Hafentechnik
Schifffahrt
Logistik

TAGUNGSBAND

HTG-Kongress 2014

100 JAHRE HTG

Berlin
21. – 23. Mai 2014
Maritim proArte Hotel Berlin

TRAGFÄHIGKEIT VIBRIERTER UND GERAMMTER STAHLPFÄHLE – EIN EXPERIMENTELLER VERGLEICH

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann,
Dipl.-Wirtsch.-Ing. H. Sychla, Dipl.-Wirtsch.-Ing. P. Stein
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

Dipl.-Ing. J. Fischer
Fichtner Water & Wind GmbH, Hamburg

Als Gründung von Offshore-Windenergieanlagen kommen vorwiegend Stahlrohre zum Einsatz, die mittels Schlagrammung in den Boden eingebracht werden. Bei diesem Verfahren werden Ermüdungserscheinungen im Stahl sowie hohe Wasserschallemissionen hervorgerufen.
Alternativ können Gründungspfähle in den Boden vibriert werden. Dazu wird der Pfahl durch Vibrationsrammen in vertikale Schwingungen versetzt, die Scherfestigkeit des umgebenden Bodens wird stark reduziert und der Pfahl sinkt durch sein Eigengewicht in den Boden. Dies benötigt deutlich weniger Zeit als eine Schlagrammung.
Beim Vibrieren von Stahlpfählen treten im Vergleich zum Schlagen geringere Verdichtungseffekte im umgebenden Boden auf. Die äußere Tragfähigkeit eines vibrierten Pfahles wird daher geringer eingeschätzt als die eines geschlagenen. Belastbare Erfahrungen zur Tragfähigkeit vergleichbarer Pfähle unterschiedlicher Einbringungsart sind bisher begrenzt.
In diesem Beitrag sollen auf Grundlage großmaßstäblicher, experimenteller Versuche die Tragfähigkeiten geschlagener und vibrierter Stahlpfähle miteinander verglichen werden. Das Verhalten des den Pfahl umgebenden Bodens während der Installation sowie während der Belastung des Pfahles wird untersucht.

1. Einleitung

Die Gründung von Baukonstruktionen auf Pfählen ist Stand der Technik und hat sich seit Jahrhunderten bewährt. Die Pfahltragfähigkeit ist von mehreren Faktoren abhängig, u.a. von der Art des Einbringverfahrens. Bei der Gründung von Offshore-Windenergieanlagen, aber auch im Hafenbau, wird aufgrund der umfangreichen Erfahrungen im Wesentlichen die Schlagrammung eingesetzt. Von den weiteren Pfahleinbringungsmethoden bietet aber auch die Vibrationsrammung, für die noch keine so umfangreichen Erfahrungen vorliegen und für die zunächst geringere erreichbare Pfahltragfähigkeiten zu erwarten sind, Vorteile. Diese liegen in der schnelleren Einbringung des Rammgutes, einer geringeren Vorschädigung des Pfahls und geringeren Schallemissionen, während die Vorteile der Schlagrammung in der Verdichtung des umgebenen Bodens und damit in einer Tragfähigkeitserhöhung, weniger bis gar keiner Rammbarkeitsrestriktionen sowie der Anwendungsmöglichkeiten umfangreicher Bemessungsmethoden liegen [Fischer et al., 2013 und Sychla et al., 2013]. In diesem Beitrag werden auf Grundlage großmaßstäblicher, experimenteller Versuche die Tragfähigkeiten geschlagener und vibrierter Stahlpfähle einander gegenübergestellt.

2. Gegenüberstellung der Methoden

2.1 Ökologie

Beim Einbringen von Pfählen entstehen sowohl beim Rammen als auch beim Vibrieren Schallemissionen und Erschütterungen. Im Zuge der Energiewende und dem vermehrten Ausbau von Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) ist die Thematik der Schallreduzierung bei der Pfahlrammung zunehmend in den Fokus gerückt. Die durch das Rammen von Offshore-Gründungspfählen entstehenden Schallemissionen können für marine Meeressäuger, insbesondere für geschützte Schweinswale, Seehunde und seltene Kegelrobben, gefährlich sein [Kuhn et al., 2012]. Zum Schutz dieser Tiere wurden vom Umweltbundesamt Grenzwerte für Unterwasserschallemissionen festgelegt. Um diese Grenzwerte einzuhalten, sind daher Schallminderungsmaßnahmen wie beispielsweise Blasenschleier oder Hydro-Sound-Dämpfer notwendig. Bei der Methode der Vibrationsrammung dagegen sind diese Werte, insbesondere der maximale Schalldruck, deutlich geringer (vgl. Abb. 1). Während beim Rammen Schallemissionen in einem breiten Frequenzspektrum entstehen, wird beim Vibrieren mit kontinuierlichen Frequenzen zwischen 20 Hz und 40 Hz gearbeitet, was weniger schädlich für die Meeresfauna ist [Fischer et al., 2013]. Die Reduzierung des Lärmpegels bei Nutzung der Vibrationsrammung beträgt nach [Elmer et al., 2007] ca. 15 - 20 dB.

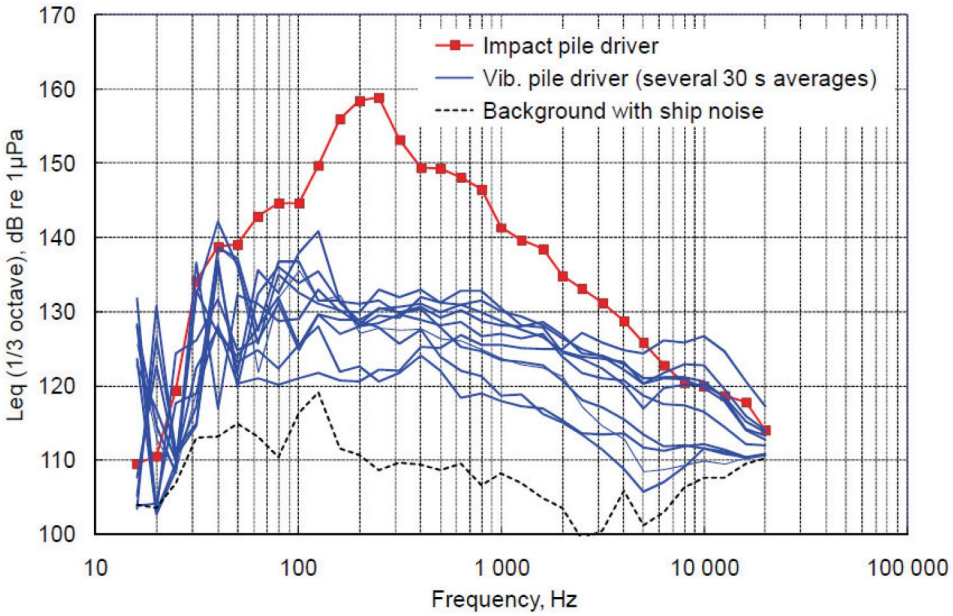


Abbildung 1: Schallemission von Schlag- und Vibrationsrammung [Matuschek et al., 2009]

2.2 Einbringbarkeit und Dauerhaftigkeit

Bezüglich der Einbringbarkeit von gerammten Pfählen gibt es fast keine Einschränkungen. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Pfähle auch bei schwierigen Bodenverhältnissen bis auf Endtiefe gerammt werden können. Beispielsweise werden OWEA-Gründungspfähle häufig 50 bis 60 m tief in dicht gelagerte Bodenschichten gerammt. Die Restriktion der Rammbarkeit ist dabei ausschließlich über die Energieleistung des Hammers und die innere Tragfähigkeit des Rammgutes definiert. Daher dienen Rammsimulationen neben der Berechnung der Vorschädigung hauptsächlich der Auswahl des Rammgerätes, um einerseits die angestrebten Tiefen zu erreichen und andererseits eine wirtschaftliche Geräteauswahl treffen zu können.

Für die Einbringbarkeit von Vibrationspfählen liegen noch keine so umfangreichen Erfahrungen vor. Auch wenn im asiatischen Raum bereits mit der Parallelanordnung mehrerer Vibratoren Pfähle mit sehr großen Pfahldurchmessern installiert wurden, so bestehen doch noch immer Restriktionen bei großen Pfahlmassen und bindigen Böden. Auch mit vorgeschalteten sogenannten „driveability studies“ zur Festlegung des Equipments kann im Vorfeld nicht davon ausgegangen werden, die erforderliche Endtiefe für den Pfahl ausschließlich durch Vibration zu erreichen.

Die „driveability studies“ bzw. Rammsimulationen dienen ebenfalls zur Berechnung der Vorschädigung des Pfahls durch den Einbringvorgang selbst. Bei der Schlagrammung von Offshore-Pfählen besteht an den horizontalen Schweißnähten eine erhöhte Ermüdungsbruchgefahr durch Kerbwirkung. Bei der Dimensionierung von Offshore-Gründungen ist der Ermüdungsnachweis häufig maßgebend, wobei der Anteil aus Vorschädigung durch die Einbringung berücksichtigt werden muss [Sternberg, 2012]. Es ist davon auszugehen, dass durch die Schlagrammung aufgrund des hohen Energieeintrags und der sehr kurzen Krafteinleitungsdauer eine größere Vorschädigung im Pfahl auftritt, als bei der Vibrationsrammung. Bei dieser wird zwar eine kontinuierliche, alternierende Schwingung aufgebracht, die allerdings mit deutlich geringeren Spannungsamplituden im Pfahl einhergeht. Ließe sich die Vorschädigung durch Vibration nachweislich verringern, könnte dadurch die Lebensdauer insbesondere von Offshore-Monopiles verlängert werden. Forschungen am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB-TUBS) zu diesem Thema befinden sich in der Planung.

Ein im Offshore-Bereich wirtschaftlich bedeutender Faktor ist die Dauer der Installation der Pfähle. Es ist allgemein bekannt, dass vibrierte Pfähle sehr viel schneller eingebracht werden können als gerammte Pfähle. Dies kann ein erheblicher Vorteil der Vibrationstechnik sein. Neben der schnelleren Eindringung bis auf die angestrebte Tiefe spielt hierbei auch die Möglichkeit einer optimierten Offshore-Baustellenlogistik eine Rolle. Werden Pfähle ausschließlich vibriert, verringert sich die notwendige Anzahl an Kranhüben und Gerätewechseln erheblich, da der Pfahl, sobald er einmal aufgenommen wurde, in einem Arbeitsgang bis zur Endtiefe eingebracht wird. Kann durch den Einsatz der Vibrationstechnik auf Rammschallminderungsmaßnahmen verzichtet werden, kommt es zu weiteren ökonomischen Vorteilen gegenüber der Schlagrammung.

2.3 Axiale Pfahltragfähigkeit

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass vibrierte Pfähle im Vergleich zu gerammten Pfählen eine geringere axiale Tragfähigkeit aufweisen. [Hartung, 1994] erklärt die geringere Tragfähigkeit vibrierter Pfähle durch eine Auflockerungszone mit geringeren Scherfestigkeiten im Nahfeld des Pfahlmantels. Diese Zone geringerer Scherfestigkeit wird durch die Vibrationsrammung hervorgerufen, da dabei die effektiven Spannungen in der Kontaktzone zwischen Pfahl und Boden herabgesetzt werden. Der Boden verhält sich wie ein Fluid und man spricht bei einem Sättigungsgrad $S_r = 1$ von einer Bodenverflüssigung. Dadurch erfährt der Pfahl weniger horizontale Spannungen am Pfahlmantel, aus denen mit dem Mohr-Coulombschen Bruchkriterium die Pfahlmantelreibung abgeleitet werden kann.

Zusätzlich zu einer Auflockerung des Bodens am Pfahlschaft kommt es bei der Vibrationsrammung im Vergleich zur Schlagrammung zu einer geringeren Verdichtung des Bodens unterhalb der Pfahlspitze und damit zu einem geringeren Pfahlspitzendruck [Mosher, 1987; Lammertz, 2003].

Bei verschiedenen Projekten in Norddeutschland ermittelte [Braaker, 1986] die Tragfähigkeit von Spundwandprofilen und Doppel-T-Trägern, die mittels Schlag- bzw. Vibrationsrammung in nichtbindige, wassergesättigte Böden eingebracht wurden. In fast jedem Fall lag die Tragfähigkeit des vibrierten Pfahls unter der des gerammten Pfahls. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die Tragfähigkeit der vibrierten Pfähle zwischen 10 und 40 % niedriger lag als die der gerammten Pfähle. Generell ist der einschlägigen Literatur zu entnehmen, dass die Tragfähigkeiten einvibrierter Pfähle geringer sind, als die von eingeschlagenen Pfählen. Es gibt allerdings auch Gegenbeispiele. Eine Übersicht ist auf der Abb. 2 dargestellt, nähere Informationen hierzu finden sich in [Fischer et al., 2013 und Sychla et al. 2013].

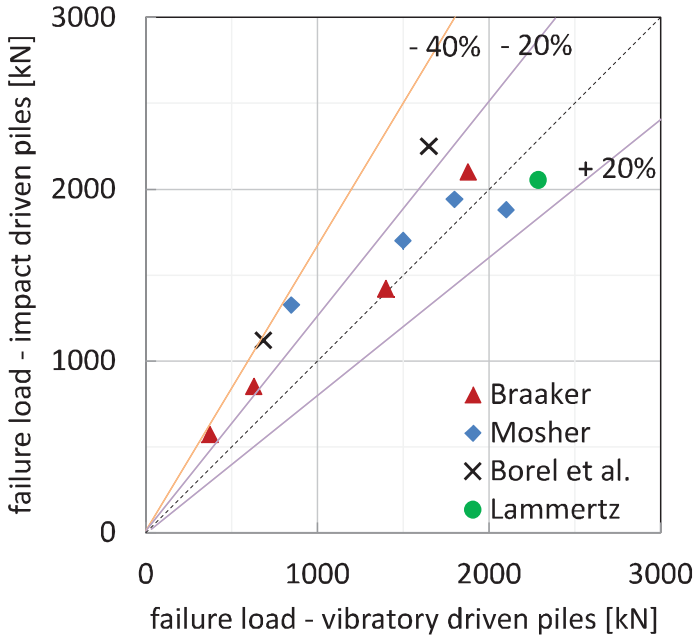


Abbildung 2: Grenztragfähigkeiten gerammter und vibrierter Pfähle [Fischer et al., 2013]

3. Versuche am IGB-TUBS

3.1 Allgemeines

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwicklung der Spannungszustände im Nahfeld gerammter Offshore-Gründungsrohre“ (FKZ: 0325162), gefördert vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, wurden am IGB-TUBS Modellpfähle aus offenen Stahlrohren in einem Versuchsstand mit einem Schlaghammer und einer Vibrationsramme eingebracht. Zur Minimierung von Skalierungseffekten wurden die Versuche in einem großmaßstäblichen Versuchsstand durchgeführt (vgl. Abb. 3).

Dieser besteht aus zwei zylindrischen Stahltrögen mit einem Durchmesser von 4 m und einer Höhe von 5 m sowie einer aufsetzbaren Rahmenkonstruktion als Widerlager für die Durchführung von statischen Probebelastungen. Die Tröge können von unten geflutet werden, um eine Wassersättigung des eingebauten Bodens zu erreichen.

Abbildung 3: Versuchsstand am IGB-TUBS

3.2 Versuchsdurchführung

In Vorbereitung der Versuche wurden ca. 55 m³ Sand mit einer Greiferschaufel in Lagen von 20 cm in einen der Tröge eingebracht und jeweils mit einer Rüttelplatte verdichtet. Dadurch wurde eine dichte Lagerung mit einer bezogenen Lagerungsdichte von 0,7 erreicht. Die Körnungslinie des Versuchsbodens ist in Abbildung 4 dargestellt.

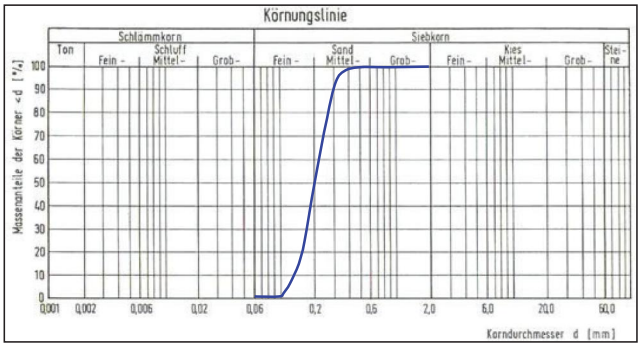
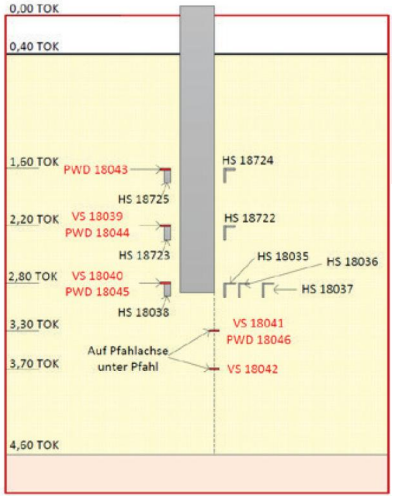


Abbildung 4: Kornverteilung Versuchsboden

Zur Messung der Spannungs-Dehnungszustände im Boden und deren Änderungen während der Einbringung wurden Erddruckgeber und Porenwasserdruckgeber im Boden eingebaut (vgl. Abb. 5). Nach Einbau des Bodens und der Messtechnik wurde der Trog von unten geflutet, um gesättigte Verhältnisse zu erreichen.

Bei den verwendeten Modellpfählen handelte es sich um Edelstahlrohre mit einem äußeren Durchmesser von 35,56 cm, einer Länge von 3 m und einer Wanddicke von 3 mm.



HS: Horizontalspannungsgeber
VS: Vertikalspannungsgeber
PWD: Porenwasserdruckgeber
TOK: Trogoberkante

Abbildung 5: Anordnung der Messgeber

Für die Schlagrammung wurde ein DELMAG D2, für die Vibrationsrammung ein kleinmaßstäblicher Vibrator APE Holland - Model 3 verwendet, deren Spezifikationen in Tabelle 1 angegeben sind. Für die kraft- und schwingungsschlüssige Verbindung des Vibrators mit dem Pfahl wurde ein selbst entwickelter mechanischer Klammermechanismus eingesetzt. Die verwendeten Hämmer sind in Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 1: eingesetzte Hämmer

Hammer	DELMAG D2	APE Holland - Model 3
Fallmasse [kg]	220	---
max. Fallhöhe [cm]	120	---
Schlagrate [Schläge/min]	60 - 70	---
Schlagenergie [kNm]	1,18 - 2,45	---
exzentrisches Moment [kg/m]	---	0,35
Frequenzbereich [Hz]	---	0 - 38
max. Zentrifugalkraft [kN]	---	40
Schwingungsamplitude [mm]	---	30
dynamische Masse [kg]	---	125
max. Seilzugkraft [kN]	---	44

In der folgenden Tabelle 2 sind Informationen der Versuchsdurchführung zusammengefasst.

Tabelle 2: Versuchsdurchführung

	Vibrationsrammung	Schlagrammung
Boden	dicht gelagerter Sand	dicht gelagerter Sand
Endtiefe [m]	2,50	2,50
Rammdauer [s]	40	142
Frequenz [Hz]	28 - 32	~ 1,0
Anzahl Schläge	---	158
Anzahl Schwingungszyklen	~ 1.200	---
Kraft [kN]	20 - 40	200 - 350

Abbildung 6: Schlag- und Vibrationshammer am IGB-TUBS

3.3 Ergebnisse der Versuche

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Totalspannungs- und Porenwasserdruckmessungen zusammenfassend für einen einvibrierten und einen eingeschlagenen Pfahl gegenübergestellt. Die Kurven zeigen die jeweiligen Veränderungen der Zustandsgrößen über die Eindringtiefe infolge der Einbringung. Die angegebenen Abstände der Geber beziehen sich auf die Pfahlaußenkante.

Die Veränderung der horizontalen Totalspannungen im Bereich der Absetztiefe der Pfähle (vgl. Abb. 7, oben) zeigt wesentliche Unterschiede infolge der Einbringmethodik. Beim Einvibrieren des Pfahls reagierten die Messgeber erst, als der Pfahlfuß nur noch ca. 0,5 m entfernt war. Die maximale Spannungserhöhung an dem zum Pfahl nächsten Messgeber betrug nur ca. 12 kN/m², in einem Abstand von 50 cm wurden nur noch sehr geringe Spannungserhöhungen gemessen. Hieraus ergibt sich, dass die infolge der Vibration eingetragene Energie bereits im Nahfeld des Pfahls vermutlich in Bewegungsenergie im Boden und Temperatur umgewandelt wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Einbringung des Pfahls beim Vibrieren nur ca. ein Drittel der Zeit betrug, die für das Einschlagen benötigt wurde.

Beim Einschlagen des Pfahls reagierten die Messgeber bereits bei einem Abstand des Pfahlfußes von ca. 1,50 m. Mit weiterer Eindringung stiegen die horizontalen Spannungen dann auf maximal ca. 75 kN/m² in 10 cm Abstand an. In 50 cm Abstand wurden noch Werte von ca. 40 kN/m² messtechnisch erfasst. Bemerkenswert ist, dass die Maximalwerte der Spannungen erreicht wurden, als sich der Pfahlfuß noch oberhalb der Messebene befand. Danach nahmen die Spannungen wieder ab. Offensichtlich tragen die durch die Rammung erzeugten Stoßwellen die Energie wesentlich weiter in den Boden ein. Da der Stoßimpuls im Wesentlichen durch den Pfahlfuß und nur in geringerem Maße durch den Pfahlmantel abgestrahlt wird, ist auch die Abnahme der Spannungen im unteren Bereich erklärbar. Weitere Auswertungen insbesondere über die Zeit sind hier jedoch noch erforderlich, um die Phänomene besser zu verstehen und auch Aussagen hinsichtlich möglicher Reflexionen an den Trogwänden machen zu können.

Hinsichtlich der Auswirkung einvibrierter Pfähle auf die Vertikalspannungen lässt sich Ähnliches ableiten wie anhand der Veränderungen der Horizontalspannungen. Die Spannungserhöhung in vertikaler Richtung ist sehr gering und lässt sich auch über die Tiefe phänomenologisch nicht ausdifferenzieren (vgl. Abb. 7, Mitte).

Die beim Rammen gemessenen Vertikalspannungen zeigen hingegen große Spannungsänderungen, wobei die Lage der Messgeber in Abhängigkeit vom Pfahlfuß von großer Bedeutung ist. Der Messgeber a) zeigt den erwarteten Verlauf. Mit Annährung des Pfahlfußes steigen die Spannungen an und fallen dann beim Durchgang des Pfahlfußes wieder ab. Auch der Rückgang bis auf null ist plausibel. Die Messgeber b),c) und d) zeigen hingegen so nicht vermutet negative Relativspannungen (die Überlagerungsspannung wurde abgezogen). Offensichtlich führen die Stoßimpulse temporär zu Dilatanzen, die mit weiterer Annäherung des Pfahlfußes wieder in Kontraktanz übergeht. Damit einher ist eine Umlagerung des Korngerüstes auch in einem vergleichsweise größeren Abstand vom Pfahl verbunden, die auch zu einer höheren Lagerungsdichte und somit höheren Pfahtragfähigkeit führen kann.

In Abbildung 7, unten sind die Veränderungen des Porenwasserdrucks im Nahfeld des Pfahls dargestellt. Die Änderungen sind offensichtlich beim Rammen größer als beim Vibrieren, allerdings sind sie zu klein, um ausdifferenziert werden zu können. Sie scheinen in diesen Versuchen von untergeordneter Bedeutung zu sein.

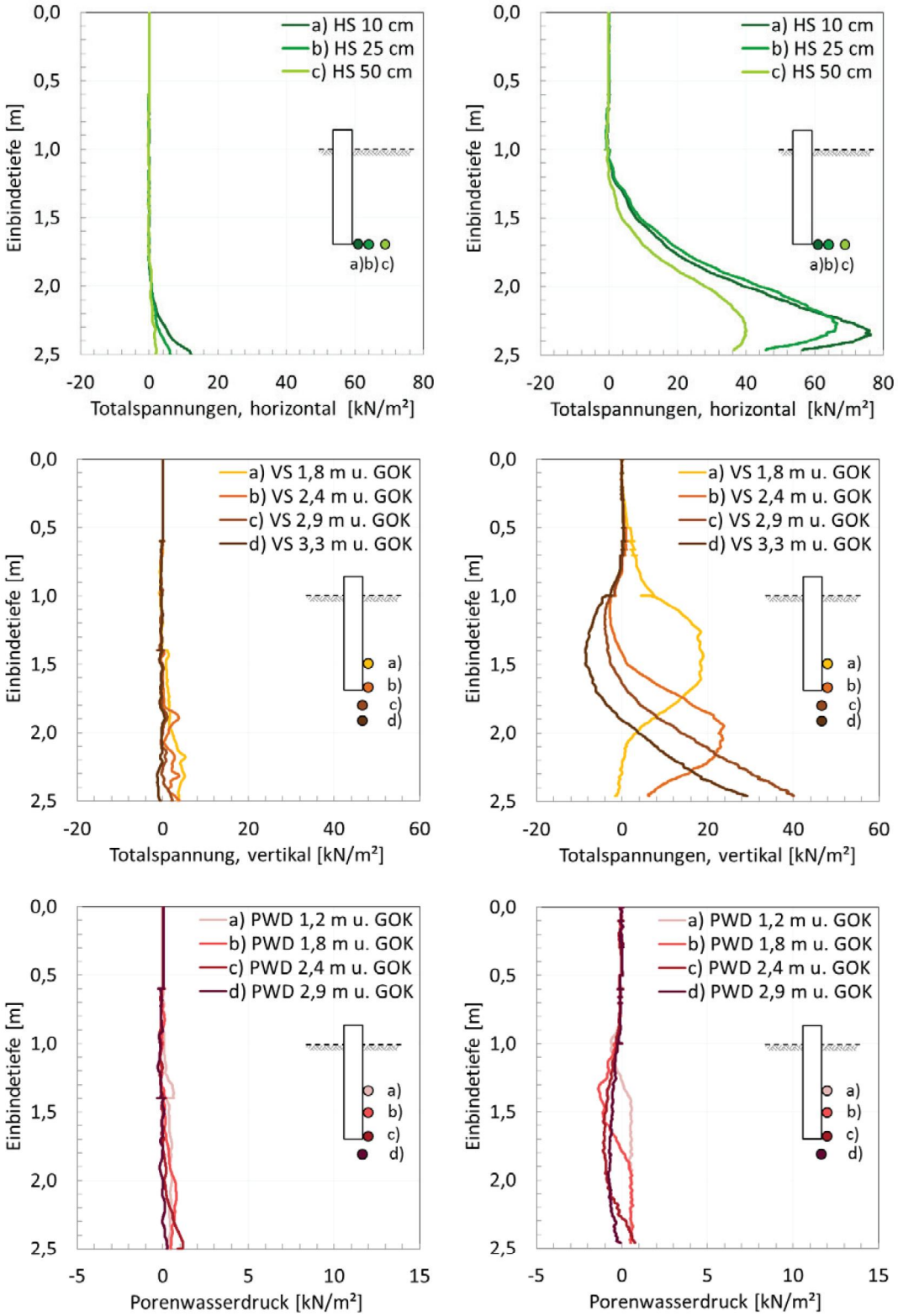


Abbildung 7: Spannungsentwicklung beim Rammen (links Vibrieren, rechts Schlagen)

Zur Ermittlung der Pfahltragfähigkeit wurden jeweils 24 Stunden nach der Einbringung statische Probebelastungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 8 dargestellt sind.

Wie erwartet stellt sich die Anfangssteifigkeit des vibrierten Pfahls deutlich geringer dar. Bei einer Verschiebung von 7,1 mm (entspricht 2 % des Pfahldurchmessers) weist der gerammte Pfahl eine um 37,5 % höhere Tragfähigkeit auf. Bis hin zu einer Verschiebung von ca. 10 % des Pfahldurchmessers verringert sich der Tragfähigkeitsunterschied zwischen vibriertem und gerammtem Pfahl auf weniger als 20 %.

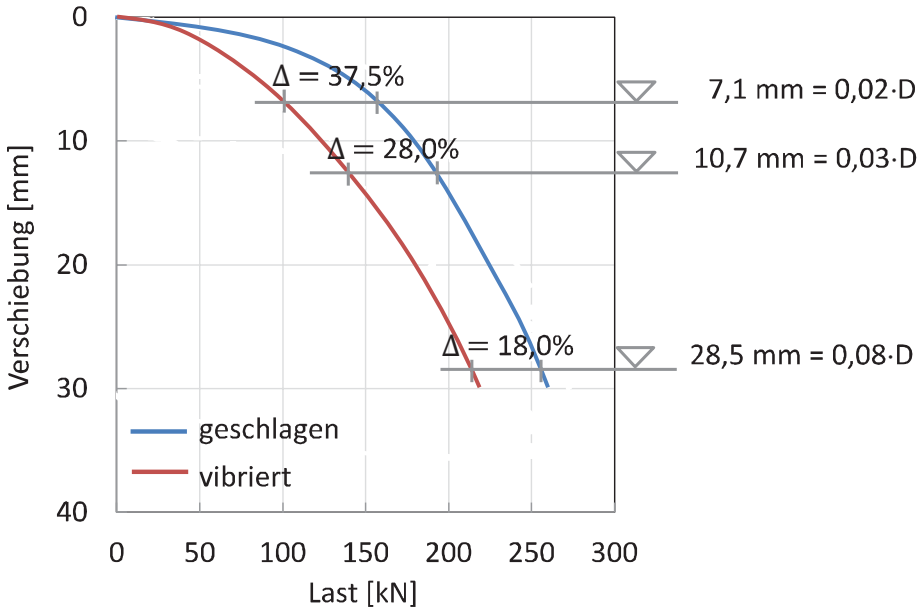


Abbildung 8: Last-Verschiebungs-Diagramm

Die auf Erfahrungen basierte Aussage, dass vibrierte Pfähle eine geringere Pfahltragfähigkeit aufweisen als vergleichbare geschlagene Pfähle (vgl. [EA-Pfähle, 2012]) bestätigt sich also auch bei diesen Versuchen. Interessant ist die Frage, wie sich Pfähle verhalten, die zunächst bis auf eine bestimmte Tiefe einvibriert und danach auf Endtiefe gerammt werden. Dieses Verfahren ist in der Praxis eingeführt und verringert die Installationszeit, bedingt aber einen höheren baubetrieblichen Aufwand. Erste Versuche in den großmaßstäblichen Versuchseinrichtungen des IGB-TUBS unter den gleichen Versuchsrandbedingungen zeigen eine weitere Erhöhung der Tragfähigkeit (vgl. Abb. 9) Dieses Verhalten wurde so nicht erwartet und wird weiter untersucht.

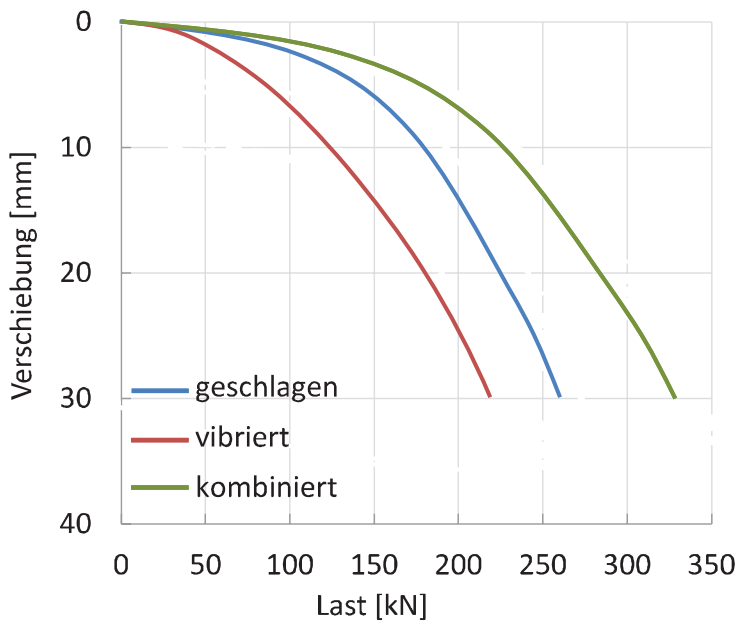


Abbildung 9: Last-Verschiebungs-Diagramm

4. Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich zumindest im Kurzzeitverhalten bei einvibrierten Pfählen geringere Tragfähigkeiten erreichen lassen, als bei eingeschlagenen Pfählen. Es ist jedoch ebenfalls aus den Ergebnissen abzuleiten, dass die Vibration den Pfahl umgebenden Baugrund geringer beeinflusst. Dies betrifft die Größe der Spannungsänderungen und die Reichweite und führt dann auch zu den an anderer Stelle festgestellten geringeren Schallemissionen. Da keine Änderung der Frequenz, mit dem Ziel, die sich zeitlich verändernden Eigenfrequenzen des Systems nachzufahren, vorgenommen wurde, bleibt die Frage offen, ob hierdurch höhere Lagerungsdichten und damit höhere Tragfähigkeiten insbesondere hinsichtlich der Mantelreibung erreichbar sind.

Bei eingeschlagenen Pfählen hingegen kann eine weiter reichende und intensivere Umlagerung infolge der Stoßimpulse abgeleitet werden. Insbesondere im Pfahlfußbereich sind durch diese Effekte höhere Spitzendrücke im Baugrund aufnehmbar.

Offen bleibt weiterhin die Frage, ob sich durch Anwachseffekte die mit den beiden Methoden erreichbaren Tragfähigkeiten annähern.

Zurzeit wird eine Forschungsarbeit am IGB-TUBS fertiggestellt, die weitere Details und Auswertungen zu den durchgeführten Untersuchungen beinhaltet. Darüber hinaus sind in den großmaßstäblichen Versuchseinrichtungen des IGB-TUBS weitere Versuche geplant, um Antworten auf die hier aufgeworfenen offenen Fragen zu geben.

Literatur

Borel, S.; Bustamante, M.; Rocher-Lacoste, F.: The Comparative Bearing Capacity of Vibratory and Impact Driven Piles, Transvib, *International Symposium on Vibratory Pile Driving and on Deep Soil Vibratory Compaction, Paris, 2006*

Braaker, H.: Rammgeräteeinfluss auf die Tragfähigkeit, *Symposium Pfahlgründungen, Darmstadt, 1986*

EA-Pfähle: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Dortmund, Ernst & Sohn, 2. Auflage, 2012*

Elmer, K.-H.; Gerasch, W.-J.; Neumann, T.; Gabriel, J.; Betke, K.; Schultz-von Glahn, M.: Measurement and Reduction of Offshore Wind Turbine Construction Noise, *DEWI Magazine Nr. 30, 2007*

Fischer, J.; Sychla, H.; Bakker, J.; de Neef, L.; Stahlmann, J.: A comparison between impact driven and vibratory driven steel piles in the German North Sea, *1st International Conference in Maritime Energy, Hamburg, 2013*

Hartung, M.: Einflüsse der Herstellung auf die Pfahltragfähigkeit in Sand, *Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, 1994*

Kuhn, C.; Bruns, B.; Fischer, J.; Gattermann, J.; Elmer, K.-H.: Development of a new underwater piling noise mitigation system - using hydro sound dampers (HSD), *31st International Conference on Ocean, Offshore and Artic Engineering, Rio de Janeiro, Brasil, 2012*

Lammertz, P.: Field studies on bearing capacity of vibratory and impact driven piles, *2nd International Young Geotechnical Engineers' Conference, Romania, 2003*

Matuschek, R.; Betke, K.: Measurement of Construction Noise During Pile Driving of Offshore Research Platforms and Wind Farms, *NAG/DAGA International Conference on Acoustics, Rotterdam, The Netherlands, 2009*

Mosher, R. L.: Comparison of axial capacity of vibratory-driven piles to impact-driven piles, *Technical Report ITL-87-7, US Army Engineers Waterways Experiment Station,USA, 1987*

Sternberg, A.: Planung und Ausführung von Monopilegründungen in der Nordsee, *8. Hans Lorenz Symposium, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, 2012*

Sychla, H.; Fischer, J.; Stahlmann, J.: Stahlpfähle – vibriert oder gerammt, *Stahl im Wasserbau, Braunschweig, 2013*

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann j.stahlmann@tu-braunschweig.de
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Hauke Sychla h.sychla@tu-braunschweig.de
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Philipp Stein p.stein@tu-braunschweig.de

Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig www.IGB-TUBS.de
Beethovenstraße 51 b, 38106 Braunschweig Tel.: 0531/391-62000

Dipl.-Ing. Jan Fischer jan.fischer@fww.fichtner.de

Fichtner Water & Wind GmbH
Hammerbrookstraße 47b www.fww.fichtner.de
20097 Hamburg Tel.: 040/3006730