

Untersuchungen zur Herstellung und Tragfähigkeit von Vollverdrängungsbohrpfählen

Die nachfolgende Kurzfassung baut auf den Ergebnissen meiner Diplomarbeit mit dem Titel „Untersuchungen zur Herstellung und Tragfähigkeit von Teil- und Vollverdrängungspfählen“ auf, die ich im Zeitraum von Januar bis April 2008 angefertigt habe. Die dargestellten Ergebnisse entstammen dabei der Auswertung der Messergebnisse eines Versuchsfeldes, das die Firma Bauer Maschinen im Jahr 2008 im Hamburger Hafen eingerichtet hat und ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg wissenschaftlich begleitet habe.

Kurzfassung:

Pfahlgründungen unterliegen durch Kostendruck und umwelttechnische Auflagen einer rasanten, technischen Entwicklung. Mit dem wirtschaftlichen Druck, Pfähle immer kostengünstiger herzustellen, wächst auch der Zwang zur Entwicklung neuer Herstellungsmethoden, die Erschütterungen und Lärm vermeiden und die Förderung von entsorgungspflichtigem Bohrgut an die Oberfläche gering halten. In dieses Segment fallen die Teil- und Vollverdrängungsbohrpfähle.

Die Diplomarbeit befasst sich mit solchen Pfählen und begleitet ein Versuchsfeld in der ersten Testphase, in dem die Herstellung und Tragfähigkeit von Teil- und Vollverdrängungsbohrpfählen untersucht wird. Neben den praktischen Tätigkeiten, wie der Durchführung von statischen Probelastungen auf dem Versuchsfeld, werden umfassende Auswertungen zu den Baugrunduntersuchungen und den Probelastungen durchgeführt. Zusätzlich werden Zusammenhänge zwischen den analysierten Telemetriedaten und der Tragfähigkeit aufgezeigt, diskutiert und festgehalten.

Während der letzten Jahre wurden viele verschiedene Vollverdrängungsbohrpfähle bzw. Schraubpfahlssysteme in unterschiedlichen Ländern entwickelt – insbesondere in den Benelux-Ländern. Einen Überblick der auf dem Markt gebräuchlichen Systeme ist in Kapitel 2 der Diplomarbeit dargestellt. Schraubpfähle werden dabei mit einer Kombination aus Drehmoment und vertikalem Vorschub in den Boden eingebracht und verdrängen dabei den Boden im Wesentlichen seitlich. Schraub- bzw. Vollverdrängungsbohrpfähle kombinieren die Vorteile anderer Pfahlssysteme. So können hohe Produktionsleistungen und große Tragfähigkeiten von Rammpfählen ebenfalls mit Schraubpfählen erzielt werden. Schraubpfähle können darüber hinaus auch insbesondere dort eingesetzt werden, wo kostengünstigere Rammpfähle aus Gründen des Lärmschutzes und der Vermeidung von Erschütterungen nicht ausführbar sind. Da es bei Vollverdrängungsbohrpfählen keine nennenswerte Bodenförderung gibt, werden diese Systeme bevorzugt bei kontaminierten Böden eingesetzt, da zum einen der anschließende kostenpflichtige Abtransport und zum anderen die kostenintensive Reinigung des Aushubmaterials eingespart wird.

Das Eindring- und Tragverhalten der einzelnen Schraubpfähle ist weitestgehend unerforscht, da sich die Schraubpfahlssysteme selbst untereinander stark in ihrer Verdrängungswirkung und somit auch im Tragverhalten unterscheiden (Vermeer et al., 2008). Dies liegt in den unterschiedlichen Pfahlssystemen begründet, welche sich sowohl in der Herstellungsmethode als auch an den eingesetzten Bohrwerkzeugen unterscheiden.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass beim Herstellungsvorgang eine Bodenverdichtung eintritt und dadurch höhere Pfahlmantelreibungen und -spitzendrücke erzielt werden. Die daraus resultierende wirtschaftlichere Pfahlbemessung ist allerdings nicht ohne weiteres umzusetzen, da sich bei der Pfahlherstellung die Bodenzustandsparameter verändern. So kann es je nach Herstellungsparametern zu Entspannungen oder bei Teilverdrängungsbohrpfählen zu Auflockerungen durch Bodenförderung kommen. Die Folgen sind im schlimmsten Fall Bauschäden und die Verschlechterung des Baugrunds. Besonders nachteilig wirkt sich dies im Rahmen der Nutzung von Bestandspfählen wie z.B. bei der Elbphilharmonie (Franke und Woldt, 2009) aus. Darüber hinaus liegen bislang keine gesicherten Erkenntnisse zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Vollverdrängungs-

bohrpfählen vor. Zur Bestimmung der statischen Grenztragfähigkeit werden daher in der Regel statische oder dynamische Pfahlprobelastungen durchgeführt. Da diese zeit- und kostenintensiv sind, müssen neue Konzepte zur Ermittlung der Pfahltragfähigkeit entwickelt werden.

Aufgrund dieser Erfahrungen und zur Gewinnung weiterer Erkenntnisse über die Herstellung und das Tragverhalten von Vollverdrängungsbohrpfählen hat die Fa. Bauer Maschinen in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Hamburg-Harburg ein Versuchsfeld im Hamburger Hafen eingerichtet. Auf dem Versuchsfeld wurde der Full displacement pile mit Lost Bit (FDP lost bit) der Fa. Bauer mit zwei verschiedenen Durchmessern eingesetzt und mit Teilverdrängungsbohrpfählen sowie normalen Schneckenortbetonpfählen verglichen, siehe Bild 1.

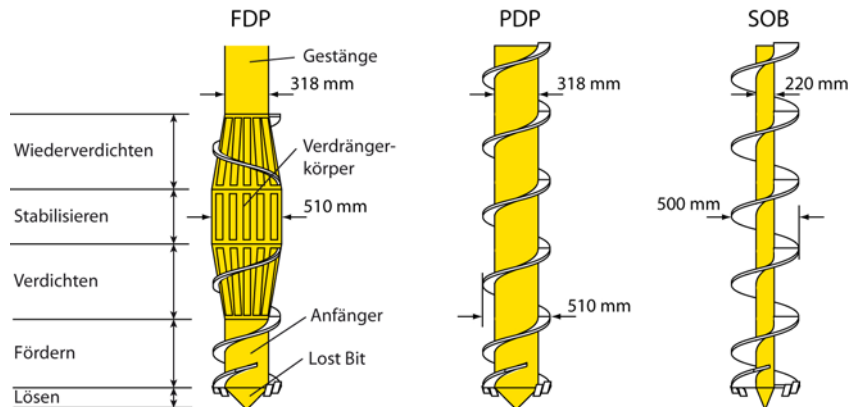


Bild 1: Auf dem Versuchsfeld eingesetzte Bohrwerkzeuge

Eine ausführliche Beschreibung des Vollverdrängerpfahlsystems der Firma Bauer sowie Ausführungsbeispiele finden sich in Kapitel 3 der Diplomarbeit. Darüber hinaus wird sich mit dem System zur Erfassung der Herstellparameter auseinander gesetzt und ein ausführlicher Bericht mit kritischen Analysen zu allen bisherigen Tests zum FDP-System erstellt. In Kapitel 4 wird das Versuchsfeld im Hamburger Hafen vorgestellt und das Untersuchungskonzept mit allen Baugrunderkundungen, Messeinrichtungen, der Pfahlherstellung und den Pfahlprüfungen detailliert erläutert. Ein vereinfachtes Bodenprofil ist in links neben den Ergebnissen der Inklinometermessungen in Bild 2 dargestellt.

Der hellblau, gestrichelte Verlauf im linken Diagramm des Bildes 2 zeigt die horizontalen Bodenverschiebungen im Abstand vom zweifachen Pfahldurchmesser zu dem Zeitpunkt an, bei dem sich das Bohrwerkzeug auf Endtiefe befindet. Zum besseren Verständnis ist in dem Diagramm auch der Verdrängerkörper höhenmaßstabgerecht in dem fertigen Pfahl eingezeichnet. Da die Bohrlochwandung im oberen Bereich nicht durch das Bohrgestänge gestützt ist, kann sich der Boden oberhalb des Verdrängerkörpers wieder entspannen. Die daraus resultierenden Auflockerungen im Boden werden durch das Nachverdichten und Betonieren während des Ziehvorganges wieder beseitigt.

Der blaue Verlauf im linken Diagramm zeigt die zusätzlichen Verschiebungen nach dem Zieh- und Betoniervorgang an. Bis zu einer Tiefe, bis zu der der Verdrängerkörper abgebohrt worden ist, stellen sich horizontale Verschiebungen von bis zu 4 cm ein. In einem Abstand vom dreifachen Pfahldurchmesser treten bleibende Verformungen im Mittel von 2 cm auf. Die oberflächennahen Verformungen werden infolge von Überfahrten der Bohrfahrzeuge verfälscht und repräsentieren somit nicht das Verdrängungsverhalten des FD-Pfahls.

Durch die Pfahlherstellung wird der anstehende Boden überwiegend seitlich verdrängt. Dadurch erhöhen sich die Lagerungsdichte und der Spannungszustand im Boden. Dies bewirkt eine Zunahme des Spitzendruckwertes eines CPT's. Einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Spitzendruck, der Lagerungsdichte und dem Spannungszustand im Boden finden sich für Hamburger Sande in Grabe und König (2004).

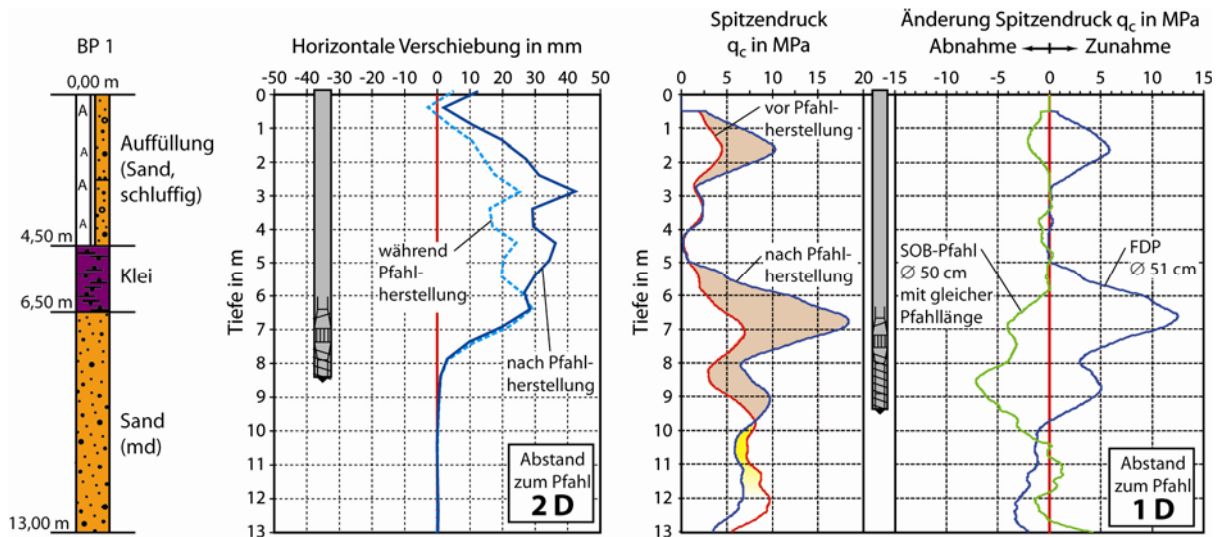


Bild 2: Horizontale Bodenverformungen(links) und Änderung des Drucksondierwiderstandes(rechts) infolge der Herstellung eines FD-Pfahls in unterschiedlichen Abständen zum Pfahl

Die Veränderungen im Boden können daher anhand von CPT's aufgezeigt werden, welche vor und nach Pfahlherstellung durchgeführt worden sind (siehe Bild 2, rechts). In der Auffüllung und in der weichen Kleischicht sind diese Effekte nicht so ausgeprägt wie in der tragfähigen Sandschicht. Hier ergeben sich lokale Spitzendruckzunahmen um bis zu 12 MPa. Die Erhöhungen reichen in etwa bis zu der Tiefe, bis zu der der Verdrängerkörper abgebohrt worden ist. Unterhalb des Verdrängerkörpers ergeben sich geringe Spitzendruckabnahmen, siehe gelb markierte Flächen in Bild 2 rechts. Diese reichen i.d.R. von der Verdrängerunterkante über die Schneckenwendel bis 0,5 bis 1 m unterhalb des Bohrwerkzeugs. Die darunter liegenden Abweichungen resultieren aus Bodeninhomogenitäten.

In der rechten Diagrammhälfte sind zum Vergleich die Spitzendruckänderungen vor und nach Herstellung eines FD-Pfahls mit denen eines normalen SOB-Pfahls bei gleicher Pfahllänge verglichen. Durch die Bodenförderung des Bohrpfahls werden sowohl die Lagerungsdichte als auch der Spannungszustand im Boden verringert, was eine Reduzierung des Spitzendruckwertes bewirkt. Diese Auflockerungen können bei fehlerhaftem Abbohren erheblich sein, siehe Fleming (1995). Mit dem optimalen Verhältnis von Abbohrgeschwindigkeit zu Umdrehungsrate können diese Effekte auf das hier dargestellte Maß reduziert werden, siehe Viggiani (1993) und Van Impe et al. (1997).

Die Bodenveränderungen infolge der Herstellung von Teilverdrängungspfählen liegen zwischen den beiden genannten Pfahltypen. In locker gelagerten Bodenschichten ($q_c < 7,5$ MPa) ergeben sich leichte Spitzendruckzunahmen, während hingegen in mitteldicht bis dicht gelagerten Bodenschichten ($q_c > 10$ MPa) sich eine Reduzierung des Spitzendruckes einstellt.

Eine vollständige Auswertung aller durchgeführten Untersuchungen ist in Kapitel 5 zu finden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der Einflussbereich des FD-Pfahls bei circa dem dreifachen des Pfahldurchmessers liegt, siehe auch Busch et al. (2010). Neben den zahlreichen Baugrunduntersuchungen und den pfahlherstellungsbegleitenden Untersuchungen sind in Kapitel 5 auch die durchgeführten Probelastungen ausgewertet.

Mit einem maximalen Drehmoment von 200 kNm und einer maximalen Vertikalkraft von 108 kN wurden mit dem FDP-System Einbindetiefen zwischen 1,5 und 7 m in mitteldicht gelagertem Sand ($q_c = 10 - 15$ kN/m²) bei einer Gesamtpfahllänge von 8,4 bis 14 m erreicht. Die daraus resultierenden Grenztragfähigkeiten liegen zwischen 2 und 4 MN. Die Streuung zwischen den Grenztragfähigkeiten wird zum einen durch den Durchmesser und die Pfahllänge hervorgerufen, wie es anhand der drei Widerstandsetzungslinien der FD-Pfähle in Bild 3 zu sehen ist. Zum anderen aber auch durch die unterschiedlichen Bodenverhältnisse auf dem Testfeld.

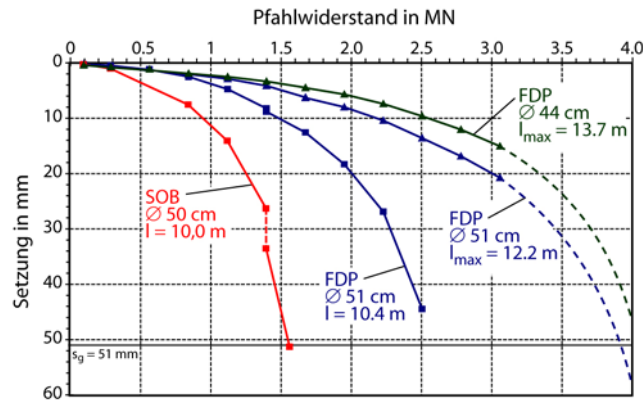


Bild 3: Vergleich der Grenztragfähigkeiten von FD- und SOB-Pfählen

Aus den beiden linken Widerstandsetzungslinien ist zu erkennen, dass der Unterschied in der Grenztragfähigkeit zwischen einem FD-Pfahl und einem Bohrpfahl bei gleichem Durchmesser und gleicher Pfahllänge ca. 1 MN beträgt. Die Tragfähigkeit eines Teilverdrängerbohrpfahls liegt etwa zwischen dem FD- und dem SOB-Pfahl und weist eine Grenztragfähigkeit von 2,1 MN auf. Weitere Analysen und Vergleiche bezüglich des Eindring- und Tragverhaltens von FD-Pfählen befinden sich in Kapitel 5. So konnte z.B. festgestellt werden, dass durch die Verwendung einer Vorlaufschnecke unterhalb des Verdrängerkörpers tiefer in die Sandschicht abgebohrt werden konnte und daher im Regelfall die Tragfähigkeiten der Pfähle höher liegen, die mit einer Vorlaufschnecke hergestellt wurden. Das bedeutet, dass die Pfahltragfähigkeit stärker durch die zusätzlich mobilisierte Mantelreibung infolge der größeren Einbindelänge ansteigt als dass diese durch die negativen Auswirkungen durch den entspannten Boden im Bereich der Vorlaufschnecke vermindert wird.

Weiterhin werden in Kapitel 6 erste Ansätze zur Entwicklung eines Berechnungsverfahrens auf empirischer und theoretischer Basis zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Vollverdrängerpfählen anhand der Herstellparameter gegeben. Dafür werden erste Grundsatzüberlegungen sowie erste mechanische Ansätze und Modellvorstellungen zum FDP-System vorgestellt und die Telemetriedaten des Herstellprozesses einer kritischen Analyse in Hinblick auf den Eindringwiderstand des Bohrwerkzeugs unterzogen.

Um den Eindringwiderstand eines gebohrten Pfahls gegenüber dem Boden erfassen zu können, hat die Firma BAUER Maschinen einen α -Wert definiert, welcher aus den Herstellparametern berechnet werden kann:

$$\alpha = \frac{M}{E} \quad (1)$$

Der α -Wert gibt das Verhältnis von Drehmoment M zur Eindringrate E an. Die Eindringrate selber ist definiert als der Quotient von Vorschubgeschwindigkeit v zu Umdrehungsrate n und gibt an, wie viel Zentimeter pro Umdrehung das Bohrwerkzeug in den Boden eindringt. Je höher der α -Wert ist, desto schwieriger ist es in den anstehenden Boden abzubohren und desto größer ist folglich auch die Tragfähigkeit des Bodens. Bei einem Vergleich zwischen dem α -Wert und dem Spitzendruckwiderstand zeigt sich ein qualitativ gleicher Verlauf über die Tiefe, so dass der α -Wert somit auch als ein Maß für den Eindringwiderstand herangezogen werden kann.

Um aus den Herstellparametern einen Zusammenhang zur Grenztragfähigkeit abzuleiten, wurden Variationsanalysen durchgeführt. Diese haben ergeben, dass für den Hamburger Bodenaufbau die Grenztragfähigkeit für FD-Pfähle mit Hilfe eines linearen Zusammenhangs mit einer Genauigkeit von $\pm 15\%$ berechnet werden kann. Die empirisch ermittelte Gleichung wurde anhand von Messdaten des Testfeldes ermittelt und kann insofern auch nur für eine erste Abschätzung für Pfähle mit identischem Herstellverfahren und ähnlichem Bodenaufbau genutzt werden. Derzeit laufen auf verschiedenen internationalen Baustellen Tests zur Überprüfung und Erweiterung der Formel für andere Bodenverhältnisse und Pfahldurchmesser.

Da die Berechnung des α -Wertes nach Gleichung 1 nicht physikalisch begründet ist, einen zu großen Schwankungsbereich aufweist und zudem mehrere Extremwerte besitzt sowie unterschiedliche Abbruchverhalten aufweist, ist die Herleitung einer neuen Definition des Eindringwiderstandes notwendig geworden. Grundlage zur Herleitung solch einer neuen Definition ist die Leistung des Bohrgerätes, die am Kraftdrehkopf über das Gestänge und das Bohrwerkzeug in den Boden eingeleitet wird, zu erfassen. Die Verdrehung und Stauchung des Gestänges unter maximaler Lasteinwirkung sind so minimal, dass diese vernachlässigt werden können. Die Leistung, die zum Abbohren benötigt und am Kraftdrehkopf aufgebracht wird, kann somit auch am Bohrwerkzeug angesetzt werden und ist definiert als der Quotient aus Arbeit W und Zeit t . Die Arbeit setzt sich zusammen aus der Addition von Vertikalkraft F multipliziert mit der Eindringtiefe s und dem Drehmoment M multipliziert mit dem Drehwinkel ψ . Um einen Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung und dem Bodenwiderstand zu erzielen, wird die Gesamtleistung durch die Summe aus Vorschubgeschwindigkeit v und Winkelgeschwindigkeit ω dividiert:

$$\alpha_{new} = \frac{(F \cdot s + M \cdot \psi) / t}{v + \omega} = \frac{F \cdot s + M \cdot \psi}{s + \psi} \quad (2)$$

Der neu definierte Eindringwiderstand α_{new} beschreibt somit das Verhältnis von aufgebrachtener Gesamtarbeit und der dadurch erreichten Verschiebung des Bohrwerkzeugs aus der Summe von Setzung und Drehwinkel.

Der neue Eindringwiderstand weist im Vergleich zur vorherigen Version einen geringeren Schwankungsbereich und ein markantes Abbruchkriterium am Ende des Abbohrvorgangs auf. Zusätzlich ist die Definition physikalisch nachvollziehbar und es sind alle am Abbohrvorgang beteiligten Größen integriert und somit alle wichtigen Herstellparameter berücksichtigt.

Resümierend kann gesagt werden, dass im Rahmen der Diplomarbeit der Verdrängungseffekt eines Vollverdrängungsbohrpfahls anhand der Spitzendruckverläufe und der horizontalen Verschiebungen aufgezeigt wird und somit die Unterschiede im Tragverhalten zu Bohrpfählen verdeutlicht werden. Da die Tragfähigkeiten von Bohrpfählen nicht auf Schraubpfähle übertragen werden können, ist es für die Baupraxis wünschenswert aus den beim Eindringvorgang ermittelten Messdaten direkt auf die Pfahltragfähigkeit schließen zu können. In der vorliegenden Arbeit wird ein Zusammenhang zwischen den beim Herstellungsvorgang ermittelten Messdaten und der Pfahltragfähigkeit hergeleitet. Implementiert man dieses Berechnungsverfahren auf ein Bohrgerät, so hat der Ingenieur auf der Baustelle einen ersten Anhaltspunkt, ob der herzustellende Pfahl die erforderliche Tragfähigkeit bereits vor der gewünschten Endtiefe erreicht hat oder ob dieser gegebenenfalls länger hergestellt werden muss, um auf die erforderliche Tragfähigkeit zu gelangen.

Referenzen

- Busch P. (2008): Untersuchungen zur Herstellung und Tragfähigkeit von Teil- und Vollverdrängerpfählen. Diplomarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Busch P., Grabe J., Gerressen F.W. und Ulrich G. (2010): User of displacement piles for reinforcement of existing piles. Proc. of DFI and EFCF 11th Int. Conf. in the DFI series: Geotechnical Challenges in Urban Regeneration in London/UK, S. 113-119
- Fleming W.G.K. (1995): The understanding of continuous flight auger piling, its monitoring and control. Proceedings, Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, Vol. 113, S. 157-165
- Franke J. und Woldt J. (2009): Die Gründung der Elbphilharmonie Hamburg. Tagungsband zum Pfahlsymposium 2009, Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 88, S. 147-169
- Grabe J. und König F. (2004): Zur aushubbedingten Reduktion des Drucksondierwiderstandes. Bautechnik 81, 7
- Van Impe W.F. und Peiffer H. (1997): Influence of screw pile installation on the stress state in the soil. Design of Axially Loaded Piles – European Practice, (Hrsg.: De Cock, Legrand), Rotterdam
- Vermeer P., Bernecker O. und Weirich, T. (2008): Schraubpfähle: Herstellung, Tragfähigkeit und numerische Modellierung. Bautechnik 3