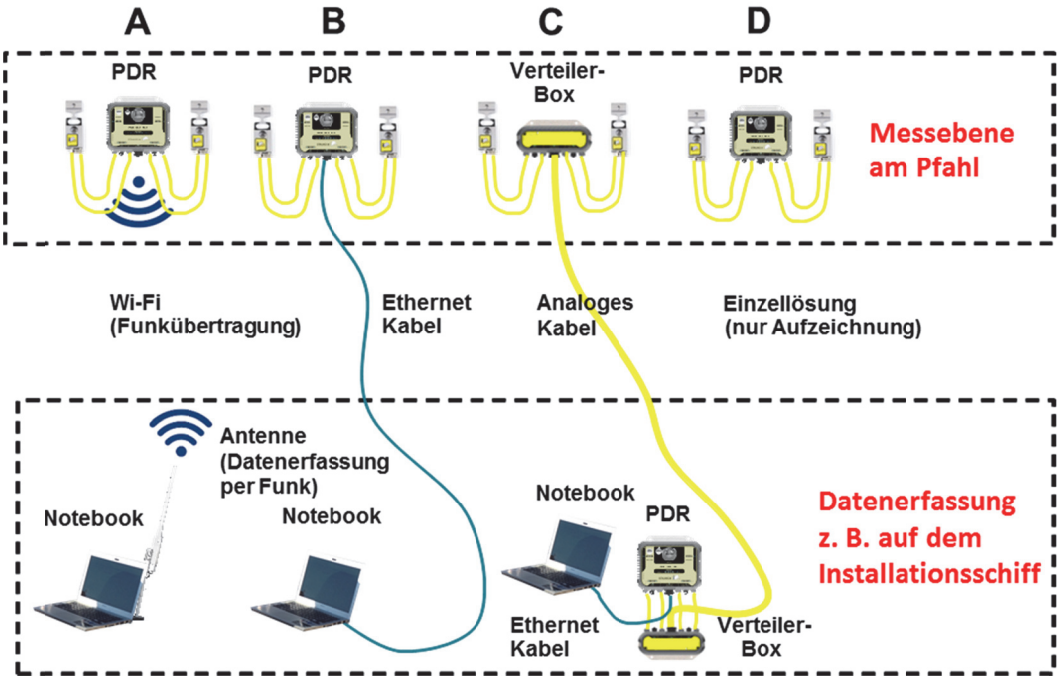

Abbildung 5: Ausgewählte PDA-Konfigurationen mit dem PDR

3. Energie

3.1. Grundlagen

Energiebetrachtungen werden bei der Pfahlrammung üblicherweise zur Wahl des Impulshammers, bei der Simulation des Rammvorganges mit einer geeigneten Software oder zur Berechnung der Vorschädigung des Pfahles durch den Rammimpuls verwendet.

Zur Beschreibung der Hammereffizienz sind eingangs zwei Situationen zu definieren, in denen jeweils ein Energieverlust entsteht:

1. Die Hammereffizienz η_k beschreibt das Verhältnis zwischen potentieller Energie E_k der Fallmasse aus einer definierten Fallhöhe h und der kinetischen Energie E_i (Impulsenergie) beim Auftreffen der Fallmasse auf die Schlagplatte des Hammers:

$$\eta_h = E_k / E_i \tag{1}$$

2. Die Übergangseffizienz η_t beschreibt den Energieverlust zwischen der kinetischen Energie des Rammhammers E_i und der in den Pfahl übertragenen Energie E_t (Übergangsenergie):

$$\eta_t = E_t / E_i \tag{2}$$

Die kinetische Energie der Freifallmasse (ohne Beschleunigung) wird berechnet zu:

$$E_i = 0{,}5 \cdot m \cdot v^2 \tag{3}$$

Wobei m die Masse des Freifallgewichtes und v die Geschwindigkeit beim Auftreffen beschreibt. In Impulshämmern der neusten Generation wird die Impulsenergie durch ein internes Monitoring-System, durch Messung der Geschwindigkeit der Fallmasse direkt vor dem Auftreffen auf die Schlagplatte, berechnet und kann somit relativ exakt bestimmt werden.

Die in den Pfahl eingeleitete Energie (Übergangsenergie), als Anteil der Impulsenergie ($E_t = E_i \cdot \eta_t$), wird klassischerweise als Integral der Kraft F_t und Geschwindigkeit v_t über die Zeit t berechnet:

$$E_t = \int F_t \cdot v_t \, dt \tag{4}$$

Für den betrachteten Fall der 'Pfahldynamik' kann die in den Pfahl eingeleitete Energie E_t über die Messung von Dehnung $\varepsilon(t)$ und Beschleunigung $a(t)$ am Pfahlkopf (vgl. Abschnitt 2.2) berechnet werden.

Die in den Pfahl eingeleitete Kraft F_t wird hierbei über den E-Modul des Materials, dessen Querschnitt sowie die gemessene Dehnung berechnet:

$$F(t)_t = \mathrm{E} \cdot \mathrm{A} \cdot \varepsilon(\mathrm{t}) \tag{5}$$

Die Pfahlgeschwindigkeit v_t wird aus der Integration der gemessenen Beschleunigung ermittelt:

$$v(t)_t = \int a(t)_t \ \mathrm{dt} \tag{6}$$

Die klassische Berechnung der in den Pfahl eingeleiteten Energie E_t aus den Messergebnissen einer dynamischen Probebelastung (DLT) ist jedoch nicht immer gültig bzw. richtig, da die Übertragungsenergie aus der Summe der abwärts (↓) und aufwärts (↑) laufenden Dehnwellenanteile berechnet wird. Die nach unten gerichteten Wellenanteile kommen hierbei anfänglich ausschließlich aus dem Rammimpuls des Hammers. Die reflektierten Wellenanteile ergeben sich beispielsweise aus den Widerständen im Boden oder Querschnittswechseln im Pfahl. Der Begriff abwärts (↓) ist hier als vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß gerichtet und aufwärts (↑) als vom Pfahlfuß zum Pfahlkopf laufend definiert.

Richtigerweise wird die eingeleitete Energie ausschließlich aus den abwärts gerichteten Kraft- und Geschwindigkeitsanteilen aus dem Rammschlag berechnet. Reflektierende, bzw. aufwärts laufende Dehnwellenanteile sind bereits in die Energieberechnung mit eingeflossen und dürfen nicht erneut berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 6).

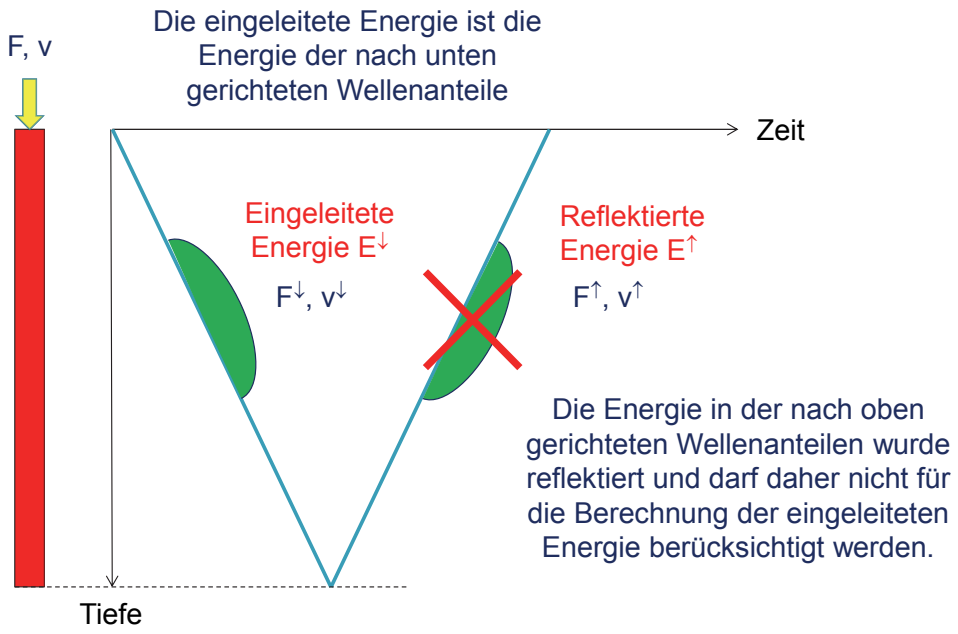

Abbildung 6: Berechnung der eingeleiteten Energie

Je nach Größe der reflektierten Wellenanteile, Pfahllänge, Einbindetiefe, Querschnittsverlauf, Lage der Sensoren, Kontaktzeit des Hammers etc., können die reflektierten Wellenanteile einen deutlichen Einfluss auf die im klassischen Fall berechnete eingeleitete Energie (Gl. 4) haben und diese verfälschen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird daher ein genauerer Ansatz zur Berechnung der eingeleiteten Energie bzw. Übertragungseffizienz vorgestellt. Der Ansatz basiert hierbei auf der ausschließlichen Betrachtung der abwärts (↓) gerichteten Wellenanteile.

3.2. Eindimensionale Wellengleichung

Durch die Messung von Dehnung und Beschleunigung am Pfahlkopf wird der Dehnwellendurchlauf des Rammimpulses über die Größen Kraft F(t) und Teilchengeschwindigkeit v(t) abgebildet. Zu jedem Zeitpunkt t beinhaltet das Messsignal (F, bzw. v) die Summe der abwärts (↓) bzw. aufwärts (↑) laufenden Wellenanteile im Pfahl. Somit ergibt sich:

$$F = F^{\downarrow} + F^{\uparrow} \tag{7}$$

$$v = v^{\downarrow} + v^{\uparrow} \tag{8}$$

Die abwärts (↓) bzw. aufwärts (↑) gerichteten Wellenanteile der Kraft können nach Gl. 9 und Gl. 10 auch über das Produkt von Teilchengeschwindigkeit v(t) und Impedanz Z (Proportionalitätsfaktor) bestimmt werden. Die theoretischen Grundlagen zu den Gleichungen können beispielsweise [Fritsch, 2008] oder [Stahlmann et al., 2004] entnommen werden.

$$F^{\downarrow} = Z \cdot v^{\downarrow} \tag{9}$$

$$F^{\uparrow} = -Z \cdot v^{\uparrow} \tag{10}$$

Mit:

Z = Pfahlimpedanz = $E \cdot A/c$ = $A \cdot \sqrt{E \cdot \rho}$ [Ns/m]

E = Elastizitätsmodul [N/m²]

A = Pfahlquerschnitt [m²]

ρ = Dichte des Pfahlmaterials [kg/m^3]

c = Wellengeschwindigkeit = $\sqrt{E/\rho}$ [m/s]

Durch Einsetzen von Gl. 7 und Gl. 8 in Gl. 4, kann die eingeleitete Energie E_t auch über die abwärts (↓) bzw. aufwärts (↑) laufenden Wellenanteile der Kräfte und Geschwindigkeiten beschrieben werden:

$$E_t = \int (F^{\downarrow} + F^{\uparrow}) \cdot (v^{\downarrow} + v^{\uparrow}) \cdot dt \tag{11}$$

oder:

$$E_t = \int (F^{\downarrow} \cdot v^{\downarrow} + F^{\downarrow} \cdot v^{\uparrow} + F^{\uparrow} \cdot v^{\downarrow} + F^{\uparrow} \cdot v^{\uparrow}) \cdot dt \tag{12}$$

Durch Einsetzen von Gl. 9 und Gl. 10 in Gl. 12 erhält man:

$$E_t = \int (F^{\downarrow} \cdot v^{\downarrow} - F^{\downarrow} \cdot F^{\uparrow}/Z + F^{\uparrow} \cdot F^{\downarrow}/Z + F^{\uparrow} \cdot v^{\uparrow}) \cdot dt \tag{13}$$

$$E_t = \int (F^{\downarrow} \cdot v^{\downarrow} + F^{\uparrow} \cdot v^{\uparrow}) \cdot dt \tag{14}$$

$$E_t = \int (F^{\downarrow} \cdot v^{\downarrow}) \cdot dt + \int (F^{\uparrow} \cdot v^{\uparrow}) \cdot dt \tag{15}$$

$$E_t = E_t^{\downarrow} + E_t^{\uparrow} \tag{16}$$

Gleichung 16 zeigt, dass die klassische Formel zur Berechnung der Energie E_t sowohl die abwärts $E_t^{\downarrow}$ als auch die reflektierten Energieanteile $E_t^{\uparrow}$ beinhaltet.

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 7 und Abbildung 8) zeigen den Einfluss der nach oben gerichteten Energie $E_t^{\uparrow}$ auf die Berechnung der maximal in den Pfahl eingeleiteten Energie. Bei einem Stahlpfahl mit konstantem Querschnitt, einer Kontaktzeit des Hammers t_E (Länge des Impulses) und einer geringen Einbindung in den Boden (Beginn der Rammung) haben die in Rot dargestellten, reflektierenden Anteile keinen Einfluss auf die Berechnung der maximal eingeleiteten Energie. Die maximale Energie kann nach der Kontaktzeit t_E 'unverfälscht' berechnet werden.

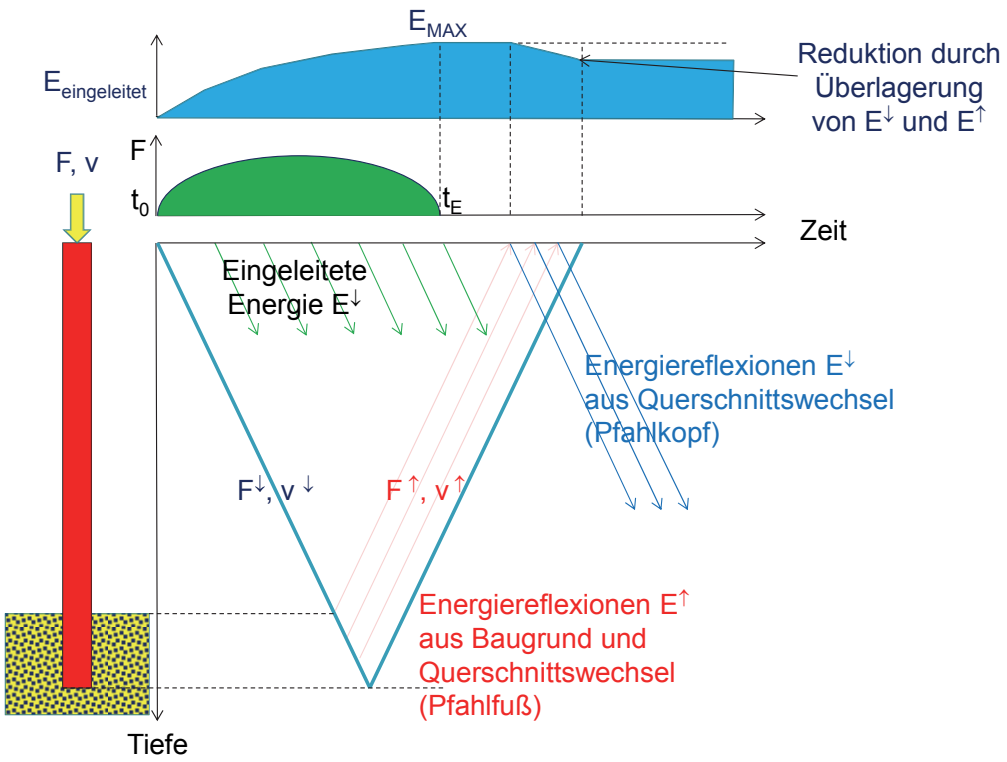

Abbildung 7: Maximal eingeleitete Energie, berechnet ohne Einfluss von Reflexionen

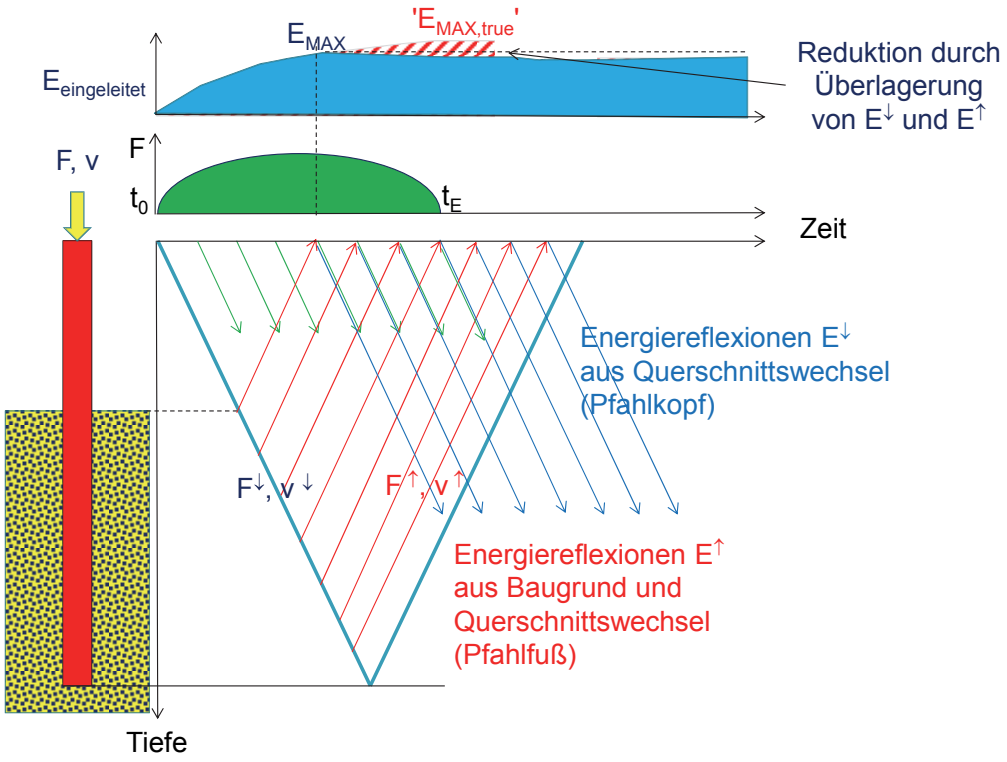

Abbildung 8: Maximal eingeleitete Energie, berechnet mit Einfluss von Reflexionen

Im weiteren Verlauf der Pfahlrammung reduziert sich der Abstand zwischen Pfahlkopf und Geländeoberkante, sodass noch in der Zeit der Energieeinleitung des Hammers $E_t^{\downarrow}$ reflektierende Anteile aus dem Boden $E_t^{\uparrow}$ die Gesamtenergie E_t verfälschen (berechnet nach Gl. 4).

Für eine realistischere Berechnung der Energie E_t sollten daher ausschließlich die Kräfte und Geschwindigkeiten der abwärts (↓) laufenden Wellenanteile aus dem Rammimpuls (dem Impulshammer) berücksichtigt werden. Hieraus ergibt sich dann:

$$\boldsymbol{E_{eingeleitet,abwärts}} = \boldsymbol{E_t^{\downarrow}} = \int (\boldsymbol{F^{\downarrow}} \cdot \boldsymbol{v^{\downarrow}}) \cdot \boldsymbol{dt} \tag{17}$$

Übergangseffizienz η_t ergibt sich somit zu:

$$\boldsymbol{\eta_t^{\downarrow}} = \boldsymbol{E_t^{\downarrow}} / \boldsymbol{E_i} \tag{18}$$

3.3. Kritische Betrachtung

Auch wenn die oben angegebenen Gleichungen (Gl. 17 und Gl. 18) eine Verbesserung der klassischen Berechnung der Übergangseffizienz η_t und eingeleiteten Energie E_t darstellen (Gl. 2 und Gl. 4), so sind diese Formeln ebenfalls nur dann korrekt, wenn ausschließlich die abwärts gerichteten Wellenanteile aus dem Hammer der Berechnung zugrunde gelegt werden. Durch Reflexionen der aufwärts laufenden Dehnwelle am Pfahlkopf (vgl. Abbildung 8) können aber auch in den 'verbesserten' Gleichungen zusätzliche nach unten gerichtete Wellenanteile zu einem verfälschten Ergebnis führen.

Zur Energieberechnung müssen somit immer auch die Randbedingungen des Gesamtsystems Hammer-Pfahl-Boden betrachtet werden, um ausschließen zu können, dass die Energieberechnung ein verfälschtes Ergebnis liefert. Entscheidend sind hierbei die Parameter:

- Kontaktzeit des Hammers beim Rammschlag (t_0 bis t_E)
- Lage der Messgeber/Sensoren
- Abstand zwischen den Sensoren und der Geländeoberkante (Beginn der Reflexionen aus dem Bodenwiderstand)
- Impedanzprofil des Pfahls (Reflexionen aus Querschnittswechseln, ggf. auch aus Steifigkeitswechseln)

Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Kraft $F^{\downarrow}$ nach Gl. 5 und die Geschwindigkeit $v^{\downarrow}$ nach Gl. 6 über die Messung von Dehnung und Beschleunigung am Pfahlkopf (siehe Abschnitt 2) berechnet werden, daher indirekt bestimmt werden, was je nach mathematischer Formulierung und nachlaufender Berechnung weitere Fehler implizieren kann.

4. Simulation

Um den Einfluss unterschiedlicher Übergangseffizienzen, beispielsweise auf die Pfahlwiderstände oder die Vorschädigung des Pfahles durch den Rammprozess darstellen zu können, werden nachfolgend Ergebnisse aus Rammsimulationsstudien gezeigt. Die Rammsimulationsstudien wurden hierbei mit der Software AllWave-PDP der Firma Allnamics B.V. durchgeführt, welches auf der eindimensionalen Wellentheorie (vgl. z. B. [Fritsch, 2008], [Stahlmann et al., 2004], [EA-Pfähle, 2012]) basiert. Abbildung 9 zeigt exemplarisch den Aufbau des Systems Hammer-Pfahl-Boden im Programm.

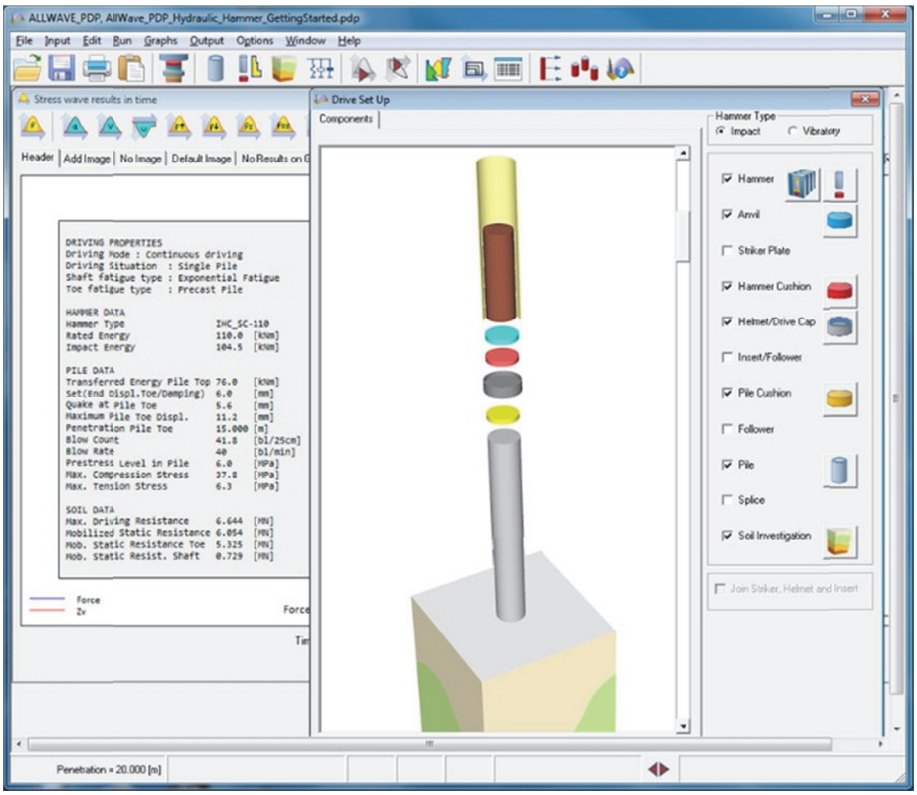

Abbildung 9: Aufbau Hammer-Pfahl-Boden – AllWave PDP

Der Programmcode basiert auf der Methode der Charakteristiken [Middendorp, 2004]. Die grundlegende mathematische Formulierung besteht dabei in der Reduktion des komplexen Gesamtmodells auf die Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen, welche eine exakte Lösung zulassen. Dieser Ansatz wurde erstmals von de Saint Venant vorgestellt. Zur Simulation der Wellenausbreitung im Pfahl wird ein linear-elastisches Verhalten zugrunde gelegt. Der anstehende Boden wird mittels Feder-Dämpfer-Systemen gekoppelt am Pfahl berücksichtigt. Dabei wird ein ideal-elastisches, ideal-plastisches Materialverhalten unterstellt [Fritsch et. al, 2013].

4.1. Modell

Für die Simulation wurde ein typischer, nichtbindiger Boden der deutschen Nordsee gewählt, mit bekanntermaßen hohen bis sehr hohen Spitzendruckwiderständen der CPT-Sonde (> 60 MPa). Für Dämpfungsparameter des Bodens, den Maximalwert der linear-elastischen Pfahlverschiebung (Quake) etc. wurden allgemein bekannte Größenordnungen angesetzt. Die kinetische Energie des Hammers E_i wurde ähnlich zu einer 'standardmäßigen' Offshore-Rammung übernommen. Der Modellpfahl hat die folgenden Spezifikationen:

- Material: Stahl (E-Modul 210.000 MN/m², Wichte: 77,5 kN/m³)
- Außendurchmesser: 3,00 m
- Wandstärke: 3 cm
- Länge: 40 m (konstanter Querschnitt)
- Einbindetiefe zu Beginn der Rammung: 5,00 m (Eindringung aus Eigengewicht)
- Einbindetiefe zum Ende der Rammung: 30,00 m

Die standardmäßig zur Verfügung stehenden Informationen aus der Rammung eines OWEA-Gründungspfahles zeigt Abbildung 10. Impulshämmer der neusten Generation liefern die intern gemessene kinetische Energie jedes Rammschlages (Abbildung, links). Die Anzahl der Rammschläge über eine bestimmte Tiefe (0,25, 0,5 bzw. 1,0 m) wird ebenfalls standardmäßig während der Installation erfasst (Abbildung, rechts).

In den nachfolgenden Rammsimulationsstudien wurden zwei Varianten der Übergangseffizienz η_t bzw. der in den Pfahl eingeleiteten Energie E_t untersucht. In der ersten Simulation wurde, in Anlehnung an die Angaben der Hammerhersteller Menck GmbH [Menck GmbH] oder IHC Hydrohammer® B.V. eine Übergangseffizienz von 95% gewählt.

In der zweiten Simulation wurde eine Übergangseffizienz von 75% angenommen. Die niedrigere Effizienz kann hierbei aus der 'falschen' Berechnung der Energie aufgrund der Überlagerung von $E_t^{\downarrow} + E_t^{\uparrow}$ resultieren (vgl. Kapitel 3). Ebenfalls kann aber auch die Konfiguration Hammer, Anvil (Übergangselement zwischen Hammer und Pfahl), Rammhaube, Pfahl, Wassertiefe etc. zu einer deutlichen Reduktion der eingetragenen Energie im Pfahl führt.

Die hier dargestellten Ergebnisse soll lediglich zeigen, wie sich die Parameter Tragfähigkeit (Mantelreibung und Spitzendruck) und Vorschädigung durch den Rammprozess bei unterschiedlichen Übergangseffizienzen η_t verändern.

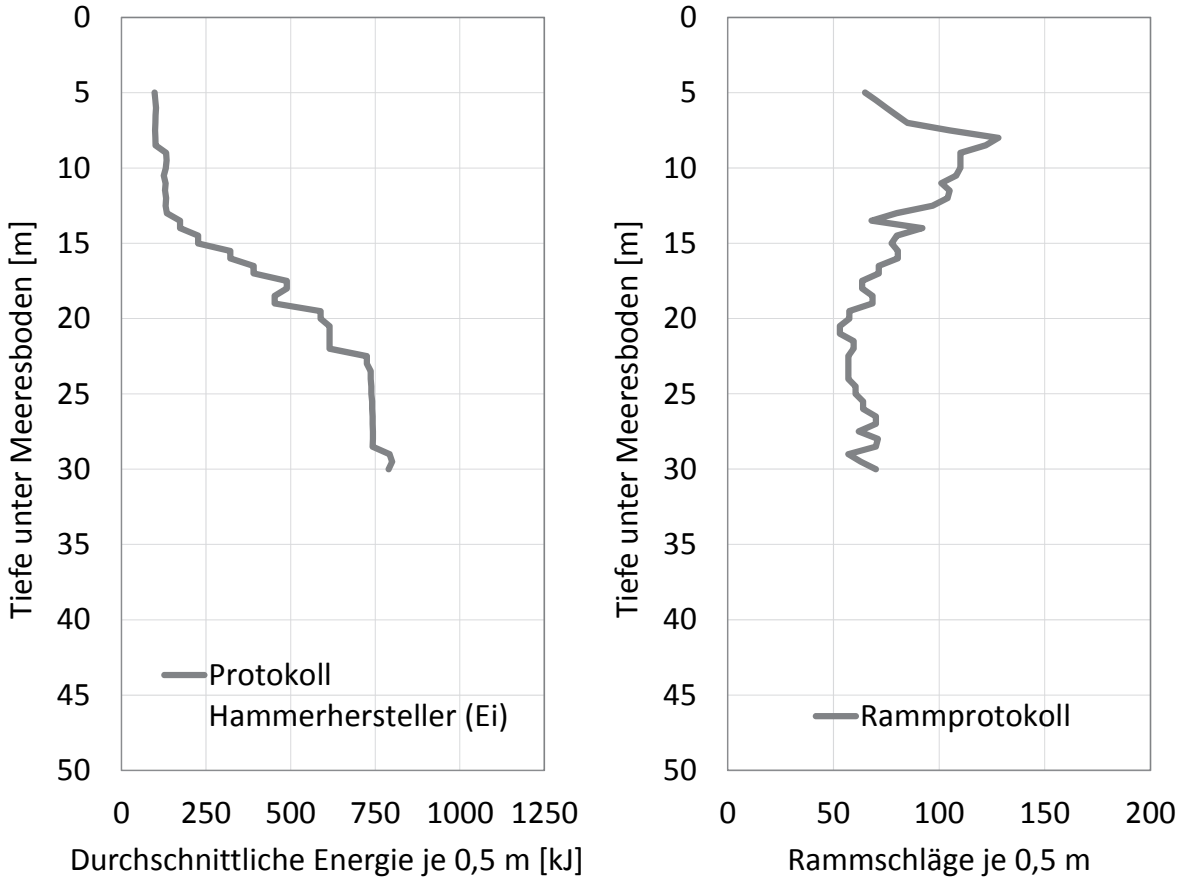

Abbildung 10: Standardinformationen von der Pfahlrammung

4.2. Ergebnisse

Die in der Folge dargestellten Ergebnisse der Rammsimulationsstudien basieren auf der Nachrechnung (post-prediction) der Daten aus Abbildung 10 sowie den Angaben zu Hammer, Pfahl und Baugrund.

In einem ersten Schritt wurde die kinetische Energie des Hammers E_i mit einer Übergangseffizienz $\eta_t^{\downarrow}$ von 95% und 75% multipliziert. Das Ergebnis der Simulation zeigt Abbildung 11 als in den Pfahl eingeleitete Energie $E_t^{\downarrow}$ (vgl. Gl. 17).

Durch Anpassung der Bodenwiderstände (Mantelreibung und Spitzendruck) wurde in einem zweiten Schritt eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen (Abbildung 10, rechts) und simulierten Rammschlägen (Abbildung 11, rechts) je 0,5 m Einbindung gesucht. Um eine gute Übereinstimmung erzielen zu können, ist der Simulationsvorgang oftmals häufig zu wiederholen, bei jeweiliger Veränderung bzw. Anpassung der Widerstände des Bodens. Als Ergebnis konnte hier eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Rammschlägen je 0,5 m Pfahleindringung erzielt werden. Zu erwähnen ist hierbei, dass der sogenannte Pfahllängeneffekt

(friction fatigue) als Veränderung der Mantelreibung während der Rammung, in den Simulationen berücksichtigt wurde.

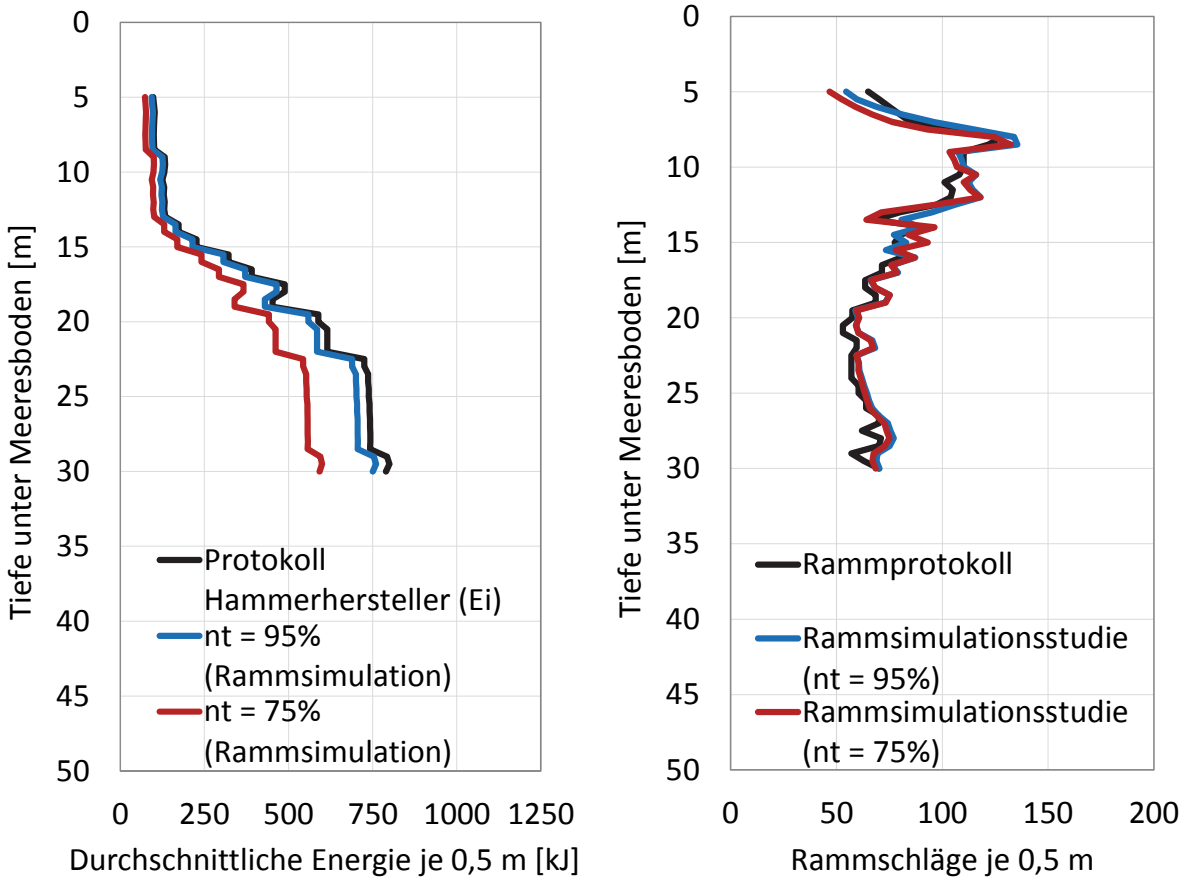

Abbildung 11: Ergebnisse Rammsimulationsstudien,
Qualität der Simulation anhand der Rammschläge je 0,5 m Einbindung

Aus dem Ergebnis der Rammsimulationsstudie, als beste Anpassung von gemessenen und berechneten Daten, kann beispielsweise die Pfahltragfähigkeit (Summe der Pfahlwiderstände) abgelesen werden. Abbildung 12 zeigt die Aufteilung von Mantelreibung und Spitzendruck in Abhängigkeit von der gewählten Übergangseffizienz $\eta_t^{\downarrow}$. Die hier dargestellten Pfahlwiderstände beschreiben den Zustand am Ende der Rammung (end of initial driving, EoD). Bei einer Übergangseffizienz $\eta_t^{\downarrow}$ von rd. 75% muss der Bodenwiderstand im Vergleich zu einer Übergangseffizienz von 95% um rd. 18% reduziert werden, um den in situ gemessenen Verlauf der Rammschläge über die Einbindetiefe annähernd deckungsgleich abbilden zu können.

Des Weiteren kann aus der Rammsimulation beispielsweise auch die Vorschädigung des Pfahles aus dem Rammprozess bewerten werden (Pile driving fatigue analysis).

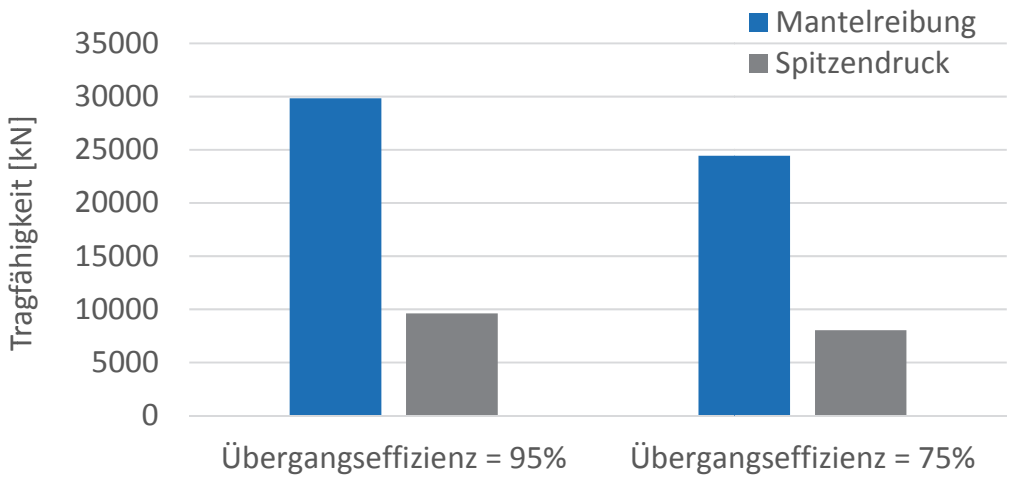

Abbildung 12: Bodenwiderstände am Ende der Rammung bei unterschiedlichen Übergangseffizienzen $\boldsymbol{\eta_t}$

Detaillierte Informationen zur Berechnung der Vorschädigung können beispielsweise [Fritsch et al., 2013] entnommen werden. Abbildung 13 zeigt die hier berechnete Vorschädigung im Stahl bei der jeweiligen Übergangseffizienz.

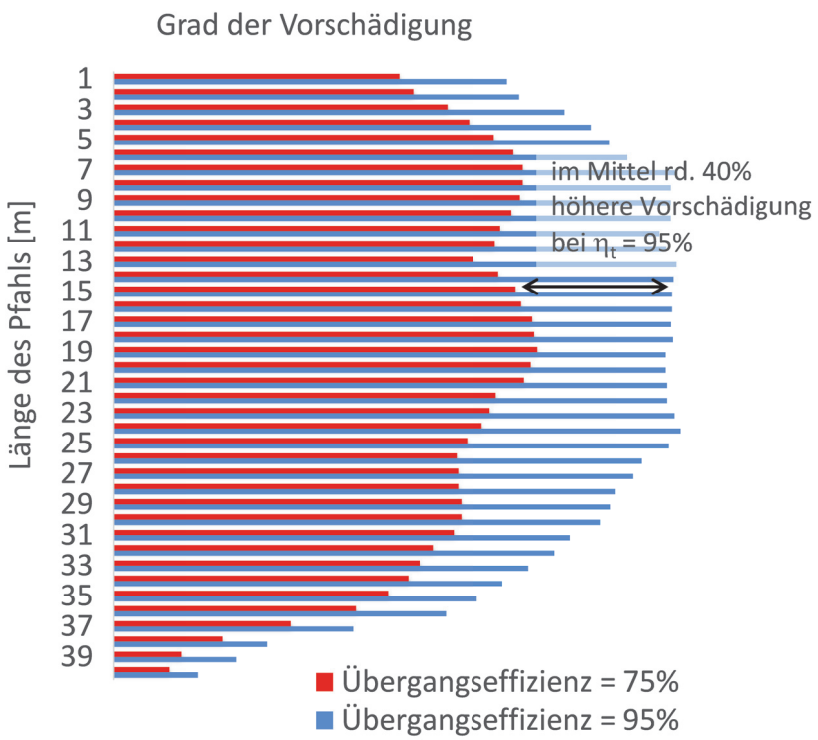

Abbildung 13: Vorschädigung durch den Rammprozess, prozentuelle Abweichung bei unterschiedlichen Übergangseffizienzen $\boldsymbol{\eta_t}$

Bei einer Übergangseffizienz $\eta_t^{\downarrow}$ von rd. 95% ist die Vorschädigung im hier betrachteten Beispiel im Mittel rd. 40% höher als bei einer Übergangseffizienz von 75%.

4.3. Interpretation

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit von der tatsächlich in den Pfahl eingeleiteten Energie $E_t^{\downarrow}$ bzw. der Größe der Übergangseffizienz $\eta_t^{\downarrow}$, deutliche Abweichungen in den Bodenwiderständen und der Vorschädigung des Pfahles durch den Rammprozess entstehen können.

Im Vorfeld von Simulationsstudien sollte daher die tatsächlich in den Pfahl eingeleitete Energie bzw. die Übergangseffizienz η_t bzw. $\eta_t^{\downarrow}$ im Detail betrachtet und analysiert werden, um realistische Ergebnisse durch die Simulation erzielen zu können.

5. Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Beitrag wurde gezeigt, dass der Ansatz der eingetragenen Energie in den Rammpfahl sowohl auf die ermittelten Pfahlwiderstände als auch auf die Vorschädigung des Pfahles einen signifikanten Einfluss aufweist. Neben messtechnischen Fragestellungen sind ebenfalls wellenmechanische Grundlagen in die Energiebetrachtung mit einzubeziehen, um Fehlerquellen in nachlaufenden Berechnungen auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Autoren der Fichtner Water & Wind GmbH beschäftigen sich seit Beginn der Installation von Offshore-Gründungspfählen in der deutschen Nord- und Ostsee intensiv mit der oben genannten Thematik, welche insbesondere für Rammsimulationen entscheidend ist. Aufbauend auf der Nachrechnung einer Vielzahl von bereits in der Nord- und Ostsee installierten Stahl-Großrohrpfählen (>>100) konnte eine umfangreiche Datenbank aus Pfahl-Rammungen in unterschiedlichsten geologischen Schichtabfolgen sowie verschiedener Pfahl-Hammer-Konfigurationen aufgebaut werden. Durch die kontinuierliche statistische Auswertung dieser Daten können Simulationsstudien für zukünftige Windparks an den Bestandsdaten eines 'Baugrunds mit vergleichbaren geotechnischen Eigenschaften' kalibriert und somit realistischere Simulationsergebnisse erzielt werden.

Literatur

BSH Standard Konstruktion, Anwendungshinweise (2012)
Anwendungshinweise für den Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen“ des BSH, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

EA-Pfähle (2012)
Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Dortmund, Ernst & Sohn, 2. Auflage

Fischer, J.; Hensel, J.; Zahlmann, J.; Stahlmann, J. (2011)
Zur Messgeberapplikation bei dynamischen Pfahltests an Offshore – Gründungselementen, Pfahl-Symposium 2011, Fachseminar am 17./18.02.11 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 94.

Fritsch (2008)
Zur Modellbildung der Wellenausbreitung in dynamisch belasteten Pfählen, Dissertation, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 86.

Fritsch, M.; Fischer, J.; Hensel, J. (2013)
Modelle zur Offshore-Rammsimulation mit gekoppelter Vorschädigungsberechnung, Pfahl-Symposium 2013, Fachseminar am 21./22.02.13 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig,
Heft 96.

Menck GmbH
Website Menck GmbH; Hydraulic Underwater Pile Driving Hammers – MHU, (30.01.2014), http://www.menck.com/products/hammers/

Middendorp, P, (2004)
Thirty years of experience with the wave equation solution based on the method of Characteristics. 7th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Kuala Lumur, Malaysia

Stahlmann, J.; Kirsch, F.; Schallert, M.; Klingmüller, O.; Elmer, K.-H. (2004)
Pfahltests - modern dynamisch und/oder konservativ statisch, 4. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 20.-21.01.2004,
ISBN 3-924813-55-8, S. 23-40

Dipl.-Ing. Jan Fischer jan.fischer@fww.fichtner.de
Dr.-Ing. Maik Fritsch maik.fritsch@fww.fichtner.de

Fichtner Water & Wind GmbH www.fww.fichtner.de
Hammerbrookstrasse 47b, 20097 Hamburg Tel.: +49 (0)40 300673-111

Peter Middendorp, MSc middendorp@allnamics.eu

Allnamics Pile Testing Experts BV www.allnamics.eu
Waterpas 98, 2495 Den Haag (NL) Tel.: +31 (0) 703077499