

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Palloks, Werner; Zierach, Rahula**

## **Zum Problem der Prognose von Schwingungen und Setzungen durch Pfahlrammungen mit Vibrationsrammbären**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102775>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Palloks, Werner; Zierach, Rahula (1995): Zum Problem der Prognose von Schwingungen und Setzungen durch Pfahlrammungen mit Vibrationsrammbären. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 72. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 48-55.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Zum Problem der Prognose von Schwingungen und Setzungen durch Pfahlrammungen mit Vibrationsbären

Palloks, W.; Zierach, R.

Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Berlin

## 1 Problemstellung

Vibrationsbären werden auf Grund vieler Vorteile in wachsendem Maße bei der Einbringung von Spundwänden und Pfählen in den Baugrund eingesetzt. Durch zahlreiche konstruktive Veränderungen haben es die Hersteller dieser Geräte verstanden, einsatzhemmende Eigenschaften zu beseitigen. Variable Drehzahlen durch Hydraulikantrieb, Erhöhung der Drehzahl (Hochfrequenzvibratoren) und variable Unwuchten, die erst nach Erreichen der gewählten Arbeitsdrehzahl ausgefahren werden und damit ihre Kraft entfalten, sind Meilensteine auf diesem Weg. Durch die hohen Drehzahlen und vor allem das Ausbleiben der bekannten Anfahr- und Auslaufpeaks ist die spürbare Schwingungseinwirkung auf die Umgebung der Rammstelle immer geringer geworden. Altbekannte Achtungszeichen sind damit weggefallen und die Versuchung ist groß, diese Geräte in immer kleineren Abständen von Bauwerken einzusetzen. Gefahr droht hier durch zu große Bauteilschwingungen und vor allem durch ungleichförmige Setzungen des Bauwerks. Es soll in diesem Beitrag der Versuch unternommen werden, einige damit verbundene Probleme anzusprechen und Lösungsansätze zu diskutieren.

## 2 Vibrationsrammung und Schwingungsausbreitung

### 2.1 Einfluß der Bodeneigenschaften

Der Eindringvorgang einer vibrierten Bohle in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften (zum Beispiel ausgedrückt durch die Ergebnisse der Rammsondierung) ist in [1] ausführlich untersucht worden. Eine Umsetzung dieser Kenntnisse auf die Größe der erzeugten Bodenschwingungen ist bisher noch nicht bekannt. Am ehesten wäre eine Korrelation mit der Größe der Fußkraft am Pfahl aussichtsreich, aber auch die Mantelreibung hat auf die Größe der im Nahbereich erzeugten Bodenschwingungen einen Einfluß und muß bei Böden mit erhöhtem Reibungsanteil ebenfalls berücksichtigt werden. Bereits hierdurch entsteht eine komplizierte Form der Wellenausbreitung, die durch eine Bodenschichtung mit Reflexionsmöglichkeit der elastischen Wellen noch unübersichtlicher wird. Durch Veränderung der Drehzahl der Vibratoren und damit der Frequenz der Bodenschwingungen wird dieser Zustand noch verstärkt [7]. Eine genaue rechnerische Vorhersage oder Beschreibung der Größe der Schwingungen an einer Stelle scheint wegen der Unkenntnis der genauen Baugrund- und Schichtverhältnisse nicht möglich zu sein, umgekehrt könnte die nachträgliche Analyse gemessener Schwingungen eine Präzisierung der dynamischen Baugrundkennwerte ermöglichen.

Bedenkt man das bisher gesagte, so ist es verständlich, daß eine quantitative Angabe der Größe der Bodenschwingungen mit großen Unsicherheiten verbunden ist. In Bild 1 sind Meßergebnisse von Vibratoren mit einem wirksamen Moment von 50 kgm zusammengestellt.

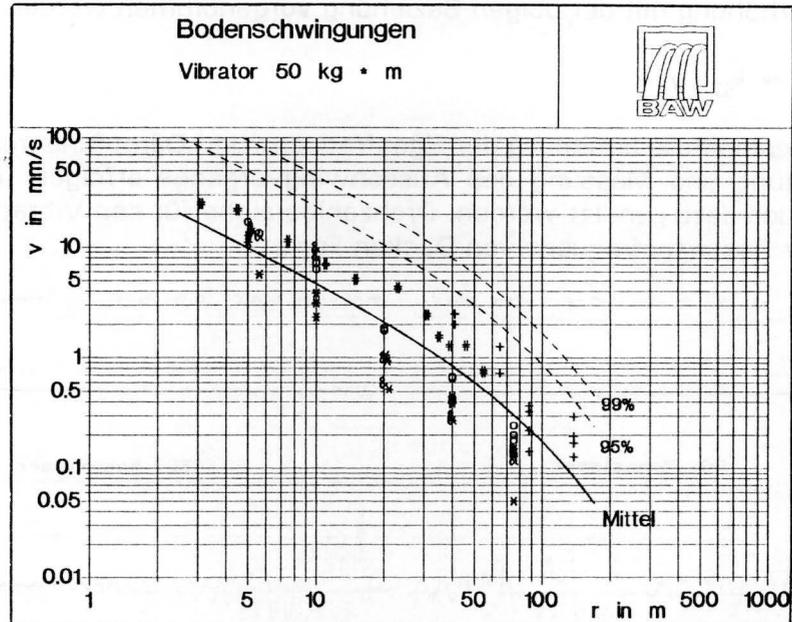


Bild 1 Bodenschwingungen durch Vibratoren mit  $M = 50 \text{ kgm}$

Drehzahlen und Baugrundverhältnisse sind dabei unterschiedlich. Es hat sich gezeigt, daß die Größe der Bodenschwingungen nicht mit der Fliehkraft korreliert werden kann, da die größten Schwingungen bei der Resonanzfrequenz des Systems Vibrator/Bohle-Boden entstehen. Diese Resonanzfrequenz variiert in einem relativ engen Bereich, so daß die Größe der maximalen Bodenschwingung letztlich von der Größe des vorhandenen wirksamen Moments bestimmt wird. Aus einer großen Zahl von Messungen hat der Verfasser [6] in einer statistischen Auswertung folgende Abhängigkeit für die Freifeldschwingung erhalten:

$$\text{mittel } v_i = 10,9 \cdot (M/M_o)^{2/3} \cdot (r/r_o)^{-1,38} \cdot 1 \text{ mm/s}$$

$$v_i(95\%) = 2,69 \cdot \text{mittel } v_i$$

$$(M_o = 1 \text{ kgm}, r_o = 1 \text{ m})$$

Diese Abhängigkeit schließt das Durchfahren der o.g. Resonanzfrequenz ein. Für Vibratoren mit variablen Unwuchten, die kräftefrei anfahren und auslaufen und mit einer festen Frequenz arbeiten, wird der Faktor in obiger Gleichung kleiner sein.

## 2.2 Einwirkung auf Gebäude

Für Bauwerksschwingungen wurde am Fundament ebenfalls unter Einbeziehung der durchgeführten Resonanzen ermittelt:

$$\text{mittel } v_i = 7,6 \cdot (M/M_o)^{2/3} \cdot (r/r_o)^{-1,38} \cdot 1 \text{ mm/s}$$

$$v_i(95\%) = 2,48 \cdot \text{mittel } v_i$$

Bauteile, vor allem Decken können (besonders bei Resonanz) zu wesentlich größeren Schwingungen als die sie tragenden Wände oder Fundamente angeregt werden (Faktor  $k_D$  gegenüber den Fundamentalschwingungen je nach Dämpfung ca. 5 - 30, Häufung bei ca. 8 - 15). Eine näherungsweise Abschätzung der Größe der Deckenschwingungen  $v_D$  kann unter Ansatz des entsprechenden (theoretisch oder experimentell zu bestimmenden) Faktors  $k_D$

der Resonanzüberhöhung mit der obigen Beziehung vorgenommen werden:

$$v_D \approx k_D \cdot v_i$$

Eine einfache experimentelle Ermittlung der Eigenfrequenz und Dämpfung von Decken kann durch Stoßanregung und Messung des Ausschwingvorgangs erfolgen (Bild 2). Dieses Verfahren kann auch dazu genutzt werden, Drehzahlbereiche für den Vibrator vorzugeben, die außerhalb der Resonanzfrequenz von Decken liegen.

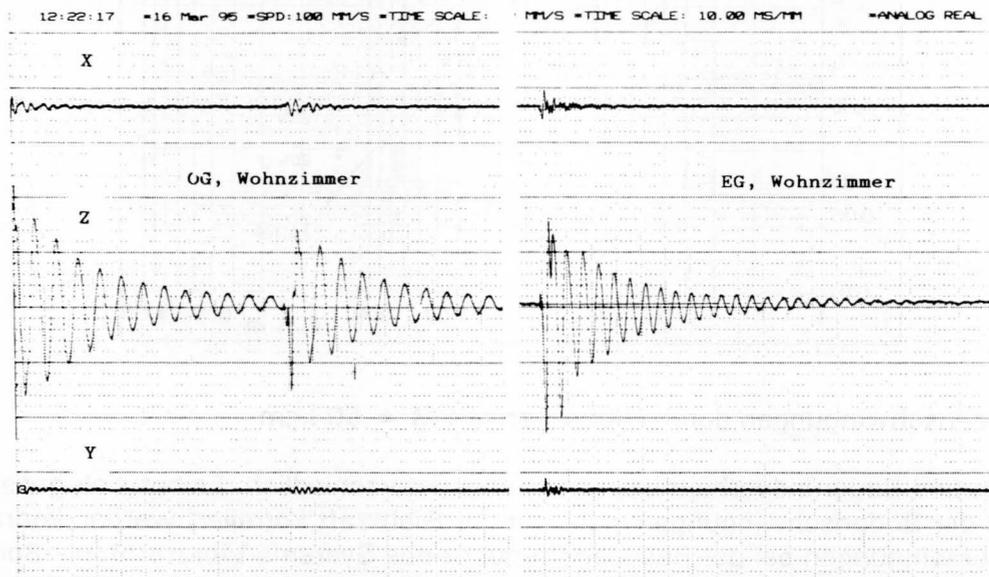


Bild 2 Registrierbeispiel stoßangeregter Decken zur Bestimmung der Eigenfrequenz und Dämpfung

### 3 Schwingungen und Setzungen

#### 3.1 Schwingungsanregung durch ein Fundament

Gemeint ist hier die Schwingung eines durch eine angreifende dynamische Kraft angeregten Fundaments. Zum Setzungsverhalten eines solchen Fundaments hat Holzlöhner [2] mit Hilfe der Dimensionsanalyse einen physikalisch sinnvollen Ansatz mit dimensionslosen Einflußgrößen gewählt. Es wird von der experimentell bestätigten Abhängigkeit der Setzung  $s$  von der Lastzyklenzahl  $N$

$$s = A \cdot \ln(N/N_0 + 1)$$

ausgegangen.  $N_0$  ist von der Vorgeschichte des Bodens abhängig.

Die Setzungsgröße nach  $10^6$  Lastwechsel  $s(10^6)$  wird auf den Radius  $r$  der Lastfläche bezogen, die dynamische Sohlfächenkraft  $P$  auf die statische usw. Insgesamt wurden folgende Modellparameter gewählt:

$$s(10^6)/r, P_{dyn}/P_{stat}, P_{stat}/\rho \cdot g \cdot r^3, \omega \cdot r/v_R, E_{dyn}/\rho \cdot g \cdot r, c/\rho \cdot g \cdot r$$

sowie die Porenzahl  $e$  und die Granulometrie  $G$  mit:

- g Erdbeschleunigung
- $\omega$  Kreisfrequenz
- $\rho$  Korndichte
- c scheinbare Kohäsion
- $E_{dyn}$  E-Modul (dynamisch)
- $v_R$  Rayleighwellengeschwindigkeit

Durch eine Vielzahl von Modellversuchen sind in [3] die Parametereinflüsse untersucht worden. Die dargestellten Ergebnisse konnten durch Modellversuche in der BAW bestätigt und ergänzt werden. Es wurde für zwei unterschiedliche Sande der Einfluß des Wassergehalts  $w$  und der Lagerungsdichte  $D$  sowie der Frequenz  $f$  untersucht. Gearbeitet wurde mit einem elektrodynamischen Schwingungserreger mit 6 Frequenzen von 15 - 150 Hz, die dynamische Sohlkraft und die Schwingungsgröße des Fundaments wurden mit einer Impedanzmeßdose gemessen. Die Größe des Parameters  $P_{stat}/\rho \cdot g \cdot r^3$  betrug 127. Die Versuche wurden mit trockenem und feuchtem Sand mit den Wassergehalten  $1/2 \cdot w_{opt}$  und  $w_{opt}$  sowie den Lagerungsdichten  $I_D = 0,41, 0,59, 0,76$  und  $0,95$  (sofern erreichbar) durchgeführt. Es zeigte sich, daß die Größe der dynamischen Sohlkraft unabhängig von der Frequenz proportional dem Schwingweg ist, eine signifikante Frequenzabhängigkeit der bezogenen Setzung demzufolge nicht beobachtet werden konnte. Als mittlere Abhängigkeit der Setzung von dem Parameter  $P_{dyn}/P_{stat}$  ergab sich :

$$s(10^6)/r = A \cdot (P_{dyn}/P_{stat})^{1,76}.$$

Die Abhängigkeit des Faktors A von der Lagerungsdichte D ist recht stark (mehr als quadratisch, Bild 3). Dabei treten gewisse Unterschiede zwischen beiden Sanden auf, die dem Einfluß der (nicht untersuchten) Kornform zugeschrieben werden muß.

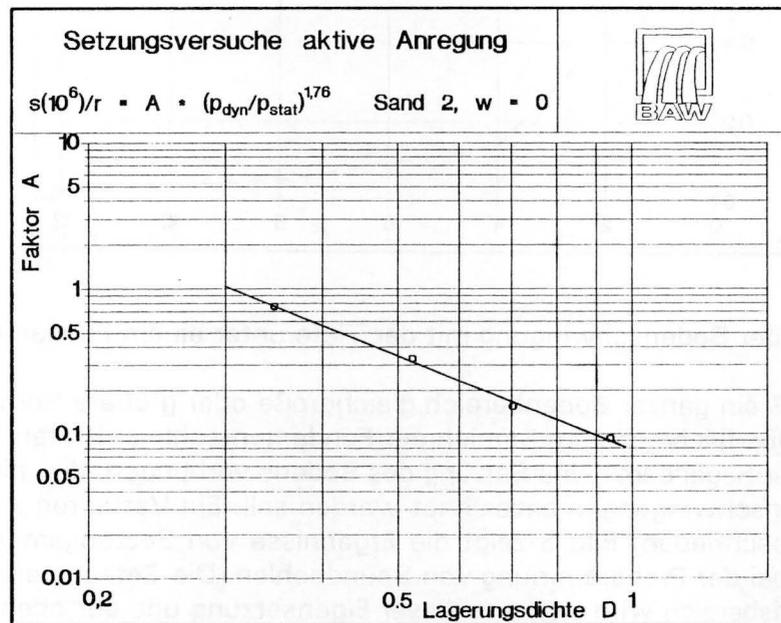


Bild 3 Einfluß der Lagerungsdichte auf das Setzungsvermögen eines Fundaments auf trockenem Sand

Aus dem Vergleich der Ergebnisse beider Untersuchungen kann geschlossen werden, daß die Größe der Setzung etwa linear vom Parameter  $P_{stat}/\rho \cdot g \cdot r^3$  abhängen wird. Zu beachten ist, daß die genannten Zusammenhänge nur zutreffen, wenn  $P_{stat}$  einen hinreichend großen Abstand zur Grundbruchlast  $P_f$  aufweist und  $P_{dyn}$  kleiner  $P_{stat}$  bleibt.

### 3.2 Schwingungsanregung durch den Boden

In der Baupraxis ist die Frage der Entstehung von Setzungen flachgegründeter Fundamente in nichtbindigen Böden besonders im Zusammenhang mit Ramm- und Vibrierarbeiten in der Nähe von Bauwerken zunehmend interessant geworden. Für kleine dynamische Beanspruchungen ( $P_{\text{dyn}}/P_{\text{stat}} \leq 0,2$ ) und den bei neueren Bauwerken durch Einhaltung der entsprechenden Vorschriften immer gegebenen ausreichenden Abstand von  $P_{\text{stat}}$  zur Grundbruchlast  $P_f$  ( $P_{\text{stat}} < 0,5 \cdot P_f$ ) kann nach Holzlöhner [3] mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Zusammenhängen die Größe der zu erwartenden Setzung auch in diesem Fall vorherbestimmt werden. Die Bedingung kleiner dynamischer Beanspruchung bedeutet einen Sicherheitsabstand zur Rammstelle, dessen Größe im folgenden noch diskutiert werden soll.

Im Gegensatz zum aktiv angeregten Fundament, bei dem die Größe der erzeugten Bodenschwingung schnell mit der Tiefe unter dem Fundament abnimmt (Bild 4), wird beim Vibrieren eines Pfahles die Schwingung im Bereich der Pfahlspitze und im Mantelbereich erzeugt.

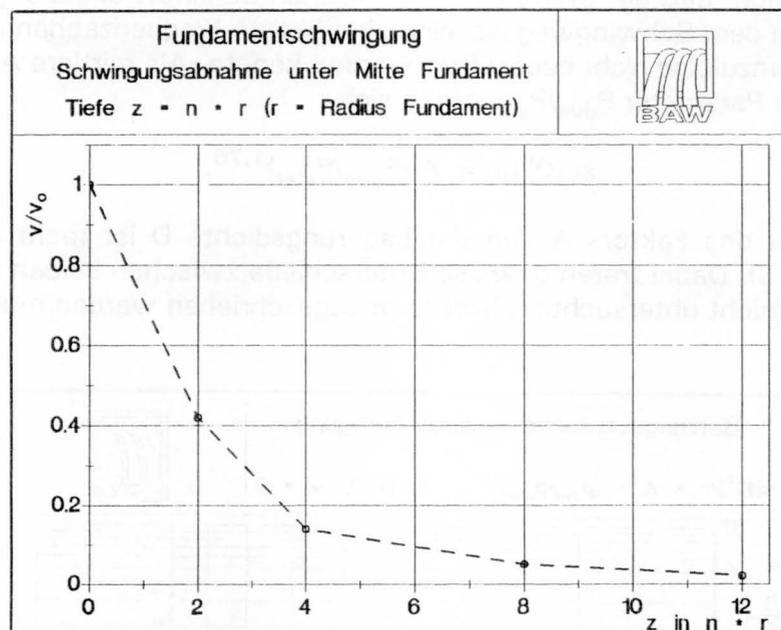


Bild 4 Abnahme der Bodenschwingung mit der Tiefe unter einem Fundament

Das bedeutet, daß ein ganzer Bodenbereich gleichgroße oder größere Schwingungen ausführt, als an der Oberfläche oder im Bereich der Fundamentsohle auftreten. Bei hinreichender Größe ist in der Regel damit eine Setzung des Bodens verbunden, die hier als Eigensetzung durch Bodenschwingungen bezeichnet werden soll. Ein Verfahren zu deren Berechnung ist in [4] beschrieben. Bild 5 zeigt die Ergebnisse von Setzungsmessungen an der Bodenoberfläche bei der Proberammung von Spundbohlen. Die Setzung eines Fundaments in diesem Abstandsbereich wird sich aus dieser Eigensetzung und der oben beschriebenen "Lastsetzung" durch die dynamische Belastung zusammensetzen. Als Beispiel sei die Setzung eines Stützenfundaments eines Hochhauses (im Rohbau) bei dem Ziehen von Bohlen der Baugrubenumspundung mit einem Vibrator dargestellt. Bild 6 zeigt die Größe der vertikalen Fundamentschwingungen und die Setzungsrate je gezogener Bohle. Der größere Teil der Setzungen hat sich während des Rüttelvorganges eingestellt, ca. 20 - 40 % der Setzungen erfolgten nach Beendigung der Arbeiten.

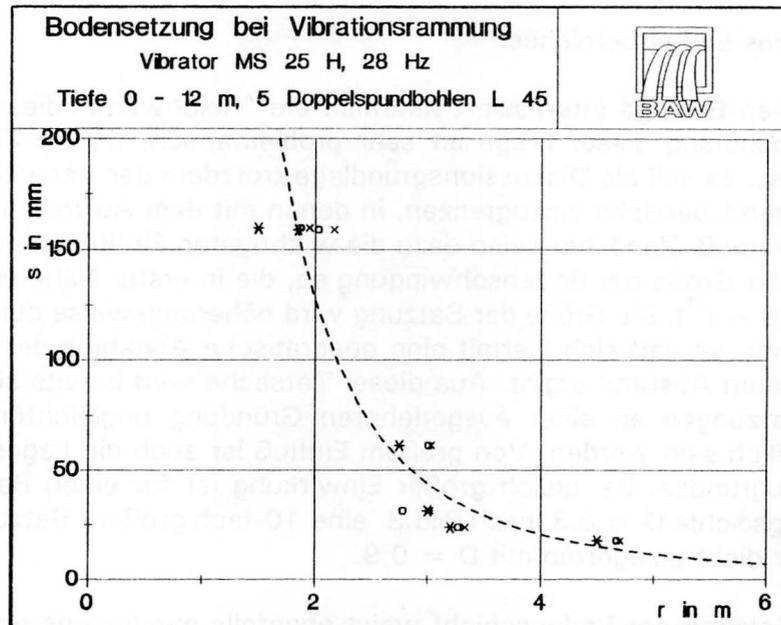


Bild 5: Bodensetzung in der Umgebung einer Vibrationsrammung

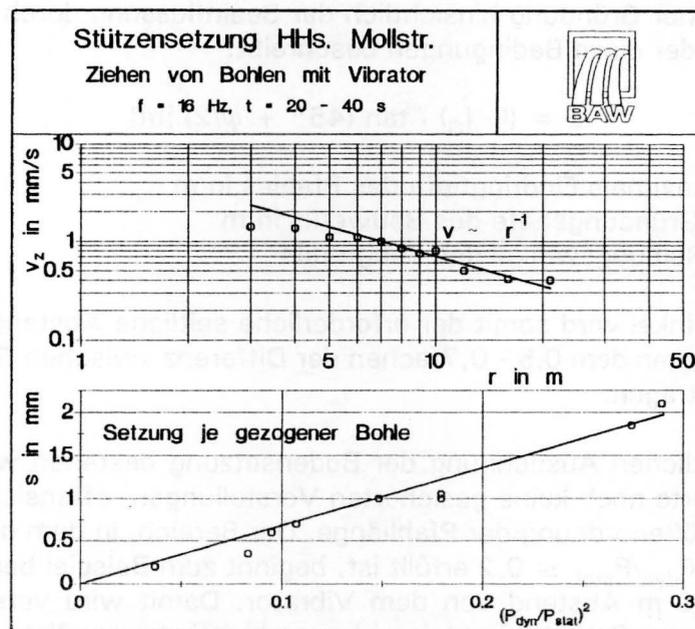


Bild 6 Schwingungen und Setzungen eines Stützenfundaments bei Pfahlziehen mit einem Vibrator

Aus vorliegenden Beobachtungen muß noch ein dritter Setzungsmechanismus angenommen werden, der zusätzlich zu den vorher genannten wirken kann: In wassergesättigten Böden bildet sich um die vibrierte Bohle eine verflüssigte Säule, die offensichtlich nur wenige dm stark ist. Eine weitere Ausbreitung dieser Verflüssigungszone ist auch in Böden, die als verflüssigungsgefährdet anzusehen sind, bisher nicht beobachtet worden. Diese verflüssigte Schicht kann eine seitliche Verdrängung des Bodens ermöglichen, so daß benachbarte große Lasten erheblichen Setzungen erleiden können analog den möglichen Setzungen im Bereich einer seitlich nachgebenden Spundwand. Im Unterschied zu den erstgenannten Mechanismen dürfte in diesem Fall die Setzung anderen Einflußgrößen unterliegen.

### 3.3 Diskussion des Einflußbereiches

Für die praktischen Belange interessiert natürlich die "Reichweite" dieses Setzungseinflusses. Die Behandlung dieser Frage ist sehr problematisch, da die Zahl der Einflußparameter groß ist. Es soll als Diskussionsgrundlage trotzdem der Versuch unternommen werden, die Abstandsbereiche einzugrenzen, in denen mit dem Auftreten von Setzungen gerechnet werden muß. Zunächst seien dazu die wichtigsten Einflußparameter diskutiert.  $P_{dyn}$  hängt von der Größe der Bodenschwingung ab, die in erster Näherung mit dem Abstand  $r$  abnimmt ( $u \sim r^{-1}$ ). Die Größe der Setzung wird näherungsweise durch das Quadrat von  $P_{dyn}$  bestimmt, so daß sich hiermit eine quadratische Abnahme der möglichen Setzungsgröße mit dem Abstand ergibt. Aus dieser Tatsache wird bereits sichtbar, daß die entstehenden Setzungen an einer ausgedehnten Gründung ungleichförmig und damit besonders schädlich sein werden. Von großem Einfluß ist auch die Lagerungsdichte des anstehenden Baugrundes. Bei gleich großer Einwirkung ist für einen Baugrund mit der geringen Lagerungsdichte  $D = 0,3$  nach Bild 3 eine 10-fach größere Setzung zu erwarten als für einen sehr dicht gelagerten mit  $D = 0,9$ .

Die Größe der Setzung der Bodenschicht weist ebenfalls mindestens eine quadratische Abnahme mit dem Abstand vom Vibrator auf. Bei dem Modell der seitlichen Verdrängung ist die Frage der Entstehung einer Setzung eher von der Lage der Gründung zur Lage der Pfahlspitze abhängig. In [5] hat der Verfasser einen seitlichen Sicherheitsabstand  $E$  der Pfahlrammung zu einer Gründung hinsichtlich der Beeinflussung durch Baugrundveränderungen angegeben, der diese Bedingungen beschreibt:

$$E = (l - l_G) / \tan (45^\circ + \varphi/2) \text{ [m]}$$

mit  $l$  = maximale Eindringtiefe des Pfahles in m  
 $l_G$  = Gründungstiefe des Bauwerks in m  
 $\varphi$  = Reibungswinkel des Baugrunds

Je nach Reibungswinkel wird somit der erforderliche seitliche Abstand der Rammung zu einer Gründung zwischen dem 0,5 - 0,7fachen der Differenz zwischen Gründungstiefe und Pfahlspitzentiefe betragen.

Hinsichtlich der seitlichen Ausdehnung der Bodensetzung bestehen wegen der wenigen vorliegenden Meßwerte noch keine gesicherten Vorstellungen, offensichtlich liegt der Einflußbereich in der Größenordnung der Pfahllänge. Der Bereich, in dem die in Abschnitt 3.2 genannte Forderung  $P_{dyn}/P_{stat} \leq 0,2$  erfüllt ist, beginnt zum Beispiel bei dem in Bild 6 dargestellten Fall in 10 m Abstand von dem Vibrator. Damit wird verständlich, daß insbesondere bei längerer Schwingungseinwirkung als bei diesen Ziehvorgängen mit Setzungen auch in noch größeren Abständen gerechnet werden muß.

## 4 Schlußfolgerungen

In diesem Beitrag wurden einige Probleme der Prognose der Größe der Schwingungen, die durch das Vibrieren von Pfählen entstehen, und den dadurch hervorgerufenen Setzungen von Boden und Fundament, angesprochen. Die Kenntnis auf diesem Gebiet ist noch stark verbesserungsfähig. Die angeführten Beispiele sollen eine Diskussionsgrundlage darstellen und dazu beitragen, daß dieser wichtigen Problematik eine größere Aufmerksamkeit zuteil wird.

Es erscheint notwendig, in Vorbereitung solcher Baumaßnahmen in stärkerem Maße als bisher Voruntersuchungen zu diesem Effekt durchzuführen. Auch moderne Vibratoren be-

sitzen hinsichtlich der Setzung benachbarter Fundamente noch ein Schadenspotential, das es zu begrenzen gilt. Dazu ist aber auch eine realistische Einschätzung der Auswirkung und Zulässigkeit der zu erwartenden Setzungen notwendig.

## 5 Literatur

- [1] Dierssen, G. Ein bodenmechanisches Modell zur Beschreibung der Vibrationsrammung in körnigen Böden. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 133, 1994
- [2] Holzlöhner, U. Bleibende Setzungen von Fundamenten infolge dynamischer Last. Die Bautechnik 5/1978, S. 150 - 154
- [3] Holzlöhner, U. Setzungen infolge Erschütterungen. Textvorschlag für DIN 4150 Teil 3, 1992 (unveröffentlicht)
- [4] Schäffner, H.-J. Ein Verfahren zur Berechnung dynamisch erzeugter Setzungen in Kornhaufwerken, Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Schriftenreihe Grundbau, Heft 12, 1964, S. 220 - 239
- [5] Palloks, W. Einfluß von Baugrundeigenschaften auf Ramm-, Aufprall- und Sprengerschütterungen bei Rekonstruktion und Abbruch, Bauforschung-Baupraxis Nr. 159, 1985, S. 22 - 27
- [6] Palloks, W. Prognose von Rammerschütterungen. Textvorschlag für DIN 4150, Teil 1, 1993 (unveröffentlicht)
- [7] Massarsch, R. Neuentwicklungen bei der Anwendung von vibrierten Pfählen. Mitt. des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, Heft 48, 1995, S. 319 - 342