

Änderung der Bodenzustandsgrößen bei der Schlag- und Vibrationsrammung offener Stahlrohrpfähle in wassergesättigten Sanden

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann¹,
Johannes Labenski, M.Sc.^{1,2}, Bastian Hoffmann, M.Sc.¹,
Shreyas Giridharan, M.Sc.¹, Sujith Gowda, M.Sc.¹
Dr.-Ing. Volker Herwig³, Benjamin Matlock MEng³

¹Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik (IGS),

²Arcadis Germany GmbH, Darmstadt, zuvor¹

³Innogy SE, Hamburg

1 Einleitung

Offene Stahlrohrpfähle werden für vielfältige Aufgabenstellungen im Wasser- und Hafenbau sowie im Offshore-Bereich eingesetzt. Stahlrohrpfähle, insbesondere im Offshore-Bereich, wurden bisher überwiegend mittels Schlagrammung installiert, obwohl das Potential der alternativen Vibrationsrammung aus der Einbringung von Spundbohlen bekannt ist: Insbesondere die Installationszeit und die Geräuschemissionen sowie die Fatiguebeanspruchung des Stahlprofils während der Installation können gegenüber einer Schlagrammung signifikant reduziert werden.

Für viele Anwendungen ist das laterale Tragverhalten von besonderer Bedeutung, das aber für einvibrierter Stahlrohrpfähle wissenschaftlich noch wenig erforscht ist. Viele Untersuchungen zum lateralen Tragverhalten wurden ohne besondere Berücksichtigung des Installationsvorgangs an eingedrückten oder bereits im Boden vorinstallierten Pfählen durchgeführt (z. B. KLINKVORT ET AL. 2013, LEBLANC ET AL 2010). Zum lateralen Tragverhalten einvibrierter Monopiles wurde 2016 ein großmaßstäblicher Feldversuch durchgeführt (MOORMANN ET AL. 2016).

Untersuchungen zur Vibrationsrammung von Pfählen zeigen einen Einfluss zyklischer und dynamischer Effekte auf, die das Penetrationsverhalten einerseits und den 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 (LABENSKI 2018).

Infolge der Pfahlinstallation ändern sich also die Bodenzustandsgrößen und Spannungen im Umfeld des Pfahls, wobei die eingesetzte Installationsmethode sowie die gewählten Installationsparameter einen signifikanten Einfluss haben. Für das Verständnis der Auswirkung der Installationsparameter auf das laterale Tragverhalten ist daher die Erforschung der Bodenzustandsgrößen infolge der Einbringung von besonderer Bedeutung. Auf der Basis von physikalischen und numerischen Untersuchungen werden diese Wechselwirkungen in dem vorliegenden Beitrag näher untersucht.

2 Erfahrungswerte aus der Literatur

In der Literatur wird insbesondere über Untersuchungen zur Änderung der Bodenzustandsgrößen bei der Impulsrammung von Fertigteilpfählen mit geschlossenen und offenen Querschnitten berichtet (KEMPFFERT & MOORMANN 2018), während die Vorgänge bei einvibrierten offenen Stahlrohrpfählen noch wenig erforscht sind.

So führte WITZEL (2004) Modellversuche zum Einbringen und zum axialen Widerstand von vorgefertigten Verdrängungspfählen in Sand durch. Die am Fuß geschlossenen Stahlrohrpfähle mit einem Außendurchmesser von 5,0 cm und variierender Einbindetiefe (0,60 m bis 1,40 m) wurden in dicht gelagerten, trockenen Sand gerammt. Die Dehnungsmessung am Pfahl erfolgte mit Dehnmessstreifen, die Messung der Spannungen im Boden mittels Erddruckgebern. WITZEL verzeichnete einen kontinuierlichen Anstieg der Radialspannungen, sobald der Pfahlfuß einen vertikalen Abstand von etwa $10 \cdot D$ zur Messebene unterschritt. Kurz bevor die Pfahlspitze die jeweilige Messebene passierte, erreichten die radialen Spannungen ihren Maximalwert. Nach Erreichen des Maximalwertes fiel die Radialspannung neben dem Pfahlmantel wieder ab und ging zum Ende der Rammung annähernd auf ihren Anfangswert zurück. Diese Beobachtungen bestätigen die Vorstellung von LINDER (1977), dass sich unterhalb des Pfahlfußes eines Rammpfahls ein verdichteter Bodenpfropfen ausbildet, der im Laufe des Rammvorganges vom Pfahlfuß vorangetrieben tiefer gerammt wird. Über den Bodenpfropfen hinausgehend entsteht danach durch den

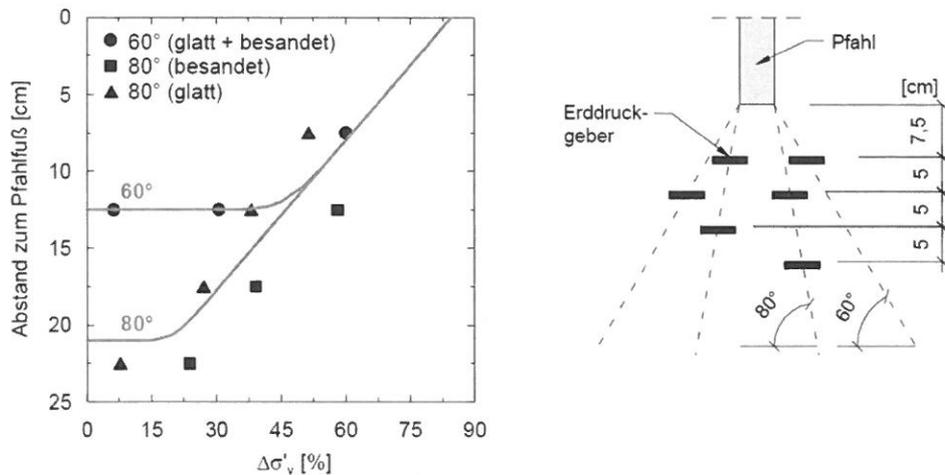


Abbildung 1: Veränderung der vertikalen Spannung σ'_v unter der Pfahlfußebene infolge des Rammvorganges nach WITZEL (2004)

Rammvorgang ein Bereich erhöhter Vertikalspannungen unterhalb des Pfahlfußes. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Zunahme der vertikalen Spannung $\Delta\sigma'_v$ durch den Rammvorgang in Abhängigkeit des Abstandes zum Pfahlfuß und der horizontalen Position (60°- und 80°-Linie in Anlehnung an LINDER 1977). Die vertikale Spannungszunahme $\Delta\sigma'_v$ ist auch von der aufgewendeten Rammarbeit W abhängig.

Hinsichtlich der Vertikalspannungen im Sand beobachtete WITZEL (2004) im Umfeld des Pfahlmantels im Laufe des Rammvorganges eine Abnahme, deren Intensität umso höher war, je geringer der Abstand zum Pfahl war; die Reichweite der vertikalen Spannungsänderungen betrug etwa $4 \cdot D$ von der Pfahlachse. Die Auswertung in Abb. 1a, in dem die gemessene vertikale Spannungsänderung $\Delta\sigma'_v$ in Abhängigkeit des Abstandes von der Pfahlachse aufgetragen ist, lässt erkennen, dass auch die Summe der Rammarbeit Einfluss auf die Abnahme der Vertikalspannungen hat: insbesondere im Nahbereich des Pfahlmantels bewirkt eine höhere Summe der Rammarbeit einen stärkeren Abfall der vertikalen Spannungen im Boden. WITZEL (2004) deutet diese Abnahme der vertikalen Spannungen als eine durch den Rammvorgang bedingte Auflockerung in direkter Umgebung um den Pfahlschaft, stellte aber andererseits fest, dass die mobilisierbare Mantelreibung mit zunehmender schichtbezogener Rammarbeit W anstieg. Diesen scheinbaren Widerspruch erklärte WITZEL (2004) mit dem Anstieg des Erdruhedruckbeiwertes K_0 infolge des Rammvorganges (Abb. 2b). Danach ergibt sich aus den durch die Rammung bedingten horizontalen und vertikalen Spannungsänderungen ein deutlicher Anstieg des „Erdruhedruckbeiwertes“ $K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$ im Pfahlnahbereich, der im Abstand von $2 \cdot D$ von

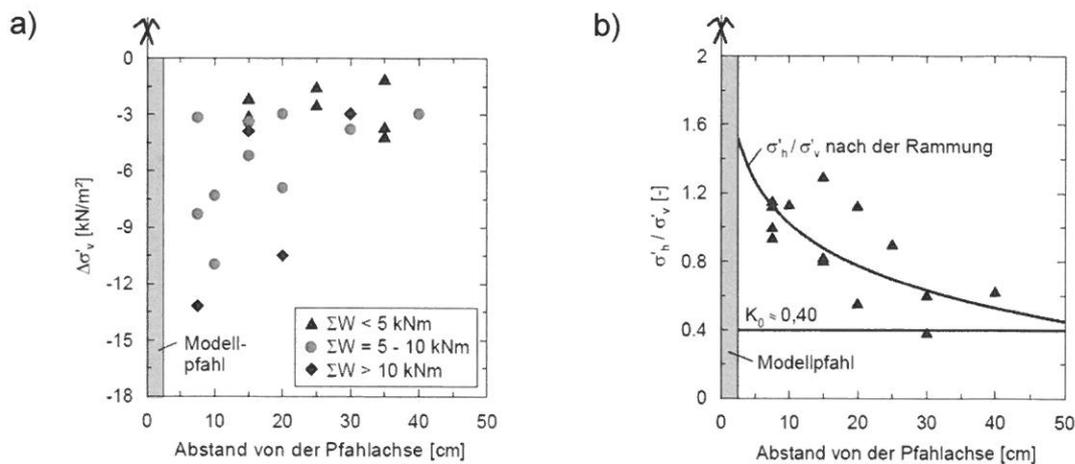


Abbildung 2: a) Vertikale Spannungsänderung $\Delta\sigma'_v$ in Abhängigkeit des Abstandes von der Pfahlachse und der Rammarbeit ΣW ; b) Änderung von $K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$ neben dem Pfahl infolge des Rammvorganges nach WITZEL (2004)

der Pfahlachse etwa um den Faktor drei höher ist als im Ausgangszustand vor der Pfahlrammung. Ein Effekt wurde bis in einen Abstand von $10 \cdot D$ von der Pfahlachse nachgewiesen.

STAHLMANN & FISCHER (2013) untersuchten die Änderung von Spannungszuständen im Boden bei geramnten und vibrierten offenen Stahlrohren in überwiegend wassergesättigtem Sand in einem großmaßstäblichen Modellversuch. Dafür wurden Stahlrohre mit einem Außendurchmesser von 0,36 m und einer Wandstärke von 3,0 mm jeweils 2,5 m tief in den Boden eingebracht. In verschiedenen Tiefen und Abständen zum Pfahl wurden sowohl die vertikalen und horizontalen bzw. radialen totalen Spannungen als auch der Porenwasserüberdruck gemessen. STAHLMANN & FISCHER (2013) stellten bei den geramnten Pfählen fest, dass mit herannahendem Pfahlfuß die Radialspannungen ansteigen. Passiert der Pfahlfuß jedoch die Messebene, so kommt es in der Folge wieder zu einer Reduktion der Horizontalspannung (Abb. 3a). Somit konnten die von WITZEL (2004) in trockenem Sand gewonnenen Erkenntnisse im wassergesättigten Sand bestätigt werden.

Die von STAHLMANN & FISCHER durchgeführten Porenwasserdruckmessung ergaben, dass bei einer schlagenden Pfahlinstallation unter den hier maßgebenden Randbedingungen keine wesentliche Akkumulation von Porenwasserüberdrücken auftritt (Abb. 4a).

Ergänzend zu den Rammversuchen wurden Vibrationsversuche durchgeführt. Abbildung 3b zeigt die Horizontalspannungen bei vibrierender Installation. Spannungserhöhungen, die in ihrer absoluten Größe zudem deutlich kleiner ausfallen als bei den Versuchen mit

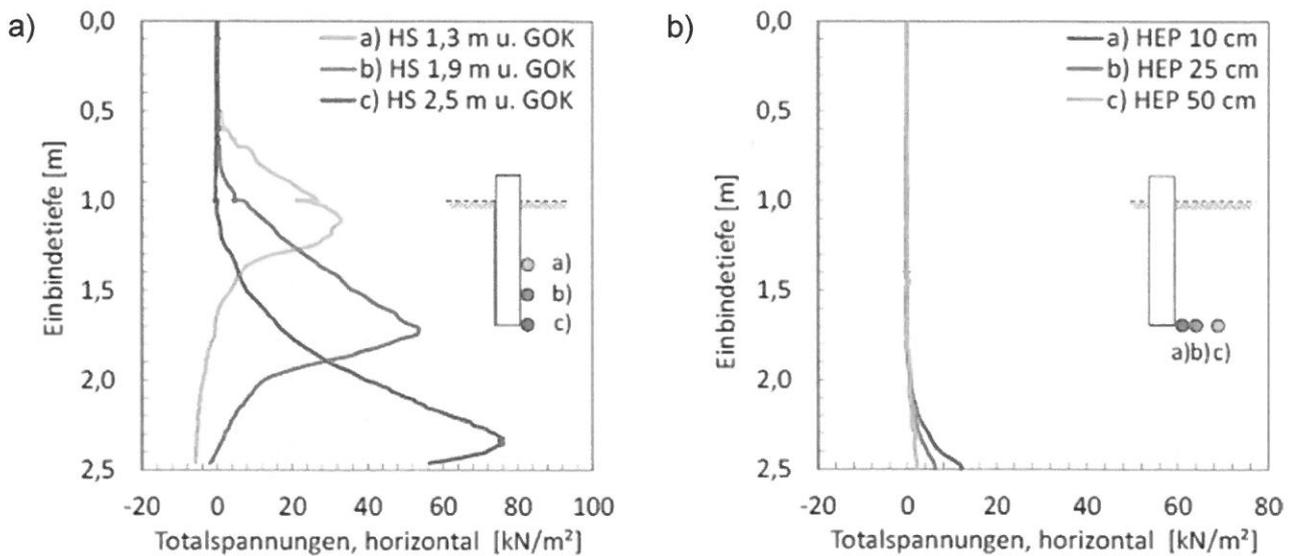


Abbildung 3: Horizontalspannungen a) während der Impulsrammung und b) während der Vibrationsrammung nach STAHLMANN & FISCHER (2013)

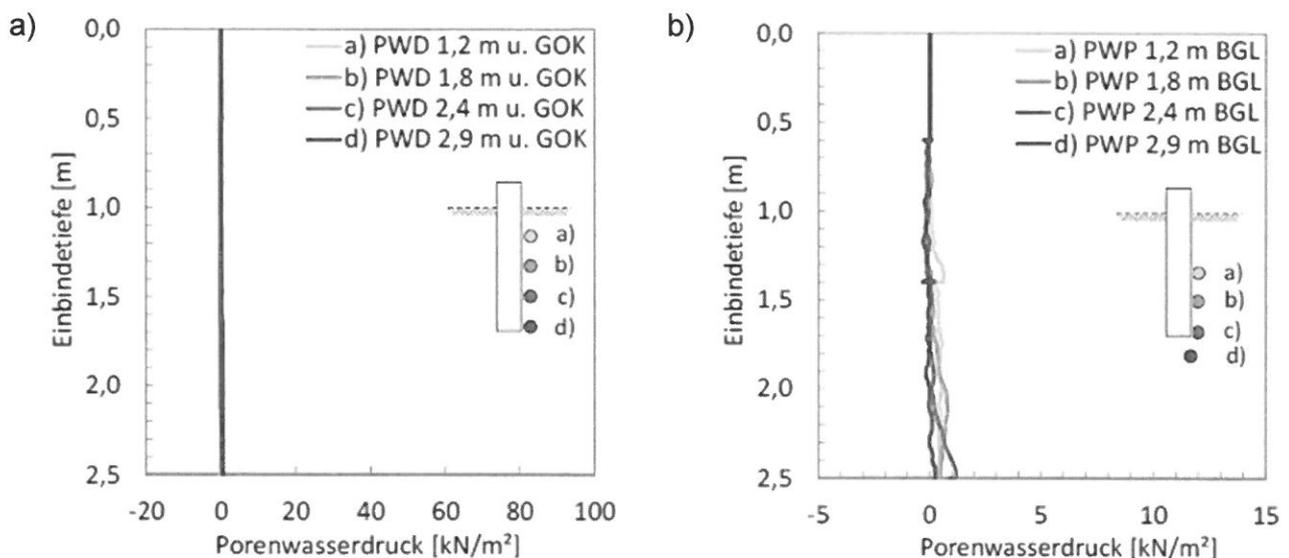


Abbildung 4: Porenwasserdruckmessungen a) während der Impulsrammung und b) während der Vibrationsrammung nach STAHLMANN & FISCHER (2013)

schlagender Installation, sind lediglich bei Annäherung des Pfahlfußes an die Messebenen zu beobachten. Die während der Vibrationsrammung gemessenen Porenwasserdruckmessungen (Abb. 4b) zeigen geringfügig höhere Werte als während der Schlagrammung.

Die während der Vibrationsrammung und nachlaufend auftretenden bodenmechanischen Vorgänge und Interaktionen zwischen Pfahl und Boden sind komplex. Zur mathematischen Beschreibung des Vibrationsrammens entwickelten RODGER & LITTLEJOHN (1980) aufbauend auf Modellversuchen einen Ansatz, der physikalische Zustände in Abhängigkeit

von der Beschleunigungsamplitude unterscheidet. Hierauf aufbauend stellte DIERSSEN (1994) ein bodenmechanisches Modell zur Beschreibung von Vibrationsvorgängen im trockenen Sand vor. Eine Erweiterung und numerische Modellbildung mit Hilfe des hypoplastischen Stoffgesetzes präsentierte CUDMANI (2001). Basierend auf Feld- und Laborversuchen werden zwei Einbringmodi (Bewegungstypen) beim Vibrationsrammen identifiziert, die von dem Anfangszustand (Lagerungsdichte, Spannungsniveau) des Bodens abhängig sind, aber auch durch die Herstellparameter (Frequenz, statisches Moment, statische Auflast) beeinflusst werden können:

- Kavitations bzw. langsames Vibrationsrammen tritt insbesondere bei einer großen Bewegungsamplitude des Rammguts auf. Dies kann der Fall sein, wenn das Arbeitsmoment der Vibratoren (große Unwuchtstellung) sehr groß ist, wenn die Vibrationsfrequenz klein ist oder wenn der Boden auf Grund seiner Lagerung und seines Spannungszustands einen sehr großen Pfahlfußwiderstand generiert, also insbesondere bei mitteldichter bis dichter Lagerung (RODGER & LITTLEJOHN 1980, CUDMANI 2001). Beim kavitativen Vibrationsrammen findet bei der Aufwärtsbewegung ein Kontaktverlust zwischen Fuß des Rammguts und Boden statt, sodass die Abwärtsbewegung ohne Kontakt zwischen Fuß und Boden beginnt. Nach Auftreffen des Fußes auf den Boden wird

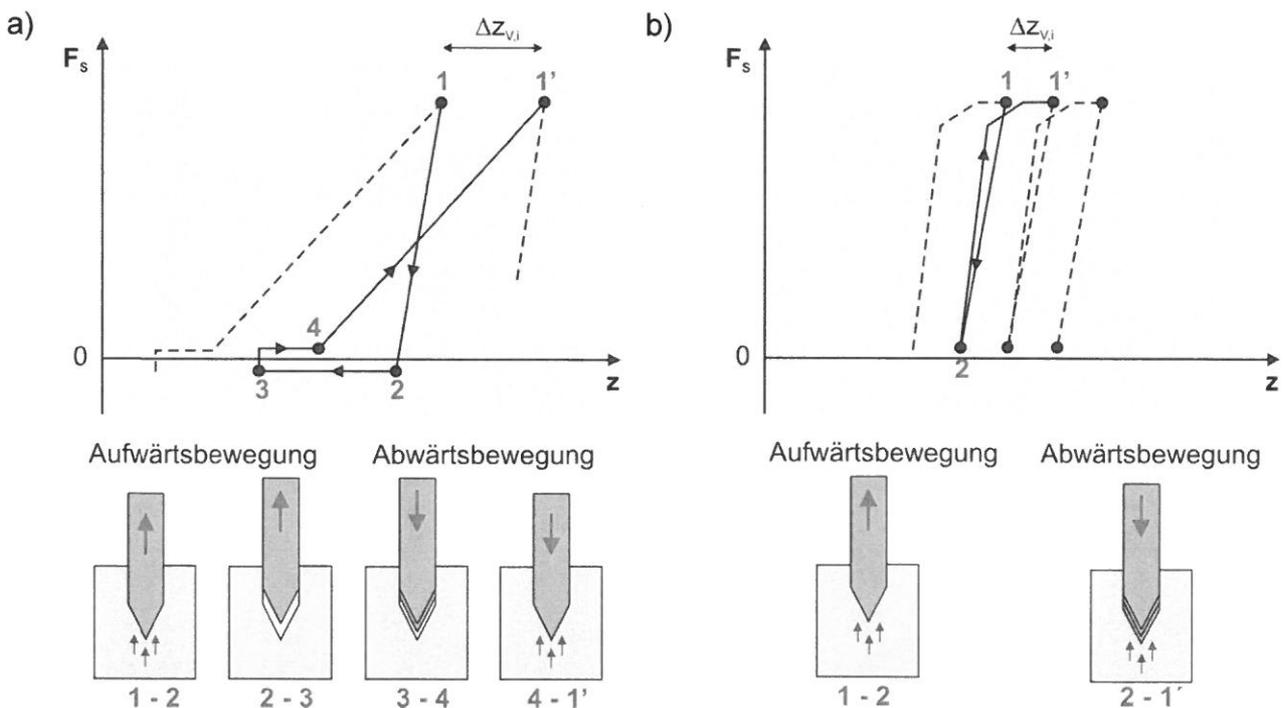


Abbildung 5: Idealisierter Verlauf der Spitzendruckkraft F_s für a) kavitives Vibrationsrammen und b) nicht-kavitives Vibrationsrammen nach DIERSSEN (1994)

der Spitzendruck erneut mobilisiert, ohne dabei den Grenzzustand zu erreichen (Abb. 5).

- Nicht-kavitations bzw. schnelles Vibrationsrammen liegt dann vor, wenn die Bewegungsamplitude des Pfahlfußes in Verbindung mit großen statischen Auflasten klein ist und sich die Pfahlspitze nicht vom Boden löst. Dies ist insbesondere der Fall bei Wahl eines geringen Arbeitsmoments der Vibratoren, hoher Vibrationsfrequenz oder wenn der Boden auf Grund seiner Lagerung und seines Spannungszustands einen geringen Pfahlfußwiderstand generiert, also insbesondere in locker bis mitteldicht gelagerten Böden (RODGER & LITTLEJOHN 1980, CUDMANI 2001). Beim nicht kavitativen Vibrationsrammen tritt bei der Aufwärtsbewegung des Pfahls kein Kontaktverlust zwischen dem Fuß des Rammgutes und dem Boden. Es kommt daher zu keiner vollständigen Entspannung des Bodens, sodass der Boden während der Abwärtsbewegung des Rammgutes einen Grenzwiderstand erreicht.

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 insbesondere im Verhalten des Bodens am Pfahlfuß.

In einem umfangreichen Versuchsprogramm untersuchten VOGELSANG ET AL. (2017) unter anderem den Vibrationsmodus. Hierfür wurden Versuche mit verschiebungskontrollierten zyklischen Amplituden unter Einhaltung einer konstanten Durchschnittsgeschwindigkeit durchgeführt, um die Effekte des kavitativen und nicht-kavitativen Vibrationsrammens unter Ausschluss der Dynamik zu untersuchen. VOGELSANG ET AL. (2017) stellten fest, dass während der Pfahlinstallation sowohl monotone als auch zyklische Effekte den Bodenwiderstand gegenläufig beeinflussen. Durch eine monotone Pfahlbewegung erhöht sich die auf den Pfahl wirkende Spannung des Bodens. Die (hoch)zyklische Bewegung des Pfahls hingegen sorgt für eine Entspannung. Ein Indikator, welcher Effekt überwiegt, kann das Verhältnis von Aufwärtsbewegung innerhalb eines Bewegungszyklus zur effektiven Eindringung des Pfahls pro Zyklus sein. Mit Zunahme dieses Verhältnisses überwiegen zyklische Effekte, was zu einem einfacheren Penetrationsvorgang führt und dem kavitativen Vibrationsrammen zuzuordnen ist. Bei einem kleinen Verhältnis überwiegen monotone Effekte und der Widerstand während der Pfahlinstallation gleicht sich dem Widerstand während des monotonen Einpressvorgangs an, was dem nicht-kavitativen Vibrationsrammen zugeordnet werden kann. Die zyklischen Effekte machen sich insbesondere in mittel-

dicht gelagertem Sand bei Nutzung einer möglichst großen Verschiebungsamplitude des Pfahls bemerkbar. In Abbildung 6 sind die Verläufe des Pfahlsitzendruckes für die Versuche in mitteldichter Lagerung mit einem mit konstanter Geschwindigkeit eingedrückten Pfahl sowie für mit großer und kleiner Verschiebungsamplitude verschiebungskontrolliert zyklisch installierten Pfähle dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Pfahl, der mit einer großen Verschiebungsamplitude zyklisch installiert wurde, einen geringeren Pfahlsitzendruck generiert, als der Pfahl, der mit kleiner Verschiebungsamplitude zyklisch installiert wurde. Zudem ist festzustellen, dass der Verlauf des Pfahlsitzendruckes im Fall der zyklischen Installation mit kleiner Verschiebungsamplitude gut mit dem Pfahlsitzendruck des mit konstanter Geschwindigkeit eingedrückten Pfahls übereinstimmt.

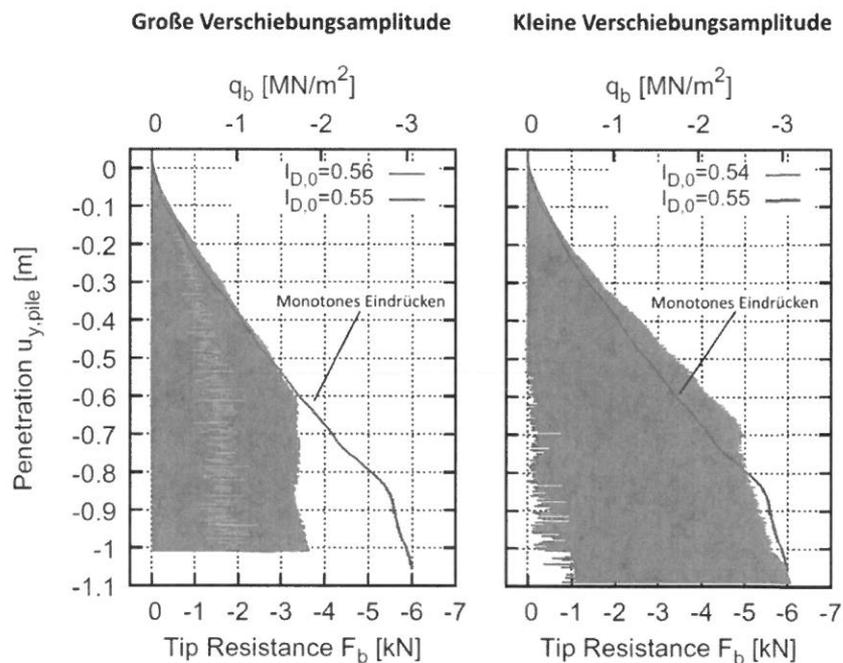


Abbildung 6: Pfahlsitzendruck während der zyklischen Pfahlinstallation mit großer (links) und kleiner (rechts) Verschiebungsamplitude im Abgleich mit monotonem Eindrücken des Pfahls in Sand mit mitteldichter Lagerung nach VOGELANG (2017)

Bei Versuchen mit einvibrierten Pfählen stellten VOGELANG ET AL. (2017) in mitteldichter, dichter und sehr dichter Lagerung des Sands ein ähnliches Verhalten und lediglich geringe quantitative Unterschiede fest. Unter Heranziehung der beiden Vibrationsmodi kavitativ und nicht-kavitativ erkannten sie, dass lediglich bei dem Versuch in sehr dichter Lagerung ein eindeutig kavitativer Vibrationsvorgang stattfindet. Bei den Versuchen in mitteldichter und dichter Lagerung ließ sich keine vergleichbar klaren Aussage treffen. In beiden Fällen verlief der Pfahlsitzendruck ähnlich; es handelte sich weder um einen eindeutig kavitativen, noch um einen eindeutig nicht-kavitativen Pfahlsitzendruckverlauf.

3 Experimentelle Untersuchungen

Um detailliertere Aussagen zur Installation von Stahlrohrpfählen mittels Vibrationsrammung sowie zu deren lateralem Tragverhalten treffen zu können, wurden im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes mit der TU Berlin (LE ET AL. 2018; REMSPECHER ET AL. 2018) sowohl physikalische als auch numerische Untersuchungen durchgeführt. Die physikalischen Untersuchungen wurden als 1g-Modellversuche konzipiert, bei denen der vibrierende Installationsvorgang von Stahlrohrpfählen in wassergesättigten Sanden unterschiedlicher Lagerungsdichte - unter Variation der maßgeblichen Installationsparameter - und das laterale Tragverhalten dieser Pfähle unter monotonen und zyklischen Einwirkungen simuliert wurde.

3.1 Versuchssand

Bei dem verwendeten Modellsand handelt es sich um einen enggestuften mittel- bis groben Berliner Sand mit einer Ungleichförmigkeitszahl von $C_U = 3,5$. Die maximale bzw. minimale Dichte wurde von LE (2015) zu $\rho_{d,max} = 1,906 \text{ g/cm}^3$ bzw. $\rho_{d,min} = 1,570 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Die Korndichte beträgt $2,61 \text{ g/cm}^3$. In Abbildung 7 ist die Sieblinie dargestellt.

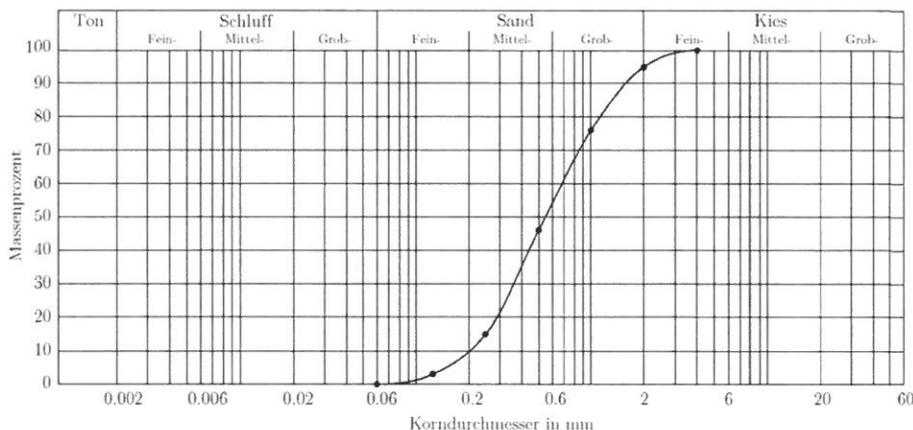


Abbildung 7: Korngrößenverteilung des in den Modellversuchen eingesetzten Berliner Sandes

3.2 Modellpfahl

Der für die Modellversuche verwendete Versuchspfahl ist ein offenes glasfaserverstärktes Kunststoffrohr (GFK), mit dem im Hinblick auf die laterale Belastung am Pfahlkopf die sich aus den Modellgesetzen äquivalente Biegesteifigkeit zutreffend abgebildet werden (LABENSKI 2019). Die Abmessungen des Versuchspfahls mit einem Außendurchmesser von 208 mm und einer Wandstärke von 3,2 mm entsprechen den skalierten Abmessungen des Feldversuches 'VIBRO I' (MOORMANN ET AL. 2016). Das Verhältnis L/D wurde zu 4,2

gewählt, was einer Einbindetiefe von 870 mm entspricht. 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 machen zu können. Während der lateralen Pfahlprobelastung wurde über die DMS die am Pfahlmantel entstehende Biegedehnung gemessen.

3.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau der Modellversuche ist in Abbildung 8a dargestellt. Die Versuche wurden in einem aus Betonringen erstellten Behälter 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. Nach Einbau des Bodens wurde der Versuchsbehälter von unten mit Wasser geflutet.

Die Versuche wurden in mitteldicht, dicht und sehr dicht gelagertem Sand durchgeführt. Dafür wurde der feuchte Sand für jeden Versuch schichtweise eingebaut und mit einer elektrischen Rüttelplatte verdichtet, bis die gewünschte Lagerungsdichte erreicht war.

Für die Durchführung der Vibrationsversuche wurde eine Pfahlführung verwendet (Abb. 8b), die eine verkippungs- und verdrehungsfreie Installation der Pfähle ermöglichte. Als Erreger wurden Unwuchtmotoren am Pfahlkopf befestigt, deren Frequenz über einen Frequenzumrichter gesteuert werden. Die dynamische Kraft konnte zusätzlich durch Veränderung der Schwungmassen variiert werden.

Die Modellversuche wurden mit variierenden Pfahlherstellparametern durchgeführt. Es wurden neben der Lagerungsdichte des Sandes die Frequenz, das Arbeitsmoment und die Zentrifugalkraft variiert. Als Referenz wurden zusätzlich Pfähle eingedrückt und eingerammt. Die Installation durch Impulsrammung wurde durch ein elektrisches Rammsondiergerät realisiert, das pro Schlag einen Energieeintrag von 49,05 Nm mobilisierte.

Die Pfahlpenetrationstiefe wurde über einen Positionsmessgeber (PT) während des gesamten Installationsvorgangs aufgeszeichnet. Zur Messung der Spannung und des Porenwasserdruckes wurden drei radiale (σ_o , σ_m , σ_u) sowie ein vertikaler (σ_v) Erddruckgeber bzw. Porenwasserdruckgeber (u_o , u_m , u_u , u_v) in den Sand eingebaut. Zusätzlich wurden drei triaxiale Beschleunigungsaufnehmer (Geo 1-3) in dem Versuchsboden eingebracht (Abb. 8a).

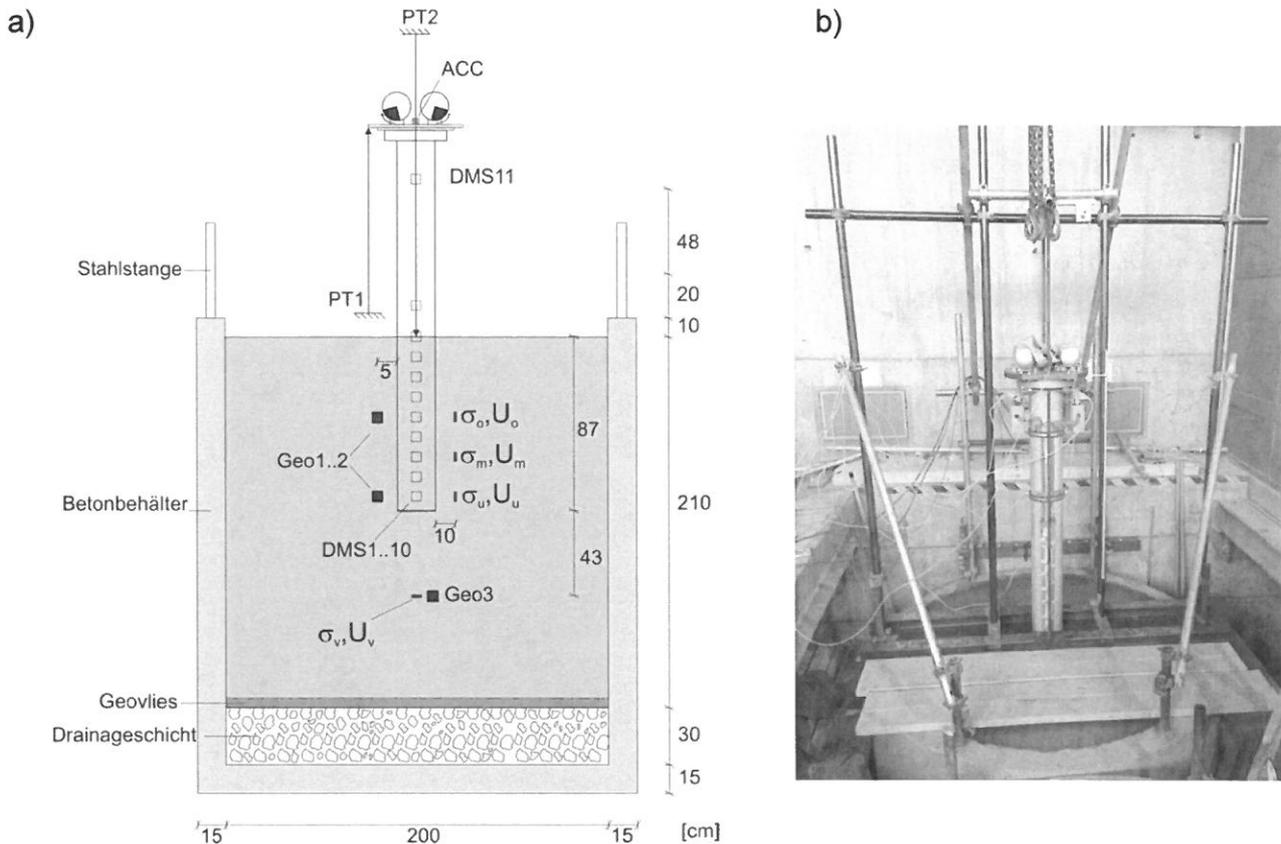


Abbildung 8: a) Versuchsaufbau für die vibrierende Pfahlinstallation, b) Installation Vibrationsversuch

3.4 Ausgewählte Versuchsergebnisse

3.4.1 Pfahlpenetration

Im Folgenden werden die Ergebnisse zweier ausgewählter, repräsentativer Modellversuche mit einvibrierten Pfählen vorgestellt und mit den Ergebnissen eines eingedrückten Pfahls verglichen. Die drei Versuche wurden in mitteldicht gelagertem Sand durchgeführt. Die Vibrationsrammung der beiden vorgestellten Versuche erfolgte mit der gleichen Vibrationsfrequenz, die nahe an der optimalen Installationsfrequenz lag. Variiert wurde das Arbeitsmoment und folglich auch die dynamische Kraft, sodass sich ein Verhältnis von dynamischer Kraft zu statischer Gewichtskraft $F_{\text{dyn}}/F_{\text{stat}}$ von 4,6 und 3,3 einstellte. Eine detaillierte Auswertung des Pfahlinstallationsvorgangs (LABENSKI 2019) ergab, dass es bei dem Versuch mit höherer dynamischer Kraft ($F_{\text{dyn}}/F_{\text{stat}} = 4,6$) zu einem kavitätem Vibrationsvorgang kam, während es bei dem Versuch mit geringerer dynamischer Kraft ($F_{\text{dyn}}/F_{\text{stat}} = 3,3$) zu einem nicht-kavitätem Vibrationsvorgang kam.

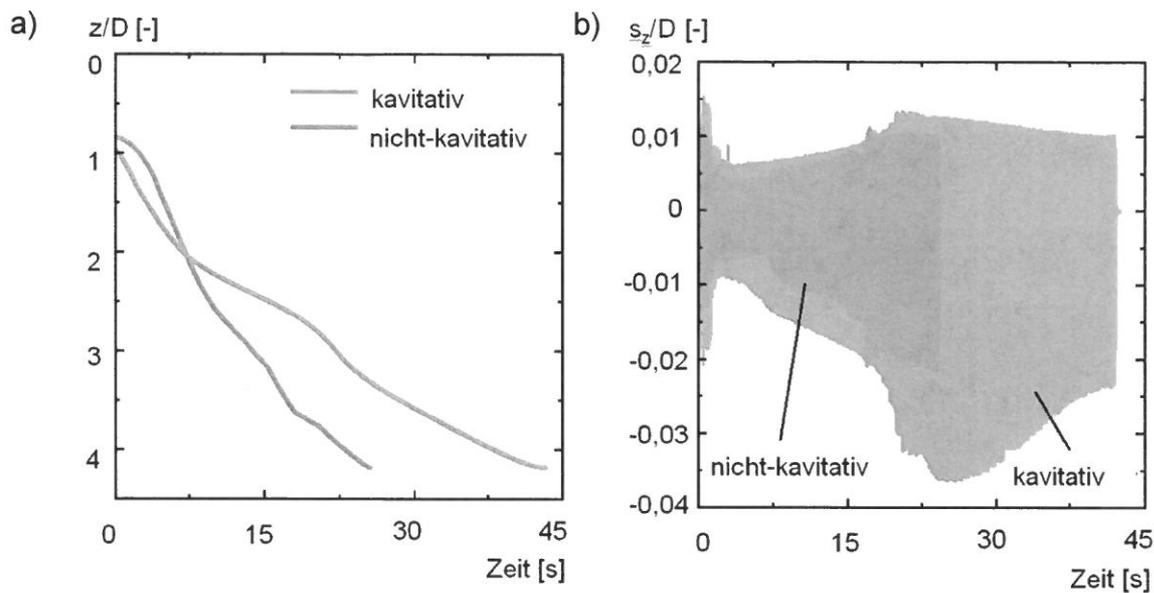


Abbildung 9: a) Pfahlpenetrationskurven und b) vertikale Verschiebungen des Pfahls s_z für die beiden in mitteldichten Sand einvibrierten Pfähle.

In Abbildung 9a sind die Pfahlpenetrationskurven der beiden einvibrierten Pfähle dargestellt. Abgebildet ist die Eindringtiefe über die Vibrationszeit. Durch Eigengewicht befanden waren die Pfähle zu Beginn der Installation bereits 0,17 bzw. 0,19 m tief in den Boden eingedrungen. Es ist festzustellen, dass der Pfahl mit nicht-kavativem Vibrationsvorgang schneller installiert werden konnte als der Pfahl, bei dem sich ein kavitativer Vibrationsvorgang einstellte. Dies passt zu der grundsätzlichen Modellvorstellung vom kavitativen und nicht-kavitativen Vibrationsrammen (RODGER & LITTLEJOHN 1980).

Die vertikalen Bewegungen des Pfahls s_z während der Pfahlinstallation (Abb. 9b) zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Tests und Vibrationsmodi. Die Auf- (positiv) und Abwärtsbewegungen (negativ) des nicht-kavativ vibrierten Pfahls sind kleiner als jene des kavativ gerammten Pfahles, wobei insbesondere der Unterschied in den Abwärtsbewegungen signifikant ist. Entscheidend für den Vibrationsmodus sind jedoch nach VOGEL-SANG (2016) und LABENSKI (2019) die aufwärtsgerichteten Bewegungen, d.h. der kleine Unterschied bei den aufwärts gerichteten Verformungen in den beiden Tests führt zu einem entweder überwiegend kavitativen oder nicht-kavitativen Einbringmodus.

Im Vergleich zur Vibrationsrammung fällt auf, dass die zum Eindrücken notwendige Kraft 5,7 mal größer ist als die mit den Unwuchtmotoren maximal erzeugbare dynamische Kraft. Dies verdeutlicht das enorme Potential der Vibrationsrammung hinsichtlich einer effizienten Pfahlinstallation.

3.4.2 Laterales Tragverhalten

In Abbildung 10 sind die lateralen Last-Verschiebungskurven der ausgewählten Modellversuche dargestellt (LABENSKI 2018). Die Last wird dimensionslos als F^* (Gleichung 1) nach KLINKVORT ET AL. (2013) mit φ' nach LE (2015) und die laterale Verschiebung dimensionslos als y^* (Gleichung 4) dargestellt. D entspricht dem Außendurchmesser des Pfahls.

$$F^* = \frac{H}{\gamma' K_p D^3} \quad (1)$$

$$K_p = \tan^2(45 + 0,5 \varphi') \quad (2)$$

$$\varphi' = 31,5^\circ \exp(0,42 I_D^{2,90}) \quad (3)$$

$$y^* = \frac{y}{D} \quad (4)$$

Die Last-Verschiebungskurven der beiden in Absatz 3.4.1 vorgestellten vibrierend installierten Pfähle stellen gleichzeitig eine Einhüllende aller Last-Verschiebungsverläufe dar, die in den Modellversuchen mit einvibrierten Pfählen ermittelten wurden. Der mit einem kavitativen Vibrationsvorgang installierte Pfahl wies bei identischer Last stets die kleinsten lateralen Verschiebungen auf und entspricht dem Maximum der Einhüllenden. Der Pfahl, der einen überwiegend nicht-kavitativen Vibrationsvorgang aufwies, repräsentiert das Minimum. Alle anderen Versuche mit verschiedenen Kombinationen aus Lagerungsdichte,

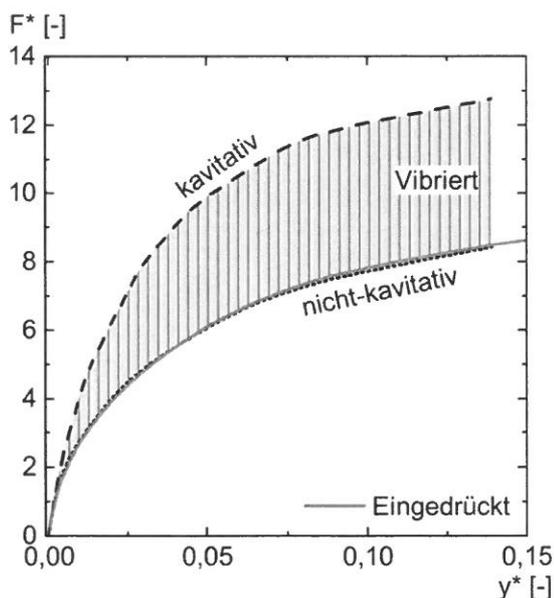


Abbildung 10: Last-Verschiebungskurven des kavitativ und nicht-kavativ vibrierten Pfahls sowie des eingedrückten Pfahls

Vibrationsfrequenz und Arbeitsmoment lagen innerhalb dieser beiden Kurven, d. h. im schraffierten Bereich (LABENSKI 2018). Im Vergleich der beiden Verläufe zeigen sich große Unterschiede. Bei einer maximalen Verschiebung von $y^* = 0,14$ kann der Pfahl mit kavitätem Vibrationsvorgang einen 1,6 mal größeren Widerstand mobilisieren als der Pfahl mit nicht-kavitätem Vibrationsvorgang. Aber auch bei einer geringeren Lateralverschiebung ist der Unterschied ähnlich groß. So beträgt der Faktor 1,75 bei einer Verschiebung von $y^* = 0,025$. Bezieht man die Last-Verschiebungskurve des eingedrückten Pfahls mit in die Betrachtung ein, so ist erkennbar, dass diese dem Verlauf des mit nicht-kavitätem Vibrationsvorgang installierten Pfahls folgt. Entsprechend den Erkenntnissen von VOGELSSANG (2016) kommt es beim nicht-kavitätem Vibrationsrahmen zu Vorgängen im Boden, die mit dem Eindringen vergleichbar sind.

3.4.3 Pfahlkopfbeschleunigung während der Pfahlinstallation

Im Folgenden werden repräsentative Ergebnisse eines einvibrierten sowie eines eingeramnten Pfahls in dichtem Sand vorgestellt und miteinander verglichen. Der einvibrierte Pfahl wurde mit 23 Hz und einem Verhältnis von dynamischer Kraft zu statischer Gewichtskraft von 4,6 installiert. Für die Installation des Rammpfahls wurde eine Gesamtenergie von 15.941,25 Nm benötigt. In Abbildung 11. sind die vertikalen Pfahlkopfbeschleunigungen während der Pfahlinstallation dargestellt. Die positive Koordinatenachse weist auf eine Beschleunigung in Verschiebungsrichtung hin. Die initiale Einbindetiefe durch Eigengewicht beläuft sich bei dem dargestellten Vibrationsversuch zu 141 mm; während durch den schwereren Aufbau des Rammversuches dieser Pfahl unter Eigengewicht bereits 170 mm tief eingedrungen war.

Durch das Einschalten der Vibratoren und dem gefolgten Einschwingvorgang des Pfahl-Boden-Systems zeigt sich in der vertikalen Beschleunigung des Vibrationsversuchs ein signifikanter Ausschlag zu Beginn der Installation. Mit weiterer Pfahlinstallation steigt auch die in Verschiebungsrichtung gerichtete Beschleunigung an. Der Anstieg ist auf den größeren Bodenwiderstand infolge der Reibung am Pfahlmantel und Pfahlfuß zurückzuführen. Der Effekt des steigenden Fußwiderstandes lässt sich indirekt über den negativen Beschleunigungsverlauf herleiten. Durch die Aufwärtsbewegung des Pfahles und der damit verbundenen Mantelreibung steigt die negative Beschleunigung mit zunehmender Einbindetiefe. Jedoch unterscheiden sich positive und negative Beschleunigung in ihrer Gradienten. Unter der Annahme, dass sich der Mantelwiderstand in der nach oben und der nach

unten gerichteten Bewegungsrichtung gleich verhält, kann die größere Beschleunigung in positiver Richtung und der damit verbundene größere Widerstand nur aus einer Erhöhung des Spitzenwiderstandes resultieren. Der gemessene maximal Wert in positiver Richtung liegt bei ca. 8 g in negativer Richtung bei ca. -4 g.

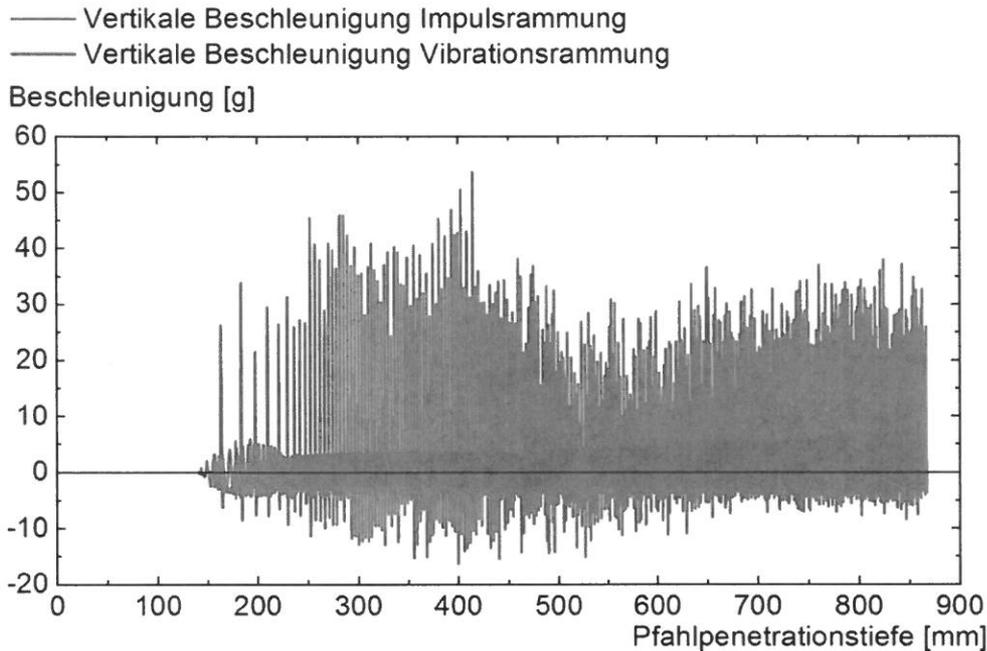


Abbildung 11: :Beschleunigung am Pfahlkopf in Relation zur Pfahleinbindetiefe

Während der Impulsrammung weist die Pfahlkopfbeschleunigung in vertikaler Richtung Werte von im Maximum mehr als 50 g auf. Auffällig ist hierbei, dass bei großen Beschleunigungswerten in Verschiebungsrichtung auch relativ große Beschleunigungen entgegen der Verschiebungsrichtung gemessen werden. Diese Beschleunigungswerte lassen sich auf die elastische Verformung des Modellpfahls und des Pfahl-Boden-Systems zurückführen. Bei einem großen Bodenwiderstand wird der Modellpfahl bei Belastung wie eine Feder gespannt, die sich bei Entlastung entspannt und somit eine Beschleunigung in negativer Richtung verursacht.

Beim Vergleich des Vibrationsversuchs und der Impulsrammung ergibt sich bei der schlagenden Einbringung eine signifikant größere Beschleunigung in Verschiebungsrichtung, da bei der Impulsrammung pro Schlag mehr Energie in das System eingeleitet wird. Zudem muss bei der Impulsrammung für jeden Schlag die Mantelreibung neu überwunden werden, während sich bei der Vibrationsrammung infolge Liquefaction eine merkliche Reduktion der Mantelreibung einstellt.

3.4.4 Spannungsänderungen infolge Pfahlinstallation

In Abbildung 12 sind die gemessenen relativen radialen Spannungsänderungen über die Pfahlpenetrationstiefe während der Installation mittels Vibrations- und Impulsrammung vergleichend dargestellt. Mit z wird die Installationstiefe der Erddruckgeber unter Sandoberfläche angegeben. Im Allgemeinen lässt sich für beide Installationsmethoden eine Erhöhung der radialen Spannungen erkennen, während sich der Pfahlfuß der Messebene nähert. Sobald der Pfahlfuß die Messebene passiert hat, kommt es zu einer Entspannung in dem nun den Pfahlmantel umgebenden Boden. Auch ist zu verzeichnen, dass die Erhöhung der radialen Spannung mit der Tiefe zunimmt. So ergeben sich im Fall der Impulsrammung die Peaks von σ/σ_0 zu 1,4, 1,6 sowie 1,8. Die Peaks im Fall der Vibrations-

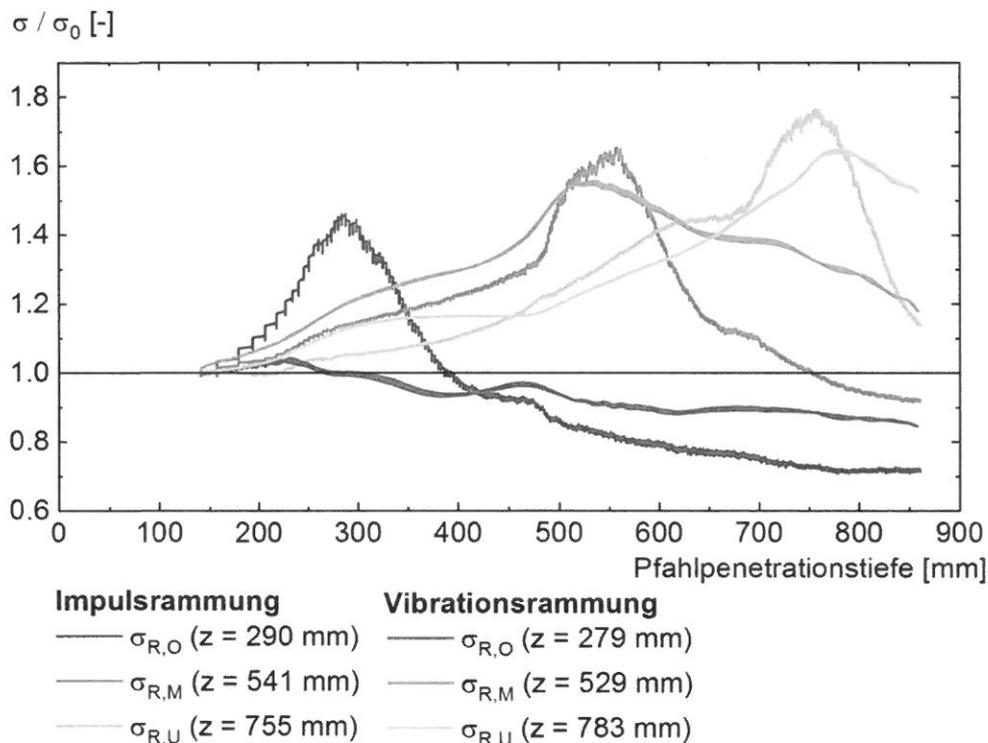


Abbildung 12: Relative Radiale Spannungsänderung über die Pfahlpenetrationstiefe

rammung sind in den Tiefen von ca. 75 cm bzw. 55 cm zwar etwas geringer als im Fall der Impulsrammung, grundsätzlich aber in einer ähnlichen Größenordnung. Nahe der Geländeoberfläche sind deutliche Unterschiede zwischen den beiden einbringvarianten zu erkennen; das Verhältnis von σ/σ_0 ist bei der Vibrationsrammung deutlich geringer als bei der Impulsrammung, was auf das Verhalten des Pfahls während der Vibrationsrammung zurückzuführen ist. Wie VOGELANG (2017) und LABENSKI (2019) zeigen, stellt sich während der Vibrationsrammung der Vibrationsmodus als Systemantwort des dynamischen

Gesamtsystems ein. So ist es charakteristisch, dass sich kein durchgängiger Vibrationsmodus einstellt, sondern dieser während der Installation variiert. Typischerweise kommt es aufgrund des geringen Bodenwiderstands nahe der Geländeoberfläche zu einem eher nicht-kavitativen Vibrationsmodus. Charakteristisch dafür ist, dass ein Großteil der Vibrationsenergie in plastische Verformung des den Pfahlfuß im Nahbereich umgebenden Bodens umgesetzt wird und nur ein kleinerer Teil sich in Form von Wellen im Boden fortsetzt. Nimmt der Bodenwiderstand zu und stellt sich das richtige Verhältnis von Auf- zu Abwärtsbewegung des Pfahlfußes ein, kann es zu einem kavitativen Einbrindmodus kommen. Oft stellen sich außerdem „Zwischenzustände“ zwischen den beiden idealen Einbrindmoduli ein. Auf diese Weise lässt sich im Fall der Vibrationsrammung der sehr kleine Peak nahe der Geländeoberfläche, aber die mit zunehmender Tiefe größer werdenden Peaks erklären.

Weitere Unterschiede in den Spannungsverläufen beider Herstellverfahren zeigen sich beim Verhalten, wenn der Pfahlfuß die Messebene passiert hat und die Einwirkung nur noch aus dem Pfahlmantel resultiert. Zwar kommt es bei beiden Herstellverfahren zu einer Entspannung des Bodens, allerdings ist der Gradient der Abnahme verschieden. Bei der Vibrationsrammung kommt es zu einer relativ stetigen Abnahme der Spannung. Der Gradient der Kurve bleibt während der gesamten Abnahme bis zum Ende der Installation annähernd konstant, wenngleich der Gradient in jeder Messebene anders ist. So ist die relative Entspannung an der Geländeoberfläche geringer als in einer Tiefe von 78 cm. Anders stellt sich dies bei der Impulsrammung dar: sobald der Pfahlfuß die Messebene passiert hat, kommt es zu einer im Vergleich zur Vibrationsrammung schnellen Entspannung; hat der Pfahlfuß eine Entfernung von $0,5 D$ zur Messebene erreicht, ändert sich der Gradient der Spannungsabnahme, der Gradient nimmt nun einen ähnlichen Wert wie bei der Vibrationsrammung ein; die Kurven entsprechender Tiefe verlaufen nun annähernd parallel. Unterschiede sind in den nicht exakt gleichen Einbautiefen begründet. Dies deutet darauf hin, dass es bei der Impulsrammung noch einen nachlaufenden Effekt durch den Pfahlfuß im Boden gibt, welcher für eine Entspannung sorgt; dies bestätigt die Ergebnisse von LINDER (1977). Ein Grund für die Abnahme der radialen Spannung bei der Schlag- und Impulsrammung sind die in den umgebenden Boden induzierten Scherwellen, die durch großen Verschiebungsamplituden am Pfahlmantel bei jedem Schlag bzw. Vibrationszyklus entstehen. Durch diese Scherwellen kommt es zu Verdichtungseffekten und damit zu einer Reduktion der radialen Spannungen.

Ein weiterer Unterschied in den Spannungsverläufen ist am Ende der Pfahlinstallation zu erkennen. Interessanterweise ist die radiale Spannung in den dargestellten Messebenen nach Pfahlinstallation bei dem Pfahl mit Vibrationsrammung größer als bei dem Pfahl mit Impulsrammung, obwohl die Peaks während der Installation im Fall der Impulsrammung größer waren.

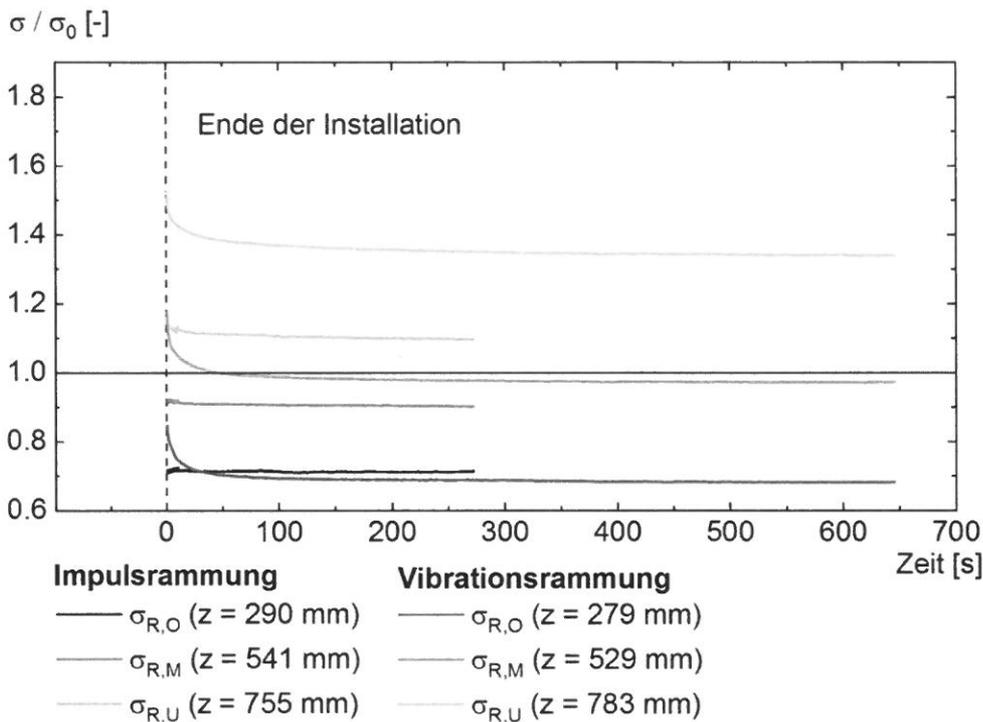


Abbildung 13: Zeitlicher Verlauf der Radialspannung nach der Pfahlinstallation

In Abbildung 13 ist der zeitliche Verlauf der radialen Spannungsänderung nach der Pfahlinstallation dargestellt. Erkennbar ist für den Vibrationsversuch ein zeitlicher Abfall der Radialspannungen. Bei dem per Impulsrammung eingebrachten Pfahl bleibt die Radialspannung nach Installationsende annähernd konstant. Dadurch ergibt sich, dass sich die radialen Spannungen durch zeitliche Effekte im Fall der Vibrationsrammung derjenigen der Impulsrammung angleicht. Dies ist nahe der Geländeoberfläche ausgeprägter als am Pfahlfuß.

Der zeitliche Abfall der Radialspannungen nach Vibrationsende ist vermutlich auf zwei Effekte zurückzuführen: zum einen auf den Einfluss der Dynamik und zum anderen auf den Abbau von Porenwasserüberdrücken, die sich während der Installation aufgebaut haben. Die dynamischen Effekte äußern sich in einer Umlagerung der Spannungen auf das Korngerüst, die zeitlich gesehen noch einige Sekunden nach der Installation andauern. diesbezüglich ist es auch möglich, dass Randeefekte des Versuchsbehälters und damit verbun-

dene Interferenzen der Wellen einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf haben. Der Einfluss der Porenwasserüberdrücke infolge der Pfahlinstallation lässt sich in Abbildung 14 beobachten. Während der Vibrationsrammung kommt es zu einem Aufbau von Porenwasserüberdrücken in den dargestellten Messebenen. Während der Impulsrammung ist hingegen in den Messgebern, die radial 0,5·D vom Pfahlmantel entfernt liegen, nur ein sehr geringer Aufbau von Porenwasserüberdrücken zu verzeichnen.

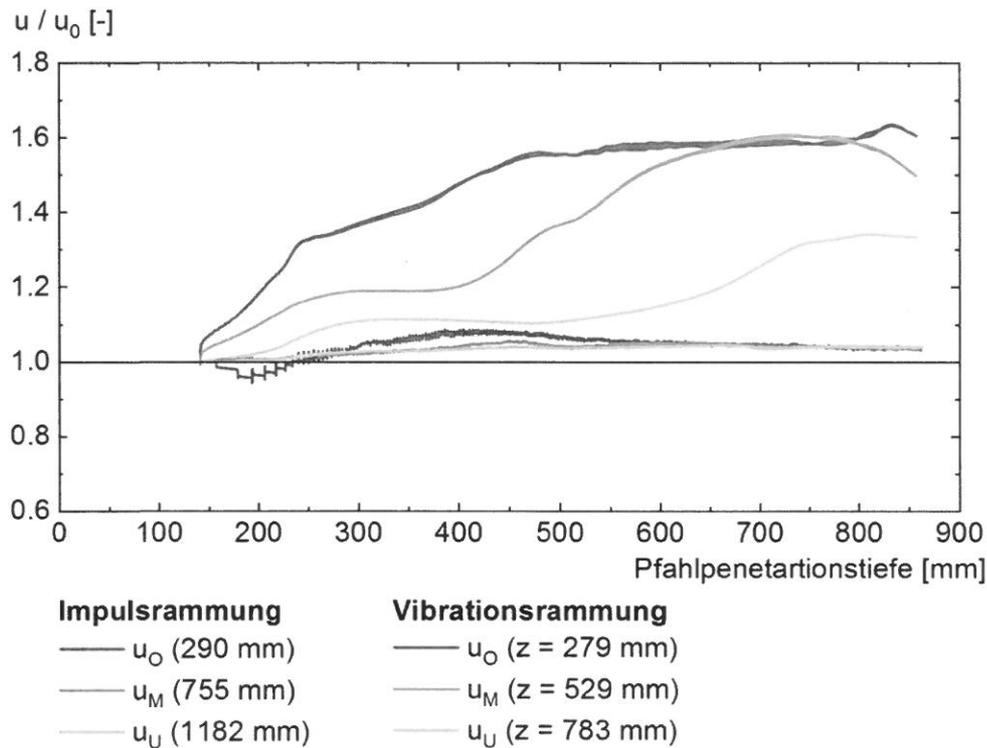


Abbildung 14: Relative Porenwasserdruckänderung über die Pfahlpenetrationstiefe während der Vibrierende- und Rammenden Installation

Bei der Vibrationsrammung setzt der Anstieg der Porenwasserdrücke mit Beginn der Installation ein. Die Sensoren u_0 und u_M zeigen mit ca. 1,6 u/u_0 ein Maximum der Porenwasserdruckakkumulation auf. Es ist festzustellen, dass mit Beginn der Vibration die Porenwasserdrücke in allen Tiefe zunehmen; dies kann ein Effekt der Behälterabmessungen bzw. der dynamischen Anregung des Gesamtsystems sein. Die beobachtete Akkumulation der Porenwasserdrücke bei der Vibrationsrammung korreliert nicht mit den diesbezüglichen Messungen von STAHLMANN & FISCHER (2013). Die geringen Porenwasserüberdrücke während der Impulsrammung im Vergleich zur Vibrationsrammung lassen sich auf die geringere Geschwindigkeit der Belastung zurückführen; der umgebende Boden ist so durchlässig, dass sich von Schlag zu Schlag die Porenwasserüberdrücke abbauen können.

4 Numerische Simulation der Pfahleinbringung mittels CPDI

Das gewählte experimentelle Untersuchungskonzept erlaubt die wirklichkeitsnahe Untersuchung des Einbringvorgang von Stahlrohrpfählen und deren Tragverhaltens unter lateralen Einwirkungen an einem „Vollpfahlmodell“. Auch die messtechnische Erfassung der Spannungsänderungen ist möglich. Der Einfluss des Einbringvorganges auf die Lagerungsdichte (Porenzahl) kann hingegen versuchstechnisch nicht quantifiziert werden, hier werden alternative Konzepte, beispielsweise mit einem „Halbpfahlmodell“ (REMSPECHER ET AL. 2018) erforderlich. Ergänzende Erkenntnisse können in dieser Hinsicht mit numerischen Simulationen gewonnen werden, an deren Modellbildung aber im Hinblick auf die Simulation des Einbringvorganges hohe Anforderungen zu stellen sind: so muss das Modell den dynamischen Einbringvorgang transient unter Berücksichtigung der Mehrphasigkeit und der bei der Penetration eintretenden großen Verzerrungen bzw. Verformungen abbilden.

4.1 Grundlagen der Modellbildung

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde mit der ‘Convected Particle Domain Interpolation Method’ (CPDI) eine fortschrittliche Variante der ‘Material Point Method’ (MPM) eingesetzt, die in einem institutseigenen Code umgesetzt und fortentwickelt wird und mit der u.a. die Abbildung der Mehrphasigkeit möglich ist. Das numerische Simulationstool wurde bereits erfolgreich zur Untersuchung der Pfahlinstallation in gesättigten Böden eingesetzt (MOORMANN ET AL. 2017, MOORMANN ET AL. 2018).

Die Material Point Method (MPM) ist eine netzbasierte Partikelmethode, bei der ein definiertes Hintergrundnetz mit „Materialpunkten“ kombiniert wird, die sich frei durch das Hintergrundnetz bewegen. Das Kontinuum wird durch LANGRANGE’sche Punkte repräsentiert, die ‘Material Points’ oder ‘Partikel’ genannt werden und sich frei durch ein festes EULER’sches Netz bewegen. Die Partikel tragen alle Informationen zu den physikalischen Eigenschaften des Kontinuums, wie Masse, Materialeigenschaften, Spannungen, Dehnungen, die Zustandsvariablen und die äußeren Einwirkungen, während das EULER’sche Netz und seine GAUSS-Punkte keine permanenten Informationen enthalten. Am Beginn eines jeden Zeitschrittes werden die Informationen von den Partikeln auf die Knoten des Hintergrundnetzes übertragen, bevor die Spannungs-Verformungsberechnung nach dem klassischen LANGRANGE’schen Ansatz erfolgt. Am Ende des Zeitschrittes werden die Infor-

mationen wieder auf die Material Points zurück übertragen und das Netz zurückgesetzt, während die Material Points in der verformten Lage verbleiben. Mit diesem Ansatz kombiniert die MPM-Methode die Vorteile der LANGRANGE'schen und der EULER'schen Methode und vermeidet gleichzeitig weitgehend deren Einschränkungen, so dass dieses numerische Modell einen sehr effektiven Simulationsansatz darstellt.

Die klassische MPM führt jedoch zu numerische Oszillationen, wenn sich Partikel über das Hintergrundnetz bewegen ('grid-crossing error'). Um diese Fehler zu vermindern, können die Materialpunkte, deren Masse auf einen einzelnen Punkt konzentriert ist, mit einer endlichen Domäne versehen werden. In dem hier verwendeten Ansatz der Convected Particle Domain Interpolation (CPDI) werden die Partikel durch einen parallelogrammförmigen Bereich abgebildet. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird ein institutseigener Code mit explizitem Integrationschema eingesetzt.

Das granulare Verhalten des Bodens wird mit dem hypoplastischen Stoffmodell nach VON WOLFFERSDORFF (1996) unter Berücksichtigung der intergranularen Dehnungen nach NIEMUNIS ET AL. (1997) simuliert. Für die Simulation werden die Parameter des Berliner Sandes entsprechend LE (2015) angesetzt. Zur Erfassung der aus der Mehrphasigkeit des porösen Mediums resultierenden Effekte in den wassergesättigten Sanden wird eine zweiphasige Formulierung eingesetzt (GIRIDHARAN ET AL. 2013), die in einem Partikel unterschiedliche Fluid- und Feststoffgeschwindigkeiten berücksichtigt ('v-w-Formulierung').

Der Kontakt zwischen Boden und Pfahl wird mit einer Penalty-Kontaktmethode modelliert (GIRIDHARAN & MOORMANN 2017). Bedingt durch den Penetrationsprozess sind die Kontaktflächen vorab nicht definiert, was besondere Lösungen zur Identifikation der Master- und Slave-Oberflächen im Zuge der Simulation erfordert (GOWDA ET AL. 2019).

Im Rahmen der numerischen Analyse wird zunächst der Ausgangsspannungszustand simuliert, bevor in einem zweiten Schritt das Pfahlprofil aktiviert wird und zunächst unter Eigengewicht in den Boden eindringt, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Simulation der Vibrations- bzw. Schlagrammung erfolgt lastgesteuert, im Falle der Vibrationsrammung durch Aufbringen einer sinusförmigen Einwirkung.

Das geometrische Modell ist achsensymmetrisch (Abb. 15a). Das Bodenkontinuum hat eine Breite von 1,0 m und eine Höhe von 2,5 m. 25.000 Partikel repräsentieren die Bodendomäne und 1.000 lineare Elemente die Kontaktelemente. Der Pfahl wird mit einem Durchmesser von 208 mm, einer Randdicke von 3,2 mm und einer Länge von 1,0 m modelliert.

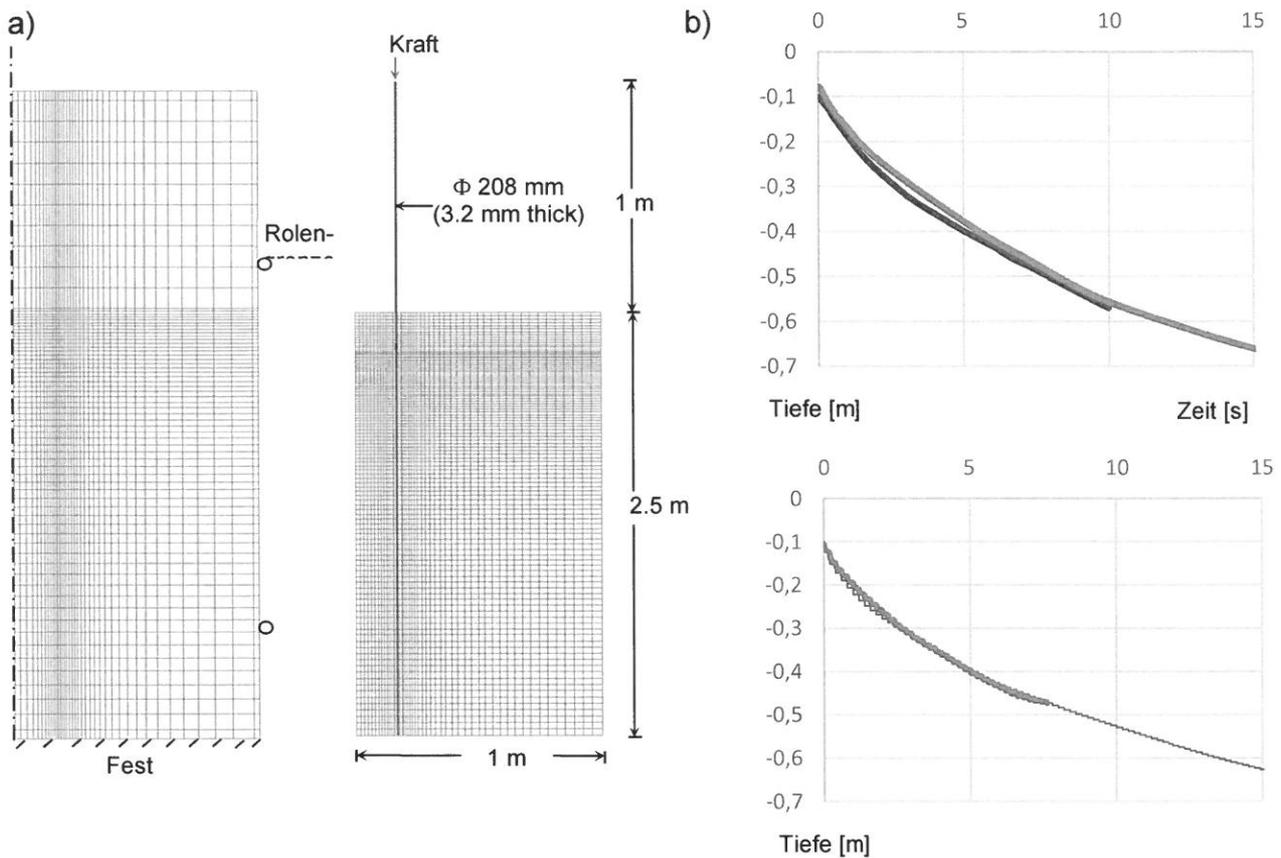


Abbildung 15: a) Geometrische Konfiguration und Randbedingungen für die Back-Analyse der Modellversuche mit CPDI (links: Hintergrundnetz, rechts: Partikelverteilung) b) Ergebnisse der Back-analyse: oben: Vibrationsrammung, unten: Schlagrammung (grün: Versuch, rot: Numerik)

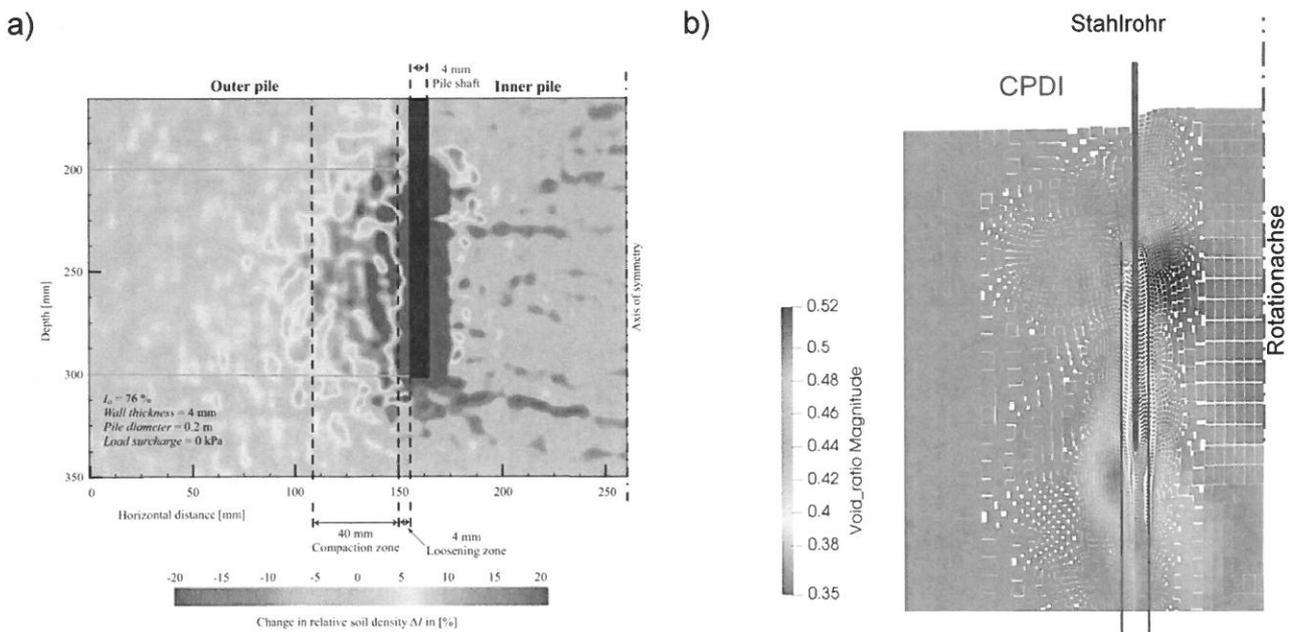


Abbildung 16: Änderung der Porenzahl im Zuge der vibrierenden Einbringung des Modellpfahls, a) Konturplot auf Basis der Digital Image Correlation (Rempescher et al. 2018), b) CPDI-Simulation

4.2 Berechnungsergebnisse

Abbildung 15b zeigt im Ergebnis einer Back-analyse der Modellversuche für eine Vibrations- und eine Schlagrammung in wassergesättigtem mitteldicht gelagertem Berliner Sand. Für beide Installationsmethoden ergeben sich gute Übereinstimmungen. Abbildung 16 zeigt ergänzend einen Vergleich der sich im Zuge der Einbringung ergebenden Änderungen der Porenzahl im Umfeld des Stahlrohrpfahls. Das numerische Untersuchungsergebnis wird mit einem Konturplot verglichen, der bei den an der TU Berlin eingesetzten „Halbpfahlmodell“ auf der Basis der Digital Image Correlation Methode von REMSPECHER ET AL. 2018 ermittelt wurde. durchgeführten Modellversuchen verglichen. Übereinstimmende ergeben sich Auflockerungen im Pfahlmantelbereich und außenliegend Verdichtungen.

5 Resümee

Sowohl durch die Impulsrammung als auch durch die Vibrationsrammung von Stahlrohrpfählen kommt es in wassergesättigten granularen Böden im Umfeld der Pfähle zu einer Veränderung der Bodenzustandsgrößen respektive der Spannungen und der Porenwasserdrücke. Diese Auswirkungen beeinflussen das laterale Tragverhalten der Pfähle deutlich. So ist bei der Vibrationsrammung ebenso wie bei der Impulsrammung im Zuge der Installation zunächst ein Anstieg der radialen Spannungen durch die Wirkung des Pfahlfußes zu beobachten. Wird durch die weitere Pfahleindringung der umgebende Boden durch den Pfahlmantel beeinflusst, so kommt es in beiden Fällen wieder zu einem Abfall der radialen Spannungen am Pfahlmantel. Der Betrag des Spannungsabfalls hängt bei der Vibrationsrammung von der Anzahl der am Pfahlmantel durchlaufenen Zyklen ab, bei der Impulsrammung von der Anzahl der Rammschläge. In beiden Fällen zeigt sich ein Abfall der radialen Spannungen unter den Ausgangsspannungszustand. Die Wahl der Installationsparameter beeinflusst die durch die Einbringung verursachten Änderungen der Bodenzustandsgrößen und damit das spätere Tragverhalten der Pfähle deutlich, so dass der Identifikation von in dieser Hinsicht optimaler Installationsparameter eine besondere Bedeutung zukommt.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden durch die innogy SE als Teil des Forschungsprojektes *“Scaled Testing of Vibration in Medium to very Dense Sand”* nachhaltig gefördert. Die Autoren danken der innogy SE für den regen Wissensaustausch und die finanzielle Unterstützung.

Literatur

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

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

Giridharan, S., Moormann, Ch. (2017): A Penalty Function Method for Modelling Frictional Contact in MPM. *Procedia Engineering, 175, 116-123.*

Giridharan, S. Stolle, D., Moormann, Ch. (2019): Modelling liquefaction using the Material Point Method – an evaluation using two constitutive models. *Proc. 2nd International Conference on the Material Point Method for Modelling Soil-Water-Structure Interaction, University of Cambridge, January 2019, 82-89*

Gowda, S., Moormann, Ch., Stolle, D. (2019): Application of Geo-contact to pile installation using the CPDI variant of Material Point Method (MPM). *Proc. 2nd International Conference on the Material Point Method for Modelling Soil-Water-Structure Interaction, University of Cambridge, January 2019, 90-96*

Kempfert, H.-G., Moormann, Ch. (2018): Pfahlgründungen. *Grundbau-Taschenbuch, Teil 3. Gründungen und geotechnische Bauwerke, 8. Aufl., 79-306.*

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

Labenski, J. (2018): Experimentelle Untersuchungen zum lateralen Tragverhalten einvibrierter offener Stahlrohrpfähle. *35. Baugrundtagung, Tagungsband Spezialsitzung für junge Geotechnik-Ingenieure, DGGT, 163-172.*

Labenski, J. (2019): Untersuchungen zum statisch lateralen Tragverhalten von in nichtbindigen Böden einvibrierten Monopiles. *Dissertation, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart (eingereicht).*

Le, V.H. (2015): Zum Verhalten von Sand unter zyklischer Beanspruchung mit Polarisationswechsel im Einzelscherversuch. *Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 66.*

Le, V.H., Remspecher, F., Rackwitz, F. (2018): Numerical investigation of installation effects on the cyclic behaviour of monopile foundation under horizontal loading. *Proc. 1st Vietnam Symp. on Advances in Offshore Eng., Hanoi, Vietnam, 1-3 November 2018.*

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

Linder, W.-R. (1977): Zum Eindring- und Tragverhalten von Pfählen in Sand. *Technische Universität Berlin.*

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

Moorman, Ch., Kirsch, F., Herwig, V. (2016): Vergleich des axialen und lateralen Tragverhaltens von vibrierten und gerammten Stahlrohrpfählen. *Vorträge der 34. Baugrundtagung, 15.-17.09.2016, Bielefeld, DGGT, 73-81.*

Moormann, Ch., Gowda, S., Giridharan, S., Hamad, F. (2017): Simulation of offshore piling using advanced dynamic material point method (MPM). *Proceedings of DFI-India 2017: 7th Conference on Deep Foundation Technologies for Infrastructure Development in India, IIT Madras, Chennai, Article #2751, Publication #1035.*

Moormann, Ch., Gowda, S., Giridharan, S. (2018): Numerical simulation of pile installation in saturated soil using CPDI. *Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE), Porto, Portugal 25-27 June 2018, London: Taylor & Francis Group, 665-672.*

Niemunis, A., & Herle, I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials, 2, 279-299.*

Remspecher, F., Le, V.H., Rackwitz, F., Herwig, V., Matlock, B. (2018): Vibratory driven installation of monopiles – an experimental investigation of the soil-pile interaction. *Proc. 1st Vietnam Symp. on Advances in Offshore Eng., Hanoi, Vietnam, 1-3 November 2018.*

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

Stahlmann, J., Fischer, J. (2013) Entwicklung der Spannungszustände im Bereich des Pfahlfußes gerammter Offshore – Gründungsstrukturen, *Technische Universität Braunschweig, Abschlussbericht des BMU-Förderprojekts, 2013.*

Vogelsang, J. (2017): Untersuchung zu den Mechanismen der Pfahlrammung, *Veröffentlichung des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 182.*

Vogelsang, J., Huber, G., Triantafyllidis, T. (2017): Stress Paths on Displacement Piles During Monotonic and Cyclic Penetration. Holistic Simulation of Geotechnical Installation Processes, 82nd Ed.. *Springer International Publishing, 29–52.*

von Wolffersdorff, P.A. (1996): A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials, 1, 251-271.*

Witzel, M. (2004): Zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von vorgefertigten Verdrängungspfählen in bindigen und nichtbindigen Böden. *Veröffentlichungen des Fachgebiets für Geotechnik, Universität Kassel, Heft 15.*

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann	christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de
Bastian Hoffmann, M.Sc.	bastian.hoffmann@igs.uni-stuttgart.de
Shreyas Giridharan, M.Sc.	shreyas.giridharan@igs.uni-stuttgart.de
Sujith Gowda, M.Sc.	sujith.gowda@igs.uni-stuttgart.de
Institut für Geotechnik	
Universität Stuttgart	www.uni-stuttgart.de/igs/
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart	Tel.: 0711 685-62436
Johannes Labenski, M.Sc.	johannes.labenski@arcadis.com
Aarcadis Germany GmbH	
Abteilung Geotechnik	www.arcadis.com
Europaplatz 3, 64293 Darmstadt	Tel.: 0151 17143151
Dr.-ing. Volker Herwig	volker.herwig@innogy.com
Benjamin Matlock, Meng	ben.matlock@innogy.com
Innogy SE	www.innogy.com
Kopstadtring 7, 22297 Hamburg	Tel.:(0 40) 6 32 99 60-0