

2. Preisträger des Frankignoul-Förderpreises 2019

Johannes Labenski, M.Sc.

*Untersuchungen zum statisch lateralen Tragverhalten
von in nichtbindigen Böden einvibrierten Monopiles:
Vorstellung eines modifizierten p-y Ansatzes*

(Kurzfassung)

Untersuchungen zum statisch lateralen Tragverhalten von in nichtbindigen Böden einvibrierten Monopiles: Vorstellung eines modifizierten p-y Ansatzes

Johannes Labenski, M.Sc.

Arcadis Germany GmbH

1 Motivation

Monopiles sind das heutzutage am häufigsten verwendete Gründungselement von Offshore Windenergieanlagen [WINDEUROPE, 2018]. Da die Windenergieanlagen immer mehr Leistung erbringen sollen, steigen auch die Anforderungen an die Gründung und das damit verbundene Tragverhalten. Dabei spielt das axiale Tragverhalten der Monopiles eine eher untergeordnete Rolle, aber dem lateralen Tragverhalten kommt die wesentliche Rolle zu. Das laterale Tragverhalten wird maßgeblich durch die den Monopile umgebenden Bodenspannungen und -zustandsgrößen beeinflusst. Die besondere Schwierigkeit bei der Ermittlung des Tragverhaltens eines Monopiles liegt zunächst darin begründet, dass während der Installation des Monopiles komplexe bodenmechanische Vorgänge infolge der Pfahl-Boden Interaktion auftreten. Es liegt daher nahe, dass die Installationsmethode einen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten haben wird.

Untersuchungen zur Vibrationsrammung von Pfählen zeigen einen Einfluss zyklischer und dynamischer Effekte auf, die das Penetrationsverhalten einerseits und den Pfahl umgebenden Boden andererseits beeinflussen. Jüngste Untersuchungen von [MASSARSCH ET AL., 2017] weisen dem Verhältnis von Vibrationsfrequenz zu optimaler Verdichtungsfrequenz bzw. optimaler Installationsfrequenz einen maßgebenden Effekt zu. Bei Vibration mit der optimalen Verdichtungsfrequenz nimmt die Penetrationsrate des Pfahls ein Minimum an und der Energieübertrag zwischen Pfahl und Boden maximiert sich. Vibriert man mit der optimalen Installationsfrequenz, kommt es aufgrund der großen Relativverschiebung zwischen Pfahl und Boden zu einem geringen Energieübertrag infolge der Vibration, aber zu einer maximalen Penetrationsrate.

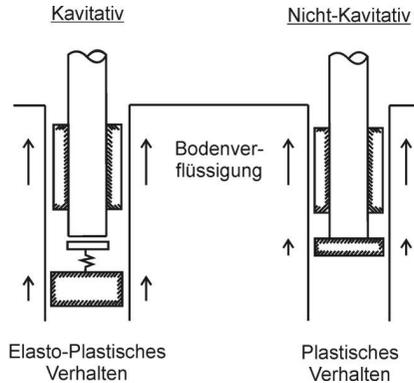


Abbildung 1: Physikalische Modellvorstellung für die beiden Vibrationsmodi kavitativ und nicht-kavitativ nach [RODGER & LITTLEJOHN, 1980]

Basierend auf Modellversuchen und numerischen Simulationen definierten [RODGER & LITTLEJOHN, 1980] zwei Modi, die beim Vibrationsrammen auftreten: *kavitatives* (langsames) und *nicht-kavitatives* (schnelles) Vibrationsrammen (Abbildung 1). Unabhängig vom auftretenden Vibrationsmodus kommt es entlang des Pfahlmantels durch die zyklische Bewegung des Pfahls zu einer Reduktion der Scherfestigkeit des Bodens. Unterschiede ergeben sich im Verhalten des Bodens am Pfahlfuß. Beim kavitativen Vibrationsrammen kommt es durch ein elasto-plastisches Verhalten des Bodens zu einem langsamen Eindringvorgang. Beim nicht-kavitativen Vibrationsrammen ist das Verhalten am Pfahlfuß überwiegend plastisch, sodass ein schneller Eindringvorgang möglich ist. Bestätigt wird diese Modellvorstellung von [CUDMANI, 2001] sowie [VOGELSSANG, 2016]. Jüngste Untersuchungen von [VOGELSSANG, 2016] zeigen, dass insbesondere durch den Pfahlfuß unterschiedliche Effekte im Boden hervorgerufen werden; die durch den Pfahlmantel hervorgerufenen Effekte sind bei beiden Vibrationsmodi vergleichbar. [VOGELSSANG, 2016] identifizierte die Verschiebungsamplitude des Pfahlfußes als die den Vibrationsmodus maßgeblich beeinflussende Größe. Kommt es durch eine große Verschiebungsamplitude zum kavitativen Vibrationsrammen, treten überwiegend zyklische Effekte im Boden auf. Aufgrund von Relaxationseffekten *vergisst* der Boden seine Belastungsvorgeschichte, sodass während der abwärtsgerichteten Bewegung des Pfahls im Vergleich zum monotonen Eindringen nicht der volle Spitzenwiderstand aktiviert wird. Kommt es durch eine kleine Verschiebungsamplitude zum nicht-kavitativen Vibrationsrammen, treten nach

[VOGELSANG, 2016] überwiegend monotone Effekte im Boden auf, wie man sie auch beim Eindringen von Pfählen beobachtet.

Viele Untersuchungen zum lateralen Tragverhalten wurden ohne besondere Berücksichtigung des Installationsvorgangs an eingedrückt oder bereits im Boden vorinstallierten Pfählen durchgeführt (z.B. [KLINKVORT ET AL., 2013], [LEBLANC ET AL., 2010]), was im Vergleich zu einvibrierten Pfählen zwangsläufig zu anderen Spannungsverteilungen und Zustandsgrößen im Boden und damit zu einem veränderten lateralen Tragverhalten führt.

Um genaue Aussagen zum lateralen Tragverhalten einvibrierter Stahlrohrpfähle treffen zu können, wurden 1g-Modellversuche durchgeführt, bei welchen der Installationsvorgang simuliert wurde. Basierend auf diesen Modellversuchen sowie numerischen Simulationen gelang es [LABENSKI, 2018a], einen bestehenden Ansatz für die Bemessung lateral beanspruchter Monopiles so zu modifizieren, dass er auf einvibrierte Monopiles anwendbar ist. Die experimentellen Untersuchungen sowie der modifizierte Ansatz werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Allgemeines

Zur Untersuchung des statisch lateralen Tragverhaltens einvibrierter Monopiles wurden insgesamt 34 Versuche durchgeführt. Bei der Pfahlinstallation wurden jeweils die Herstellparameter Vibrationsfrequenz, Arbeitsmoment sowie dynamische Kraft variiert. Der daraus resultierende Einfluss auf das laterale Tragverhalten wurde mit der anschließenden lateralen Pfahlprobelastung ermittelt. Die Versuche wurden in sehr dichter, dichter und mitteldichter Lagerung des Sandes durchgeführt. Außer Standardversuchen mit normalem Installationsvorgang wurden ergänzend Spezialversuche mit modifizierter Pfahlinstallation durchgeführt. Außerdem wurden zwei Versuche mit eingedrückt Pfählen durchgeführt, die als eine Art Referenz dienen.

2.2 Versuchssand

Für die Modellversuche wurde Berliner Sand genutzt. Dabei handelt es sich um einen enggestuften Mittel- bis Grobsand mit einer Ungleichförmigkeitszahl von $C_u = 3,5$. Die maximale Dichte beträgt $\rho_{d,max} = 1,906 \text{ g/cm}^3$ und die minimale Dichte $\rho_{d,min} = 1,570 \text{ g/cm}^3$

bei einer Korndichte von $2,61 \text{ g/cm}^3$. Umfangreiche Laboruntersuchungen an Berliner Sand können [LE, 2015] entnommen werden. Zur Herstellung der gewünschten Lagerungsdichte im Versuchsbehälter wurde der feuchte Sand für jeden Versuch schichtweise eingebaut und mit einer elektrischen Rüttelplatte verdichtet, bis die gewünschte Lagerungsdichte erreicht war.

2.3 Modellpfahl

Die Modellversuche wurden mit einem glasfaserverstärkten Kunststoffrohr (GFK) durchgeführt. Durch die Wahl eines GFK-Rohrs anstatt eines Stahlrohrs konnte die sich aus den Modellgesetzen ergebende Biegesteifigkeit des Pfahls im Modell zufriedenstellend abgebildet werden (vgl. [LABENSKI, 2018a]). Mit einem Modellpfahl aus Stahl würde die Biegesteifigkeit im Modell etwa um den Faktor 6 überschritten werden.

Der Außendurchmesser des Modellpfahls betrug 208 mm bei einer Wandstärke von 3,2 mm. Entsprechend dem großmaßstäblichen VIBRO-I Feldversuch (vgl. [MOORMANN ET AL., 2016]) wurde ein Verhältnis von Einbindetiefe zu Pfahldurchmesser L/D von 4,2 gewählt, sodass die Einbindetiefe im Modell 870 mm betrug. Der Modellpfahl wurde mit Dehnmessstreifen (DMS) entlang des Pfahlmantels sowie einem Beschleunigungsaufnehmer am Pfahlkopf instrumentiert. Über die DMS wurde während der Installation der Verlauf des Pfahlfußwiderstands aufgezeichnet, um Aussagen über den Vibrationsmodus treffen zu können (vgl. [CUDMANI, 2001], [VOGELSSANG, 2016]). Während der lateralen Pfahlprobelastung wurde über die DMS die am Pfahlmantel entstehende Biegedehnung gemessen.

2.4 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau der Modellversuche ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Versuche wurden in Betonringen mit einem inneren Durchmesser von 2,0 m sowie einer Höhe von 2,5 m durchgeführt. Der Versuchsbehälter wurde mit einer 0,3 m hohen Drainageschicht, gefolgt von einer 2,1 m hohen Sandschicht befüllt. Um eine Vermischung der beiden Schichten zu verhindern, wurde ein Geovlies eingelegt. Nach Einbau des Bodens konnte der Versuchsbehälter von unten mit Wasser geflutet werden.

Für die vibrierende Pfahlinstallation wurde eine Pfahlführung benötigt (Abbildung 2a), die ein Verkippen und Verdrehen des Pfahls verhinderte. Für die Installation wurden zwei elektrische Unwuchtmotoren am Pfahlkopf befestigt, deren Frequenz über einen

Last wurde zudem die Verschiebung an ausgewählten Punkten oberhalb der Geländeoberfläche gemessen. Diese Messwerte erlaubten eine Auswertung der lateralen Pfahl-Boden Interaktion.

Die Modellversuche wurden mit variierenden Pfahlherstellparametern durchgeführt. Es wurden neben der Lagerungsdichte des Sandes die Frequenz, das Arbeitsmoment und die Zentrifugalkraft variiert. Die laterale Pfahlprobelastung wurde hingegen immer identisch durchgeführt.

Im Folgenden werden zwei repräsentative Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Zum einen handelt es sich um einen Versuch, bei dem es zu einem eher nicht-kavitativen Vibrationsvorgang kam. Bei dem anderen Versuch trat das Gegenteil ein und es stellte sich ein eher kavitativer Vibrationsvorgang ein.

3 Ausgewählte Versuchsergebnisse zur Pfahlinstallation

In Abbildung 3 sind die vertikalen Verschiebungsamplituden s_z der beiden Versuche über die Installationszeit dargestellt. Die beiden Versuchsergebnisse zeigen, dass es wesentliche Unterschiede zwischen den beiden zuvor definierten Vibrationsmodi gibt. Im Fall des Versuchs, bei dem es zu einem nicht-kavitativen Vibrationsvorgang kam, ist insbesondere die abwärts gerichtete Amplitude kleiner als bei dem Versuch mit kavitativem Vibrationsvorgang. Neben den deutlichen Unterschieden in der abwärts gerichteten Verschiebungsamplitude ist auch die aufwärts gerichtete Amplitude des Versuchs mit kavitativem Vibrationsvorgang größer als diejenige des nicht-kavitativ vibrierten Pfahls. So haben [VOGELANG, 2016] und [LABENSKI, 2018a] gezeigt, dass die aufwärts gerichtete Verschiebungsamplitude ein wesentlicher Parameter ist, der darüber entscheidet, welcher Vibrationsmodus beim Vibrieren auftritt. Neben der Größe der Verschiebungsamplitude ist der Abbildung auch zu entnehmen, dass der nicht-kavitative Vibrationsvorgang zu einer geringeren Installationszeit führte, was wiederum [RODGER & LITTLEJOHN, 1980] bestätigt.

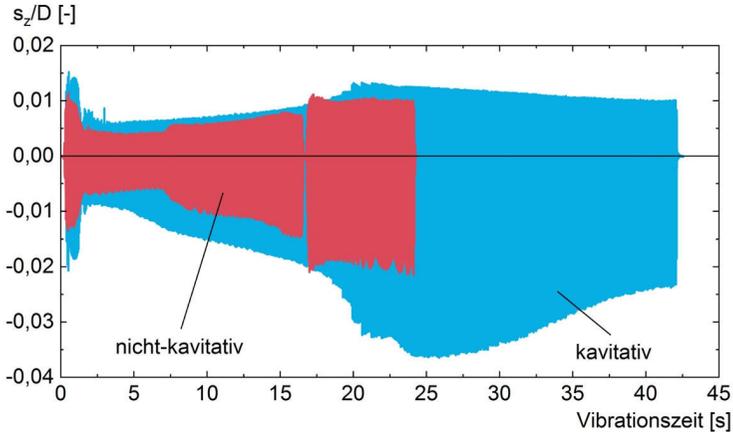


Abbildung 3: Über den Pfahldurchmesser D normierte vertikale Verschiebungsschwingungszahl s_z der beiden Versuche mit kavitivem und nicht-kavitivem Vibrationsvorgang

4 Ausgewählte Versuchsergebnisse zur lateralen Pfahlprobelastung

Neben wesentlichen Unterschieden der beiden Vibrationsmodi während des Pfahlinstallationsvorgangs weisen beide auch Unterschiede im lateralen Tragverhalten auf.

In Abbildung 4 sind die dimensionslosen Lastverschiebungskurven beider Versuche dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass der Pfahl mit einem kavitativen Installationsvorgang einen signifikant größeren Bodenwiderstand generieren kann als der Pfahl mit einem nicht-kavitativen Vibrationsmodus. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass es sich bei diesen beiden Versuchen um diejenigen mit dem besten und mit dem schlechtesten lateralen Tragverhalten aller von [LABENSKI, 2018a] durchgeführten Versuche handelt. Die Lastverschiebungskurven der anderen durchgeführten Versuche verlaufen zwischen diesen beiden Versuchsspuren. Wie [LABENSKI, 2018b] zudem zeigte, verläuft die laterale Lastverschiebungskurve eines eingedrückten Pfahles fast identisch zu der des mit nicht-kavitivem Vibrationsvorgang installierten Pfahls.

Neben den beiden experimentellen Last-Verschiebungskurven sind außerdem analytisch bestimmte Kurven in der Abbildung dargestellt. Die Kurve mit dem Titel *Standard p-y* wurde mit dem p-y Ansatz aus der [DNVGL-ST-0126, 2016] bestimmt. Dieser Ansatz ist identisch mit dem von [MURCHISON & O'NEILL, 1984] vorgestellten Ansatz. Es zeigt sich deutlich, dass die analytisch bestimmte Kurve nicht zu den experimentell ermittelten Kurven passt,

auch wenn sie in der gleichen Größenordnung liegt (vgl. [LABENSKI & MOORMANN, 2018]). Die beiden anderen analytisch ermittelten Kurven werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

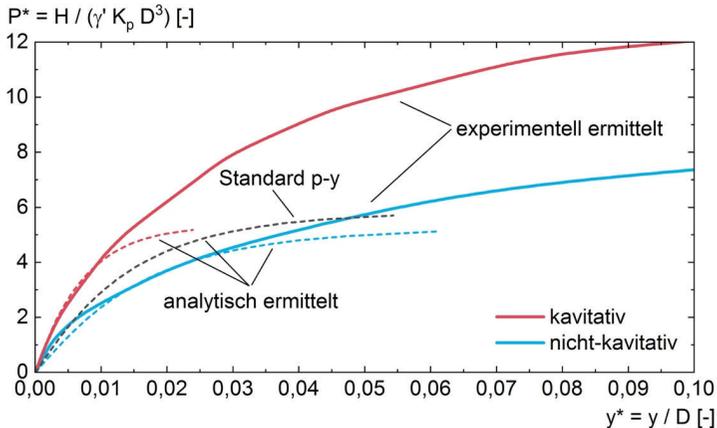


Abbildung 4: Experimentelle und analytische laterale Last-Verschiebungskurven

5 Abhängigkeitsfunktion zwischen vibrierender Pfahlinstallation und lateralem Tragverhalten

Um den Einfluss der vibrierenden Pfahlinstallation auf das statisch laterale Tragverhalten zu quantifizieren, nutzte [LABENSKI, 2018a] die aus der Auswertung der Pfahlinstallation und des lateralen Tragverhaltens gewonnenen Erkenntnisse. Diese ermöglichten die Aufstellung einer Abhängigkeitsfunktion zwischen der Pfahlinstallation und der lateralen Pfahlkopfsteifigkeit K_{SLS} (Abbildung 5). Die laterale Pfahlkopfsteifigkeit ist definiert als Sekante der Last-Verschiebungskurve zwischen $P^* = 3$ und 6. Die Erkenntnisse aus der Auswertung der Last-Verschiebungskurven, der Pfahl-Boden Interaktion und ihr Einfluss auf die laterale Pfahlkopfsteifigkeit K_{SLS} wurden genutzt, um Gleichung 1 zu entwickeln. Die Vibrationsrammung wird über den Parameter Λ erfasst, in welchen die während der Vibrationsrammung in den Boden eingeleitete Energie, der *Grad der Kavität*, die Erregerfrequenz der Vibratoren sowie das Verhältnis von dynamischer Kraft zu statischer Gewichtskraft eingehen. Eine vollständige Herleitung der Gleichung ist in [LABENSKI, 2018a] zu finden. Bei den in dieser Veröffentlichung vorgestellten Versuchen handelt es sich um die zwei Extrema mit höchster und geringster Pfahlkopfsteifigkeit.

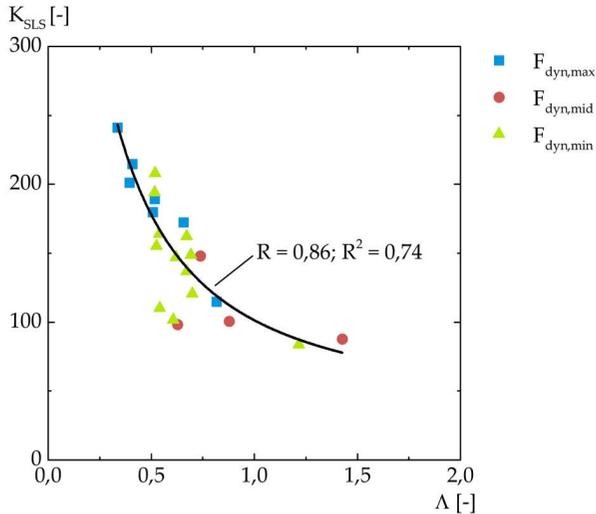


Abbildung 5: Laterale Pfahlkopfsteifigkeit K_{SLS} in Abhängigkeit von dem Parameter Λ nach [LABENSKI, 2018a]

$$K_{SLS} = 28,5 \cdot \exp[2,06 / (\Lambda + 0,63)] \quad (1)$$

6 Vorschlag eines modifizierten p-y Ansatzes zur Berechnung des statisch lateralen Tragverhaltens einvibrierter Monopiles

Um einen Berechnungsansatz für das laterale Tragverhalten einvibrierter Monopiles bereitzustellen, wurde die Abhängigkeitsfunktion aus Gleichung 1 mit der für die Bemessung von Monopiles gebräuchlichen p-y Methode (vgl. beispielsweise [KLINKVORT & HEDEDAL, 2014], [MOORMANN, 2018]) gekoppelt. Durch diesen modifizierten analytischen Berechnungsansatz ist es möglich, maßgebende, das laterale Tragverhalten beeinflussende, Installationseffekte infolge der vibrierenden Pfahlherstellung bei der Bemessung des Monopiles zu erfassen.

Der Ansatz von [LABENSKI, 2018a] sieht eine Modifikation der initialen Steifigkeit der Bettungsreaktionskurven mittels des Faktors α_{vib} vor. Eine Modifikation des Bruchwerts wird hingegen nicht vorgenommen. In Abbildung 6 werden für eine Einbindetiefe von $z/D = 2$

experimentell und analytisch bestimmte Kurven der beiden in dieser Veröffentlichung präsentierten Versuche gegenübergestellt. Dargestellt ist zudem der entsprechende Anpassungsfaktor α_{vib} . Der Vergleich der experimentellen und analytischen lateralen Bettungsreaktionskurven deutet zunächst an, dass der laterale Bodenwiderstand durch die analytischen Kurven unterschätzt wird. Allerdings verhalten sich die entsprechenden Kurven bis zu $p^* = 3$ ähnlich und verlaufen annähernd parallel. Mit zunehmendem p^* laufen die Kurven allerdings weiter auseinander, da der Bruchwiderstand des analytischen Ansatzes nicht modifiziert wurde.

Um die Anwendbarkeit des vorgestellten Ansatzes unter Beweis zu stellen, sind in Abbildung 4 die mit diesem Ansatz analytisch bestimmten lateralen Last-Verschiebungskurven der beiden in dieser Veröffentlichung vorgestellten Versuche dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den analytischen Last-Verschiebungskurven bis zu einer Last von $P^* = 5$. Erst mit weiterer Belastung laufen die experimentellen und analytischen Kurven aufgrund des nicht modifizierten Bruchwerts auseinander.

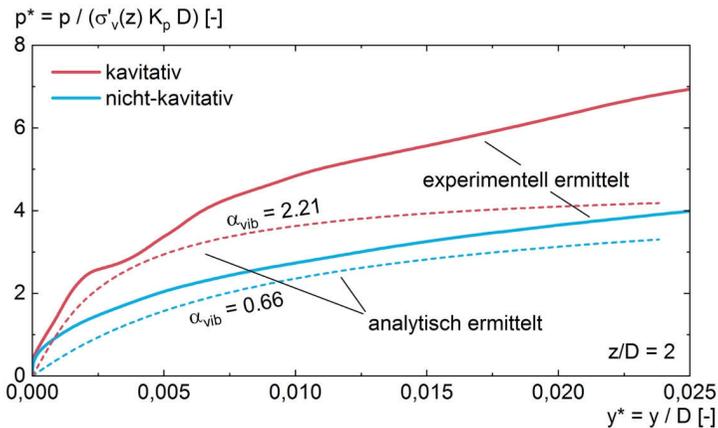


Abbildung 6: Experimentelle und analytische laterale Pfahl-Bettungsreaktionskurven in einer Tiefe von $z/D = 2$

7 Résumé

In dieser Veröffentlichung wurden der experimentelle Versuchsaufbau zur Untersuchung des lateralen Tragverhaltens einvibrierter Monopiles sowie zwei repräsentative

Versuchsergebnisse einvibrierter Monopiles vorgestellt. Der Vergleich der Versuchsergebnisse hinsichtlich der Pfahlinstallation zeigte deutliche Unterschiede zwischen den beiden Vibrationsmodi kavitativ und nicht-kavitativ. Bei der Vorstellung der Versuchsergebnisse hinsichtlich des lateralen Tragverhaltens zeigte sich, dass das laterale Tragverhalten maßgeblich durch den während der Installation auftretenden Vibrationsmodus beeinflusst wird. Um den Einfluss der vibrieren Pfahlinstallation auf das laterale Tragverhalten zu quantifizieren, wurde von [LABENSKI, 2018a] eine Abhängigkeitsfunktion entwickelt, die die wesentlichen das laterale Tragverhalten beeinflussenden Effekte während der vibrierenden Pfahlinstallation erfasst.

Weiterhin zeigte sich, dass der Standard p-y Ansatz nicht geeignet ist, das laterale Tragverhalten einvibrierter Monopiles zu bestimmen. Aus diesem Grund wurde eine Modifikation des bestehenden p-y Ansatzes vorgestellt. Dieser Ansatz greift im Wesentlichen die zuvor vorgestellte Abhängigkeitsfunktion auf und modifiziert die Anfangssteifigkeit der lateralen Bettungsreaktionskurven. Durch Rückrechnung von lateralen Last-Verschiebungskurven konnte die Anwendbarkeit des vorgestellten Ansatzes unter Beweis gestellt werden. Der vorgestellte Ansatz hat den Vorteil, dass er durch einfache Modifikation der bestehenden p-y Methode leicht in bestehende Bemessungsansätze und -programme integriert werden kann, ohne dass aufwändige dreidimensionale numerische Berechnungen notwendig sind.

8 Danksagung

Ich bedanke mich für die Unterstützung durch meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann sowie die Bereitstellung des Arbeitsplatzes und des Labors an der Universität Stuttgart.

Die experimentellen Untersuchungen wurden zu Teilen während der von innogy SE geförderten Forschungsprojekte *VibroPile II* sowie *CAFÉ* durchgeführt. Ich bedanke mich an dieser Stelle für die Unterstützung insbesondere bei Dr.-Ing. Volker Herwig sowie Ben Matlock.

Die analytischen Last-Verschiebungskurven in dieser Publikation wurden mit dem Programm IGtHPile berechnet, welches vom Institut für Geotechnik (IGtH) der Leibnitz Universität Hannover entwickelt wurde.

Literatur

Cudmani, R.; Statische, alternierende und dynamische Penetration in nichtbindigen Böden. *Dissertation, Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Heft 152, Karlsruher Institut für Technologie, 2001.*

DNVGL-ST-0126; Support structures for wind turbines. *DNV GL Standard, April 2016.*

Klinkvort, R.T.; Hededal, O.; Effect of load eccentricity and stress level on monopile support for offshore wind turbines, *Canadian Geotechnical Journal* 51(9), 966–974, 2014.

Klinkvort, R.T.; Hededal, O.; Springman, S.; Centrifuge modelling of drained lateral pile – soil response: Application for offshore wind turbine support structures, *Dissertation, Technical University of Denmark, Lyngby, 2013.*

Labenski, J.; Untersuchungen zum statisch lateralen Tragverhalten von in nichtbindigen Böden einvibrierten Monopiles, *Dissertation, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart (Entwurf vom 04. Mai 2018), 2018a.*

Labenski, J.; Experimentelle Untersuchungen zum lateralen Tragverhalten einvibrierter offener Stahlrohrpfähle, *Vorträge der 35. Baugrundtagung, Forum für junge Geotechnik-Ingenieure, S. 163–172, DGGT, Stuttgart, 2018b.*

Labenski, J.; Moormann, Ch.; Experimental investigations on the lateral bearing behaviour of vibratory-driven open steel pipe piles. *Proceedings of the 2018 DFI-EFFC International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement, S. 170–179, 2018.*

Le, V.H.; Zum Verhalten von Sand unter zyklischer Beanspruchung mit Polarisationswechsel im Einfachscherversuch, *Dissertation, Heft 66, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, 2015.*

LeBlanc, C.; Houlsby, G.; Byrne, B.; Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading, *Géotechnique* 60(2), 79–90, 2010.

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

Moormann, Ch.; Jahresbericht 2017 des Arbeitskreises Pfähle der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), *Bautechnik* 95(2), 175–182, 2018.

Moormann, Ch.; Kirsch, F.; Herwig, V.; Vergleich des axialen und lateralen Tragverhaltens von vibrierten und gerammten Stahlrohrpfählen, *Vorträge der 34. Baugrundtagung, 15.-17.09.2016, DGGT. Bielefeld. S. 73–81, 2016.*

Murchison, J.M.; O'Neill, M.W.; Evaluation of p-y relationships in cohesionless soils, *Proceedings of the ASCE Symposium Analysis and Design of Pile Foundations, S. 174–191, ASCE, San Francisco, 1984.*

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

Vogelsang, J.; Untersuchungen zu den Mechanismen der Pfahlrammung. *Dissertation, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik, Heft 182, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2016.*

WindEurope Business Intelligence; Offshore Wind in Europe - Key trends and statistics 2017, 2018

Autor

Johannes Labenski, M.Sc.

johannes.labenski@arcadis.com

Arcadis Germany GmbH

Abteilung Geotechnik

Europaplatz 3, 64293 Darmstadt

www.arcadis.com

Tel.: +49 151 17143151