Zum axialen Tragverhalten von vibrierten und gerammten Vollverdrängungspfählen

Bastian Hoffmann M.Sc., Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik

Fertigpfähle werden in der Regel durch Schlagrammung eingebracht. Mit dem alternativen Einsatz des Vibrationsverfahrens können signifikante ökonomische und ökologische Vorteile verbunden sein, da der Schall an der Quelle reduziert und eine deutlich schnellere und ermüdungsärmerer Herstellung ermöglicht wird. Dies ist in der Ingenieurpraxis u.a. von besonderer Bedeutung für im Wasser- und Offshore-Bau eingesetzte Stahlrohrpfähle, sowie bei sehr dicht gelagerten nichtbindigen Böden, aber auch für weitere Anwendungen wird die vibrierende Einbringung verstärkt angestrebt. In diesem Beitrag werden vergleichende Modellversuche zur schlagenden und vibrierenden Installation vorgestellt. Die durchgeführte axiale Belastung geben Aufschluss über die unterschiedlichen Tragmechanismen. Mittels eines neu entwickelten Versuchstands konnten dynamische Effekte, welche bei der vibrierenden Installation entstehen, von zyklischen Effekten abgegrenzt werden und Aussagen über den Einfluss der Installationsmethode auf die axiale Tragfähigkeit getroffen werden.

1 Einleitung

Während für schlagend eingebrachte Pfähle bewährte Berechnungsansätze für die Prognose des axialen Pfahltragverhaltens zur Verfügung stehen, die auch Eingang in Normen und Regelwerke (u.a. EA-Pfähle) gefunden haben, liegen zum Einfluss der Vibrationseinbringung auf den axialen Pfahlwiderstand entsprechend abgesicherte Erfahrungen noch nicht vor. Insgesamt ist der Kenntnisstand gering. Die ‚EA-Pfähle' DGGT (2012) empfiehlt, den axialen Pfahlwiderstand vibrierter Fertigrammpfähle gegenüber gerammten Pfählen abzumindern.

In dem hier vorgestellten Beitrag wird der aktuelle Kenntnisstand zum Einfluss des Herstellungsvorganges von vibrierend eingebrachten Fertigrammpfähle auf die Baugrundverhältnissen und auf das axiale Pfahltragverhalten vorgestellt und auf der Basis neuer experimenteller Untersuchungen fortgeschrieben.

2 Stand der Forschung

2.1 Verfahren der Pfahleinbringung im Vergleich

Cudmani (2001) betrachtet drei Kategorien der Pfahleinbringung. Das langsame monotone Eindringen des Pfahls wird als statische Penetration bezeichnet. Die alternierende Penetration beschreibt eine zyklische kraft- oder verschiebungsgesteuerte Eindringung, bei dem keine Trägheitskräfte berücksichtigt werden müssen. Die dynamische Penetration hingegen charakterisiert das Eindringen eines Körpers unter dynamischer Krafterregung. Zusätzlich zu diesen Verfahren kann die in der Praxis gängige Impulspenetration oder Schlagrammung erwähnt werden. In Abbildung 2-1 ist die Pfahleinbringung mit schematischem Verlauf der Einbringung und der eingeprägten Kräfte für die Installationsarten; monotones Einpressen, Schlagrammung, Vibrationsrammung und zyklisches Eindrücken nach Vogelsang (2017) dargestellt.

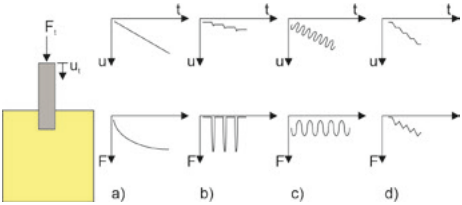

Abbildung 2-1: Grundlagen der Pfahleinbringung mit schematischem Verlauf der Eindringung und der eingeprägten Kräfte: a) monotones Einpressen, b) Schlagrammung, c) Vibrationsrammung, d) zyklisches Eindrücken (nach Vogelsang 2017)

Das monotone Einpressen ist der einfachste Installationsvorgang. Dieser eignet sich, um ein Verständnis mechanischer Zusammenhänge zu schaffen und

findet in vielen wissenschaftlichen Arbeiten als Referenz zu anderen Penetrationsverfahren Verwendung, z. B. bei Vogelsang (2017), Labenski (2020) und weitere.
Für das Verfahren der Schlagrammung liegen vielzählige Erfahrungen vor, um eine optimale Pfahleinbringung zu gewährleisten und die Tragfähigkeit der Pfähle abschätzen zu können. So liefert beispielsweise die EA-Pfähle DGGT (2012) Erfahrungswerte für die Tragfähigkeit für verschiedene Pfahlsysteme. Bei der Rammung von Pfählen durchläuft die von den Rammbären initiierte Stoßwelle den Pfahlquerschnitt als Druckwelle bis zum Fuß und wird als Zugwelle wieder reflektiert Wienholz (1998). Um die Energieübertragung zwischen Pfahl und Boden während der Rammung abschätzen zu können ist nach Massarsch (1992) die Pfahlimpedanz der maßgebende Parameter.

$$\mathbf{I = (E \cdot A)/C} \qquad (1)$$

mit

I	Impedanz	$[kNs/m]$
E	Elastizitätsmodul	$[kN/m^2]$
C	Wellengeschwindigkeit	$[m/s]$
ρ	Dichte	$[kN/m^3]$

Bei zunehmender Impedanz des Pfahles steigt nach Schwab & Bhatia (1985) der Energieanteil, der für die Pfahleinbringung aufgebracht werden kann. Zudem wird der Anteil der Energie kleiner, der bei der Rammung durch Schwingungen in den umliegenden Boden verloren geht. Wienholz (1998) konnte in Modellversuchen den Einfluss der Pfahlimpedanz auf das axiale Tragverhalten von Vibrationspfählen übertragen. So stellte er in seinen Modellversuchen fest, dass bei geringer Pfahlimpedanz ein größerer Energieeintrag in den umliegenden Boden erfolgt, was wiederum mit erhöhten Pfahltragfähigkeiten korreliert.

Das grundlegende Prinzip der Vibrationsrammung besteht darin, dass durch das zyklische und dynamishe Anregen des Vibrationsgutes die Scherfestigkeit des umliegenden Bodens temporär herabgesetzt wird, so dass Mantelreibung und Spitzendruck durch die Ausübung der Erregerkraft überwunden werden können. Schlussendlich dringt der Pfahl alleine durch sein Eigengewicht in den Boden ein. Hartung (1994) und Schmid (1970) erkannten schon früh, dass sich die Installationszeit im Vergleich zur Schlagrammung um den Faktor zehn reduzieren ließ. Ein weiterer Vorteil der Vibrationsrammung gegenüber der Schlagrammung liegt in der Lärmreduktion, so konnte Bouth (1973) eine um 35 dB geringere Lautstärke feststellen.

2.2 Pfahl-Bodeninteraktion während der Vibrationsrammung

Bei der vibrierenden Pfahlinstallation kommt es aufgrund von Überlagerungseffekten zu komplexen bodenmechanischen Phänomenen. So entstehen infolge der harmonischen Kraftanregung zyklische Effekte, hohe Vibrationsfrequenzen bewirken wiederum hohe Beschleunigungen der Bodenpartikel zudem treten dynamische Effekte auf. Labenski (2020) grenzte die beiden Effekte der Dynamik und der Zyklik voneinander ab und definierte die Begriffe wie folgt:

- *Dynamische Pfahleinbringung*: Hierbei verändern sich die zeitlich veränderlichen Größen so schnell, dass Trägheitskräfte wirksam sind.
- *Zyklische Pfahleinbringung*: Die zeitlich veränderlichen und periodischen Größen laufen so langsam ab, dass keine Trägheitskräfte wirksam sind.

Eine Zuordnung in Frequenzbereiche tätigte Gotschol (2002)

zyklisch	Zyklisch-dynamisch	dynamisch
$0 < f \leq 1{,}0$ Hz	$1{,}0 < f \leq 10$ Hz	$F > 10$ Hz

Tabelle 1: Frequenzbereich verschiedener Anregungen nach Gotschol (2002)

2.2.1 Einfluss dynamischer Effekte

Als Frequenz wird die Anzahl der vertikalen Schwingungen des Vibrator-Pfahl Systems pro Sekunde bezeichnet. Kühn (1978) bezeichnete den Vibrator als Schwingungserreger, den Pfahl als Federung und den Boden als Dämpfung.

Frühere Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von nichtbindigen Böden führten Hertwig et al. (1933) durch und erkannten das Potential einer optimalen Verdichtung bei Frequenzen in der Nähe der Resonanzfrequenz des Bodens. Nach Westerberg (1995), Massarsch & Westerberg (1995) und Woods (1997) sind zwei Resonanzfrequenzen für die Vibrationsrammung ausschlaggebend: Die Resonanzfrequenz des Vibrator-Pfahl Systems und die Resonanzfrequenz des Vibrator-Pfahl-Bodensystems. Bei einer optimalen Installationsfrequenz ist die Bewegungsamplitude sowie die relative Verschiebung zwischen Pfahl und Boden maximal. Diese Frequenz entspricht der Resonanzfrequenz des Vibrator-Pfahl Systems, hierbei schwingen Pfahl und Boden nicht in Phase.Mit der hieraus resultierenden hohen Eindringgeschwindigkeit können kurze Installationszeiten erzielt werden. Der Großteil der eingeleiteten Energie wird in Form von Wärme am Pfahlmantel und -fuß frei. Ein geringer Teil der Energie wird wellenförmig in den umliegenden Boden abgegeben.

Im Gegensatz dazu wird die Resonanzfrequenz des Vibrator-Pfahl-Boden Systems als optimale Verdichtungsfrequenz definiert. Die Bodenpartikel schwingen in gleicher Phase wie der Pfahl und die Relativverschiebung ist minimal. Die vertikalen Bodengeschwindigkeiten werden maximal, es treten geringe Energieverluste durch Reibung zwischen Pfahl und Boden auf, weshalb eine optimale Energieübertragung stattfindet.

Es kann aufgrund der starken Bodenvibration sogar zu einem Stopp der Penetration kommen. Infolge der durch die Vibration ausgelösten Veränderung der Lagerungsdichte kann sich die Resonanzfrequenz ständig ändern.

Hartung (1994) beschrieb die Beziehung zwischen der Installation von Vibrationspfählen und der Verdichtung des umliegenden Bodens und dessen Auswirkung auf die axiale Tragfähigkeit. Hierbei stellte er fest, dass die Tragfähigkeit abhängt vom Verhältnis zwischen Erregerfrequenz und Bodenresonanzfrequenz ist. In Modellversuchen konnte er zeigen, dass die axiale Tragfähigkeit mit zunehmender Installationsfrequenz abnahm, ein nachträgliches Nachverdichten unter Resonanzfrequenz steigerte die Tragfähigkeit wiederum, erreichte jedoch nicht das Niveau, welches mit einer niedrigeren Installationsfrequenz hätte erreicht werden können. Die größten Pfahltragfähigkeiten konnte bei einer geringen Differenz zwischen Installationsfrequenz und Eigenfrequenz des Bodens erzielt werden. Kühn (1980) veröffentlichte hierfür eine Tabelle mit Eigenfrequenzen verschiedener Böden. Die höhere Tragfähigkeit der mit niedriger Frequenz eingebrachten Pfähle konnte auf einen höheren Pfahlfußwiderstand zurückgeführt werden. So stellte Hartung (1994) fest, dass die Vibrationsfrequenz einen großen Einfluss auf den Pfahlfußwiderstand hat. In Modellversuchen konnte Wienholz (1998) die Verdichtung im Fußbereich während des Nachverdichtungsvorganges und die Auflockerung um den Pfahlmantel bestätigen. Im wesentlichen untersuchte Wienholz (1998) den Einfluss der Pfahlimpedanz auf die axiale Tragfähigkeit. Hierbei stellte er bei geringer Pfahlimpedanz und dem damit verbundenen höheren Energieeintrag in den Boden höhere axiale Pfahlwiderstände fest.

Als Hauptursache für Bodenverdichtung gilt nach Wersäll (2013) neben der Bodenverflüssigung die Überschreitung kritischer Scherdehnungen. Hierzu führte Massarsch (2016) Versuche zur Identifikation des Verdichtungsmechanismus von Böden durch. Er definierte die Scherdehnung γ wie folgt:

$$\gamma = \frac{\upsilon}{c_s} = \frac{a}{2\pi f c_s} \qquad (2)$$

mit

γ Impedanz

υ Elastizitätsmodul

c_s Scherwellengeschwindigkeit

a Beschleunigung des Bodens

f Schwingfrequenz

Gemäß Massarsch (2016) verringert sich die Bodenverdichtung durch eine Abnahme der Scherdehnung. Unter Betrachtung von Gleichung (2) findet eine Reduktion der Scherdehnung bei konstanter Beschleunigung a und erhöhter Frequenz f statt. Entscheidend für den Verdichtungsvorgang ist die vertikale Schwinggeschwindigkeit v, welche mit-

tels Geophonmessungen bestimmt werden kann. Ergebnisse solcher Geophonmessungen finden sich bspw. in Massarsch (2002) oder Massarsch et al. (2017).

2.2.2 Einfluss zyklischer Effekte

Neben den dynamischen Effekten treten beim Vibrationsrammen infolge der Pfahlbewegung zyklische Effekte im Boden auf. Das auftretende Verformungsverhalten von nichtbindigen Böden unter zyklischer Belastung wird als zyklisches Kriechen bezeichnet (Lammertz 2008). Hierbei tritt eine Akkumulation der plastischen Verformungsanteile auf. Bei zunehmender Zyklenzahl erhöhen sich die plastischen Verformungen und die Bodeneigenschaften werden nachhaltig verändert. Nach Lammertz (2008) kann zwischen zyklischer Bodenverfestigung und -entfestigung unterschieden werden. Kornumlagerungen, die zur Ver- oder Entfestigung führen, treten nach Triantafyllidis (2003) erst nach Überschreitung eines linearen Scherdehnungsbereiches auf.
Cudmani (2001) stellte in durchgeführten Feldversuchen zwei Bewegungsmodi während der Vibrationsrammung fest und führte hierbei die Begriffe kavitatives Vibrationsrammen und nicht-kavitatives Vibrationsrammen ein. Bereits Rodger & Littlejohn (1980) beschrieben zwei unterschiedliche Bewegungsarten, i.e. das langsame (kavitative) und das schnelle (nicht-kavitative) Vibrationsrammen. Dierssen (1994) bezeichnete den schnellen Bewegungsmodus als pulsierendes Vibrationsrammen. Beim schnellen (nicht-kavitativen) Vibrieren bewegt sich der Pfahl ohne Bewegungsumkehr nach unten. Beim langsamen (kavitativen) Vibrationsrammen hingegen kommt es zu einer Bewegungsumkehr des Pfahls. Durch beide Modi entsteht am Pfahlmantel eine Bodenverflüssigung. Am Pfahlfuß bildet sich beim kavitativen Vibrationsrammen, gegensätzlich zum nicht-kavitativen Vibrationsrammen, keine Verflüssigungszone, sondern ein elasto-plastischer Bereich aus. Das kavitative Vibrationsrammen konnte Cudmani (2001) bei maximaler Unwuchtstellung und Vibrationsfrequenz (maximale Bewegungsamplitude und Fliehkraft) in mitteldichter bis dichter Lagerung feststellen. Das nicht-kavitative Vibrationsrammen wurde in lockerer bis mitteldichter Lagerung, bei minimaler Unwuchtstellung (minimale Bewegungsamplitude) und maximaler statischer Auflast beobachtet. Vielsack & Storz (1997) führten ebenfalls Modellversuche zum Vibrationsrammen durch. Hierbei stellten sie ähnlich wie Cudmani (2001) verschiedene Vibrationsmodi fest. Im Grundmodus weist die Bewegung des Pfahls die gleiche Periode auf wie die Erregung. Höhere Modi haben mehrere Erregerzyklen, weshalb Vielsack & Storz (1997) diese mit Hilfe der ganzzahligen Parameter *m* und *n* definierten. *n* beschreibt die Entwicklungszahl des Spitzendrucks pro charakteristische Periode. Umso höher der Bewegungsmodus, desto langsamer findet die Pfahlinstallation statt.
Volgelsang (2017) führte Versuche zur monotonen und zyklischen Pfahlinstallation durch. Bei der zyklischen Pfahlinstallation variierte er den Bewegungsrhythmus. Er stellte bei Messungen des Pfahlspitzendrucks und der Mantelreibung, unabhängig von der Lagerungsdichte, eine Art Grenzbelastung des monotonen Versuches gegenüber dem zyklischen Eindrücken fest. Zusätzlich konnte Vogelsang (2017) bei zyklischer Pfahlinstallation in locker gelagerten Sanden, eine Verdichtung des umliegenden Bodens im Mantelbereich feststellen. Infolge der zyklischen Scherbeanspruchungen kam es zu Kornumlagerungen, ähnlich wie sie Wichtmann (2016) in zyklischen Triaxialversuchen feststellen konnte. Gegenteilige Effekte entstanden in mitteldichter und dichter Lagerung, was Vogelsang mit dem *friction fatigue*-Effekt begründete. Durch die zyklische Pfahlinstallation kommt es zu einer Spannungsrelaxation am Pfahlmantel und zur Abnahme der mobilisierten Mantelreibung. Lehane & White (2005) stellten in Zentrifugenversuchen zusätzlich fest, dass die Verringerung der Horizontalspannungen bzw. der friction fatigue-Effekt neben der Anzahl der Zyklen von der Größe der Pfahlbewegungsamplitude abhängig ist.

3 Versuchsaufbau

Am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart werden physikalische Untersuchungen zur Klärung des axialen Tragverhaltens von vibrierten und gerammten Vollverdrängungspfählen durchgeführt.

Die 1g-Modellversuche wurden im geometrischen Maßstab 1:10 konzipiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

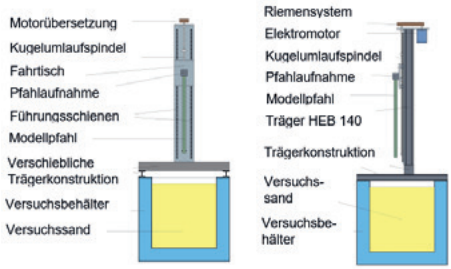

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Die skalierten Modellversuche werden in einem rechteckigen Stahlbehälter mit einer Kantenlänge von 1,0 m x 1,0 m und einer Höhe von 1,6 m durchgeführt. Die Abmessungen des Stahlbehälters gewährleisten einen horizontalen Abstand von 14·D von Pfahlmantel zum Behälterrand und einen vertikalen Abstand von 17,5·D vom Pfahlfuß zum Boden des Behälters. Während der Installation werden die Verschiebung des Pfahls, sowie der Erddruck am Behälterboden gemessen. In der nachgeschalteten axialen Belastung des Pfahls werden die axiale Dehnung über Dehnmesstreifen am Pfahl gemessen. Die Dehnmesstreifen befinden sich in sechs Ebenen entlang des Pfahlmantels. Die Pfahlspitzenkraft wird separat gemessen. Mittels einer am Pfahlkopf angebrachten Kraftmessdose kann zusätzlich die Gesamtkraft ermittelt werden. Zusätzlich wird die Pfahlkopfverschiebung über die gesamte axiale Belastung aufgezeichnet.
Bei der zyklischen quasi statischen Pfahlinstallation wird nahezu derselbe Versuchsaufbau verwendet. Der Unterschied liegt in der Messung der Normalkraft während der Pfahlinstallation mittels Dehnmesstreifen. Die Messungen während der schlagenden Pfahlinstallation entsprechen der zyklischen quasi statischen Pfahlinstallation.

3.1 Versuchssand

Für die Vibrationsversuche und die zugehörigen zyklischen quasi statische Versuche wird der Modellsand trocken in einer Lagerungsdichte von $D = 0{,}57$ eingebaut, für die Vibrationsversuche und den zugehörigen zyklischen quasi statischen Versuchen mit einer Lagerungsdichte von $D = 0{,}76$. Die maximale Lagerungsdichte $\rho_{d,max}$ beträgt 1.69 g/cm^3 und korrespondiert mit einer minimalen Porenzahl von $e_{min} = 0{,}565$. Die minimale Lagerungsdichte liegt bei $\rho_{d,min} = 1{,}37\ g/cm^3$, die dazugehörige Porenzahl bei $e_{max} = 0{,}702$. Weitere Bodenparameter zum verwendeten Versuchssand finden sich in Klein (2019).

3.2 Versuchspfahl

Als realmaßstäbliche Vorlage dient ein 10 m langer rechteckiger Fertigrammpfahl aus Stahlbeton mit einer Kantenlänge von 0,35 m. Als Modellpfahl wird ein runder Aluminiumpfahl gewählt, die Abmessungen können Tabelle 3-1 entnommen werden. Der Durchmesser wird zu einem runden Pfahldurchmesser D_{eq} skaliert.

Eigenschaften	Abmessungen	Einheit
Durchmesser	34	(mm)
Länge	1500	(mm)
Einbindetiefe	1000	(mm)
Wandstärke	4	(mm)

Tabelle 3-1: Abmessungen des Modellpfahls

3.3 Versuchsdurchführung

Vorrangiges Ziel der Modellversuche ist es, den Einfluss der dynamischen Installation durch die Vibrationsrammung auf das axiale Tragverhalten, im Vergleich zu der in der Praxis weit verbreiteten Schlagrammung zu untersuchen. Die Modellversuche werden in mehreren Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird der Sand homogen in den Behälter eingerieselt. Im zweiten Schritt erfolgt die vibrierende bzw. schlagende Installation des Modellpfahls bis auf Endtiefe. Anschließend erfolgt die axiale Probebelastung. Die während der Installation aufgezeichnete Bewegungsspur wird in einem zweiten Versuch mit Hilfe des Versuchsaufbaus in Abbildung 3-1 „in Zeitlupe", das heißt zeitlich

stark gestreckt und ohne dynamische Effekte nachgebildet. Auch der mit diesem Verfahren installierte Pfahl wird im Anschluss axial belastet. Zur Umrechnung der Bewegungsspur während der vibrierenden bzw. schlagenden Pfahlinstallation wird ein MATLAB-Code entwickelt, der es ermöglicht, die Bewegungsamplituden in absolute Koordinaten in G-CODE-Sprache umzuwandeln. Mit diesem Input kann der elektrische Schrittmotor das Bewegungsmuster des Pfahls in Zeitlupe und ohne Einfluss der Dynamik wiederholen. Die hierbei gewählte Geschwindigkeit ist langsam genug, um Trägheitseffekte auszuschließen. Im Falle der Schlagrammung ist zwischen jedem Rammschlag eine Pause von zehn Sekunden eingehalten. Somit ist dem Boden die Möglichkeit zum Abbau von Verspannungen gegeben.
Die axiale Belastung erfolgte schrittweise in Stufen von 50N alle drei Minuten. Der Grenzzustand wird über die Grenzsetzung $s = 0{,}1 \cdot D_{eq}$ definiert.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Einfluss der Dynamik bei rammender Einbringung

In Abbildung 4-1 sind die Widerstandssetzungskurven von zwei rammend eingebrachten Pfählen im Abgleich mit den Verhalten eines ohne dynamischen Einfluss analog eingebrachten Pfahls dargestellt. Die Versuche sind in Sand mit einer Lagerungsdichte $D = 0{,}76$ durchgeführt. Zum besseren Vergleich der Ergebnisse wird die axiale Kraft K während der Probebelastung durch die axiale Kraft $K_{monoton}$ während der axialen Belastung eines monoton installierten, d.h. mit einer Geschwindigkeit von *120 mm/min* eingedrückten Pfahles normiert. Die monotone Pfahlinstallation und axiale Belastung erfolgt in gleicher Lagerungsdichte.
Die beiden Rammversuche unterscheiden sich in der pro Rammschlag eingeleiteten Energie. So wird die Fallhöhe und somit die Energie zwischen 20 *cm*, was einer Energie pro Schlag von 19,62 *J* entspricht und 50 *cm* was einer Energie von 49,05 *J* pro Schlag entspricht, variiert. Die Gesamtenergie, die für die schlagende Pfahlinstallation aufgebracht wird, liegt bei *4767 J* bei 20 *cm* Fallhöhe und 6229,4 *J* bei 50 *cm* Fallhöhe. Die Versuchsergebnisse zeigen eine leichte Steigerung des axialen Widerstandes mit Zunahme der Fallhöhe um 8,8 % bei einer Verschiebung von $s = 0{,}1\ D_{eq}$. Bei einer Verschiebung von $s = 0{,}04\ D_{eq}$ ist kein Unterschied festzustellen. Diese Beobachtungen entsprechen im Wesentlichen den Feststellungen von Hartung (1994). So konnte Hartung (1994) keinen Einfluss der Fallhöhe auf die axiale Tragfähigkeit feststellen.

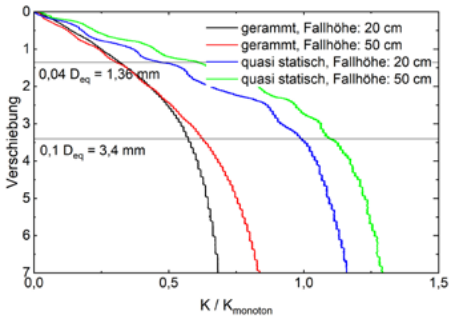

Abbildung 4-1: Widerstandssetzungslinien bei Schlagrammung - Vergleich gerammter und zyklisch quasistatischer Versuche unter Variation der Fallhöhe

Den Einfluss der Dynamik lässt sich sowohl bei 20 *cm* Fallhöhe als auch bei 50 *cm* Fallhöhe identifizieren, so sind Laststeigerungen von +36,1 % bei 20 *cm* Fallhöhe und +48,0 % bei 50 *cm* Fallhöhe bei einer Verschiebung von $s = 0{,}04\ D_{eq}$ erkennbar. Bei der definierten Grenzsetzung $s = 0{,}1\ D_{eq}$ sind Steigerungen von +42,3 % bei 20 *cm* Fallhöhe und +43 % bei 50 *cm* Fallhöhe gegenüber dem gerammten Pfählen mit dynamischen Effekten festzustellen. Ein Pfahlversagen unter der Annahme der überproportionalen Verschiebungszunahme pro Laststufe lässt sich bei einer Verschiebung von 6 *mm* für die Rammversuche feststellen.
So zeigen die Rammversuche ein früheres Versagen gegenüber den ohne Dynamik durchgeführten Versuchen. Hier lag die Grenzverschiebung zum Pfahlversagen bei *7 mm*.
Die höhere Tragfähigkeit der ohne Dynamik durchgeführten Versuche ist auf die Entspannungsphase zwischen den einzelnen Bewegungszyklen zurückzuführen. So wird zwischen jedem Zyklus eine „Ruhezeit" von zehn Sekunden eingehalten. Diese Zeit

ermöglichte es, dem Boden sich zu entspannen und umzulagern, was vermutlich zu einer höheren Mantelreibung führte. Durch die dichte Lagerung des Bodens, kommt es vermutlich während der Schlagrammung zu Auflockerungen im Mantelbereich, die sich mit größerer Schlagzahl verstärkt negativ auf den axialen Widerstand auswirkten. So kann ein Zusammenhang zwischen eingeleiteter Energie und axialem Widerstand festgestellt werden. Durch die bereits initial dichte Lagerung des Bodens wirkt sich ein hoher Energieeintrag negativ auf die Pfahltragfähigkeit aus.

4.2 Einfluss der Dynamik bei vibrierender Einbringung

In Abbildung 4-2 ist das Ergebnis eines Vibrationsversuchs und der dazugehörigen zyklisch quasi statischen Versuchspur dargestellt. Die beiden Versuche wurden in einer Lagerungsdichte $D = 0{,}57$ durchgeführt.

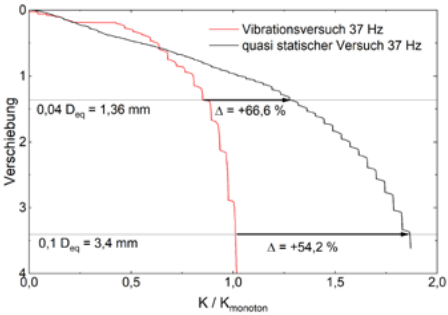

Abbildung 4-2: Widerstandssetzungslinien bei Vibrationsrammung - Vergleich vibriert zu zyklisch quasistatischer Versuch

Auch hierbei ist ein signifikanter Einfluss der Dynamik auf die axiale Tragfähigkeit festzustellen. So ist bei dem quasi statisch eingebrachten Pfählen bei einer Verschiebung von $s = 0{,}04\ D_{eq}$ ein um +66,6 % höherer Widerstand festzustellen. Bei $s = 0{,}1\ D_{eq}$ liegt die Steigerung bei +54,2 %. Durch die während der Vibrationsrammung hervorgerufenen zyklische und dynamische Effekte am Pfahlmantel wird die Mantelreibung maßgebend herabgesetzt, was zu einer geringeren Tragfähigkeit führt. Ein Pfahlversagen lässt sich beim Vibrationsversuch bei einer Verschiebung von $s = 0{,}04\ D_{eq}$ feststellen.

Im Vergleich hierzu tritt beim quasi statischen Versuch erst bei größerer Verschiebung ein Versagen ein. Die hierbei entstehende Widerstandssetzungsline zeichnet sich durch einen flacheren Verlauf aus. Es kann gezeigt werden, dass sich der Einfluss der Dynamik sowohl bei gerammten, als auch bei vibrierten Modellpfählen einen negativen Einfluss auf das Widerstandssetzungsverhalten hat.

4.3 Einfluss der Frequenz auf den axialen Widerstand bei Vibrationsrammung

Abbildung 4-3 zeigt die Widerstandssetzungskurven zweier durch Vibrationsrammung eingebrachter Modellpfähle unter Variation der Installationsfrequenz.

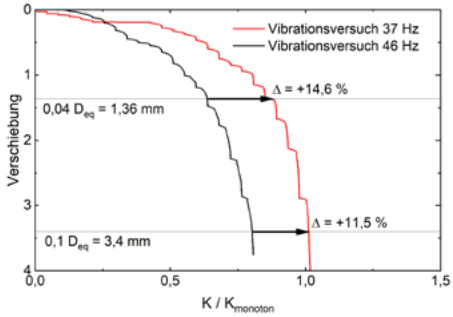

Abbildung 4-3: Widerstandssetzungslinien bei Vibrationsrammung - Einfluss der Installationsfrequenz

Die beiden Versuche sind in Sand mit einer Lagerungsdichte $D = 0{,}57$ durchgeführt. Zum besseren Vergleich sind auch diese Versuche mit einem monotonen eingepressten Versuch in derselben Lagerungsdichte normiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der mit einer Frequenz von 46 *Hz* installierte Pfahl bei einer Setzung von $s = 0{,}04\ D_{eq}$ einen um +14,6 % und bei einer Setzung $s = 0{,}1\ D_{eq}$ einen um +11,5 % höheren Pfahlwiderstand mobilisieren kann. Diese Beobachtung korreliert zunächst nicht mit den Ergebnissen von Hartung (1994), der gegenteilige Effekte in dichter Lagerung beobachtet. Allerdings liegt bei den hier präsentierten Versuchen mit $D = 0{,}57$ eine mitteldichte Lagerung vor, so dass der höhere Energieeintrag bei einer Frequenz von 46 *Hz* vermutlich größere Verdichtungen als bei der Einbringung mit 37 *Hz* verursacht hat.

Die von Hartung (1994) durchgeführten Versuche wurden in dichterer Lagerung durchgeführt, weshalb er Auflockerungen am Pfahlmantelbereich beobachten konnte. Die Annahme der zusätzlichen Verdichtung während der Vibration stützt auch die Beobachtung von einem Setzungstrichter um den Pfahl nach der Pfahinstallation.

4.4 Einfluss der Amplitude auf den axialen Widerstand bei Vibrationsrammung

Zur Ermittlung des Einflusses der bei vibrierender Installation gewählten Amplitude, wird in weiteren Modellversuchen bei einer Installationsfrequenz von 46 *Hz* die Amplitude zwischen minimaler Maschineneinstellung und maximale Maschineneinstellung variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-4 dargestellt. Die beiden Versuche wurden in Sand mit einer Lagerungsdichte $D = 0{,}57$ durchgeführt. Der mit minimaler Amplitude installierte Pfahl zeigt gegenüber dem mit maximaler Amplitude installierten Pfahl einen um +30,3 % höheren Widerstand bei einer Setzung von $s = 0{,}04\ D_{eq}$ und +39,2 % bei einer Setzung von $s = 0{,}1\ D_{eq}$. Die signifikante Zunahme des Widerstandes bei kleiner Amplitude basiert nach Labenski (2020) auf der in den Boden eingebrachten Energie. So beschreibt er in seiner Dissertation, dass die laterale Tragfähigkeit von vibrierten Monopiles von der in den Boden eingebrachten Energiemenge abhängt. Eine Übertragung dieses Effekts auf die axiale Tragfähigkeit erscheint durchaus denkbar. Mit einer geringeren Amplitude verlängert sich die Installationszeit und damit die Anzahl der auf den Boden einwirkenden Zyklen. Des Weiteren führen große Verschiebungsamplitude zu einem *friction fatigue-Effekt* wie sie beispielsweise Wichtmann (2016) in Triaxialversuchen feststellen konnte.

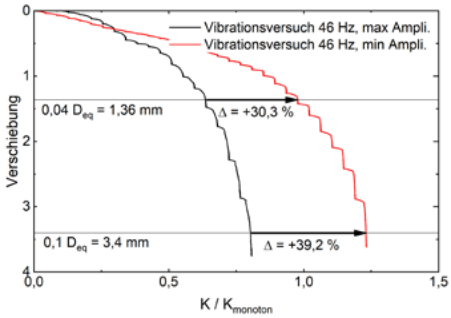

Abbildung 4-4: Widerstandssetzungslinien bei Vibrationsrammung – Einfluss der Amplitude bei Installation

Die durch größer Scherung hervorgerufenen Auflockerungen am Pfahlmantel führen zu einer Reduktion der Mantelreibung und somit zu einer Abnahme der axialen Tragfähigkeit. In Vorversuchen wurden die zyklisch quasi statischen Versuche von Vogelsang (2017) wiederholt und um größere Bewegungszyklen erweitert. Hierbei konnte ebenfalls der Effekt des geringeren Widerstandes bei größeren Bewegungsamplituden festgestellt werden. Der *friction fatigue-Effekt* ist ebenfalls von der Lagerungsdichte abhängig: Bei dichter Lagerung tritt der Effekt verstärkt auf, da keine zusätzliche Verdichtung am Pfahlmantel erzielt werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In den durchgeführten Versuchen konnte sowohl bei gerammten, als auch bei vibrierten eingebrachten Pfählen ein negativer Einfluss der Dynamik auf die axiale Tragfähigkeit festgestellt werde. Die durch die zyklischen und dynamischen Effekte hervorgerufenen Auflockerungen am Pfahlmantel führen zu einer Reduktion des axialen Widerstandes, im Abgleich zum jeweiligen Pendant ohne Dynamik. Dieser Effekt ist stark durch die initiale Lagerungsdichte beeinflusst. Befindet sich der Boden bereits in dichter Lagerung, beeinflussen die Auflockerungen den Widerstand besonders signifikant.

Hinsichtlich des Widerstandssetzungsverhaltens zeigen die gerammten Modellpfähle ein weicheres (duktileres) Verformungsverhalten als die entsprechenden zyklischen quasi statischen Versuche. Gegenteilig zu den Rammversuchen konnte bei den

Vibrationsversuchen ein „steiferes" Widerstandssetzungsverhalten, im Vergleich zu dem zyklisch quasi statischen Versuch beobachtet werden.
Der Einfluss der Vibrationsfrequenz auf die axiale Tragfähigkeit ist ebenfalls stark durch die Lagerungsdichte beeinflusst. So konnte in den in mitteldicht gelagerten Sanden durchgeführten Versuchen eine Steigerung des Widerstandes bei höherer Vibrationsfrequenz festgestellt werden.
Es konnte gezeigt werde, dass ein signifikanter Einfluss der Amplitude auf die axiale Tragfähigkeit besteht. Der Einfluss der Amplitude wird durch den *friction fatigue-Effekt* geprägt. Bei größerer Amplitude kommt es zu größeren Scherdehnungen am Pfahlmantel, was zu Auflockerungen im Mantelbereich führt und in einer Reduktion der mobilisierbaren Mantelreibung resultiert. Auch diesbezüglich ist zu erwähnen, dass dieser Effekt maßgebend von der initialen Lagerungsdichte abhängt.

In weiteren Versuchsserien wird der Effekt der Veränderung der Tragfähigkeit durch zyklische und dynamische Effekte weiter untersucht. Hierbei wird ein Fokus auf die bodenveränderten Eigenschaften der jeweiligen Installationsmethode gelegt. Hierfür wird schon jetzt, in vorlaufenden Versuchen einen Miniatur-CPT-Sondierungen eingesetzt. Ziel ist es, einen Beitrag für einen in der Praxis tauglichen Bemessungsansatz für vibrierte, axial belastete Pfähle zu leisten.

Literaturverzeichnis

Boguth, K. (1973). *Vibrationsprobleme beim Rammen und Ziehen*. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau H. 4, S. 345-347

Cudmani, R.O. (2001). *Statische, alternierende und dynamische Penetration in nichtbindigen Böden*. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 152, Dissertation

Dierssen, G. (1994). Ein bodenmechanisches Modell zur Beschreibung des Vibrationsrammens in körnigen Böden. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 133, Dissertation

EA-Pfähle (2012). *Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle" EA Pfähle*. Arbeitskreis Pfähle (AK2.1) der deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. 2. Auflage, Ernst & Sohn

Gotschol, A. (2002). *Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter und der zyklisch-dynamischer Beanspruchung*. Schriftreihe Geotechnik der Universität Kassel, Heft 12, Dissertation.

Hartung, M. (1994). *Einflüsse der Herstellung auf die Pfahltragfähigkeit in Sand*. Veröffentlichung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Braunschweig, Heft 45, Dissertation

Hertwig, A., Früh, H., Lorenz, H. (1933). *Die Ermittlung der für das Bauwesen wichtigsten Eigenschaften des Bodens durch erzwungene Schwingungen*. Veröffentlichung der Degebo, Heft 1. Berlin: Julius Springer

Klein, L. (2019). Untersuchungen zum räumlichen aktiven Erddruck bei Baugruben mit rechteckigem Grundriss. Mitteilung des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 71, Dissertation

Kühn, G. (1978). *Vibrationsrammung und Bodenbeschaffenheiten*. Baumaschinen und Bautechnik 25 Heft 9, 463-474

Kühn, G. (1980). *Abhängigkeit der Ramm- und Ziehverfahren von Bodenbeschaffenheiten*. Baumaschine und Bautechnik 27(8), 558-567

Labenski, J. (2020). *Untersuchungen zum Einbringverhalten und dem lateralem Tragverhalten unter monotoner Einwirkung von in nichtbindigen Böden vibrierend installierten Monopiles*. Veröffentlichung des Institutes für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 74, Dissertation

Lammertz, P. (2008). *Ermittlung der Tragfähigkeit vibrierter Stahlrohrpfähle in nichtbindigem Boden* Heft 35, Universität Duisburg-Essen, Dissertation

Lehane, B., M., White, D.J. (2005). *Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand*. Canadian Geotechnical Journal 42(4), 1039-1052

Massarsch, K.R. (1992). *Static and dynamic soil displacements caused by pile driving*. Proceedings of the 14th International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles, Den Haag

Massarsch, K.R., Westerberg, E. (1995). *Frequencyvariable vibrators and their application to foundation engineering*. 20th Annual Conference on Deep Foundations. Deep Foundation Institute, (CPT 95), S. 14

Massarsch, K.R. (2002). *Effects of vibratory compaction* TransVib 2002 – International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction, Louvain-La, Belgien, 33-42

Massarsch, K.R. (2016). *Grundlagen der Rüttelverdichtung* Beiträge zum 31. Christian Veder Kolloquium, Graz, Gruppe Geotechnik, Nr. 56, 109-125

Massarsch, K.R., Fellenius, B.H., Bodare, A. (2017). *Fundamentals of the vibratory driving of piles and sheet piles*. Geotechnik 40(2), 126-141

Rodger, A.A., Littlejohn, G.S. (1980). *A study of vibratory driving in granular soils*. Géotechnique 30(3), 269-293

Schmid, W.E. (1970). *Low Frequency Pile Vibrators*. Conference on Design and Installation of pile Foundations of Cellular Structures, Lehigh University, S. 257-265

Schwab, J.P., Bhatia, S. K. (1985). *Pile driving influence on surrounding soil and structures* 4, S. 641-684

Triantafyllidis, Th. (2003). *Bodenverflüssigung infolge zyklischer Belastung* GEOLEX, Heft 2, 5-20

Vogelsang, J. (2016). *Untersuchungen zu den Mechanismen der Pfahlrammung*. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 182, Dissertation

Wersäll, C. (2013). *Influence of Frequency on Compaction of Sand in Small-Scale Tests*, Department of Civil and Architectual Engineering, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology

Westerberg, E., Massarsch, K.R., Eriksson, K. (1995). *Soil resistance during vibratory pile driving. International Symposium on Cone Penetration Testing*. Swedish Geotechnical Society, (CPT 95), Linkoping, 241-250

Wichtmann, T. (2016). *Soil behaviour under cyclic loading: experimental observations, constitutive description and applications*. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 181, Habilitation

Wienholz, B. (1998). *Tragfähigkeit von verdrängungspfählen in Sand in Abhängigkeit von der Einbringung*. Veröffentlichung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Braunschweig, Heft 57, Dissertation

Woods, R.D. (1997). *Dynamic Effects of Pile Installations on Adjacent Structures* National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., USA