

# MESSUNGEN UND BERECHNUNGEN AN VIBRIERTEN PFÄHLEN

Dr. Frank Rausche

## 1 EINLEITUNG

Pfähle und Spundbohlen können mit Hilfe von Vibrobären entweder äußerst wirtschaftlich oder überhaupt nicht gerammt werden. Unter günstigen Bodenbedingungen kann der Vibrobär einen Pfahl leicht zehn mal schneller rammen als ein Diesel- oder Druckluftbär. Deshalb sind die Pfahlunternehmer natürlich daran interessiert auf Grund von Bodenaufschlüssen die Vibrorammbarkeit von Pfählen vorraussagen zu können. Darüber hinaus ist es auch wichtig von Messungen oder Beobachtungen während des Eindringens auf die Tragkraft eines Pfahles schließen zu können. Gegenwärtig wird oft verlangt, daß normal belastete Pfähle, die mit dem Vibrobär eingebracht werden, entweder statisch oder, mit Hilfe eines Schlagrammbärs, dynamisch probebelastet werden. Dadurch wird aber die Wirtschaftlichkeit der Vibrorammung stark eingeschränkt. Gelänge es, die Grenzlast des Pfahles von Kraft- oder Beschleunigungsmessungen während der Rammung oder von der Eindringgeschwindigkeit zu berechnen, dann könnten belastbare Pfähle wesentlich wirtschaftlicher hergestellt werden.

Im folgenden werden zwei Verfahren beschrieben, die zur Vorraussage der Vibrorammbarkeit und zur dynamischen Bestimmung der Tragkraft auf Grund von Messungen entwickelt wurden. Diese Verfahren beruhen auf dem Wellengleichungsverfahren und der Case Methode (RAUSCHE, 1974).

## 2 GRUNDLAGEN

### 2.1 Der Vibrobär

Die meisten Vibrobäre arbeiten mit niedrigen oder mittleren Frequenzen, d. h. bis ungefähr 25 Hz. Darüber hinaus spricht man von Hochfrequenz- oder Resonanzbäre. Bei 25 Hz müßte ein Pfahl ungefähr 100 m lang sein, damit Resonanz im Pfahl

auftreten könnte. Wenn Resonanz auftritt, dann wachsen die Kräfte in Pfahl und Bär gewaltig an, was leicht zu Schäden im Bärmechanismus führen kann. Allerdings können Resonanzbäre Pfähle unter schwierigsten Bedingungen sehr schnell rammen, z. B. im Permafrost.

Die meisten Vibrobäre bestehen aus einem oberen Schwingungsisolator, an dem Versorgungskabel bzw. -schläuche elastisch angebracht werden, und einem unteren Motorteil (Bild 1). Diese beiden Hauptteile sind über Federn und/oder Elastomere verbunden. Die entweder elektrischen oder hydraulischen Motoren im unteren Bärteil treiben die Unwuchten an, d. h. exzentrisch gelagerte Massen, die paarweise gegeneinander rotieren, so daß nur ihre vertikalen Fliehkräfte auf Pfahl oder Bohle einwirken können. Das Rammgut ist gewöhnlich mit Hilfe einer hydraulisch fernbedienbaren Zange am Motorteil des Vibrobärs befestigt.

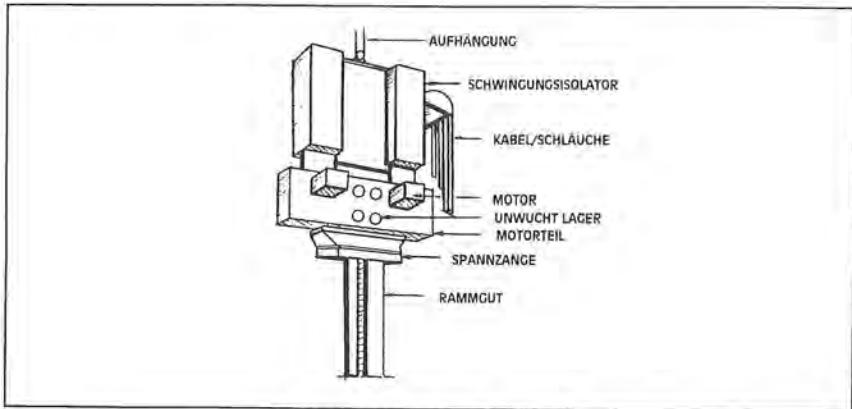


Bild 1: Skizze eines Vibrobärs

Hersteller der Vibrobäre geben oft die notwendige Rammleistung der Antriebsaggregate in kW an, zusammen mit der Masse der Unwuchten,  $m_e$ , und dem dazugehörigen Radius,  $r_e$ . Das Produkt von Masse und Radius ist das Schwungmoment oder das statische Moment. Schwungmoment und Rammfrequenz,  $\omega$ , bestimmen die Fliehkraft,  $F_v$ , die über die Motorteilmasse (und durch sie abgemindert) auf das Rammgut einwirkt.

$$F_v = m_e r_e \omega^2 \quad (1)$$

Ein weiterer Kennwert ist die maximale Amplitude,  $u_s$ , die der Bär unter günstigen Umständen erzeugen kann.

Zum Verständnis der Leistungsübertragung von Bär auf Rammgut hilft es sich vorzustellen, was in den Extremfällen Nullwiderstand und völlig starrer Bodenwiderstand eintritt. Im ersten Fall schwingt der Bär frei mit einer Amplitude die umso größer ist, je kleiner die Frequenz ist. Energieverbrauch tritt dann hauptsächlich durch die Verformung der Verbindungen zwischen Motorteil und Schwingungsisolator auf. Im Fall des starr gelagerten Pfahles kann der Motorteil überhaupt nicht schwingen, wodurch die Energieabgabe auf Null absinkt. Es muß also eine Bodenwiderstandsgröße geben, bei der die Leistungsabgabe einen Maximalwert erreicht.

## 2.2 Das Wellengleichungsverfahren

Dieses Verfahren wurde zur Untersuchung des Verhaltens eines Pfahles während der Kraftübertragung eines Rammbärs entwickelt. Im Grunde ist es ein Differenzenverfahren zur Lösung der eindimensionalen Wellengleichung. E.A.L. Smith (1960) entwickelte dieses Verfahren soweit, daß es nicht nur einen mathematischen Algorithmus darstellte, sondern auch eine wirklichkeitsgetreue Repräsentierung des Systems Bär-Pfahl-Boden. Dabei bediente er sich hauptsächlich der Modellelemente Massenpunkt, Feder und Dämpfer, die Kräfte durch Trägheit, Verformung und Geschwindigkeit hervorgerufen, mathematisch darstellen. Da dieses Verfahren schon so ausgereift ist, daß es sich auf tausenden von Baustellen weltweit bewähren konnte, bietet es sich an, dynamische Berechnungen von Vibrobämmungen mit Hilfe des Wellengleichungsprogrammes nach Smith durchzuführen.

Das GRLWEAP™ Programm entspricht den Empfehlungen von Smith; es wurde im letzten Jahr so weiterentwickelt, daß eine Vibroberechnung nun sehr leicht vorgenommen werden kann. Das Vibrobärmodell (Bild 2) besteht aus zwei Massen, die durch eine Feder und einen Dämpfer miteinander verbunden sind. Ein- oder mehrmassige Bäre würden entsprechend dargestellt. Die Kraft  $F_v$ , greift am Motorteil des Bärs an. Die dadurch entstehende Bewegung wird nach Newton berechnet. Die Bewegung des Bärs verursacht Kräfte in benachbarten Federn und Dämpfern.

Über Kraft und Bewegung kann die Leistungsabgabe errechnet und wenn nötig durch Reduzierung von  $F_v$  begrenzt werden. Eine Art von Wirkungsgrad,  $\eta$ , ( $0 < \eta \leq 1$ ) kann auch über eine Reduzierung von  $F_v$  berücksichtigt werden.

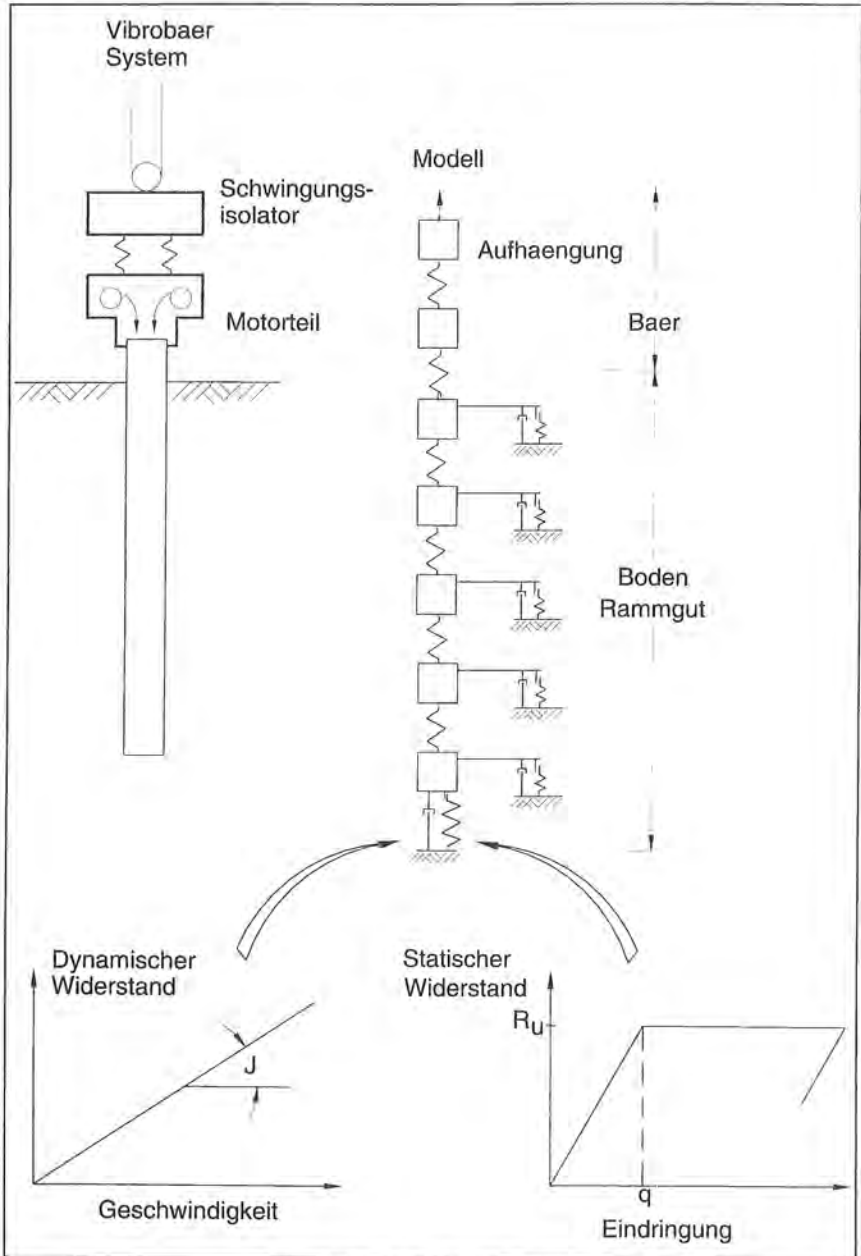


Bild 2: GRLWEAP Modell für Vibrobär

Der Pfahl ist normalerweise in 1 m lange Elemente unterteilt. Die Klemmvorrichtung (Zange) für die Rammgutbefestigung und das oberste Pfahlsegment sind starr mit dem Motorteil des Vibrobärs verbunden. An den einzelnen Pfahlsegmenten greifen die Bodenwiderstandskräfte,  $R_s$  und  $R_D$ , an.  $R_s$  berücksichtigt statische Kräfte im Boden, die von der Eindringung,  $u$ , des Rammguts in den Boden abhängen.

$$R_s = k_s u \quad (2)$$

mit

$$-R_U \leq R_s \leq R_U \quad (2a)$$

und

$$k_s = R_U / q \quad (2b)$$

Die Größen  $R_U$  und  $q$  sind Grenzwerte von statischem Bodenwiderstand und elastischer Bodenverformung. Die Summe aller an den einzelnen Elementen angreifenden  $R_U$ -Werte ist die Grenztragkraft des Pfahles,  $Q_U$ . Die untere Grenze in Gl. 2a ist besonders wichtig, da sie dazu beiträgt, während der nach oben gerichteten Bewegung von Bär und Pfahl, Energy im Boden zu speichern, die dann zum leichten Eindringen des Pfahles beiträgt.

$R_D$  repräsentiert den dynamischen, d.h. den von der Pfahlgeschwindigkeit abhängigen, Bodenwiderstand, der nach Smith wie folgt berechnet wird.

$$R_D = j R_s \dot{u} \quad (3)$$

wobei  $j$  ein Dämpfungsfaktor mit Dimension s/m ist. Anstelle der Variablen  $R_s$  kann auch die Konstante  $R_U$  in Gleichung 3 eingesetzt werden. Für Spundbohlen, die mit Vibrobäre gerammt werden, scheint das  $R_D$  Bodenmodell besonders gut geeignet zu sein, Schloßreibung zu berücksichtigen. Dieser Eindringwiderstand tritt nämlich nur dann auf, wenn benachbarte Spundbohlen eine Relativgeschwindigkeit haben.

Für den Berechnungsvorgang selbst gibt es zwei Möglichkeiten. Im ersten Vorgang werden für eine Anzahl von  $Q_U$ -Werten die Eindringungsdauer (in sec) und die Druck- und Zugmaximalspannungen im Rammgut berechnet. Dies führt zu einer sogenannten Traglastkennlinie (s. auch 3.2). Im zweiten Vorgang läßt das Programm für eine bestimmte Eindringungstiefe aus Mantelreibungs- und Spitzendruckwerten

das  $Q_U$  berechnen und daraus dann wieder die Eindringungsdauer und die Pfahlspannungen. Das Ergebnis ist dann das Rammbarkeitsdiagramm.

### 2.3 Die Case Methode

Messungen von Kraft,  $F(t)$ , und Beschleunigung,  $\ddot{u}(t)$ , am Pfahlkopf dienen beim Rammpfahl zur Berechnung der Pfahltragkraft nach der Case Formel, die die elastischen Verformungen des Pfahles während der sehr raschen Belastung berücksichtigt.

$$Q_U = \frac{1}{2}[F(t_1) + F(t_2)] + \frac{1}{2}Z[\dot{u}(t_1) - \dot{u}(t_2)] - j_c Z \dot{u}_{\text{res}}(t_{1,5}) \quad (4)$$

mit

$$v_{\text{res}}(t_{1,5}) = \frac{1}{2}[F(t_1) - F(t_2)] + \frac{1}{2}Z[\dot{u}(t_1) + \dot{u}(t_2)] \quad (4a)$$

$$Z = EA/c \quad (4b)$$

$$t_2 = t_1 + 2L/c \quad (4c)$$

$$t_{1,5} = t_1 + L/c \quad (4d)$$

wobei  $L$  die Pfahllänge,  $c$  die Wellengeschwindigkeit,  $Z$  die Pfahlimpedanz,  $E$  der E-Modul und  $A$  die Querschnittsfläche des Pfahles ist. Die Pfahlkopfgeschwindigkeit,  $\dot{u}(t)$ , wird aus der gemessenen Beschleunigung,  $\ddot{u}$ , durch Integration berechnet. Der zweite Teil auf der rechten Seite von Gl. 4 stellt einen Bodendämpfungsanteil dar; dabei muß im allgemeinen der dimensionslose Case-Dämpfungsfaktor,  $j_c$ , auf Grund der Bodenkorngrößen geschätzt werden.

Die Zeit  $t_1$  wird meistens dann so gewählt, daß die Pfahlkopfgeschwindigkeit unter dem Aufschlag des Bären einen Maximalwert erreicht. Für den Vibrobär muß  $t_1$  so gewählt werden, daß  $Q_U$  ein Maximum wird. Wegen der i. a. langsamen Belastung des Vibrobären ist es aber oft hinreichend genau, den Pfahl als starren Körper zu betrachten und den Bodenwiderstand als Summe von Pfahlkopfkraft und Pfahltragheit (auf Grund der Pfahlmasse,  $m_p$ ) zu berechnen.

$$Q_U = F(t) + m_p \ddot{u}(t) - j_c \ddot{u}(t) \quad (5)$$



Die gemessenen Pfahlkopfkräfte und -geschwindigkeiten können auch in ihre Fourieranteile zerlegt werden und dann im Frequenzbereich dargestellt werden. Dabei ist das Verhältnis Geschwindigkeit zu Kraft dann die Mobilität. Der Umkehrwert der Mobilität in der Nähe der Null-Frequenz kommt dabei die Bedeutung einer Pfahlsteifigkeit zu.

$$k_d = 2\pi f_0 F(f_0) / u(f_0) \quad (6)$$

wobei  $f_0$  ein niedriger Frequenzwert ist. Diese Methode wird häufig im sogenannten Transient Response Verfahren bei der Pfahlintegritätsprüfung angewendet (DAVIS und DUNN, 1974) hat aber auch für Vibropfähle ein Anwendungsfeld.

### 3 BEISPIELE

#### 3.1 Rohrpfähle

Das erste Beispiel wurde bereits in der Literatur (LIKINS et al., 1992) beschrieben. Es zeigte wie zwei große, offene Rohrpfähle (Durchmesser 1520 mm, Wandstärke 25 und 38 mm, Länge 44 m (40 m für den zweiten Pfahl)) zuerst mit einem Vibrobär (ICE 1412) und dann mit einem Schlagrammbär (Vulcan 060) auf eine Tiefe von insgesamt 26 m grammt wurde. Der Boden bestand in dem Bereich, in dem vibriert wurde, für Pfahl 1 aus 3 m tonigem Sand und dann 10,5 m weichem bis feinem Ton (es dauerte 4 Minuten, um den Pfahl auf 13 m Tiefe zu bringen). Pfahl 2 wurde erst durch 13,4 m lockeren bis mitteldichten Feinsand und dann 5,8 m in festen bis sehr steifen Ton vibriert. Diese 19,2 m Tiefe wurde mit dem Vibrobär in 9 Minuten erzielt. Kraft- und Beschleunigungsmessungen wurden während beider Rammungen vorgenommen. Die Vibrobeschleunigungsmessungen wurden über die Zeit integriert, was die Geschwindigkeit und Eindringung ergab. Beschleunigung und Kraft wurden auch nach Gl. 5 ausgewertet; dadurch ergab sich der Eindringungswiderstand, R, alle als Funktion der Zeit wie in Bild 3 dargestellt.

Der Vibrobär wurde mit einem 410 kW Aggregat betrieben; seine Maximalfrequenz ist 21 Hz und sein Schwungmoment 115,2 kg-m, was einer Fliehkraft von 2000 kN entspricht. Die Messungen zeigten aber, daß während der Rammung die Frequenz meistens bei 17 Hz lag. Die dazugehörige Fliehkraft ist 1300 kN; die gemessenen Maximalkräfte waren etwa 1200 kN. Aus Beschleunigungs- und Kraftmessungen wurde auch die in den Pfahl eingetragene Leistung mit maximal 138 (140) kW

ermittelt. Die Messungen, die unter den ersten Schlägen des Rammbärs gemacht wurden entsprachen, was den Bodenwiderstand anbelangt, den letzten Messungen unter dem Vibrobär. Diese ersten Schläge wurden mit Hilfe des CAPWAP® Verfahrens (Rausche, 1993) ausgewertet und ergaben eine statische Grenztragkraft von 2100 (2900) kN. Die mit Hilfe von Gl. 5 und  $j_c = 0$  ausgewerteten Vibromessungen ergaben einen maximalen  $Q_U$ -Wert von 1870 (2800) kN. Die gute Übereinstimmung zwischen Vibro- und Schlagrammessungen könnte als Beweis für die Anwendbarkeit von Gl. 5 dienen. Sie kann aber auch damit erklärt werden, daß die durch Vibrierung hervorgerufene Bodenwiderstandsverminderung den durch die Vernachlässigung der Bodendämpfung gemachten Fehler eliminierte.

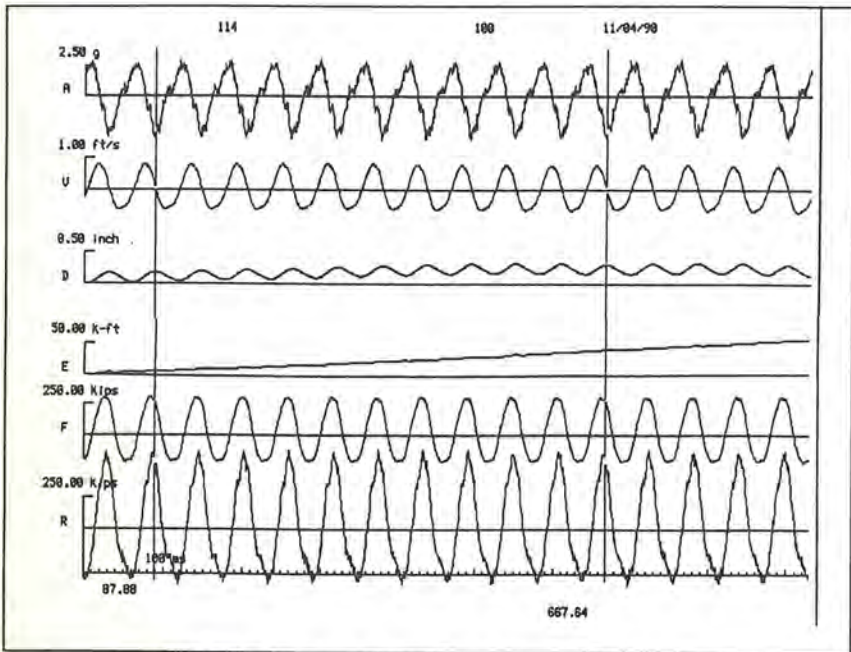


Bild 3: Meßergebnisse von Rohrpfahl mit ICE 1412 Bär

### 3.2 Spundbohlenrammung

Im Zuge des Neubaus eines Wehr- und Schleußenbauwerkes im Ohio River wurden beim Vibro- und Schlagrammen von Spundwänden für eine kreisförmige Fangedammzelle Messungen am Kopf einer PS31 Doppelbohle vorgenommen. Der Boden



bestand in diesem Bereich aus weichem oder mittelstifem Ton. Der Grund für diese Messungen war ein unerwartet großer Rammwiderstand, der wenigstens zum Teil auf eine hohe Reibung in den Schlössern zurückgeführt wurde. Daher wurden Messungen sowohl an freien als auch an in die Zelle eingefügten Bohlen vorgenommen. Nachdem der Rammfortschritt mit dem Vibrobär an einer Doppelbohle unwirtschaftlich wurde, wurden Rammung und Messung unter einem Schlagbär fortgesetzt.

Der Vibrobär war ein Modell ICE 815 mit 26.7 Hz Maximalfrequenz, 50,7 kg-m Schwungmoment (und damit 1420 kN maximaler Fliehkraft), 25 mm Amplitude und 375 kW Antriebsleistung. Die Messungen ergaben am Kopf der Doppelbohle bei einer Frequenz von 22.5 Hz (Fliehkraft 1013 kN) maximale Kräfte zwischen 700 und 790 kN oder eine Druckspannung von maximal 41 MPa (Bild 4). Die in die Doppelbohle übertragene Leistung lag dabei bei maximal 60 kW. Der nach Gl. 5 mit einem  $j_c = 0$  berechnete Bodenwiderstand betrug 740 kN bei einer Eindringungsdauer von 262 s/m. Die Nachrammung mit dem Schlagbär ergab nach CAPWAP (GRL, 1992) einen Bodenwiderstand von 890 kN, wovon ungefähr 50% am Mantel angegriffen. Der relativ hohe Spitzenwiderstand wurde als Schloßreibung interpretiert, die mit Hilfe einer relativ hohen Dämpfung berücksichtigt werden kann.

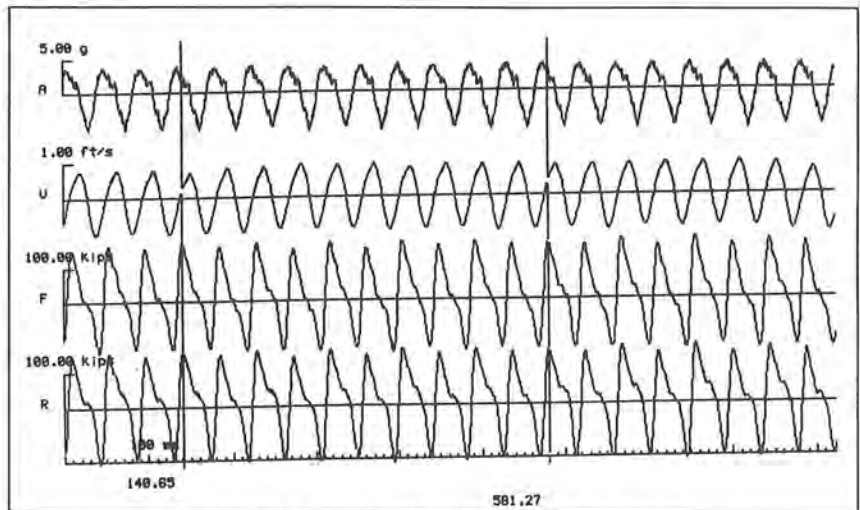


Bild 4: Meßergebnisse, Doppelbohle PS 31, ICE 815

Mit Hilfe von GRLWEAP wurde dieses Beispiel nachgerechnet. Die durch CAPWAP aus den Schlagbärmessungen gewonnenen Werte wurden dabei als Eingaben genommen. Bild 5 zeigt die dadurch berechnete Tragkraftkennlinie für den ICE 815.; die entsprechenden Werte sind aus Tabelle 1 ersichtlich. I. a. stimmen diese gerechneten Ergebnisse recht gut mit denen nach Case überein, wenn man die 700 und 800 kN Traglasten betrachtet. Dabei muß aber berücksichtigt werden, daß ein sogenannter Wirkungsgrad 0,9 verwendet wurde und daß für die Bodendämpfungsfaktoren ein Durchschnittswert mehrerer Messungen in GRLWEAP verwendet wurde. Am enttäuschendsten sind die Unterschiede zwischen den gerechneten und gemessenen Leistungswerten. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß die gemessenen Leistungswerte von Beschleunigungs- und Kraftmessungen durch Integration ermittelt wurden und daher mögliche Fehler durch fehlerhafte Integrationskonstanten enthalten.

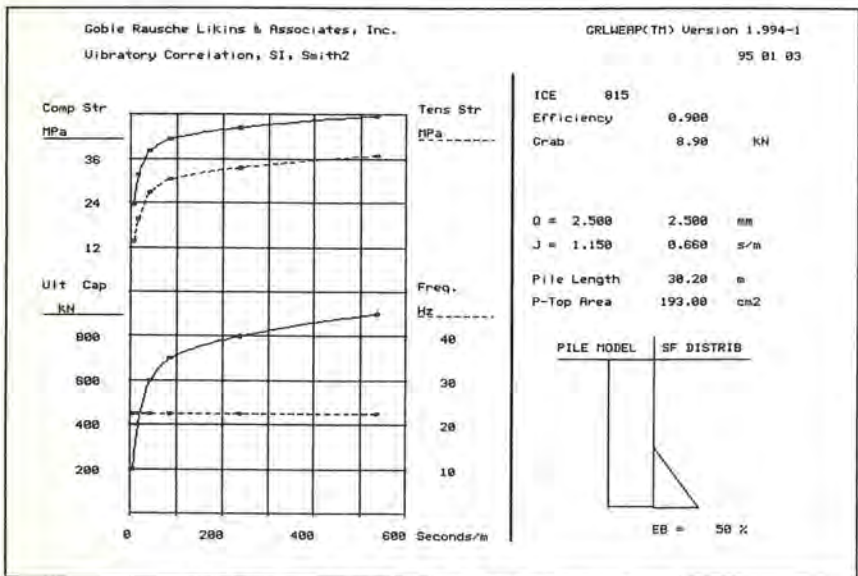


Bild 5: Tragkraftkennlinie fuer PS 31 und ICE 815

Traglast kN	Druck- spannung MPa	Zug- spannung MPa	Eindring- zeit s/m	Leistungs- übertragung kW
200	23.5	13.7	5.3	72
400	31.7	19.6	15.6	91
600	38.3	27.0	42.5	99
700	41.4	30.4	86.8	99
800	44.5	33.7	238.8	98
900	47.7	36.9	537.4	97
(720)	(41)	(34)	(262)	(<60)

#### 4 GRENZEN DER VERFAHREN

Das schwierigste Problem bei der Berechnung vom vibrierenden Pfahlrammen ist die Änderung des Bodenwiderstandes durch das Vibrieren. Es ist bekannt, dass bei dichten Böden Auflockerungen auftreten können und beim lockeren Boden Verdichtungen. Nach dem Rammen kommt es dann oft wieder zu einem "Anwachsen" des Bodens an den Pfahl oder zu einer Bodenentspannung. Inwieweit diese Bodenwiderstandsveränderungen die Eindringgeschwindigkeit und Tragkraftentwicklung und -berechnung beeinflussen, darüber kann mit Sicherheit noch nichts ausgesagt werden.

Ein weiteres Problem besteht bei der Ermittlung der Schloßreibung. Durch Messungen mit einem Schlagbär kann man relativ leicht feststellen, wo die Reibungswiderstände an der Bohle angreifen. Beim Vibrobär ist das wesentlich schwieriger oder unmöglich. Für die GRLWEAP Berechnung müssen noch Empfehlungen zur Berücksichtigung der Schloßreibung entwickelt werden.

Wegen der Veränderung des Bodenwiderstandes und der Schloßreibung müssen die hier beschriebenen Verfahren noch mit Vorsicht angewendet werden.

Die Berechnung der Leistungsübertragung von Bär auf Pfahl ist möglicherweise mit Fehlern behaftet. Dieses Problem kann aber leicht mit erhöhter Meßgenauigkeit und verbesserten Rechenverfahren vermieden werden.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Case und Wellengleichungsmethoden, die ursprünglich für Schlagbäre entwickelt worden waren, wurden den Bedingungen des Vibrobärs angepaßt. Die Case Formel, auf Kraft- und Beschleunigungsmessungen des Vibrorammvorgangs angewendet, ergab befriedigende Traglastergebnisse, wie Vergleiche mit Ergebnissen von Schlagrammungen und CAPWAP zeigten.

Eine vernünftige Vorrassage der Vibrorammbarkeit mit dem GRLWEAP Programm scheint durchaus möglich zu sein.

Weitere Untersuchungen, die die dynamischen Bodenkonstanten für den Vibropfahl festlegen, müssen noch vorgenommen werden. Ebenso müssen noch die Probleme gelöst werden, die durch ungewöhnlich hohe Schloßreibung auftreten können.

## 6 LITERATUR

DAVIS, A.G. and DUNN, C.S.: From theory to field experience with the non-destructive vibration testing of piles. Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 57, pp. 571-593, 1974.

GRL, Goble Rausche Likins and Associates, Inc.: CAPWAP Description, 4535 Emery Industrial Parkway, Cleveland, OH 44128, USA, 1992.

LIKINS, G., RAUSCHE, F., MORRISON, M. and RAINES, R.: Evaluation of measurements for vibratory hammers. Application of Stress-Wave Theory to Piles, F.B.J. Barends (ed), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 54 10 082 6, 1992.

RAUSCHE, F.: Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen. Baugrundtagun, Frankfurt-Höchst, 1974.

SMITH, E.A.L.: Pile-driving analysis by the wave equation. ASCE, *Journal for Soil Mechanics and Foundations Division*, 86(4), pp. 35-61, 1960.