

Zur Auswertung dynamischer Messungen an großen offenen Stahlrohrpfählen

Frank Rausche, Garland Likins und Oswald Klingmüller

Besonders im Nearshore und Offshore Bereich werden für die Gründung von immer mehr und teureren Bauvorhaben häufig offene Stahlrohrpfähle mit immer größeren Durchmessern in den Meeresboden gerammt. Dabei kommt es dann zu zwei grundsätzlichen Fragestellungen.

- (a) bei der Planung, kann das Rohr wirtschaftlich und schadensfrei gerammt werden?
und
- (b) während der Installation, können die Bodenwiderstandskräfte die Gebrauchslasten mit genügendem Sicherheitsgrad und mit annehmbaren Setzungen aufnehmen?

Die erste Frage wird häufig mit einer Wellengleichungsanalyse beantwortet. Die zweite 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 Pfropfenbildung kommt, muss dann bei der Berechnung ein realistisches Bodenmodell für die dynamische Lastabtragung am Pfahlfuß gefunden werden.

Dieser Beitrag beschreibt mehrere Fallstudien vom internationalen Hafenbau und von 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 Pfropfenbildung 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.

Einleitung

Stahlrohrpfähle mit Durchmessern bis zu 4 m kamen bereits in den 70er Jahren im Offshore Bereich zur Verwendung (Bild 1). Als Monopfähle in der Windenergieindustrie sollen die Durchmesser etwa 2 mal so gross werden und wegen hoher Biegemomente soll es dabei auch zu sehr grossen Wandstärken kommen. Als Alternative zu Fangedaemmen aus einzelnen Spundwandbohlen sollen jetzt sogar Rohre mit 20 m Durchmesser in den Boden gerüttelt werden.

Dynamische Messungen und Berechnungen sind bei diesen Pfahlgroessen von entscheidender Bedeutung, weil (a) die Auswahl von geeigneten Rammgeräten unnötige und hohe Kosten vermeiden kann und (b) weil dynamische Messungen (in den meisten Fällen mit einem Pile Driving Analyzer® aufgenommen und verarbeitet) eine wirtschaftlich erschwingliche Probelastung darstellen und auch wertvolle Ergebnisse für spätere Pfahlbemessungen und Rammarbeiten liefern. 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 weithin bekannte Smithsche Bodenmodell. Dabei werden die Bodenwiderstandskräfte als Funktionen der Pfahlbewegung (Pfahlverschiebung + elastisch-

plastische Feder ergeben statischen Widerstand und Pfahlgeschwindigkeit + Daempfer geben dynamischen Widerstand) in der Pfahl-Bodenfuge angenommen (Bild 2a).

Waehrend das Smith-Modell meist zufriedenstellende Ergebnisse bei der Simulierung 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 tatsaechlichen Gegenbenheiten besser simulieren kann. Die fuer die Rohrmessungen wichtigen Modellerweiterungen sind dabei die Beruecksichtigung von Residualspannungen, die am Ende des Rammschlages im Pfahl und Boden verbleiben, der Traegheit der Pfropfenmasse und der Bewegung des den Pfahl umgebenden Bodens. Die Residualspannungen werden im GRLWEAP und CAPWAP Programm durch wiederholte Schlagsimulierungen iterativ berechnet. Die Traegheitskraft des Pfropfens wird als Produkt von Pfahlbeschleunigung und Pfropfenmasse (mp) berechnet, waehrend die Bodenbewegung mit Hilfe zusaetzlicher Daempfer (Sk , Bt) und Bodenmassen (ms , mt) dargestellt (Bild 2b). Die Beruecksichtigung der Bodenbewegung ist deshalb wichtig weil sie erklart, warum der statische Bodenwiderstandsteil abnehmen kann (wenn der Boden praktisch ausweicht), waehrend der Pfahl noch eine positive Geschwindigkeit hat (also sich immer noch nach unten bewegt). Am Mantel erklart sich das mit einer in den Halbraum propagierenden Welle und im und unter dem Rohr mit einer Pfropfenbewegung. Das Smith-Modell sieht nicht vor, dass der statische Widerstand bei positiven Geschwindigkeiten abnehmen kann. Die feste Verbindung zwischen Pfropfenmassen und Pfahlelementen ist natuerlich eine sehr einschneidende Vereinfachung; das soll demnaechst verbessert werden.



Bild 1: Rohrpfahl von 3660 mm Durchmesser

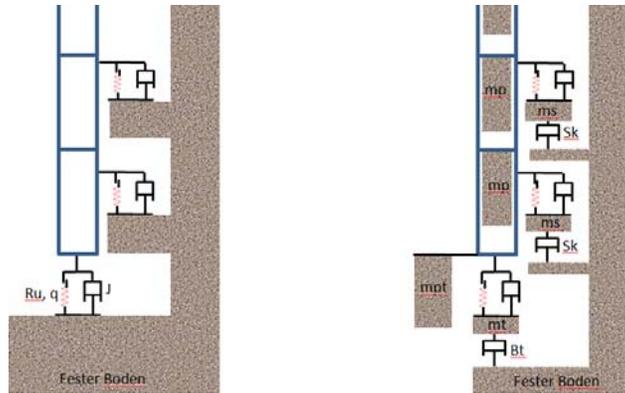


Bild 2a: Smith Bodenmodell Bild 2b: Erweitertes CAPWAP Bodenmodell

Pfahle mit grossem, d.h. mit mehr als 1.5 m, Durchmesser koennen meist nur offen gerammt werden und werden daher als Nicht-Verdraengungspfahle klassifiziert. 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 Traegtheit des Bodenpfropfens entgegenzuwirken. Bei diesen groesseren Pfahlen kommt es auch kaum zu einem Miteinanderwirken der gegeneberliegenden Pfahlseiten. Nehmen wir eine Schergeschwindigkeit im Boden von 150 m/s an, dann kommt in einem 1.5 m Durchmesser Pfahl die Scherwelle von der gegeneberliegenden Pfahlseite erst nach 10 ms an. Das ist in den meisten Rammfaellen aber ungefaehr die Dauer einer positiven (nach unten gerichteten) Geschwindigkeit. Das bedeutet auch, dass bei groesseren Pfahlen, der Pfropfen ungleichmaessig belasted wird und sich daher nicht gleichmaessig mit dem Pfahl bewegen kann.

Pfahle mit mittleren Durchmessern, ungefaehr im 0,5 bis 1,5m Bereich, verhalten sich manchmal als Verdraengungspfahle, indem sich ein Pfropfen schon waehrend des Pfahlrammens bildet was meist zu sehr hohen Schlagzahlen (kleinen Eindringungen pro Schlag) fuehrt. Damit der Pfropfen sich mit dem Rohr bewegt, muss die Mantelreibung im Pfahlinneren sehr gross sein, was nicht immer durch die normalen Effektivspannungen (Bodengewicht unter Auftrieb) moeglich ist und bei rolligen Boeden haeufig mit dem Gewoelbeeffekt erklart wird (der vertikale Druck gegen den Pfropfen verursacht seitlich hohe Druেকে).

Bei kleinen Rohrdurchmessern mit weniger als etwa 0.5 m in dichten und sehr dichten Boeden kommt es oft sehr schnell zur Pfropfenbildung (vielleicht auch durch den Gewoelbeeffekt) und daher zur Ausbildung des vollen Spitzendrucks. Dadurch erledigt sich automatisch die Frage der Reibung im Pfahlinneren. Kleinere Durchmesser unterscheiden sich also kaum im Ramm- und Tragverhalten von geschlossenen Pfahlen.

Offshore Rohrpfahle muessen wegen Wellen- und anderen horizontalen Belastungen und grossen Wassertiefen, oft hohe Querkraefte und Momente aufnehmen. Ihre Wandstaerke ist dann zumindest im Maximalmomentenbereich wesentlich hoeher als fuer die Normalkraefte im statischen und dynamischen Zustand erforderlich. Groessere Wandstaerken und die damit verbundene hoehere Pfahlsteifigkeit erlauben auch sehr grosse Roehre in Boeden hoher Festigkeit mit verfuegbaren Geraeten zu rammen. In der Form von berechneten Eindringungen in Abhaengigkeit von Tragfaehigkeiten zeigt das Bild 3 fuer 3 Rohrpfahle von 4 m Durchmesser

dass eine hohe gleichfoermige Wandstaerke von 125 mm die beste Rammpbarkeit hat, waehrend die mit 75 mm oben und unten und 125 mm in der Mitte am schwersten zu rammen ist. Das Beispiel wurde mit GRLWEAP und den Daten eines Menck MHU 1700T Rammbaeren (100 Mg Schlaggewicht) gerechnet.

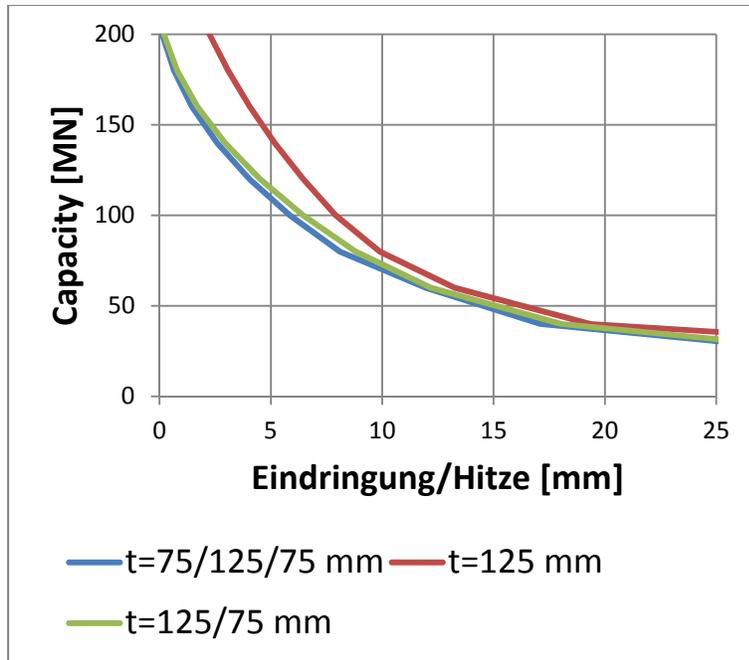


Bild 3: Eindringungen/Hitze fuer Pfaehle mit verschiedenen Wandstaerken

Was passiert im offenen Rohrpfahl beim Hammerschlag

Der Hammerschlag verursacht eine Druckwelle im Pfahl, d.h. die Rohrteilchen bewegen sich erst am Pfahlkopf und etwas spaeter im unteren Pfahlbereich nach unten. Wo sich eine Bodensauele im Pfahl befindet, wird diese eine Reibung am inneren Pfahlmantel verursachen; ein voelliges Mitnehmen der Bodenteilchen, so dass sie sich mit dem Pfahl bewegen (Pfropfenbildung) ist wegen der Bodentraegheit im oberen Pfahlbereich praktisch unmoeglich. Aussen und innen am Rohrpfahl verursachen die Widerstandskraefte 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 Widerstandskraefte keinen Einfluss auf die untenliegenden Schichten haben waehrend sich die Stosswelle im Pfahl nach unten propagiert.

Wenn die Stosswelle das untere Ende des Rohres erreicht ist sie je nach Mantelreibung in ihrer Intensitaet reduziert. Die Beschleunigung ist allerdings immer noch hoch nur wird sie ueber eine etwas kuerzere Zeit wirken als am Pfahlkopf. Die im Stahl ankommende Stosswelle bewirkt zusaetzlich zur aeusseren und inneren Mantelreibung einen Druck an der Stahlspitze entstehen. Wenn die innere Reibung genuegend gross ist, dann drueckt sie gegen den Boden und dadurch kann sich der Gesamtfusswiderstand aufbauen (Pfropfeneffekt). Besonders im rolligen Boden ist es auch moeglich, dass wegen der Querdehnungseffekte in Boden und Pfahl, der erhoechte Druck

gegen den Pfropfen eine zusätzliche seitliche Reibung im Rohr verursacht, die grösser ist als die Reibung aussen am Pfahl. Ist die innere Reibung nicht genügend gross, dann bewegt sich die Bodensaule relativ zum Pfahl nach oben (teilweiser oder kein Pfropfeneffekt), wobei dann natürlich der Spitzendruck sofort abnimmt.

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 (und das ist der interessante Fall), ist die Gesamtdruckwelle grösser als die im Stahl reflektierte Zugwelle, wodurch sich die Rohrteilchen nach oben bewegen (Rueckfederung). Dadurch entspannt sich der Druck im Boden im und unter dem Pfahl und die Widerstandskräfte nehmen schlagartig 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 Rueckfederung des Pfahls verursacht im oberen Teil der inneren Bodensaule 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 Rueckfederung und nach der Zugreflexion gibt es weitere Rohrteilchenbewegungen nach unten. Die Bodensaule befindet sich dann auch in einem Zustand der Auflockerung.

Aussen am Pfahl sorgt der sich relativ starr verhaltende Bodenhalbraum dafür, dass während der Rueckfederung sich nach unten gerichtete Mantelreibungskräfte entwickeln, die bis zum nächsten Schlag verbleiben (Residual Stress Effekt). Die negativen äusseren Widerstandskräfte verhindern oft, dass es zu einer völligen Rueckfederung 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.

Anwendung der Theorie

Grosse Rohrdurchmesser: Beim Rammen und bei sehr grossen Durchmessern auch im statischen Fall 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 Bodensaule geringer sind und (b) weil die Bodensaule 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 Massenkkräfte simuliert werden kann.

Mittlere Rohrdurchmesser: Die Bilder 4a und 4b erläutern den bei diesen Durchmessern komplizierteren Zusammenhang, wobei mit P_m , P_t und P_s die Mantelreibung, die Pfropfentragkraft 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 offenes Rohr. Wenn die Mantelreibung aber geringer ist, dann gibt es entweder nur eine teilweise oder überhaupt keine Pfropfenbildung; in dem Fall stanz das Rohr durch den Boden und die

Bodensaule bleibt in ihrer urspruenglichen Lage. Die Kurven in Bild 4b zeigen in Abhaengigkeit vom Pfahldurchmesser diese 3 Kraftgroessen. Sie ergeben sich unter der Annahme, dass die Beschleunigung am Pfahlfuss 250 g, die Mantelreibung im Pfahlinneren 250 kPa und der Spitzendruck 10 mal groesser als die Mantelreibung ist. Das Volumen der Pfpfenmasse wurde mit einer Laenge von 2 mal Durchmesser angenommen. Selbst mit dieser relativ kurzen Pfpfenmasse ist in diesem Beispiel die Traegheitskraft schon bei einem Durchmesser von 0,6 m ebenso gross wie der Spitzendruck und mehr als zweimal die innere Reibung. Fuer diese Reibung wurde angenommen, dass sie auch ueber eine Laenge von 2 Pfahldurchmessern in das Rohr uebertragen wird. Diese Annahme ist vernuenftig, wenn in der Tat der Pfpfen praktisch starr mit dem Rohr verbunden ist. Bei teilweisem Pfpfenverhalten kann sich die Reibung ueber groessere Strecken aufbauen.

Beispiele von ausgewerteten Messungen

Im fogenden werden an Hand von dynamischen Pfahlkopfmessungen die Vorgaenge am Pfahlfuss untersucht. Die PDA Daten (Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf) wurden zunaechst mit einem Signal Matching Programm (CAPWAP) ausgewertet. Wenn eine beste Uebereinstimmung von Rechnung und Messung erzielt worden ist, ergeben sich damit die verschiedenen Prameter des Bodenmodells. Zusaetzlich kann man damit auch die Verschiedenen Anteile der Gesamtfusskraft, also Traegheit, Daempfung und statischer Widerstand. Am Pfahlfuss haben die statischen und dynamischen Widerstandekraefte eine Reibungs- und eine Spitzenkomponente. Die Tragheitskraft ist das Produkt von Pfahlfussbeschleunigung und Pfpfen- oder Bodenmasse. Pfpfenmasse gibt es beimoffenen Rohrpfahl waehrend ein geschlossener Pfahl Bodenmasse verdraengt.

Es sollte hier auch noch geklaert werden was in manchen internationalen Rammvorschriften „Practical Refusal“ und „Absolute Refusal“ nicht ganz eindeutig definiert wird. Der „Praktische Rammlimit“ entspricht haeufig einer Schlagzahl von 800 Schlaegen/m oder einer Eindringung von 1.25 mm/Schlag. Die Hammerhersteller garantieren ihre Maschinen meist nur, wenn dieser Wert nich ueberschritten wird. Der absolute Rammwiderstand wird haeufig mit dem praktischen verwechselt, soll aber eigentlich bedeuten, dass der Pfahl unter einem Schlag ueberhaupt nicht eindringt (unendlich grosse Schlagzahl). Das ist unpraktisch, weil es selten zu Null-eindringungen kommt. API (2003) hat deshalb den absoluten Rammlimit so definiert, dass unter 800 Schlaegen der Pfahl weniger als 300 mm eindringt (0.375 mm/Schlag); nach einer Rammunterbrechung wird dieser Rammlimit verdoppelt (weniger als 150 mm unter 800 Schlaegen oder 0.188 mm/Schlag). Es wird daher vorgeschlagen, dass der „Absolute Rammlimit“ auch im allgemeinen so definiert wird, dass eine Rammung abgebrochen werden muss wenn der Pfahl weniger als 300 mm unter 800 Schlaegen eindringt. Auf der anderen Seite sollte nie ein Rammkriterium verlangen, dass der Pfahl weniger als 12.5 mm pro Hitze eindringt. Die US Strassenbehoerden verlangen i. A., dass die planmaessige Eindringung von Mantelreibungspfahlen auf nicht weniger als 25 mm pro Hitze beschraenkt wird.

Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser

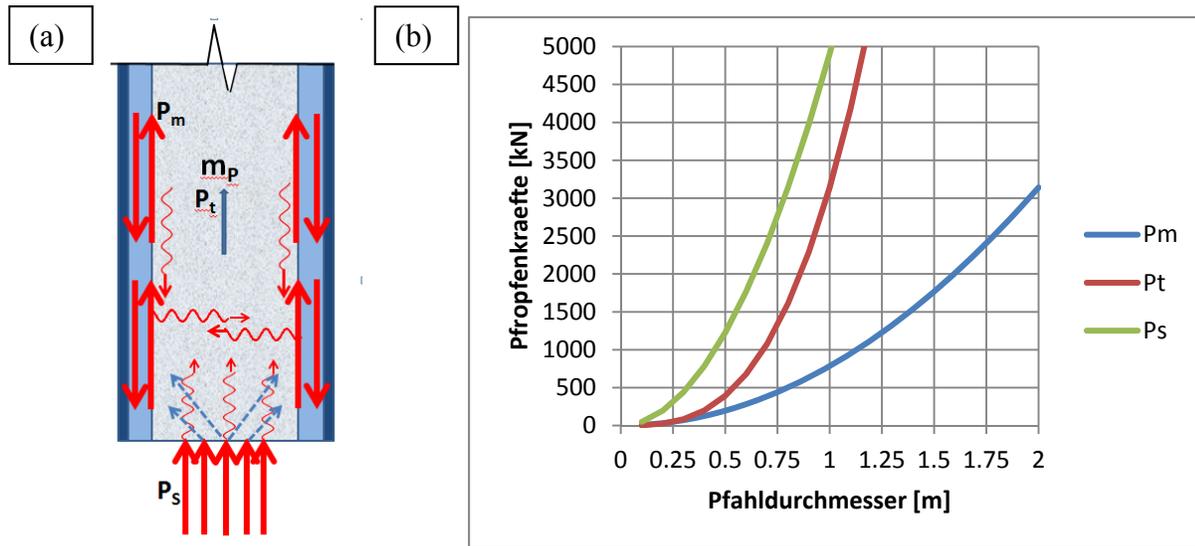


Bild 4: (a) Kräfte am und Wellen im Bodenpfropfen; (b) Berechnete Bodenpfropfenkräfte in

Beispiel 1: Offenes Rohr in sandigem Boden

Als Beispiel dynamischer Kräfte am Pfahlfuss wird ein 1200 mm Durchmesser Pfahl 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 Program ausgewertet. Um eine gute Anpassung von Rechnung und Messung zu erzielen, war es notwendig mit Pfropfenmasse, Bodendaempfung, Abstrahldaempfung und natürlich statischem Widerstand zu arbeiten (Bild 5, rechts). Bild 5 rechts zeigt dimensionslos die berechnete Gesamtkraft am Pfahlfusssegment, d.h. 1 m ueber der Pfahlspitze. Sie setzt sich aus Komponenten von Bodenmassentraegheit, Bodendaempfung und statischem Bodenwiderstand zusammen. Der statische Bodenwiderstand ist die Summe von Spitzenwiderstand und Mantelreibung ueber ein 2 m langes Segment. Zusätzlich zur Pfropfenmasse von 1.9 Mg (entspricht ungefaehr der Bodenmasse in einem Rohrstueck von 1 Durchmesser Laenge) musste auch mit einer 10% erhoekten Rohrimpedanz (equivalent zu zusaetzlicher Masse und Steifigkeit) gerechnet werden. Dazu kam dann noch eine Abstrahldaempfung (110% der Pfahlimpedanz) fuer die Mantelreibung.

Bild 5 rechts zeigt dimensionslose Pfahlspitzenkraefte (normalisiert mit dem statischen Spitzenwiderstand). Das zeigt, dass die Traegheitskraft der Propfenmasse beinahe 3 mal so gross ist wie der statische Spitzenwiderstand. Der Kraefteverlauf zeigt auch, dass die relativ hohe Pfropfentraegheitskraft nur ueber eine sehr kurze Zeit wirkt. Das kann aber lang genug sein, um den Pfropfen gegenueber dem Rohr zu verschieben. Auf diese Weise werden dann die Spitzendruckkraefte zu Mantelreibungskraeften im Inneren des Pfahles.

Die Rechnung ergab weiter eine relativ kleine elastische Bodenverformung (quake) von wenig mehr als 1 mm oder ungefaehr 40% des fuer einen offenen Rohrpfahl erwarteten Wertes. Deshalb koennte 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 wuerde, bietet eine teilweise Pfropfenbildung eine bessere Erklaerung.

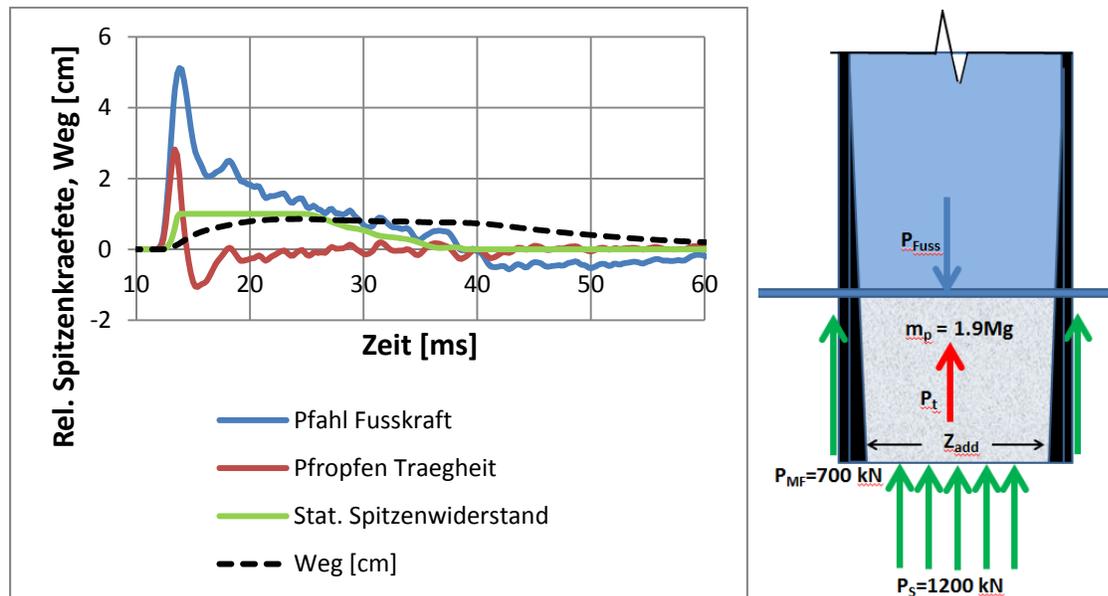


Bild 5: CAPWAP berechnete Fusskraefte ueber die Zeit fuer Beispiel 1

Beispiel 2: Geschlossenes Rohr im Kies-Sand

Wenn nur vertikale Lasten im Pfahl abgetragen werden muessen und daher die Gesamteinbindung des Pfahles von untergeordneter Bedeutung ist, koennen selbst groessere Pfahldurchmess entweder voellig oder teilweise geschlossen gerammt werden. Im Beispiel 2 wurde ein 1067x20 mm Pfahl mit einer ausgerundeten Stahlspitze versehen. Er wurde dann bis zum „Praktischen Rammlimit“ in eine dichte Kiessandschicht bei etwa 10 m Tiefe gerammt, wo er dann auch die erwartete Grenztragfaehigkeit laut dynamischer Messung erzielte. Messungen wurden am Pfahlkopf waehrend der Rammung vorgenommen; die in den Pfahl eingetragene Energie war demnach beinahe 200 kJ. Die CAPWAP Berechnung wurde mit einer 3 kN Bodenmasse aber ohne Abstrahldaempfung vorgenommen. Spitzendruck ueber die Gesamtflaeche war beinahe 7 MPa und die Mantelreibung ueber die unteren 6 Durchmesser 80 kPa.

Bild 6 (oben) zeigt als Funktion der Zeit die dimensionslosen (relativ zum statischen Spitzenwiderstand) die CAPWAP berechneten Pfahlsitzenkraefte: Gesamtkraft, Statischer Fusswiderstand (Spitze plus Reibung am Fusssegment), Geschwindigkeit mal Impedanz, und Traegheit zusammen mit der Pfahleindringung am Fuss. Diese Kraftkomponenten wurden dann auch ueber der Spitzeneindringung (oder dem Weg) im Bild 6 (unten) aufgetragen. Die Traegheitskraft erreichte in diesem Beispiel nur etwa 40% des statischen Fusswiderstandes und, obwohl sie ueber nur eine sehr kurze Zeit positiv war, erreichte der Fusswiderstand waehrend dieser Zeit mehr als 60% des gesamten statischen Widerstandes.

Es ist bekannt dass grosse Verdraengungspfaehle nur mit grossen elastischen Eindringungen den vollen Fusswiderstand mobilisieren koennen. Im diesem Beispiel war die gerechnete elastische Bodenverformung am Fuss (quake) 15 mm (fuer sehr dichte oder sehr harte Boeden wird gewoehnlich 1/120 des Durchmessers oder 8.5 mm erwartet; bei lockereren Boeden zweimal so viel).

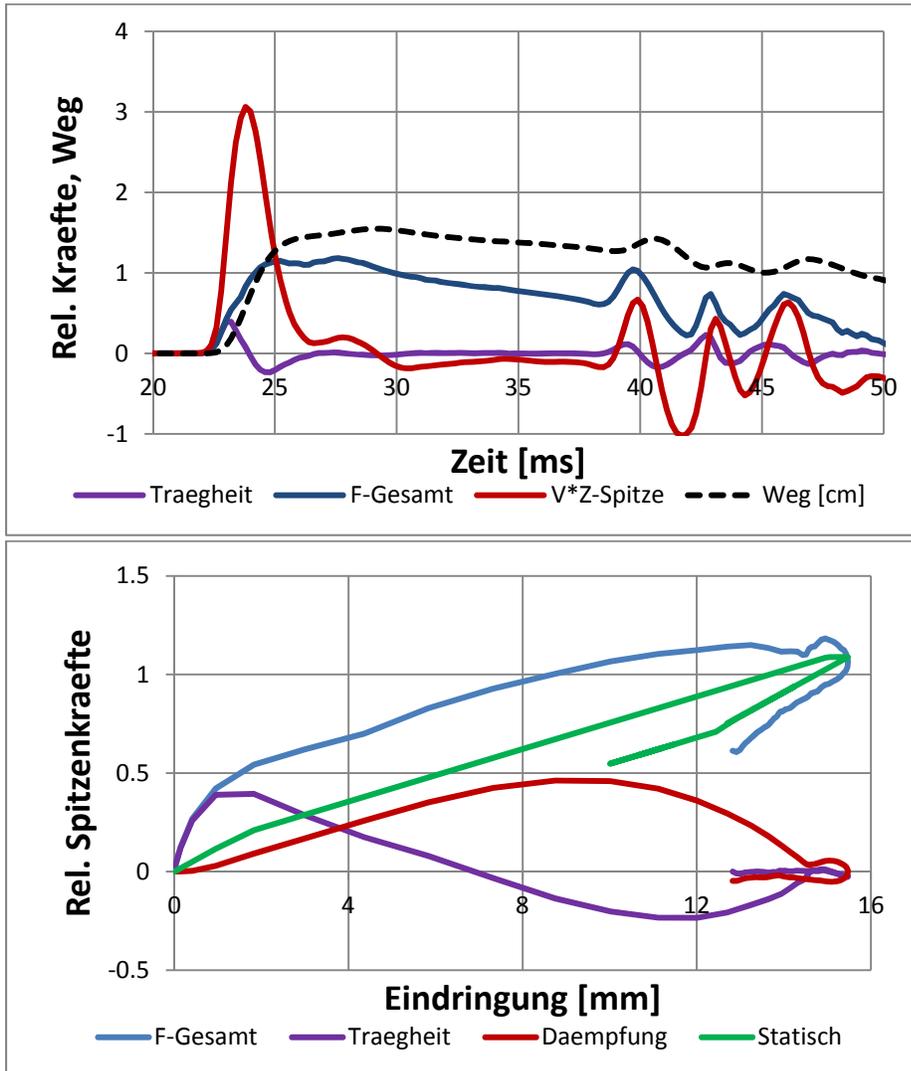


Bild 6: Kraefte am Pfahlfuss fuer Beispiel 2 (oben) ueber die Zeit und (unten) ueber die Fusseindringung

Beispiel 3: Offenes Rohr im Kies-Sand

Auf der gleichen Baustelle wie im Beispiel 2, wurde ein Pfahl gleichen Durchmessers aber ungefaehr 10 m groesserer Laenge offen auf 25 m Tiefe gerammt, wo er die den praktischen Rammlimit und ungefaehr 95% der erwarteten Grenztragfaehigkeit erreichte. Die Energie im Pfahl war 10% hoeher als im Beispiel 2. Die Groessen im Bild 7 entsprechen denen vom Bild 6.

Um eine gute uebereinstimmung zwischen Messung und Rechnung zu erzielen, wurde eine Abstrahldaempfung von 3.5 mal der Pfahlimpedanz angesetzt und, eine kleine Pfropfenmasse von 3 kN (das entspricht einer Pfropfenlaenge von etwa 20% des Pfahldurchmessers). Es ergaben sich dabei Spitzendruck- und Mantelreibungswerte von 4 MPa (ueber den Gesamtquerschnitt gerechnet) und 220 kPa (ueber die untersten 5.5 Durchmesser).

Dieser Pfahl hat sich nicht als Verdraengungspfahl verhalten. Das zeigt nicht nur der relativ geringe Spitzendruck, sondern auch die gemittelte elastische Eindringung des Fusswiderstands von 4 mm. Das beduted also, dass der Fusswiderstand wesentlich steifer, wenn auch geringer war als der des geschlossenen Pfahls. Wegen seiner groesseren Laenge hatte dieser Pfahl dann insgesamt die gleiche Steifigkeit wie der kuerzere Pfahl mit seinem groesseren, aber sich weicher verhaltenden Spitzendrucks.

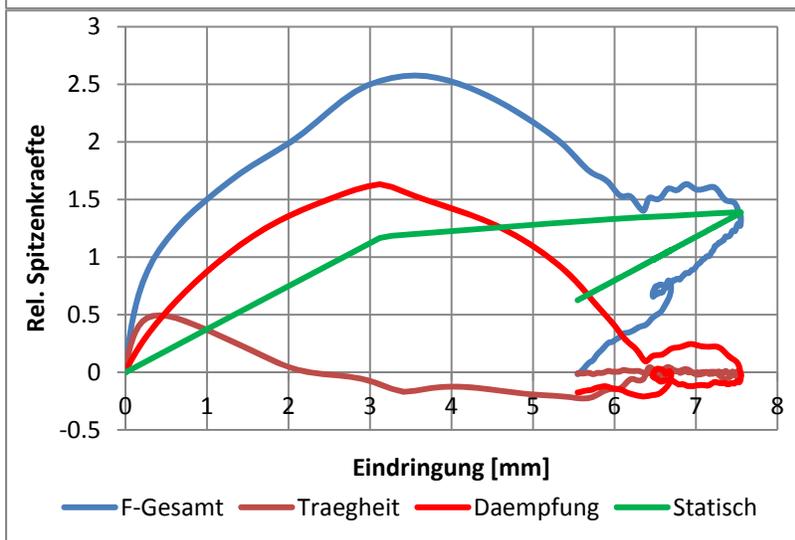
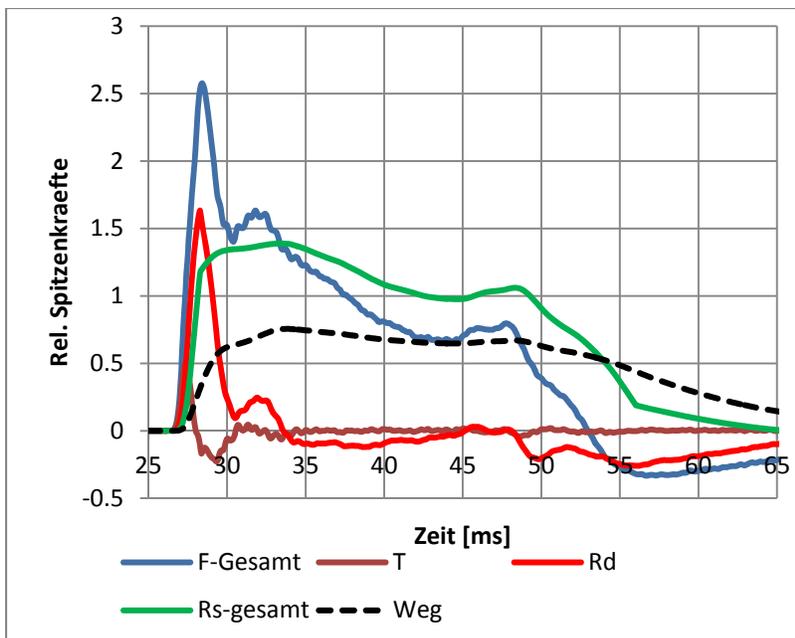


Bild 6: Kraefte am Pfahlfuss fuer Beispiel 3 (oben) ueber die Zeit und (unten) ueber die Fusseindringung

Beispiel 4: Rohrfahl mit Betonpfropfen

Das folgende Beispiel soll zeigen, dass Bodenpfropfen sehr verschiedene Eigenschaften haben koennen. In diesem Fall wurden 40 m lange Pfaehle, die in den oberen 27,5 m mit Beton gefuellt waren, bis zum praktischen Rammlimit 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 Pfaehle mit den schluffigen Sanden des oberen Bereiches gefuellt war.

Fuer die 2 Testpfaehle 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-Bodensauele gerechnet werden, die eine Wellengeschwindigkeit von weniger als 80% der des Stahles hatte. Die CAPWAP berechneten Last-Setzungslinien im Bild 4 (die Belastung ist in Prozent der erwarteten Grenztragkraft) geben das weichere Verhalten des zweiten Pfahles eindeutig wieder. In beiden Faellen war aber die waehrend des Rammens auftretende Grenztragkraft geringer als erwartet. Moeglicherweise wuerden Nachrammungen hoehere Werte ergeben.

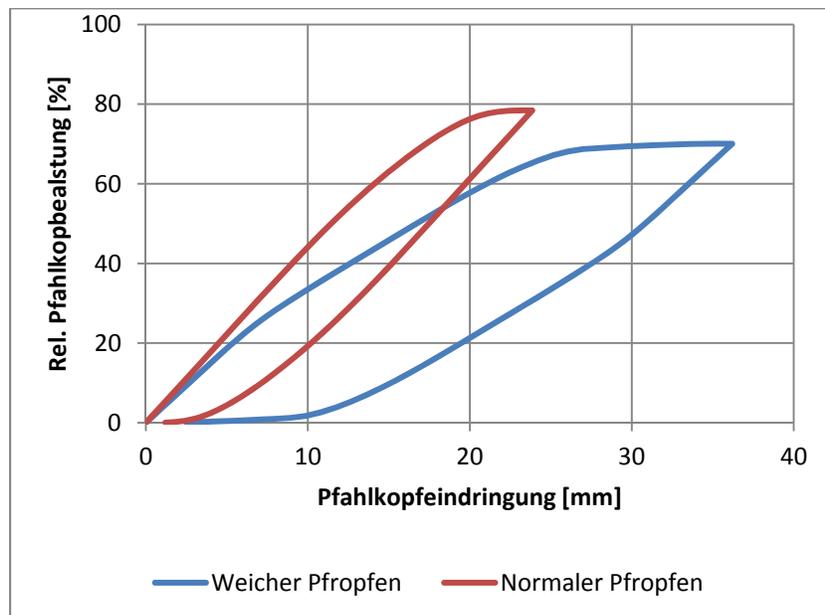


Bild 8: CAPWAP berechnete Lastsetzungslinien fuer 2 aehnliche Beton-Rohrfaehle

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschäftigte sich mit dem dynamischen Verhalten von Rohrpfehlen und gibt Beispiele für die Auswertung von dynamischen Messungen. Dabei wurden für die Pfahlspezialisten interessanten Feststellungen gemacht.

Das Verhalten offener Rohrpfehle während des Rammens unterscheidet sich je nach Pfahldurchmesser; eine mögliche Klassifizierung wurde wie folgt ermittelt:

- 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 1500 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 Bodensaule ergeben. Auch sind Spitzendruck und Pfropfentraegheitskraft so gross, dass es im dynamischen Fall kaum zur Pfropfenbildung kommen kann. Auch im statischen Fall 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 dabei vorkommen, dass sich die Pfehle im dynamischen Fall wie ein offenes Rohr, während des statischen aber wie ein geschlossenes Rohr verhalten. Dabei muss dann allerdings eine entsprechende Eindringung in den tragfähigen Boden gewährleistet sein.

Die Beispiele zeigten auch, dass selbst benachbarte Pfehle ein völlig verschiedenes Tragverhalten aufweisen können.

Quellen

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.

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