

Mitteilung des Instituts
für Geomechanik und Geotechnik
Technische Universität Braunschweig
Heft Nr. 113



Pfahl - Symposium 2023

Band 1

Fachseminar: 16./17. Februar 2023

Organisation:

Akad. Direktor Dr.-Ing. Jörg Gattermann

Braunschweig 2023

Herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann

Eigenverlag: **Institut für Geomechanik und Geotechnik**
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 51 b · 38106 Braunschweig
Telefon : (0531) 391-62000
Fax : (0531) 391-62040
E-Mail : igg@tu-bs.de
Internet : www.igg-tubs.de
ISBN : 978-3-948141-05-9

Druck: **DruckVoll UG Anne Seckelmann**
Weinbergweg 40 a · 38106 Braunschweig
Telefon : (0531) 390 679 64
E-Mail : info@druckvoll-bs.de
Internet : www.druckvoll-bs.de

Gedruckt auf 80g/qm Soporset Premium Offset
EU Ecolabel und FSC® zertifiziert

Mitteilung des Instituts
für Geomechanik und Geotechnik
Technische Universität Braunschweig
Heft Nr. 113



Pfahl-Symposium 2023

Band 1

Fachseminar: 16.-17. Februar 2023

Organisation:
Akad. Direktor Dr.-Ing. Jörg Gattermann

Braunschweig 2023

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann

Einfluss der Herstellparameter auf das axiale Tragverhalten von Vibrationspfählen

Bastian Hoffmann, Christian Moormann

Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Deutschland

1 Einleitung

Fertigpfähle werden in der Regel durch Schlagrammung mit entsprechend dimensionierten Rammhären eingebracht. Mit dem alternativen Einsatz des Vibrationsverfahrens sind signifikante ökonomische und ökologische Vorteile verbunden, da der Schall an der Quelle reduziert und ein deutlich schnelleres und ermüdungsärmeres Einbringen ermöglicht wird. Dies ist in der Ingenieurpraxis u.a. von besonderer Bedeutung für im Wasser- und Offshore-Bau eingesetzte Stahlrohrpfähle, aber auch für weitere Anwendungen wird die vibrierende Einbringung verstärkt angestrebt.

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. Nach 'EA-Pfähle', 5.4.4.2(1) [DGGT, 2012] ist der axiale Pfahlwiderstand (Erfahrungswerte) vibrierter Fertigpfähle gegenüber gerammten Pfählen abzumindern, wobei der Betrag der Abminderung im Einzelfall festzulegen ist. Nur wenn ein Pfahl auf den letzten $8 D_{eq}$ in den tragfähigen Boden gerammt wird, kann die Abminderung für die Spitzendruckwerte entfallen kann.

Im vorliegenden Beitrag wird der aktuelle Kenntnisstand zum Einfluss des Herstellungsvorganges von vibrierend eingebrachten Fertigteilpfählen auf die Bodenzustandsgrößen und auf das axiale Pfahltragverhalten vorgestellt und auf der Basis neuer experimenteller Untersuchungen fortgeschrieben. Dabei wird unter anderem auch der wesentliche Einfluss der bei der Vibrationsrammung gewählten Herstellparameter auf das axiale Pfahltragverhalten aufgezeigt.

Mittels Modellversuchen im geometrischen Maßstab 1:10 wird zunächst das Einbringverhalten und die dabei mobilisierte initiale Mantelreibung und Spitzendruck während des vibrierenden Installationsvorganges untersucht. Dabei werden die dynamischen Effekte von den

zyklischen Effekten der Vibrationsrammung durch einen Versuchsaufbau abgegrenzt, der es ermöglicht, die Auf- und Abwärtsbewegung während der Vibrationsrammung aufzuzeichnen und in einem zweiten Versuch in zeitlicher Verzögerung zu reproduzieren. Anschließend werden die Pfähle im Rahmen einer statischen Probelastung bezüglich ihres axialen Tragverhaltens hin untersucht. Um die durch die Vibrationsrammung bedingten Änderungen im Boden zu beschreiben werden vor und nach der Pfahlherstellung Drucksondierungen im Nah- und Fernbereich des einvibrierten Pfahls durchgeführt.

Auf der Basis der Versuchsergebnisse wird der Einfluss der Herstellparameter auf das axiale Pfahltragverhalten von vibrierten Fertigpfählen identifiziert und erste Empfehlungen zur Wahl der Herstellparameter formuliert.

2 Stand der Forschung

2.1 Ergebnisse ausgewählter Feldversuche im Hinblick auf die axiale Tragfähigkeit gerammter und vibrierter Pfähle

In den vergangenen Jahrzehnten sind vereinzelt Feldversuche dokumentiert, die einen direkten Vergleich des Widerstandes gerammter und vibrierter Pfähle ermöglichen. Im Folgenden soll auf die wichtigsten Abhandlungen eingegangen werden, wobei die wichtigsten Ergebnisse in Tabellenform dargestellt werden, um einen Vergleich zu ermöglichen.

So berichtet Mazurkiewicz [1975] von 22 Spannbetonpfählen, die zu gleichen Teilen gerammt und vibriert installiert wurden. Der Baugrund gliedert sich in 0,9-1,5 m mächtige Auffüllung, unterlagert von Torf in einer Mächtigkeit von 0,9-1,8 m, gefolgt von tragfähigen Schichten in Form von Fein- bis Mittelsanden sowie sandigen Kiesen, die wiederum ab 5 m unter Gelände von schluffigen Tonen und Schluff unterlagert werden.

Die eingebrachten Pfähle hatten bei einem Durchmesser von 34 cm Längen zwischen 13 m und 27 m. Nach der Pfahlinstallation erfolgte eine axiale Pfahlprobelastung. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der axialen Pfahlprobebelastungen nach [Mazurkiewicz, 1975]

Pfahlpaar	Länge [m]	Pfahlwiderstand		Verhältnis gerammt/vibriert
		vibriert [kN]	gerammt [kN]	
1	13	343	824	2,4
2	13	412	471	1,14
3	13	637	834	1,3
4	17	392	618	1,58
5	17	451	1108	2,46
6	18	255	1030	4,04
7	22	922	1422	1,54
8	23	490	736	1,50
9	23	686	1324	1,93
10	23	343	588	1,71
11	27	834	1030	1,24

In den vergleichenden Feldversuchen zeigte sich, dass der Widerstand der vibrierten Pfähle im Schnitt nur rund 60 % des Widerstandes der gerammten Pfähle erreicht. Zusätzlich wurde der Pfahlwiderstand in Abhängigkeit von der Standzeit untersucht. So hat die Standzeit bei beiden Installationsarten einen positiven Einfluss auf den Pfahlwiderstand, obgleich sich dieser nicht von der Installationsart beeinflusst lässt.

Jeyaplan [1983] berichtete von axialen Pfahlprobebelastungen an zwei Pfahlpaaren, jeweils gerammt und vibriert in unterschiedlichen Baufeldern. Die Pfähle bestanden aus Stahlrohren, die nach der Installation mit Ortbeton vergossen wurden. Das eine Pfahlpaar hatte einem Durchmesser von 152 mm eine Länge von 12,5 m und, das andere Pfahlpaar eine Länge von 25 m wobei die untern 9,1 m einen Durchmesser von 305 mm, die oberen 15,9 m ein Durchmesser von 337 mm hatten. Die Baugrundverhältnisse zeigten sich im ersten Baufeldfeld wie folgt: Die oberste Schicht bestand aus 9°m mächtigem Ton und Feinsand, unterlagert von 1,5 m dicken Grobsanden und Kiesen sowie Ton. Des Weiteren schlossen sehr dicht gelagerte Sande, Kiese und Geröll an.

Im zweiten Baufeld standen 7,3 m mächtige Mittel- bis Feinsande und wenig Feinkies an. Diese wurden von 5,5 m Feinsand unterlagert. Hierunter lagen Schichten von 3,0 m

mächtigen schwach schluffigen Feinsand. In größerer Tiefe lagen ebenfalls Schluffe und Feinsande vor.

Die Ergebnisse der axialen Pfahlprobelastungen zeigten einen um 33 % (erstes Baufeld) bzw. 27 % (zweites Baufeld) höheren Widerstand der vibrierten gegenüber den gerammten Pfählen.

Briaud [1990] berichtet von sechs H-Profil-Stahlpfählen, die zu gleichen Teilen schlagend und vibrierend installiert wurden. Im Anschluss erfolgte eine axiale Pfahlprobelastung. Der Baugrund bestand aus 1,4 m starkem sandigem Kies, unterlagert von 12,2 m aufgeschüttetem Sand gefolgt von mittelsteifen schluffigen Ton. Zwischen 13,7 m und 15,2 m unter GOK befand sich zerklüftetes Serpentinegestein.

Die HP14x73 H-Profil-Stahlpfähle wurden instrumentiert [Trucker & Briaud 1988] und bis in eine Tiefe von 9,1 m entweder mit Schlagrammung oder Vibration installiert.

Pfahl 1 wurde zunächst eingerammt und 30 Tage nach Installation axial auf Druck probebelastet (1I). Nach einer Standzeit von 67 Tagen wurde eine zweite Belastung (1IR) durchgeführt. Darauf folgend wurde Pfahl 1 gezogen und in eine Entfernung von 6°m vibrierend installiert. Nach 33 Tagen erfolgte die axiale Probebelastung (1V) und nach 63 Tagen die zweite (1VR). Pfahl 2 wurde schlagend installiert und nach 65 Tagen axial probebelastet (2I), im Anschluss gezogen und vibrierend installiert. Die axiale Belastung 2V erfolgte 64 Tage nach der Installation. Pfahl 3 wurde nach der rammenden Installation nach 12 Tagen axial belastet (3I). Nach dem Ziehen und der erneuten Installation erfolgte 13 Tage später die axiale Belastung 3V. Die Ergebnisse der axialen Probebelastungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Grenztragfähigkeit bei $s/D = 0,1$ im Durchschnitt bei gerammten und vibrierten Pfählen etwa gleich groß ist. Die Verteilung der Last unterscheidet sich jedoch stark von der Installationsmethode, so konnte Briaud et al. [1990] feststellen, dass bei gerammten Pfählen 51 % der Last über die Pfahlspitze abgetragen wurde, hingegen bei einem Vibrationspfahl der Spitzendruckanteil lediglich bei 13 % lag. Des Weiteren wurde bei vibrierten Pfählen ein weiches Tragverhalten identifiziert.

Tabelle 2: Ergebnisse der axialen Pfahlprobelastungen nach [Briaud et al., 1990]

Pfahl	Installationsmethode	Grenzlast bei D/10 + PL/AE	Last bei 6,35 mm	Setzung bei $Q_{ult}/2$	Anfangssteifigkeit
		[kN]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
1I	gerammt	712	534	2,6	135
1IR	gerammt	756	560	2,4	158
2I	gerammt	778	583	2,2	174
3I	gerammt	712	534	2,2	159
Mittel gerammt		740	553	2,4	157
1V	vibriert	801	454	4,6	87
1VR	vibriert	645	489	2,6	123
2V	vibriert	578	316	4,7	62
3V	vibriert	890	400	8,0	56
Mittel vibriert		728	415	5,0	82
<u>gerammt</u> vibriert		1,02	1,33	0,48	1,91

In Mosher [1990] wird von Feldversuchen an gerammten sowie an vibrierten Pfählen berichtet. Die Baugrundverhältnisse im Testfeld Schleuse „Arkansas River Damm Nummer 4“ bestanden aus 4,5 m mächtigen Schluffen und Tonen unterlagert von dicht gelagerten Fein- bis Mittelsande bis in eine Tiefe von 30,5 m. Diese wiederum wurden in Tiefen zwischen 9,1 m und 15,2 m von geringmächtigen Schluffen und Tonlagen durchzogen. Die Fein- und Mittelsande wurden von Basisschichten aus tertiärem Ton unterlagert. Zur Versuchsvorbereitung wurde die oberste Schicht auf Schluff und Ton abgetragen, so dass die Testpfähle in den Sand installiert wurden.

Als Versuchspfähle wurden Fertigpfähle aus Stahlbeton mit quadratischem Querschnitt, runde Stahlrohrpfähle sowie H-Profil-Stahlpfähle des Typs 14 BP 73 eingesetzt. Der äquivalente Durchmesser der Pfähle lag jeweils bei 406 mm, die Einbindetiefe durchschnittlich bei 16°m.

Zur Pfahlherstellung kamen drei verschiedene Installationsgeräte zum Einsatz: zwei Schlaghämmer der Firma Vulcan mit einer Schlagenergie von 33,1 kNm und einem Fallgewicht von 3629 kg (Modell 80 C) bzw. einer Schlagenergie von 48,8 kNm und ein Fallgewicht von

6350 kg (Modell 140 C). Die vibrierten Pfähle wurden mit Hilfe eines hochfrequenten Bodine Sonic Hammers installiert.

Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche sowie die ermittelten axialen Pfahlwiderstände. Hierbei zeigt sich beim Vergleich gerammt zu vibriert eine Abhängigkeit der Pfahlart und des Installationsgerätes. So konnte bei gerammten Pfählen teilweise höhere aber auch niedrigere Pfahlwiderstände mobilisiert werden.

Tabelle 3: Ergebnisse der axialen Pfahlprobelastungen am Testfeld „Arkansas River Damm Nummer 4“ nach [Mosher, 1990]

Versuch	Pfahlart	Äquivalenter Pfahldurchmes- ser [mm]	Einbinde- tiefe [m]	Rammge- rät	Grenzlast [kN]	Verhältnis gerammt/vibriert
2	Stahlrohr	406	16,1	140 C	1735	
2X	Stahlrohr	406	16,1	140 C	1868	1,13
10	Stahlrohr	406	16,2	Bodine	1601	
4	Spannbe- ton	406	12,3	140 C	1512	
5	Spannbe- ton	406	15,5	140 C	2135	1,4
11	Spannbe- ton	406	11,8	Bodine	1334	
6	14 BP 73	406	12,2	80 C	1246	
7	14 BP 73	406	15,9	80 C	1690	0,79
9	14 BP 73	406	16,2	Bodine	1868	

Im Weiteren wird in Mosher [1990] von einem zweiten Testfeld an der Arkansas River Schleuse am Damm Nummer 3 berichtet. Die Baugrundverhältnisse setzten sich wie folgt zusammen: bis in eine Tiefe von 9°m stand Schluff und magerer Ton an, der von Fein- bis Mittelsanden in einer Mächtigkeit von 27,4 m bis 39,6 m unterlagert werden. Zur Tiefe schlossen tertiäre, steife Tone und feste, überkonsolidierte Tone an. Durch einen Aushub bis 15,2 m unter GOK wurde die Sandschicht freigelegt und das Versuchsfeld vorbereitet.

Als Versuchspfähle wurden die oben beschriebenen H-Profil-Stahlpfähle des Typs 14 BP 73 mit einem äquivalenten Pfahldurchmesser von 406 mm verwendet. Die Einbindetiefe

varierte zwischen 12,9 m und 22,3 m. Als Installationsgerät wurde der oben beschriebene Schlaghammer 140 C sowie der niederfrequente Vibrationshammer der Firma Foster des Typs FR 2-50 verwendet.

Die installierten Pfähle wurden mittels Probelastungen hinsichtlich ihrer axialen und lateralen Tragfähigkeit untersucht. Zusätzlich wurden Zugbelastungen durchgeführt. In Summe wurden an fünfzehn verschiedenen Pfählen axiale Druckversuche, 10 laterale Probe- sowie 7 Zugbelastungen durchgeführt.

Während der vibrierenden Pfahlinstallation kam es zu Auflockerungen des Sandes in Pfahlnähe, so dass sich zwischen den Flanschen Hohlräume mit Tiefen von 1,5 m bis 3,1 m bildeten, die aufgefüllt und teilweise verdichtet wurden. Bei den Pfählen 3A und 3B wurden hierfür Betonverdichter eingesetzt. Beim Pfahl 2A wurde ein Sand- Wassergemisch als Füllstoff verwendet, jedoch nicht verdichtet. Bei Pfahl 9 wurde das Sand- Wassergemisch zusätzlich verdichtet, hieraus kann sich eine signifikant höhere Tragfähigkeit ableiten. Die Ergebnisse der axialen Pfahlprobelastung auf Druck sind in Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4: Ergebnisse der axialen Probelastung am Testfeld Arkansas River Schleuse, Damm Nummer 3 nach [Mosher, 1990]

Versuch	Einbindetiefe [m]	Rammgerät	Grenzlast [kN]	Verhältnis gerammt/vibriert
1	12,9	FR 2-50	756	
2	13,0	140 C	1192	
2A	18,8	140 C	1646	
3	14,2	FR 2-50	934	
3A	14,2	FR 2-50	1068	
3B	18,8	FR 2-50	1290	1,48
5	16,1	140 C	1334	
6	19,2	140 C	1557	
7	22,3	140 C	1913	
9	13,1	FR 2-50	1130	

Die Ergebnisse der axialen Belastung zeigen, dass im Mittel die vibrierend in den Sand eingebrachten Pfähle eine geringere axiale Tragfähigkeit aufweisen als gerammte Pfähle.

Lammer [2008] berichtet von Feldversuchen an gerammten und vibrierten Pfählen beim Neubau des Emspiers. Hierzu wurden jeweils zwei Pfahlpaare in insgesamt drei Pfahlgruppen (A, B, C) an drei Standorten im Emder Außenhafen eingebracht und axial probebelastet. Ziel war es, das Tragverhalten von mit unterschiedlichen Installationsmethoden eingebrachten offenen Stahlrohren mit einem Durchmesser von 914,2 mm und einer Wandstärke von 12,7 mm sowie die Auswirkung auf die Pfropfenbildung zu untersuchen.

Pfahlgruppe A wurde in einen 8 m mächtige Weichschicht eingebracht, die von 4 m mächtigem mitteldichtem mittelsandigem Feinsand unterlagert wurde. Darunter folgte mit einer Mächtigkeit von 15 m grobsandiger Fein- und Mittelsand, dem bis in eine Tiefe von 30 m unter GOK feinkiesiger Grobsand folgte. Der Baugrundaufbau an den Standorten für die Pfahlgruppen B und C setzt sich ähnlich zusammen. Zuoberst stand eine 7 m mächtige Weichschicht an, unter welcher eine 6 m mächtige mittelsandige Feinsand-Schicht lag. Darauf folgte grobsandiger Fein- und Mittelsand mit einer Mächtigkeit von 10 m. Beim Standort für Pfahlgruppe B wurden darunter feinkiesiger Grobsand, bei Pfahlgruppe C mittelsandiger Feinsand in mitteldichter Lagerung bis in eine Tiefe von 30 m unter GOK erkundet. An allen drei Pfahlgruppen lag der Wasserspiegel bei Mittlerem Tidehochwasser bei 4,5 m ü. Gel. Und bei Mittlerem Tideniedrigwasser bei 1,3 m ü. Gel.

Die Pfähle aller Pfahlgruppen wurden mit einer dynamischen Probelastung untersucht. Die zugehörigen Ergebnisse sind Tabelle 6 zu entnehmen. Hierbei entspricht L_E = Einbindetiefe nach der Messung, L_d = Einbindetiefe in die tragfähige Sandschicht, Δt = Standzeit, R_m = gemessener Pfahlwiderstand, α = Anteil des Pfahlmantelwiderstandes an R_m .

Tabelle 5: Pfahlängen und Einbindetiefe nach [Lammertz, 2008]

Pfahlgruppe	Pfahlpaar	Pfahl	Einbringmethode	Länge [m]	Einbindetiefe [m]
A	A1	R 2	gerammt	27,5	21,5
		R 3v	vibriert		
	A2	R 4v	gerammt	31,3	27,3
		R 5	vibriert		
B	B1	R 11v	gerammt	31,3	25,3
		R 12	vibriert		
	B2	R 14v	gerammt	31,3	20,5
		R 15v	vibriert		
C	C1	R 44v	gerammt	31,3	20,5
		R45v	vibriert		
	C2	R46	gerammt	31,3	25,3
		R47v	vibriert		

Tabelle 6: Ergebnisse der dynamischen Pfahlprobelastung nach [Lammertz, 2008]

Pfahl- gruppe	Pfahl- paar	Pfahl	L_E [m]	L_d [m]	Δt [d]	R_m [kN]	α [-]
A	A1	R 2	20,5	10,0	12	2054	0,74
		R3v	20,4	10,0	15	2286	0,73
	A2	R 4v	22,8	15,8	15	4753	0,84
		R 5	22,4	15,8	15	5251	0,82
B	B1	R11v	24,7	18,2	7	5531	0,82
		R 12	24,4	18,2	7	5561	0,86
	B2	R 14v	20,5	14,5	7	3504	0,69
		R 15v	20,7	14,5	7	3857	0,73
C	C1	R 44v	18,8	13,4	19	5106	0,78
		R 45v	19,4	13,4	19	4625	0,77
	C2	R 46	24,4	18,0	9	5653	0,86
		R 47v	24,3	18,0	9	5316	0,85

Die Pfahlpaare A1, A2, B1 und C2 wurden von Lammertz [2008] vergleichend betrachtet. So ergab sich beim Pfahlpaar A1, dass der vibrierte Pfahl eine höhere Tragfähigkeit als der gerammte aufwies. Bei den anderen Pfahlpaaren wiesen die gerammten Pfähle eine geringfügig höhere Tragfähigkeit auf als die vibrierten Pfähle. Die Unterschiede lagen im Bereich der Mantelreibung bei weniger als 10 %, im Bereich des Spitzenwiderstandes bei etwa 20 %. Lammertz [2008] konnte in den ausgewerteten Feldversuchen folgende Zusammenhänge feststellen:

- Der Einfluss der Vibrationsrammung wirkt sich im Vergleich zur Schlagrammung bei Pfählen, die Lasten hauptsächlich über Mantelreibung abtragen, nur geringfügig auf die Tragfähigkeit aus.

- Im Vergleich zur Schlagrammung fiel die Tragfähigkeit von Pfählen, die unter Einsatz der Vibrationsrammung in locker bis dicht gelagerten Sand installiert wurden, etwas höher aus.
- Bei dicht bis sehr dicht gelagerten Sanden besaßen die gerammten Pfähle im Vergleich zu den vibrierten etwas höhere Widerstände.
- Je niedriger die Eindringgeschwindigkeit des vibrierten Pfahles bei der Installation ist, umso geringer fielen die Unterschiede in der Tragfähigkeit im Vergleich zum gerammten Pfahl aus.

In der Literatur finden sich noch weitere Quellen, die einen Vergleich zwischen gerammten und vibrierten Pfählen zulassen. So werden in Păunescu & Mateescu [1971] die Ergebnisse von axial belasteten vibrierten und gerammte Stahlbetonpfählen vorgestellt. Hierbei zeichnet sich eine im Durchschnitt 25 % höhere Tragfähigkeit der gerammten Pfähle ab. Gerammte und vibrierte Pfähle in Sanden wurden von Braaker [1986] anhand verschiedener Projekte analysiert. Hierbei variierten Bodenzusammensetzungen und Lagerungsdichten jedoch von Fall zu Fall. Es konnten 10 % bis 40 % geringere Tragfähigkeiten bei vibrierten Pfählen festgestellt werden. Den Einfluss der Installationsmethode an Doppelbohlen untersuchte Borel et al. [2002]. Die Bohlen wurden in Geschiebemergel und dicht gelagerten Kiesen eingebracht. Die Tragfähigkeit fiel im Geschiebemergel um 35 % höher bei gerammten Bohlen als bei vibrierten; in Kies lag der Unterschied lediglich bei 25 %. Rocher-Lacoste et al. [2004] stellten an Ramppfählen ebenfalls eine um 30 % bis 40 % höhere Tragfähigkeit an gerammten Pfählen gegenüber vibrierten Pfählen fest.

Die Ergebnisse zeigen, dass in der Mehrzahl der durchgeführten Feldversuche die axiale Tragfähigkeit gerammter Pfähle höher liegt als bei vergleichbaren Vibrationspfählen. Die Verteilung des Mantelwiderstandes und des Spitzenwiderstandes fielen jedoch unterschiedlich aus; so berichtete Lammertz [2008] von nur geringen Unterschieden zwischen Vibrations- und Ramppfählen. Briaud et al. [1990] stellten hingegen fest, dass sich bei gerammten Pfählen der Pfahlwiderstand zu etwa gleichen Anteilen auf Mantel- und Fußwiderstand verteilte, die von ihm getesteten Vibrationspfähle hingegen lediglich 13 % ihrer Last über die Pfahlspitze in den Baugrund abtrugen. Des Weiteren identifizierte er ein weiches Tragverhalten vibrierter Pfähle.

Abbildung 1 zeigt eine Erweiterung der Zusammenstellung aus Lammertz [2008]. Hierbei sind gerammte und vibrierte Versuchsergebnisse unter jeweils vergleichbaren Randbedingungen gegenübergestellt.

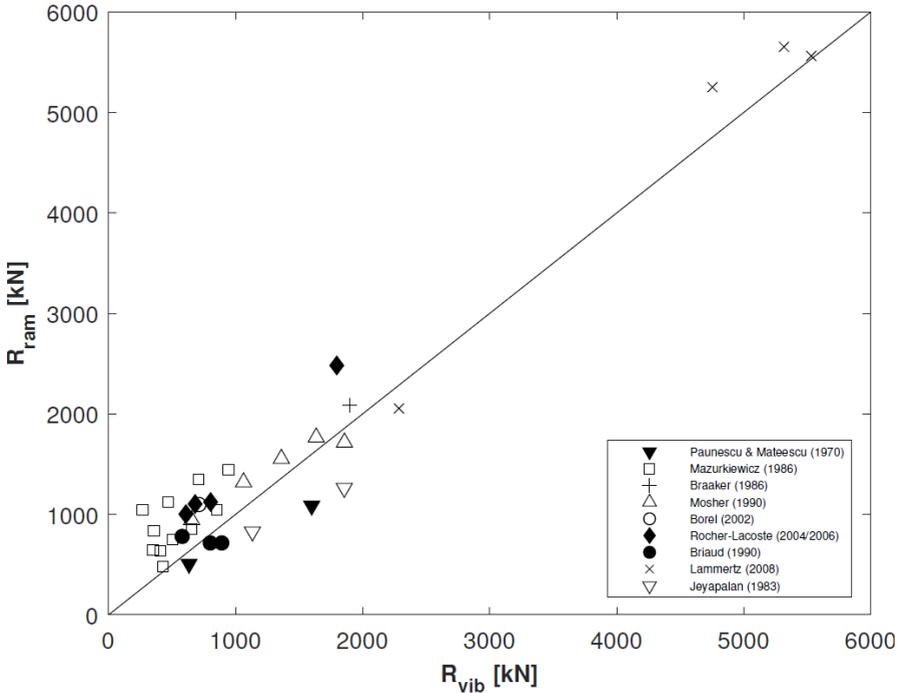


Abbildung 1: Pfahlwiderstände gerammter und vibrierter Pfähle bei Feldversuchen im Vergleich, erweiterte Abbildung nach Lammertz [2008]

3 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des qualitativen und quantitativen Einflusses der Herstellparameter auf das axiale Tragverhalten von vibrierend eingebrachten Fertigpfählen wurden am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart 1g-Modellversuche im Maßstab 1:10 geplant und durchgeführt. Der vereinfachte Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Versuchspfahl wurde vibrierend und quasi-statisch in den Boden installiert. Bei der quasi-statischen Pfahlinstallation wird die Bewegungsspur eines vibrierend installierten Pfahls zeitlich stark verzögert wiederholt und somit ohne den Einfluss dynamischer Kräfte installiert.

Die skalierten Modellversuche wurden in einem rechteckigem 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 zu Behälterrand und einen vertikalen Abstand von 17,5 D vom Pfahlfuß zum Boden des Behälters. Während der Installation wird die Verschiebung des Pfahls sowie die Normalkräfte im Pfahl als auch der Erddruck am Behälterboden gemessen. Die Dehnmessstreifen befinden sich in elf Ebenen entlang des Pfahlmantels. Die Pfahlspitzenkraft wird separat gemessen. Mittels einer am Pfahlkopf angebrachten Kraftmessdose kann zusätzlich der Pfahlwiderstand während der axialen Belastung ermittelt werden. Zusätzlich wird die Pfahlkopfverschiebung über die gesamte axiale Belastung aufgezeichnet.

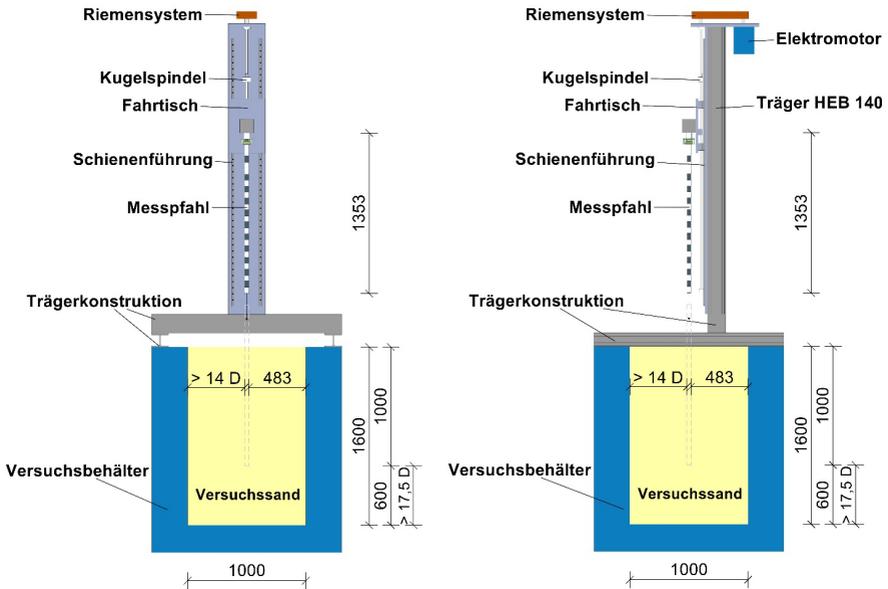


Abbildung 2: Frontalansicht des Versuchstandes (links), Seitenansicht des Versuchstandes (rechts)

Vor der Pfahlinstallation wird eine Drucksondierung zur Bestimmung der initialen Lagerungsdichte durchgeführt. Nach der axialen Belastung wird der Einfluss der Installationsmethode auf die Bodenzustandsgrößen durch im Abstand von 2 D, 4 D, 6 D, 8 D, 10 D und 12 D zum Pfahlmantel ausgeführte Drucksondierungen untersucht.

3.1 Versuchssand

Der verwendete Modellsand wurde für die Vibrationsversuche und die zugehörigen zyklischen quasi-statischen Versuche trocken mit einer Lagerungsdichte von $I_D = 0,35$ und $I_D = 0,15$ rieselnd eingebaut.

3.2 Versuchspfahl

Als Prototyp im Realmaßstab dient ein 10 m langer Fertigrammpfahl mit quadratischen Querschnittsabmessungen von 0,35 m x 0,35 m. Als Modellpfahl wurde ein runder Aluminiumpfahl gewählt, die Abmessungen könne Tabelle 7 entnommen werden. Der Durchmesser wurde D_{eq} zu einem runden Pfahldurchmesser skaliert.

Tabelle 7: Abmessungen des Modellpfahls

Eigenschaften	Abmessungen	Einheit
Durchmesser	0,034	(m)
Länge	1,5	(m)
Einbindetiefe	1,0	(m)
Wandstärke	0,004	(m)

3.3 Versuchsdurchführung

Vorrangiges Ziel der Modellversuche ist es, den Einfluss der dynamischen Installation durch die Vibrationsrammung auf die axiale Tragfähigkeit 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 Installation des Modellpfahls bis auf Endtiefe. Anschließend erfolgte die axiale Probelastung. In einem zweiten Versuch, dem sogenannten „zyklischen quasi-statischen Versuch“ wurde die während der vibrierenden Installation aufgezeichnete Bewegungsspur in absolute Koordinaten umgewandelt und mit Hilfe des elektronischen Schrittmotors in Abbildung 2 „in Zeitlupe“ und ohne dynamische Effekte nachgebildet.

Auch der mit diesem Verfahren installierte Pfahl wurde im Anschluss axial belastet. Zur Überführung der Bewegungsspur während der vibrierenden Pfahlinstallation wurde ein spezieller MATLAB-CODE entwickelt, welcher 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 Geschwindigkeit wurde dabei so langsam gewählt, dass Trägheitseffekte ausgeschlossen werden können.

Die axiale Belastung erfolgte lastgesteuert schrittweise um 50 N alle drei Minuten. Als Versagen wurde die Grenzsetzung $s = 0,1 D$ definiert.

Zur Bestimmung der initialen Lagerungsdichte und der Bodenveränderung aufgrund der Pfahlinstallation wurden Drucksondierungen vor der Pfahlinstallation und nach der axialen Belastung durchgeführt. In Abbildung 3 ist die Anordnung der Drucksondierungen im Grundriss dargestellt.

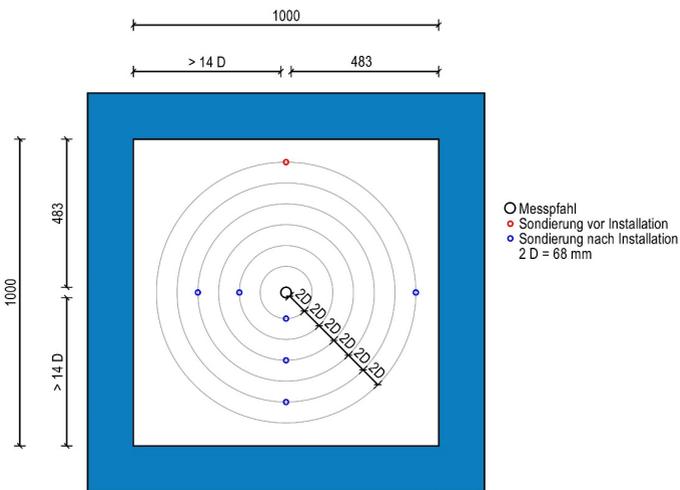


Abbildung 3: Draufsicht Versuchstand mit Anordnung der Drucksondierungen

4 Versuchsergebnisse

4.1 Abhängigkeit der axialen Tragfähigkeit von der Frequenz

In Abbildung 4 sind die Widerstandssetzungslinien für mit unterschiedlichen Frequenzen vibrierend eingebrachten Modellpfähle in lockerer Lagerungsdichte (links) und für die äquivalenten quasi-statischen Versuche mit gleicher Bewegungsspur rechts dargestellt. Die Versuche zeigen bei der vibrierenden Installation eine deutliche Abhängigkeit des

Pfahlwiderstandes von der Frequenz, wobei die Tragfähigkeit mit zunehmender Frequenz zunimmt. Dieser Effekt lässt sich für die lockere Lagerung damit erklären. Dass bei den höherfrequenten Versuchen eine größere Installationsenergie in den Boden eingeleitet wird und hier zu einer Verdichtung führt. Des Weiteren erfährt der Boden im Mantelbereich bedingt durch die höhere Frequenz mehr Scherbewegungen, wodurch sich der Boden um den Mantelbereich vermutlich stärker verdichtet.

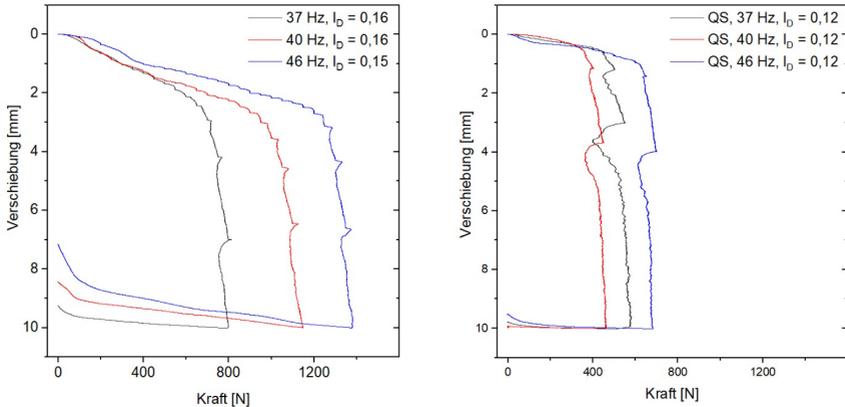


Abbildung 4: Widerstands-Setzungskurven für Vibrationsversuch (links) und quasi-statischer Versuch in lockerer Lagerung (rechts)

Dieser Effekt zeigt sich in den Ergebnissen von in geringem Abstand zum Pfahlmantel durchgeführten Drucksondierungen sowie im Abgleich mit den Widerstandssetzungslinien der quasi-statischen Versuche. Hierbei ist festzustellen, dass der quasi-statische Versuche mit der Bewegungsspur des 40-Hz-Versuches die geringste Tragfähigkeit aufweist, gefolgt von den quasi-statischen Versuchen mit der Bewegungsspur des 37-Hz- und des 46-Hz-Versuchs. Hierbei zeigt sich, dass der dynamische Einfluss sich negativ auf die Tragfähigkeit auswirkt.

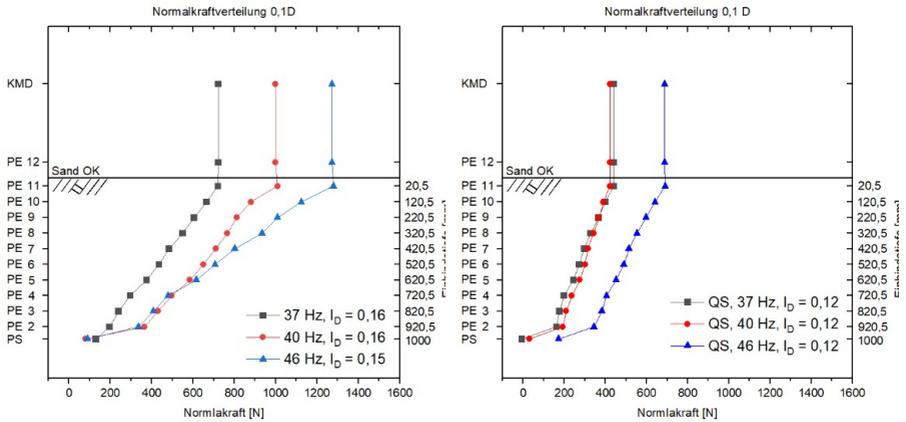


Abbildung 5: Verlauf der Normalkraft über die Pfahltiefe im Messpfahl in lockerer Lagerung für eine Pfahlverschiebung von 0,1 D und vibrierender Pfahlinstallation (links) und quasi-statischer Pfahlinstallation (rechts)

Die Verteilung der Normalkraft bei einer Verschiebung von 0,1 D für die Vibrationsversuche in lockerere Lagerung sowie die quasi-statischen Versuche mit selber Bewegungsspur sind in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei zeigt sich für beide Versuchsarten eine nahezu gleiche Verteilung des Pfahlwiderstandes auf Spitzenwiderstand und Mantelreibung. So entfällt auf die Pfahls Spitze im Durchschnitt 11 % des Pfahlwiderstandes sowohl bei vibrierend als auch bei äquivalent quasi-statisch eingebrachten Pfählen. Die restlichen 89 % der Einwirkung werden nahezu linear über die Tiefe am Pfahlmantel abgetragen.

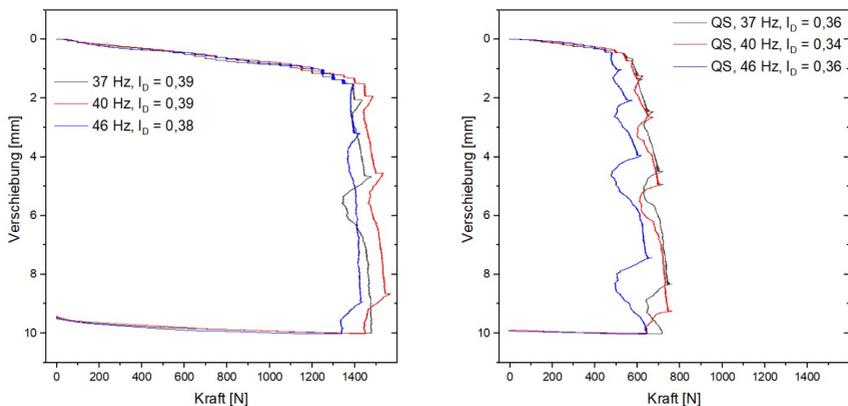


Abbildung 6: Widerstands-Setzungskurven für Vibrationsversuche in mitteldichter Lagerung (links) und quasi-statischer Versuch in mitteldichte Lagerung (rechts)

In Abbildung 6 sind die Widerstandssetzungslinien der Vibrationsversuche in mitteldichter Lagerung (links) zu sehen. Rechts die dazugehörigen quasi-statischen Versuche ohne dynamischen Einfluss bei gleicher Bewegungsspur. Anders als in lockerer Lagerung lässt sich keine eindeutige Frequenzabhängigkeit der Pfahltragfähigkeit ausmachen. Auffällig ist jedoch auch hier, dass die Versuche ohne dynamischen Einfluss eine deutlich geringeren Pfahlwiderstand aufweisen. Somit scheint der dynamische Einfluss in mitteldichter Lagerung ebenfalls einen positiven Effekt auf das Bodengefüge zu verursachen und eine Steigerung der Tragfähigkeit zu ermöglichen. Die Verteilung der Normalkräfte im Pfahlschaft ist in Abbildung 7 dargestellt. Hierbei zeigt sich wie in lockerer Lagerung eine annähernd lineare Abnahme der Normalkraft infolge Mantelreibung über die Einbindetiefen. Ähnlich wie in lockerer Lagerung liegt die Verteilung des Pfahlwiderstandes auf Fuß- und Mantelwiderstandes unabhängig von der Installationsfrequenz bei den Vibrationspfählen bei ca. 15 % Fußwiderstand und 85 % Mantelwiderstand. Bei den Versuchen ohne dynamischen Einfluss liegt der Anteil des Spitzendrucks deutlich höher: so zeigt sich hierbei im Durchschnitt eine Verteilung des Widerstandes von ca. 30 % auf die Pfahlspitze und 70 % auf den Pfahlmantel. So lässt sich feststellen, dass die Dynamik in mitteldichter Lagerung einen Einfluss auf die Verteilung zwischen Mantelreibung und Spitzenwiderstand hat.

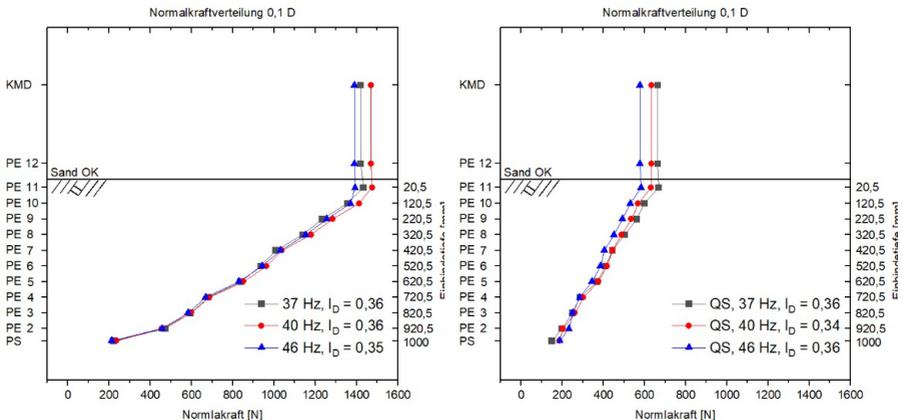


Abbildung 7: Verlauf der Normalkraft über die Pfahltiefe im Messpfahl in mitteldichter Lagerung für eine Pfahlverschiebung von $0,1D$ und vibrierender Pfahlinstallation (links) und quasi-statischer Pfahlinstallation (rechts)

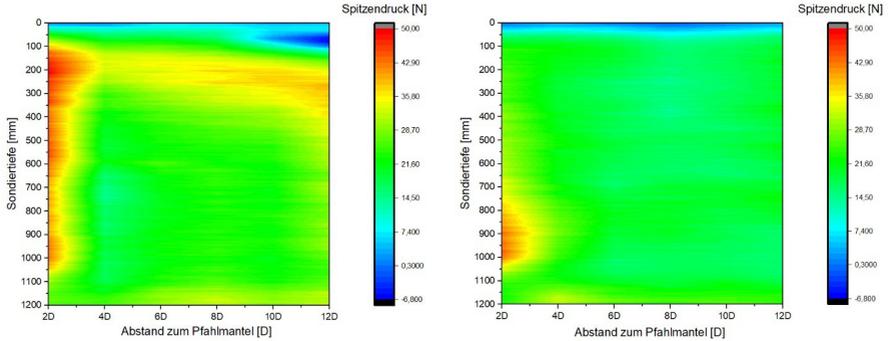


Abbildung 8: Konturplot des Spitzendrucks der Drucksondierungen in Abhängigkeit vom Abstand zum Pfahlmantel für Vibrationsversuch 37 Hz (links) und quasi-statischen Versuch 37 Hz (rechts)

Abbildung 8 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Drucksondierungen mit zunehmendem Abstand zum Pfahlmantel für einen Vibrationsversuch 37 Hz (links) und einen quasi-statischen Versuch mit gleicher Bewegungsspur (rechts). Hierbei ist zu erwähnen, dass zwischen den konkreten Messdaten der in den Abständen 2 D, 4 D, 6 D, 8 D, 10 D und 12 D vom Pfahlmantel ausgeführten Sondierungen interpoliert wurde.

Ein Vergleich zeigt, dass durch die vibrierende Pfahlinstallation in lockerer Lagerung zu einer Veränderung der Bodenzustandsgrößen, wobei es insbesondere im Nahbereich des Pfahles bis zu einem Abstand von etwa 4 D zu einer Erhöhung des Spitzendrucks der Drucksonde kommt. In dem quasi-statischen Versuch kommt es ohne dynamische Einflüsse zu einer deutlich geringeren Beeinflussung der Bodenzustandsgrößen infolge der Pfahlinstallation. Im Pfahlmantelbereich im Abstand von 2 D zeigt sich so gut wie keine Veränderung. Lediglich im Pfahlfußbereich treten Bodenveränderungen auf. Die hier dargestellten Veränderungen ähneln den Beobachtungen von Remspecher [2020] welcher über die DIC-Methode Volumenänderungen während der Vibrationsrammung dokumentierte. Interessant ist das bei quasi-statischer Pfahlinstallation eine Bodenveränderung lediglich im Nahbereich der Pfahlspitze zu verorten ist. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Pfahlspitze maßgeblich für die Veränderung des Bodens verantwortlich ist. Ferner scheint es so dass die Auf- und Abwärtsbewegungen und die damit verbundenen Scherungen induziert durch den

Pfahlmantel eine Aufhebung dieser, durch die Pfahlspitze verursachten Bodenveränderung verursacht. Bei Messungen der horizontalen Radialspannung während vibrierender und schlagender Pfahlinstallation konnte in Hoffmann et al. [2020] beobachtet werden, dass ein Horizontalspannungsanstieg induziert durch die Pfahlspitze im umliegenden Boden verursacht wird. Der Einfluss des Pfahlmantels führte zu einer Reduzierung der Horizontalspannungen bis nahe dem Ausgangsniveau. Die Erklärung fand sich beim *friction fatigue*-Effekt wie er beispielsweise in White & Lehane [2004] oder Yang et al. [2014] erklärt wird. Ähnliche Beobachtungen zur Reduzierung der Horizontalspannungen bedingt durch den Einfluss des Pfahlmantels konnten ebenfalls Stahlmann & Fischer [2013] feststellen. Der *friction fatigue*-Effekt und die Reduzierung der Horizontalspannungen könne eine Erklärung für den geringeren Drucksondenwiderstand im Pfahlmantelbereich sein. Eine Abgrenzung zwischen der Veränderung der Lagerungsdichte und des Horizontalspannungszustandes ist auf Basis der Miniaturdrucksondenenergebnisse nicht möglich.

Es stellt sich nun die Frage, warum bei der dynamischen Pfahlinstallation dieser Effekt scheinbar nicht auftritt. Hierbei lässt sich vermuten, dass durch den dynamischen Einfluss eine Veränderung der Lagerungsdichte induziert wird. Welche den Effekt der Veränderung der Horizontalspannungen überlagert und sich in einem größerem Drucksondenwiderstand äußert.

5 Zusammenfassung

Die Auswertung der Feldversuche zeigt, dass gerammte Pfähle in der Regel einen größeren axialen Widerstand aufweisen als vibrieren eingebrachte Pfähle. Diese Beobachtungen spiegeln sich bei den Vorgaben für vibrierend eingebrachten Pfähle in den aktuellen Normen und Regelwerken wieder, die im Regelfall von einer verminderten axialen Tragfähigkeit von vibrierend eingebrachten Pfählen ausgehen.

In Modellversuchen wurden von einigen Autoren aber auch bei Vibrationspfählen höhere axiale Widerstände als bei Rammpfählen beobachtet (u.a. Wienholz [1998], Vipulananda et al. [1990] oder O'Neill et al. [1990]).

Die in der Literatur beschriebenen Laborversuche wurden fast ausschließlich in homogenen Sanden durchgeführt. Im Vergleich hierzu sind die Feldversuche durch teilweise komplexere Bodenschichtungen und inhomogene Baugrundverhältnisse geprägt. In homogenen Sanden ist die durch die Vibrationsrammung induzierte Verdichtung effektiverer, des Weiteren

gelang es manchen Autoren die Installationsfrequenz nahe der Bodenresonanzfrequenz zu wählen was sich ebenfalls positiv auf die Tragfähigkeit auswirkte.

In den hier dargestellten Versuchen in lockerer Lagerungsdichte konnte der axiale Pfahlwiderstand mit zunehmender Installationsfrequenz gesteigert werden.

In mitteldichter Lagerung konnte kein signifikanter Einfluss der Installationsfrequenz auf die axiale Tragfähigkeit ausgemacht werden.

Der Einfluss dynamischer Effekte wirkte sich sowohl in lockerer als auch in mitteldichter Lagerung positiv auf den Pfahlwiderstand aus. Mit steigender Lagerungsdichte kann sich dieser Effekt jedoch auch umkehren, wie Versuche in [Hoffmann 2022] zeigen, bei denen in initial dicht gelagert Sanden eine durch die Vibration bedingte dynamische Anregung nicht zu einer weiteren Verdichtung, sondern zu Auflockerungen um den Pfahl und einer Reduzierung der axialen Pfahlwiderstand führte.

Die Verteilung von Mantel- und Spitzenkraft während der axialen Belastung der Modellpfähle zeigte unabhängig von der Lagerungsdichte und unabhängig von der Installationsfrequenz einen Pfahl der überwiegend über Mantelreibung lasten abträgt. Dies bestätigt die Ergebnisse aus der Literatur Bsp. Lammertz [2008].

Es zeigte sich in mitteldichter Lagerung ein Anstieg des Spitzenwiderstandes, wenn der Pfahl ohne dynamischen Einfluss in den Boden installiert wurde.

Eine Bodenveränderung während der Vibrationsrammung konnte mittels den Drucksondierungen nach der Pfahlinstallation nachgewiesen werden. Der Einfluss der Vibration auf den umliegenden Boden ist von der initialen Lagerungsdichte abhängig. So ist der Effekt in lockerer Lagerung am größten. Es zeigte sich im Abstand von 4 D um den Pfahlmantel die größte Erhöhung des Drucksondenwiderstands.

Literatur

Borel, S., Bustamante, M., Gianceselli, L.; Two comparative field studies of the bearing capacity of vibratory and impact driven sheet piles, *Proc. Intern. Symp. on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction. Louvain-la-neuve, 9-10 September 2002, 2002*

Braaker, H.; Rammgeräteeinfluss auf die Tragfähigkeit. Pfahl-Symposium, *Darmstadt 2-30, 1986*

- Briaud, J.-L., Coyle, H.M., Trucker, L.M.;** Axial response of three vibratory- and three impact-driven h piles in sand, *Transportation Research Record (1277)*, 1990
- EA-Pfähle;** Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ - EA Pfähle. *Arbeitskreis Pfähle (AK 2.1) der deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2. Auflage, Ernst & Sohn, 2012*
- Hoffmann, B., Labenski, J., Moormann, C.;** Effects of vibratory driven installation of mono-piles on soil conditions and their cyclic lateral load bearing behavior. *ISFOG 4th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Austin, Texas, USA, 2020*
- Hoffmann, B.;** Zum axialen Tragverhalten von vibrierten und gerammten Vollverdrängungspfählen. *37. Baugrundtagung, 05 Forum für junge Geotechnik-Ingenieure., 08.10.2022, Wiesbaden, 2022*
- Jeyapalan, J.;** Axial capacity of vibro-driven piles, *Draft report submitted to the US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1983*
- Lammertz, P.;** Ermittlung der Tragfähigkeit vibrierter Stahlrohrpfähle in nichtbindigem Boden, Mitteilung aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen, Heft 35, VGE Verlag, 2008
- Mazurkiewicz, B.;** Influence of vibration of piles on their bearing capacity, *Proc. 1st Baltic Conference on Soil Mech. and Found. Eng, Volume 2, pp. 143-153, 1975*
- Mosher, R.L.;** Axial capacity of vibratory-driven piles versus impact-driven piles, *Transportation Research Record (1277)*, 1990
- O'Neill, M.W., Vipulanandan, C., Wong, D.;** Laboratory modeling of vibro-driven piles. *Journal of geotechnical engineering 116(8), 1190-1209, 1990*
- Păunescu, M., Mateescu, G.;** Study on the behavior of piles thrust into soil by means of vibratory equipment, *Behavior of piles, pp. 121-125. Thomas Telford Publishing, 1971*
- Rempspecher, F.;** On the Effects of Pile Installation in Granular Soil, Fakultät VI – *Planen Bauen Umwelt Technische Universität Berlin, 2020*
- Rocher-lacoste, F., Borel, S., Gianceselli, L., Po, S.;** Comparative behaviour and performances of impact and vibratory driven piles in stiff clay, *Cyclic behavior of soils and liquefaction phenomena, pp. 533-540, 2004*

Stahlmann, J., Fischer, J.; Entwicklung der Spannungszustände im Bereich des Pfahlfußes gerammter Offshore-Gründungsstrukturen. *Final report of BMU-Resarch project, Technische Universität Braunschweig, 2013*

Trucker, L.M., Briaud, J.L.; Axial response of three vibratory and three impact driven piles in sand, *Technical Report, Briaud Engineers College Station TX, 1988*

Vipulanandan, C., Wong, D., O'Neill, M.W.; Behavior of vibro-driven piles in sand. *Journal of Geotechnical Engineering 116(8), 1211-1230, 1990*

White, D.M., Lehane, B.M.; Friction fatigue on displacement piles in sand. *Géotechnique 54 (10), 645-658, 2004*

Wienholz, B.; Tragfähigkeit von Vibrationspfählen in Sand in Abhängigkeit von der Einbringung. *Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig. Heft Nr. 57, 1998*

Yang, Z.X., Jardine, R.J., Zhu, B.T., Rimoy, S.; Stresses developed around displacement piles penetration in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 140 (3): 04013027, 2014*

Autoren

Bastian Hoffmann, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann

bastian.hoffmann@igs.uni-stuttgart.de
christian.moorman@igs.uni-stuttgart.de

Institut für Geotechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart

www.igs.uni-stuttgart.de
Tel.: 0711 685-62436