

# **TRAGFÄHIGKEIT EINES EINVIBRIERTEN DALBENS**

Oswald Klingmüller und Frank Rausche

veröffentlicht in:

Pfahl-Symposium 2007, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der  
Technischen Universität Braunschweig, Heft Nr. 84

# TRAGFÄHIGKEIT EINES EINVIBRIERTEN DALBENS

Oswald Klingmüller, Frank Rausche

## Zusammenfassung

Beim Einbringen von zwei Rohrpfählen für ein Hafenprojekt am Rhein ergab sich die Möglichkeit, den Vibrationsvorgang und den Schlagammvorgang durch Messungen am Pfahlkopf zu erfassen. Die Auswertung zeigte, dass eine Abminderung der Pfahltragfähigkeit des eingerüttelten Pfahls nicht gegeben war. Für die Bestimmung der Pfahltragfähigkeit aus der Vortriebsgeschwindigkeit wird eine kalibrierte Simulationsberechnung mit einem Wellengleichungsprogramm vorgeschlagen.

## 1 EINLEITUNG

Seit Anfang der 90iger Jahre des vorigen Jahrhunderts gab es verschiedene Ansätze das Einvibrieren von Pfählen genauer zu untersuchen. Einerseits galt das Interesse einer praxisorientierten Vorberechnung des Vorgangs um für ein gegebenes Rammgut und einen gegebenen Boden das optimale Rüttelgerät zu definieren (Rausche 1995 bzw. Rausche 2002), andererseits gab es auch Bestrebungen aus den Vorgängen beim Rammen, insbesondere der Vortriebsgeschwindigkeit, die Tragfähigkeit der eingerüttelten Pfähle nachzuweisen (Rausche 1995, Lammertz-Richwien 2002 und 2004, Viking 2002). Die Untersuchung der Vorgänge im Boden und der Veränderung des Bodens beim Rütteln war Gegenstand weiterer Forschungsprojekte (Cudmani, Huber 2002).

Als bei einem Projekt die Gelegenheit gegeben war, Messungen während des Einrüttelns und während des Schlag-Rammens durchzuführen, bot es sich an, diese auch auf der Grundlage der genannten Untersuchungen auszuwerten.

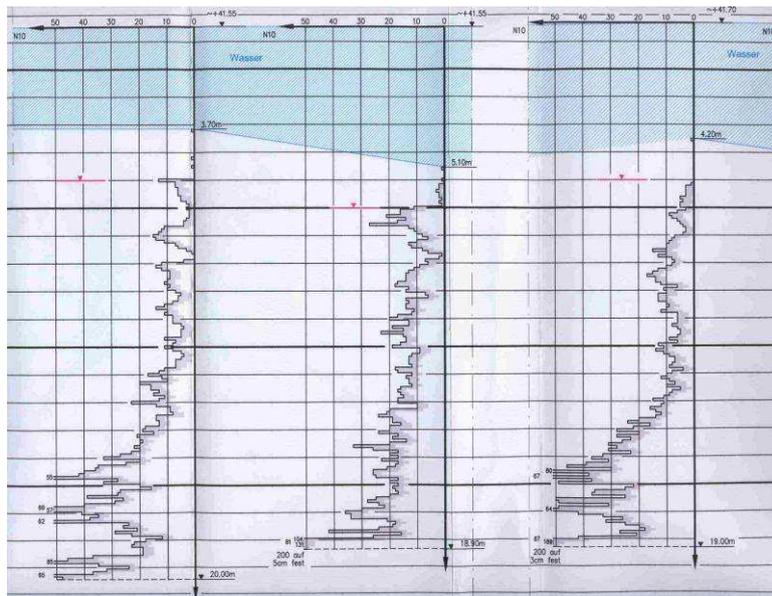
## 2 PROBLEMSTELLUNG

Für einen neuen Hafen am Rhein sollen mehrere größere Anlege- und Verladebrücken gebaut werden. Aus konstruktiven Gründen sollen die Brücken auf Rohrpfähle  $\varnothing 1.020$  mm abgesetzt werden.

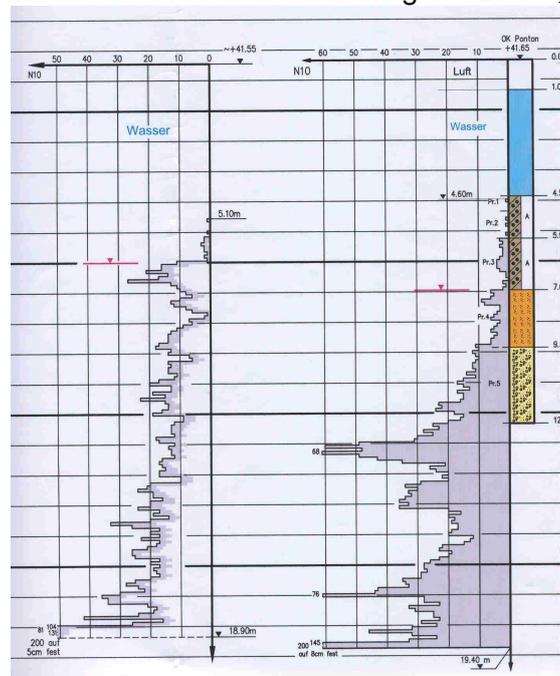
Aus den ersten Baugrunduntersuchungen als Rammsondierungen (siehe Bild 1) ergab sich die Ausführung der Stahlrohrpfähle als Spitzendruckpfähle. Die Rohrpfähle sollen mit angeschweißten Flügeln versehen werden, so dass eine Pfropfenbil-

ung gewährleistet ist. Es war vorgesehen, die Pfähle mit einem Vibrationsgerät einzubringen.

Aufgrund der der hochliegenden festeren Schicht in den Sondierungen 1 und 3 (Bild 1a) war aber nicht sichergestellt, dass die Pfähle tief genug einbinden, um eine ausreichende seitliche Bettung zu gewährleisten. Es wurden deswegen zusätzliche Rammsondierungen ausgeführt, um eine größere Sicherheit bezüglich Rammbarkeit und Tragfähigkeit zu erreichen. Der neue Sondierpunkt 22 wurde zwischen die Sondierpunkte 1 und 2 gelegt (Bild 1b).



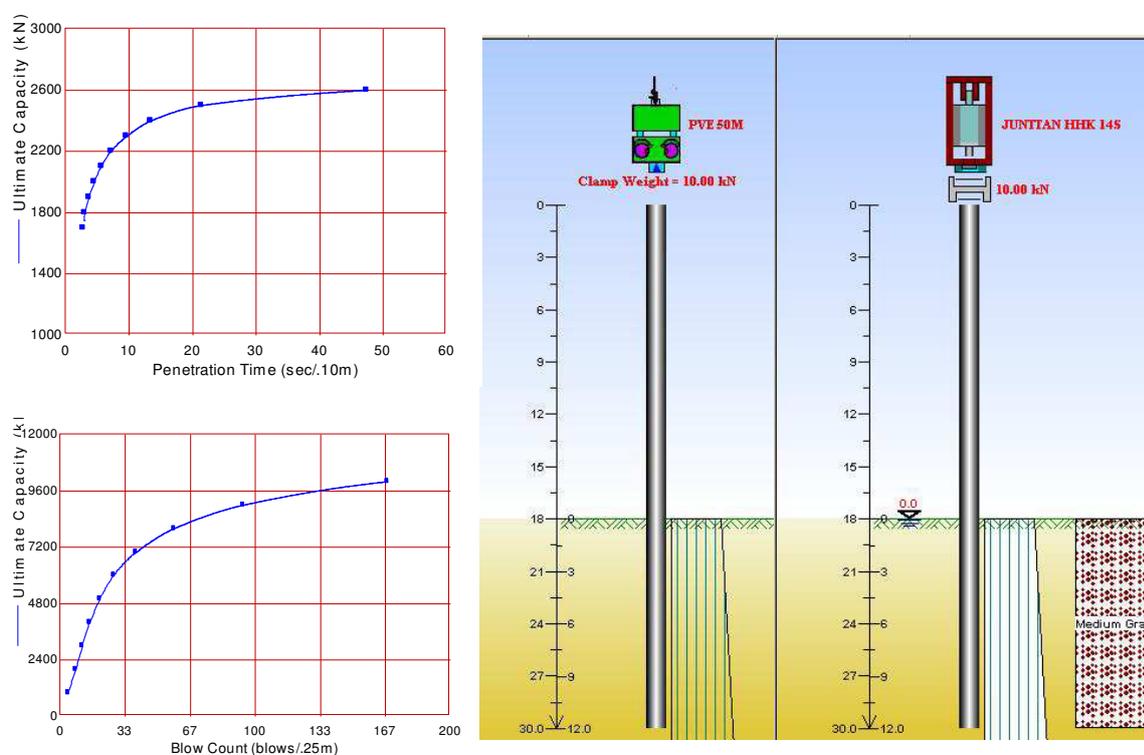
**Bild 1a:** Bodenaufbau aus Rammsondierungen - DPH1, DPH2, DPH3



**Bild 1b** aus zusätzlichen Rammsondierungen, DPH2 und DPH22, RKS22

Die zusätzlichen Rammsondierungen zeigten, dass ca. 5m unter der Sohle des Hafens die Schlagzahlen so ansteigen können, dass das Erreichen einer ausreichenden Rammtiefe fraglich wurde. Es wurde deswegen auf die Querschnittsverstärkungen zur Pfropfenbildung verzichtet. Allerdings war dann nicht mehr sichergestellt, dass eine ausreichende *vertikale* Tragfähigkeit erreicht wird.

Durch Simulationsberechnung (Bild 2) wurde festgestellt, ob es bei den gegebenen Bodenverhältnissen möglich ist, mit dem vorhandenen Gerät die Pfähle einzubringen. Wie anhand der Rammzeit zu erkennen ist, würde das Rüttelgerät PVE 50M schon bei einem statischen Anteil des Rammwiderstandes von 3.000 kN nicht mehr ausreichen, den Pfahl einzubringen, das Rammgerät Junttan HHK12A' wäre noch bis zu einem statischen Anteil von 10.000 kN am Rammwiderstand einsetzbar.



**Bild 2:** Simulationsberechnung für Rütteln und Rammen

Zur Verbesserung der Planungssicherheit wurden deswegen zwei Probepfähle ausgeführt, bei denen die tatsächliche Tragfähigkeit ermittelt werden sollte. Ein Probepfahl war hierbei schon mit Befestigungspollern sowie Knaggen und Kopfbolzendübeln ausgestattet, da festgestellt werden sollte, ob diese Anbauten vor dem Rammen montiert werden können (Bild 3). Die Kopfbolzendübel waren vorgesehen, da die Option, zur Erhöhung der Lebensdauer die Pfähle auszubetonieren, offengehalten werden sollte.

Da es bislang keine ausreichenden Grundlagen für die Bestimmung der Tragfähigkeit aus dem Verlauf des Einvibrierens gibt, sollten die Probepfähle nach dem Einvibrie-

ren gerammt werden, so dass dynamische Probelastungen ausgeführt werden konnten.

Aus Sicherheitsgründen wäre es sehr zeitaufwändig gewesen, nach dem Absetzen des Vibrationsgeräts die Messtechnik zu montieren, so dass die Sensoren auf dem Boden montiert wurden und während des ganzen Vorganges messbereit waren. Es konnten somit nicht nur die üblichen dynamischen Pfahlprobelastungen ausgeführt werden, sondern auch Messungen während des Vibrierens durchgeführt und ausgewertet werden.



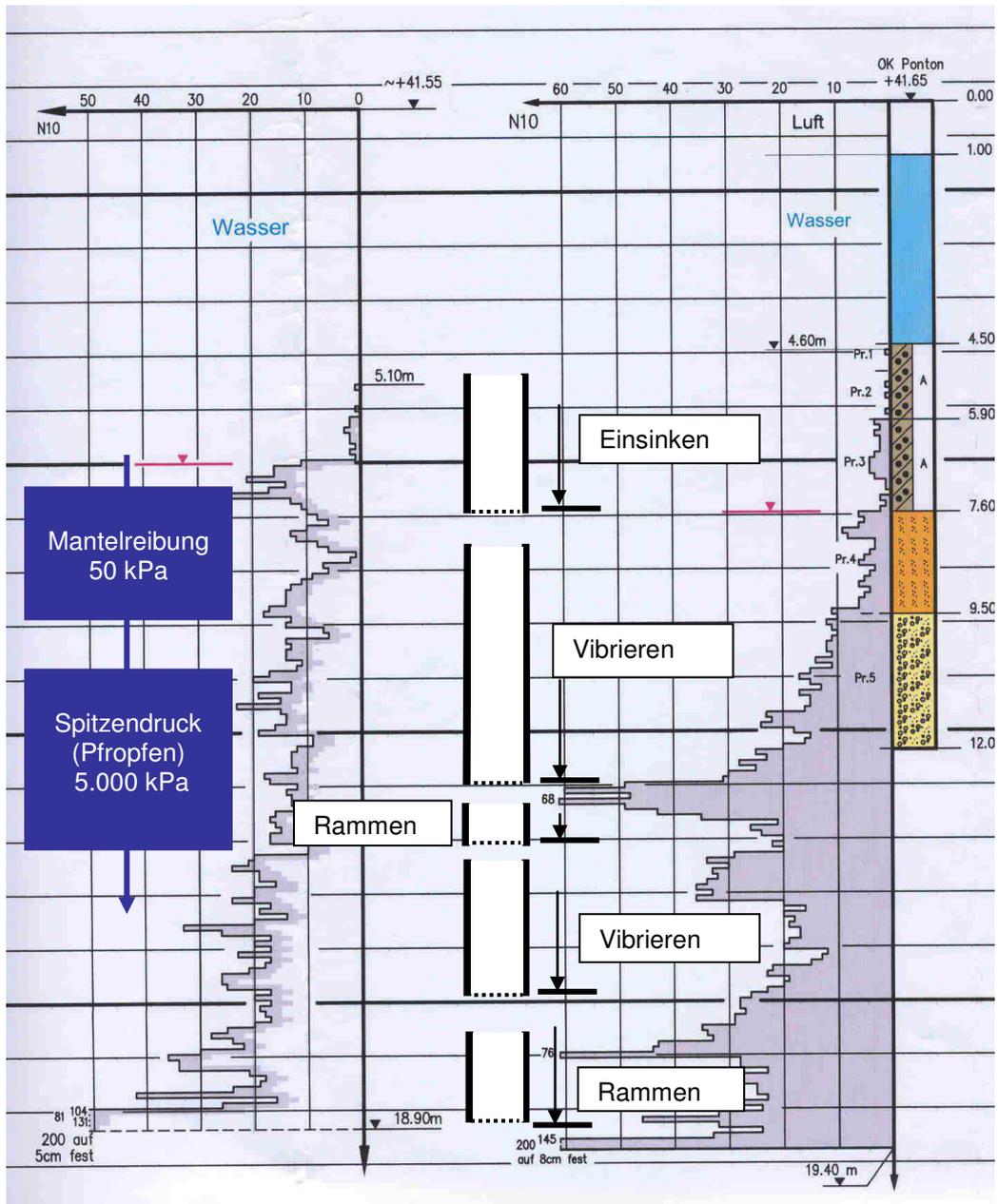
**Bild 3** : Probefahl mit Pollern, Knaggen und Dübeln

### 3 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN

Aufgrund der Sondierergebnisse der zweiten Bodenaufschlüsse (Bild 1b) erschien es möglich, dass die Pfähle schon beim Erreichen von 5 bis 6 m Einbindung ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. Es wurde deswegen vorgesehen, das Einvibrieren nach Erreichen einer Einbindung von 6 m zu unterbrechen und den Pfahl mit einem hydraulischen Rammgerät für ca. 1 m einzurammen. Danach wurde der Pfahl um weitere 3 m einvibriert und dann bis zur Endtiefe wiederum gerammt (siehe Bild 4).

Das Bild 5a zeigt Pfahl 2 zum Ende des Rüttelvorgangs, Bild 5b das Abnehmen des Hydraulikhammers nach dem Erreichen der Endtiefe.

Für das Vibrieren wurde das Gerät PVE 50M (Fliehkraft 1.600 kN, Drehzahl 1.700 Upm oder 28 Hz), zum Rammen ein Gerät Junttan HHK12A mit einem auf 14 t (nominelle Energie 150 kNm) vergrößerten Rammbaren eingesetzt.



**Bild 4:** Durchführung der Pfahlinstallation



**Bilder 5a und 5b :** Vibrieren und Rammen

Die Sensoren, normale Dehnungsaufnehmer sowie piezoresistive Beschleunigungsaufnehmer von Pile Dynamics Inc. Cleveland, wurden auf dem Transportponton 3 m von der Pfahloberkante entfernt montiert. Bei dem Pfahl mit den Anbauten war ein Abstand von 2 m zu den Störstellen gegeben.

Die Kabel wurden so befestigt, dass sie während des gesamten Ramm- und Vibriervorgangs messbereit waren (siehe Bilder 6a und 6b).



**Bilder 6a und 6b** : Sensoren am Pfahl angeschraubt

### 3 MESSUNGEN UND AUSWERTUNGEN

Mit einem Pile Driving Analyzer® wurden beim Rüttelvorgang jeweils Zeitabschnitte von 0,3 s der Dehnungs- und der Beschleunigungszeitverläufe der zwei Sensorenpaare aufgezeichnet. Durch Integration über die Zeit kann aus der Beschleunigung die Schwinggeschwindigkeit und die Verschiebung des Pfahlkopfes ermittelt werden (Bild 7).

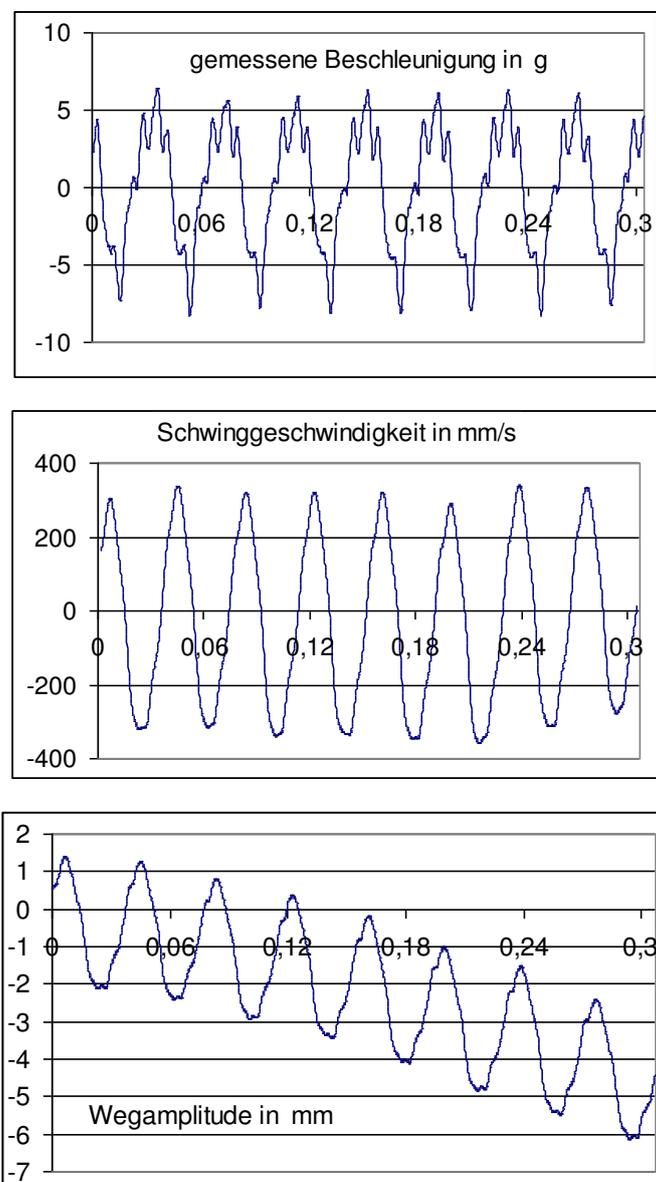
Die Bewegungsmessungen (Bilder 8) zeigen, dass die Beschleunigungen beim Einvibrieren um etwa zwei Größenordnungen geringer sind als bei der Schlagrammung (ca. 6 g beim Vibrieren, gegenüber ca. 600 g bei der Schlagrammung).

Die angeschweißten Anbauteile haben übrigens bei diesen Beschleunigungen keinen Schaden erlitten.

Nach zweifacher Integration ergibt sich eine Bewegungsamplitude von 2 mm. Die Amplitude, die im Datenblatt des Rüttlerherstellers mit 21 mm angegeben wird, bezieht sich offensichtlich auf die theoretische maximale Verschiebung der Rüttlermasse. Die Bewegungen des Teils mit der Unwucht sind mit dem Rammgut verbunden und durch den Boden behindert, so dass die angegebene Amplitude nicht gleichbedeutend ist mit der Bewegung des Pfahls (siehe auch Lammertz/Richwien 2002).

Die Abwärtsbewegung konnte allerdings nicht durch die Messung selbst bestimmt werden, da die zweifache Integration Messfehler der Beschleunigung verstärkt. Die im Bild angegebenen 4 mm pro 0,3 Sekunden (entsprechend 13 mm/s oder 75 s/m) wurden durch eine externe Beobachtung mit Stoppuhr anhand der Markierungen auf dem Pfahl bestimmt. Die Bewegung aus der zweifachen Integration wurde mit diesem Wert korrigiert.

Abgesehen von den Bewegungsgrößen selbst ist aus der Messung zu erkennen, dass der Rüttelvorgang nicht wie in der Spezifikation angegeben mit 28 Hz (1.700 Upm) sondern mit 25 Hz ausgeführt wurde, obwohl ein auf den Rüttler abgestimmtes Aggregat eingesetzt war.



**Bild 8:** Gemessene Bewegungsgrößen

Aufgrund der niedrigeren Frequenz muss auch von einer im Quadrat des Verhältnisses vorhandener zu spezifizierter Frequenz abgeminderten Fliehkraft von

$$F = (25/28)^2 * 1.600 = 1.200 \text{ kN}$$

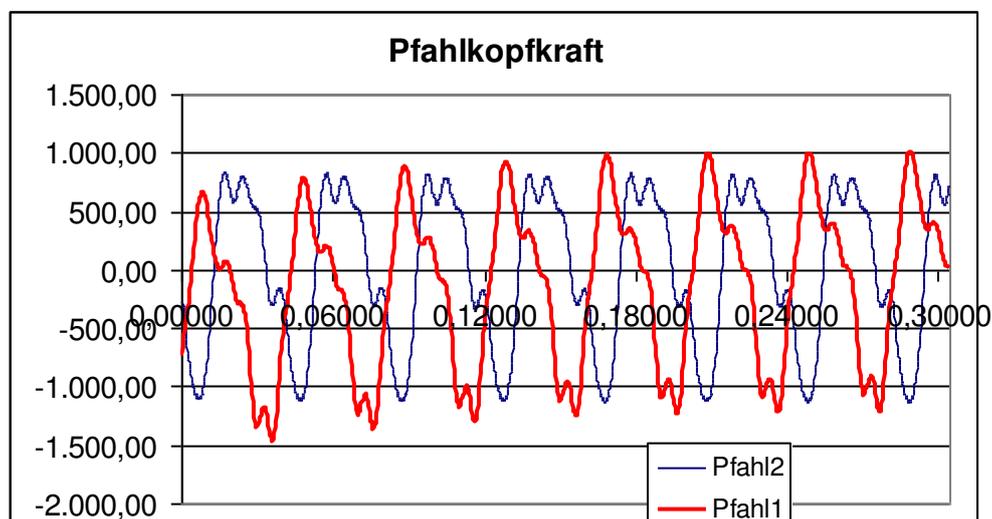
ausgegangen werden.

Die Fliehkraft wird als ein Anhaltswert für die Möglichkeit eines Rüttlers, ein bestimmtes Rammgut bei gegebenen Bodenwiderstand einzubringen, genommen. Die Messung der Kräfte (Bild 9) zeigt, dass die maximale in den Pfahl eingeleitete Kraft etwas geringer ist als die Fliehkraft.

Aus der Kraft und der Beschleunigung kann der statische Anteil am Bodenwiderstand beim Rütteln abgeschätzt werden :

$$R_u = F(t) - m * a(t), \quad (1)$$

mit F als gemessene Pfahlkopfkraft, m als Pfahlmasse und a(t) gemessene Beschleunigung. Als Bodenwiderstand wird der Maximalwert über einen Messbereich genommen.

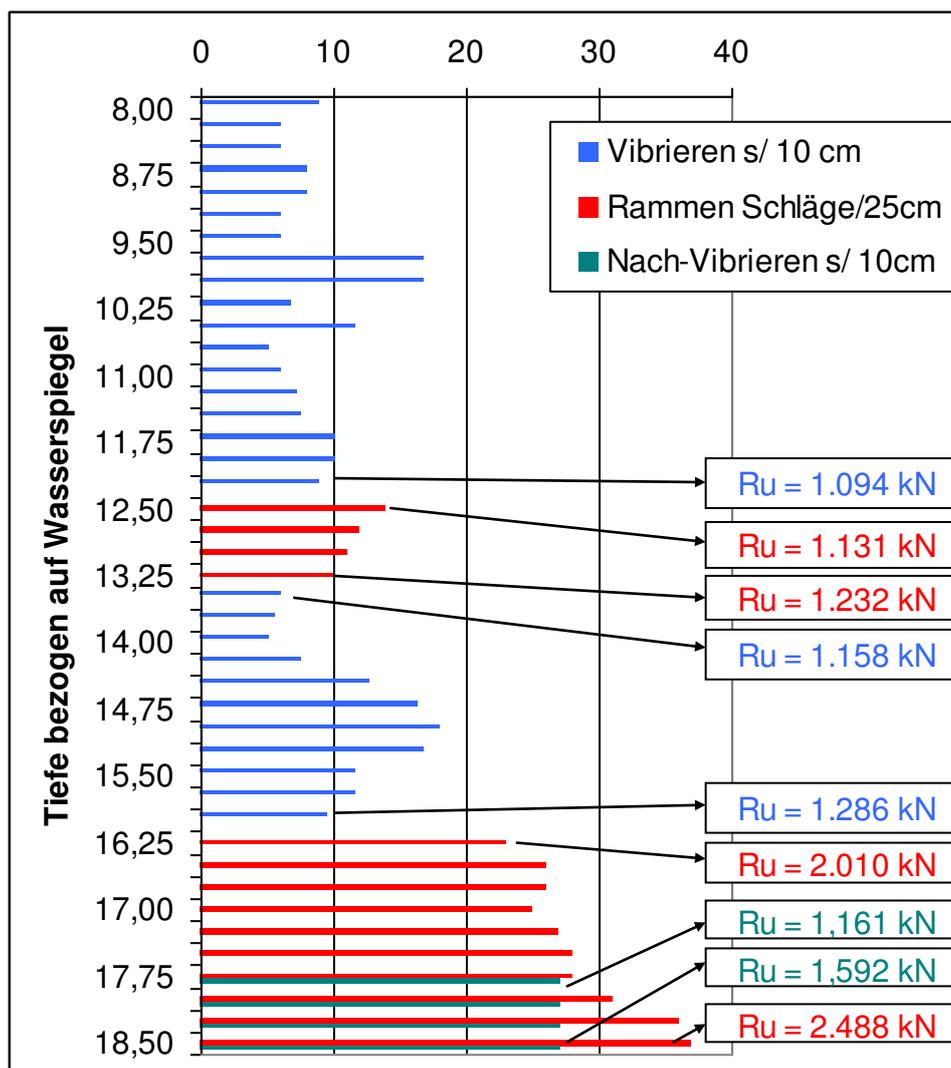


**Bild 9:** Gemessene Kräfte

Wird die Energie über eine Periode aus dem Zeit-Integral Kraft mal Geschwindigkeit bestimmt, ergibt sich ein Wert von etwas über 6 kNm; die in den Pfahl übertragene Leistung (Energie pro Zeiteinheit) ist dann etwa 150 kNm oder 150 kW.

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit der Pfähle wurden die Pfähle nach dem Einrütteln gerammt. Die dynamischen Messungen wurden nach dem CAPWAP-Verfahren ausgewertet. Der Ablauf der Pfahlinstallation ist in Bild 4 dargestellt.

Die aus den Bodenuntersuchungen abgeleiteten Bemessungswerte für Mantelreibung und Spitzendruck sind ebenfalls in Bild 4 angegeben. Demnach würde sich bei Annahme einer Pfropfenbildung ein Spitzendruck von 3.800 kN ergeben, zusammen mit der Mantelreibung eine Tragfähigkeit von nahezu 5.000 kN. Ohne Pfropfenbildung wäre die Tragfähigkeit etwas geringer als 2.000 kN (siehe auch Bild 4).



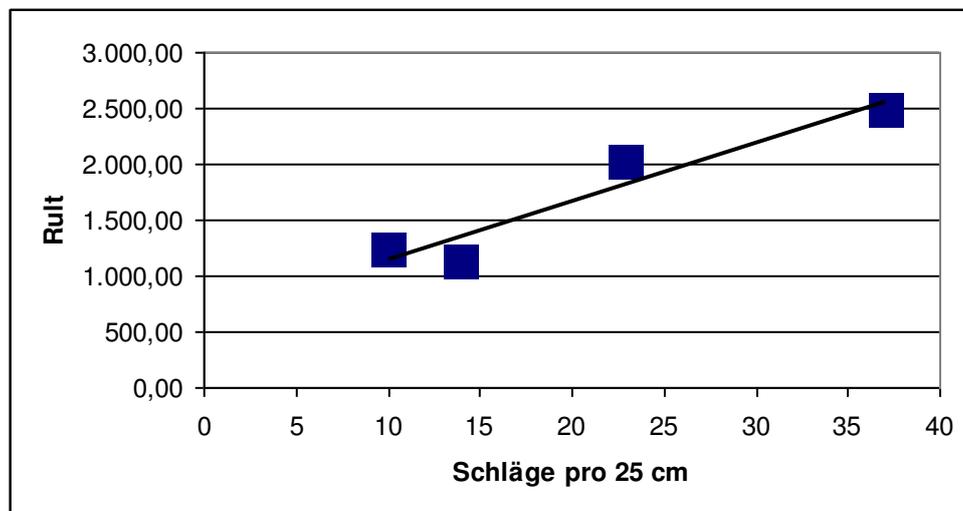
**Bild 9:** Rammprotokoll und Bodenwiderstände

In Bild 9 sind die Schlagzahlen beim Rammen und die Eindringgeschwindigkeiten beim Vibrieren zusammengestellt. Die Eindringgeschwindigkeiten wurden als Zeit in Sekunden bezogen auf 10 cm Eindringung angegeben, damit die Größenordnung den Schlagzahlen auf 25 cm entsprechen. Qualitativ entspricht eine solche Angabe der üblichen Angabe der Schlagzahlen, denn je länger die Zeit für die Eindringung pro Längeneinheit ist, desto größer ist der Bodenwiderstand.

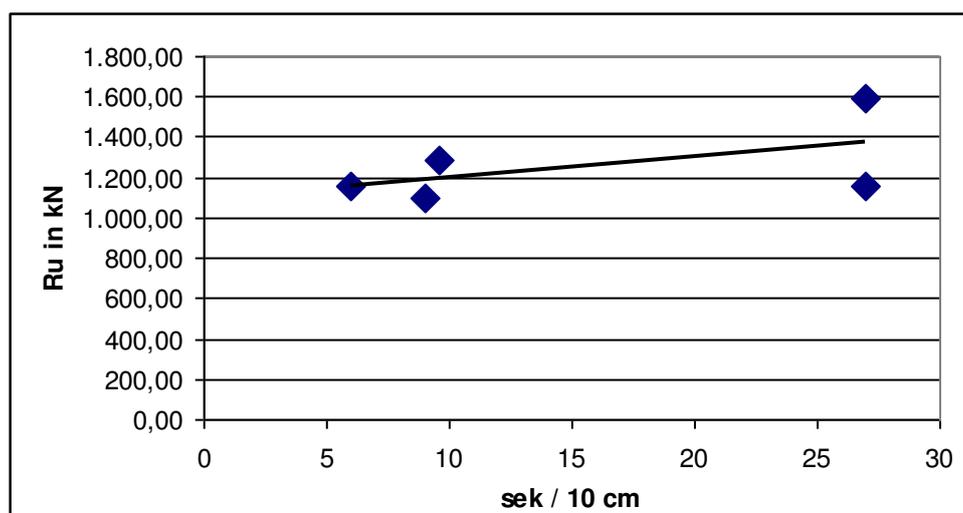
Nach der Rammung auf Endtiefe stand der Pfahl etwas schief, deswegen wurde er noch einmal vibrierend gezogen und danach wieder eingerüttelt. Bei diesem letzten Rüttelvorgang wurde die kleinste Eindringgeschwindigkeit bzw. längste Einheitseindringzeit bestimmt.

Die Bodenwiderstände beim Rütteln wurden mit Formel (1) bestimmt, die statischen Anteile der Bodenwiderstände beim Rammen mit dem CAPWAP-Verfahren.

Für beide Größen kann eine positive Korrelation mit dem jeweiligen Bezugswert festgestellt werden (siehe Bilder 10 und 11). Es ist allerdings zu erkennen, dass die Bodenwiderstände direkt nach dem Rütteln (zum Umsetzen des Gerätes werden ca. 30 Minuten gebraucht), deutlich unter den Werten zum Ende eines Rammvorganges liegen.



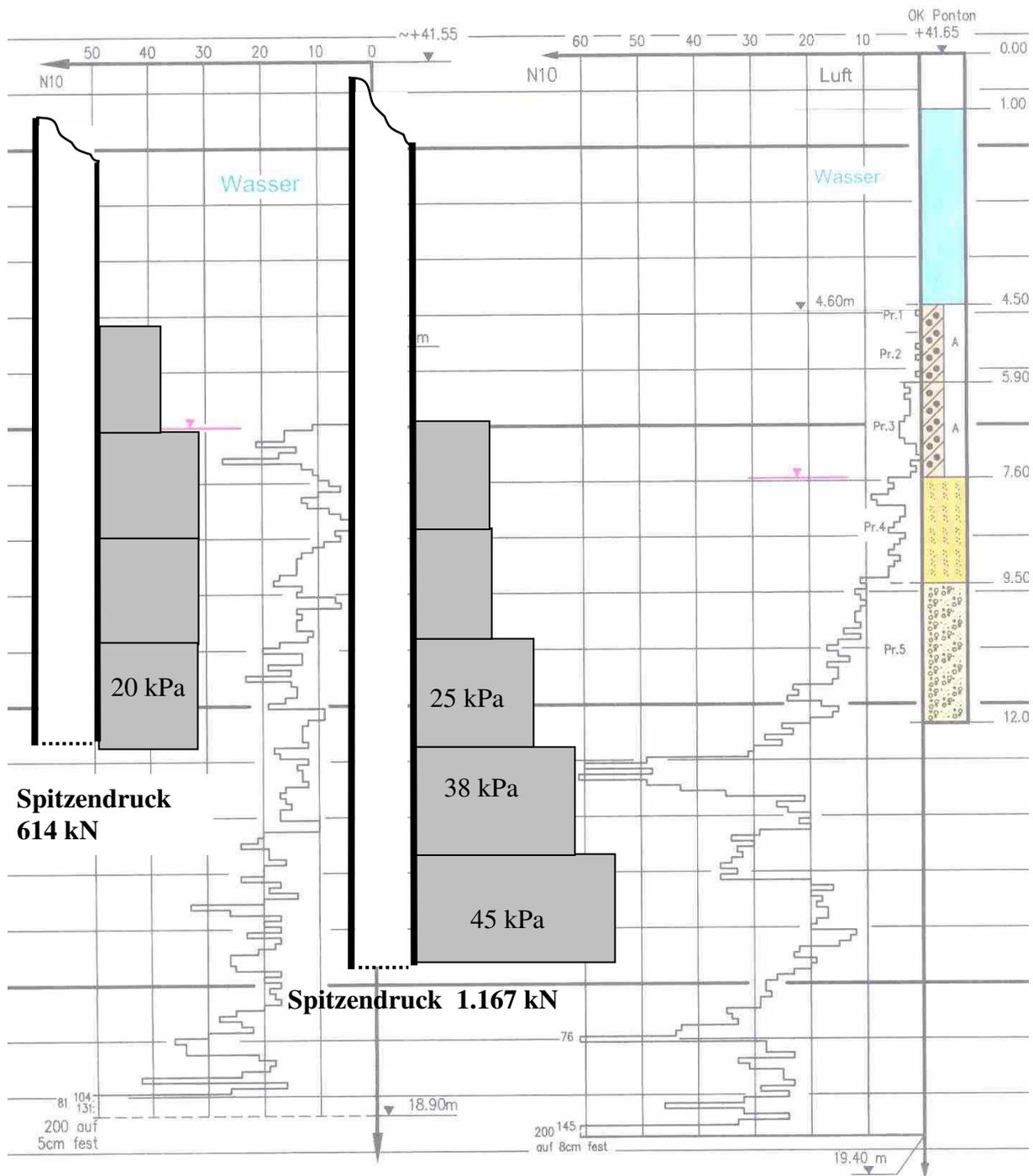
**Bild 10:** Schlagzahlen und Bodenwiderstände beim Rammen



**Bild 11:** Eindringzeiten und Bodenwiderstände beim Rütteln

Wird die Mantelreibungverteilung betrachtet, ergeben sich Werte, die etwas geringer sind, als die aus den Bodenuntersuchungen abgeleiteten Werte (Durchschnittswert

für die Bodenbereiche mit Schlagzahlen >10 war 50 kPa). Es kann aber erwartet werden, dass durch das sogenannte Festwachsen, eine Erhöhung der Mantelreibung um 50%, mit der Zeit größere Werte erreicht werden. Diese liegen dann etwas über dem aus der Sondierung abgeleiteten Durchschnittswert von 50 kPa.

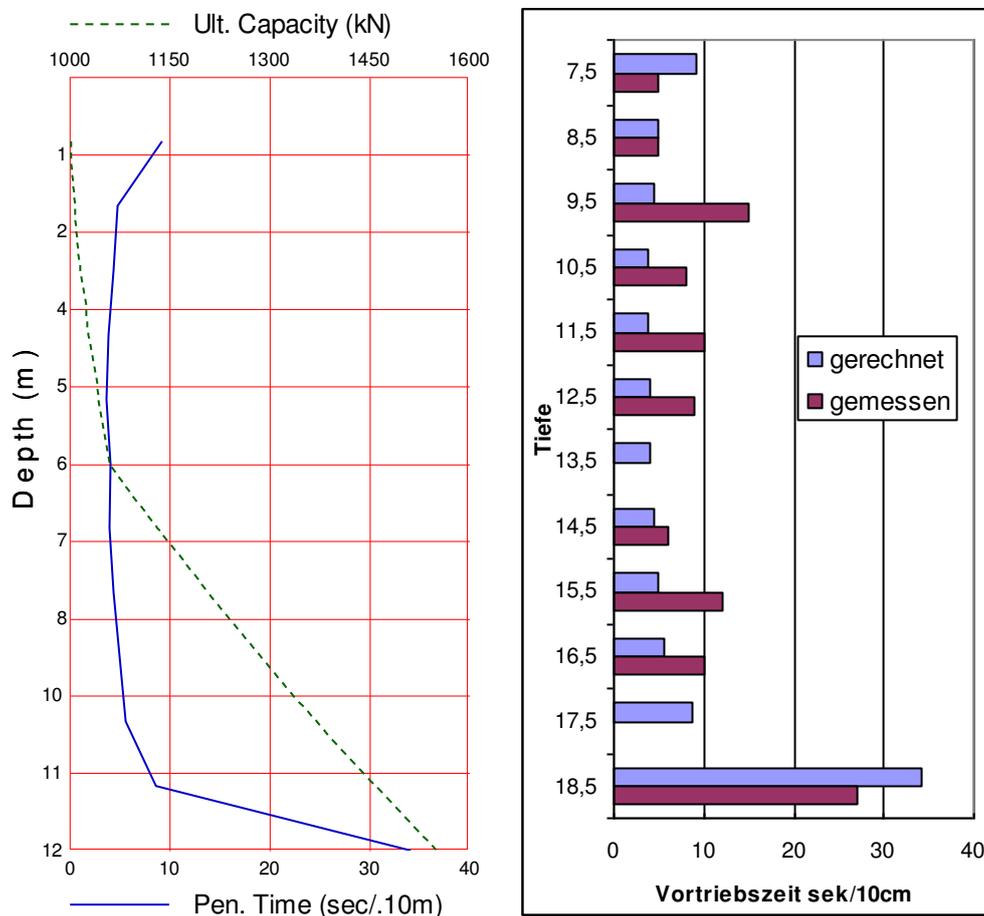


**Bild 12:** Dynamische Pfahlprobelastungen nach dem Einrütteln  
Mantelreibungsverteilung aus CAPWAP-Berechnungen

Insofern kann in diesem Fall nicht erkannt werden, dass durch das Einbringen mit einem Rüttelgerät die Pfahltragfähigkeit geringer ist als beim Einbringen durch Schlagrammung. Die Unsicherheiten in der Bestimmung von Mantelreibung und Spitzendruck entsprechen den üblichen Problemen bei der Festlegung von Pfahltragfähigkeiten.

#### 4 BESTIMMUNG DER TRAGFÄHIGKEIT AUS DEM VIBRATIONSVORGANG

In Lammertz/Richwien 2006 und Rausche 2002 werden jeweils Ansätze zur Berechnung des statischen Anteils des Bodenwiderstandes durch eine empirische Beziehung entwickelt.



**Bild 13** : Simulation des Einrüttelns zur Bestimmung der Tragfähigkeit

In die empirischen Formeln geht neben den Leistungsdaten des Gerätes die Eindringgeschwindigkeit ein. Die Messungen zeigten, dass die tatsächlichen Kräfte und Bewegungen des Pfahls (Pfahlkraft, Verschiebung, Energie) von den theoretischen Werten abweichen. Es ist also notwendig, empirische Beiwerte einzuführen, durch

die diese Abweichungen ausgeglichen werden. Diese Beiwerte können nur zuverlässig bestimmt werden, wenn viele gleichartige Pfähle mit gleichartigen Vibrationsparametern zur Verfügung stehen.

Aufgrund der Erfahrungen bei dem vorgestellten Fall wird deswegen vorgeschlagen, durch ein Simulationsprogramm die Einwirkungen des Rammgeräts auf den Pfahl und die Rückwirkungen des Bodens zu erfassen und hierbei auch die tatsächlichen Betriebsdaten (z.B. tatsächliche Rüttelfrequenz, Masse der Zange o.ä) zu berücksichtigen (siehe Bild 13 links). Durch die Kalibrierung mit der gemessenen Vortriebsgeschwindigkeit ergibt sich dann eine beste Schätzung für den statischen Anteil des Bodenwiderstandes beim Rütteln (Bild 13 rechts). Bei einer solchen Kalibrierung können auch die gemessenen Größen, z.B. eingeleitete Kraft, eingeleitete Energie, Pfahlkopfbewegung, für das Vibrieren berechneter Bodenwiderstand nach Formel (1), zur Verbesserung der Modellbildung verwendet werden.

Für das geschilderte Beispiel wurde die Berechnung ausgeführt, so dass sich bei einer Vortriebsgeschwindigkeit von 3 mm/s (bzw. 300 sek/m) ein Bodenwiderstand von 1,5 MN ergibt, hiervon 1,3 MN Spitzendruck. Wird angesetzt, dass die Mantelreibung beim Rütteln auf 20% reduziert ist, kann eine statische Pfahltragfähigkeit von 2,3 MN bestimmt werden. Diese ist etwas geringer als der durch dynamische Pfahlprobebelastung für die Endtiefe bestimmte Wert und liegt damit auf der sicheren Seite, da noch kein Festwachsen eingerechnet ist.

## Literatur

Cudmani R.O., Huber G.

Development of a Vibro-Penetration Test (VPT) for in-situ investigation of cohesionless soils .

*Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction TRANSVIB 2002,*

Lammertz, P.

Tragfähigkeit von geramnten und vibrierten Stahlrohrpfählen,  
28.Baugrundtagung Leipzig 2004

Lammertz, P.; Richwien, W.,  
 Bearing capacity of open ended steel pipe piles vibrated in sand,  
 International Symposium Transvib 2006,

Rausche F.  
 Messungen und Berechnungen an vibrierten Pfählen,  
 Pfahlsymposium TU Braunschweig 1995

Rausche F.  
 Modeling of vibratory driving,  
*Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction TRANSVIB 2002,*

Viking, K.,  
 Vibro-driveability, a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils,  
 PhD thesis, Div. Of Soil and Rock Mechanics, Royal Inst. Of Technology, Stockholm,  
 Sweden. 2002

#### Autoren

<p>Dr.-Ing. O. Klingmüller,</p> <p>GSP          Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen          und dynamische Prüfmethoden mbH,          Käfertaler Str. 164,          68167 Mannheim          Tel.: +49 (0)621 33 13 61          Fax: +49 (0)621 33 42 52          e-mail: ok@gsp-mannheim.de          web: www.gsp-mannheim.de</p>	<p>Dr.-Ing. F. Rausche,</p> <p>PDI          Pile Dynamics Inc.,          4235, Renaissance Parkway          Cleveland, Ohio 44128 USA          Tel.: +1 216 831 6131          Fax: +1 216 831 0916          e-mail: info@pile.com          web: www.pile.com</p>
---	--