

Zum Gruppentragverhalten von Verdrängungspfählen: Untersuchungen zu Interaktionseffekten bei Installation und axialer Beanspruchung

Dipl.-Ing. Thomas Garbers, Aarsleff Spezialtiefbau GmbH, Hamburg

Felix Mitlmeier M.Sc., Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Stuttgart

Dipl.-Ing. MBA Peter Wardinghus, Aarsleff Grundbau GmbH, Hamburg

Während für das Gruppentragverhalten von Bohrpfählen sowohl messtechnische Erfahrungen als auch Bemessungsansätze (u. a. sogenanntes Nomogramm-Verfahren in der 'EA-Pfähle') vorliegen, ist das Gruppentragverhalten von Verdrängungspfählen weitgehend ungeklärt. Insbesondere ist offen, ob die von Bohrpfählen bekannte Abminderung der Mantelreibung infolge der Pfahl-Pfahl-Interaktion bei Verdrängungspfählen zumindest in nichtbindigen Böden durch die herstellungsbedingte Erhöhung der Lagerungsdichte kompensiert wird bzw. ob die aus der Verdichtung in einer Gruppe resultierenden Effekte im Sinne einer technischen und wirtschaftlichen Optimierung bei der Bemessung genutzt werden können. Technische Regelwerke zur Berücksichtigung der Gruppeneffekte stehen nicht zur Verfügung. Im Rahmen des Beitrages wird über die Ergebnisse eines laufenden Forschungsvorhabens zum Gruppentragverhalten von Verdrängungspfählen auf der Basis von Feldversuchen sowie experimenteller Untersuchungen berichtet.

1 Einleitung

Das statisch axiale Tragverhalten von Gruppenspählen unterscheidet sich gegenüber dem von Einzelpfählen aufgrund der Position der Pfähle innerhalb der Gruppe und der damit einhergehenden unterschiedlich stark ausgeprägten Pfahl-Pfahl-Interaktion, welche auch als Gruppenwirkung bezeichnet wird. Zum Trag- und Setzungsverhalten von Bohrpfahlgruppen liegen bereits umfangreiche Kenntnisse vor (vgl. Katzenbach & Moormann 1997; Kempfert et al. 2018), des Weiteren steht in der 'EA-Pfähle' (2012), Abs. 8.2.1.2, ein auf Rudolf (2005) zurückzuführendes Näherungsverfahren zur Ermittlung des setzungs- und widerstandsbezogenen Gruppenverhaltens von Bohrpfählen zur Verfügung.

Die durch den Herstellungsvorgang von Verdrängungspfählen bedingten Änderungen der Statusvariablen im umgebenden Boden, wie Spannungszustand und Porenzahl sind weiterhin Gegenstand der Forschung. Noch deutlich geringer ist der wissenschaftliche Kenntnisstand zu den aus der Installation resultierenden Effekten bei in einer Gruppe

angeordneten Verdrängungspfählen auf den umgebenden Boden und in der Konsequenz auf das Trag- und Verformungsverhalten der Pfahlgruppe. Im vorliegenden Beitrag wird zunächst der Stand der Wissenschaft zu den Installationseffekten sowie zum statisch axialen Tragverhalten von Verdrängungspfahlgruppen vorgestellt. Hierauf aufbauend wurden im Rahmen einer Forschungsinitiative von der Aarsleff Grundbau GmbH und dem Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart (IGS) in einem Feldversuch an in Gruppen angeordneten Fertigteiltrampfpfählen mittels Druck- und Rammsondierungen die Änderung der Bodenzustandsgrößen innerhalb von Pfahlgruppen überprüft sowie mit Hilfe von dynamischen Pfahlprobelastungen Auswirkungen auf den axialen Widerstand der Pfähle infolge Gruppenwirkung und Anwachseffekten analysiert und bewertet.

Abschließend wird über ein am IGS laufendes Forschungsprojekt zum statisch axialen Tragverhalten von Verdrängungspfahlgruppen berichtet, in dessen Rahmen Modellversuche und numerische Simulationen zu dieser Thematik geplant sind.



2 Statisch axiale Tragfähigkeit von Verdrängungspfahlgruppen

2.1 Effekte bei Einzelpfählen

Bei geramten, einzelstehenden Verdrängungspfählen in locker gelagerten Sanden konnte Meyerhof (1959) eine Erhöhung der Lagerungsdichte bis in einen Abstand von $3 \cdot D$ (mit D = Pfahldurchmesser) von der Pfahlachse nachweisen, während Robinsky & Morrison (1964) bei eingedrückten Pfählen Einflüsse auf die Bodenzustandsgrößen sogar bis in einen Abstand von $7 \cdot D$ bis $12 \cdot D$ beobachteten. Unterhalb des Pfahlfußes bilden sich bei locker bzw. mitteldicht gelagerten Sanden Kompressionsbereiche in einer Ausdehnung von $3 \cdot D$ bis zu $5 \cdot D$ aus (Robinsky & Morrison 1964). Bei dicht gelagerten Sanden sind die Aussagen hingegen widersprüchlicher: In der Umgebung des Pfahlfußes stellte Kérisel (1961) bei eingedrückten Pfählen fest, dass verdichtete Bereiche von einer durch Dilatanzeffekte hervorgerufenen Auflockerungszone umgeben waren. Meyerhof (1959) konnte hingegen in der Umgebung des Fußes eines Ramppfahls nur Verdichtungseffekte feststellen (Abb 2.1). Übergeordnet kann festgehalten werden, dass die Pfahlrammung in nichtbindigen Böden unterhalb des Pfahlfußes und seitlich des Pfahlschafts eine Erhöhung der Lagerungsdichte verursacht und in diesen Bereichen erhöhte Spannungszustände hervorruft (u. a. Wienholz 1998, Witzel 2004), welche das Tragverhalten von Pfählen positiv beeinflussen.

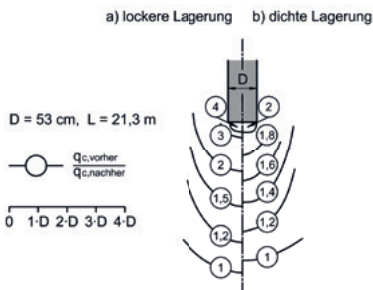


Abbildung 2.1: Mittels CPT detektierte Verdichtungszone a) locker bzw. b) dicht gelagerter Sande bei geramten Verdrängungspfählen nach Meyerhof (1959)

2.2 Modellversuche zum Gruppentragverhalten

Ein Großteil der Erkenntnisse zur Gruppeneffektivität von Verdrängungspfählen basiert auf Modellversuchen in nichtbindigen Böden. Die widerstandsbezogene Gruppenwirkung axial beanspruchter Pfähle G_R (EA-Pfähle 2012), welche auch als Gruppeneffektivität (u. a. Vesić 1969, Valsangkar & Meyerhof 1983) bezeichnet wird, ist definiert als:

$$G_R = \frac{R_G}{n_G \cdot R_E} \quad \text{Gl. (1)}$$

mit

R_G Gesamtwiderstand der Pfahlgruppe,

n_G Anzahl der Gruppenpfähle und

R_E Widerstand des Einzelpfahls bei mittlerer Setzung der Pfahlgruppe.

Dass sich das statisch axiale Tragverhalten eines einzelnen Verdrängungspfahls nicht unmittelbar auf das eines Gruppenpfahls übertragen lässt, konnte schon Preß (1933) mit einer aus drei geramten Modellpfählen bestehenden Pfahlreihe nachweisen. Kézdi (1957) ramnte quadratische Stahlbetonpfähle mit einer Seitenlänge von 100 mm und einer Pfahlänge von 2,0 m in natürlich anstehenden, erdfeuchten Feinsand ein. Er untersuchte dabei u. a. eine aus vier Pfählen bestehende quadratische Gruppe (2×2), vgl. Abbildung 2.2, wobei die Effektivität mit $G_R \approx 2,05$ bei einem Verhältnis von Pfahlachsabstand zu Pfahldurchmesser $a/D = 2$ am größten war und bei $a/D = 6$ mit $G_R \approx 1,05$ sich kaum von dem Tragverhalten eines Einzelpfahls unterschied.

Ferner drückte Hanna (1963) runde Holzpfähle mit $D = 98 \text{ mm}$ und $L = 0,30 \text{ m}$ in Sand lockerer und dichter Lagerung ein. Neben rechteckigen Pfahlgruppen und Pfahlreihen wurden auch 2×2 sowie 3×3 Pfahlgruppen betrachtet. Hier zeigt sich vor allem der Einfluss der initialen Lagerungsdichte des Versuchsbodens: Bei lockerer Lagerung ist die Gruppeneffektivität durchweg größer als 100 %, mit einem Maximum bei $a/D = 2$. In dichter Lagerung hingegen ist der Gruppenfaktor durchweg kleiner als 1,0.

Modellversuche in weit größerem Umfang wurden von Vesić (1969) durchgeführt. Die mit Dehnmess-

streifen instrumentierten runden Modellpfähle aus Aluminium mit $D = 100$ mm und einer Einbindetiefe von $L = 1,52$ m ermöglichten eine getrennte Betrachtung von Mantelreibung und Spitzendruck und wurden u. a. in einen künstlich in mitteldichter Lagerung hergestellten Sandkörper eingedrückt. Vesíć konnte nachweisen, dass die Gruppentragfähigkeit in nichtbindigen Böden auf eine Erhöhung des Mantelwiderstands der Gruppenpfähle zurückzuführen ist, während der Spitzendruck nahezu unbeeinflusst bleibt (Abb. 2.2). Die auf die Mantelreibung bezogene Gruppeneffektivität einer 2×2 Gruppe hat mit 3,02 ihr Maximum erst bei einem Pfahlachsabstand von $6 \cdot D$. Die Gesamteffektivität der 2×2 Gruppe ist mit $G_R = 1,35$ bei einem Pfahlachsabstand von $4 \cdot D$ am größten. Tejchmans (1973) Versuche mit eingedrückten quadratischen Stahlbetonpfählen ($b = 35$ mm, $L = 0,60$ m) in locker bzw. mitteldicht gelagerten, künstlich eingebauten Sand bestätigen im Wesentlichen die bisherigen Beobachtungen: In lockerer gelagertem Sand sind die Gruppenfaktoren für beide betrachteten Gruppengeometrien bei einem Pfahlachsabstand von $2 \cdot D$ bis $4 \cdot D$ stets größer als $G_R = 1,35$.

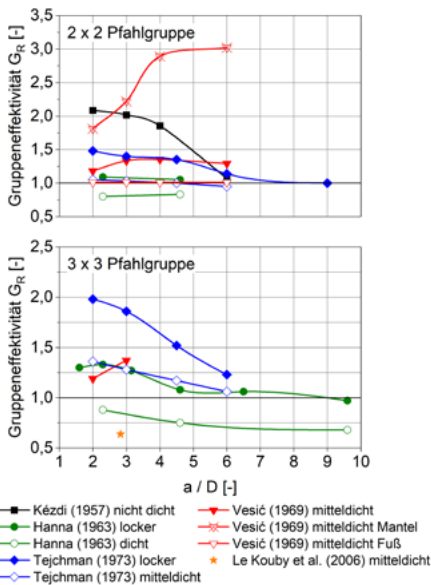


Abbildung 2-2: Gruppeneffektivität von 2×2 (oben) und 3×3 Verdrängungspfahlgruppen (unten) in nichtbindigen Böden aus Modellversuchen bei $s = 0,1 \cdot D$

2.3 EA-Pfähle (2012)

In der EA-Pfähle, Abs. 8.2.1.4, wird darauf verwiesen, dass zum Tragverhalten von Verdrängungspfahlgruppen noch wenig abgesicherte Erfahrungen vorliegen, so dass zwar ein abweichendes Setzungsverhalten gegenüber Bohrpfahlgruppen zu erwarten sei, aber generell nur „erste tendenzielle Angaben“ gemacht werden könnten. Hinsichtlich der Gruppenwirkung wird nach der Bodenart unterschieden:

- Nichtbindige Böden:

Im Grenzzustand ULS darf bei Verdrängungspfahlgruppen ein Gruppenfaktor $G_R \geq 1,0$ angenommen werden. Für günstige Verhältnisse von Pfahlabstand zu Einbindetiefe $a/d = 0,3$ bis $0,7$ kann der Gruppenfaktor bis zu $G_R = 1,5$ betragen.

Im Grenzzustand SLS soll bei ungünstigen Verhältnissen von $a/d \leq 0,5$ die Gruppenwirkung mit

$G_R < 1,0$, bei günstigen Verhältnissen mit $G_R \geq 1,0$ angesetzt werden.

- Bindige Böden:

In bindigen Böden sollte ein Gruppenfaktor $G_R \leq 1,0$ angenommen werden. Bindige Böden mit einer undrainierten Scherfestigkeit $c_u \geq 100$ kN/m² können aber ein günstiges Tragverhalten aufweisen, so dass der Gruppenfaktor mit $G_R = 1,0$ angesetzt werden darf.

Bei der Pfahleinbringung entstehende Porenwasserüberdrücke sind dahingehend zu berücksichtigen, dass die Gruppenwirkung temporär um bis zu $G_R = 0,4$ abgemindert werden muss.

3 Feldversuch in Bad Reichenhall

3.1 Versuchskonzept

In einem Feldversuch im Realmaßstab wurde 2021 projektbegleitend in Bad Reichenhall ein aus Drucksondierungen, Rammsondierungen und dynamischen Pfahlprobebelastungen bestehendes Untersuchungsprogramm an einer 3×3 Pfahlgruppe und einem unbeeinflussten Einzelpfahl durchgeführt. Die



quadratischen Stahlbetonpfähle mit einer Seitenlänge von 40 cm und einer Länge von 13 m sind im Grundriss in vertikaler Richtung in einem Achsabstand von $a_v = 4,1 D_{eq}$ und in horizontale Richtung mit $a_h = 3,5 \cdot D_{eq}$ angeordnet und wurden in der in Abb. 3.1 a) dargestellten Reihenfolge mit einem Hydraulikhammer und 50 kN Fallgewicht eingerammt (Abb. 3.2). Der unbeeinflusste Einzelpfahl (EP) ist ca. 7 m von der Pfahlgruppe entfernt.



Abbildung 3.2: Einrammen der Pfähle

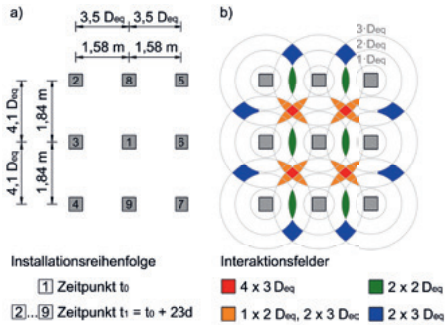


Abbildung 3.1: a) Geometrie der 3 x 3 Pfahlgruppe und Installationsreihenfolge der Pfähle 1-9; b) Interaktionsfelder innerhalb der Pfahlgruppe in Abhängigkeit des äquivalenten Pfahldurchmessers D_{eq}

Der zeitliche Ablauf des Versuchsprogramms gliederte sich wie folgt:

Zeitpunkt t_0 :

- Schwere Rammsondierungen DPH 1 und DPH 2, Drucksondierungen CPT 1 und CPT 2 (Abb. 3.3 a)
- Rammung von EP und P1 bis zu einer Tiefe von ca. 12,0 m unter GOK
- Dynam. Pfahlprobelastung von EP und P1

Zeitpunkt $t_1 = t_0 + 23 d$:

- Rammung von P2 bis P9 bis zu einer Tiefe von ca. 12,0 m unter GOK
 - Dynam. Pfahlprobelastung von P1, P2 und P9
- Zeitpunkt $t_2 = t_0 + 42 d$:
- Dynam. Pfahlprobelastung von P1, P2, P9 und EP
 - Rammern von P2 bis P9 bis zur Endtiefe 13,0 m unter GOK

Zeitpunkt $t_3 = t_0 + 49 d$:

- Schwere Rammsondierungen DPH 3 bis DPH 10 (Abb. 3.3 b)

Ziel des Untersuchungsprogramms war es, die Gruppenwirkung von Verdrängungspfählen in einem Baugrund mit einer wechselnden Schichtfolge aus bindigen und nichtbindigen Böden zu klären. In diesem Kontext wurde untersucht, ob das vereinfachte Modell einer infolge der Pfahlinstallation angenommenen, radialen Verdrängung des Bodenvolumens und geometrischen Einteilung in Interaktionsfelder gem. Abb. 3.1 b) gerechtfertigt ist. Insbesondere in Feldern, in denen sich mehrere Einflussbereiche überschneiden, sollte im Vergleich zum insitu Zustand eine erhöhte Lagerungsdichte in nichtbindigen Schichten nachweisbar sein. In einem ersten Ansatz wurde dabei vereinfacht angenommen, dass der Einflussbereich eines Gruppenpfahls nicht über das Dreifache des äquivalenten Durchmessers D_{eq} hinausreicht.

Aufgrund der Baugrundsituation waren Anwachseffekte (u.a. Skov & Denver 1988, Vavrina et al. 2016) zu erwarten, die den axialen Pfahlwiderstand neben der Rammreihenfolge der Gruppenpfähle (Le Kouby et al. 2016) zusätzlich beeinflussen. Die Pfahlwiderstände wurden mit dynamischen Probelastungen und vollständiger Modellbildung (CAPWAP) ermittelt.

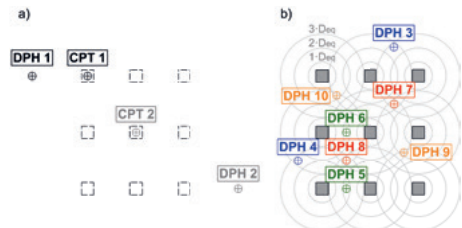


Abbildung 3.3: Sondierungen a) vor (t_0) und b) nach Rammung der Pfahlgruppe (t_3)

3.2 Baugrundsituation

Der Baugrund im Testfeld zeichnet sich vor allem durch eine heterogene Schichtenfolge aus leichtplastischen, zum Teil organischen Schluffen sowie Kies-Sand Gemischen mit schluffigem Feinkornanteil aus, die im Versuchsfeld in Tiefenbereichen von 2,1 ÷ 3,5 m (1) in vorwiegend lockerer Lagerung, sowie in Tiefen von 4,2 ÷ 7,2 m (2) und 9,8 ÷ 11,8 m (3) in mitteldichter bis dichter Lagerung anzutreffen waren. Das Grundwasser stand ca. 2,9 m unterhalb der Geländeoberkante an. Die vorab durchgeführten schweren Rammsondierungen (DPH 1-2) und Drucksondierungen (CPT 1-2) zeigten, dass die Schichtenfolge im Bereich des Feldversuchs weitgehend einheitlich ist. Die weitgestuften, schluffigen Kies-Sand Gemische sind in den Sondierprofilen (Abb. 3.4) mit Schlagzahlen bis zu $N_{10} = 48$ und einem maximalen Sondierspitzenwiderstand $q_c = 107 \text{ MN/m}^2$ gut erkennbar. Die Einteilung in Homogenbereiche fand im Abgleich mit dem Baugrundgutachten sowie anhand der CPF-Daten nach dem Klassifizierungsschema von Robertson (1990) statt.

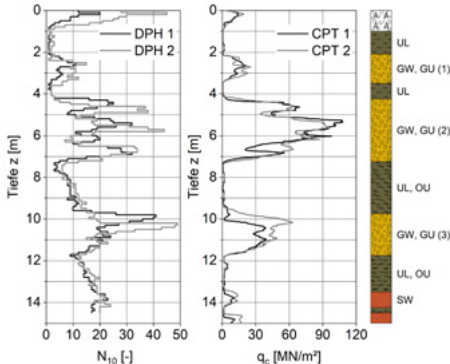


Abbildung 3.4: DPH 1-2 und CPT 1-2 zur Beurteilung des in-situ Zustandes des im Versuchsfeld anstehenden Baugrundes

3.3 Versuchsergebnisse

Am ersten Versuchstag (t_0) wurden die unbeflussten Pfähle EP und P1 gerammt und unmittelbar getestet (Abb. 3.5 a). Die Pfahlwiderstände betragen $R_{c,EP}(t_0) = 1210 \text{ kN}$ und $R_{c,P1}(t_0) = 1130 \text{ kN}$.

Zum Zeitpunkt t_1 folgten nach vollständiger Installation der Gruppe Probebelastungen am Mittelpfahl P1, am Eckpfahl P2 und am Randpfahl P9. Beim Mittelpfahl P1 wächst der axiale Pfahlwiderstand auf $R_{c,P1}(t_1) = 2090 \text{ kN}$, wobei der Mantelwiderstand um $R_{s,P1}(t_1)/R_{s,P1}(t_0) = 2,09$ und der Spitzenwiderstand um $R_{b,P1}(t_1)/R_{b,P1}(t_0) = 1,55$ ansteigt. Der Gesamtwiderstand des Eckpfahls ist nahezu identisch mit dem des Mittelpfahls, der Widerstand des Randpfahls ist hingegen mit $R_{c,P9}(t_1) = 2145 \text{ kN}$ etwas größer. Zum Zeitpunkt t_2 fanden erneut dynamische Pfahlprobebelastungen statt. Für den unbeflussten Einzelpfahl EP zeigt sich nach 42 Tagen Standzeit eine Erhöhung des Gesamtwiderstands um 99 % auf $R_{c,EP}(t_2) = 2410 \text{ kN}$, wobei der Fußwiderstand nahezu unverändert bleibt und der Mantelwiderstand im Verhältnis $R_{s,EP}(t_2)/R_{s,EP}(t_0) = 2,97$ zunimmt.

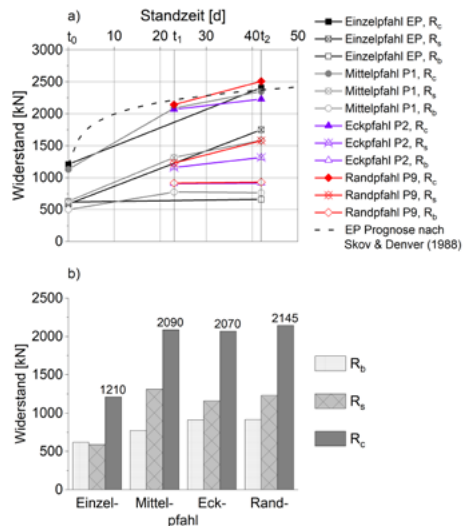


Abbildung 3.5: a) Pfahlwiderstände zu den Zeitpunkten t_0 , t_1 und t_2 und b) Widerstände von Einzelpfahl und Gruppenpfählen unmittelbar nach Rammung aus dynamischen Pfahlprobebelastungen

Dieser Anstieg kann dem Anwachseffekt zugerechnet werden und deckt sich mit den Beobachtungen aus Vavrina et al. (2016). Wird zur Prognose des zeitabhängigen Zuwachses der Ansatz nach Skov & Denver (1988) verwendet, so lässt sich mit einem empirischen Faktor von $\Delta_{10} = 0,5$ in Abbildung 3.5 a)



nach 42 Tagen Standzeit eine sehr gute Übereinstimmung zum durch die Probebelastungen nachgewiesenen Anstieg des Widerstandes des Einzelpfahles feststellen. Waren die Widerstände der Gruppenpfähle zum Zeitpunkt t_1 noch relativ identisch, so lassen sich zum Zeitpunkt t_2 deutlichere standortspezifische Unterschiede erkennen. Die Mantelreibung aller Gruppenpfähle nahm aufgrund des Abbaus von installationsbedingten Porenwasserüberdrücken unterschiedlich stark zu, während sich der Spitzendruck mit der Zeit kaum veränderte. Der Eckpfahl weist mit $R_{c,P2}(t_2) = 2230$ kN die geringste Tragfähigkeit auf, es folgt der Mittelpfahl mit $R_{c,P1}(t_2) = 2350$ kN und der Randpfahl mit $R_{c,P9}(t_2) = 2510$ kN.

Bei Betrachtung der Pfahlwiderstände unmittelbar nach Pfahlrammung (Abb. 3.5 b) ist außerdem deutlich zu erkennen, dass die Gruppenpfähle für alle Pfahlpositionen eine durchweg höhere Tragfähigkeit als der Einzelpfahl aufweisen. Im Falle des Eckpfahls P2 beträgt das Widerstandsverhältnis zum Einzelpfahl $R_{c,P2}(O_d)/R_{c,EP}(O_d) = 1,71$.

Wird die Installationsreihenfolge in die Bewertung der Widerstände der Gruppenpfähle mit einbezogen, so fällt auf, dass der Eckpfahl P2 zum Zeitpunkt t_1 zuerst gerammt wurde, der Randpfahl P9 hingegen am Schluss. Die in Abb. 3.6 dargestellten Rammdiagramme zeigen, dass die Rammenergie der zuerst eingebrachten Pfähle P2 bis P4, bspw. im Tiefenbereich von 5,0 m, mit 4150 bis 4600 kN/m geringer ausfällt als die der zuletzt eingebrachten Randpfähle P8 und P9, für die eine Rammenergie von 7000 bis 8600 kN/m aufgezeichnet wurde. Auch die Energiesumme der zuletzt hergestellten Pfähle P8 und P9 ist im Mittel ca. 42 % höher als die der Pfähle P2 bis P4. Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass der Verdrängungsvorgang bei Rammung der Pfähle eine sukzessive Erhöhung der Lagerungsdichte in den Kiesschichten bewirkt und somit einen erhöhten Energieeintrag bei Installation der nachfolgenden Pfähle erforderlich macht. Dieser Effekt hat zur Folge, dass in diesem Feldversuch die Tragfähigkeit des zum Schluss eingebrachten Randpfahls über der des früher installierten Mittelpfahls liegt.

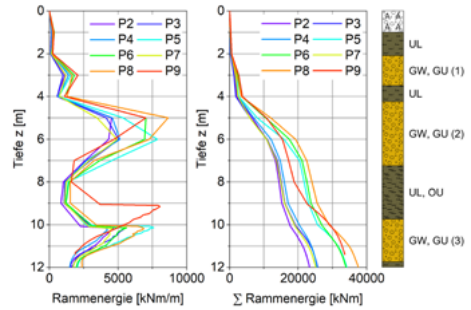


Abbildung 3.6: Aufgezeichnete Rammenergie (links) und Energiesumme (rechts) der Pfähle P2-P9

Ferner erfolgte eine Auswertung der schweren Rammsondierungen zum Zeitpunkt t_3 , siehe Abbildung 3.7. Die Auswertung wurde in den drei als homogen definierten weitgestuften Kies-Sand-Gemischen mit Schluffanteilen (1)–(3) durchgeführt. In der tabellarischen Zusammenstellung (Tab. 3.1) wurden die Schlagzahlen N_{10} je Homogenbereich aufsummiert und in das Verhältnis zu den gemittelten Schlagzahlen aus den vor Pfahlinstallation ausgeführten DPH 1 und DPH 2 gesetzt. Es lässt sich vorerst festhalten, dass sich unabhängig von der Position der Sondierungen im Einflussbereich der Gruppenpfähle für den locker gelagerten Tiefenbereich (1) eine sich im Vergleich zu den mitteldicht gelagerten Tiefenbereichen (2) und (3) geringfügigere Verdichtung infolge der Pfahlherstellung einstellt. Der stärkste Verdichtungseffekt tritt in Tiefenbereich (2) auf, der neben sehr hohen Spitzendrücken von $q_c = 107$ MN/m² (Abb. 3.4) zudem mit ca. 3,0 m Schichtdicke die größte Mächtigkeit aufweist.

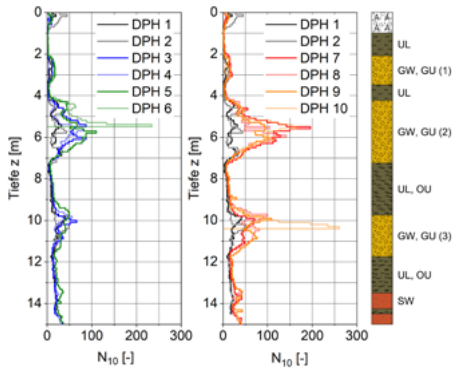


Abbildung 3.7: Sondierdiagramme aus DPH 1 bis DPH 10

Hinsichtlich der Lage der Sondierpunkte wird folgend auf Tiefenbereich (2) Bezug genommen. Es ist zu erkennen, dass sich für DPH 3 und DPH 4, die außerhalb der Gruppe liegen, aber noch von Rand- bzw. Eckpfählen beeinflusst werden, mit einer prozentualen Veränderung von +48 % bis +111 % eine Erhöhung der Schlagzahlen ergibt. Deutlich höhere Schlagzahlverhältnisse von 158 % bis 274 % stellen sich bei DPH 5 und DPH 6 ein, die innerhalb der Pfahlgruppe im geometrischen Einflussbereich von $2 \times 2 D_{eq}$ liegen (Abb. 3.3). Hierbei ist zu beachten, dass DPH 6 in einer Tiefe von 5,5 m mit einer Schlagzahl von $N_{10} = 234$ abgebrochen wurde. Aus dem signifikanten prozentualen Unterschied von DPH 6 zu DPH 5 lässt sich ableiten, dass DPH 6 inmitten der Pfahlgruppe zusätzlich beeinflusst wird, sprich eine angenommene Interaktion von max. $3 \cdot D_{eq}$ in diesem Fall zu konservativ ist. Für DPH 7 bis DPH 10 ist mit einer Erhöhung von +171 % bis +278 % im Vergleich zum insitu Zustand der nachweislich größte Verdichtungseffekt erkennbar, da sich hier die Interaktionsbereiche mehrerer Gruppenpfähle überschneiden.

	GW, GU (1)	GW, GU (2)	GW, GU (3)
DPH 3	+30 %	+111 %	+21 %
DPH 4	-66 %	+48 %	+4 %
DPH 5	+85 %	+158 %	+42 %
DPH 6	+90 %	+274 %	-
DPH 7	+107 %	+278 %	+86 %
DPH 8	+85 %	+172 %	+237 %
DPH 9	+66 %	+171 %	+152 %
DPH 10	-20 %	+234 %	+538 %

Tabelle 3.1: Prozentuale Veränderung der Summe der Schlagzahlen N_{10} in nichtbindigen Homogenbereichen, im Vergleich zu Mittelwert aus DPH 1 und DPH 2

4 Experimentelle Untersuchungen an der Universität Stuttgart

Am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart wird aktuell ein Forschungsvorhaben zum Gruppentragverhalten von Verdrängungspfählen durchgeführt. In Moormann & Ries (2015) wurde u. a. über kleinmaßstäbliche Vorversuche in Sand mit eingedrückten Pfahlscheiben und Modellpfählen im Maßstab 1:100 berichtet (Abb. 4.1).

Neben einer visuellen Auswertung, mit deren Hilfe installationsbedingte Verspannungsbereiche zwischen den Pfählen einer 1 x 3 Pfahlreihe beobachtet werden konnten, wurden auch Randpfähle (P1 und P3) und Mittelpfahl (P2) probebelastet, vgl. Abb. 4.2 a), wobei der Mittelpfahl in diesem Versuch zuletzt eingedrückt wurde und in der Einzelbelastung bei $s = 1$ mm das ca. 1,5-fache im Vergleich zu den jeweiligen Randpfählen trägt. Bei Belastung der Pfahlreihe beträgt das Widerstandsverhältnis von Mittelpfahl zu Randpfahl ca. 1,25.

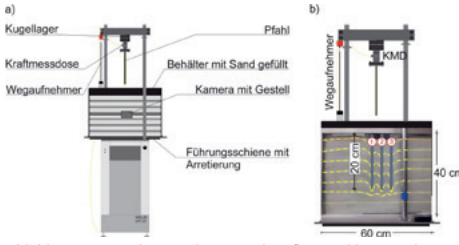


Abbildung 4.1 a) Schematischer Versuchsaufbau und b) Versuchsaufbau und visuelle Auswertung der Bodenverschiebungen nach Eindringen der Modellpfahlreihe aus Moormann & Ries (2015)

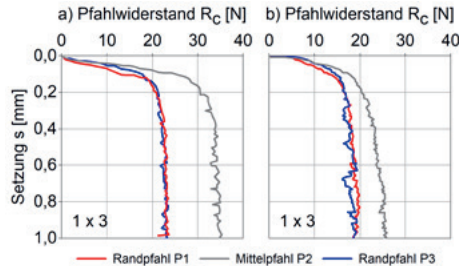


Abbildung 4.2: a) Ergebnisse der Probebelastungen an einzelnen Gruppenpfählen und b) ermittelte Pfahlwiderstände aus Pfahlgruppenbelastung (Moormann & Ries 2015)

In weiteren Vorversuchen wurde am IGS im Modellmaßstab das Gruppentragverhalten von geramten Vollverdrängungspfählen in Sanden untersucht (u. a. Frank 2017). Exemplarisch zeigt Abb. 4.3 Ergebnisse für einen Versuch an einer 3 x 3 Pfahlgruppe mit $a/D = 3$ (Modellpfähle: geschlossene Rohrprofile aus Aluminium mit $D = 34 \text{ mm}$, $l/D = 1/38$) in mitteldicht gelagertem Sand. Das beobachtete Widerstandssetzungsverhalten zeigt, dass die aus einer Pfahlgruppenbelastung resultierenden Gruppenpfahlwiderstände von der Position und der Installationsreihenfolge des Pfahls in der Gruppe abhängig sind. Für alle Pfähle in der Gruppe ergibt sich im Abgleich mit dem freistehenden Einzelfahl eine signifikant höhere Steifigkeit und ein deutlich erhöhter Pfahlwiderstand (Abb. 4.3a). Der Widerstand des Mittelpfahls ist für $s = 3 \text{ mm}$ gegenüber dem des Einzelfahls um das 1,5-fache erhöht. Für die Belastung der Pfahlgruppe ergibt sich nach Gl. 1 die Gruppeneffektivität für $s = 3 \text{ mm}$ zu $G_R = 1,80$ (Abb. 4.3b).

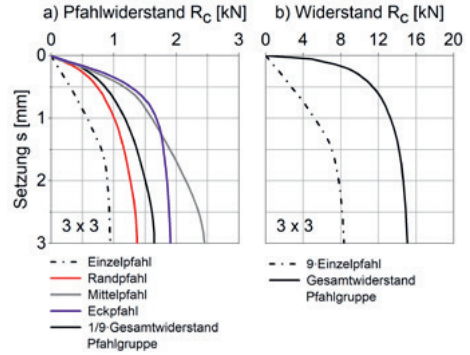


Abbildung 4.3: a) Gruppenpfahltragfähigkeiten ermittelt aus Pfahlgruppenbelastung sowie b) Gesamtwiderstand der Pfahlgruppe aus Pfahlgruppenbelastung, $a/D = 3$ (Frank 2017)

Auch diese Ergebnisse belegen das bisher bei der Bemessung von Verdrängungspfahlgruppen in der Regel nicht berücksichtigte Potenzial, das sich aus dem Einfluss der herstellungsinduzierten Verdichtungs- und Verspannungseffekte bei Pfahlgruppen in nichtbindigen Böden auf das Pfahltragverhalten ergibt.

Aktuell sind am IGS weitere Versuchsreihen mit für 1g-Versuche skalierten Modellpfählen im Maßstab 1:15 in einer sog. *calibration chamber* in der Umsetzung (Abb. 4.4). Der Vorteil bei derartigen Versuchen besteht darin, dass durch eine gleichförmige Belastung der Sandoberfläche (z. B. Remspecher 2020) der Initialspannungszustand erhöht werden kann und somit Verdrängungseffekte bei der Installation sowie das Pfahltragverhalten im Modell besser auf den Realmaßstab übertragbar sind.

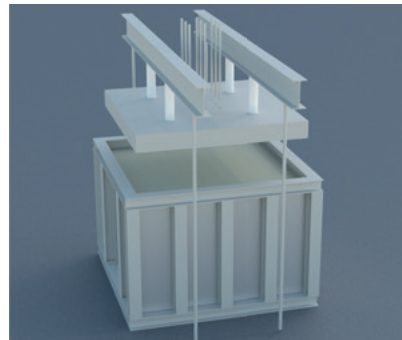


Abbildung 4.4 Isometrische Ansicht des Versuchsstands (sog. calibration chamber) für Versuche an Verdrängungspfahlgruppen im Maßstab 1:15

Folgende Randbedingungen werden dabei untersucht bzw. variiert:

- Achsabstände der Gruppenpfähle
- Gruppengeometrie, u. a. 2×2 , 3×3 sowie Pfahlreihen
- Lagerungsdichte des Versuchsbodens
- Art der Installation: Schlagrammung und Eindrücken
- Installationsreihenfolge

5 Zusammenfassung

Experimentelle Untersuchungen aus der Literatur an 4er bzw. 9er Verdrängungspfahlgruppen im Modellmaßstab belegen, dass vor allem in locker gelagerten nichtbindigen Böden bis zu einem Pfahlachsabstand von $\geq 6 \cdot D$ die Tragfähigkeit der Gruppenpfähle in Summe höher ist als die Summe der Widerstände der äquivalenten Einzelpfähle. Für mitteldicht bzw. dicht gelagerte Sande sowie andere Gruppengeometrien sind die Aussagen zur Gruppeneffektivität bisher nicht konsistent.

In einem projektbegleitenden Feldversuch konnte für eine Pfahlgruppe, deren Fertigteiltrampfpfähle in einem Baugrund mit einer Schichtenfolge aus schluffigen Kies-Sanden und leichtplastischen Schluffen einbinden, eine Erhöhung des axialen Widerstandes mit der Standzeit beobachtet werden, wobei der Widerstandszuwachs allein auf den Mantelwiderstand zurückzuführen ist. Des Weiteren zeigte sich, dass unmittelbar nach Rammung das Widerstandsverhältnis von Gruppenpfahl zu Einzelpfahl mindestens 1,71 beträgt, die Pfähle in der Gruppe an allen Pfahlpositionen also einen deutlich höheren Pfahlwiderstand haben als ein vergleichbarer freistehender Einzelpfahl. Auch eine Abhängigkeit der Installationsreihenfolge konnte nachgewiesen werden. Innerhalb der Pfahlgruppe konnten in den nichtbindigen Schichten mit schweren Rammsondierungen stark verdichtete Bereiche mit Schlagzahlen $N_{10} > 200$ identifiziert werden. Am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart wird das Gruppentragverhalten von Verdrängungspfahlgruppen systematisch untersucht. Durchgeführte Vorversuche belegen, dass bei Vollverdrängungspfählen in mitteldicht gelagerten Sanden ein

deutlich steiferes Widerstandssetzungsverhalten und ein signifikant erhöhter Pfahlwiderstand im Vergleich zu einem Einzelpfahl beobachtet werden kann, was ein erhebliches bemessungstechnisches Optimierungspotential verdeutlicht. Aktuell werden in großmaßstäblichen Modellversuchen mit erhöhtem Spannungsniveau und instrumentierten Modellpfählen die Interaktionseffekte der Gruppenpfähle untersucht. Auf der Basis einer Kombination solcher physikalischer und numerischer Untersuchungen sollen Bemessungsansätze abgeleitet werden, mit deren Hilfe die in der Regel positiven Aspekte aus dem Verdrängungsvorgang bei der Pfahlinstallation und dessen Einfluss auf die Pfahl-Pfahl-Interaktion und das axiale Tragverhalten in der Ingenieurpraxis berücksichtigt werden können.

Literaturverzeichnis

- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. – DGGT (2012). *Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ – EA-Pfähle*. 2. Aufl., Berlin: Ernst & Sohn.
- Frank, J. (2017). Modellversuche zum Gruppentragverhalten von vorgefertigten Vollverdrängungspfählen in Sand. Pfahl-Symposium 2017. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 102, 41-50.
- Hanna, T.H. (1963). Model studies of foundation groups in sand. *Géotechnique*, 13(4), 334-351.
- Katzenbach, R., Moormann, C. (1997). Design of axially loaded piles and pile groups in Germany, Actual practice and recent research results. Design of axially loaded piles – European practice, International Seminar, ISSMFE - ERTC3, Brüssel, 1997, Balkema, Rotterdam, 177-201.
- Kempfert, H.-G., Moormann, C. (2018). *Kapitel 3.2, Pfahlgründungen*. Grundbau-Taschenbuch, Teil 3, 8. Aufl.: Gründungen und geotechnische Bauwerke. Berlin: Ernst & Sohn.
- Kérisel, J. (1961). Fondations profondes en milieux sableux. *Proc. 5th ICSMGE*, Paris, Vol. 2, 73-83.



- Kézdi, Á. (1957). Bearing capacity of piles and pile groups. *Proc. 4th ICSMFE*, London, Vol. 2, 46-51.
- Le Kouby, A., Canou, J., Dupla, J.C. (2006). Group effect on model piles under axial monotonic loading. *Proc. 4th Int. Conf. on Soft Soil Engineering*, Vancouver, 179-187.
- Le Kouby, A., Dupla, J.C., Canou, J., Francis, R. (2016). The effects of installation order on the response of a pile group in silica sand. *Soils and Foundations*, 56(2), 174-188.
- Meyerhof, G.G. (1959). Compaction of sands and bearing capacity of piles. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(6), 1-29.
- Moormann, C., Ries, S. (2015). Zum Gruppentragverhalten bei vorgefertigten Vollverdrängungspfählen in Sand. *Pfahl-Symposium 2015*. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 99, 434-464.
- Preß, H. (1933). Die Tragfähigkeit von Pfahlgruppen in Beziehung zu der des Einzelpfahles, *Die Bautechnik*, 11(45), 625-627.
- Remspecher, F. (2020). *On the effects of pile installation in granular soil*. Technische Universität Berlin, Dissertation.
- Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-158.
- Robinsky, E.I., Morrison, C.F. (1964). Sand displacement and compaction around model friction piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(2), 81-93.
- Rudolf, M. (2005). *Beanspruchung und Verformung von Gründungskonstruktionen auf Pfahlrosten und Pfahlgruppen unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 17, Dissertation.
- Skov, R., Denver, H. (1988). Time-dependence of bearing capacity of piles. *Proc. 3rd Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Ottawa, 25-27.
- Teichman, A.F. (1973). Model investigations of pile groups in sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(2), 199-217.
- Valsangkar, A.J., Meyerhof, G.G. (1983). Model studies of the collapse behaviour of piles and pile groups. *Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, 65-109.
- Vavrina, L., Plohmann, P., Moormann, C., Wardinghus, P. (2016). Beitrag zur Prognose des zeitabhängigen Zuwachses des axialen Pfahlwiderstandes von Fertigrammpfählen. *Vorträge der 34. Baugrundtagung*, Bielefeld, 93-101.
- Vesić, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. *Performance of Deep Foundations*, ASTM STP 444. American Society for Testing and Materials, 177-222.
- Wienholz, B. (1998). *Tragfähigkeit von Verdrängungspfählen in Sand in Abhängigkeit von der Einbringung*. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 57, Dissertation.
- Witzel, M. (2004). *Zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von vorgefertigten Verdrängungspfählen in bindigen und nichtbindigen Böden*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 15, Dissertation.