

Verdrängungsprozess geschraubter Pfähle: neueste Erkenntnisse

O. BERNECKER

Bernecker Ingenieur GmbH, Friolzheimer Straße 3A, 70499 Stuttgart

K. KLIESCH

Frankfurt University of Applied Sciences, Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main

L. SCHNEIDER

Vormals Bernecker Ingenieur GmbH, Friolzheimer Straße 3A, 70499 Stuttgart

C. VOGT-BREYER

Hochschule für Technik, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart

ZUSAMMENFASSUNG:

Der Beitrag stellt aktuelle Forschungsergebnisse zu Versuchsreihen vor, die an der Frankfurt University of Applied Sciences und der Hochschule für Technik Stuttgart durchgeführt werden. Die Versuchsreihen sind eine konsequente Fortführung der bisherigen, um daraus das grundsätzliche Verdrängungsverhalten von Schraubpfählen anhand unterschiedlicher bodenmechanischer und photogrammetrischer Index-Versuche abzuleiten. Es ist gelungen, die Dreh- und Eindringbewegung versuchstechnisch im Labor so darzustellen, dass der Herstellprozess im unmittelbaren Pfahlumfeld durch Werkzeuge aus der Photogrammetrie sichtbar gemacht wird.

Bisherige Untersuchungen anderer Forscher zum Einflussbereich um den Pfahl basieren vornehmend auf numerischen Simulationen und auf kostenintensiven Probelastungen. Die nun vorliegenden labormaßstäblichen Versuche können mit den Ergebnissen aus numerischen Simulationen und In-Situ-Versuchen verglichen werden. Der maßgebende Einflussbereich wird verifiziert und verlässlicher definiert.

1. Einleitung

Das Tragverhalten von Schraubpfählen wird wesentlich durch die stattfindenden Verdrängungsvorgänge beeinflusst, die beim Herstellvorgang im angrenzenden Baugrund verursacht werden. Dieser Bereich wird als Einflussbereich bezeichnet.

Erste Ansätze zur numerischen Modellierung des Verdrängungsverhaltens liegen mit den Veröffentlichungen in BUSCH[28] (2008) [6], GRABE et al. (2012) [14] und AUBRAM (2014) [1] vor. Zudem wurden von verschiedenen Autoren einzelne Schraubpfahlssysteme experimentell untersucht. Erste Ergebnisse systematischer Versuchsserien verschiedenartiger Schraubpfahltypen und die Auswirkung der Herstellvorgänge auf die Änderung der Lagerungsdichten im Pfahlumfeld wurden durch die Autoren vorgestellt (BERNECKER et al., 2014 [21]). Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde die Versuchstechnik und Methodik konsequent weiterentwickelt und optimiert (SCHNIEDERMEIER, 2015 [26]; ROSHAN MONIRI, 2016 [23]). In Zusammenarbeit mit der Hochschule für Technik Stuttgart wurde die nun endgültig ausgereifte Versuchsmethodik entwi-

ckelt, die den Herstellungsprozess durch Dreh- und Drücken hinreichend und verlässlich nachvollzieht und übertragbar macht (SCHNEIDER [25]). Diese Ergebnisse können nun mit denen aus numerischen Simulationen und In-Situ-Versuchen verglichen werden.

2. Der Einflussbereich

Die bislang vorliegenden Erkenntnisse zur Bestimmung des Einflussbereiches basieren auf Ergebnissen aus In-Situ-Versuchen (MAYERHOF, 1959 [18]; BRIEKE, 1993 [4]; SHAKHIREV, 1996 [27]; BUSCH, 2008 [6]), aus numerischen Simulationen (VERMEER et al., 2008 [28]; MAHUTKA & HENKE, 2009 [19]; PUCKER & GRABE, 2012 [21]; GRABE et al., 2012 [14]; AUBRAM, 2014 [1]) und aus Modellversuchen (BERNECKER et al., 2014 [2], LINDER, 1977 [18], SCHMITT, 2004 [24]).

In den Tabellen 1 bis 3 wird der aus diesen Untersuchungen bisher radial zur Pfahlachse abgeleitete Einflussbereich zusammengefasst: dargestellt als Mehrfaches des äquivalenten Pfahldurchmessers D .

Danach kann allerdings noch keine realistische und allgemein gültige (reproduzierbare) Einschätzung des Verdrängungsprozesses und der damit erreichten Tragfähigkeit abgeleitet werden.

Tabelle 1: Bisher abgeleiteter radialer Einflussbereich aus In-situ-Versuchen (nach SCHNIEDERMEIER, 2015 [26])

Autor	Boden	Einflussbereich (Faktor) bezogen auf den Pfahldurchmesser D			Methode
		Lagerung			
		Locker	Mitteldicht	dicht	
BRIEKE [4]	Sand		6		CPT
BUSCH et al. [6]			>2		INK
MAYERHOF (aus [18])		4		4	CPT
SHAKHIREV [27]	Ton	8			H _z S (im Ton)

CPT: Drucksondierungen
 INK: Inklinometermessungen
 H_zS: Harzsuspension in Bohrlöchern

Tabelle 2: Bisher abgeleiteter radialer Einflussbereich aus numerischen Simulationen (nach SCHNIEDERMEIER, 2015 [26])

Autor	Einflussbereich (Faktor) bezogen auf den Pfahldurchmesser D		
	Lagerung		
	Locker	Mitteldicht	dicht
AUBRAM [1]	1-2		
GRABE et al. [28]	4-7		4-7
MAHUTKA [19]	4-5		5-10
PUCKER & GRABE [18]	>2		
VERMEER et al. [28]	5		

DEM: Diskrete Element Methode
 PIC: Particle-In-Cell-Methode
 SPH: Smoothed-Particle Hydrdynamics
 MPM: Material Point Methode
 FEM: Finite Element Methode
 ALE: Allgemeine Lagrange-Euler Methode
 CEL: Gekoppelte Euler-Lagrange Methode

Tabelle 3: Bisher abgeleiteter radialer Einflussbereich aus Modellversuchen in Sand (nach SCHNIEDERMEIER, 2015 [26])

Autor	Einflussbereich (Faktor) bezogen auf den Pfahldurchmesser D			Methode
	Lagerung			
	Locker	Mitteldicht	dicht	
BERNECKER et al. [2]	2-5		5-6,5	DBA
LINDER [18]			3-4	FV
SCHMITT [24]	2-3			DV
SCHNIEDERMEIER [26]	6-9		10-11	VA
	4-5*		9-12*	
ROSHAN MONIRI [23]			5-6	VA

* Während der Pfahleinbringung

DBA: Differenzbildanalyse nach GREIWE et al. (2011) [14]
 FV: Frostverfahren
 DV: Doppelverdrängungspfähle
 VA: Vektoranalyse nach GREIWE et al. (2011) [14]

3. Vergleich zwischen Modellversuch und In-Situ-Versuch

Die durch BERNECKER et al. (2014) [2] vorgestellten Ergebnisse aus Modellversuchen, die mittels der so genannten Differentialanalyse nach GREIWE et al (2014) [14] ausgewertet wurden, wurden durch SCHNIEDERMEIER (2015) [26] an eigenen Versuchsreihen an locker gelagerten und dicht gelagerten Sanden weiterentwickelt und mittels der Vektoranalyse nach GREIWE et al [14] analysiert. Der ungünstig wirkende Modell-Effekt der angeordneten Glasscheibe zur photogrammetrischen Aufnahme des Herstellungsprozesses wurde durch Verlegung des Versuchspfahles in das Innere des Sandkörpers verringert. SCHNIEDERMEIER [26] konnte damit diesen Störfaktor nachhaltig ausschalten, ohne die Qualität der Auswertung zu beeinträchtigen.

Die in den Versuchsserien aus der Verdrängung (nur Drücken) erfassten horizontalen Verschiebungen stimmen qualitativ mit den Werten aus numerischen Simulationen von PUCKER & GRABE (2012) [21] in Bezug gesetzt (siehe Abbildungen 1 und 2).

PUCKER & GRABE, 2012 [21] zeigten die horizontale Verschiebung im Abstand von 2 D von der Pfahlachse im Mai Lou Sand über die Tiefe. Die Lagerungsdichte und das Verhältnis zwischen der Rotationsgeschwindigkeit und der Vortriebsgeschwindigkeit (v_r / v_z) wurden variiert. Die Autoren validierten ihre Ergebnisse mit den Inklinometer-Messungen von BUSCH (2011) [7].

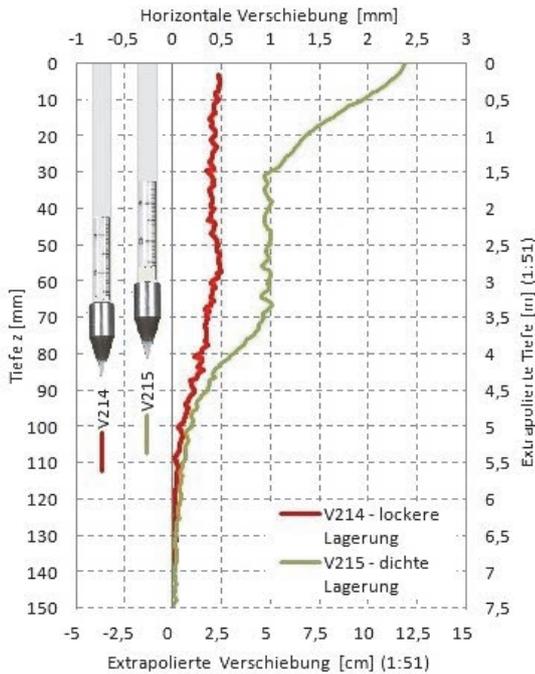


Abbildung 1: Radiale Bodenverformungen infolge Eindrücken des Modellpfahls in dichter und lockerer Lagerung (SCHNIEDER-MEIER, 2015 [26])

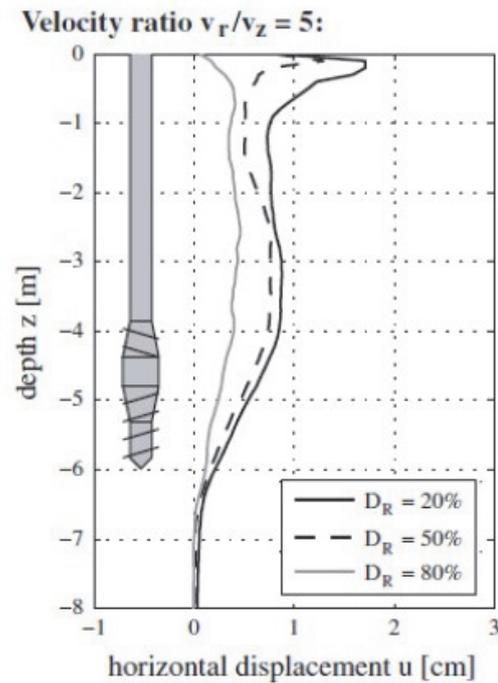


Abbildung 2: Radiale Bodenverformungen infolge des Bohrprozesses mittels numerischer Simulation (PUCKER & GRABE, 2012 [21])

4 Systematische experimentelle Untersuchungen

4.1 Zielsetzung

Die Laborversuchsreihen wurden an enggestuften Sanden durchgeführt, mit denen die Verdrängungsvorgänge im nahen Pfahlumfeld des gedrehten Pfahles erfasst und geklärt werden sollen. Hauptaugenmerk der Untersuchungen im Labor stellen dabei die Veränderungen der Lagerung während des kompletten Herstellvorgangs dar. Dabei wird im Labormaßstab systematisch ein Modellpfahl als modifizierter ATLAS-Pfahl mit verdickter Spitze untersucht (siehe Abbildung 3). Ziel ist es, die Verdrängungseffekte in Abhängigkeit von den Arbeitsphasen abzuleiten. Nachfolgend soll über die grundsätzliche Methodik und Ergebnisse aus echten Vollverdrängungsversuchen mit Modell-Schraubpfahl mit verdickter Spitze berichtet werden.



Abbildung 3: Modellpfahl als modifizierter ATLAS-Pfahl mit verdickter Spitze (SCHNEIDER, 2020 [25])

4.2 Methodik

Die nachfolgenden Ergebnisse wurden an so genannten Sandkasten-Versuchen (siehe Abb. 4) mit trockenem Sand hoher Lagerungsdichte durchgeführt. Hierzu wurde eine Seite des Versuchskastens durch eine spiegelungsfreie PMMA-Glasscheibe ausgebildet, um daran 2-dimensionale hochauflösenden Fotos aufnehmen zu können. Pro Fotoserie können somit die Ausgangssituation und die jeweiligen Arbeitsschritte des Modellpfahles nacheinander dokumentieren werden.

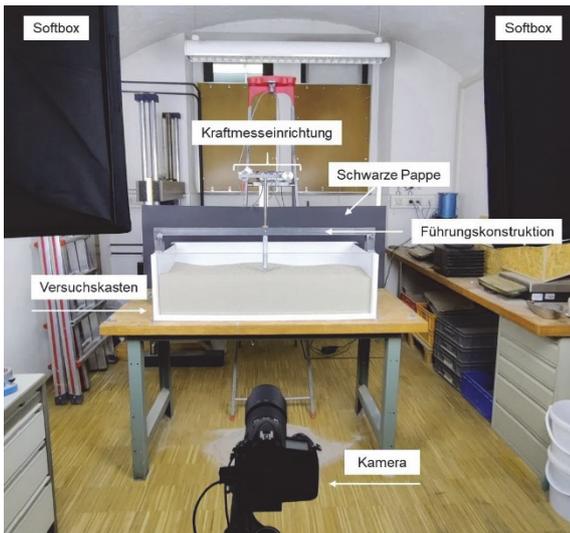


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur hochauflösenden Bildaufnahme [25]

Um die erforderliche Drehbewegung des Modellpfahles zu ermöglichen, wurde dessen Angriffspunkt in den Abständen $A = 2D/3D$ zur Glasscheibe positioniert und an der Hochschule für Technik Stuttgart eine eigene Drehlogistik hierfür entwickelt (siehe Abbildungen 5 und 6).

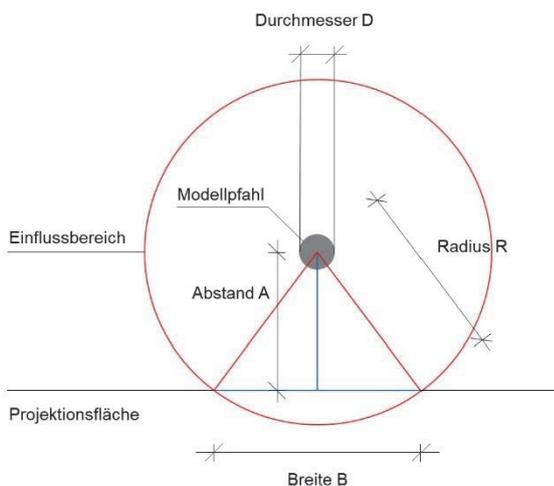


Abbildung 5: Anordnung des Pfahlabstands zur PMMA-Scheibe [25]

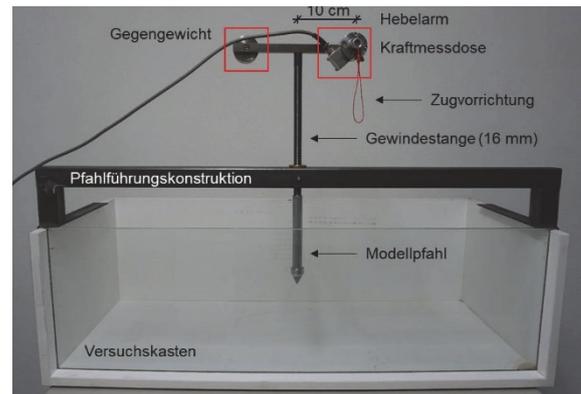


Abbildung 6: Aufbau der Pfahlführungskonstruktion mit Drehmomentmessung [25]

Der Modellpfahl wird dabei weggesteuert in bis zu 17 Teilschritten bis zur Endtiefe in den Versuchsboden durch Drücken und Drehen eingebracht. Bei jedem Teilschritt wird photogrammetrisch der Zustand aufgenommen (BERNECKER, 2014 [2]). In den Abbildungen Bild 7 ist das Ergebnis einer so genannten Vektorbildanalyse an einem dichten Sand bei dem Eindringversuch eines eingepressten Verdrängungspfahles dargestellt.

Die Fotoaufnahmen wurden durch SCHNEIDER [25] mit Hilfe der so genannten Nahbereichsphotogrammetrie (GEHRKE & GREIWE, 2011, [11]) durch Unterstützung und Beratung des Labors für Photogrammetrie und Fernerkundung der Frankfurt University of Applied Sciences durchgeführt. Die etwa 120 hochauflösenden Fotoaufnahmen wurden durch Kalibrierung entzerrungsfrei erstellt und anschließend rund 1000 Differenzanalysen unterzogen.

Bei der Differenzanalyse werden die Unterschiede zweier Bilder (Zustand 1: vor Eindringung des Modellpfahles; Zustand 2: z.B. nach Eindringung um 1 cm) aufeinander manuell (Fehler ca. 1 Pixel) registriert und software-gestützt ein Differenzbild gerechnet (siehe [11]).

Die Auswertung der Differenzbilder erfolgt dann zusätzlich mit der Methodik der Vektoranalyse nach GEHRKE & GREIWE, 2011, [11]. Dabei können Lageveränderungen einzelner Sandkörner durch die Veränderung von zugeordneten Punkten (Key-Points) in zwei aufeinander folgenden digitalen Bildern als Vektoren visualisiert werden. Software gestützt wird also in einem ausgewählten Bereich nach markanten Punkten (Keypoints) gesucht. Anschließend wird in einem zweiten, fast identischen Bild für jeden markanten Punkt des Referenzbildes der korrespondierende Punkt identifiziert. Die Bewegung der gefundenen übereinstimmenden Punkte, wird in Form eines Vektors ausgegeben. Das nachfolgende Bild Abb. 7 zeigt das Ergebnis einer Vektoranalyse mit etwa 20fach überhöht dargestellten Be-

wegungsvektoren im Eindringintervall von 95 mm auf 100 mm. Deutlich zu erkennen sind die roten Bewegungsvektoren der Sandkörner, Die grünen Punkte kennzeichnen die identifizierten markanten Punkte im gesamten Bearbeitungsfenster sowie in den beiden Referenzgebieten. Neben den deutlichen Bewegungsvektoren im Einflussbereich des Modellpfahls sind auch einzelne Vektoren außerhalb des Bereichs verzeichnet. Diese Bewegungsvektoren entstehen durch ein fehlerhaftes Matching zweier markanter Punkte. Insgesamt gut erkennbar ist jedoch die aufwärts gerichtete Bewegung der Sandkörner, die eine sehr gute Übereinstimmung mit der Veränderung an der Oberfläche zeigt.

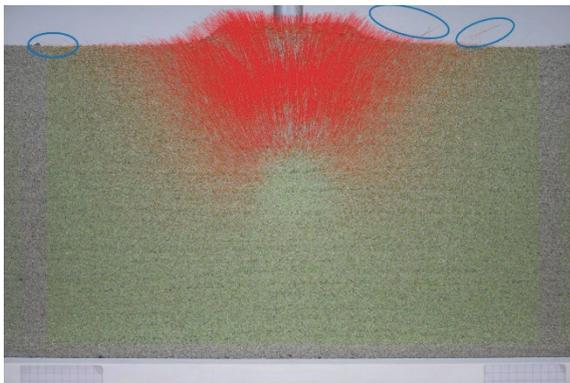


Abbildung 7: Grafische Auswertung der Vektoranalyse mit hervorgehobenen Fehlstellen [25]

4.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsserie dargestellt und erläutert. Dabei werden Ergebnisse der ersten Serien aus den Jahren 2013, bei denen der Modellpfahl durch Penetration eingebaut wurde, den Versuchsserien aus dem Jahre 2020 gegenübergestellt.

Bei den Versuchen mit eingedrehtem Modellpfahl sind während des Eindringprozesses strukturelle Veränderungen an der Sandoberfläche erkennbar. Es entsteht in den ersten 15 mm des Eindrehprozesses eine kleine kreisförmige Aufwölbung im Umfeld der Schneidespitze. Mit dem darauffolgenden Eindringen der Aufweitung, welche den Verdrängungskörper darstellt, nimmt die Aufwölbung an Höhe und Umfang zu. Im weiteren Verlauf des Eindringprozesses entsteht durch Nachfall eine trichterförmige Ausbildung der Erhöhung um den Pfahl. Abb. 8 und 10 zeigen diese Prozesse im Modellversuch. Abb. 9 verdeutlicht diese Vorgänge am ausgeführten Schraubpfahl und bestätigt somit die Laborbeobachtungen. Der Durchmesser des Trichters wurde bei den Versu-

chen mit 8 cm Durchmesser beobachtet. Dies entspricht etwa dem 2,8fachen Durchmesser des Verdrängungskörpers.



Abbildung 8: Aufwölbung während des Eindringprozesses der Versuche V224 und V323 [25]



Abbildung 9: Baustelle - Aufwölbung während des Eindringprozesses bei der Herstellung eines Schraubpfahls

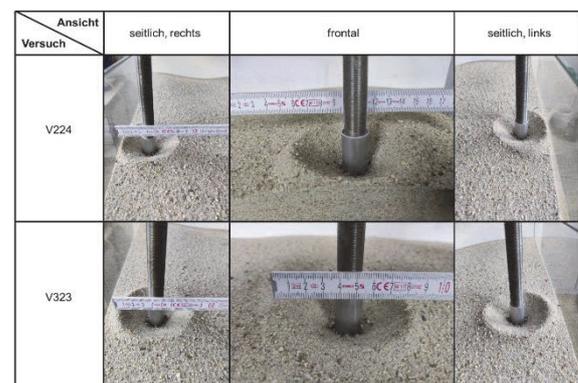


Abbildung 10: Ansichten der ausgebildeten Trichterformen der Versuche V224 und V323 [25]

Der Durchmesser des Trichters wurde bei den Versuchen mit 8 cm Durchmesser beobachtet. Dies entspricht etwa dem 2,8fachen Durchmesser des Verdrängungskörpers.

In der Gegenüberstellung der durch Penetration bzw. durch Eindrehen eingebauten Modellpfähle zeigen sich deutliche Unterschiede in der Bewegungsrichtung des den Pfahl umgebenden Sand. Während sich

beim Eindringen des Pfahles vornehmlich Sandkornbewegungen im unmittelbaren Umfeld der Pfahlspitze zeigen, ist beim eingedrehten Pfahl erkennbar, dass über die gesamte Eindringhöhe Sandkornbewegungen stattfinden.

Die folgende Abbildung zeigt gegenüberstellend die Ergebnisse der Vektoranalysen der Versuchsreihen von SCHNEIDER (2020) [25] („drehend + drückend“) und jene von ROSHAN MONIRI (2016) [23].

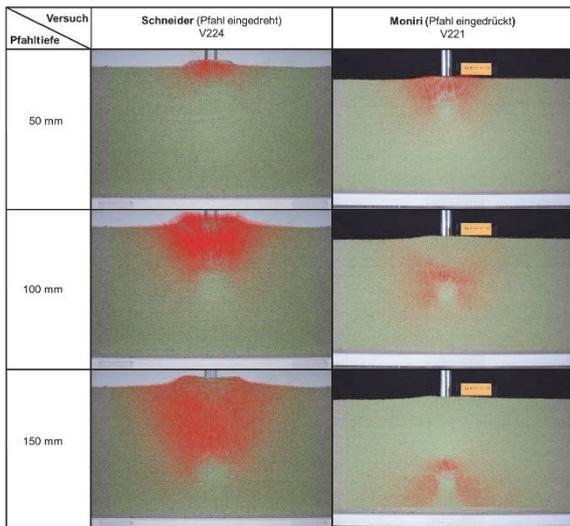


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Vektoranalyse für die unterschiedliche Pfahleinbringung, Links „drehend + drückend“, rechts: „drückend“ [25]

Der sich aus dem Einbringprozess für die drehend + drückend eingebrachten Modellpfähle abzuleitende Einflussbereich zum Ende der vollständigen Pfahleinbringung zeigt die Abbildung 12. Dabei ist in guter Näherung eine kegelstumpffartige Ausprägung von Oberkante Verdrängungskörper bis zur Oberfläche klar erkennbar.

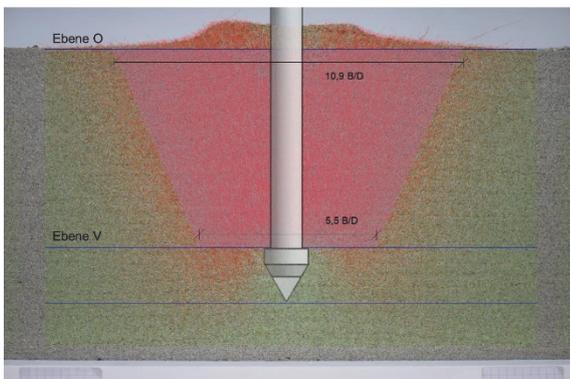


Abbildung 12: Einflussbereich an der Projektionsebene, als Kegelstumpf idealisiert [25]

Der Einflussbereich wird deshalb zur Charakterisierung in zwei Hauptebenen Ebene O und Ebene V unterteilt.

Betrachtet man nun die Ausbildung des Einflussbereiches in diesen Ebenen in radialer Richtung und in 5 mm Eindringsschritten, ergibt sich für die durchgeführten Versuchsserien im dicht gelagertem Sand folgendes Bild (Abbildungen Abb. 13 und 14): dargestellt sind die Serien, die in einem Abstand von $2 \cdot D$ und $3 \cdot D$ zur Bildebene (= Glasscheibe) durchgeführt wurden. Der Radius des Einflussbereiches R wird abhängig vom Durchmesser des Pfahlschafts in R/D dimensionslos angegeben.

In Abbildung 13 (Abstand von $2 \cdot D$ zur Projektionsebene) wird nach 35 mm Eindringtiefe eine erste Beeinflussung in der Bildebene erkennbar. Dies entspricht der Höhe des Verdrängungskörpers, gemessen von der Pfahlspitze aus. Mit dem vollständigen Eindringen des Verdrängungskörpers wird demnach die Verdrängung des Sandes in der Projektionsebene sichtbar und damit wirksam.

In Abbildung 14 (Abstand von $3 \cdot D$ zur Projektionsebene) beginnt diese sichtbare Beeinflussung erst nach 55 bis 70 mm, also in etwa dem 1,6 – 2fachen Durchmesser.

Mit weiterem Eindringen des Modellpfahles treten diese Effekte nicht mehr auf.

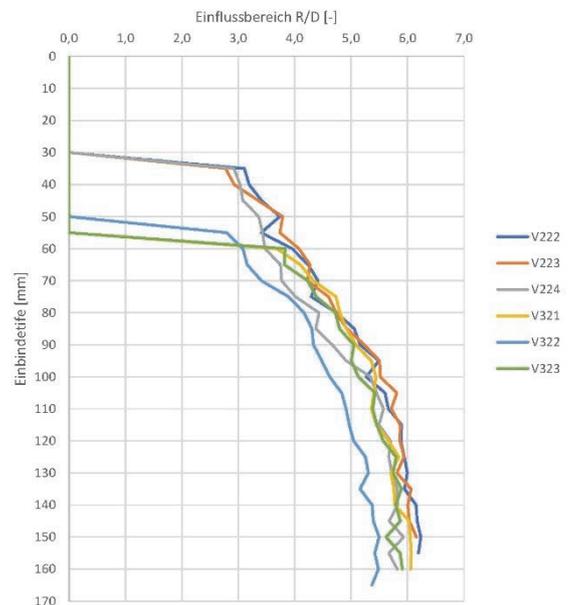


Abbildung 13: Horizontaler Einflussbereich für die Serien 2D und 3D in Ebene O [25]

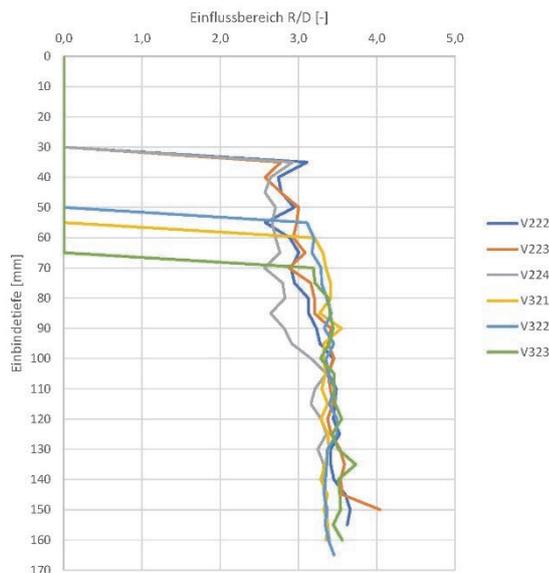


Abbildung 14: Horizontaler Einflussbereich für die Serien 2D und 3D in Ebene V [25]

Die Mittelwerte (MW) für R/D der festgestellten Einflussbereiche für die Ebene O (EO) und die Ebene V (EV) ergeben sich aus den Versuchen demnach wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{MW EO} &= 5,9 \\ \text{MW EV} &= 3,6 \end{aligned}$$

5 FAZIT UND AUSBLICK

Mit der entwickelten Versuchslastlogistik ist es nun endlich gelungen, den komplexen Herstellungsprozess aus Drehen und Drücken bei Schraubpfählen plausibel und realitätsnah zu modellieren. Die Analyse des Herstellvorganges und der damit einhergehenden Änderungen nichtbindiger Böden im Pfahlumfeld können nun mit den Ergebnissen aus numerischen Simulationen und In-Situ-Versuchen verglichen und verifiziert werden.

Die Bewertung der Versuche im Hinblick auf die Veränderung der Lagerungsdichte im Umfeld von Pfählen wird nach wie vor als entscheidende Kenngröße zur Qualitätssicherung angesehen, nach der Ausführung die Herstellungsqualität und damit indirekt die Tragfähigkeit überprüfen zu können. Hier erscheinen numerische Methoden in Verbindung mit den vorliegenden Versuchsergebnissen ein vielversprechender Ansatz.

Der durch mehrjährige umfangreiche Versuchsreihen eingeschlagene Weg wird weiterverfolgt.

6 LITERATURANGABEN

- [1] **Aubram, D. (2014):** Über die Berücksichtigung großer Bodendeformationen in numerischen Modellen. Vorträge zum Ohde-Kolloquium 2014. In: Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Dresden (Heft 19), S. 109–122.
- [2] **Bernecker, O., Kliesch, K., Gehrke, R., Greiwe, A. (2014):** Änderung der Lagerungsdichte im Umfeld geschraubter Pfähle-Beitrag zum 09. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 2014
- [3] **Borchert, K.M. & Kirsch, F., Mittag, J. (2005):** Betonsäulen als pfahlartige Tragglieder - Herstellverfahren, Qualitätssicherung, Tragverhalten und Anwendungsbeispiele.- Pfahl-Symposium 2005. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft Nr. 80. S. 219-238.
- [4] **Brieke, (1993):** Vergleich der Tragfähigkeit unterschiedlicher Pfahlsysteme.- Pfahlsymposium 1993, TU Braunschweig
- [5] **Buchmann, K.-J. und Steiner, H. (1996):** Einsatz und Tragverhalten des Vollverdrängungsbohrpfahles bei verschiedenen Bauvorhaben in Norddeutschland.- Vortragsband Baugrundtagung, Berlin: DGGT.
- [6] **Busch, P. (2008):** Untersuchung zur Herstellung und Tragfähigkeit von Teil- und Vollverdrängersystemen.- Diplomarbeit (unveröffentlicht), Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg
- [7] **Busch, P. (2011):** Untersuchungen zur Herstellung und Tragfähigkeit von Teil- und Vollverdrängersystemen.- Bewerbung für den Edgard-Frankignoul-Förderpreis 2011 – Kurzfassung.- http://www.franki.de/pdf/Kurzfassung_Busch.pdf (2013-11_10)
- [8] **Dijkstra, J., Anaraki, K. E., Broere, W., van Tol, F. (2009):** Numerical simulation of pile installation in sand. In: 1st International Symposium on Computational Geomechanics (ComGeoI), S. 753–762.
- [9] **DIN EN 12699 (2001):** Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Verdrängungspfähle, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [10] **EA-Pfähle (2012):** Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“.- Ernst & Sohn Verlag
- [11] **Gehrke, R. & Greiwe, A. (2011):** Sensoren zur kleinformatischen Aerophotogrammetrie mit UAV. - SEYFERT, E. (Hrsg.): DGPF Jahrestagung 2011
- [12] **Grabe J. & König & Mahutka K.-P. (2005):** Zur indirekten Beurteilung der Lagerungsdichte nichtbindiger Böden auf der Grundlage von Drucksondierungen. -Tagungsband zum Ohde-Kolloquium in Dresden 2005, Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der TU Dresden, Heft 15, 1-18
- [13] **Grabe, J. & Dührkop, J. & Henke, S. & Kinzler, S. & König, F. (2007):** Pfähle mit veränderlichem Querschnitt - Konische Pfähle, Fertigteilepfähle mit Fußaufweitung und Flügelpfähle. -Tagungsband zum Pfahl-Symposium 2007, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 84, S. 131-155
- [14] **Grabe J., Pucker T., Busch P. und Gerssen F.-W. (2012):** Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Herstellung von Vollverdrängungsbohrpfählen. Tagungsband zur 32. Baugrundtagung 2012 in Mainz, S. 75-81, Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
- [15] **Greiwe, A. & Gehrke, R. & Gangl, C. (2011):** Nutzung der Aerophotogrammetrie mit UAV für GIS-Fachanwendungen. In: STROBL ET AL . (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2011- Beiträge zum 23. AGIT-Symposium Salzburg, 2011
- [16] **Handbuch Eurocode 7, Band 1 (2011):** Band 1: Allgemeine Regeln - Vom DIN autorisierte konsolidierte Fassung.- Beuth Verlag GmbH Berlin
- [17] **Handbuch Eurocode 7, Band 2 (2011):** Band 2: Erkundung und Untersuchung - Vom DIN autorisierte konsolidierte Fassung.- Beuth Verlag GmbH Berlin
- [18] **Linder, W.-R. (1977):** Zum Eindring- und Tragverhalten von Pfählen in Sand. Dissertation. Berlin.
- [19] **Mahutka, K.-P., Henke, S. (2009):** Numerische Untersuchungen zur herstellungsbe-
- dingten Tragfähigkeit von Pfählen. Tagungsband zum Pfahlsymposium 2009. In: Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig Heft 88, S. 471–492.
- [20] **Nowak, T. (2021):** Untersuchung von Rammpfählen in PLAXIS 2D.- Studienarbeit an der Hochschule RheinMain, betreut durch das Fachgebiet Geotechnik an der Fachhochschule Frankfurt am Main (unveröffentlicht)
- [21] **Pucker, T., Grabe, J. (2012):** Numerical simulation of the installation of full displacement piles. In: Computers and Geotechnics (45), S. 93–106.
- [22] **Rollberg, D. (1976):** Bestimmung der Tragfähigkeit und des Rammwiderstands von Pfählen aus Sondierungen.- Veröff. Inst. Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswesen RWTH Aachen, Heft 3
- [23] **Roshan Moniri, P. (2016):** Tragfähigkeit von Vollverdrängungspfählen: Verifizierung anhand von Laborversuchen und durch numerische Berechnungen.- Masterthesis an der Hochschule RheinMain, betreut durch das Fachgebiet Geotechnik an der Fachhochschule Frankfurt am Main (unveröffentlicht)
- [24] **Schmitt, A. (2004):** Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Ortbetonpfählen mit variabler Bodenverdrängung.- Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Hrsg.: TU Darmstadt, Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik; VII, 149 S.
- [25] **Schneider, L. (2020):** Bestimmung des Einflussbereichs von geschraubten Verdrängungspfählen durch Analyse hochauflösender Bilder im Laborversuch.- Masterthesis an der Hochschule für Technik Stuttgart (unveröffentlicht)
- [26] **Schniedermeier, R. (2015):** Bestimmung des Einflussbereiches von Verdrängungspfählen durch Analyse hochauflösender Bilder im Laborversuch.- Masterthesis an der Hochschule RheinMain, Wiesbaden, betreut durch das Fachgebiet Geotechnik an der Fachhochschule Frankfurt am Main (unveröffentlicht)

- [27] **Shakhirev, V. (1996):** Etude expérimentale du comportement du sol lors du fonçage des pieux. In: Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, S. 95–116.

- [28] **Vermeer, P., Bernecker, O. und Weirich, T. (2008):** Schraubpfähle: Herstellung, Tragfähigkeit und numerische Modellierung. Bautechnik 85, Heft 2, pp. 133-139.