

Auswertung der dynamischen Pfahlprobelastungen

Oswald Klingmüller, GSPmbH, Mannheim

Frank Rausche, Pile Dynamics Inc., Cleveland, Ohio, USA

1 Einleitung

Auch wenn dynamische Pfahlprobelastungen zur Bestimmung axialer Tragfähigkeiten seit vielen Jahren durchgeführt werden und als allgemein anerkannter Stand der Technik auch Eingang in die Normung (siehe Handbuch Eurocode 7, 2011) gefunden haben, haben geotechnische Sachverständige häufig Schwierigkeiten, die Ergebnisse zu bewerten und in das Nachweiskonzept für ihr Gründungsvorhaben einzubauen. Häufig werden Grenzfälle in der Anwendbarkeit der dynamischen Probelastungen verallgemeinert oder als Einschränkungen missverstanden, (z.B. - dynamische Probelastungen sind im Fels nicht möglich, da die Setzungen nicht ausreichen, - keine Bestimmung der Tragfähigkeit möglich, wenn die Setzungen zu groß sind, - durch dynamische Pfahlprobelastung können keine Setzungen unter statischer Belastung bestimmt werden, - die Anwendung ist nur bei konstantem Pfahlquerschnitt möglich, usw.). Dabei ist die Anwendung im Regelfall einfach und leicht nachvollziehbar.

Aussagen wie oben verwirren natürlich die Anwender bzw. geotechnischen Sachverständigen, von denen eine vertiefte Kenntnis der nichtlinearen Bodendynamik nicht erwartet werden kann. Solche Aussagen verstärken die Ansicht, dass es sich bei der dynamischen Pfahlprobelastung um ein Verfahren handelt, zu dem nur Initiierte Zugang haben und welches der Rest der geotechnischen Ingenieurgesellschaft als „Black Box“ akzeptieren muss.

Dies muss natürlich nicht so sein. Jeder Ingenieur, der in der Lage ist, das Rammen von Pfählen im Hinblick auf Rammgerät und Pfahl- und Bodeneigenschaften zu beurteilen, kann auch eine fundierte Bewertung der Ergebnisse der dynamischen Pfahlprobelastung vornehmen, wenn er sich auf den gesunden Ingenieurverstand verlässt.

Dieser Beitrag soll nicht nur den Baugrundsachverständigen, die die Ergebnisse bewerten müssen, einfache Regeln zur Plausibilitätskontrolle in die Hand geben sondern auch Empfehlungen für die Auswertung dynamischer Probelastungen.

Als erstes werden einige grundlegende Zusammenhänge der Pfahldynamik erläutert.

2 Grundlagen

Die dynamische Pfahlprobelastung ist ein Vorgang, bei dem eine sehr schnelle kurzzeitige Belastung durch Messungen differenziert betrachtet und ausgewertet wird.

Diese Belastung kann entweder ein Schlag des Einrammens oder Nachrammens sein oder sie wird mit einer speziellen Belastungseinrichtung gezielt als dynamische Probelastung aufgebracht.

Durch die Modellfaktoren in Tabelle A11 des Eurocode 7 bzw. nach Tabelle A7.2 des Handbuchs wird zum Ausdruck gebracht, dass das Verfahren der vollständigen Modellbildung (siehe EAPfähle 2012) als zuverlässigstes Auswertungs-Verfahren anerkannt ist. So kommen bei Rammformeln Modellfaktoren von 1,2 oder 1,1 (mit elastischer Verformungsmessung) und bei der Wellengleichungsmethode von 1,05 zur Anwendung, während bei dynamischen Probelastungen mit der Auswertung von Messungen am Pfahlkopf Modellfaktoren von 1,0 (geschlossene Formel) und 0,85 (vollständige Modellbildung) angesetzt werden können.

Die vollständige Modellbildung erfordert die Lösung einer komplizierten Aufgabe im Zusammenspiel von Mathematik, Numerik, nichtlinearer Mechanik und Dynamik. Auch wenn mittlerweile Computerprogramme zur Verfügung gestellt werden, die die Lösungssuche unterstützen und die Lösungsfindung erleichtern und beschleunigen, sind spezielle Kenntnisse erforderlich, die außerhalb des üblichen Erfahrungsbereichs des geotechnischen Sachverständigen liegen. Deswegen fordert EAPfähle 2012 auch den Nachweis der besonderen Qualifikation.

Aus EAPfähle 2012:

10.7 Qualifikation der Prüfinstitute und des Personals

- (1) Die dynamischen Pfahlprobelastungen sind von Fachpersonal auszuführen und auszuwerten, welches über die erforderliche Sachkunde und Erfahrung verfügt.
- (2) Die erforderliche Sachkunde und Erfahrung des Fachpersonals in der Durchführung und Auswertung der dynamischen Prüfungen sollte durch regelmäßige Teilnahme an Fortbildungsveranstaltungen zur Thematik auf einen neuesten Stand der Technik und ggf. Wissenschaft sichergestellt werden.

Da der geotechnische Sachverständige, diese Kenntnisse im allgemeinen nicht besitzt, er aber die rechtliche Verantwortung für die sichere Gründung übernimmt, muss ihm eine Überprüfung auch als Plausibilitätskontrolle möglich sein. Grundkenntnisse sind auch erforderlich, um die dynamische Probelastung im Kontext anderer Maßnahmen des Nachweiskonzeptes (z.B. statische Probelastungen) richtig vorzubereiten und auszuschreiben.

Der Bericht über die dynamischen Pfahlprobelastungen muss eindeutig das Ergebnis der Probelastung als nachgewiesenen Widerstand $R_{c;m}$ (Versuchswert des Druckwiderstandes des Bodens gegen einen Pfahl im Grenzzustand der Tragfähigkeit, siehe Handbuch EC7 – 1, 2011) enthalten. In den Berichten wird dieser Versuchswert meist mit **Ru** bezeichnet (**ultimate resistance**). Dies ist der durch die dynamische Belastung bestimmte statische Bodenwiderstand.

Dass eine bewegte Masse, die auf einen Widerstand auftrifft, eine Kraft ausübt, ist jedem bekannt, der mit einem Hammer einen Nagel in ein Brett getrieben oder dabei zufällig den Finger getroffen hat.

Die grundlegenden Zusammenhänge dieses Vorganges sind in den Lehrbüchern der Mechanik abgeleitet (siehe z.B. Lehmann 1977). Aus dieser Stoßmechanik ergibt sich:

Je größer die bewegte Masse im Verhältnis zur getroffenen Masse, desto größer ist auch die Geschwindigkeit, die die getroffene Masse nach dem Stoß aufweist.

Speziell für Pfähle interessiert hier die Krafteinleitung in einen elastischen Stab und die dadurch in diesen Stab eingeleitete Stoßwelle (siehe z.B. Timoshenko-Goodier 1970). Die für die Pfahlprobelastung wichtigsten Grundgleichungen sind u.a. in EAPfähle Abschnitt 10 zusammengestellt.

Für die Pfahlprobelastung wichtig ist die maximale Stoßkraft sowie der aktivierbare Widerstand. Zur Veranschaulichung der Größenordnung kann angegeben werden, dass eine 10-t Fallmasse üblicherweise eingesetzt wird, um Stoßkräfte von 5 bis 15 MN zu erzeugen. Die tatsächliche Größe der Stoßkraft ergibt sich aus der Durchführung der Stoßbelastung mit Futter oder Rammhaube, dem Pfahltyp und Querschnitt, der Fallhöhe und der Bodenreaktion.

Die Stoßkraft wird vom dem Pfahl in dem Boden übertragen und erzeugt einen dynamischen Bodenwiderstand. Dieser ist bei Lockerböden (rollig oder bindig) im

Allgemeinen kleiner als die Stoßkraft, kann aber bei Felseinbindung auch größer als die Stoßkraft sein.

Als einfache Grundformel wird der Gesamtwiderstand R_{tot} der Summe aus einem statischen Widerstand R_u und einem dynamischen Widerstand R_d gleichgesetzt:

$$R_{tot} = R_u + R_d \quad (1)$$

Der statische Anteil R_u des Gesamtwiderstandes ist der gesuchte statische Pfahl-Bodenwiderstand und ist kleiner als der Gesamtwiderstand. Der dynamische Anteil ist in einem vereinfachten Modell abhängig von der Geschwindigkeit der Pfahlbewegung. Je höher die Geschwindigkeit, desto größer ist der dynamische Widerstand und desto kleiner ist bei gleichem Gesamtwiderstand der statische Widerstand. Es ist insofern nicht sinnvoll, durch die Vergrößerung der Fallhöhe die Stoßkraft zu erhöhen, weil dadurch gleichzeitig die Geschwindigkeit vergrößert wird und damit der dynamische Widerstand.

In Lockerböden, bei denen zur Aktivierung des Spitzendrucks eine größere Setzung unter dem Pfahlfuß erforderlich ist, soll die Gewichtskraft der Fallmasse mindestens 2% des Bodenwiderstandes betragen. Größere Massen sind vorteilhaft.

Bei Pfählen, die im Fels eingebunden sind, kann die Fallmasse auf 1% der geforderten Belastung reduziert werden.

Im Allgemeinen wird bei einer dynamischen Pfahlprobelastung davon ausgegangen, dass der Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht wurde, wenn die bleibenden Setzungen nach der Stoßbelastung bei Mantelreibungspfählen größer als 2,5 mm sind, bei Spitzendruckpfählen größer als 5 mm. Während der dynamischen Belastung erreicht die elastische Verformung des Pfahles meist wesentlich größere Werte.

Sind die Setzungen kleiner, ist davon auszugehen, dass der Grenzzustand nicht erreicht wurde. In diesen Fällen kann der angegebene Widerstand häufig als untere Grenze oder konservative Abschätzung für die Tragfähigkeit im Grenzzustand verwendet werden. Dieser Widerstand wird dann auch als „**aktivierter Widerstand**“ bezeichnet.

Vor allem bei Großbohrpfählen wird bei diesen geringen Setzungen der Spitzendruck nicht vollständig aktiviert. Bei statischen Pfahlprobelastungen wird nach EAPfähle 2012 Kapitel 9 davon ausgegangen, dass der Grenzzustand erreicht wird, wenn die Setzungen unter dem Pfahlfuß 10% des Durchmessers überschreiten, d.h. sie liegen im cm-Bereich.

Die Grundgleichungen der eindimensionalen Wellenausbreitung zeigen, dass die Kraft des Pfahlkopfes proportional der Geschwindigkeit ist. Kraft und Geschwindigkeit können daher zusammen in einem Achsenkreuz dargestellt werden (siehe Bild 1). Die mit dem Proportionalitätsfaktor multiplizierte Geschwindigkeit, v , hat die Dimension einer Kraft und wird mit V bezeichnet (Bilder 2 und 3).

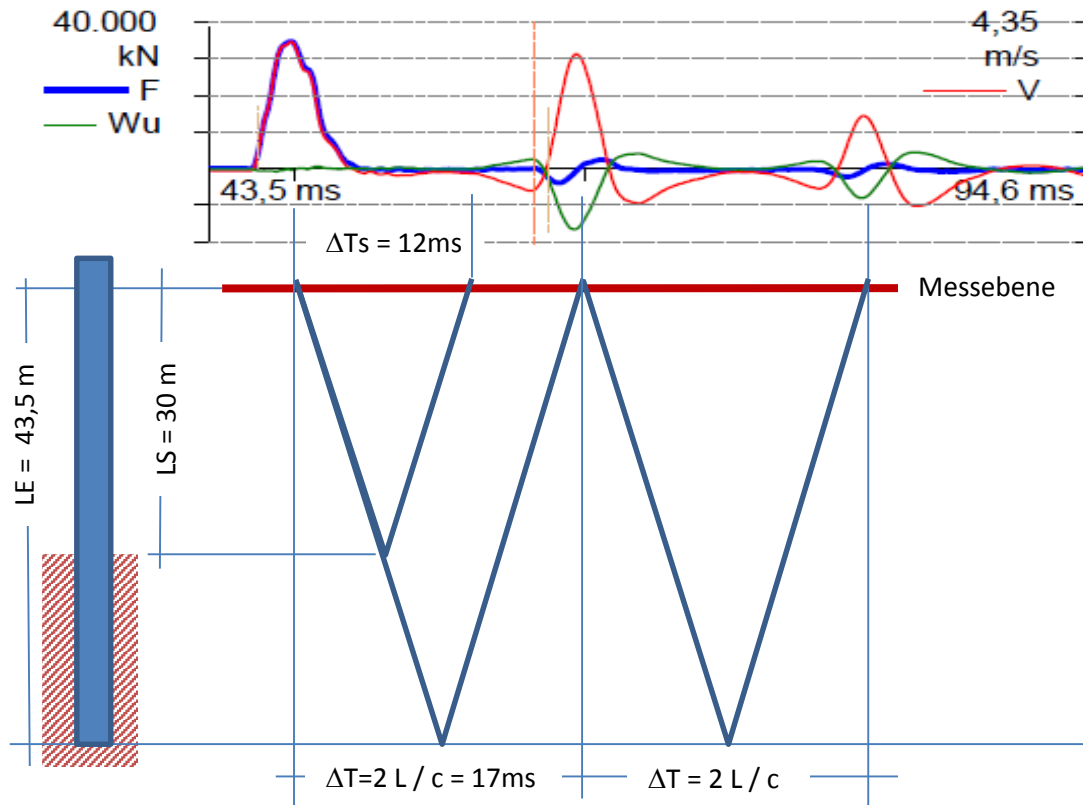


Bild 1: Zeit-Orts-Zusammenhang für einen Pfahl mit geringer Mantelreibung im unteren Bereich des Pfahles und deutlicher Reflexion der Stoßwelle vom Pfahlfuß

Wenn die Kraft- und Geschwindigkeitsentwicklung beim Stoß im Millisekundenbereich betrachtet wird, können Abweichungen der Geschwindigkeit V von der Kraft F erkannt werden (siehe Bild 1).

Bild 1 zeigt, dass die Abweichung der Geschwindigkeit V (rote Linie) von der Kraft F (blaue Linie) mit der Wirkung der Mantelreibung zusammenhängt. Die Zeit $\Delta T_s = 12$ ms ist mit der Tiefe der Oberkante dieser Schicht von 30 m über

$$\Delta T_s = 2 LS / c = 2 * 30 / 5,123 = 12 \text{ ms}$$

verbunden. $c = 5,123 \text{ m/ms}$ oder 5.123 m/s ist die Wellengeschwindigkeit des Stahls. Aufgrund des geringen Bodenwiderstandes an Mantel und Spitze ist bei dieser Messung auch eine deutliche Reflexion vom Pfahlfuß zu identifizieren. Diese erreicht den Pfahlkopf bzw. die Messebene (LE ist die Strecke von Messebene bis Pfahlfuss) nach der Zeit

$$\Delta T = 2 \text{ LE} / c = 2 * 43,5 / 5,123 = 17 \text{ ms.}$$

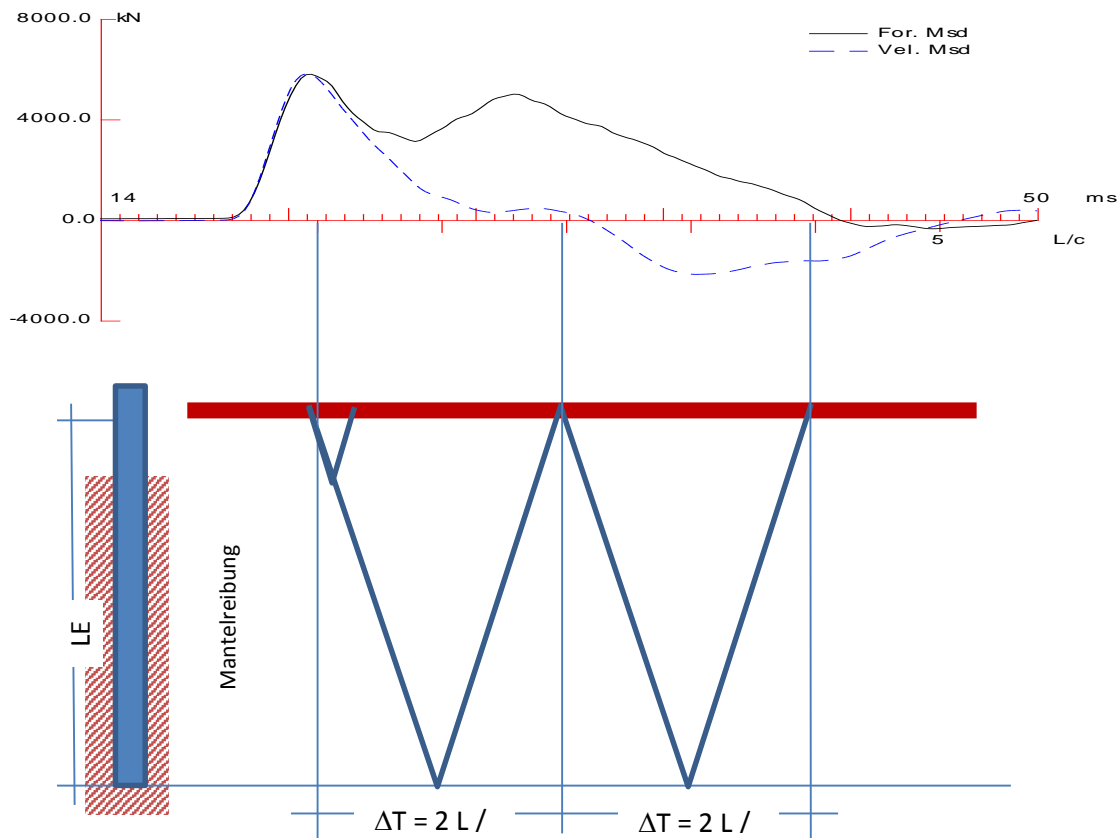
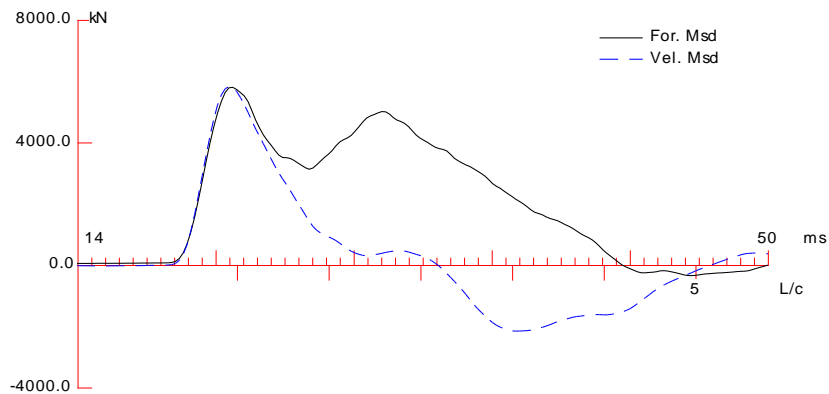


Bild 2: Zeit-Orts-Zusammenhang für einen Pfahl mit großer Mantelreibung beginnend wenig unter der Messebene und kaum erkennbarer Reflexion der Stoßwelle vom Pfahlfuß

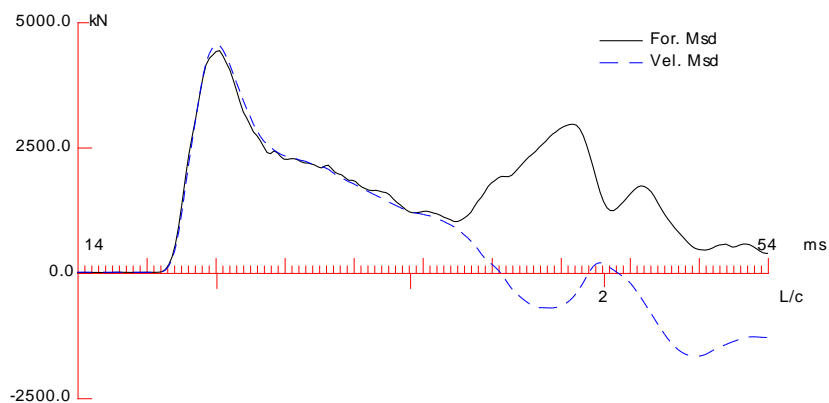
Im Bild 2 wurde ein „festgewachsener“ Pfahl geprüft. Die Mantelreibung erreicht schon wenig unter der Geländeoberfläche größere Werte und ist im Zeitbereich kurz nach dem Maximum der Kraft durch die Abweichung der Geschwindigkeit (gestrichelte blaue Linie) von der Kraft (durchgezogene Linie) festzustellen.

Bild 3 zeigt, wie sich allein aus dem Zeitverlauf von Kraft- und Geschwindigkeit erkennen lässt, ob ein Pfahl vollständig im Boden eingebettet ist (Bild 3a) oder nur in seinem unteren Bereich (Bild 3b). Allerdings ist die in der Abweichung der Linien festzustellende Wirkung

der Mantelreibung im Sinne von Gleichung (1) die Summe aus der dynamischen und der statischen Wirkung.



a) Rammung an Land



b) Rammung für einen Anleger – Pfahl größtenteils im Wasser

Bild 3: Zeitverläufe der Kraft $F(t)$ und der Geschwindigkeit $V(t)$

Die Bestimmung des statischen Anteils der Mantelreibung kann mit einer geschlossenen Lösung auf der Grundlage der eindimensionalen Wellentheorie erfolgen. Dies erfordert aber einerseits Vereinfachungen der mechanischen Zusammenhänge und andererseits die Verwendung empirischer Faktoren für die Festlegung der dynamischen oder der Dämpfungswirkung. Eine solche Lösung ist vor allem

- bei geschichtetem Baugrund
und
- bei Pfählen mit variablen Querschnitten

ungenau, ohne dass angegeben werden kann, ob sie die Tragfähigkeit über- oder unterschätzt.

Deswegen wurde seit den 70er Jahren (Rausche 1974) eine Verknüpfung der Messung mit einer Computer-Simulation des Rammvorganges entwickelt. Hierbei wird ausgehend von den bekannten Angaben über den Pfahl und den Boden interaktiv das Pfahl-Boden-System ermittelt, welches dem gemessenem Verhalten am besten entspricht.

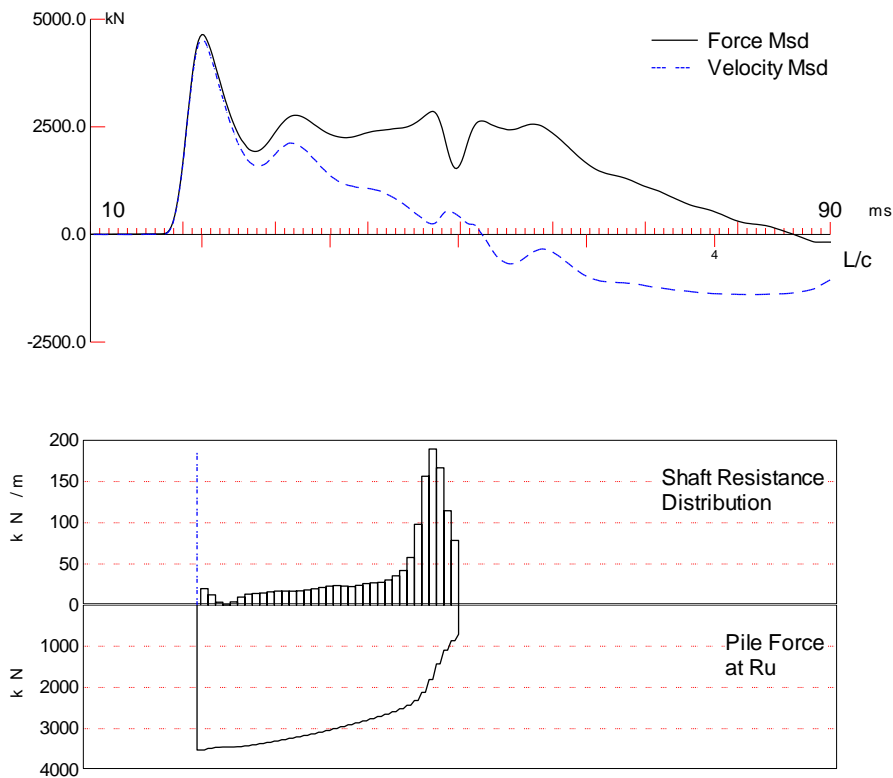


Bild 4: Gemessene Kraft $F(t)$ und Geschwindigkeit $V(t)$ und Mantelreibungsverteilung

Der Pfahl und der umgebende Boden werden hierbei im Sinne der Methode der Finiten Elemente oder der Finiten Differenzen dargestellt. Letzteres ist aufgrund der sehr kleinen Zeitschritte im Microsekundenbereich numerisch vorteilhaft. Durch diese Diskretisierung reduziert sich die Bestimmung eines Modells auf die Berechnung der das Modell beschreibenden Parameter. Die Einordnung in mathematische Problemklassen und die Lösungsmöglichkeiten wurden in Klingmüller 1991 ausführlich erläutert. Die Grundzüge des Verfahrens sind in Klingmüller 1991 oder auch in EAPfähle 2012 S. 244 ff beschrieben.

Als Ergebnis der Berechnung liegt die Verteilung des statischen Anteils der Mantelreibung (Bild 4) sowie eine Lastsetzungskurve (Bild 5) vor. Diese Lastsetzungskurve ergibt sich aus der Computer-Simulation einer statischen Probelastung an dem gefundenen Model des Pfahls im Boden.

Auch die Verteilung des statischen Anteils der Mantelreibung steht im Zusammenhang zur Abweichung der Geschwindigkeit $V(t)$ von der Kraft $F(t)$. Die gemessenen Zeitverläufe werden deswegen bei der Ergebnisdarstellung häufig über die horizontal dargestellte Mantelreibungsverteilung (oben links, unten rechts) aufgetragen (siehe Bild 4).

Die Maximalbelastung dieses simulierten statischen Versuchs (in Bild 4 sind dies 3.518 kN) ergibt sich aus der erreichten Verschiebung. Die Summe des Spitzendrucks und der Mantelreibungswerte ergibt den Kraftverlauf im Pfahl, wie er auch aus einer statischen Probelastung mit Dehnungsmessung in verschiedenen Ebenen bestimmt werden kann.

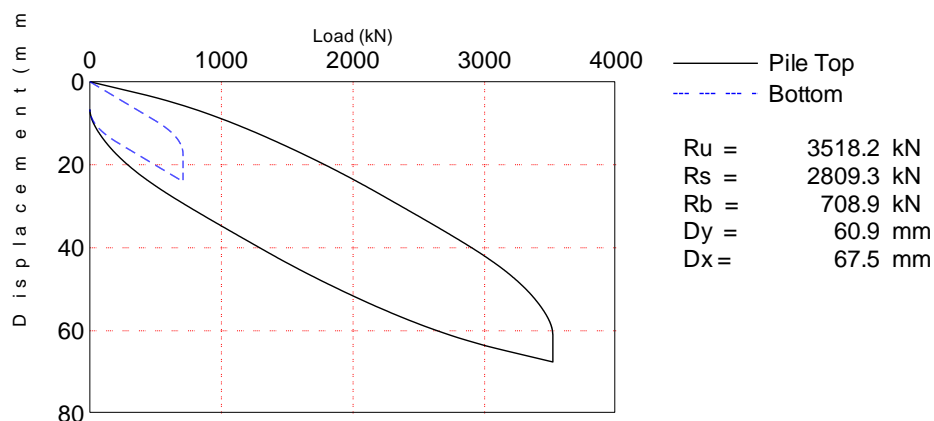


Bild 5: Widerstands-Setzungs-Linie

Für das Modell wird die Mantelreibung als Kraft-Verschiebungslinie für ein Element bestimmt. Bezogene Größen wie Kraft pro Längeneinheit (kN/m) oder Kraft pro Fläche (kN/m²) werden nachträglich daraus errechnet. Bei der Angabe von Mantelreibung als kPa (kN/m²) muss darauf geachtet werden, wie die Fläche (Umfang des Pfahls) ermittelt wurde und ob gegebenenfalls bei offenen Rohren Reibung innen und außen zu berücksichtigen ist.

Durch die Modellbildung ist auch die Entwicklung des Widerstandes unter der Pfahlspitze mit der Verschiebung der Pfahlspitze bekannt und kann in der Widerstandssetzungsline angegeben werden (gestrichelte blaue Linie in Bild 5).

Bei der Beurteilung der Setzungen ist zu berücksichtigen, dass die im Computer simulierte statische Probelastung von den Eigenschaften des Computermodells des Pfahls im Boden ausgeht. Da mit der unter dem Pfahlfuß erreichten Setzung auch der Spitzendwiderstand im bilinearen Lastverformungsverhalten festgelegt ist, endet die errechnete Lastsetzungskurve immer in einer Vertikalen. Das heißt nicht, dass sich der Pfahl immer bei dieser Laststufe weiter Richtung Erdmittelpunkt bewegt. In der Regel ist

beim Spitzendruck jeder Setzungszuwachs auch mit einem (geringer werdenden Spannungsanstieg) verbunden. Für rollige Böden und Verdrängungspfähle kann der geotechnische Sachverständige es für richtig halten, die Linie für größere Setzungen zu extrapolieren.

3 Empfehlungen für die geotechnische Begutachtung

3.1 Gründungsentwurf und Vorbereitung der Prüfungen

Beim Entwurf einer Pfahl-Gründung wird vom Widerstand der Einzelpfähle ausgegangen. Aus der Kostenoptimierung ergibt sich, ob für den Tragfähigkeitsnachweis Pfahlprobelastungen wirtschaftlich sind, und wenn ja wie viele. Die Staffelung der Streuungsfaktoren (Multiplikatoren der Widerstandsfaktoren bzw. der Sicherheitsfaktoren) in Abhängigkeit der geprüften Pfähle führt dann auf eine komplexe Optimierungsaufgabe (siehe z.B. Klingmüller, Tittler 1995).

Wenn nur 1 dynamische Probelastung durchgeführt wird, ist eine normenkonforme Bestimmung des charakteristischen Pfahl-Widerstandes nicht möglich.

Gemäß Normenhandbuch EC7 ist bei der Durchführung von dynamischen Probelastungen darauf zu achten, wie die Äquivalenz der Ergebnisse dynamischer und statischer Probelastungen nachgewiesen wird. Für eine große Anzahl von Pfahlgründungen in tragfähigen rolligen Böden, Sanden und Kiesen, oder Fels, wurde die Äquivalenz nachgewiesen und es ist häufig möglich, den Nachweis für ein Pfahlsystem in einem Boden bekannter Kornverteilung und Lagerungsdichte zu führen.

Bei bindigen Böden, bei denen zeitabhängige Setzungen unter konstanter Last auftreten, die durch die dynamische Prüfung nicht bestimmt werden können, kann je nach Größe der Gründung und den Baugrundverhältnissen die Kombination von statischen und dynamischen Prüfungen sinnvoll sein.

Es ist nicht ungewöhnlich, dass in der statischen und der dynamischen Probelastung oder jeweils in einer von beiden die Grenzlast nicht erreicht wird, indem z.B. die statische Probelastung nur bis auf die 1,5-fache Gebrauchslast ausgelegt ist oder die dynamische Probelastung mit einer leichten Belastungseinrichtung gefahren wird.

Bezüglich der Festlegung der charakteristischen Werte gibt es zur Zeit kein einheitliches Vorgehen. Die gängige Praxis erwartet von der Institution, die die dynamische

Probebelastung ausführt und auswertet, die Weitergabe eines zuverlässigen Messwertes $R_{c,m}$. Die Festlegung der Korrelationsfaktoren gemäß den Vorgaben des EC7 obliegt dann dem geotechnischen Sachverständigen. Durch die Regelungen des Normenhandbuchs und die Ausführungen in EAPfähle Kapitel 10 zur Kalibrierung wird die Schnittstelle aber dahin verschoben, dass es Aufgabe der für die dynamische Probebelastung verantwortlichen Institution wird, den charakteristischen Wert $R_{c,k}$ aus dem Versuchswert $R_{c,m}$ zu bestimmen. Das würde aber voraus setzen, dass diese Institution dazu fachlich in der Lage ist und auch in die Planung der Probebelastungen einbezogen wird.

3.2 Ramppfähle

Bei Ramppfählen ist die dynamische Probebelastung zusätzlich zu den üblichen Bestimmungen des Pfahlbodenwiderstandes aus der Beobachtung des Rammfortschrittes seit vielen Jahren ein eingeführtes Verfahren. Die Beteiligten geotechnischen Sachverständigen haben meist eine langjährige Erfahrung und können die Plausibilität der Ergebnisse der dynamischen Pfahlprobebelastung über der Auswertung der Rammprotokolle beurteilen.

Einige Probleme, die Einfluss auf die Planung für die Erstellung der Gründung und die Durchführung von dynamischen Probebelastungen haben, geben trotzdem immer wieder Anlass zur Diskussion und zu Rückfragen.

1. Rammgerät zum Einrammen und für dynamische Probebelastung

Zum Einbringen der Pfähle wird das wirtschaftlichste (sprich kleinste) Rammgerät ausgewählt, von dem erwartet wird, dass es die Pfähle bis auf die erforderliche Endtiefe einbringen kann. Da davon ausgegangen wird, dass der Bodenwiderstand während der Rammung geringer ist als im Endzustand nach dem „Anwachsen“, ist das wirtschaftliche Rammgerät bei der Nachrammung nicht in der Lage, den tatsächlichen höheren Pfahl-Bodenwiderstand zu aktivieren. Wenn es trotzdem gelingt, den Pfahl „loszuschlagen“, besteht die Möglichkeit, den Pfahl-Bodenwiderstand durch Überlagerung der hohen Mantelreibung am Anfang und des hohen Spitzendrucks zum Ende der Rammung zu überlagern (s. Hussein et al., 2002). Hierfür muss aber eine längere Rammung erfolgen, so dass nach Abbau der Mantelreibung die volle Aktivierung des Spitzendrucks möglich wird. In der geotechnischen Bewertung ist ein solches Vorgehen zu berücksichtigen.

2. Einzelschläge mit hoher Energie beim Nachrammen

Rammgeräte sind für kontinuierliches Schlagen ausgelegt. Die Ausführung eines Einzelschlages ist zwar prinzipiell möglich, praktisch ist dies aber fast immer nur mit verminderter Energie möglich. Beim Anfahren eines Rammgeräts wird die Energie kontinuierlich bis zum Erreichen der nominellen Energie gesteigert. Bei Nachrammungen nach einer kurzen Wartezeit kann dann durch die ersten Schläge mit niedrigerer Energie die Mantelreibung schon abgemindert sein, bevor Schläge mit hoher Energie erfolgen. Es gelingt dann nicht, den gesamten Pfahlbodenwiderstand in einem Schlag zu aktivieren. Auch in diesem Fall können Überlagerungen von hohen Mantelreibungsanteilen im oberen Pfahlbereich von frühen Schlägen mit den im unteren Bereich von späteren Schlägen aktivierten Widerständen überlagert werden.

3. Mantelreibungsverteilung entspricht nach Augenschein nicht dem Bodenprofil

Bei Nachrammungen wird die Mantelreibung im oberen Bereich sehr hoch und die eingeleitete Stoß-Kraft reicht nicht aus, um die Mantelreibung und den Spitzendruck in der tragfähigen Schicht voll zu aktivieren.

Auch beim Einrammen kann als Ergebnis der Modellbildung eine Mantelreibungsverteilung angegeben werden, die auf den ersten Blick nicht plausibel erscheint und deswegen hinterfragt werden muss.

Im Beispiel auf Bild 4 nimmt die Mantelreibung in den Elementen oberhalb der Pfahlspitze ab gegenüber dem Maximalwert. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- i Die Lagerungsdichte des Bodens nimmt mit der Tiefe ab. Das ist zwar ungewöhnlich aber nicht unmöglich. Speziell in dem gezeigten Fall lag unter der dichtgelagerten Sandschicht eine weichere bindige Schicht. Möglicherweise war die Abgrenzung der Schichten an der Stelle dieses Pfahles nicht so scharf wie aufgrund der Bodenaufschlüsse für das gesamte Fundament angenommen worden war.
- ii Bei geschlossenen Pfählen oder bei Propfenbildung in offenen Rohrpfählen kann auch der Boden unter der Pfahlspitze seitlich verdrängt werden, wodurch die Mantelreibung in der Nähe der Spitze reduziert wird.
- iii Im Bild 2 ist die Zuordnung von Zeit und Ort zu erkennen. Es ist zu sehen, dass die Wirkung der Spitze sich mit der Mantelreibung der

Elemente direkt oberhalb der Pfahlspitze überlagert. Eine scharfe Trennung ist nicht immer möglich. Bei einer Nachbearbeitung der Messungen kann eine Lösung mit einer Mantelreibungsverteilung, die bis zum untersten Element ansteigt, gefunden werden. Allerdings kann diese Lösung das gemessene Pfahlverhalten nur dann befriedigend abbilden, wenn für die unteren Pfahlelemente eine erhöhte dynamische Steifigkeit (Impedanz) angenommen wird (siehe Bild 6). Die Gesamttragfähigkeit wird durch diese Modelleigenschaft nur unwesentlich verändert.

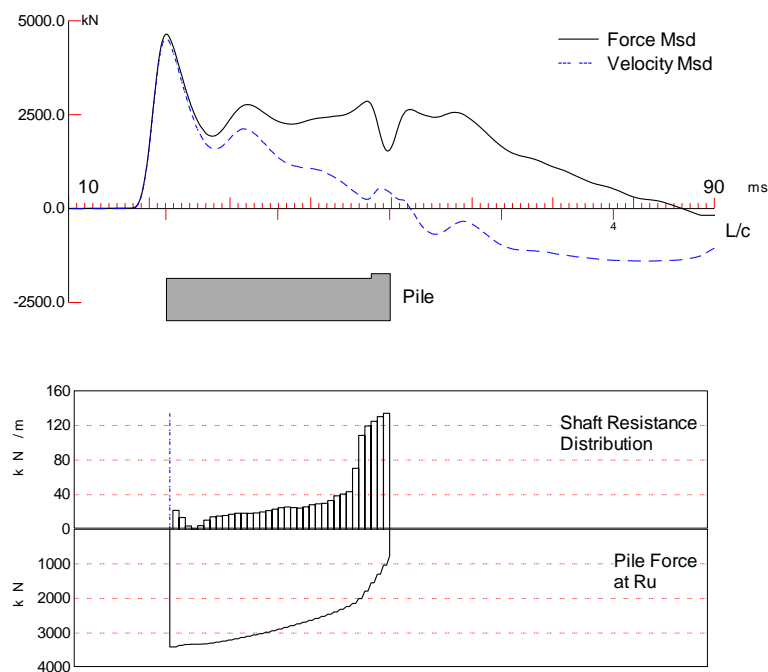


Bild 6: Verändertes Mantelreibungsmodell

Eine weitergehende Plausibilitätskontrolle wird erforderlich, wenn abweichende Ergebnisse statischer Prüfungen vorliegen.

3.3 Ortbetonpfähle

Während der Rammvorgang Schlüsse über den Pfahl-Boden-Widerstand zulässt, liefert der Herstellvorgang von Ortbetonpfählen nur wenig brauchbare Informationen.

In Deutschland wurde die dynamische Probelastung bei Bohrpfählen in den letzten Jahren häufig als sehr wirtschaftliche (low cost) alternative Prüfung und äquivalent zu

einer statischen Prüfung eingesetzt. Meist wird von den Pfahlunternehmern die Pfahlprobelastung mit den Pfählen in einem Leistungspaket angeboten und wird so beauftragt. Es hängt dann vom Einzelfall ab, ob eine Prüfung der angegebenen Tragfähigkeiten von einem Prüfstatiker gefordert und von einem geotechnischen Sachverständigen durchgeführt wird. In vielen Fällen zeigt schon die Anzahl der durch dynamische Probelastung geprüften Pfähle („1“!), dass diese Tragfähigkeitsnachweise außerhalb gültiger Normung durchgeführt werden. Auch der durch die frühere DIN 1054 und den jetzigen EC7 gemäß Normenhandbuch geforderte Nachweis der Äquivalenz der Ergebnisse dieser dynamischen mit Ergebnissen einer statischen Probelastung wird oft nicht geführt.

Die Ausschreibung der dynamischen Probelastung erfolgt dann oft ohne Angabe der nachzuweisenden Prüflast und Forderung des Einsatzes eines geeigneten Fallgewichtes. Mit der Vorlage des Ergebnisses ist zwar die Leistungsposition abgearbeitet, für einen normgemäßen Nachweis ist das Ergebnis aber ungeeignet. Dabei ist gerade bei Ortbetonpfählen die Bestimmung eines zutreffenden PfahlBodenmodells nicht einfach und erfordert fortgeschrittene Kenntnisse in der zugrundeliegenden Mathematik und Mechanik.

- i. Bei verschiedenen Pfahlsystemen, z.B. Teilverdrängern oder vermörtelten Stopfsäulen, ergibt sich der Pfahlquerschnitt erst im Zuge der Pfahlherstellung, was zu einer zusätzlichen Schwierigkeit und Unschärfe bei der Modellbildung und damit in den ermittelten Tragfähigkeitswerten führt,
- ii. Bei ungleichmäßig geschichtetem Baugrund und hoher Stoßbelastung kann es sein, dass die Betonzugspannungen überschritten werden. Dies beeinflusst einerseits die Modellbildung und muss andererseits gegebenenfalls beim Nachweis der Langzeitstandsicherheit berücksichtigt werden,
- iii. Die tatsächlichen Widerstände im Grenzzustand liegen häufig sehr weit oberhalb der aktivierbaren Tragfähigkeiten. Soll nun der Spitzendruck nachgewiesen werden, ist eine Stoßkraft aufzubringen, die zuerst die Mantelreibung überwindet und dann zusätzlich den Spitzendruck aktivieren kann.

In dieser Situation, die auch durch die von EU- und nationale Richtlinien vorgegebene Konkurrenzsituation (sprich Preiskampf) bestimmt ist, gelingt es dann auch weniger qualifizierten Institutionen beauftragt zu werden. Die Ergebnisse werden dann auch

ungeprüft übernommen und nur durch Listen von Referenzprojekten, die als Qualifikationsnachweis missverstanden werden, belegt.

In dieser Situation sollte der geotechnische Sachverständige, der ja letztendlich die Verantwortung für die Standsicherheit übernimmt, auf jeden Fall die sachgemäße Ausführung der dynamischen Probelastung überprüfen:

Zuerst ist es ausreichend zu prüfen, ob folgende Daten verfügbar sind.

- i. Eingesetzte Belastungseinrichtung und Fallgewicht W_r ,
- ii. Angabe der Fallhöhe und der bleibenden Setzung nach jedem Schlag,
- iii. Angabe der gemessenen Energie E_{pfahl} und Vergleich mit der potentiellen Energie E_{pot} ,
- iv. Maximale Geschwindigkeit v_{max} (V_{max}) und Kraft F_{max} am Pfahlkopf,
- v. Angabe der maximalen am Pfahlkopf gemessenen Druckspannungen,
- vi. Angabe der maximalen in geschlossener Form errechneten Zugspannungen
- vii. Angabe, welcher Schlag zur weiteren Auswertung mit der vollständigen Modellbildung herangezogen wurde,
- viii. Angabe des Impedanzprofils der Modellbildung, gegebenenfalls Begründung von Impedanzvariationen mit Bezug zu Bodenschichtung und Bohrprotokoll, gegebenenfalls Angaben über mitschwingende Bodenmasse am Fuß und am Mantel,
- ix. Angabe des Bodenwiderstandes $R_{c,m}$,
- x. Angabe der Mantelreibung über die Tiefe als Kraft pro Längeneinheit (kN/m) oder Kraft pro Fläche (kPa)
- xi. Angabe des Spitzendrucks als Kraft (kN),
- xii. Widerstandssetzungslinie.

Wenn der geotechnische Sachverständige diese Daten aus dem Messbericht zusammenstellt, kann er leicht feststellen, ob die verschiedenen Größen (z.B. $W_r \approx 0,02 R_{c,m}$, $E_{\text{pot}} > E_{\text{pfahl}}$, $F_{\text{max}} > R_{c,m}$ bei Lockerböden Sand und Schluff, $R_{c,m} < 2 F_{\text{max}}$) in einem sinnvollen Zusammenhang stehen. Die Prüfung der Einzelwerte (insbesondere zu Punkt vii) kann vom geotechnischen Sachverständigen nicht unbedingt verlangt werden. Wenn irgendwelche Daten wie angegeben nicht vorhanden sind, oder nicht zusammenpassen, ist es empfehlenswert, die Originalmessdaten anzufordern und durch eine andere

Institution eine unabhängige Auswertung vornehmen zu lassen. Sinnvollerweise sollten für solche unabhängigen Auswertungen 20% der Gesamt-Prüfungskosten bereitgehalten werden.

4 Empfehlungen für die Auswertung (mit vollständiger Modellbildung CAPWAP)

Die dynamische Probelastung für Pfähle erfordert, dass

- I. eine Belastungseinrichtung mit ausreichend großer Fallmasse und ausreichender Fallhöhe bereitgestellt werden,
- II. genaue Messungen ausgeführt werden,
- III. eine sachverständige Auswertung der Messungen vorgenommen wird.

Zu I.

Die geotechnische Planung geht von einem Nachweiskonzept aus und sieht in der Regel vor, dass ein bestimmter Pfahl-Boden-Widerstand nachgewiesen wird. Häufig enthält die Ausschreibung bzw. das Leistungsverzeichnis hierzu keine Angaben. Es ist dann Aufgabe der Institution, die die dynamische Probelastung anbietet, auf den Zusammenhang zwischen vorhandenem Fallgewicht und nachweisbarem/aktivierbarem Widerstand hinzuweisen.

Zu II.

Genauere Messungen können nur ausgeführt werden, wenn die Sensoren an einem klar definierten Pfahlmaterial kraftschlüssig befestigt werden können. Bei Ortbetonpfählen, die für die Prüfung mit einem aufbetonierten Pfahlkopf versehen werden, muss vor allem darauf geachtet werden, dass der Beton im Bereich der Messebene homogen und ausgehärtet ist. Wenn ein Abstand von $> 1,5 D$ zum Pfahlkopf nicht eingehalten werden kann, sollte mit 4 Dehnungssensoren gemessen werden.

Zu III.

Es wird vom Auftraggeber erwartet, dass als Ergebnis einer dynamischen Probelastung ein eindeutiger Versuchswert für den Bodenwiderstand, $R_{c,m}$ angegeben wird. Wird lediglich eine Auswertung nach dem direkten Verfahren (siehe EAPfähle 2012, S.240f) vorgenommen und der Widerstand für eine Reihe von Dämpfungsfaktoren angegeben, entspricht dieses Vorgehen nicht dem von EAPfähle 2012 empfohlenen Vorgehen. Zudem

liegt es dann in der Verantwortung der auswertenden Institution als Fachfirma auf die Erhöhung des Streuungsfaktors (Widerstandsfaktors, Sicherheitsfaktors) bei Anwendung des direkten Verfahrens hinzuweisen.

Als Standard gilt nach EAPfähle 2012 das Verfahren der vollständigen Modellbildung (auch Systemidentifikation, Lösung des inversen Problems, „signal matching“), auf welches deswegen im Folgenden näher eingegangen wird.

Das Problem der Systemidentifikation als mathematische Optimierungsaufgabe wurde u.a. von Klingmüller 1984 und 1991 ausführlich diskutiert. Aus mathematischer Sicht ist es bei einer Optimierungsaufgabe sinnvoll, zuerst die Zielfunktion zu minimieren, d.h. die Abweichung des berechneten Modellverhaltens vom gemessenen Pfahlbodenverhalten zu minimieren. Für diese Berechnung können Standardverfahren der mathematischen Optimierung genutzt werden. Allerdings wurde in den verfügbaren Programmen für die Auswertung von dynamischen Pfahlprobelastungen die mechanische Qualität des Problems genutzt und Strategien entwickelt, die die Eigenschaften der eindimensionalen Wellenausbreitung nutzen. Vereinfacht heißt dies,

- dass Parameter vom Pfahlkopf beginnend nach unten variiert werden;
- dass die Fehlerfunktion Abschnitte im Zeitbereich unterschiedlich wichtet, insbesondere ist der Zeitbereich um die Ankunftszeit der Fußreflektion stärker gewichtet.
- Dass Erfahrungswerte als Grenzen für dynamische Bodenparameter wie Dämpfungskonstanten und Bodensteifigkeiten gesetzt wurden,

Diese inhärenten Eigenschaften des Systems und des Modells führen auch dazu, dass Unterschiede in der Modellbildung zu beobachten sind, je nachdem

- ob die gemessene Geschwindigkeit $V(t)$ als Eingangsgröße verwendet wird und die errechnete Gleichgewichtskraft $F^*(t)$ mit der gemessenen Kraft $F(t)$ verglichen wird, oder
- ob die gemessene Kraft $F(t)$ aufgebracht wird und die für das Modell errechnete Geschwindigkeit $V^*(t)$ mit der gemessenen Geschwindigkeit $V(t)$ verglichen wird, oder
- ob der Mittelwert von Kraft und Geschwindigkeit als induzierte herablaufende Welle (Wave Down) $Wd(t) = \frac{1}{2} (F(t) + V(t))$ auf das Pfahlmodell aufgebracht wird und die errechnete reflektierte Welle (Wave Up) am Pfahlkopf $Wu^*(t) = \frac{1}{2} (F^*(t) - V^*(t))$ mit

aus den gemessenen Größen bestimmten reflektierten Welle $W_u(t) = \frac{1}{2} (F(t) - V(t))$ verglichen wird.

Eine Lösung sollte dahingehend überprüft werden, ob das Modellverhalten aller drei Ansätze ähnliche Übereinstimmungen zwischen Rechnung und Messung ergibt. Ist dieses nicht der Fall, sollte der Auswertende die Abweichungen untersuchen und gegebenenfalls erklären, warum sich Unterschiede ergeben.

Liegt ein mathematisch begründetes Modell vor, ist im Zuge der Auswertung in einem weiteren Schritt die geotechnische Sinnfälligkeit zu prüfen.

- Mantelreibung und Spitzendruck sollten im Kontext der Bodenaufschlüsse in einer sinnvolle Größenordnungen liegen. Anhaltswerte liefern die Erfahrungswerte aus EAPfähle 2012, Kapitel 5.3, die aus den vorhandenen Informationen über den Boden bestimmt werden können.
- In einem nächsten Schritt wird geprüft, wie Mantelreibung der untersten Pfahlelemente und Spitzendruck sich gegenseitig bedingen, und welche Einflüsse Verschiebungen in den Größen auf den Gesamtwiderstand und die Einzelwerte haben
- In einem weiteren Schritt muss in einer Sensitivitätsanalyse festgestellt werden, wie empfindlich das Modell auf Änderung von Mantelreibung, Spitzendruck und Gesamtwiderstand R_u reagiert. Wenn der Gesamtwiderstand große Änderungen erfahren kann, ohne dass sich dabei die Fehlerfunktion deutlich ändert, kann das Modell nicht befriedigend sein.

Manchmal ist es möglich, einen unteren Wert des Widerstandes als auf der sicheren Seite liegend anzugeben. Sinnvoller ist es aber, das Modell zu überarbeiten und eventuell von einer völlig neuen Parameterkombination auszugehen.

- Vor allem bei Bohrpfählen ist zu überprüfen, ob Impedanzvariationen, insbesondere auch die möglichen Querschnittsänderungen mit der Herstellungsart und den Bodenfestigkeiten verträglich sind, wie sich Impedanzänderungen und Mantelreibungsverteilung gegenseitig beeinflussen und ob ein Einfluss auf den Gesamtwiderstand R_u gegeben ist.
- Wenn die Modellbildung durch die Annahme einer Abstrahlungsdämpfung verbessert wurde, muss eine plausible Begründung dieser Maßnahme gemacht

werden. Bei Nachrammungen und Prüfungen mit geringen bleibenden Setzungen kann die Begründung als gegeben angesehen werden.

- Bei sehr langen vor allem Stahlpfählen kann es sein, dass nach der Stoßbelastung eine Mantelreibung verbleibt, die im Gleichgewicht mit Restspannungen steht. Da diese Restspannungen Einfluss auf die Verteilung der Mantelreibung und den Gesamtwiderstand haben, sollten sie mit einem entsprechenden Rechenmodell abgeschätzt werden.
- Bei mehrfachen dynamischen Prüfungen am selben Pfahl ist durch die Auswertung anderer Schläge die Konsistenz der Lösungen zu überprüfen und der Einfluss der Versuchsparameter aufgebrachte Energie im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Modellbildung festzustellen.
- Auch bei der Prüfung von mehreren Pfählen im selben Baugrundhomogenbereich ergibt sich die Möglichkeit, durch Konsistenzprüfung die Sicherheit der Modellfindung zu verifizieren.
- Die Prüfung gleicher Pfähle im benachbarten Baugrund trägt ebenfalls dazu bei, die Modellfindung abzusichern.
- Ganz allgemein gilt, dass, je mehr Pfähle geprüft werden, desto sicherer ist die Modellbildung.

Abschließend sei noch bemerkt, dass die Modellbildung in der Mehrzahl der Prüfungen bei Rammpfählen, die eindeutig tragfähigen Baugrund erreichen, ein abgesichertes Verfahren ist und in der Regel schon in wenigen Schritten zu einem befriedigenden Ergebnis führt.

Literatur

Handbuch Eurocode 7; Geotechnische Bemessung, Band 1: Allgemeine Regeln, Beuth Verlag Berlin 2011

EAPfähle 2012; Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Verlag Ernst&Sohn Berlin 2012

EAU 2004; Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen, Häfen und Wasserstraßen“ herausgegeben von der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Verlag Ernst&Sohn Berlin 2005

Hussein, M.H., Sharp, M.,R., and Knight, W.F., 2002. The Use of Superposition for Evaluating Pile Capacity. Conf. On Deep Foundations, ASCE, Orlando, Florida, USA, 6-18.

Klingmüller, O 1984; Computational tools for dynamic pile testing, II.Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Stockholm1984, ed. Holm-Bredenberg-Grävare, Balkema Rotterdam 1985, S.342-349

Klingmüller, O 1991; Dynamische Pfahlprüfung als Optimierungsproblem, Pfahlsymposium Braunschweig, S. 149 - 176

Klingmüller, O 1995; Optimierung von Pfahlgründungen unter Berücksichtigung von Aufwendungen für Pfahlprüfungen, Pfahlsymposium Braunschweig, S.285 - 300

Lehmann, T. 1977; Elemente der Mechanik, Vieweg Braunschweig, S.220 ff

Rausche 1974 Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen, Baugrundtagung Frankfurt

Rausche, F., Likins, G., Liang, L., and Hussein, M., 2010. Static and dynamic modes for CAPWAP Signal Matching; The Art of Foundation Eng. Practice; ASCE GSP No. 198; 534-553.

Timoshenko, S.P., Goodier, J.N.:1970; Theory of Elasticity, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, Intern.Student Edition, S.492ff

Autoren:

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller,
Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH
Steubenstraße 46 - 68163 Mannheim - Tel.: 0049621 331361 email ok@gsp-mannheim.de

Frank Rausche, PhD, PE, Pile Dynamics, Inc., Cleveland, Ohio, USA, FRausche@pile.com