Vorträge der Baugrundtagung 1998 in Stuttgart

21. - 24. September 1998



Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.

Tragfähigkeitsermittlung von Pfahlgründung durch Drucksondierergebnisse

Dipl. Ing. D. Behnke, Grundbaulabor Bremen, Bremen Dr.-Ing. G. von Bloh, Grundbaulabor Bremen, Bremen

Zusammenfassung

Durch die ermittelten empirischen Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen elektrischer Drucksondierungen (Spitzendruck und Mantelreibung) und dem Pfahlfuß- und Pfahlmantelwiderstand kann die äußere Tragfähigkeit von Pfählen ermittelt werden. Es werden beispielhaft die Ergebnisse der Auswertung von über 430 statischen Probebelastungen erläutert. Die Zuverlässigkeit dieses Verfahrens wird exemplarisch durch den Vergleich der gemessenen Widerstands-Setzungs-Linie mit dem rechnerischen Verlauf nachgewiesen.

Summary

Through the empirical found out coherence between the results of cone penetration tests and the shaft and base resistance the external bearing capacity of piles can be calculated. The results of over 430 static pile load tests will be illustrated by examples. The reliability of this method will be proofed exemplary by the comparison of the measured load settlement line with the calculated load settlement line.

1. Aufgabenstellung

Die Mehrzahl der auf dem Markt befindlichen Pfahlsysteme und zwar sowohl Rammpfähle als auch Bohrpfähle sind nach den geltenden Normen Spezialpfähle, so daß deren Tragfähigkeit im Einzelfalle nachzuweisen ist. Der hoffnungsvolle Weg der DIN 4014 "Bohrpfähle" die Tragfähigkeit aus der Baugrundfestigkeit zu ermitteln, hat leider keine Fortsetzung in den nachfolgenden Vornormen gefunden. Die Ansätze sind in den Forschungsberichten T2244 "Verbesserung der Angabe über die vertikale Pfahltragfähigkeit in der geplanten DIN 1054, Teil 5, Pfahlgründungen, Teil 2" und T2472 "Verbesserung der Genauigkeit der Tragfähigkeitsangaben für Ramm- bzw. Verdrängungspfähle im Zuge der Neubearbeitung der DIN 4026 unter Berücksichtigung von EC 7" vorhanden. Beide Arbeiten sind am Institut für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, Technische Hochschule Darmstadt, von Prof. FRANKE durchgeführt worden. Diese Arbeiten sind die Grundlage für das nachfolgend beschriebene Bemessungsverfahren, die Widerstands-Setzungs-Linie aus Drucksondierergebnissen zu ermitteln.

2. Lösungsweg

Die Grundüberlegung basiert auf der Tatsache, daß eine Drucksondierung als "Mini-Stahlpfahl" angesehen werden kann, bei dem fortlaufend die Bruchspannungen getrennt nach Mantelreibung und Spitzendruck gemessen werden.

Als weiterer Ausgangswert liegen die Ergebnisse von Pfahlprobebelastungen vor, bei denen eine Widerstands-Setzungs-Linie gemessen wird und zwar im Normalfall eine Gesamtverformung, die sich aus dem Widerstand von Spitzendruck und Mantelreibung zusammensetzt. Ein Beispiel einer solchen Widerstands-Setzungs-Linie ohne die Entlastungsschleifen ist auf dem Bild 1 dargestellt.



Bild 1: Widerstands-Setzungs-Linie einer statischen Probebelastung

Es galt nun ein Verfahren zu finden, um die summarisch erfaßten Werte in Mantelreibung und den Spitzendruck zu trennen. Der Weg dazu führt über eine Analyse der Widerstands-Setzungs-Linie. Es ist seit längerem bekannt (VAN DER VEEN, 1953), daß die Widerstands-Setzungs-Linie am zutreffendsten mit einer Hyperbel der folgenden Form

$$Q(s) = \frac{s}{a+b\cdot s}$$
(1)

beschrieben werden kann.



Bild 2: Widerstands-Setzungs-Linie im transformierten Koordinatensystem

$$\frac{s}{Q(s)} = a + b + s \tag{2}$$

wird aus der Ursprungsgleichung eine Gerade im transformierten s/Q – s – Koordinatensystem. Das Bild 2 zeigt die Meßwerte aus Bild 1 im transformierten Koordinatensystem. Der Koordinatenabschnitt a = tan α gibt die Anfangsneigung der Widerstands-Setzungs-Linie im linearen Koordinatensystem wieder. Die Neigung b = tan β der Ausgleichsgeraden bestimmt die Asymptote der Widerstands-Setzungs-Linie im linearen Q – s – System. Die Bruchlast Q_f berechnet sich als Kehrwert der Geradenneigung

$$Q_{f} = \frac{1}{b} \tag{3}$$

Der Ausdruck $Q_f = 1/b$ ist primär als mathematischer Parameter in der Gleichung der Widerstands-Setzungs-Linie und erst sekundär als physikalische Kraft zu sehen.

Wenn nach dieser Methode die vorliegenden Widerstands-Setzungs-Linien im transformierten s/Q – s – Koordinatensystem dargestellt werden, zeigt sich in den meisten Fällen bei den ersten Meßwerten (obere Punktgruppe) zu Beginn eine flachere Ausgleichsgerade, die mit zunehmender Belastung in eine steilere Ausgleichsgerade übergeht (vgl. Bild 2, untere Punktgruppe). Dabei wird davon ausgegangen, daß im oberen Bereich die Meßwerte durch die Mantelreibung bestimmt werden, während mit zunehmender Setzung der Spitzendruck bestimmend wird. Bei dieser Methode werden 2 Hyperbelgleichungen ermittelt, die einen Bruchwert für den oberen Bereich der Widerstands-Setzungs-Linie (Index o) und einen Bruchwert für den unteren Bereich (Index u) liefern. Der Bruchwert aus der ersten Hyperbel wird als Mantelreibungsanteil (Q_{rf}) zugrundegelegt. Die Differenz zum Gesamtwiderstands-Setzungs-Linien sind im Bild 3 getrennt für den Gesamtwiderstand und den Mantelreibungsund Spitzendruckanteil dargestellt.



Bild 3: Auswertung einer Widerstands-Setzungs-Linie nach dem Hyperbelverfahren

Nach dieser Methode sind alle 430 Widerstands-Setzungs-Linien ausgewertet worden und eine entsprechende Unterteilung der Gesamtlast in Mantelreibung und Spitzendruck vorgenommen worden. Es ist zu beachten, daß hierbei die vorliegenden Widerstands-Setzungs-Linien im Hyperbelverfahren über den Meßbereich hinaus extrapoliert wurden, so daß es sich bei den ermittelten Werten um theoretische Bruchlasten Q_f, unterteilt in Mantelreibungsanteil Q_{rf} und Spitzendruckanteil Q_{sf}, handelt. Die Auswertungen haben gezeigt, daß die hieraus ermittelten Bruchspannungen für Mantelreibung und Spitzendruck besser im Zusammenhang stehen mit den Bruchwerten der Drucksondierungen als die Grenzwerte, die in den bisherigen Normen unterschiedlich gewählt wurden.

In der DIN 1054 (11.1976) wird die Grenzlast bei Rammpfählen bei einer bleibenden Setzung von 2,5% des Pfahldurchmessers und bei Bohrpfählen bei einer Setzung von rund 2 cm definiert. In der DIN 4014 (03.1990) ist die Grenzlast bei einer Setzung von 10% des Pfahlfußdurchmessers festgelegt.

Es wird daher empfohlen, auch bei Pfählen den Bruchwert zu verwenden, wie es bei Flachgründungen mit der Ermittlung der Grundbruchlast geschieht. Diese Vorgehensweise steht auch im Einklang mit der DIN V 1054-100 "Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau", (04.1996).

3. Auswertung

Nach der vorstehend beschriebenen Methode sind insgesamt 434 statische Probebelastungen für folgende Pfahlsysteme ausgewertet worden:

Ortbetonrammpfähle		
(Pfahl DIN V4026* -OR-)	166	Stück
Fertigbetonrammpfähle		
(Pfahl DIN 4026-TR-)	14	Stück
Stahlrammpfähle		
(Pfahl DIN 4026-TR)	14	Stück
Vollverdrängungsbohrpfähle		
(Pfahl DIN 4026-OGC-)	137	Stück
Teilverdrängungsbohrpfähle		
(Pfahl DIN 4014-BE- (D _i : D _a >0,55))	58	Stück
Großbohrpfähle		
(Pfahl DIN 4014-BV)	8	Stück
Teilverdrängungsbohrpfähle, mantelverpreßt		
(Pfahl DIN 4014-BEM- ($D_i : D_a > 0,55$)	15	Stück
Betonrüttelsäulen	2	Stück
Zugpfähle	20	Stück

Die Ergebnisse der Probebelastungen wurden dankenswerterweise von Spezialtiefbaufirmen aus Norddeutschland zur Verfügung gestellt. Bei den Unterlagen der Probebelastungen, die teilweise bis zu 40 Jahre zurückliegen, mußte berücksichtigt werden, daß zum überwiegenden Teil nur die Aufzeichnung des Spitzendruckes aus den Drucksondierungen vorliegt. Ferner war die Lage der Drucksondierungen zu dem Probebelastungspfahl nicht immer eindeutig, so daß für die Auswertung folgende Kategorien unterschieden werden:

Kategorie A – Drucksondierung liegt in der Pfahlachse des Probepfahles Kategorie B – Drucksondierung liegt bis 25 m von dem Probepfahl entfernt Kategorie C – Drucksondierung liegt auf der Baufläche

Diese Unterteilung wurde vorgenommen, da bekanntlich auch nahe beieinander liegende Drucksondierungen teilweise große Streubereiche in den Drucksondierungsergebnissen aufweisen, die durch die geologische Entstehung der nichtbindigen Bodenarten zu erklären sind.

Es ist daher auch nicht verwunderlich, daß bei der Auftragung von Sondierspitzendruck q_c in Abhängigkeit zur Pfahlmantelreibung τ_m bzw. Pfahlspitzendruck σ_s teilweise eine sehr große Streuung gefunden wurde. Bei der Betrachtung der Extremwerte wurde festgestellt, daß die Aufteilung der Meßwerte beim Hyperbelverfahren nach Spitzendruck und Mantelreibung nicht immer plausibel ist. Hierfür ist neben der vorstehend beschriebenen Streuung der Drucksondierungsergebnisse auch die Genauigkeit der Widerstands-Setzungs-Linie im Anfangsbereich zu nennen, die sehr empfindlich bei der Auswertung nach dem Hyperbelverfahren ist.

Ferner sind bei eingelagerten gemischtkörnigen oder bindigen Böden ein starker Abfall des Spitzendruckes zu verzeichnen, der zu großen Streuungen führt.

Für die weitere Auswertung für das nachstehend beschriebene Bemessungsverfahren der äußeren Pfahltragfähigkeit wurden daher nur Pfähle mit der Einbindung in nichtbindige Böden herangezogen. Ferner mußten bei der Bestimmung des Zusammenhanges von Drucksondierergebnissen und den Pfahlmantel- und Pfahlspitzendruckkräften die o.g. Kategorien berücksichtigt werden und es wurden Probebelastungen ausgeschlossen, bei denen die Drucksondierung nicht bis mindestens dreifachem Pfahlfußdurchmesser unter die Gründungssohle reichte.

4. Bemessungsverfahren

Die gewonnenen Abhängigkeiten zwischen Sondierspitzendruck und den Bruchwerten der Pfahlmantelreibung $(Q_r (s))$ sowie des Pfahlspitzendruckes $(Q_s (s))$ wurden für ein Bemessungsverfahren zugrunde gelegt. Die Bruchlast des Pfahles wurde wie folgt ermittelt:

$$Q(s) = Q_s(s) + Q_r(s) = A_F \cdot \sigma_s(s) + \sum_{1}^{r} [A_{mi} \cdot \tau_{mi}(s)]$$

Hierin bedeuten:

Q _s (s)	Pfahlfußwiderstand in Abhängigkeit von der Pfahlkopfsetzung s
Q _r (s)	Pfahlmantelwiderstand in Abhängigkeit von der Pfahlkopfsetzung s
A _F	Pfahlfußfläche
$\sigma_{s}(s)$	Pfahlfußwiderstandsspannung in Abhängigkeit von der Pfahlkopfsetzung s
A _{mi}	Pfahlmantelfläche im Bereich der Bodenschicht i
τ _{mi} (s)	Pfahlmantelreibungsspannung in Abhängigkeit von der Pfahlkopfsetzung s
100000	Nummer der Bodenschicht

Die getrennt ermittelten Bruchlasten für Mantelreibung Q_{rf} und Spitzendruck Q_{sf} ergeben die Gesamtbruchlast Q_{f} . Bei der Ermittlung der Widerstands-Setzungs-Linie wurde vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend nur die untere Hyperbel zugrunde gelegt. Auf die von ROLLBERG vorgeschlagene Fortsetzung der Hyperbel mit einer tangentialen Endgerade wurde bewußt verzichtet. Die Hyperbelkonstante b ergibt sich als Kehrwert der aus den Drucksondierergebnissen berechneten Gesamtbruchlast unter Berücksichtigung der Pfahldaten. Für den Verlauf der Widerstands-Setzungs-Linie ist die in Ansatz gebrachte Anfangsneigung a = tan α maßgeblich. Die im Berechnungsverfahren angesetzten Anfangsneigungen sind nachfolgend für die angegebenen Pfahlsysteme aufgeführt.

	Minimalwert	Mittelwert	Maximalwert	Dimension
Ortbetonrammpfähle	a = 1,0 · 10 ⁻³	2,2 · 10 ⁻³	4,0 · 10 ⁻³	[mm/kN]
Vollverdrängungsbohrpfähle	$a = 1,2 \cdot 10^{-3}$	2,4 · 10 ⁻³	5,0 · 10 ⁻³	[mm/kN]
Teilverdrängungsbohrpfähle	a = 1,7 · 10-3	4,3 · 10 ⁻³	10,0 · 10 ⁻³	[mm/kN]

Das Bild 4 zeigt beispielhaft die aus der Auswertung der gemessenen Widerstands-Setzungs-Linie von insgesamt 166 Ortbetonrammpfählen gewonnenen a-Werte (a_{Messung}) im Verhältnis zu dem in der Berechnung angesetzten Mittelwert. Ferner sind die im Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Widerstands-Setzungs-Linie angesetzten Grenzwerte a_{min} und a_{max} in das Histogramm eingetragen. Die Darstellung zeigt, daß lediglich 8 von 166 Fälle ein vom Berechnungsansatz abweichendes Verhältnis beim Verlauf der Widerstands-Setzungs-Linie zeigen. Für die Vollverdrängungspfähle (VVB-Pfähle) werden 26 Fälle von 137 und für Teilverdrängungsbohrpfähle (TVB-Pfähle) 3 Fälle von 58 durch die gewählten Ansatzwerte a nicht abgedeckt.

Bei dem Bemessungsverfahren werden für verschiedene Pfahlsysteme jeweils eine minimale, mittlere und maximale Widerstands-Setzungs-Linie ermittelt und graphisch dargestellt.

(4)



Bild 4: Verhältniswert der Anfangsneigung aus der Messung zum Mittelwert beim Bemessungsverfahren

Es ist hiermit jedoch nicht möglich, eine getrennte Widerstands-Setzungs-Linie für die Mantelreibung und den Spitzendruck entsprechend DIN 4014 zu ermitteln. Für die praktische Anwendung ist nach den vorliegenden Erfahrungen die Darstellung einer gesamten Widerstands-Setzungs-Linie jedoch vollständig ausreichend.

Für alle auswertbaren Probebelastungen sind die rechnerischen mittleren, minimalen und maximalen Widerstands-Setzungs-Linien ermittelt worden und mit den gemessenen Widerstands-Setzungs-Linien verglichen worden.



Bild 5: Verhältniswert der gemessenen Setzung bei Q_{zul} zur berechneten minimalen Setzung s_{min.}

Der Vergleich für Ortbetonrammpfähle ist in den Bildern 5 bis 7 exemplarisch im Histogramm dargestellt. Aus den Probebelastungsergebnissen wurde die jeweils zulässige Belastung Q_{zul} unter Berücksichtigung einer 2fachen Sicherheit gegenüber der maximal aufgebrachten Prüflast ermittelt. Die zur jeweiligen zulässigen Belastung



Bild 6: Verhältniswert der gemessenen Setzung bei Qzul zur berechneten mittleren Setzung s_{Mittel}

gehörende Setzung wird als s_{Messung} bezeichnet. Zur Bewertung wird S_{Messung} ins Verhältnis zu den rechnerischen Setzungen bei der entsprechenden Last gesetzt. Die Bilder 5 bis 7 zeigen diese Verhältniswerte für die minimale berechnete Setzung s_{min}, die mittlere Setzung s_{Mittel} und die maximale Setzung s_{max}.



Bild 7: Verhältniswert der gemessenen Setzung bei Q_{zul} zur berechneten maximalen Setzung s_{max}

Bei Betrachtung der Darstellung im Bild 7 zeigt sich, daß ein Fall der ausgewerteten Probebelastung von Ortbetonrammpfählen bei der zulässigen Belastung eine größere Setzung (< 20%) aufwies, als die nach dem Bernessungsverfahren ermittelte maximale Setzung s_{max}. In Bezug auf die ermittelten mittleren Setzungen weist die Mehrzahl der gemessenen Setzungen bei der zulässigen Belastung einen kleineren Wert auf (Bild 6).

Für die Vollverdrängungspfähle (VVB) liegen die gemessenen Setzungen bei der zulässigen Belastung in zwei Fällen um bis zu 40% über den rechnerisch ermittelten maximalen Setzungen. Bei den Teilverdrängungsbohr-

pfählen (TVB) wurde bei einer Probebelastung bei der zulässigen Last eine größere Setzung als die maximal berechnete gemessen.



Bild 8: Verhältniswert der gemessenen Setzung bei Q_{max} zu berechneten maximalen Setzung

Das Bild 8 zeigt beispielhaft für Ortbetonrammpfähle die Verhältniswerte der gemessenen Setzungen bei der maximal aufgebrachten Probelast (Q_{max}) zu den berechneten maximalen Setzungen. Es wurden lediglich in vier Fällen Verhältniswerte größer 1,0 ermittelt. Bei den Vollverdrängungsbohrpfählen wurden in 10 Fällen und bei den Teilverdrängungsbohrpfählen in 2 Fällen Setzungen bei Q_{max} gemessen, die größer als die rechnerisch ermittelten maximalen Setzungen sind.

Bei der Berechnung der äußeren Pfahltragfähigkeit wird folgendermaßen vorgegangen:

Aus der mittleren Widerstands-Setzungs-Linie wird für die Setzung $s_g = D_f/10$ die Grenzlast Q_g ermittelt, so daß neben der Bruchlast Q_f auch die Grenzlast Q_g entsprechend der DIN 4014 sowie in der international üblichen Praxis ermittelt wird. Die rechnerisch zulässige Belastung des Pfahles (äußere Pfahltragfähigkeit) wird dann unter Zugrundelegung von globalen Sicherheitswerten wie folgt ermittelt:

$$Q_{zul} = \frac{Q_f}{2}$$
 bzw. $\frac{Q_g}{1,75}$. (5)

Die 1,75-fache Sicherheit gegenüber dem Grenzwert ist aufgrund der Tatsache, daß dem Bemessungsverfahren ein Vielfaches der sonst geforderten 2 Probebelastungen zugrundeliegen, gerechtfertigt. Daneben ist es möglich, für eine aus der Bauwerkskonstruktion festzulegende zulässige Setzung szul die dazugehörige zulässige Belastung aus der Widerstands-Setzungs-Linie direkt zu ermitteln.

Auf dem Bild 9 ist beispielhaft das Ergebnis der Probebelastung im Vergleich zum Ergebnis des Bemessungsverfahrens aufgetragen. Zusätzlich zu den berechneten Widerstands-Setzungs-Linien wurden die Meßwerte aufgetragen und die nach DIN 4014 ermittelten Werte in das Diagramm aufgenommen. Weitere Beispiele für Ortbetonrammpfähle sowie für Voll- und Teilverdrängungsbohrpfähle sind auf den Bildern 10 bis 15 im Anhang enthalten.

Bei der Anwendung des Verfahrens, das zu einer wirtschaftlichen Ausnutzung der Pfahltragfähigkeit führt, ist jedoch zu beachten, daß die Baugrundfestigkeit durch eine ausreichende Anzahl von Drucksondierungen nachgewiesen wird. Dazu wird vor allen Dingen auf die DIN 4020 verwiesen und dringend empfohlen, die Abstände für die Erkundungen nicht größer als 25 m zu wählen und bei erkennbaren Festigkeitsunterschieden entsprechend zu verringern.

5. Zukünftige Entwicklung

Die bisherigen Erfahrungen bei der Anwendung dieses Verfahrens seit 1993 haben gezeigt, daß in vielen Fällen Probebelastungen entbehrlich waren. Selbst die Hamburger Baubehörde, die seit Jahrzehnten eine spezielle Abteilung für die Festlegung von Pfahltragfähigkeiten eingerichtet hat, konnte von dem Bemessungsverfahren überzeugt werden.

Unbefriedigend waren bisher jedoch die Ansätze für gemischtkörnige Böden wie Geschiebelehm, Geschiebemergel, teilweise in Wechsellagerung mit Sanden, oder auch für bindige Böden. Für diese Fälle wurde eine weitere Auswertung der Probebelastungen vorgenommen, wenn Drucksondierungen mit getrennter Messung der Mantelreibung und des Spitzendruckes vorlagen. Unter Verwendung der aus der Drucksondierung gemessenen Mantelreibung wurden die Mantelreibungskräfte der Pfähle ermittelt. Wie das Beispiel auf Bild 16 zeigt, konnten dabei gute Übereinstimmungen zwischen der gemessenen und der berechneten Widerstands-Setzungs-Linie erzielt werden. Dies gilt übrigens auch für Sande zur Ermittlung der Pfahlmantelreibung aus der gemessenen Mantelreibung der Drucksondierung.

Es wird daher vorgeschlagen, für die Bemessung der Pfahlmantelkräfte zukünftig nicht mehr die Spitzendruckwerte q_c der Drucksonde sondern die direkt gemessene Mantelreibung f_s zu verwenden. Damit wird gleichzeitig auch die Einbeziehung von gemischtkörnigen und bindigen Böden bei der Berechnung möglich.

Um eine bessere Grundlage zur Weiterentwicklung des Bemessungsverfahrens zu erhalten, wird empfohlen, vor jeder Probebelastung an dem Standort des Probepfahles eine Drucksondierung mit getrennter Messung von Mantelreibung und Spitzendruck durchzuführen. Damit entfallen die Unsicherheiten aus der Streuung der Meßwerte durch abweichende Baugrundverhältnisse. Diese Vorgehensweise hat außerdem noch den Vorteil, daß eventuelle Abweichungen an dem Standort für den Probepfahl gegenüber den Erwartungen aus den benachbarten Erkundungen bekannt werden, bevor der Pfahl hergestellt wird. Es müssen dann hinterher keine Mutmaßungen angestellt werden, warum der Pfahl in seinem Tragverhalten entweder besser oder schlechter als erwartet war. Diesem Vorschlag ist der Pfahlausschuß bei der Neufassung der Empfehlung für axiale Probebelastung leider nicht gefolgt.

Bei der Auswertung von Probebelastungen, bei denen die Reaktionspfähle im gleichen Verfahren hergestellt wurden, sollten auch die Verformungen der Reaktionspfähle im gleichen Umfang wie der Probepfahl registriert werden. Dadurch wird es möglich, mindestens im Gebrauchslastbereich eine Last-Hebungs-Kurve zu ermitteln, mit der dann auch noch eine Trennung zwischen Mantelreibungs- und Spitzenfußkraft möglich ist.

Am wichtigsten ist es jedoch, eine ausreichende Erkundung des Baugrundes durch Drucksondierungen vorzunehmen, um eine gesicherte Grundlage für die Anwendung der gewonnenen Abhängigkeiten zwischen den Meßwerten der Drucksondierung und den Pfahlkräften für das Berechnungsverfahren zu erhalten. Bei einer entsprechenden Grundlage ist es auch möglich, die aus den einzelnen Berechnungen ermittelten Pfahlgründungssohlen als Isoflächensystem (Bild 17) darzustellen.

Literatur

- [1] FRANKE 1990: "Verbesserung der Angaben über die vertikale Pfahltragfähigkeit in der geplanten DIN 1054, Teil 5, "Pfahlgründungen", Teil 2"; Abschlußbericht zum Forschungsauftrag des Instituts für Bautechnik Az. IV 1-5-411/8, Institut für Grundbau, Boden- und Felsmechanik Technische Hochschule Darmstadt, IRB-Verlag Stuttgart
- [2] FRANKE 1991: "Verbesserung der Genauigkeit der Tragfähigkeitsangaben für Ramm- bzw. Verdrängungspfähle im Zuge der Neubearbeitung der DIN 4026 unter Berücksichtigung von EC7"; Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des Instituts für Bautechnik Az. IV 1-5-499/87, Institut für Grundbau, Boden- und Felsmechanik Technische Hochschule Darmstadt, IRB-Verlag Stuttgart
- [3] ROLLBERG 1978: "Die Kraft-Setzungs-Linie von Pfählen"; Bauingenieur 53, S. 309-313
- [4] VAN DER VEEN 1953: "The bearing capacity of a pile", Proc. 3rd ICSMFE; Zürich, Bd. 2, S. 84ff



Bild 9: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren – Ortbetonrammpfahl



Bild 10: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren – Ortbetonrammpfahl

Ortbetonrammpfahl Ø: 56 cm, Fuß Ø: 118 cm Oberkante Gelände: 4.10 m NN, Ok. tragf. Baugrund: -0.10 m NN, Gründungssohle: -4.90 m NN Einbindung in tragfähigen Baugrund: 4.80 m, Pfahllänge u. GOK: 9.00 m



Bild 11: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren - Ortbetonrammpfahl

Vollverdrängungsbohrpfahl Ø: 46 cm, Fuß Ø: 46 cm Oberkante Gelände: 7.71 m NN, Ok. tragf. Baugrund: -5.79 m NN, Gründungssohle: -10.79 m NN Einbindung in tragfähigen Baugrund: 5.00 m, Pfahllänge u. GOK: 18.50 m



Bild 12: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren – Vollverdrängungsbohrpfahl

Vollverdrängungsbohrpfahl Ø: 56 cm, Fuß Ø: 56 cm Oberkante Gelände: 4.10 m NN, Ok. tragf. Baugrund: -2.90 m NN, Gründungssohle: -7.40 m NN Einbindung in tragfähigen Baugrund: 4.50 m, Pfahllänge u. GOK: 11.50 m

Drucksondierung: vv0504

fs/qc[%]

Spitzenwiderstand qc [MN/m²]



Berechnungswerte:



Bild 13: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren – Vollverdrängungsbohrpfahl

Teilverdrängungsbohrpfahl Ø: 51 cm, Fuß Ø: 51 cm Oberkante Gelände: 1.15 m NN, Ok. tragf. Baugrund: -6.55 m NN, Gründungssohle: -9.95 m NN Einbindung in tragfähigen Baugrund: 3.40 m, Pfahllänge u. GOK: 11.10 m

Berechnungswerte:

Bild 14: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren – Teilverdrängungsbohrpfahl

Teilverdrängungsbohrpfahl Ø: 44 cm, Fuß Ø: 44 cm Oberkante Gelände: 1.00 m NN, Ok. tragf. Baugrund: -5.50 m NN, Gründungssohle: -15.50 m NN Einbindung in tragfähigen Baugrund: 10.00 m, Pfahllänge u. GOK: 16.50 m

Bild 15: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren – Teilverdrängungsbohrpfahl

Teilverdrängungsbohrpfahl Ø: 60 cm, Fuß Ø: 60 cm Oberkante Gelände: 21.54 m NN, Ok. tragf. Baugrund: 18.74 m NN, Gründungssohle: 7.54 m NN Einbindung in tragfähigen Baugrund: 11.20 m, Pfahllänge u. GOK: 14.00 m

Berechnungswerte:

Bild 16: Vergleich zwischen Probebelastung und Bemessungsverfahren – Teilverdrängungsbohrpfahl

