

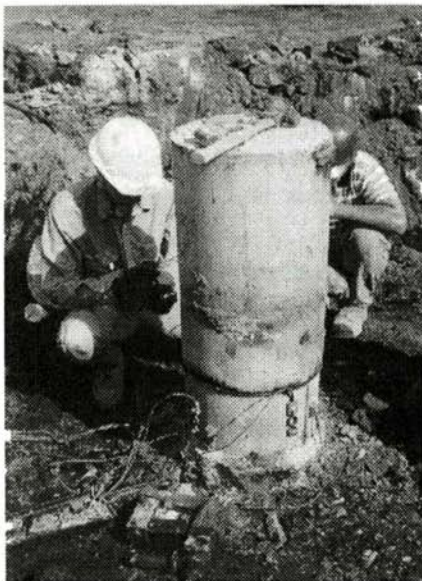
## VEREINFACHTE DYNAMISCHE PROBEBELASTUNGEN VON BOHRPFÄHLEN

Frank Rausche, Brent Robinson und Garland Likins

### 1 EINLEITUNG

Dynamische Probelastungen sind wegen ihrer schnellen und einfachen Anwendung zur Qualitätsüberwachung sowohl von Rammpfählen als auch von Bohrpfählen weltweit beliebt. Bei Rammpfählen ist der Testvorgang besonders einfach, da das Belastungsgerät - der Rammbar - vorhanden ist. Gemessen werden Dehnung und Beschleunigung unterhalb des Pfahlkopfes. Die Dehnung ergibt nach Multiplikation mit E-Modul und Querschnittsfläche die Pfahlkopfkraft. Da bei vorgefertigten

Rammpfählen diese Pfahlparameter ziemlich genau bekannt sind und der E-Modul sich wenig über dem Querschnitt ändert, geben zwei Dehnungsgeber in den meisten Fällen gute Ergebnisse. Sie werden zusammen mit zwei Beschleunigungsgebern an gegenüberliegenden Pfahlseiten am Pfahl angeschraubt.



Bei Bohrpfählen ist der Aufwand etwas größer, weil ein Fallgewicht zur Baustelle geschafft werden, mit einem Kran vor dem Probeschlag angehoben werden und dann aus 30 cm bis 3 m Höhe fallengelassen werden muß.

Bild 1: Vorbereitungen am Bohrpfahl

Die erforderlichen Messungen, Beschleunigung und Dehnung, werden

normalerweise ein bis zwei Pfahldurchmesser unterhalb des Pfahlkopfes vorgenommen werden. Da Bohrpfähle ohne bleibendes Schutzrohr oft unbestimmte Querschnitts-flächen und Materialgrößen haben, ist es am besten, einen Sockel guter Betonqualität, mit einer Länge von ein- bis zweimal Pfahldurchmesser, in einem dünnwandigen Stahlschalungsrohr auf dem Pfahlkopf aufzubetonieren. Nach Entfernung des Stahlrohrs im Geberbereich, werden die Geber am Sockelbeton mit Hilfe von Dübeln angeschraubt. Wegen der möglichen Unterschiedlichkeit der Betonqualität über dem Pfahlquerschnitt werden zur Steigerung der Genauigkeit der gemessenen Pfahlkopfkraft häufig vier Dehnungsgeber am Pfahlkopf eingesetzt (Bild 1). Das Stahlrohr dient auch als eine wirksame äussere Bewehrung, die ein Abplatzen des Betons im Aufschlagbereich verhindert.

In einer jüngsten Weiterentwicklung konnten Belastungs- und Meßsystem kombiniert, vereinfacht und verbessert werden. In diesem neuen System wird die Pfahlbewegung immer noch am Pfahlkopf, die Pfahlkopfkraft dagegen als Bärverzögerung gemessen und dann mit der Bärmasse multipliziert. Dieser Vorgang ist wesentlich einfacher und auch genauer als die Dehnungsmessung am Pfahl. Im folgenden wird beschrieben, wie die dynamischen Pfahlprüfungen an Bohrpfählen heute und in der Zukunft durchgeführt werden.

## **2 ALLGEMEINES**

Seit 1970 werden dynamische Probelastungen regelmäßig in vielen Ländern und auf hunderten Baustellen jährlich als Qualitätskontrolle von vorgefertigten Rammpfählen angewendet. Seit dem Ende der 70er Jahre wurden auch zunehmend mehr Ortbetonrammpfähle und Bohrpfähle mit dieser Methode auf Tagfähigkeit geprüft und mit statischen Versuchen verglichen. Besonders umfangreiche Vergleichsergebnisse und Erfahrungen mit dynamischen Probelastungen an Bohrpfählen lieferte eine Versuchsreihe, die in Australien in 1982 an 12 Pfählen mit etwa 60 m Länge und 1,5 m Durchmesser durchgeführt wurde (Seidel und Rausche, 1984). Nachdem die Vergleichstest eine gute Übereinstimmung der statisch und dynamisch ermittelnden Pfahltragfähigkeiten

ergeben hatten wurden noch ca. 100 weitere Pfähle auf dieser Baustelle dynamisch getestet. Weitere Vergleiche von statischen und dynamischen Probelastungen wurden unter anderem von Seitz, 1984; Hussein et al., 1992; Wienholz und Huch, 1997; Schau und Weigel, 1997 veröffentlicht. Die Literatur enthält noch zahlreiche andere Beispiele solcher Vergleichsversuche. Eine ausführliche Beschreibung der Grundlagen des Verfahrens kann man im Kapitel Grundbau des Beton-Kalenders 1998 finden. Die Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen der DGGT (1998) geben über die richtige Ausführung dynamischer Probelastungen weitere Auskunft.

### **3 DURCHFÜHRUNG DER DYNAMISCHEN PROBEBELASTUNGEN**

Für dynamische Probelastungen von Rammpfählen steht der Belastungsapparat, d. h. der Rammbar, bereits zur Verfügung. Bei Bohrpfählen muß ein Fallgewicht zur Baustelle gebracht werden, dessen Gewicht,  $G$ , entsprechend der nachzuweisenden Pfahltragfähigkeit,  $Q$ , gewählt werden muß. Die folgenden Erfahrungswerte geben i. a. zufriedenstellende Ergebnisse:

$G/Q = 1\%$  für Pfähle, die im harten bindigen Boden oder Fels einbinden

$G/Q = 1,5\%$  für Mantelreibungspfähle

$G/Q = 2\%$  für Bohrpfähle mit Spitzendruck in rolligen Böden.

Hussein et al. (1996) hat diese Thema ausführlich behandelt und zeigt dabei, wie mit Hilfe der Wellengleichungsberechnung die Wahl von Fallgewicht und Futterstärke auf die Pfahl- und Bodenverhältnisse abgestimmt werden kann.

Die wichtigste Voraussetzung für gute Ergebnisse sind genaue Messungen. Beschleunigungsmessungen sind i. a. problemlos, da sie unabhängig von der Qualität des Pfahlmaterials an der Befestigungsstelle des Beschleunigungsgebers sind. Theoretische Untersuchungen und praktische Erfahrungen haben auch gezeigt, daß selbst ein einzelner Beschleunigungsgeber, seitlich am Pfahl angebracht, die Bewegung der Pfahlachse genügend genau mißt. Auch die

Entfernung des Beschleunigungsgebers von Oberkante Pfahlkopf kann beliebig klein gewählt werden.

Bei der Dehnungsmessung am Pfahl, über die die Pfahlkopfkraft ermittelt wird, muß aber sorgfältiger vorgegangen werden. Dehnungsmeßwerte reagieren empfindlich auf Unebenheiten der Aufschlagsfläche, wenn die Geber zu nahe am Pfahlkopf angebracht werden. Sie müssen auch an einwandfreiem Pfahlbeton angebracht werden, da Verunreinigungen des Betons ein weicheres Material und dadurch lokal größere Dehnungen verursachen können. Für gute Dehnungsmessungen wird deshalb oft ein zusätzlicher Sockel am Pfahlkopf aufbetoniert. Der Sockel sollte zwei Pfahldurchmesser lang sein. Bewehrung braucht nicht im Sockel eingebaut zu werden, wenn als bleibende Betonschalung ein dünnwandiges Stahlrohr verwendet wird, das während der Probelastung die horizontalen Querkzugsspannungen am Pfahlkopf aufnimmt. Zur Anbringung der Geber werden dann Fenster in das Rohr geschnitten oder ein unterer Ring, etwa 200 mm breit, des Schalungsrohres wird entfernt, wodurch eine ebene Betonoberfläche mit guten Betoneigenschaften zur Anbringung der Geber freigelegt wird. Der aufbetonierte Sockel kann auch sehr leicht mit einer ebenen und horizontalen Pfahlkopfoberfläche, für eine einwandfreie Übertragung der dynamischen Belastung in den Pfahl, hergestellt werden.

Für die dynamische Probelastung muß der Beton die entsprechende Festigkeit erreicht haben. Außerdem sollte beachtet werden, daß je nach Einbauart der Pfähle die Bodenschicht am Pfahlmantel gestört ist und nur langsam ihre langzeitliche Festigkeit zurückgewinnt. Die Probelastung sollte daher frühestens eine Woche nach dem Betonieren durchgeführt werden.

Nachdem die Geber am Pfahl angebracht sind, wird oft ein Sperrholzfutter auf den Pfahlkopf gelegt und darauf eine lastverteilende Stahlplatte. Zur eigentlichen Probelastung läßt man dann das Fallgewicht einige Male mit zunehmenden Fallhöhen auf die Stahlplatte fallen, bis so viel Energie in den Pfahl übertragen wird, daß entweder die erforderliche Tragfähigkeit oder die Grenztragkraft des Pfahles

kurzfristig aktiviert wird. Noch während des Schlages rechnet der Pile Driving Analyzer® (PDA) die dynamischen Spannungen am Pfahlkopf und entlang des Pfahles aus, sodaß der Testingenieur sofort entscheiden kann, ob die Prüfung schadlos weitergeführt werden kann. Wenn notwendig, d.h. wenn die dynamischen Spannungen die zulässigen Werte überschreiten, sollte dann entweder zusätzliches Rammfutter zwischen Pfahl und Fallgewicht eingebaut oder die Fallhöhe verringert werden. Der PDA rechnet auch nach der vereinfachten Case Methode die Tragfähigkeit aus, damit der Testingenieur beurteilen kann, wann die Probelastung abgebrochen werden kann. Für die PDA-Berechnungen braucht man den dynamischen E-Modul des Pfahlmaterials, dessen Größe von der Qualität der Betonzuschläge und der Betonfestigkeit abhängt. Häufig ist der E-Modul von vergleichbaren Baustellen her bekannt; im übrigen kann er in erster Näherung mit 35 GPa angenommen werden. Während der dynamischen Probelastung kann der E-Modul durch die im Pfahl dynamisch gemessene Wellengeschwindigkeit überprüft und, wenn notwendig, korrigiert werden.

Wie bei allen schnellen Pfahl- oder Materialprüfungen, ist die maximale Belastung nicht mit der Tragfähigkeit identisch. Beim Pfahltest kommt hinzu, daß die dynamische Pfahlkopfkraft nicht nur vom Bodenwiderstand, sondern auch von der Aufschlagsgeschwindigkeit des Fallgewichts und von den elastischen Eigenschaften des Pfahles abhängt. Deshalb muß bei dynamischen Pfahlprobelastungen der statische Bodenwiderstand von den Messungen berechnet werden. Das geschieht auf der Baustelle mit der einfachen Case Formel im PDA wird danach aber mit CAPWAP® (Case Pile Wave Analysis Program) genauer nachgerechnet. Dieses Programm führt eine Systemidentifikation durch Angleichen von gerechneten und gemessenen Pfahlkopfgrößen durch. Es ist auf der Wellengleichung aufgebaut und berücksichtigt daher die Pfahlelastizität und –träglichkeit. Ebenso wichtig ist aber, daß das Programm in der Lage ist, erstens die dynamischen Anteile des Bodenwiderstands von den statischen trennen zu können, zweitens, die Mantelreibung vom Spitzendruck zu unterscheiden und drittens, mit diesen Ergebnissen eine Lastsetzungslinie zu berechnen. Dieses simulierte Ergebnis kann



dann mit der Lastsetzungslinie einer statischen Probelastung verglichen werden. Natürlich können keine Kriech- oder Konsolidierungssetzungen mit dem dynamischen Test ermittelt werden. Außerdem ist es besonders bei Pfählen mit großen Durchmessern durchaus möglich, daß mit größeren Pfahleindringungen auch noch höhere Tragfähigkeiten aktiviert werden als beim dynamischen Versuch.

#### **4 VERBESSERUNGEN MIT NEWTON**

Das schon recht einfache Pfahltestverfahren kann noch weiter vereinfacht, verbilligt und verbessert werden, wenn das Aufbetonieren des Betonsockels vermieden und die Pfahlkraft unabhängig von den Betonmaterialeigenschaften bestimmt werden kann. Eine Möglichkeit der Verbesserung wäre natürlich, eine Kraftmeßdose zwischen Fallgewicht und Pfahl einzubauen, um die Kraft direkt zu messen. Das wäre aber unpraktisch, weil für die zu erwartenden dynamischen Belastungskräfte, die oft mehr als  $2Q$  erreichen, relativ schwere und große Meßdosen erforderlich wären, und weil es nötig wäre für verschiedene Pfahlgrößen und -belastungen verschiedene Meßdosen bereitzustellen.

Glücklicherweise hat aber im Jahre 1666 Sir Isaac Newton gelernt, daß es weh tut, wenn einem ein harter Apfel auf den Kopf fällt. Er hat gefolgert, daß es dem Apfel ebenso weh tut, und daß  $actio$  gleich  $reactio$  ist. Deshalb kann man also die Kraft sowohl am Apfel wie am Kopf messen. Weiterhin hat der geniale Newton festgestellt, daß Kraft gleich Masse mal Beschleunigung ist. Die schwierige Kraftmessung am Kopf kann daher auf eine einfache Beschleunigungsmessung am Apfel reduziert werden. (Dabei ist am Rand zu vermerken, daß Beschleunigungsgeber eigentlich eine Kraft messen, die proportional zur Beschleunigung ist).

Das Newton Konzept vereinfacht den Testvorgang wesentlich. Im einmassigen System, das nur aus Bär, Futter und Pfahl besteht, wird während des Aufschlages die Verzögerung des Fallgewichtes gemessen. Multiplikation mit der Bärmasse ergibt dann die Pfahlkopfkraft (Bild 2). Beim Newtontest verwendet man am besten

ein Fallgewicht mit großer Aufschlagsfläche, die den sauber und eben abgezogenen Pfahlkopf gleichmäßig belastet. Dadurch kann die dynamische Aufschlagskraft ohne eine lastverteilende Platte auf dem Futter schadlos auf den Pfahl übertragen werden. Die Newtonkraft,  $F_N$ , d.h. die auf dem Pfahlkopf direkt angreifende Kraft, kann von der Bärbeschleunigung,  $a_H$ , und der Bärmasse,  $M_R$ , berechnet werden:

$$F_N = M_R a_H \quad (1)$$

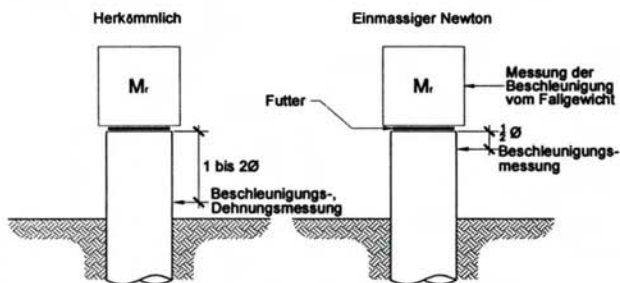


Bild 2: Messungen im herkömmlichen und einmassigen Newton System

Die Beschleunigung,  $a_p$ , die zur Pfahlkopfgeschwindigkeit  $v_p$  integriert wird, muß aber in jedem Fall am Pfahlkopf gemessen werden, da die Geschwindigkeiten von Fallgewicht und Pfahlkopf verschieden sind. Die Beschleunigungsgeber können und sollen aber viel näher am Pfahlkopf angebracht werden als im herkömmlichen System, damit die Phasenverschiebung zwischen Kraft und Geschwindigkeitsmessung so klein wie möglich ist.

Beim etwas komplizierteren zweimassigen Newton-System gibt es eine lastverteilende Platte, mit Masse  $M_H$ , zwischen Fallgewicht und Pfahlkopf. Die Beschleunigung,  $a_H$ , dieser Platte muß auch gemessen werden, damit ihre Trägheitskraft von der des Fallgewichts abgezogen werden kann.

$$F_N = M_R a_R - M_H a_H \quad (2)$$

Bei der Meßauswertung stellt man i.a. fest, daß die vom Aufschlag im Fallgewicht erzeugten Stoßwellen eine hochfrequenzige Bewegungskomponente erzeugen, die im Pfahl nicht auftreten. Je länger das Fallgewicht ist, desto niedriger sind diese Frequenzen. Eine digitale Filterung kann die berechnete Kraftkurve ohne weiteres

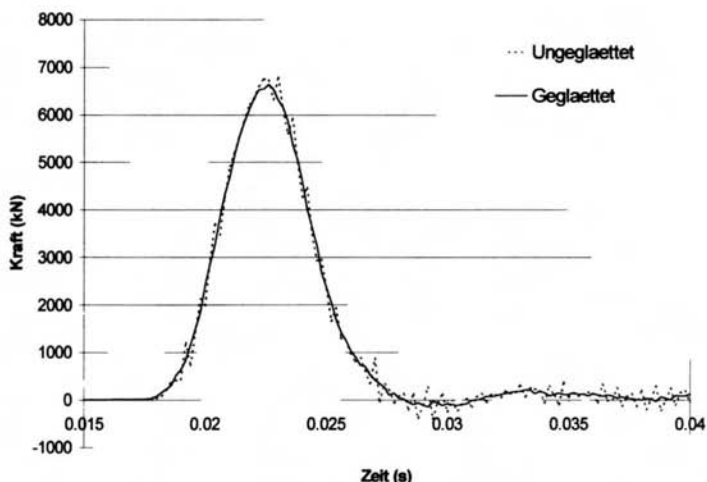


Bild 3: Pfahlkopfkraft von Beschleunigungsmessung am Fallgewicht (Amherst, S4, BN2)

glätten, solange die Bärlänge,  $L_R$ , so klein ist, daß die Bärfrequenz,  $f_R$ , wenigstens zwei mal größer ist als die Frequenz wesentlicher Pfahlkraftanteile. Wenn man die höchsten wichtigen Frequenzen im Bohrpfahl mit 500 Hz annimmt, wird mit einer Wellengeschwindigkeit im Bär,  $c_R$ , von ca. 5000 m/s, die maximale Bärlänge, die eine einwandfreie Glättung zuläßt:

$$\max L_R = \frac{1}{2} c_R / 2 f_R = \frac{1}{2} 5000 / [(2)(500)] = 2,5 \text{ m} \quad (3)$$

Bild 3 zeigt für einen Bohrpfahl von 1 m Durchmesser und für ein Fallgewicht mit  $L_R = 1.2 \text{ m}$  Länge (s. Beispiel 2) die ungeglättete Messung und die gefilterte Kraftkurve.



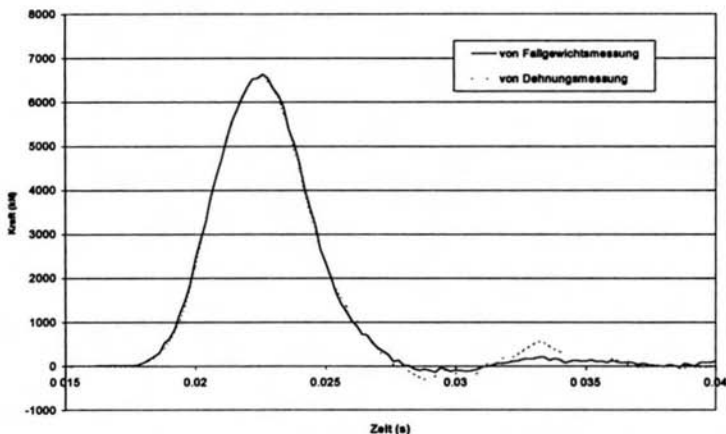


Bild 4 Kraftkurven von Beschleunigung am Fallgewicht und Dehnung 0,7 m unter Pfahlkopf (Amherst, S4, BN2)

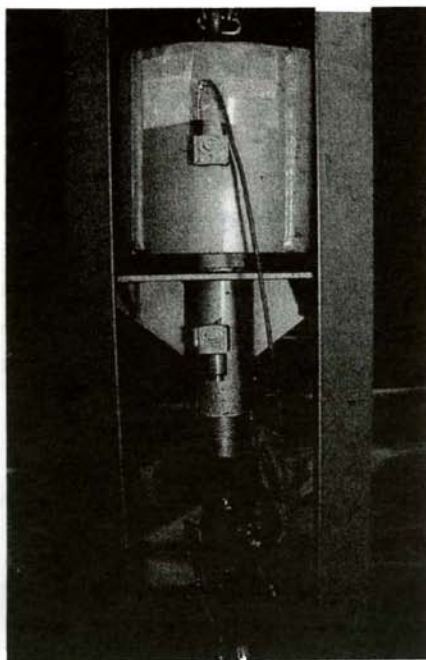
Ein offensichtlicher Unterschied zwischen der Kraftmessung am Pfahl und am Fallgewicht ist deren vertikale Distanz, und die damit zusammenhängende Zeitverschiebung der Kraftmessungen. Da die Dehnungsgeber mit einer absoluten Mindestentfernung von einem Pfahldurchmesser unterhalb der Pfahloberfläche angebracht werden müssen, enthalten diese Messungen Spannungswellenanteile, die sich von denen am Pfahlkopf unterscheiden. Z. B. kann am Pfahlkopf selbst nur eine Druckkraft entstehen, während am Dehnungsmeßpunkt auch kurzfristig Zugkräfte auftreten können. Bild 4 zeigt für den Pfahl von Beispiel 2 die Ergebnisse von Messungen, die mit zwei verschiedenen PDA-Geräten am Fallgewicht und Pfahl gemessen wurden.

## 5 BEISPIELE

### 5.1 Modelpfahl

Das erste Beispiel ist ein SPT Stahlrohr mit 28 mm Durchmesser und 4,9 m Länge, das zur Überprüfung der Genauigkeit des neuen Meßsystems sowohl als einmassiges als auch zweimassiges System ausgebildet wurde. Die Massen von Bär und Schlaghaube waren 49 und 3,2 kg. Die Genauigkeit des neuen Verfahrens

wurde mit verschiedenen Fallhöhen und Futterstärken untersucht. Bild 5 zeigt Versuchseinrichtung und Geber, während im Bild 6 die verschiedenen Kraftkomponenten der zweimassigen Messung als Funktion der Zeit und zum Vergleich damit die traditionelle Messung am Pfahlkopf dargestellt sind. Zur genauen Übereinstimmung zwischen Newtonkraft und der am Pfahl gemessenen Pfahlkopfkraft wurde als Korrektur auch die Trägheit der Masse des Pfahles zwischen Pfahlkopf und Dehnungsgeber von der Trägheitskraft des Fallgewichtes abgezogen. Bild 6 zeigt auch die Pfahlkopfgeschwindigkeit nach Multiplikation mit der Pfahlimpedanz ( $E$ -Modul mal Querschnittsfläche geteilt durch Wellengeschwindigkeit). Die Proportionalität zwischen Kraft und Geschwindigkeit zur Zeit des Aufschlages des Fallgewichtes kann auf die Wellengleichung zurückgeführt und zur Überprüfung der Messungen verwendet werden.



## 5.2 Amherst Pfähle

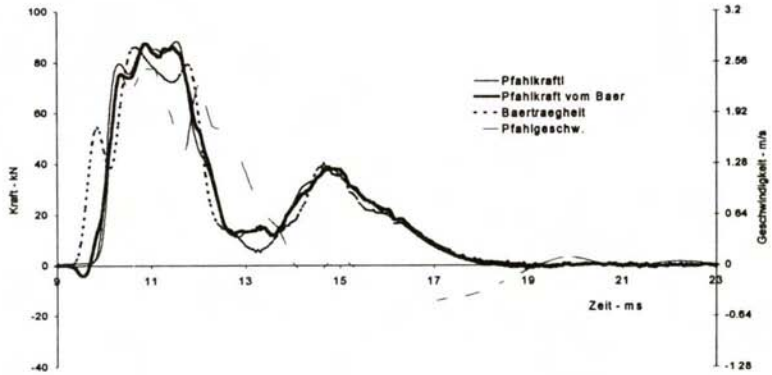


Bild 6: Vergleich von Pfähkopfkraftkurven, direkt und am Baer gemessen

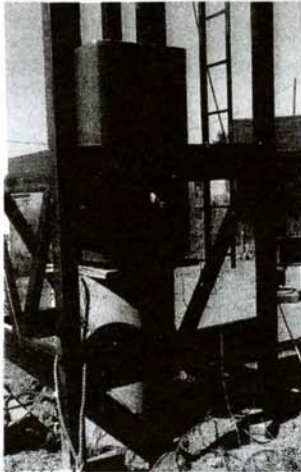


Bild 7: Amherst Bohrpfählestest mit instrumentiertem Newton

Das zweite Beispiel ist eine Versuchsreihe, die auf einer der National Geotechnical Experimentation Sites in Amherst, Massachusetts durchgeführt wurde. Die amerikanische Bundestrassenverwaltung (FHWA) hat mehrere solcher Versuchsfelder in verschiedenen Teilen der USA eingerichtet. Hier werden neue

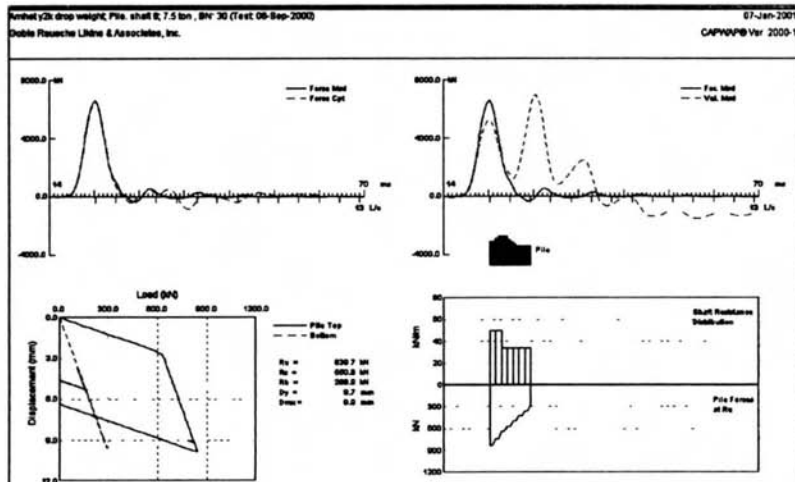


Bild 8: CAPWAP Ergebnisse von Amherst

Bau- und Testmethoden unter verschiedenen geologischen Bedingungen vorgeführt und auf ihre Tauglichkeit hin geprüft.

Drei Bohrpfähle, Länge  $L = 14,5 \text{ m}$ , Durchmesser  $1000 \text{ mm}$  in den oberen  $6 \text{ m}$  und  $900 \text{ mm}$  im unteren Bereich wurden mit je drei Schlägen des  $60 \text{ kN}$  schweren Newton getestet (Bild 7). Der Bär wurde mit Hilfe einer hydraulischen Schere frei auf ein  $35 \text{ mm}$  starkes Sperrholzfutter (ohne lastverteilende Platte) mit Fallhöhen zwischen  $250 \text{ mm}$  und  $1,15 \text{ m}$  fallengelassen. Die Belastungseinrichtung erlaubte es, das Fallgewicht und seine Führung mit einem relativ kleinen, hydraulischen Autokran aufzubauen, den Bär anzuheben, das Bärgewicht auf den Führungsrahmen abzusetzen und dann eine Seilschleife hydraulisch abzuschneiden. Das Entladen des Lastwagens, der Aufbau und das Umsetzen der Belastungsvorrichtung auf drei Pfähle, die dynamische Probebelastung von drei Pfählen, Abbau und Wiederbeladen des Lastwagens dauerte weniger als 7 Stunden. Zur Überprüfung der neuen Methode wurden die Messungen sowohl am Newton als auch am Pfahl nach herkömmlicher Weise vorgenommen. Bild 4 zeigt im Vergleich

die am Pfahl und am Bär gemessenen Pfahlkräfte. Maximale Pfahlkopfkräfte erreichten mit der höchsten Fallhöhe nahezu 10 MN was einer Pfahldruckspannung von ca. 15 MPa entspricht. Die in die Pfähle übertragenen Energien schwankten zwischen 20 und 40% des Produktes Fallgewicht mal Fallhöhe. Dabei wurden die höheren Wirkungsgrade beim dritten Schlag erzielt, bei dem das Sperrholzfutter sich schon am Pfahlkopf angepaßt hatte.

Der Boden in Amherst bestand hauptsächlich aus weichen, tonigen Seeablagerungen (Varved Clay) unter einer 4,5 m starken, überkonsolidierten Schluff- und Tonschicht. Die von CAPWAP berechneten Tragfähigkeiten lagen zwischen 850 und 1160 kN. Ein Beispiel der CAPWAP Ergebnisse zeigt Bild 8 (von oben rechts im Gegenuhrzeigersinn): die Kraft- und Geschwindigkeitsmessung, die gemessene und die angepaßten bzw. berechneten Kraftkurven, eine simulierte statische Last-Setzungslinie und die berechnete Verteilung der Mantelreibung des Verfahrens begrenzen.

### **5.3 Houston Pfähle**

Je drei Schraubenpfähle von 350, 400 und 450 mm Durchmesser mußten auf 3 verschiedenen Baustellen dynamisch getestet werden. Die Pfähle waren ungefähr 24 m lang mit gleicher Einbettung, sodaß die Pfahlköpfe zur Anbringung der Geber für die Standard-PDA Messung freigelegt werden mußten. Wie bei den Amherst Tests wurden Messungen sowohl am Newton (Pfahlgeschwindigkeitsmessung 350 mm unter Pfahloberkante) als auch am Pfahl (Geber 700 mm unter Pfahloberkante) vorgenommen. Bild 9 zeigt einen Vergleich der Kraft- und Geschwindigkeitskurven, (die Geschwindigkeitskurven unterscheiden sich kaum), die am Newton und am Pfahl mit zwei verschiedenen PDA's gemessen wurden. Die im Vergleich mit der Geschwindigkeit hohe Pfahlkopfkraft, i.a. proportional zur Zeit des Aufschlags, kam durch einen vergrößerten Pfahlquerschnitt unter dem Pfahlkopf zustande.

Dynamische Probelastungen an Bohrpfählen werden in vielen Ländern mit gutem Erfolg durchgeführt. Belastungssysteme mit bis zu 40 Mg Masse werden dabei

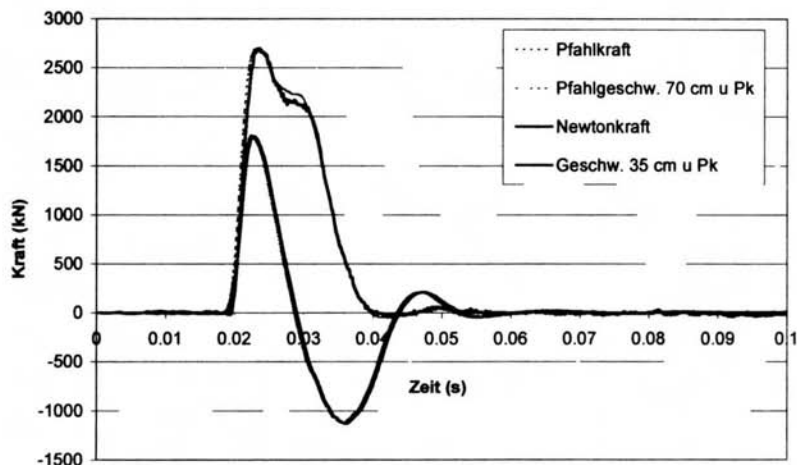


Bild 9: Kraft - und Geschwindigkeitskurven von Newton und von PDA Messungen am Pfahl (Houston, P14, BN3)

eingesetzt. Pfahlkopfkraft und -beschleunigung werden i.a. ein bis zwei Pfahldurchmesser unter dem Pfahlkopf vorgenommen. Das bedeutet, daß zur Verbesserung der Meßgenauigkeit einige Vorarbeiten, einschließlich einer Pfahlverlängerung des Pfahles, geleistet werden müssen, die die Wirtschaftlichkeit

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit der dynamischen Probelastungen von Bohrpfählen können aber noch weiter gesteigert werden, wenn die Messung der Pfahlkopfkraft am Fallgewicht und nicht am Pfahl vorgenommen wird. Am einfachsten und genauesten ist es mit dem einmassigen System zu arbeiten, obwohl eine Korrektur mit zusätzlichen Beschleunigungsmessungen am Schlagstück vorgenommen werden kann.

Erfahrungen mit diesem Verfahren sind ermutigend aber noch begrenzt. Z. Zt. werden noch Vergleichsmessungen und Verbesserungen am Rechenprogramm im



PDA gemacht. Es ist aber vorgesehen, die Methode bereits im Jahre 2001 routinemäßig anzuwenden.

## 7 LITERATUR

Beton-Kalender 1998, Grundbau, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen, 1998, Arbeitskreis 2.1 der DGGT, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Braunschweig

Hussein, M., Likins, G., und Rausche, F., 1996, Selection of a hammer for high strain dynamic testing of cast-in-place shafts, Fifth Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Orlando, FL.

Hussein, M., Townsend, F., Rausche, F., and Likins, G., 1992, Dynamic testing of drilled shafts, Transportation Research Record 1336, National Research Council, Washington, DC.

Schau, D., und Weigel, A., 1997, Korrelationsstudie der Probelastungen mit Hilfe der statischen und dynamischen Meßmethode unter Berücksichtigung unterschiedlicher Analysemethoden und Parameter, Pfahlsymposium, Technische Universität Braunschweig.

Seidel, J. und Rausche, F., 1984, Correlation of static and dynamic pile tests on large diameter drilled shafts, Third Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, p. 313

Seitz, J.M., 1984, Correlation of static and dynamic pile tests on large diameter drilled shafts, Third Int. Conf. on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, p. 201

Wienholz, B., und Huch, T., 1997, Tragfähigkeitsbestimmungen an Ortbetonpfählen; Vergleich von statischen und dynamischen Probelastungen, Pfahlsymposium, Technische Universität Braunschweig.