

Zur Beziehung zwischen Bärmasse, Futtersteifigkeit, dynamischen Spannungen und Pfahleindringung

Frank Rausche und Oswald Klingmüller

Einleitung

Beim Rammen entstehen sowohl Druck- als auch Zugspannungen im Pfahl, die im Stahlpfahl 90% der Fließgrenze und im Betonpfahl entweder 85% der Betondruckfestigkeit und 50% der Betonzugfestigkeit oder 70% der Bewehrungszugfestigkeit betragen dürfen (z. B. AASHTO, 1996). Beim Rammen von Betonpfählen kann das Auftreten von Zugspannungen zu Rissen und nach zahlreichen Schlägen mit hohen Spannungswechseln zu Pfahlbeschädigungen führen. Es ist auch bekannt, dass das Verhältnis von Bär- zu Pfahlgewicht dabei eine große Rolle spielt. Daher wird manchmal für das Rammen von Betonpfählen ein Mindestbärgewicht verlangt.

Ein verbreiteter Erfahrungsgrundsatz besagt, dass bei einem zu leichten Bär der Pfahlkopf zerstört wird, bei einem zu schweren Bären der Pfahlfuß. Dies ist eine Folgerung daraus, dass bei einem leichteren Bären eine größere Fallhöhe erforderlich ist, um die gleiche Energie aufzubringen als bei einem schweren Bären. Eine größere Fallhöhe bedeutet aber auch eine größere Fallgeschwindigkeit und das führt zu größeren Spannungen am Pfahlkopf. Wird mit einem schweren Bären gerammt, kann der Pfahl bis zu einem hohen Bodenwiderstand eingebracht werden, ohne dass dies am Pfahlkopf zu Schäden führt. Beim Auftreffen auf eine sehr widerstandsfähige Schicht wird dann der Pfahl im Fußbereich überbeansprucht.

Natürlich sind schwerere Hämmer meistens unwirtschaftlicher. Ein optimales Rammsystems muss den Pfahl schnell und sicher, also mit zulässigen dynamischen Spannungen in den Boden eintreiben.

Ähnliche Überlegungen müssen auch bei der Vorbereitung, d.h. bei der Auswahl eines Fallgewichtes, für dynamische Probelastungen bei Einzelprüfungen z.B. von

Großbohrfählen angestellt werden. Bei Verwendung eines kleinen Fallgewichtes wird dann versucht durch eine größere Fallhöhe ausreichend Energie aufzubringen. Dadurch sind dann aber die dynamischen Anteile des Widerstandes hoch, so dass auch bei großer Pfahlbeanspruchung nur ein geringer statischer Widerstand aktiviert werden kann. Es wurden daher Systeme entwickelt, die die dynamischen Kräfte über eine längere Zeit als beim normalen Rammen auf den Pfahl einbringen und dadurch bei geringer Spannung große Energie aufzubringen. Dabei kamen weiche Futter oder Federn, große Fallgewichte und sogar Verbrennungsdrücke zum Einsatz (Klingmüller, 1999, Rausche u.a., 2006) .

Dieser Beitrag untersucht die Beziehungen zwischen Bärgewicht, Pfahleindringung und Spannungen in Betonrammpfählen und Bohrpfählen sowohl auf Grund von Simulationen des Rammvorganges nach der Wellengleichungsmethode als auch mit Hilfe von Messergebnissen an verschiedenen Pfahlgrößen und Fallgewichten. Mit Hilfe dieser Ergebnisse werden dann Empfehlungen für die Vorbereitung von Rammaufgaben und dynamischen Probelastungen formuliert.

Mechanische Grundlagen

Es ist seit langem bekannt, dass Pfahlspannungen beim Rammen sowohl von der Masse der schlagenden Teile und der Auftreffgeschwindigkeit als auch von der Steifigkeit des Futters abhängen. Timoshenko (1951) berichtet, dass Boussinesque bereits 1883 eine Lösung für die Druckspannungen in einem Pfahl, die durch den Aufprall eines starren Körpers verursacht wurden, vorstellte. Dabei wurde der Parameter α als Verhältnis von Pfahl- zu Bär- (oder Fall)gewicht eingeführt.

$$\alpha = G_p / G_b \quad (1)$$

Die Lösung (Bild 1) wurde auf Grund der Wellentheorie in einem Stab entwickelt, der an seinem unteren Ende einen starren Bodenwiderstand erfährt, und zeigt, dass die Druckspannungen im Pfahl zunehmen, wenn die Pfahlmasse relativ zur Bärmasse abnimmt. In Bild 1 wurde die Zeitachse durch Teilung mit $T/2$ dimensionlos gemacht, wobei $T = 2L/c$ die Zeit ist, die die Stoßwelle benötigt, um zweimal die Pfahlänge L mit der

Geschwindigkeit c zu durchlaufen. Die Ordinate zeigt die Druckspannung am Pfahlkopf, σ , die durch Division mit der beim Aufschlag entstehenden Spannung normalisiert wurde.

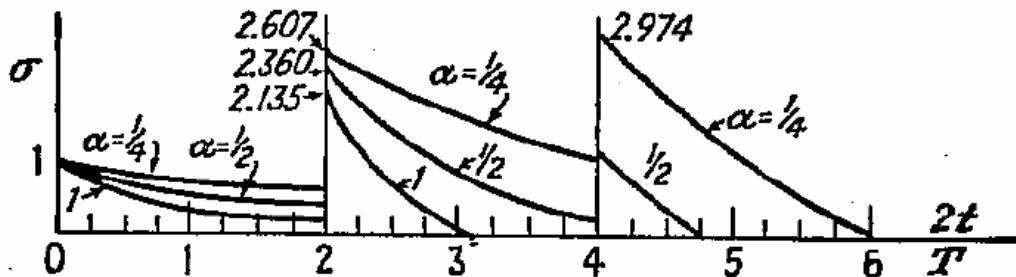


Bild 1: Druckspannungen im Pfahlkopf über die Zeit und mit 3 verschiedenen α – Werten (nach Timoshenko et al., 1951)

Während für Stahlpfähle die dynamischen Druckspannungen gefährlich sind, da wegen der geringen Blechdicke Beulgefahr besteht, führen beim Betonpfahl Zugspannungen oft zu Rissen und, wenn Druckspannungen gleichzeitig groß sind, zu weiteren Schäden. Wellentheorie könnte hier wiederum helfen, eine Beziehung zwischen α und den Zugspannungen abzuleiten und sie würde zeigen, dass größere Bärmassen (d.h. kleinere α -Werte) zu geringeren Zugspannungen führen. Tatsächlich gibt es Faustformeln oder Ausschreibungsbedingungen, die verlangen, dass das Pfahl-/Bärmassenverhältnis α mindestens 1:1 sein sollte, um hohe Zugspannungen zu vermeiden. Solche vereinfachten Ansätze sind aber äußerst ungenau und können entweder zu Schäden oder zu unwirtschaftlichen Lösungen führen. Geschlossene Lösungen liefern i.a. keine realistischen Ergebnisse, da Schlaghaube, Futter und Bodenwiderstand einen großen Einfluss auf die Zugspannungen haben und die geschlossenen Lösung zu sehr komplizieren. Die numerische Lösung der Wellengleichung in der Form eines Rechenprogrammes wie z. B. GRLWEAP (PDI, 2005) macht diese Berechnungen wesentlich einfacher und realistischer.

Obwohl numerische Lösungen schnell und einfach wertvolle Ergebnisse liefern bevor ein Pfahl gerammt wird, ist es besser, die Spannungen direkt zu messen oder mit Hilfe der Wellentheorie von Messungen am Pfahlkopf zu berechnen. Das kann mit der sogenannten Case Methode oder dem CAPWAP Verfahren gemacht werden (PDI, 2006).

In den letzten Jahren wurden mehrfach die Vorteile des sogenannten „Rapid Load Tests“ (RLT) gegenüber der traditionellen dynamischen Probelastung gerühmt. Z.B. hat Middendorp (2005) die Statnamic Methode vorgestellt, die durch die Zündung eines Explosionsstoffs zwischen Pfahl und Reaktionsmasse den Pfahl rund 100 ms lang belastet. Dadurch sollen Zugspannungen vermieden werden, während die dynamische Probelastung Zugspannungen im Pfahl erzeugen könnte. Die Verbrennungsdrücke können aber nur eine Last auf den Pfahl bringen, wenn eine entsprechend große Reaktionsmasse vorhanden ist und die wird i.a. mit 5 bis 10% der Belastungskraft angegeben. Demgegenüber arbeitet die dynamische Probelastung mit einem Fallgewicht von 1 bis 2% der zu erzielenden Prüflast. Wenn z.B. ein 4 MN Test durchgeführt werden muss, dann braucht man bei der dynamischen Probelastung ein 4 bis 8 Tonnen Fallgewicht, während der Rapid Load Test wenigstens 20 Tonnen Reaktions- oder Fallgewicht verlangt. Weiterentwicklungen sind die Pseudostatic und Hybridnamic Belastungsmethoden (Miyasaka, 2007), die auch mit einem mindestens 5%igen Fallgewicht und einem dicken Futter oder weicher Feder die Belastung über die Zeit ausdehnen und dadurch die Zugspannungen reduzieren oder vermeiden. Große Reaktions- oder Fallgewichte erhöhen natürlich die Kosten der Prüfung wesentlich. Auf der anderen Seite sind mäßige Zugspannungen, die nur drei- oder viermal (normale Anzahl der dynamischen Belastungen) und mit einer kurzen Dauer auftreten, für einen Pfahl im allgemeinen unschädlich. Deswegen soll hier die Abhängigkeit der Spannungen von Fallgewicht und Futtersteifigkeit untersucht werden.

Simulierungen

Zur Verdeutlichung der Beziehung zwischen den gegebenen Größen (Pfahlgeometrie, Bodenverhältnisse) und den Veränderlichen (Fallgewicht und Futter) unter einigermaßen wirklichkeitsgetreuen Verhältnissen, wurden Rammsimulationen mit Hilfe des Wellengleichungsprogrammes GRLWEAP vorgenommen. Dabei wurden 2 Pfahlgrößen angenommen: (a) ein 15 m langer Betonpfahl mit 600 mm Durchmesser und (b) ein 30 m langer Betonpfahl mit Durchmesser 420 mm. Mit diesen Größen war das Pfahlgewicht in beiden Fällen ca. 100 kN. Der Aufschlag erfolgte über eine 5 kN schwere Stahlplatte und

ein Holzfutter. Die Bärmasse wurde bis zu 1,5 mal der Pfahlmasse (15 Tonnen) gewählt; höhere Werte wären unpraktisch. Für den kurzen Pfahl wurde die Futterstärke mit 75 mm angenommen. Wegen der kleineren Querschnittsfläche wurde sie für den langen Pfahl auf die Hälfte verringert. Dadurch blieb die Futtersteifigkeit in beiden Fällen die gleiche. Für den kurzen Pfahl wurde dann auch der Einfluss eines recht weichen, 750 mm starken Holzfutters untersucht. Um für den dadurch entstandenen Energieverlust zu kompensieren wurde die Fallhöhe in diesem Fall von 2 auf 4 m erhöht. Der Boden wurde als eine steife Tonablagerung über einem dichten Sand mit den entsprechenden dynamischen Bodenkennwerten und einem 50 prozentigen Bodenwiderstand an der Pfahlspitze angenommen.

Für eine maximale bleibende Eindringung von weniger als 1,5 mm wurden die berechneten dynamischen Maximalspannungen in Bild 2 als Funktion der relativen Fallgewichtsmasse ($1/\alpha = \text{Fallgewicht}/\text{Pfahlgewicht}$) aufgetragen. (Für größere Eindringungen unterschieden sich die Spannungen nur unwesentlich). Diese Ergebnisse sind überraschend, denn sie zeigen zunächst, dass die Zugspannungen mäßig und unabhängig von der Pfahllänge sind, solange $1/\alpha$ mindestens 0,5 ist.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Boussinesque, die für gleiche relative Bärgewichte, $1/\alpha$, gleiche Druckspannungen voraussagen, sind die Druckspannungen im schlankeren Pfahl höher als im kurzen Pfahl mit größerem Durchmesser. Intuitiv ist das vernünftig und hat natürlich damit etwas zu tun, dass im realistischeren Fall ein Futter und eine Haubenmasse in der Berechnung berücksichtigt wurden.

Überhaupt nicht überraschend ist, dass ein 10 mal dickeres Futter wesentlich geringere Zug- und Druckspannungen im Pfahl ergibt. In diesem Fall wurde dabei sogar angenommen, dass die Fallhöhe auf das Doppelte, also auf 4 m, erhöht wurde. Mit diesem weichen Futter treten dann für alle Fallgewichte praktisch keine Zugspannungen im Pfahl auf.

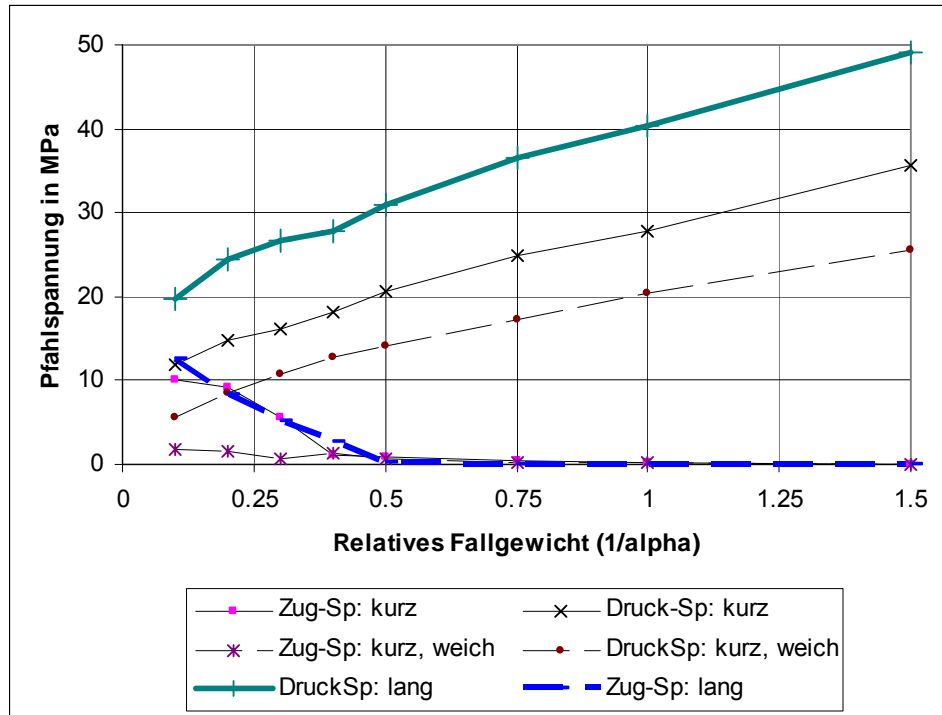


Bild 2: Zug und Druckspannungen in Abhängigkeit vom relativen Fallgewicht

Außer den Pfahlspannungen sind auch die Eindringungen pro Schlag von Bedeutung (a) beim Rammen für bessere Wirtschaftlichkeit und (b) bei einer dynamischen Pfahlprüfung für die Aktivierung (und daher Messung) der Pfahltragfähigkeit. Die Ergebnisse in Bild 2 entsprechen aktivierten Tragfähigkeiten, R_{u-a} , bei denen etwa 1 mm pro Schlag bleibende Eindringung berechnet wurden. Bei bleibenden Eindringungen von nur 1 mm wird i.a. die Grenztragfähigkeit eines Pfahles nicht erreicht, d.h. also das nur eine Mindesttragfähigkeit nachgewiesen werden kann.

Die R_{u-a} Werte wurden im Bild 3 als Funktion des Bärgewichtes aufgetragen. Die aktivierten statischen Tragfähigkeiten fallen mehr oder weniger in den Bereich von 50 bis 100 Fallgewichten, also, wie erwartet, braucht man ein Fallgewicht das wenigstens 1 bis 2% der zu erzielenden Tragfähigkeit ist. Diese Beziehungen sind allerdings nicht linear und wenn für einen bestimmten Pfahl eine sehr hohe Tragfähigkeit nachgewiesen werden muss, dann muss u. U. ein größeres Fallgewicht eingesetzt werden. Das gilt auch für besonders lange oder sehr weich gefederten Pfähle und natürlich auch, wenn größere Eindringungen pro Schlag erzielt werden sollen.

Bild 3 zeigt eine Bärgewicht/Ru-a Beziehung für relativ geringe bleibende Eindringungen. Das heisst also, dass i.a. grössere Bärgewichte als 1% der zu prüfenden Tragfähigkeit eingesetzt werden müssen. Dabei muss auch beachtet werden, dass insbesondere rollige Böden mit hohem Spitzendruck wesentlich höhere Energien und daher Bärgewichte verlangen als z.B. ein bindiger Boden oder gar ein im Fels eingebundener Pfahl. Wegen der mannigfaltigen Einflüsse sollte die Wahl eines ausreichenden Bärgewichtes durch eine Wellengleichungssimulation des Tests nachgewiesen werden.

Messungen

Die folgenden fünf Beispiele sollen dazu dienen, die theoretischen Ergebnisse zu untermauern. Diese Beispiele wurden für sehr verschiedene Pfahltypen und Belastungssysteme ausgewählt. Tabelle 1 beschreibt einen Schraubenpfahl (CFA pile), einen quadratischen, vorgespannten Ramppfahl, ein langes Stahlrohr, einen Großbohrpfahl und ein Betonrohr (cylinder pile). Die Pfahllängen liegen zwischen 20 und 57 m und Pfahlgewicht, Fallgewicht (Bärgewicht) und das Verhältnis von Bär- zu Pfahlgewicht, $1/\alpha$, zeigen auch große Unterschiede.

Die ersten vier Beispiele wurden mit relativ dünnen, etwa 50 bis 100 mm starken, Weichholzfütern und einfachen Fallgewichten, System APPLE, von 10 bis 36 Tonnen Masse durchgeführt. Das fünfte Beispiel zeigt Ergebnisse, die mit dem japanischen System Hybriddynamic erzielt wurden. Dieses System fällt in die RLT Kategorie, weil es mit relativ großem Fallgewicht und weichem Futter arbeitet. Bild 4 ist ein Photo des mit einem 40 Tonnen schweren Fallgewicht ausgestatteten Belastungssystems. Es kann durch Einfügung weiterer Stahlplatten auf 80 Tonnen erweitert werden. Der massive Rahmen dient sowohl zur hydraulischen Anhebung als auch stabilen Führung des Fallgewichtes während des Freifalls. Das speziell entwickelte, synthetische Futter liegt in einer grossen Schlaghaube und dehnt den Kaftimpuls über die Zeit aus. Die Messung wird am Pfahl mit denselben Gebern durchgeführt, die bei der dynamischen Pfahlprüfung Dehnung und Beschleunigung messen. Zusätzlich wird dann noch die Eindringung optisch über die Zeit gemessen. Bild 5 zeigt das mit 36 Tonnen Fallgewicht bestückte APPLE system, das beim im Fels gegründeten Grossbohrpfahl um Einsatz kam.

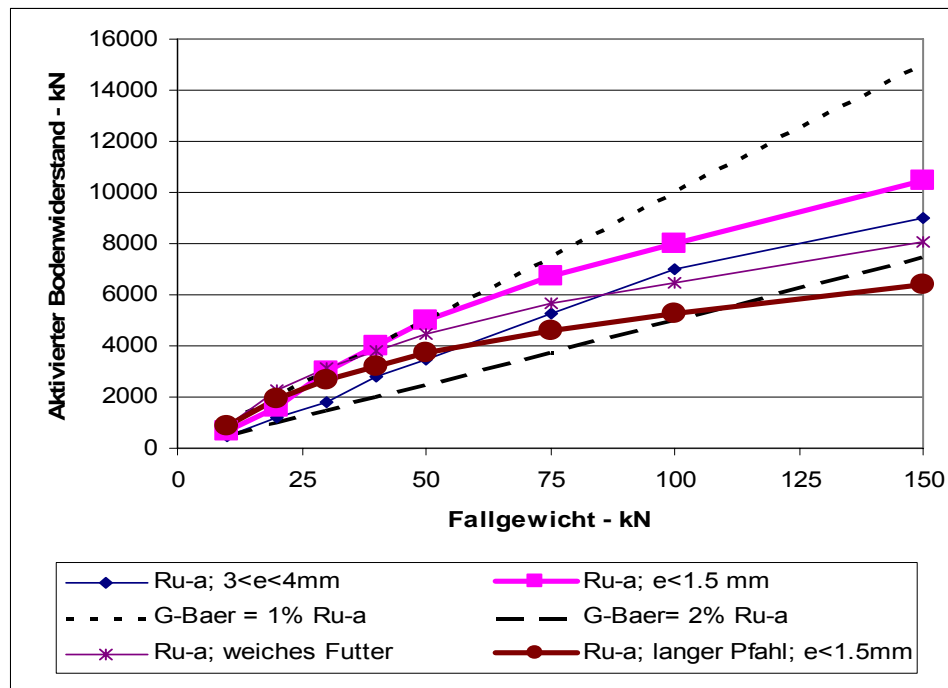


Bild 3: Beziehung zwischen aktiviertem Bodenwiderstand und Bärgewicht von Simulationen des Bealstungsvorgangs

Die Bilder 6, 7 und 8 zeigen für die Fälle 3, 4 und 5 die gemessenen Kraft- und Geschwindigkeitskurven, die mit CAPWAP ausgewertet wurden, wodurch die Druck- und Zugspannungen und die aktivierte Tragfähigkeit von Tabelle 2 ermittelt wurden. Die Fallgewichte relativ zu den aktivierten Tragfähigkeiten, bewegten sich zwischen 1,3 und 7,7. Der niedrigste Wert von 1,3 trat bei dem im harten Kalkstein gegründeten Großbohrpfahl auf; bei diesem Pfahl wurde die Grenztragkraft durch die dynamische Probelastung nicht erreicht.

Bild 8 gibt die Messschriebe wieder, die mit dem System Hybriddynamic erzielt wurden. Diese Kurven zeigen eine relativ kurze (etwa 5 ms) Anstiegszeit bei der Stoeinleitung und dann ein flaches Kraftverhalten. Sie sind leicht und verlässlich mit den gleichen Methoden, z.B. CAPWAP, wie die dynamischen Probelastungen auswertbar. Der relativ kurze Kraft- und Geschwindigkeitsanstieg ist für geringfügige Zugspannungen verantwortlich. Die dynamischen Prüfungen in den anderen Fällen (5 und 6) ergaben langsamere Kraftanstiege bedingt durch das Weichholzfutter und besondere

Fallgewichtskonstruktion. Es sollte hier noch angemerkt werden, dass nicht nur ein rascher Anstieg, sondern auch eine schnelle Abnahme der Kräfte im Pfahl Spannungswellen verursachen können.

Tabelle 1: Pfahl- und Fallgewichtdaten der Fallstudien

	Pfahltyp	Pfahl Länge L	Pfahl Gewicht Gp	Fall Gewicht Gb	1/α Gb/Gp
		m	kN	kN	
1	380 mm Ø Schraubpfahl	24,4	69,5	98	1,41
2	500 mm □ Vorgespannt	27,4	177	169	0,96
3	610x12 mm Stahlrohr	56,8	87,1	356	4,09
4	1830mm Ø Bohrfahl	25,7	1.478	356	0,24
5	600x90 mm Betonrohr	20,1	76,5	432	5,64

Die Dauer der Kraftkurven, T_{pk} , geteilt durch die Stoßwellendauer, $2L/c$ (c ist die Geschwindigkeit der Stoßwelle mit ungefähr 4 und 5 m/ms für Beton und Stahl) ergibt eine relative Kraftpulsdauer. Sie liegt bei den dynamischen Probelastungen zwischen 2,1 und 2,5 und ist nur beim System Hybriddynamic wesentlich größer. Es ergibt sich aber keine klare Beziehung zwischen Spannungen und $T_{pk}/(2L/c)$. In allen Fällen lagen die dynamischen Pfahlspannungen weit unter den zulässigen Werten (die höchsten Zugspannungen von 3,6 MPa traten im vorgespannten Rammpfahl auf).

Tabelle 2: Messergebnisse

	Pfahltyp	Zugspanng. MPa	Druckspannung MPa	Bleibende Eindringung, mm	Ru-a MN	Gb/ Ru-a %	$T_{pk}/(2L/c)$ %
1	380 mm Ø Schraubpfahl	0,9	31	4,8	2,4	4,0	2,2
2	500 mm □ Vorgespannt	3,6	25	0,6	5,7	2,9	2,3
3	610x12 mm Stahlrohr	0,9	343	1,8	7,1	5,0	2,5
4	1830mm Ø Bohrfahl	1,7	9,1	1,5	27,7	1,3	2,1
5	600x90 mm Betonrohr	1,7	43	22	5,8	7,7	7,8

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellte theoretische und gemessene Ergebnisse vor, die die folgenden Schlussfolgerungen ziehen lassen.

- Zugspannungen im Pfahl sind sowohl von der relativen Kraftpulsdauer abhängig, als auch von der Dauer des Kraftanstiegs zur Beginn der Belastung und von der .
- Die relative Kraftpulsdauer nimmt hauptsächlich mit dem Fallgewicht oder der Reaktionsmasse zu.
- Um bei dynamischen Probelastungen genügend hohe Eindringungen zu erzielen und damit ausreichende Tragfähigkeiten bei zulässigen Spannungen zu aktivieren, muss die Bärmasse mindestens 2% (1% bei im Fels gegründeten Pfählen) der nachzuweisenden Tragfähigkeit und mehr als 25% des Pfahlgewichtes betragen. Im Einzelfall sollten diese Werte durch Simulationen des Belastungsvorganges überprüft werden.
- Zugspannungen im Pfahl sind nur bedingt vom relativen Fallgewicht (oder der Reaktionsmasse) abhängig.
- Druckspannungen zeigen eine deutlichere Abhängigkeit vom Bärgewicht und natürlich auch von der Futterbeschaffenheit.
- Der Unterschied zwischen dynamischen und RLT Probelastungen ist nicht klar definierbar; wenn große, bleibende Eindringungen erwünscht sind, muss in jedem Fall mit höheren relativen Fallgewichten gearbeitet werden. Das führt aber nur dann zur vollkommenen Aktivierung der Grenztragfähigkeit, wenn die Pfahltragfähigkeit geringer ist als die Materialfestigkeit des Pfahles.
- RLT können mit den Methoden der dynamischen Probelastung ausgewertet werden, solange der Kraftanstieg nicht ein Vielfaches der Spannungswellenlaufzeit ist. Das hat den Vorteil, dass der dynamische Anteil des Bodenwiderstandes durch die Berechnung definiert werden kann.



Bild 4: System Hybriddynamic



Bild 5: Dynamische Probelastung von Grossbohrpfahl mit 36 Tonnen APPLE

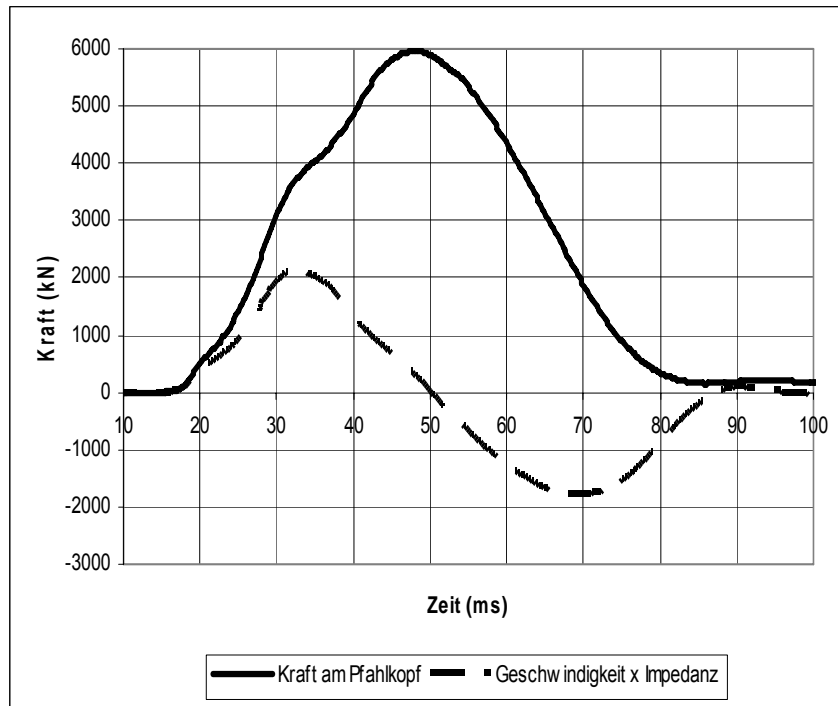


Bild 6: Pfahlkopfkraft und –geschwindigkeit für den Stahlrohrpfahl

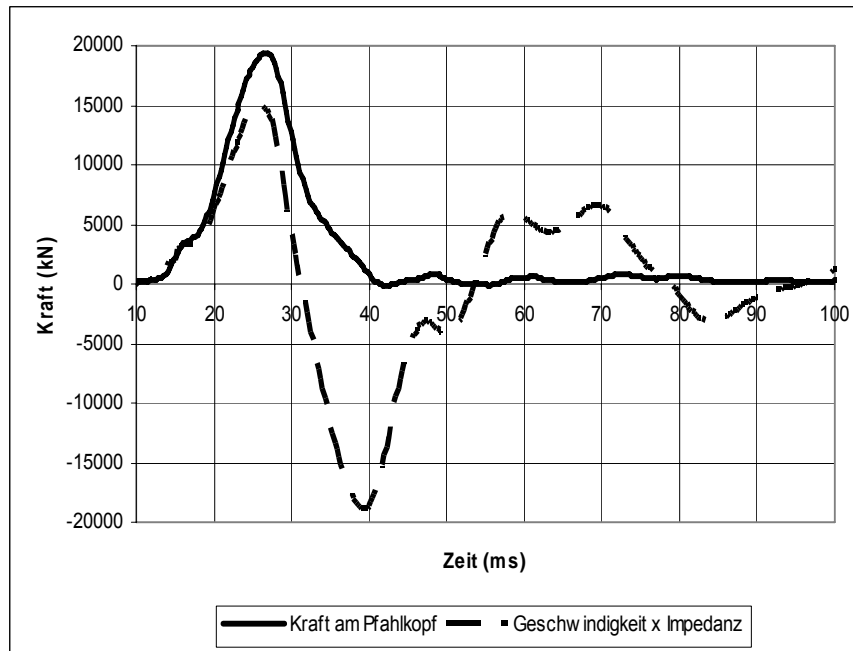


Bild 7: Pfahlkopfkraft und –geschwindigkeit für den Großbohrpfahl

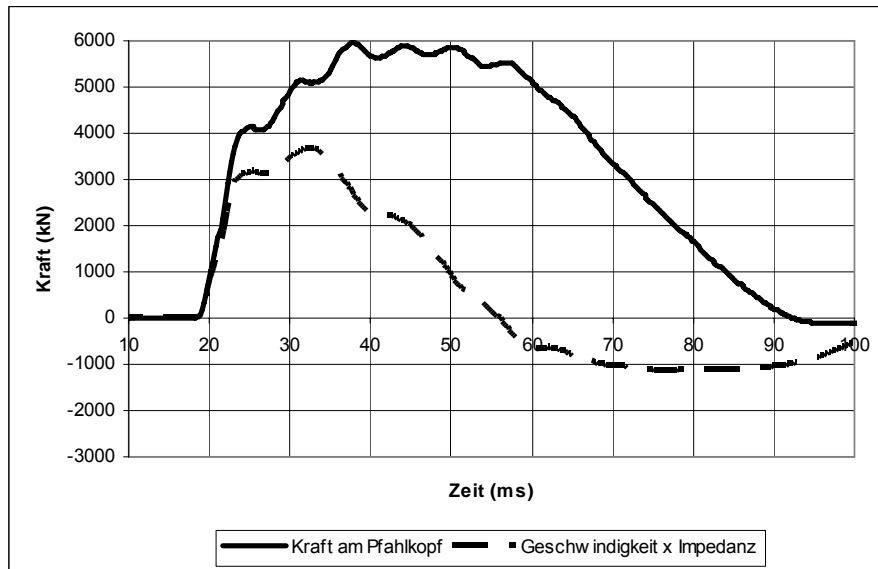


Bild 8: Pfahlkopfkraft und –geschwindigkeit für das Betonrohr (System Hybriddynamic)

Quellen

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996. Standard Specifications for Highway Bridges (Sixteenth Edition).

Klingmüller, O. (1999) : Dynamische Prüfung von Großbohrpfählen - Fallmasse, Fallhöhe und erreichbare Tragfähigkeit, Pfahlsymposium, TU Braunschweig

Middendorp, P. (2005) : Verwendung von statnamischen Probelastungen in Deutschland, Pfahlsymposium, TU Braunschweig

Miyasaka, T. and Kuwabara, F., (2006). Large Scale Pseudostatic Pile Load Test, Part.1- Ground Oscillation and Ultimate Soil Resistance, S. 1547-1548, Proceedings of 41st Annual Conference of Japanese Geotechnical Society, Kagoshima, July, 2006.

PDI, (2005). GRLWEAP Background Report, 4535 Renaissance Parkway, Cleveland, OH, 44128, USA. www.pile.com.

PDI, (2006). CAPWAP Background Report, 4535 Renaissance Parkway, Cleveland, OH, 44128, USA. www.pile.com.

Rausche, F., Morgano, M., Hannigan, P., Bixler, M. and Beim, J., 2006. Experiences with heavy drop hammer testing of rock-socketed shafts, Deep Foundations Institute, Annual Conference, Washington, DC.

Timoshenko, S., and Goodier, J.N., (1951). Theory of Elasticity, McGraw-Hill Book Company, Inc.

Dr., Dipl.-Ing. Frank Rausche
GRL Engineers, Inc.

4535 Renaissance Parkway
Cleveland, OH 44128
USA

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller
GSP
Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Messungen

Käfertalerstrasse 164
D 68167 Mannheim