

Zur Auswertung dynamischer Messungen an großen offenen Stahlrohrpfählen

Frank Rausche, Garland Likins und Oswald Klingmüller

Zusammenfassung

Für die Gründung von immer mehr und teureren Bauvorhaben werden besonders im Nearshore und Offshore Bereich häufig offene Stahlrohrpfähle gerammt. Aus wirtschaftlichen Gründen werden die Durchmesser immer größer.

- (a) Dabei kommt es dann zu zwei grundsätzlichen Fragestellungen in der geotechnischen Planung: können die Gebrauchslasten mit ausreichender Sicherheit und mit annehmbaren Setzungen in den Boden übertragen werden?
- (b) bei der Planung, kann das Rohr wirtschaftlich und ohne Schäden gerammt werden?

Die erste Frage muss über dynamische Messungen am Pfahl während der Rammung und sofortiger Inversionsrechnung (z.B. CAPWAP) nach der Rammung an Ort und Stelle behandelt werden. Besonders wenn es zu einer teilweisen Pfropfenabbildung kommt, muss dann bei der Berechnung ein realistisches Bodenmodell für die dynamische Lastabtragung am Pfahlfuß gefunden werden.

Die zweite Frage wird mit einer Wellengleichungsanalyse beantwortet.

Dieser Beitrag beschreibt mehrere Fallstudien im internationalen Hafenaufbau und bei der Installation von Offshore Energieanlagen. Dabei wurden dynamische Messungen während des Rammens durchgeführt und ausgewertet. Der Vorgang bei der Ermittlung der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Pfropfenabbildung und/oder der inneren und äußeren Mantelreibung am Rohr wird an Hand dieser Beispiele beschrieben. Auf Grund dieser Erfahrungen werden dann Empfehlungen für die verschiedenen Komponenten des dynamischen Bodenmodells gemacht.

1. Einleitung

Stahlrohrpfähle mit Durchmessern bis zu 4 m kamen bereits in den 70er Jahren im Offshore Bereich zur Verwendung (Abbildung 1). Als Einzelpfähle in der Windenergieindustrie können die Durchmesser etwa 2 mal so groß werden und wegen hoher Biegemomente ergeben sich dabei auch sehr grosse Wandstärken. Als Alternative zu Fangedämmen aus einzelnen Spundwandbohlen sollen jetzt sogar Rohre mit 20 m Durchmesser in den Boden gerüttelt werden.

Dynamische Messungen beim Rammen und (Simulations-)Berechnungen des Rammvorganges sind bei diesen Pfahlabmessungen von entscheidender Bedeutung, weil (a) die Auswahl von geeigneten Rammgeräten unnötige und hohe Kosten vermeiden kann und (b) weil die dynamische Messung (in den meisten Fällen mit einem Pile Driving Analyzer® aufgenommen und verarbeitet) die einzige Möglichkeit einer wirtschaftlich erschwinglichen Probelastung darstellt und auch wertvolle Ergebnisse für spätere Pfahlbemessungen und Rammarbeiten liefert.

Zur Arbeitsvorbereitung von Rammarbeiten steht das Wellengleichungsverfahren (z.B. GRLWEAP) zur Verfügung (Rausche und Klingmüller, 2005), zur Auswertung von dynamischen Messungen das CAPWAP® Program (Pile Dynamics, 2006). Beide Methoden haben als Grundlage für die dynamische Bodenwiderstandsmessung im dynamischen Belastungsfall das Smithsche Bodenmodell. Dabei werden die Bodenwiderstandskräfte als Funktion der Pfahlbewegung in der Pfahl-Bodenfuge angenommen (Abbildung 2, links).

Während das Smith-Modell meist zufriedenstellende Ergebnisse bei der Simulation des Rammvorgangs mit der Wellengleichung liefert, zeigt es sich aber bei der Auswertung von Messungen, dass dieses sehr vereinfachte Modell erweitert werden muss, damit es die tatsächlichen Gegebenheiten besser darstellen kann. Die für die Messungen an Rohrpfählen wichtigen Modellerweiterungen sind dabei die Berücksichtigung von Restspannungen, die am Ende des Rammschlages im Pfahl und Boden verbleiben, der Trägheit der Pfropfenmasse und der Bewegung des den Pfahl umgebenden Bodens. Die Restspannungen werden im GRLWEAP und CAPWAP Programm durch wiederholte Schlagsimulationen iterativ berechnet. Die Trägheitskraft des Pfropfens wird als Produkt von Pfahlbeschleunigung und Pfropfenmasse (mp) berechnet, während die

Bodenbewegung mit Hilfe zusätzlicher Dämpfer (S_k , B_t) und Bodenmassen (m_s , m_t) dargestellt (Abbildung 2 rechts). Durch die Berücksichtigung der Bodenbewegung wird erklärt, warum der statische Bodenwiderstandsteil abnehmen kann (wenn der Boden praktisch ausweicht), obwohl sich der Pfahl weiterhin nach unten bewegt. Am Mantel erklärt sich das aus der Abstrahlungsdämpfung im und unter dem Rohr mit der Pfropfenbewegung. Das einfache Smith-Modell sieht nicht vor, dass der statische Widerstand bei positiven Geschwindigkeiten abnehmen kann.



Abbildung 1: Rohrpfahl von 3660 mm Durchmesser vor der Rammung

Pfähle mit großem, d.h. mit mehr als 1,5 m Durchmesser können meist nur offen gerammt werden. Bei der Rammung kann sich zwar eine große innere Reibung entwickeln, die aber nicht groß genug ist, um dem Spitzendruck, der dynamische Widerstandskraft an der Spitze und der Trägheit des Bodenpfropfens entgegenzuwirken. Bei diesen größeren Pfählen kommt es auch kaum zu einem Miteinanderwirken der gegenüberliegenden Pfahlseiten. Nehmen wir eine Scherwellengeschwindigkeit im Boden von 150 m/s an, dann kommt in einem 1,5 m Durchmesser Pfahl die Scherwelle von der gegenüberliegenden Pfahlseite erst nach 10 ms an. Das ist in den meisten Fällen aber ungefähr die Dauer einer positiven (nach unten gerichteten) Geschwindigkeit. Das bedeutet auch, dass bei größeren Pfählen, der Pfropfen ungleichmäßig belastet wird und sich daher nicht gleichmäßig mit dem Pfahl bewegen kann.

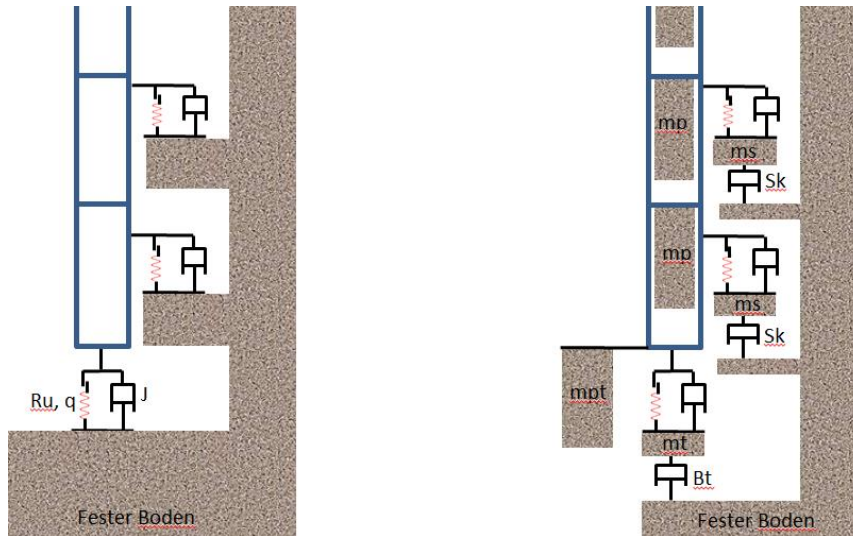


Abbildung 2: links, Smith Bodenmodell, rechts, erweitertes CAPWAP Bodenmodell

Pfähle mit mittleren Durchmessern, im Bereich 0,5 bis 1,5m, verhalten sich als Verdrängungspfähle, wenn sich ein Pfropfen schon während des Pfahlrammens bildet. Dies führt zu sehr hohen Schlagzahlen (kleinen Eindringungen pro Schlag). Damit der Pfropfen sich mit dem Rohr bewegt, muss die Mantelreibung im Pfahlinneren sehr groß sein, da sie (zusammen mit dem Gewicht unter Auftrieb des Bodens im Innern) im Gleichgewicht mit den Normalspannungen auf der Kreisfläche stehen müssen. Bei rolligen Böden wird die Erhöhung der Schubspannungen häufig mit dem Gewölbeeffekt erklärt (der vertikale Druck gegen den Pfropfen verursacht seitlich hohe Drücke). Das Pfropfenproblem wurde in mehreren Veröffentlichungen behandelt, dabei ist die von Paikowsky und Chernauskas (2008) besonders relevant für den dynamischen Fall und die Auswertung von dynamischen Messungen.

Bei kleinen Rohrdurchmessern mit weniger als etwa 0,5 m in dichten und sehr dichten Böden kommt es oft sehr schnell zur Pfropfenbildung (vielleicht auch durch den Gewölbeeffekt) und daher zur Bildung des vollen Spitzendrucks. Kleinere Durchmesser unterscheiden sich also kaum im Ramm- und Tragverhalten von geschlossenen Pfählen.

Offshore Rohrpfähle müssen wegen der Wellen- und anderen horizontalen Belastungen und der großen Wassertiefen oft hohe Querkräfte und Momente aufnehmen. Ihre Wandstärke ist dann zumindest im Maximalmomentenbereich wesentlich höher als für die Normalkräfte im statischen und dynamischen Zustand erforderlich. Größere Wandstärken

und die damit verbundene höhere Pfahlsteifigkeit erlauben auch sehr große Rohre in Böden hoher Festigkeit mit verfügbaren Geräten zu rammen.

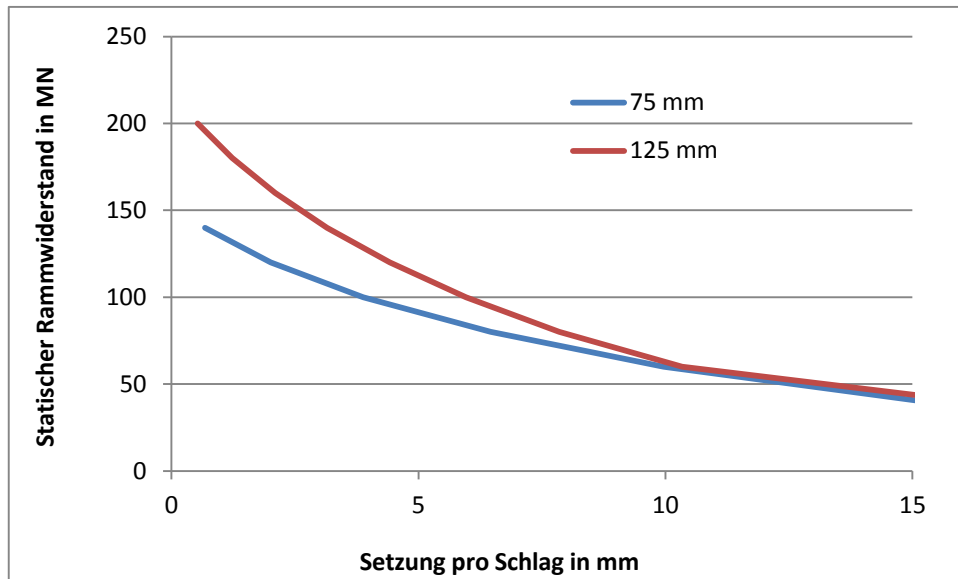


Abbildung 3: Simulationsberechnung GRLWEAP zum Vergleich der Rammung von zwei Pfählen unterschiedlicher Steifigkeit

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer mit dem Wellengleichungsprogramm vorgenommenen Simulationsberechnung. Bei gleichem statischen Rammwiderstand von 100 MN dringt der steifere Pfahl (Wandstärke 125 mm) 6 mm pro Schlag ein, der weichere Pfahl (Wandstärke 75 mm) nur 4 mm. Steifere Pfähle sind also leichter zu rammen als weichere Pfähle.

2. Was passiert im offenen Rohrpfahl beim Hammerschlag

Der Hammerschlag verursacht eine Druckwelle im Pfahl, d.h. ein Rohrelement am Pfahlkopf bewegt sich zuerst nach unten, erst später bewegt sich ein Element im unteren Pfahlbereich nach unten. Wo sich eine Bodensäule im Pfahl befindet, wird diese Bewegung eine Reibung am inneren Pfahlmantel verursachen. Ein vollständiges Mitnehmen der Bodenteilchen, so dass sie sich mit dem Pfahl bewegen (Pfropfenbildung) ist wegen der Bodenträgheit im oberen Pfahlbereich praktisch unmöglich. Außen und innen am Rohrpfahl verursachen die Widerstandskräfte also eine Verzerrung des Bodens und damit eine horizontale Scherwelle und eine vertikale Druckwelle, die sich beide relativ langsam (im Vergleich mit der Stoßwelle im Stahlrohr) nach unten und oben und außen

am Pfahl in alle Richtungen ausbreiten. Das bedeutet auch, dass die oben entstehenden Widerstandskräfte keinen Einfluss auf die untenliegenden Schichten haben, während sich die Stoßwelle im Pfahl nach unten ausbreitet.

Wenn die Stoßwelle im Rohr das untere Ende des Rohres erreicht, ist sie je nach Mantelreibung in ihrer Intensität reduziert. Die im Stahl ankommende Stoßwelle bewirkt einen Spitzendruck unter dem Stahlquerschnitt. Wenn die innere Reibung genügend groß ist, dann nimmt sie den Boden mit und dadurch kann sich der Gesamtfußwiderstand aufbauen (Pfropfeneffekt). Besonders im rolligen Boden ist es auch möglich, dass wegen der Querdehnungseffekte in Boden und Pfahl der erhöhte Druck gegen den Pfropfen eine zusätzliche seitliche Reibung im Rohr verursacht, die größer ist als die „normale“ Mantelreibung auf der Außenseite des Pfahls. Ist die innere Reibung nicht genügend groß, dann bewegt sich die Bodensäule relativ zum Pfahl nach oben (teilweiser oder kein Pfropfeneffekt), wobei sich dann natürlich der Spitzendruck nur unter dem Stahlquerschnitt aufbauen kann.

Die Stoßwelle wird am Rohrende als Zugwelle reflektiert und die Widerstandskräfte, die im Rohr, außen am Rohr und an der Rohrspitze angreifen verursachen eine, die Zugwelle überlagernde, nach oben laufende Druckwelle. Bei hohem Bodenwiderstand (wie er oft bei Offshore-Rammungen auftritt), ist die Gesamtdruckwelle größer als die im Stahl reflektierte Zugwelle, wodurch sich die Rohrteilchen nach oben bewegen (Rückfederung). Dadurch entspannt sich der Druck im Boden im und unter dem Pfahl und die Widerstandskräfte nehmen plötzlich ab. Der schnelle Abbau der Widerstandskräfte am Pfahlfuß wird auch durch die Trägheitskräfte begünstigt, die zumindest teilweise verhindern, dass sich der Pfropfen wie ein starrer Körper mit dem Pfahl bewegt.

Die Rückfederung des Pfahls verursacht im oberen Teil der inneren Bodensäule eine Entspannung und möglicherweise sogar eine Auflockerung (sodass beim nächsten Schlag wieder nur sehr wenig innerer Widerstand vorhanden ist.) Ist der Bodenwiderstand gering, gibt es keine Rückfederung und nach der Zugreflexion gibt es weitere Bewegungen der Rohrelemente nach unten. Die Bodensäule befindet sich dann auch in einem Zustand der Auflockerung.

Außen am Pfahl sorgt der sich relativ starr verhaltende Bodenhalbraum dafür, dass während der Rückfederung sich nach unten gerichtete Mantelreibungskräfte entwickeln,

die bis zum nächsten Schlag bestehen bleiben (residual stress effect). Die negativen äußeren Widerstandskräfte verhindern oft, dass es zu einer völligen Rückfederung am Pfahlfuß kommen kann. Dadurch bleibt der Pfahlfuß dann unter bleibendem Druck und beim nächsten Schlag muss nicht der volle Widerstand am Pfahlfuß mobilisiert werden.

4. Anwendung der Theorie

Große Rohrdurchmesser: Beim Rammen von Pfählen mit sehr großen Durchmessern und auch bei statischer Belastung gibt es innere Reibung aber keine Pfropfenbildung. Gegenüberliegende Rohrseiten können sich während des Schlages kaum beeinflussen. Bei der Rammung ist die innere Reibung geringer als außen am Pfahl (a) weil die Effektivspannungen in der Bodensäule geringer sind und (b) weil die Bodensäule durch die Rohrbewegungen aufgelockert wird. Im statischen und im Nachrammfall können sich höhere innere Reibungen aufbauen. In diesem Fall ist der normale Smith Ansatz zufriedenstellend, d.h. also, dass Spitzendruck und Reibung unabhängig voneinander sind. Allerdings ist es möglich dass ein relativ geringer Bodenmasseneffekt einen beschleunigungsabhängigen Bodenwiderstand verursacht, der über zusätzliche Pfahlimpedanz oder Massenkräfte modelliert werden kann.

Mittlere Rohrdurchmesser: Abbildung 4 erläutert den bei diesen Durchmessern komplizierteren Zusammenhang, wobei mit P_m , P_t und P_s die Mantelreibung, die Pfropfenträgheitskraft und der Pfropfspitzendruck bezeichnet werden. Wenn $P_m > P_s + P_t$ dann bewegt sich der Bodenpfropfen mit dem Rohrpfahl, d.h., der Pfahl verhält sich wie ein geschlossenes Rohr. Wenn die Mantelreibung aber geringer ist, dann gibt es entweder nur eine teilweise oder überhaupt keine Pfropfenbildung; in dem Fall stantzt das Rohr durch den Boden und die Bodensäule bleibt in ihrer ursprünglichen Lage. Die Kurven in Abbildung 4 zeigen in Abhängigkeit vom Pfahldurchmesser diese 3 Kraftgrößen. Sie ergeben sich unter der Annahme, dass die Beschleunigung am Pfahlfuß 250 g, die Mantelreibung im Pfahlinneren 250 kPa und der Spitzendruck 10 mal größer als die Mantelreibung ist. Das Volumen der Pfropfenmasse wurde mit einer Länge von 2 mal Durchmesser angenommen. Selbst mit dieser relativ kurzen Pfropfenmasse ist in diesem Beispiel die Trägheitskraft schon bei einem Durchmesser von 0,6 m ebenso groß wie der Spitzendruck und mehr als zweimal so groß wie der statische innere Reibungsanteil. Für diese Reibung wurde angenommen, dass sie über eine Länge von 2 Pfahldurchmessern

in das Rohr übertragen wird. Diese Annahme ist berechtigt, wenn der Pfropfen starr mit dem Rohr verbunden ist. Bei teilweiser Pfropfenbildung kann sich die Reibung über größere Strecken aufbauen.

Wenn es zu einer vollständigen Pfropfenbildung kommt, ist der Rammwiderstand bei dichten Böden wie bei einem geschlossenen Pfahl sehr groß. Die Setzungen pro Schlag werden sehr klein. Der theoretische Fall, dass keine Setzungen mehr erreicht werden können, wird im internationalen Sprachgebrauch „refusal“ genannt. Für die Praxis ist dieser Begriff aber nicht eindeutig definiert. Häufig wird auch unterschieden zwischen „Practical Refusal“ und „Absolute Refusal“. „Practical Refusal“ (dieser Begriff könnte auch als „praktische Rammgrenze“ übersetzt werden) entspricht häufig einer Schlagzahl von 800 Schlägen/m oder einer Eindringung von 1.25 mm/Schlag.

Die Rammgerätehersteller geben Garantien für ihre Maschinen meist nur, wenn dieser Wert nicht überschritten wird. Der theoretische „Absolute Refusal“ wird häufig mit dem „Praktischen Refusal“ verwechselt, er soll aber eigentlich bedeuten, dass der Pfahl unter einem Schlag überhaupt nicht eindringt (unendlich große Schlagzahl). Abgesehen von einem Verlust der Gewährleistung, ist dieser Fall für die Praxis nicht relevant, weil das Rammen in der Regel gestoppt wird, bevor es zu Null-Eindringungen kommt. Das American Petroleum Institute, API (2003), hat deshalb den „Absolute Refusal“ so definiert, dass unter 800 Schlägen der Pfahl weniger als 300 mm eindringt (0,375 mm/Schlag); nach einer Rammunterbrechung wird dieser Wert verdoppelt (weniger als 150 mm unter 800 Schlägen oder 0,188 mm/Schlag). Es wird daher vorgeschlagen, dass die Rammgrenze (refusal) auch im allgemeinen so definiert wird, dass eine Rammung abgebrochen wird, wenn der Pfahl weniger als 300 mm unter 800 Schlägen eindringt. Auf der anderen Seite sollte nie ein Rammkriterium verlangen, dass der Pfahl weniger als 12,5 mm pro 10 Schläge (Hitze) eindringt. Die US Straßenbehörden (American Association of Highway and Transport Organisations – AASHTO) verlangen i. a., dass die planmäßige Eindringung von Mantelreibungspfählen auf nicht weniger als 25 mm pro Hitze (10 Schläge) begrenzt wird. Im folgenden wird unter „refusal“ nur der „practical refusal“ mit 800 Schlägen pro Meter verstanden und als deutsche Übersetzung mit „Rammgrenze“ bzw. „praktische Rammgrenze“ bezeichnet.

Beispiele von ausgewerteten Messungen

Im folgenden werden an Hand von dynamischen Pfahlkopfmessungen die Vorgänge am Pfahlfuß untersucht. Die PDA Daten (Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf) wurden zunächst mit einem Signal Matching Programm (vollständige Modellbildung, CAPWAP) ausgewertet. Wenn eine beste Übereinstimmung von Rechnung und Messung erzielt worden ist, sind die verschiedenen Parameter des Bodenmodells bekannt. Zusätzlich sind damit auch die verschiedenen Anteile des Gesamtspitzenwiderstandes, also Trägheit, Dämpfung und statischer Widerstand bekannt. Am Pfahlfuß haben die statischen und dynamischen Widerstandskräfte eine Reibungs- und eine Spitzenkomponente. Die Trägheitskraft ist das Produkt von Pfahlfußbeschleunigung und Pfropfen- oder Bodenmasse. Pfropfenmasse gibt es beim offenen Rohrpfahl, während ein geschlossener Pfahl Bodenmasse verdrängt.

Beispiel 1: Offenes Rohr in sandigem Boden

Als Beispiel dynamischer Kräfte am Pfahlfuß wird ein Pfahl mit 1200 mm Durchmesser betrachtet. Der Pfahl war auf 36 m Tiefe gerammt und nach mehr als einer Woche nachgerammt worden. Bei der Nachrammung wurden Messungen am Pfahlkopf vorgenommen und mit dem CAPWAP Programm ausgewertet. Um eine gute Anpassung von Rechnung und Messung zu erzielen, war es notwendig mit Pfropfenmasse, Bodendämpfung, Abstrahldämpfung und natürlich statischem Widerstand zu arbeiten. Abbildung 5 (rechts) zeigt diese Kraftkomponenten und, dass die berechnete Gesamtkraft am Pfahlfußsegment, 1 m über der Pfahlspitze angreift. Sie setzt sich aus Komponenten der Bodenmassenträgheit, der Bodendämpfung und des statischen Bodenwiderstandes zusammen. Der statische Bodenwiderstand ist die Summe aus Spitzenwiderstand und Mantelreibung über ein 2 m langes Segment. Zusätzlich zur Pfropfenmasse von 1.9 Mg (entspricht ungefähr der Bodenmasse in einem Rohrstück von 1 Durchmesser Länge) musste auch mit einer 10% erhöhten Rohrimpedanz (equivalent zu zusätzlicher Masse und Steifigkeit) gerechnet werden. Dazu kam dann noch eine Abstrahldämpfung (110% der Pfahlimpedanz) für die Mantelreibung.

Abbildung 5 links zeigt dimensionslose Pfahlspitzenkräfte (bezogen auf den statischen Spitzenwiderstand). Die Trägheitskraft der Propfenmasse ist hier beinahe 3 mal so groß wie der statische Spitzenwiderstand. Der Kräfteverlauf zeigt auch, dass die relativ hohe Pfropfenmassenträgheitskraft nur über eine sehr kurze Zeit wirkt. Das kann aber lang genug sein,

um den Pfropfen gegenüber dem Rohr zu verschieben. Auf diese Weise werden dann die Spitzendruckkräfte zu Mantelreibungskräften im Inneren des Pfahles.

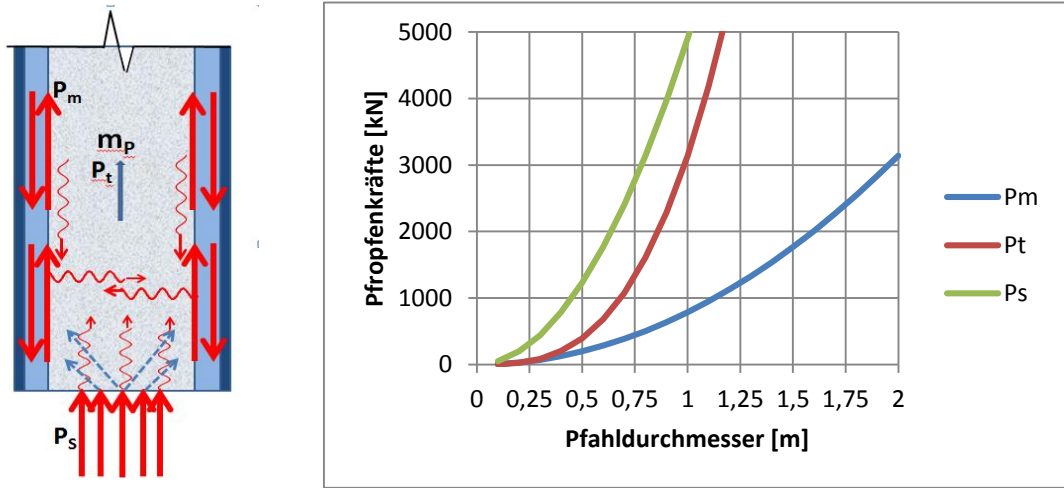


Abbildung 4: links, Kräfte am und Wellen im Bodenpfropfen; rechts, berechnete Pfropfenkräfte in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser

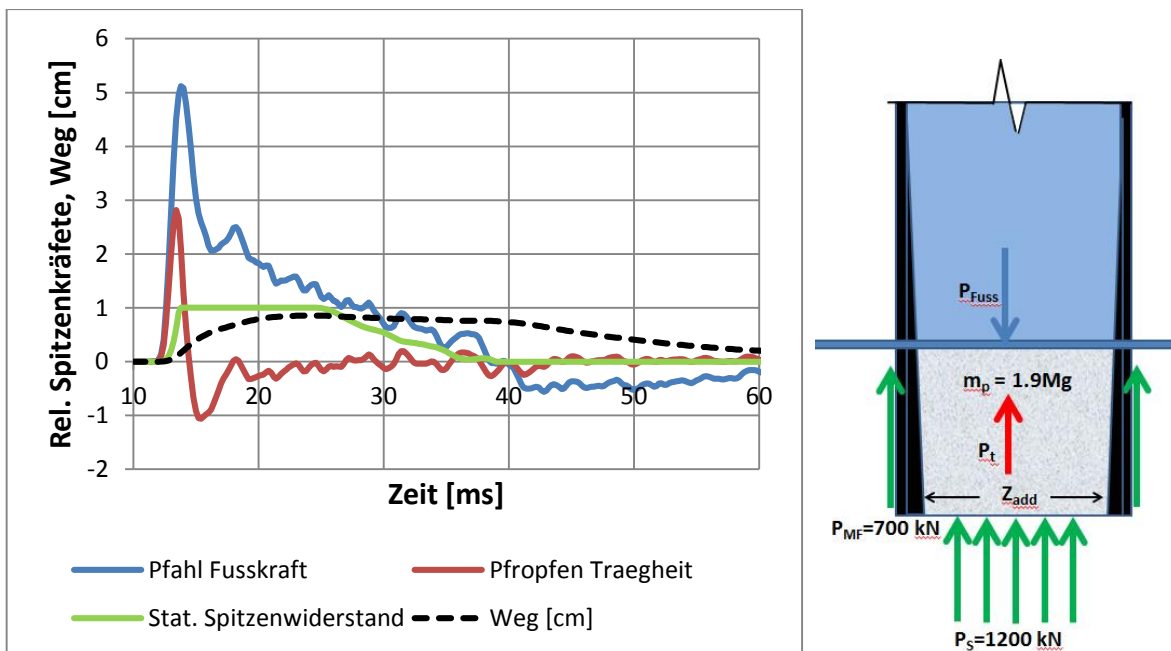


Abbildung 5: CAPWAP berechnete Fußkräfte über die Zeit für Beispiel 1

Die Rechnung ergab weiter eine relativ kleine elastische Bodenverformung (quake) von wenig mehr als 1 mm oder ungefähr 40% des für einen offenen Rohrfahl erwarteten Wertes. Deshalb könnte darauf geschlossen werden, dass keine Pfropfenbildung auftrat; da aber eine Pfropfenmassenkraft an der Pfahlspitze auftrat und der Spitzendruck auf den

Stahlquerschnitt bezogen mehr als 15 MPa sein würde, bietet eine teilweise Pfropfenabbildung eine bessere Erklärung.

Beispiel 2: Geschlossenes Rohr im Kies-Sand

Wenn nur vertikale Lasten im Pfahl abgetragen werden müssen und daher die Gesamteinbindung des Pfahles von untergeordneter Bedeutung ist, können selbst größere Pfahldurchmesser entweder völlig oder teilweise geschlossen gerammt werden. Im Beispiel 2 wurde ein 1067x20 mm Pfahl mit einer ausgerundeten Stahlspitze versehen. Er wurde dann bis zur „Praktischen Rammgrenze“ in eine dichte Kiessandschicht bei etwa 10 m Tiefe gerammt, wo er dann auch die erwartete Grenztragfähigkeit laut dynamischer Messung erzielte. Messungen wurden am Pfahlkopf während der Rammung vorgenommen; die in den Pfahl eingetragene Energie betrug demnach beinahe 200 kJ. Die CAPWAP Berechnung wurde mit einer 3 kN Bodenmasse aber ohne Abstrahldämpfung vorgenommen. Der Spitzendruck über die Gesamtfläche betrug beinahe 7 MPa und die Mantelreibung über die unteren 6 Durchmesser 80 kPa.

Abbildung 6 (oben) zeigt als Funktion der Zeit die dimensionslosen (relativ zum statischen Spitzenwiderstand) mit CAPWAP berechneten Pfahlspitzenkräfte: Gesamtkraft, Statischer Fußwiderstand (Spitze plus Reibung am Fußsegment), Geschwindigkeit mal Impedanz, und Trägheitskraft zusammen mit der Pfahleindringung am Fuß. Diese Kraftkomponenten wurden dann auch über der Spitzeneindringung (oder dem Weg in cm) in Abbildung 6 (unten) aufgetragen. Die Trägheitskraft erreichte in diesem Beispiel nur etwa 40% des statischen Fußwiderstandes und, obwohl sie über nur eine sehr kurze Zeit positiv war, erreichte der Fußwiderstand während dieser Zeit mehr als 60% des gesamten statischen Widerstandes. In diesem Beispiel ist der dynamische Bodenwiderstand (Dämpfung) 3 mal so groß wie der statische und hat damit wesentlich mehr Einfluss auf die Pfropfenbewegung als die Trägheitskraft.

Es ist bekannt dass große Verdrängungspfähle nur mit großen Eindringungen den vollen Fußwiderstand mobilisieren können. In diesem Beispiel war die gerechnete elastische Bodenverformung am Fuß (quake) 15 mm (für sehr dichte oder sehr harte Böden wird gewöhnlich 1/120 des Durchmessers oder 8,5 mm erwartet; bei lockereren Böden zweimal so viel).

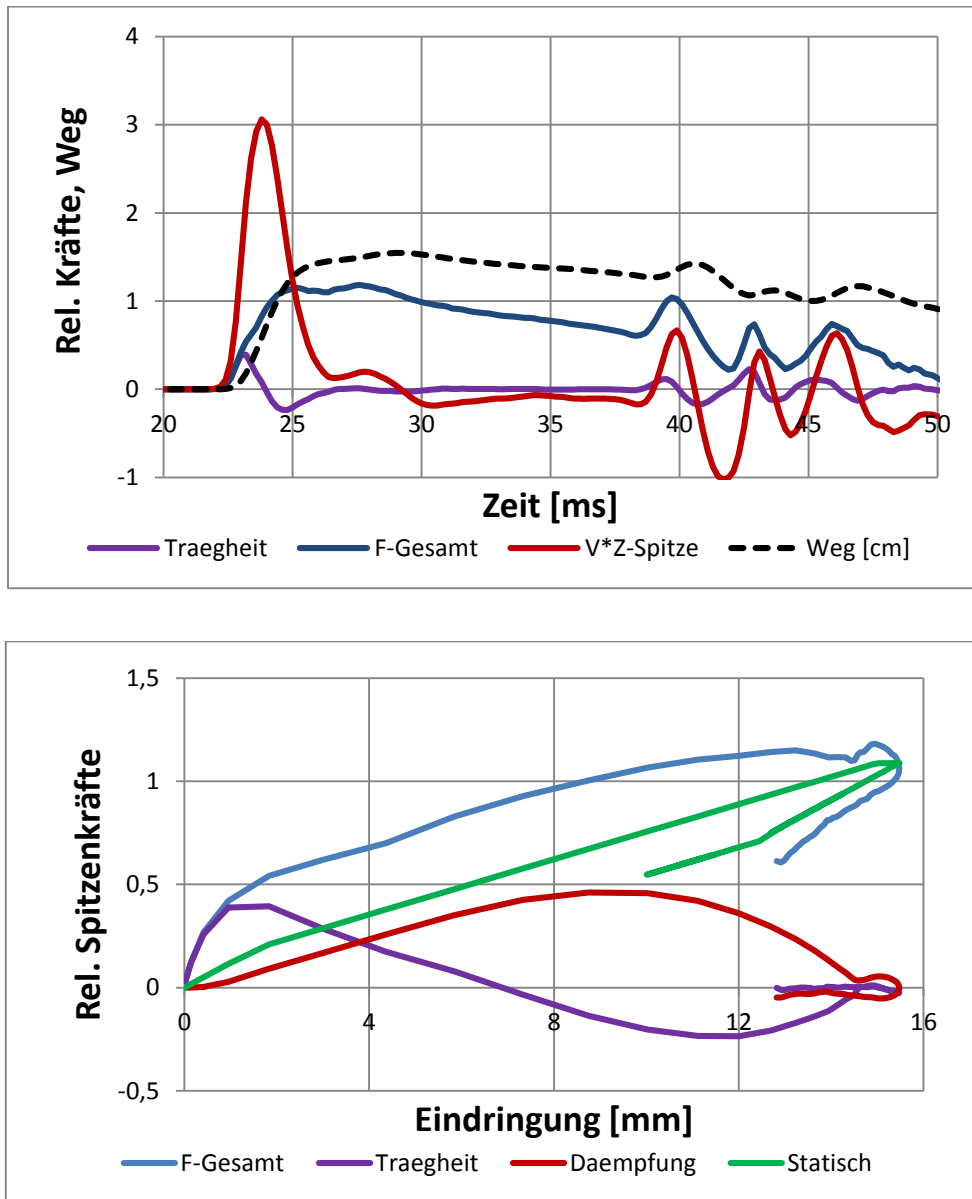


Abbildung 6: Kräfte am Pfahlfuß für Beispiel 2 über Zeit und Fuß Eindringung

Beispiel 3: Offenes Rohr im Kies-Sand

Auf der gleichen Baustelle wie im Beispiel 2, wurde ein Pfahl mit gleichem Durchmesser aber ungefähr 10 m länger offen auf 25 m Tiefe gerammt, wo er die "praktische Rammgrenze" und ungefähr 95% der erwarteten Grenztragfähigkeit erreichte. Die Energie im Pfahl war 10% höher als im Beispiel 2. Abbildung 7 zeigt die Kräfte und Bewegungen wie Abbildung 6 im vorgehenden Fall.

Um eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung zu erzielen, wurde eine Abstrahldämpfung von 3,5 mal der Pfahlimpedanz ($\text{kN}/(\text{m}/\text{s})$) angesetzt und eine kleine Pfropfenmasse von 300 kg (das entspricht einer Pfropfenlänge von etwa 20% des Pfahldurchmessers). Es ergaben sich dabei ein Spitzendruck von 4 MPa (über den Gesamtquerschnitt gerechnet) und eine Mantelreibung von 220 kPa (über die untersten 5,5 mal Durchmesser).

Dieser Pfahl hat sich nicht als Verdrängungspfahl verhalten. Das zeigt nicht nur der relativ geringe Spitzendruck, sondern auch die gemittelte elastische Eindringung des Fußwiderstands von 4 mm. Das bedeutet also, dass der Fußwiderstand wesentlich steifer, wenn auch geringer war als der des geschlossenen Pfahls. Wegen seiner größeren Länge hatte dieser Pfahl dann insgesamt die gleiche Steifigkeit wie der kürzere Pfahl mit seinem größeren, aber sich weicher verhaltenden Spitzendrucks.

Beispiel 4: Rohrpfahl mit Betonpfropfen

Das folgende Beispiel soll zeigen, dass Bodenpfropfen sehr verschiedene Eigenschaften haben können. In diesem Fall wurden 40 m lange Pfähle, die in den oberen 27,5 m mit Beton gefüllt waren, bis zur „praktischen Rammgrenze“ auf eine Tiefe von etwa 28 m gerammt. Der Boden bestand aus schluffigen Sandschichten und im Pfahlspitzenbereich aus steifem Ton. Es kann also erwartet werden, dass der offene Rohrteil der Pfähle mit den schluffigen Sanden des oberen Bereiches gefüllt war.

Für die 2 Testpfähle musste bei der Auswertung der Messungen mit 2 verschiedenen Modellen gearbeitet werden. Das erste war normal, d.h. der Pfahlsegmente wurden direkt aus den Materialkennwerten der Stahl- und Betonquerschnitte berechnet. Allerdings musste sowohl ein Spitzenwiderstand am Betonende wie auch am Rohrende angesetzt werden. Bei dem zweiten Pfahl zeigte der Bodenwiderstand ein unerwartet weiches Verhalten und anstelle der Stahlkennwerte des Rohres musste das Pfahlmodell im unteren Bereich mit einer Stahl-Bodensäule gerechnet werden, die eine Wellengeschwindigkeit von weniger als 80% der des Stahles hatte. Die mit CAPWAP berechneten Last-Setzungslinien in Abbildung 8 (die Belastung ist in Prozent der erwarteten Grenztragkraft aufgetragen) geben das weichere Verhalten des zweiten Pfahles eindeutig wieder. In beiden Fällen war aber die während des Rammens

auftretende Grenztragkraft etwas geringer als erwartet. Möglicherweise würden Nachrammungen höhere Werte ergeben.

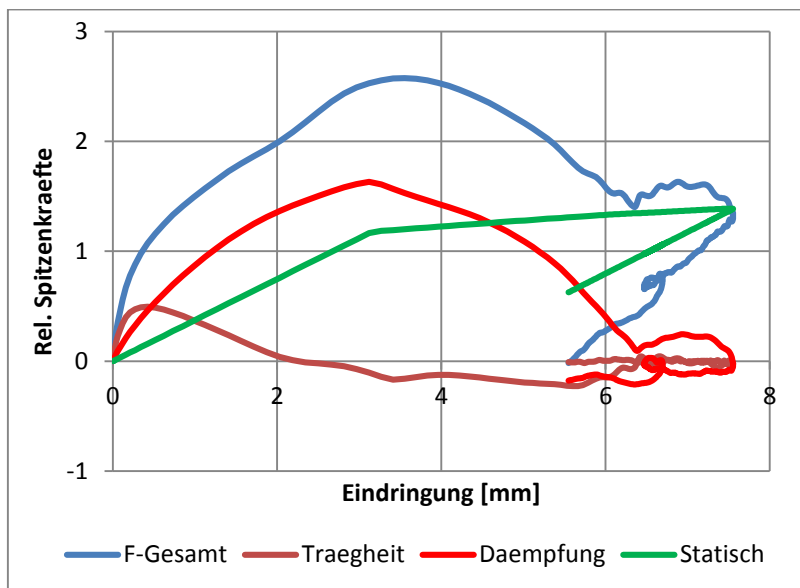
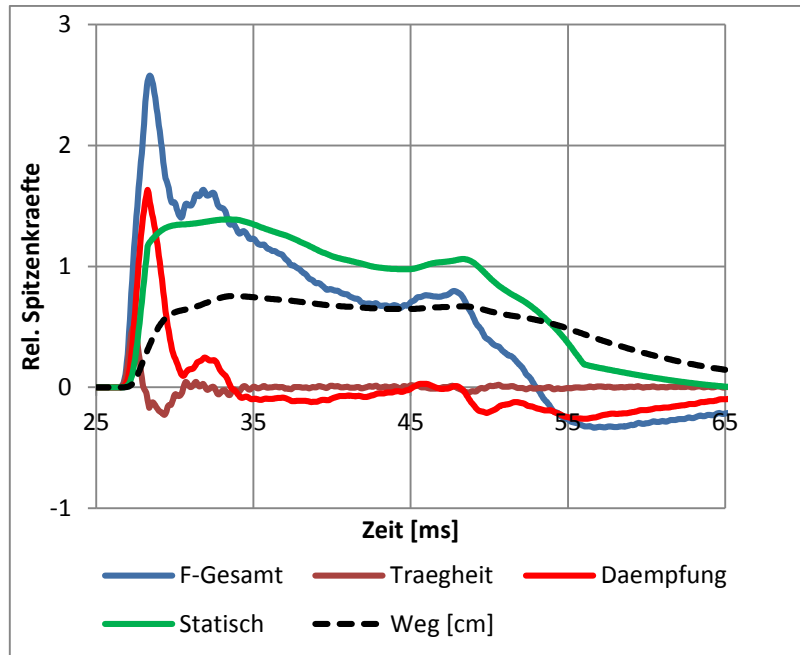


Abbildung 7: Kräfte am Pfahlfuß für Beispiel 3, oben über die Zeit und unten über die Fußeindringung

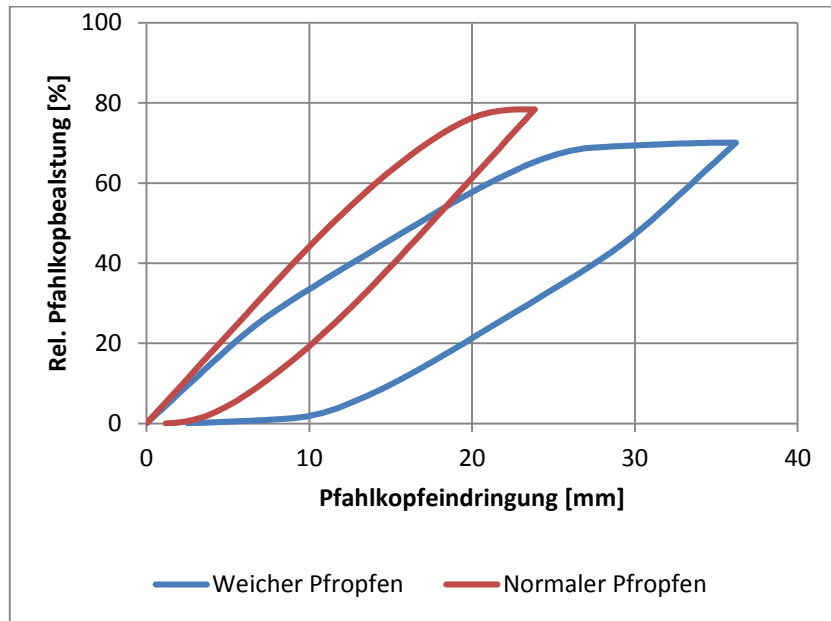


Abbildung 8: CAPWAP berechnete Lastsetzungslinien für 2 ähnliche Beton-Rohrpfähle

Zusammenfassung

Der Beitrag beschäftigte sich mit dem dynamischen Verhalten von Rohrpfählen und gibt Beispiele für die Auswertung von dynamischen Messungen.

Das Verhalten offener Rohrpfähle während des Rammens unterscheidet sich je nach Pfahldurchmesser. Die Rammung kann wie folgt klassifiziert werden

- Klein wurden Durchmesser von 500 mm oder weniger bezeichnet. In diesen Fällen kann i. A. angenommen werden, dass sich im dichten rolligen oder im harten feinkörnigen Boden der Pfahl so verhält als ob er am Fuß geschlossen wäre.
- Durchmesser von mehr als 1.500 mm gehören zu den großen Pfählen; in diesen Fällen beeinflussen sich die Scherkräfte von gegenüberliegenden Seiten im Pfahl während des Stoßes nicht, sodass erwartet werden muss, dass sich ungleichmäßige Verformungen in der Bodensäule ergeben. Auch sind Spitzendruck und Pfropfen­trä­ge­kraft so groß, dass es im dynamischen Fall kaum zur Pfropfenbildung kommen kann. Auch bei statischer Belastung muss bei großen Pfählen erwartet werden, dass sich ein vollkommener Pfropfen kaum bilden kann.

- Bei den mittleren Durchmessern, zwischen 500 und 1500 mm, ergeben sich die größten Schwierigkeiten bei der Berechnung des dynamischen und statischen Verhaltens. Es kann durchaus bei diesen Pfählen vorkommen, dass sie sich bei dynamischer Belastung wie ein offenes Rohr verhalten, während einer statischen Belastung aber wie ein geschlossenes Rohr. Dabei muss dann allerdings eine entsprechende Eindringung in den tragfähigen Boden gewährleistet sein.

Die Beispiele zeigten auch, dass teilweise offene Pfähle, selbst wenn sie benachbart sind, ein völlig verschiedenes Tragverhalten aufweisen können.

Literatur

API, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Load and Resistance Factor Design, RP-2A LRFD, 1993, Reaffirmed 2003. American Petroleum Institute, 1220 L-Street, Washington, DC, 20005, USA.

Pile Dynamics, Inc., CAPWAP Manual 2006, www.pile.com.

Pile Dynamics, Inc., GRLWEAP Manual 2010, www.pile.com

Paikowsky, S. und Chernauskas, L.R., Dynamic analysis of open ended pipe piles, Proceedings of the 8th Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Lisbon, Portugal 2008, J.A. Santos, Ed., IOS Press, S. 59-76.

Rausche, F. und Klingmüller, O., Rammbarkeitsuntersuchung für Offshore-Monopiles von Windenergieanlagen, Mitteilungen des Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Februar 2005, S. 177-194.

Autoren

Dipl.-Ing. Frank Rausche, Ph.D.

frausche@pile.com

GRL Engineers, Inc.

30725 Aurora Road, Cleveland, OH 44139, USA

Garland Likins , M.S.

glikins@pile.com

Pile Dynamics, Inc.

30725 Aurora Road, Cleveland, OH 44139, USA

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller

ok@gsp-mannheim.de

GSP Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode, mbH

Steubenstraße 46, 68163 Mannheim