

Pfahl-Symposium 2011

17. 118. Februar 2011

TU Braunschweig, Heft 94

99/7

Vergleich von Vibrexpfählen und Schraubbohrpfählen anhand von Probelastungen

Dr.- Ing. M.Sc. Jimmy Wehr

Dr.- Ing. Jerzy Świniański

1 Einleitung

Im Rahmen der Erweiterung einer Raffinerie sind zahlreiche Installationen und Objekte in den Jahren 2007 bis 2010 in Planung und in Bau, um die Produktivität des Unternehmens in den nächsten Jahren zu verdoppeln. Dies ist z. Z. die größte petrochemische Investition Europas. Es sind mehrere weltweittätige Spezialfirmen, Lieferanten und Ingenieurbüros aktiv, die alle neuen Installationen entworfen haben und bauen. Gebäude, mehrere Tanks (max. 50 000 m³), Reaktoren, Kamine (bis 80 m) und zahlreiche Stahlkonstruktionen werden gebaut. Teile der neuen Installationen werden sehr nah an und zwischen bestehenden Objekten, oft mit sehr schwierigem Zugang und in engsten räumlichen Verhältnissen errichtet.

In den Ausschreibungsdokumenten hat der Bauherr für alle empfindlichen Objekte und Installationen die zulässige maximale Setzung auf 25 mm begrenzt. Da Installationen in schwierigen Baugrundverhältnissen zu realisieren sind, hatten mehrere GU's, Baufirmen und deren Büros zu entscheiden und vor dem Bauherrn zu verantworten, welche Fundamente flach oder tief zu gründen sind.

2 Geotechnische Verhältnisse und Aufgabe

Die Raffinerie liegt im Mündungsbereich eines Flusses mit komplizierten Bodenverhältnissen, die für viele Städte im Ostseeraum charakteristisch sind. Der typische Bodenaufbau mit einigen Drucksondierungsprofilen ist in Abb. 1 dargestellt.

Bis 4 m unter GOK wurden mitteldichte/lockere Feinsande (S1), stellenweise mit organischen Schluffen/Tonen (C1) geschichtet, angetroffen. Darunter liegt dichter

Feinsand (S2) und noch tiefer organischer Ton (C2, $c_u \approx 20-30$ kPa). Weitere mitteldichte/dichte Feinsande S3 und S4 sind noch durch organischen Ton (C3, $c_u \approx 30-40$ kPa) unterteilt. Der untere Feinsand (S4) geht in dichten Mittelsand (S5) über. Den Drucksondierungsprofilen ist zu entnehmen, dass Grenzen der Bodenschichten z. T stark variieren. Grundwasser wurde ca. 1,0- 2,5 m unter GOK erbohrt. In diesem Teil des Geländes wird das Wasser abgesenkt.

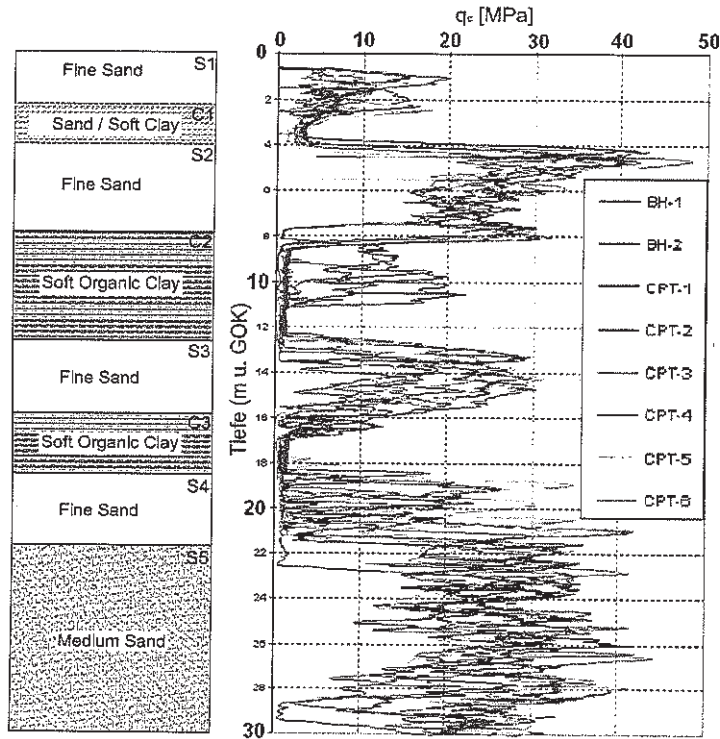


Abbildung 1: Baugrundaufbau im Bereich der Raffinerie

In bestehendem Baugrund war eine Flachgründung mit Bodenverbesserung für sehr leichte Konstruktionen mit kleinen Fundamenten selbst ohne die organische Schicht C1 nur bedingt (z. B. für nicht sehr empfindliche Tanks) möglich. In anderen Fällen musste eine Tiefgründung auf Pfählen oder starren pfahlähnlichen Elementen bis in eine maximale Tiefe von 21-26 m angewandt werden.

Die Firma Keller hat den geotechnischen Wettbewerb gewonnen und von dem zweiten Auftrag an alle weiteren über 20 Aufträge erhalten (beim Ersten hatte ein Mitbewerber Schraubbohrpfähle von über 20 m Länge nicht problemlos geschafft). Der Ausführungsentwurf ist vorbereitet und die Arbeiten termingerecht und einwandfrei ausgeführt worden.

Die ausgeführten und beauftragten Arbeiten umfassen:

- 3180 Pfähle (64.000 m), davon: a) 1440 Vibrex-/Gürtelrüttlerpfähle (406 mm, $L = 21 - 23$ m), b) 1180 CFA - Schraubbohrpfähle (430 mm, 630 mm und 800 mm, $L = 12 - 26$ m) und c) 560 MESI Mikropfähle gebohrt mit 101-127 mm Stahlrohren ($L = 15 - 16$ m).
- 3340 Rüttelstopfsäulen (26.800 m) für die Gründung der 3 Tanks und 4 leichten Gebäude, sowohl 140 DSM- Säulen für den Baugrubenverbau.

Die oben genannten Pfahlarten sowie die Rüttelstopfverdichtung sind, bis auf die Vibrex-/Gürtelrüttlerpfähle, seit mehreren Jahren bekannt und auch von Keller oft ausgeführt worden. Deswegen werden im nachfolgenden Teil nur die Vibrex-/Gürtelrüttlerpfähle detailliert beschrieben.

3 Vibrex-/Gürtelrüttlerpfähle

Vibrex-/Gürtelrüttlerpfähle sind Ortbeton-Vollverdrängungspfähle, die mithilfe moderner Gerätetechnik seit ca. zwei Jahren auf dem deutschsprachigen Markt angeboten werden. Ein erstes derartiges Pfahlgroßprojekt in Domdidier in der Schweiz wurde vor kurzem fachtechnisch beschrieben (Schmid 2008). Im Vergleich zu Domdidier waren die Pfahlfundamente hier anderen Lastkombinationen (z. B. Druck/Zug mit z. T. hohen Horizontalkräften) ausgesetzt und es wurden auch andere Bodenverhältnisse angetroffen.

3.1 Ablauf der Pfahlherstellung

An das Liebherr Gerät LRB 255 wurde das 30 m lange Rammrohr (406 mm) und ein Gürtelrüttler 32 VMR gehängt (s. Abb 5). Diese ca. 100 Tonnen schwere Gerätschaft mit verstellbarem Moment und frequenzgesteuertem Rüttler konnte eine ca. 400 kN große Druck- oder Zugkraft beim Vortreiben oder Herausziehen des Rohres ausüben um einen optimalen Pfahlherstellvorgang zu erreichen.

Am Einsatzpunkt wird das Rammrohr zuerst mit einem verlorenem Stahlfußdeckel (s. Abb. 3) von unten verschlossen und dann auf eine Solltiefe einvibriert (s. Abb. 2, links). Um dichte Sande (S2-S4) zu durchdringen, die Penetrationszeit zu verkürzen und Erschütterungen in der Umgebung zu minimieren wurde eine Niederdruckwasserspülung beim Vortreiben angewendet. Die Wasserspülung wurde oben eingeschaltet und ca. 2 m über der Solltiefe abgestellt. Zwei Kreiselpumpen haben Leitungswasser aus einem Spülcontainer mit einem Druck von ca. 20 bar in zwei Spülrohre gefördert (s. Abb. 4).

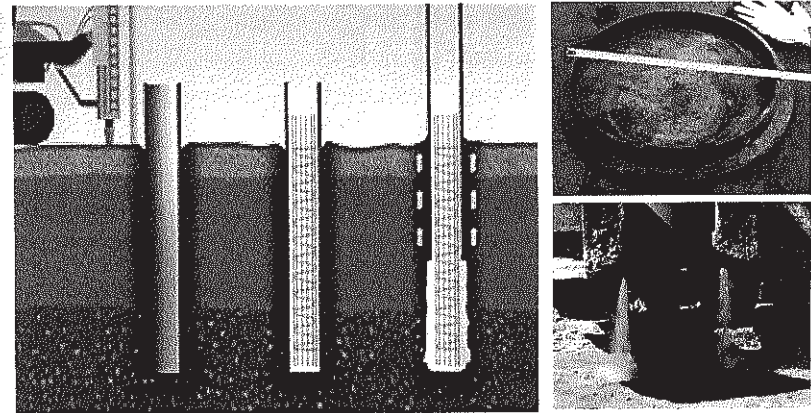


Abbildung 2: Etappen der Pfahlerstellung (links): Einvibrieren des Rohres, Einbau der Bewehrung, Betonieren mit Herausziehen des Rohres

Abbildung 3: Verlorener Stahlfußdeckel (rechts oben)

Abbildung 4: Reinigen der Spülrohre (rechts unten)

Nach dem Erreichen der Solltiefe wurde ein aus zwei Teilen zusammengesetzter Bewehrungskorb in das Rammrohr eingeführt (s. Abb. 2 Mitte, Abb. 7). Die Pfähle wurden über die ganze Länge bewehrt (5 Stäbe mit bis zu 20 mm und Spirale). In Abb. 6 sind noch zwei Stahlrohre für eine Ultraschall-Pfahlintegritätsprüfung mit der CSL-Methode (Crosshole Sonic Logging) zu sehen.

Nach dem Einführen der Bewehrung wird der Beton C25/30 von einer Betonpumpe über eine Leitung und den Schwenkopf direkt ins Rammrohr gefördert (s. Abb. 2 rechts und Abb. 8). Da hier Vibrexpfähle ohne Geotextilmantelung, die in der Schweiz angewendet wurde, erstellt worden waren, war der Betonverbrauch um 40-50 % größer als der theoretische Querschnitt des Rammrohres.

Vor ersten Pfahlarbeiten wurden Probenpenetrationen und Pilotpfähle mit begleitenden Erschütterungsmessungen ausgeführt. Der Bauherr und der Auftraggeber wollten die Vertraglichkeit der neuen Technologie und die Pfahltragfähigkeiten verifizieren.

In einer Entfernung zu empfindlichen Installationen von 20 m bis 60 m wurden alle 10 m Probepenetrationen mit Erschütterungsmessungen durchgeführt. Selbst in der kleinsten Entfernung von ca. 20 m lagen die maximalen an Fundamenten der Installationen gemessenen Partikelgeschwindigkeiten unter dem Zielwert von 2 mm/s, was immer noch deutlich unter den zulässigen Werten des Bauherrn lag.

Während der Pfahlherstellung wurden folgende Prozessdaten über die Zeit und die Tiefe überwacht und kontinuierlich in Pfahlprotokollen aufgenommen: Eindringtiefe und -geschwindigkeit des Rohrs, Frequenz und Amplitude des Rüttlers, Druck- und Ziehkraft des Geräts, Öldruck im Rüttler und Betonverbrauch.

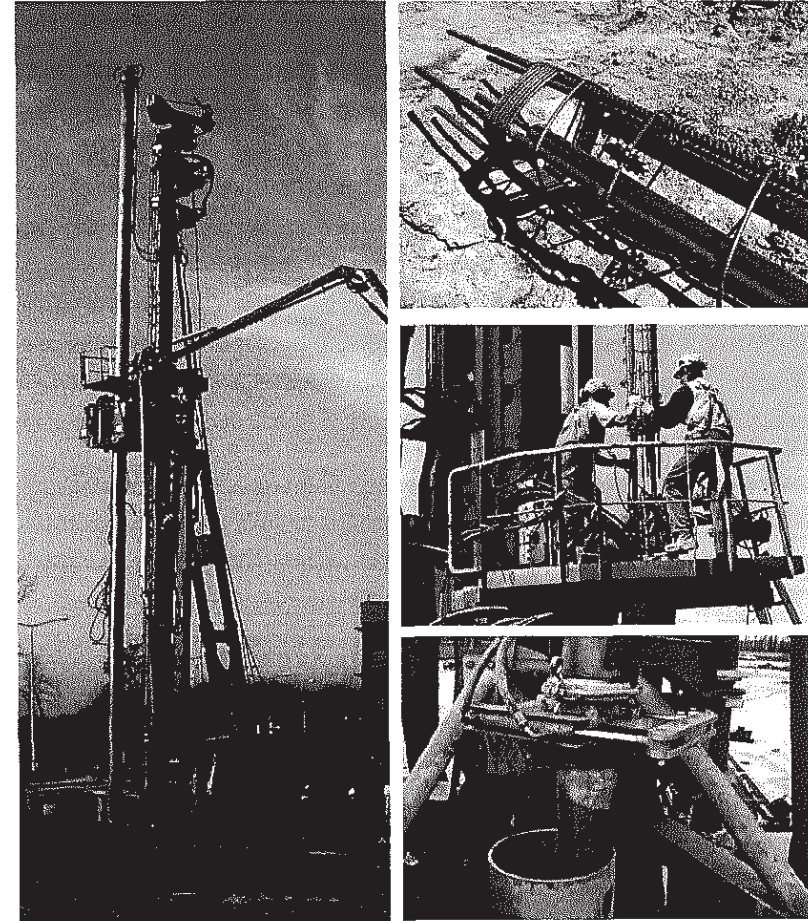


Abbildung 5: LRB 255 mit 30 m langem Rohr und Gürtelrüttler

Abbildung 6: Bewehrungskorb mit Abstandhalter und 2 Rohren für Crosshole Sonic Logging (recht oben)

Abbildung 7: Montage des zweiten Teils des Bewehrungskorbs (rechts Mitte)

Abbildung 8: Betonieren des Pfahles im Rohr über dem Schwenkkopf (r. unten)

4 Qualitätskontrolle und Pfahltests

Außer der Erfassung der Prozessdaten jedes Pfahles wurden überprüft:

- Die Betonqualität jeder Lieferung (z. B. Würfelproben),
- Die Pfahlintegrität für insgesamt ca. 50% der Pfähle,
- 250 % der Gebrauchslast der Pilotpfähle mit Probelastungen
- 150 % der Gebrauchslast der Produktionspfähle mit Probelastungen. Ein Prozent der Produktionspfähle wurden statisch belastet.

Bei langen Vollverdrängungspfählen (bei $L/D > 30 \div 50$) ist manchmal das Fußsignal bei der „Low strain“ Integritätsprüfung schwer auswertbar. Deswegen wird in solchen Fällen eine Ultraschall-Pfahlintegritätsprüfung, deren Beispiel in Abb. 9 dargestellt ist, empfohlen.

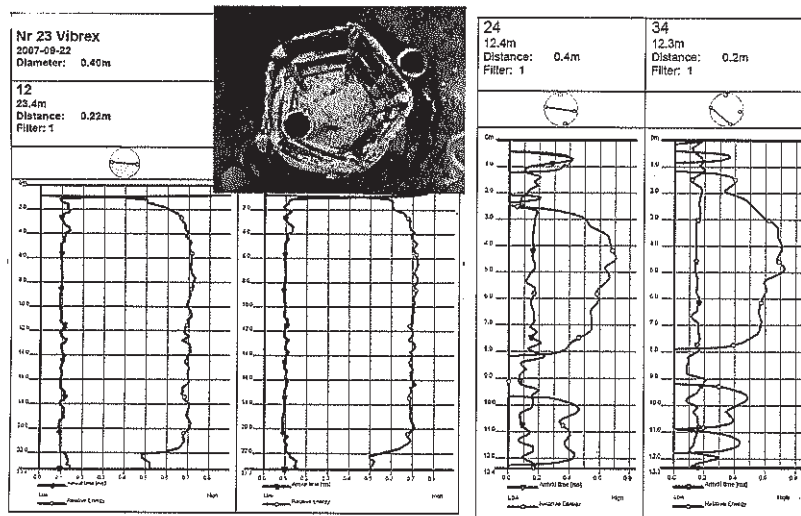


Abbildung 9: Ergebnisse einer Ultraschall-Pfahlintegritätsprüfung: gesunder Vibrexpfahl links, Pfahl mit Defekten rechts

5 Vergleich der Probelastungen und statische Berechnungen

Die Last-Setzungskurven der auf Druck statisch belasteten Vibrex- und CFA-Pilotpfähle lassen folgende Schlüsse zu (s. Abb. 10):

- Vibrexpfähle mit einer Länge von 21 m, 23 m, und 25 m zeigten ähnliches, fast lineares Verhalten bis zu einer maximalen Prüflast von 3000 kN. Die gemessene Maximalsetzung betrug 6-8 mm, d. h. ca. 1,5-2,0 % des Pfahldurchmessers. Bleibende Setzungen von Vibrexpfählen lagen bei 1,4-2,2 mm. Die maximale Spannung im theoretischen Pfahlquerschnitt betrug ca. 23 MPa bei einer zulässigen Druckfestigkeit im bewehrten Beton C25/30 von 16,7 MPa.
- CFA-Pfähle mit einer Länge von 21 m und 25 m zeigten ebenfalls ähnliches Verhalten bis zur maximalen Prüflast von 3500 kN. Gemessene Maximalsetzungen betrugen 12-14 mm, d. h. ca. 2,0-2,2 % des Pfahldurchmessers. Bleibende Setzungen von CFA-Pfählen lagen bei 7,2-8,5 mm. Die maximale Spannung im theoretischen Pfahlquerschnitt betrug ca. 11,2 MPa bei einer zulässigen Druckfestigkeit im unbewehrten Beton C25/30 von 13,9 MPa (CFA-Pfähle waren nur bis 12-15 m Tiefe bewehrt).
- Bei hohen Lasten (2500-3000 kN) zeigten Vibrexpfähle ($D = 406$ mm) steiferes Verhalten und kleinere bleibende Setzungen als CFA-Schraubbohrpfähle ($D = 630$ mm). Die Grenzmantelreibung der CFA-Pfähle war bei der maximalen Prüflast von 3500 kN bereits überwunden, was wiederum bei Vibrexpfählen (bei 3000 kN) nicht festgestellt wurde.
- Bei keinem der Probestpfähle wurde bis 3000-3500 kN die Grenzlast erreicht. Die geotechnische Pfahltragfähigkeit eines Einzelpfahles konnte zu 80 % der maximalen Prüflast, d. h. ca. 2400 kN für Vibrex- und ca. 2800 kN für CFA-Pfähle abgeschätzt werden.

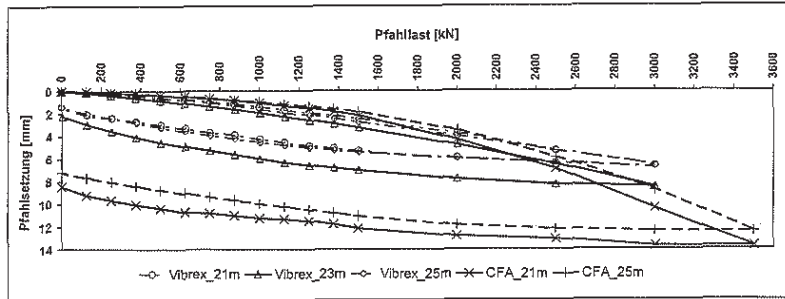


Abbildung 10: Last-Setzungskurven der drei Vibrex 406 mm und zwei CFA 630 mm Testpfähle

Die Last-Hebungskurven der auf Zug statisch belasteten Vibrexpfähle lassen folgende Schlüsse zu (s. Abb. 11):

- Das Last-Hebungsverhalten der Vibrexpfähle auf Zug war durch die Festigkeit der Bewehrung geprägt. Nach Überschreiten der zulässigen Spannungen im Bewehrungskorb, z. B. 422 kN bei 5 Stäben Ø16 mm nahmen die Hebungen deutlich zu. Bleibende Hebungen nach Entlastung lagen bei 1,5-2,2 mm.
- Bei einem Zugprobepfahl mit einer Bewehrung von 7 Stäben Ø25 war bis 1400 kN keine Grenzlast festzustellen. Die bleibende Hebung lag nach der Entlastung nur bei 2,4 mm.

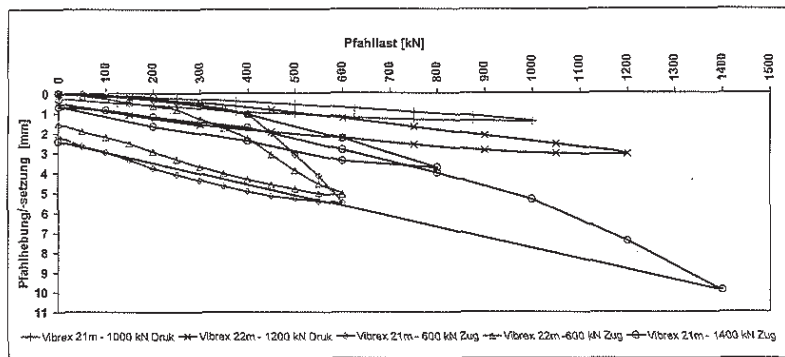


Abbildung 11: Last-Hebungs- und Setzungskurven der Vibrexpfähle aus statischen Probebelastungen

Tabelle 1: Zulässige Pfahllasten berechnet nach LCPC Methode und geschätzte Pfahllasten aus Probebelastungen

Pfahllänge	Zulässige Pfahllasten aus stat. Berechnungen und Probebelastungen [kN] ¹		
	LCPC B&G ²	LCPC B&G ³	Probebelastung ⁴
1	2	3	4
Vibrex-/Gürtelrüttlerpfähle 406 mm			
21 m	1290	1690	2400
23 m	1330	1750	2400
25 m	1380	1940	2400
Schraubbohrpfähle - CFA 630 mm			
21 m	1380	1950	2800
23 m	1610	2270	--
25 m	1840	2400	2800

Legende:

1. Pfahllasten mit Teilsicherheitsbeiwerten ohne Gruppeneffekte und eventuelle negative Mantelreibung
2. Tragfähiger Boden: nur Sande S4 und S5, unter dem organischen Ton C3
3. Tragfähiger Boden: Sande S3, S4 und S5, d. h. auch Sand über dem Ton C3
4. Tragfähigkeit eines Einzelpfahles: interpretiert als 80 % der maximalen Prüflast

In geschichtetem Bodenaufbau (s. Abb. 1) wurde angenommen nur die Sandschichten S4 und S5 als tragfähig zu betrachten. Mit der LCPC Methode von Bustamante & Gianeselli (1982), der Ergebnisse von Drucksondierungen zugrunde liegen, erhielt man die zulässigen Pfahllasten der Tabelle 1, Spalte 2. Die Berücksichtigung der tragfähigen Sandschicht S3 zusätzlich führt zu höheren, realistischen zulässigen Pfahllasten, die den Ergebnissen der Probebelastungen näher kommen (s. Tabelle 1, Spalte 3).

Aufgrund der zulässigen Druckfestigkeit des Betons C25/30 mit einem zusätzlichen Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 und 2,0 wurden in dem Ausführungsentwurf die zulässigen Pfahllasten auf maximal 1460 kN für Vibrexpfähle und auf maximal 2170 kN für CFA Schraubbohrpfähle 630 mm begrenzt.

7 Zusammenfassung

Für die Erweiterung einer Raffinerie wurden Vibrex-/Gürtelrüttlerpfähle angewendet. Da die Raffinerie im Mündungsbereich eines Flusses liegt, wurden auf dem ganzen Gelände komplizierte Bodenverhältnisse angetroffen. Sandiger Untergrund ist mit mehreren Schichten organischer Sedimente bis in eine Tiefe von maximal 22 m angesprochen worden. Alle empfindlichen und schweren Gebäude und Installationen sollten tief auf Pfählen gegründet werden, da die zulässigen Setzungen vom Bauherrn auf maximal 25 mm begrenzt wurden.

Vor den eigentlichen Pfahlarbeiten wurden Pfahlprobelastungen an 25 m langen Vibrexpfählen mit 406 mm Durchmesser ausgeführt, welche eine fast lineare Steifigkeit zeigten. Bis 3.000 kN konnten nur vernachlässigbare Setzungen und keine Grenzlast nachgewiesen werden. Die Pfahltragfähigkeiten haben die zulässigen Lasten deutlich überschritten.

Insgesamt wurden über über 3000 Vibrex-, Schraubbohrpfähle und MESI Mikropfahle mit einer Länge bis 27 m hergestellt. Die mit Gürtelrüttler hergestellten Vibrexpfähle konnten im Gegensatz zu Schraubbohrpfählen über die ganze Pfahlänge bewehrt werden, was für hohe Anlagenteile mit großen Zugkräften, z. B. Kamine, von großer Bedeutung war.

Insgesamt wurden über 30 Probelastungen (Druck und Zug) und mehrere Integritätstests durchgeführt. Probelastungen von Vibrexpfählen im Vergleich zu Schraubbohrpfählen zeigten bei hohen Lasten steiferes Verhalten und kleinere bleibende Setzungen. Statische Berechnungen schätzten die Ergebnisse der Probelastungen in konservativer Weise ab.

Literatur

M. Bustamante / L. Gianceselli, (1982); Pile bearing capacity predictions by means of CPT, *In European Symposium on Penetration Testing, ESOPT, 2(2)*

Liebherr / BVV, (2008); Spezialtiefbau – Kompendium Verfahrenstechnik und Geräteauswahl, *Ernst & Sohn, 1. Auflage, Berlin*

D. Schmidt, (2008); Ortbeton- Verdrängungs-Pfahl, Einführung eines neuen Gründungselement am Beispiel Sonderfundierung ALDI, CH-Domdidier, 7268 Pfähle à 35 m Länge. *6. Kolloqium, Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, S. 571-578, 2008.*

Autoren

Dr. Ing. M.Sc. Jimmy Wehr

J.Wehr@kellerholding.com

Dr.-Ing. Jerzy Świniański

jswinianski@keller.com.pl

Keller Holding GmbH

www.KellerHolding.com

Kaiserleistraße 44, 63067 Offenbach

Tel.: 069 8051-257