

# Grundlagen und Ergebnisse der Ableitung von axialen Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten für die EA-Pfähle

Es werden die Grundlagen der empirischen Ableitung von axialen Pfahlwiderständen und ausgewählte Ergebnisse vorgestellt, die in die vom Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der DGGT bearbeitete neue Empfehlung EA-Pfähle eingeflossen sind.

Die durchgeführten Untersuchungen liefern empirisch weitgehend abgesicherte Spannen von Erfahrungswerten für den Pfahlspitzenwiderstand und die Pfahlmantelreibung in Abhängigkeit der Baugrundverhältnisse für die derzeit überwiegend in der Baupraxis zur Ausführung kommenden Pfahlsysteme. Die vergleichende statistische Auswertung von Probelastungen ermöglicht eine einheitliche Beurteilung des Tragverhaltens der verschiedenen Pfahlsysteme und somit eine sichere und je nach Untersuchungsaufwand auch wirtschaftliche Ableitung der Pfahltragfähigkeiten.

**Background and results of derivation of axial pile resistances based on empirical values for „EA-Pfähle“.** *The basics of the derivation of axial pile capacity based on empirical values and selected results are presented, which are already integrated in the national German recommendations for piles „EA-Pfähle“.* *The study provides to a large extent a secured range of empirical values for the base resistance and the skin friction for different pile systems as a function of the soil strength. Based on comparative statistical analysis of pile load tests of different pile systems, it becomes possible to derive a consistent analysis of bearing behaviour of pile systems, which provides a safe and an economical pile bearing capacity depending on the expense of preliminary soil investigations.*

## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Für die Ermittlung von Pfahlwiderständen dürfen in Deutschland nach DIN 1054 erdstatische Verfahren i. d. R. nicht verwendet werden, da keine Verfahren vorliegen, die das mechanische Modell und die Herstellungseinflüsse der verschiedenen Pfahlarten zutreffend abbilden. Dem gegenüber ist das Pfahltragverhalten auf der Grundlage von Pfahlprobelastungen auf dem Baufeld oder von vergleichbaren Probelastungen festzulegen. Wenn keine Pfahlprobelastungen durchgeführt werden und keine Erfahrungswerte aus unmittelbar vergleichbaren Pfahlprobelastungen vorliegen, darf der charakteristische axiale Pfahlwiderstand des Einzelpfahls nach DIN 1054:2005-01 aus allgemeinen Erfahrungswerten bestimmt werden. Ähnliche Festlegungen finden sich in DIN EN 1997-1:2005-10 (Eurocode EC 7-1), wobei in der derzeit in Bearbeitung befindlichen Ergänzungsnorm DIN 1054:2007 und dem

nationalen Anhang zum Eurocode EC 7-1 die Regelungen aus DIN 1054:2005-01 für die Anwendung in Deutschland im Wesentlichen bestätigt werden.

Allerdings finden sich in den vorhandenen Pfahlnormen DIN 4026, DIN 4014, DIN 4128 bzw. die neuere DIN 1054:2005-01 Erfahrungswerte für den Pfahlwiderstand in nur sehr eingeschränkter Weise und nur für wenige Pfahlarten. Dies wurde am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel zum Anlass genommen, Datenbanken mit Ergebnissen von axialen Pfahlprobelastungen an unterschiedlichen Pfahlsystemen zu erstellen und diese vergleichend statistisch auszuwerten. Ziel war dabei, für die vom Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der DGGT bearbeitete neue Empfehlung EA-Pfähle [1] für möglichst viele Pfahlarten vergleichende Spannen der Erfahrungswerte für Pfahlspitzenwiderstand und Mantelreibung empirisch abgesichert angeben zu können. Damit sollte ein maßgeblicher Beitrag für eine sichere und wirtschaftliche Beurteilung der Tragfähigkeit von derzeit überwiegend in der Baupraxis zur Ausführung kommenden Pfahlsystemen erreicht werden.

Die EA-Pfähle [1] liegt inzwischen als 1. Auflage (2007) vor. Darin finden sich im Abschnitt 5.4 zahlreiche Tabellen mit axialen Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten für verschiedene Pfahlsysteme. In diesem Beitrag werden die verwendeten Auswertestrategien und Grundlagen zur Erarbeitung der Tabellenwerte der EA-Pfähle [1] erläutert und weitere Detailergebnisse mitgeteilt, die dem Anwender auch Hinweise über Streuungen und damit Risiken bei der Anwendung der Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten geben sollen.

Die von den Verfassern für den Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ (DGGT) abschließend durchgeführten empirischen Auswertungen von statischen und teilweise auch dynamischen Pfahlprobelastungen basieren u. a. auch auf vorlaufenden und betreuten Arbeiten von [2], [3], [4] und [5].

Die durchgeführten Untersuchungen liefern Spannen von Erfahrungswerten für den Pfahlspitzenwiderstand  $q_b$  und die Pfahlmantelreibung  $q_s$  in Abhängigkeit der Baugrundverhältnisse in Form des Spitzenwiderstandes der Drucksonde  $q_c$  für die Festigkeiten nichtbindiger Böden und der charakteristischen undrännierten Scherfestigkeit  $c_{u,k}$  bei bindigen Böden für folgende Pfahlsysteme:

- Fertigrammpfähle
- Ortbetonrammpfähle

- Schraubpfähle
- verpresste Verdrängungs- und Mikropfähle
- Bohrpfähle

Für die Bohrpfähle in Lockergestein wurde im Gegensatz zu den anderen Pfahlsystemen keine nochmalige umfangreiche empirische Untersuchung durchgeführt, sondern in Anlehnung an [6] bzw. DIN 4014:1990-03 unter Berücksichtigung der Auswerteerfahrungen mit den anderen Systemen Modifikationen vorgenommen. Zu den Angaben von Bohrpfählen in Fels s. a. [7]. Die Auswertung und Ableitung der Pfahlwiderstände von Frankipfählen enthält [8].

**2 Empirische Grundlagen und Auswertestrategien**

**2.1 Verwendete statistische Methoden**

Die verwendeten deskriptiven und analytischen statistischen Methoden zur Ableitung der Pfahltragfähigkeiten aus Erfahrungswerten werden an dieser Stelle nur skizziert, siehe hierzu u. a. [9]. Neben der deskriptiven Datenanalyse zur Strukturierung und Beschreibung des Datenmaterials unter Verwendung von Histogrammen und dem statistischen Merkmal der Standardabweichung finden die analytischen Verfahren der Korrelations- und Regressionsanalyse Anwendung.

Im Rahmen der Korrelationsanalyse werden die Zusammenhänge in Form von Streudiagrammen dargestellt und mit dem Korrelationskoeffizienten qualitativ bewertet. Zusätzlich werden Vergleiche zwischen den Korrelationen verschiedener Merkmale durchgeführt.

Aus dem qualitativen Zusammenhang der Korrelationsanalyse wird ein Regressionsmodell formuliert und anhand des vorliegenden Datenmaterials validiert. Die Regressionsanalyse spezifiziert bekanntlich dadurch den funktionalen Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehrerer unabhängigen Variablen und ermöglicht infolge iterativer Optimierung des Regressionsmodells die empirische Repräsentation großer Datenmengen und somit auch die Interpolation fehlender bzw. Prognose zukünftiger Werte.

**2.2 Pfahlsysteme und Datengrundlage**

Als Datengrundlage wurden für die verschiedenen Pfahlsysteme umfangreiche Datenbanken aus überwiegend sta-

tischen aber auch dynamischen Probelastungen erstellt, siehe Tabelle 2.

Zur Ableitung der Pfahltragfähigkeiten wurden ausschließlich Probelastungsergebnisse verwendet, die über hinreichende Baugrundaufschlüsse verfügen und somit eine zuverlässige Korrelation zwischen der Baugrundfestigkeit und den Pfahlwiderständen ermöglichen.

Die aus den Projektunterlagen entnommenen Daten für die Pfahlsysteme enthalten für jede Probelastung folgende Angaben:

- allgemeine Daten (Bauvorhaben und Ort, Datum der Herstellung und der Probelastung)
- Pfahldaten (Baustoff, geometrische Abmessungen, Einbindelänge)
- Daten zur Pfahlherstellung (je nach Pfahlsystem, z. B. Rammenergie)
- Baugrund (Drucksondierung, Bohrprofil, Grundwasserhältnisse)
- Probelastungsergebnisse (Widerstand-Setzungs-Linie, dynamisch ermittelte Pfahlwiderstände)

**2.3 Aufbereitung der Probelastungsergebnisse**

Der größte Teil der vorliegenden statischen Probelastungen wurde nicht bis zum Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt, sondern oberhalb der Gebrauchslast abgebrochen. Um die einzelnen Probelastungen miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, eine Grenzsetzung  $s_1 = s_g$  festzulegen, die den Messwert des Pfahlwiderstandes im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit  $R_{1,m} = R_{1,m}(s_g)$  begrenzt. Als Grenzsetzung  $s_g$  wird für die untersuchten

Tabelle 2. Übersicht zu den verwendeten Probelastungen verschiedener Pfahlsysteme

Table 2. Overview of pile load tests of the different pile systems

Pfahlsysteme		Anzahl
Fertigrammpfähle	Stahlbeton und Spannbeton	121
	Stahlträgerprofil (h ≤ 0,50 m und h/b <sub>F</sub> ≤ 1,5)	55
	doppeltes Stahlträgerprofil	9
	offenes Stahlrohr und Hohlkasten (D <sub>b</sub> ≤ 0,80 m)	13
	geschlossenes Stahlrohr (D <sub>b</sub> ≤ 0,80 m)	4
Ortbetonrammpfähle	Simplexpfahl	70
	Frankipfahl	300
Schraubpfähle	Atlaspfahl	124
	Fundexpfahl	52
Verpresste Verdrängungspfähle	Verpressmörtelpfahl	22
	Rüttelinjektionspfahl	7
Verpresste Mikropfähle <sup>1)</sup>	Verbundpfahl	9

1) Es lagen wesentlich mehr Ergebnisse vor, allerdings i. d. R. mit unvollständigen Baugrundunterlagen; bei der Auswertung wurde sich auch mit an Verpressankern orientiert.

Tabelle 1. Statistische Merkmale

Table 1. Statistical parameters

Variable	$x_i, y_i$
arithmetisches Mittel	$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$
Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Korrelationskoeffizient	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n-1) \cdot s_x \cdot s_y}$

Pfahlarten das inzwischen weitgehend akzeptierte Kriterium

$$s_g = 0,1 \cdot D \text{ bzw. } s_g = 0,1 \cdot D_{eq} \quad (1)$$

verwendet, wobei D den je nach Pfahlssystem maßgebenden Durchmesser bezeichnet und bei nicht-runden Systemen in einen äquivalenten Ersatzdurchmesser  $D_{eq}$  umgerechnet werden muss.

Nach Festlegung der Grenzsetzung lässt sich die zugehörige Widerstand-Setzungs-Linie (WSL) mit Hilfe des Hyperbelverfahrens näherungsweise extrapolieren und somit die Tragfähigkeit  $R_{1,m}$  abschätzen.

Zur statistischen Analyse der Probelastungsergebnisse und der Ableitung der Erfahrungswerte für Pfahlspitzenwiderstand und Pfahlmantelreibung sind Kenntnisse über das vorliegende Aufteilungsverhältnis des Gesamtwiderstandes in den Spitzenwiderstandsanteil und den Mantelreibungsanteil notwendig. Hiermit werden die setzungsabhängigen Pfahlwiderstände der WSL für die statistische Analyse in die setzungsabhängigen Spitzenwiderstands- und Mantelreibungsanteile aufgeteilt und auf qualitative und funktionale Zusammenhänge mit den Bodeneigenschaften untersucht. Dieses Aufteilungsverhältnis kann je nach Pfahlssystem in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens und dem Pfahlmaterial und innerhalb eines Pfahlsystems je nach den geometrischen Abmessungen der Pfähle und der Bodenart erheblich variieren. Folgende Methoden eignen sich für die Bestimmung des Aufteilungsverhältnisses:

- messtechnisch überwachte Feld- oder Modellversuche
- Vergleich zwischen Druck- und Zugbelastungsversuchen
- dynamische Pfahltests mit Modellbildung
- empirische Methoden (Hyperbelverfahren mit einer oder zwei Regressionsgeraden)

Da in der Regel für die untersuchten Pfahlssysteme nicht alle Methoden zur Bestimmung des Aufteilungsverhältnisses zur Verfügung stehen oder geeignet sind, siehe auch [2], werden die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Pfahlssysteme zu einem weiteren Festlegungskriterium des Aufteilungsverhältnisses. Hierbei kommt der ingenieurmäßigen Erfahrung zum Tragverhalten der Pfahlssysteme unter Berücksichtigung der jeweiligen Herstellungsverfahren, Pfahlgeometrien und Pfahlmaterialien eine besondere Bedeutung zu.

#### 2.4 Vorgehensweise zur Ableitung der Pfahlwiderstände

Der Pfahlwiderstand R eines Pfahles setzt sich im Allgemeinen nach Gl. (2) aus der Pfahlmantelreibung  $R_s$  und dem Pfahlfußwiderstand  $R_b$  zusammen und wird in Abhängigkeit des Aufteilungsverhältnisses der Tragfähigkeitsanteile berücksichtigt:

$$R = R_b + R_s = q_b \cdot A_b + \sum_{i=1}^n (q_{s,i} \cdot A_{s,i}) \quad (2)$$

mit

$A_b$  Nennwert der Pfahlfußfläche

$A_{s,i}$  Nennwert der Pfahlmantelfläche in der Schicht i

$q_b$  Pfahlspitzenwiderstand

$q_{s,i}$  Pfahlmantelreibung in der Schicht i

Aufbauend auf den qualitativen Zusammenhängen zwischen Baugrundverhältnissen und Pfahlspitzenwiderstand bzw. Pfahlmantelreibung der Korrelationsanalyse wurde in Abhängigkeit des Aufteilungsverhältnisses des jeweiligen Pfahlsystems das Regressionsmodell gebildet. In der Regressionsanalyse wurde der funktionale Zusammenhang zwischen Pfahltragfähigkeitsanteilen und Baugrundverhältnissen iterativ optimiert, bis die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Pfahlwiderstand zu Null wird:

$$\Delta R_1 = \frac{R_{1,m} - R_{1,cal}}{R_{1,m}} \equiv 0 \quad (3)$$

mit

$\Delta R_1$  Differenz zwischen Messwert und Berechnungsergebnis der Gesamttragfähigkeit im Grenzzustand GZ 1 der Tragfähigkeit

$R_{1,m}$  Messwert der Gesamttragfähigkeit aus Probelastung

$R_{1,cal}$  Berechnungsergebnis der Gesamttragfähigkeit nach Gl. (2)

#### 2.5 Konstruktion der Widerstand-Setzungs-Linie

Zur Konstruktion der Widerstand-Setzungs-Linie wurden setzungsabhängige Erfahrungswerte für Pfahlspitzenwiderstand und Pfahlmantelreibung abgeleitet. In Abhängigkeit der Herstellungsverfahren der Pfahlssysteme unterscheiden sich die Setzungskriterien, siehe hierzu [2], [6] und [10]. In der statistischen Auswertung wurden zunächst die Erfahrungswerte für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelt und anschließend in weiteren Auswertungsschritten die Erfahrungswerte für die setzungsabhängigen Widerstände zur Konstruktion der Widerstand-Setzungs-Linie und somit zur Beschreibung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit, siehe [1].

#### 3 Spannen der abgeleiteten Erfahrungswerte und Anwendungsrisiken

Gemäß DIN 1054 und DIN 4020 streuen Bodenkenngrößen auf Grund entstehungsbedingter geologischer Randbedingungen erheblich. Dies gilt auch in besonderem Maße für das Pfahltragverhalten und die Pfahlwiderstände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, weil zu den baugrundbedingten Streuungen noch erhebliche herstellungsbedingte Einflüsse hinzukommen können.

Da Erfahrungswerte für den Pfahlwiderstand in nur sehr eingeschränkter Weise und nur für wenige Pfahlarten vorliegen, wurden die Streuungen des Pfahltragverhaltens bei der statistischen Analyse durch eine Spanne des Fraktilbereiches berücksichtigt, wie in Bild 1 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit dargestellt ist.

In der vorliegenden Untersuchung wurden von den Verfassern Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für das 10 %-, 20 %- und 50 %-Fraktil abgeleitet. Für die Anwendung der Erfahrungswerte des 10 %-Fraktils bedeutet dies, dass in 90 % der Fälle die mit den Erfahrungswerten ermittelte Tragfähigkeit auf der sicheren Seite liegt bzw. die vorhandene Tragfähigkeit nicht überschreitet. Dem gegenüber werden bei der Festlegung von charakteristischen Bodenkenngrößen bekanntlich i. d. R. „vorsichtige Mittelwerte“ im Bereich des 50 %-Fraktils gewählt.

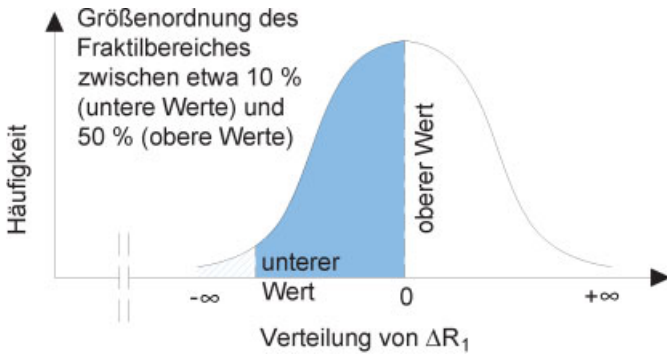


Bild 1. Verteilung und Fraktilbereich der erzielten Ergebnisse für Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten im Vergleich zu Probelastungsergebnissen  
 Fig. 1. Range of empirical values of pile resistances

Auf Grund der hier dargestellten Vorgehensweise werden nach EA-Pfähle [1] die Begriffe unterer und oberer Wert für die 10 %- und 50 %-Fraktile verwendet. Der angegebene Fraktilbereich, der in Bild 1 grafisch dargestellt ist, kann je nach Probelastungen und lokalen Randbedingungen kleiner oder auch größer ausfallen und bietet zunächst nur eine Orientierung.

Die Anwendung der unteren Erfahrungswerte (Kleinstwerte) sollte nach EA-Pfähle [1] der Regelfall sein und setzt voraus, dass eine Baugrunduntersuchung in Anlehnung an DIN 4020 vorliegt. Sollten die endgültigen Baugrunduntersuchungen noch nicht zur Verfügung stehen, können die unteren Erfahrungswerte auch für Vorentwürfe Anwendung finden. Über die unteren Werte hinausgehende Pfahlwiderstände, abgestuft in Richtung der oberen Werte der Tabellen, sind nur nach ausdrücklicher Bestätigung eines Sachverständigen für Geotechnik zu verwenden. Zusätzlich sind die örtlichen Begebenheiten und Erfahrungen, sowie der spezifische Anwendungsfall im Einzelnen zu berücksichtigen. Weitere Anwendungshinweise finden sich in [1].

**4 Ableitung der Pfahltragfähigkeit von Fertigrammpfählen**

**4.1 Allgemeines**

Am Beispiel der Fertigrammpfähle wird die Ableitung der Pfahltragfähigkeiten auf empirischer Grundlage dargestellt. Hierbei werden zunächst Fertigrammpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton berücksichtigt. Die Anwendungsgrundlagen der Erfahrungswerte sind [1] zu entnehmen, darüber hinaus sind dort auch Anwendungsbeispiele zu den Erfahrungswerten von axialen Pfahlwiderständen auf empirischer Grundlage angegeben. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung von Stahlprofilen – wie z. B. Stahlträgerprofile, offene Stahlrohre und Hohlkästen, geschlossene Stahlrohre – sind ebenfalls in [1] enthalten und wurden analog bestimmt, wie hier beispielhaft für Betonfertigrammpfähle dargestellt, siehe hierzu auch Abschn. 4.4.

**4.2 Tragverhalten und Aufteilung der Gesamttragfähigkeit von Fertigrammpfählen**

In [2] wird ein Auswerteverfahren für Fertigrammpfähle vorgeschlagen, das zur Konstruktion der Widerstand-Setzungs-Linie einen setzungsabhängigen Spitzenwiderstand

bei  $s/D = s/D_{eq} = 0,035$  und den Bruchzustand der Mantelreibung berücksichtigt, welches hier für die Auswertung zu

$$s_{sg} = 0,5 \cdot R_{s1} \leq 1,0 \text{ cm} \tag{4}$$

modifiziert wurde. Auf der Grundlage von messtechnisch ausgestatteten statischen Pfahlversuchen, dynamischen Probelastungen und Vergleichen zwischen Druck- und Zugbelastungsversuchen wird das auf Modellversuchen basierende Aufteilungsverhältnis nach [2] modifiziert und ein neuer Ansatz für die Festlegung der Tragfähigkeitsanteile verwendet, siehe Bild 2. Darüber hinaus ist für den Fertigrammpfahl zwischen dem Bruchzustand der Pfahlmantelreibung  $R_{s(g)}$  bei  $s = s_g = s_{sg}$  und einem ergänzend eingeführten und hier verwendeten Zustand der Mobilisierung der Bruchmantelreibung  $R_{s(g^*)}$  bei  $s = s_{sg^*}$  zu unterscheiden. In Bild 2 ist in Abhängigkeit der Pfahlgeometrie das Aufteilungsverhältnis für den Mantelreibungsanteil als hier gewählten modifizierten Ansatz gekennzeichnet. Durch die Berücksichtigung eines setzungsabhängigen Mantelreibungsverlaufs ergibt sich für Fertigrammpfähle die Widerstand-Setzungslinie nach Bild 3.

Die charakteristische Gesamttragfähigkeit für Fertigrammpfähle ergibt sich demnach aus

$$R_k(s) = R_{b,k}(s) + R_{s,k}(s) = \eta_b \cdot q_{b,k} \cdot A_b + \eta_s \cdot \sum_{i=1}^n (q_{s,k,i} \cdot A_{s,i}) \tag{5}$$

mit

- $\eta_b$  Anpassungsfaktor des Spitzenwiderstandes, hier  $\eta_b = 1,0$
- $\eta_s$  Anpassungsfaktor der Pfahlmantelreibung, hier  $\eta_s = 1,0$

Hierbei sind folgende setzungsabhängige Widerstände zu berücksichtigen

$$R_{b,k}(s = 0,035 \cdot D_{eq})$$

$$R_{b,k}(s_g = 0,10 \cdot D_{eq})$$

$$R_{s,k}(s = s_{sg^*})$$

$$R_{s,k}(s_g = s_{sg})$$

mit  $s_{sg^*} = 0,5 \cdot R_{s,k}(s = s_{sg^*}) \leq 1,0 \text{ cm}$  nach Gl. (4)

Damit wurde gegenüber gebohrten Pfahlsystemen hier zusätzlich die Annahme getroffen, dass die Pfahlmantelreibung nach einer ersten Mobilisierungsgröße bei  $s_{sg^*}$  im Gebrauchszustand mit Annäherung an den Bruch bei  $s_{sg}$  weiter ansteigt, was zu homogeneren statistischen Ergebnissen bei der Auswertung geführt hat.

**4.3 Beispiele zur statistischen Analyse der Probelastungsergebnisse**

Bild 4 enthält beispielhaft die aus dem Aufteilungsverhältnis resultierenden Pfahlspitzenwiderstände in Abhängigkeit des Spitzenwiderstandes der Drucksonde für nichtbindige Böden im Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1. Die qualitativen Zusammenhänge der beiden Merkmale aus der Korrelationsanalyse liefern die Grundlage für die Regressionsanalyse.

Die verwendeten Regressionsfunktionen zwischen den Pfahlwiderständen und den maßgebenden Baugrundverhältnissen weisen sowohl für den Pfahlspitzenwiderstand als auch für die nicht dargestellte Pfahlmantelreibung einen bilinearen Verlauf auf. Hierdurch wird zum einen der Verdichtungseffekt, der bei weniger tragfähigen Böden stärker auftritt als bei Böden mit größeren Tragfähigkeiten, und zum anderen die in dem Bereich hoher Baugrundfestigkeit vorliegende abnehmende Anzahl der untersuchten Probelastungen berücksichtigt.

Für die Ermittlung der Pfahlmantelreibung ist der aus dem Aufteilungsverhältnis resultierende Pfahlmantelwiderstand auf alle Bodenschichten zu beziehen. Auf diese Weise werden in der Auswertung der Probelastungen auch geringtragfähige Bodenschichten berücksichtigt, die für die praktische Anwendung der Erfahrungswerte zu vernachlässigen sind.

Die Ergebnisse für die in die EA-Pfähle [1] eingeführten unteren und oberen Erfahrungswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind in Bild 5 und die statistischen Merk-

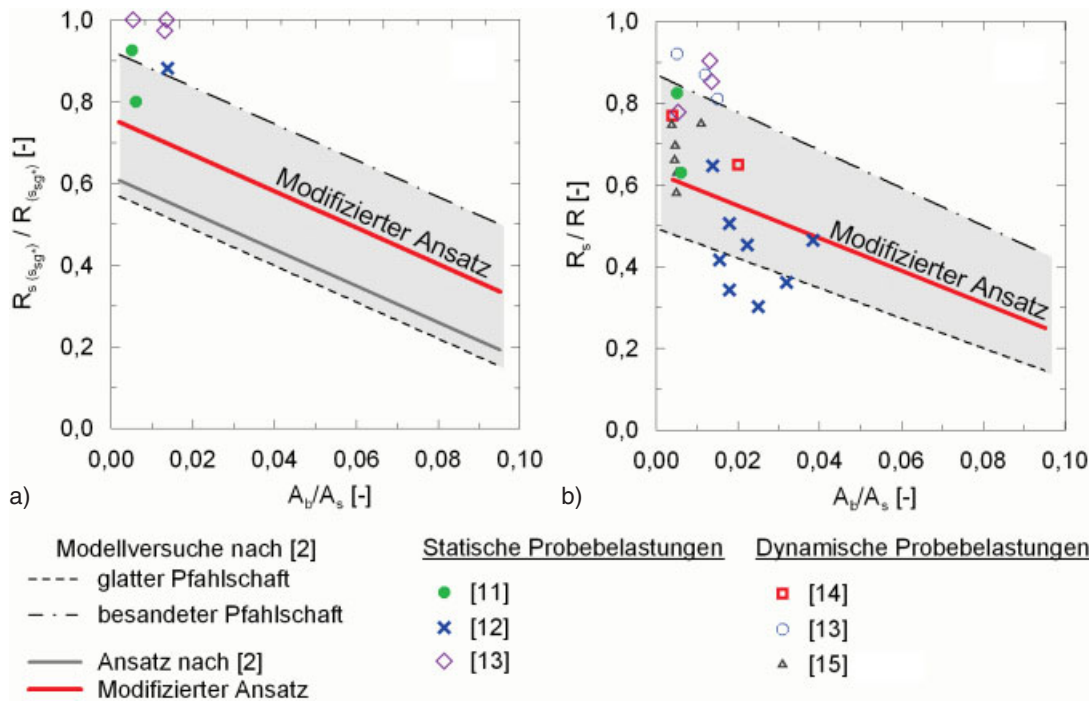


Bild 2. Aufteilungsverhältnis für Fertigrammpfähle a) bei Mobilisierung des Bruchzustandes der Mantelreibung; b) im Bruchzustand des Pfahls

Fig. 2. Proportion of total pile capacity for driven precast piles a) at mobilisation of the skin friction up to failure state; b) at failure state of the pile system

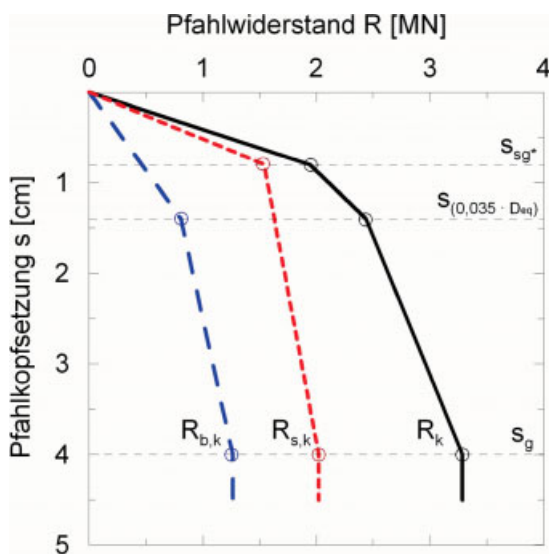


Bild 3. Idealierte Widerstand-Setzungs-Linie für Fertigrammpfähle nach Gl. (5)

Fig. 3. Idealized load-settlement-curve for driven precast piles according to eq. (5)

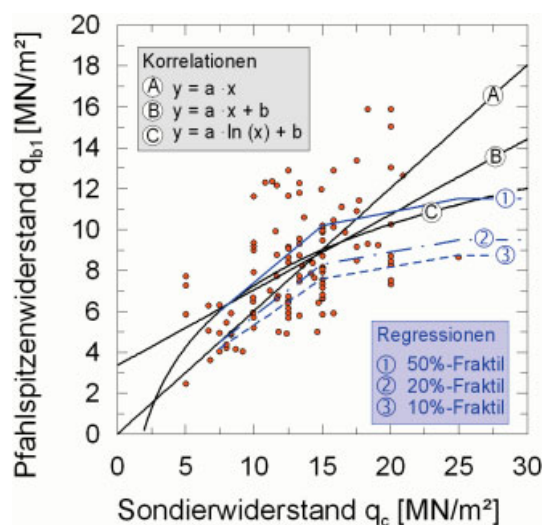


Bild 4. Korrelationen zwischen dem Sondierwiderstand  $q_c$  und dem Pfahlspitzenwiderstand  $q_{b1}$  aus den Pfahlprobelastungen (gerammte Betonfertigmppfähle)

Fig. 4. Correlation between mean cone resistance  $q_c$  and pile base resistance  $q_{b1}$  from the load tests (driven precast piles)

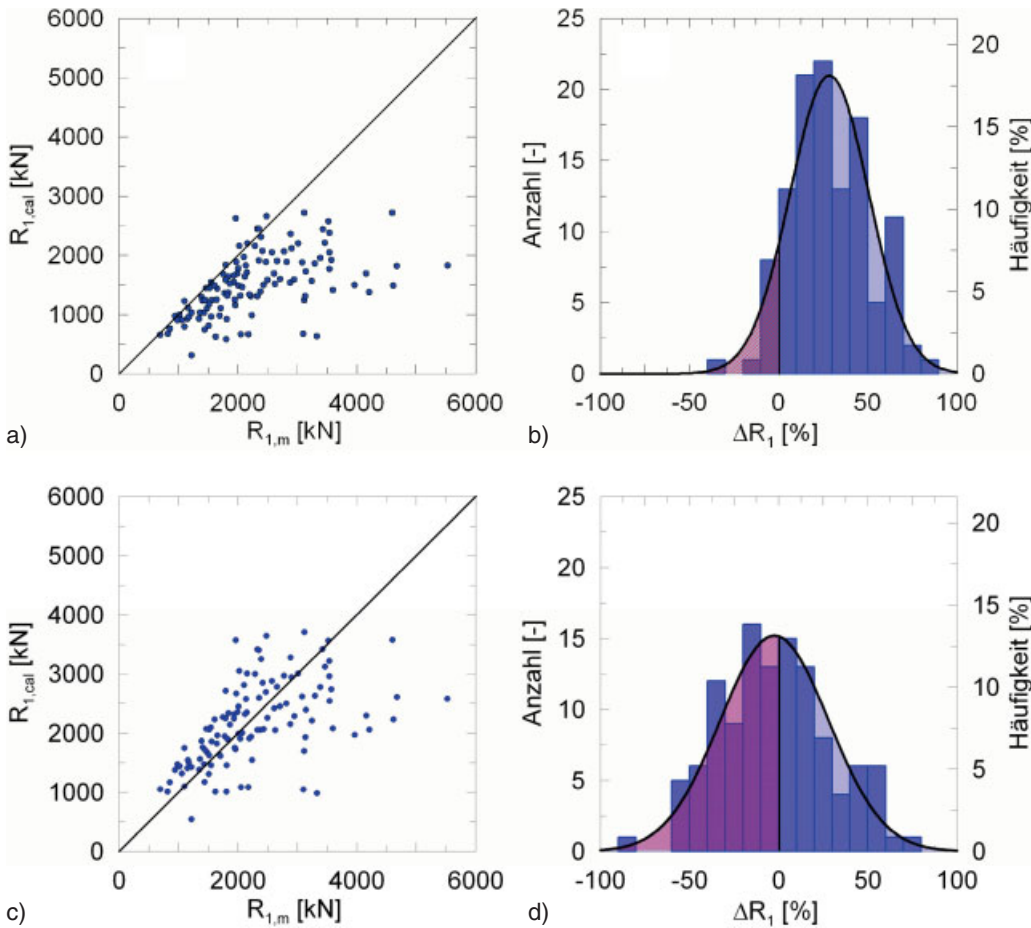


Bild 5. a) Streudiagramm und b) Histogramm für die unteren Erfahrungswerte von Fertigrammpfählen in nichtbindigen Böden im GZ 1; c) und d) für die oberen Erfahrungswerte  
 Fig. 5. a) Scatter plot and b) histogramm of the lower empirical values of driven precast piles in noncohesive soils in ULS; c) and d) upper empirical values

male für das 10 %-, 20 %- und 50 %-Fraktile in Tabelle 3 dargestellt.

Für die vorliegenden Probelastungsergebnisse werden Abweichungen zwischen Messwerten und Berechnungsergebnissen der Gesamttragfähigkeit erzielt, die in einem Bereich von  $\Delta R_1 = 0,29$  bis  $-2,38$  % liegen. Der Korrelationskoeffizient beschreibt für den vorliegenden Datensatz mit  $r = 0,54$  eine mittlere Korrelation.

Die aus den dargestellten Auswertungen in [1] eingeflossenen Spannen der Erfahrungswerte und zusätzlich das 20 %-Fraktile für Fertigrammpfähle sind für den Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1 in den Tabellen 4 bis 7 beispielhaft angegeben. Für die zur Konstruktion der Widerstand-Setzungs-Linie erforderlichen setzungsabhängigen Widerstände und die Anwendungsgrundlagen der Erfahrungswerte wird auf EA-Pfähle [1] verwiesen.

Tabelle 3. Statistische Merkmale für Betonfertigrammpfähle  
 Table 3. Statistical parameters for driven precast piles

	$\Delta R_1$ [%]	s [%]	r [-]
untere Erfahrungswerte (10 %-Fraktile)	0,29	22,1	0,54
20 %-Fraktile	-0,18	24,5	0,54
obere Erfahrungswerte (50 %-Fraktile)	-2,38	30,0	0,54

Diese Art der vergleichenden statistischen Auswertung von Probelastungen an verschiedenen Pfahlsystemen stellt gegenüber den bisherigen Angaben nach Auffassung der Verfasser einen Fortschritt dar, da bei den verschiedenen Pfahlsystemen jeweils ein vergleichbares statistisches Niveau zugrunde gelegt wurde. Dem gegenüber sind die Tragfähigkeitsangaben der DIN 4014 für Bohrpfähle nach [6] in der Nähe der 10 %-Fraktile einzuordnen, das sog. S-Verfahren [16], das tendenziell informativ in DIN

Tabelle 4. Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzenwiderstand  $q_{b1,k}$  für Fertigrammpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

Table 4. Empirical values of characteristic base resistances  $q_{b1,k}$  for driven precast piles in noncohesive soils in ULS

s/D <sub>eq</sub> = 0,1	Pfahlspitzenwiderstand $q_{b1,k}$ in kN/m <sup>2</sup>		
	bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde in MN/m <sup>2</sup>		
	7,5	15	25
10 %-Fraktile	4200	7600	8750
20 %-Fraktile	4500	8300	9500
50 %-Fraktile	6000	10200	11500

1054:2005-01 für Betonfertigrampfpfähle eingegangen ist, orientiert sich eher an den Mittelwerten (50 %-Fraktile).

#### 4.4 Berichtigung zu [1] Tabelle 5.5

In [1], Tabelle 5.5, finden sich Anpassungsfaktoren  $\eta_b$  für den Spitzenwiderstand von Stahlträgerprofilpfählen. Dabei ist der Anwendungsbereich zunächst auf  $h/b_F \leq 1,5$  zu begrenzen.

#### 5 Ableitung des Pfahlsitzenwiderstandes in Geschiebemergel

Auf Grund der Vielzahl an Probelastungsergebnissen können für bestimmte Pfahlsysteme Erfahrungswerte für

Tabelle 5. Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung  $q_{s1,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

Table 5. Empirical values of characteristic skin friction  $q_{s1,k}$  for driven precast piles in noncohesive soils in ULS

$s_{sg} = s_g = 0,1 \cdot D_{eq}$	Pfahlmantelreibung $q_{s1,k}$ in kN/m <sup>2</sup>		
	bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde in MN/m <sup>2</sup>		
	7,5	15	25
10 %-Fraktile	40	95	125
20 %-Fraktile	45	105	140
50 %-Fraktile	60	125	160

Tabelle 6. Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlsitzenwiderstand  $q_{b1,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

Table 6. Empirical values of characteristic base resistances  $q_{b1,k}$  for driven precast piles in cohesive soils in ULS

$s/D_{eq} = 0,1$	Pfahlsitzenwiderstand $q_{b1,k}$ in kN/m <sup>2</sup>		
	Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undrännierten Bodens in kN/m <sup>2</sup>		
	100	150	250
10 %-Fraktile	600	850	1150
20 %-Fraktile	650	950	1250
50 %-Fraktile	750	1100	1500

Tabelle 7. Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung  $q_{s1,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

Table 7. Empirical values of characteristic skin friction  $q_{s1,k}$  for driven precast piles in cohesive soils in ULS

$s_{sg} = s_g = 0,1 \cdot D_{eq}$	Pfahlmantelreibung $q_{s1,k}$ in kN/m <sup>2</sup>		
	Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undrännierten Bodens in kN/m <sup>2</sup>		
	60	150	250
10 %-Fraktile	20	40	55
20 %-Fraktile	25	50	65
50 %-Fraktile	35	60	80

den Pfahlsitzenwiderstand im norddeutschen Geschiebemergel angegeben werden. Die Auswertung erfolgt in gleicher Weise wie oben beschrieben, wobei für die Pfahlmantelreibung die Erfahrungswerte für bindige Böden angesetzt werden.

Bild 6 enthält für Simplexpfähle, Atlaspfähle und Fundexpfähle beispielhaft die Erfahrungswerte für den Spitzenwiderstand  $q_{b1}$  in Geschiebemergel für die verschiedenen Fraktile, siehe auch Tabelle 8.

#### 6 Vergleichende Bewertung der ermittelten Pfahltragfähigkeiten

Im Folgenden sind einige Kriterien aus den empirischen Untersuchungen vergleichend bewertet. Zur Verdeutlichung werden in Bild 7 die zusammengefassten Ergebnisse der ausgewerteten Probelastungen ( $R_{1,m}$ ) und die aus den statistischen Untersuchungen abgeleiteten Erfahrungswerte ( $R_{1,cal}$ ) der verschiedenen Pfahlsysteme gegenübergestellt.

Vergleicht man die Spitzenwiderstände der einzelnen Pfahlsysteme in Bild 8a untereinander, so lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Art der Pfahlherstellung und der Systeme sowie deren Tragfähigkeiten erkennen. Rampfpfähle haben im Allgemeinen einen größeren Spitzenwiderstand, da infolge des Einrammens in den Baugrund eine Verdrängung und Verdichtung des Bodens unterhalb der Pfahlspitze erfolgt. In nichtbindigen Böden

Tabelle 8. Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlsitzenwiderstand  $q_{b1,k}$  für den Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1 in Geschiebemergel

Table 8. Empirical values of characteristic base resistances  $q_{b1,k}$  in boulder clay in ULS

$s/D_{eq} = 0,1$	Pfahlsitzenwiderstand $q_{b1,k}$ in kN/m <sup>2</sup>		
	Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undrännierten Bodens in kN/m <sup>2</sup>		
	100	150	250
Simplexpfahl	3400–3700	5400–5700	6600–7000
Atlaspfahl	1500–2700	2250–3500	3000–4250
Fundexpfahl	2600–4000	4200–5500	5300–6500

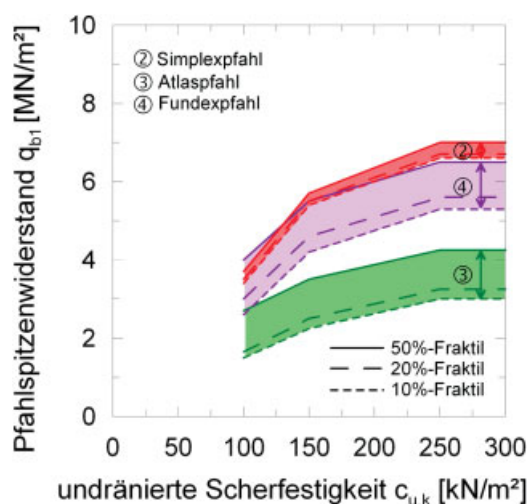


Bild 6. Pfahlsitzenwiderstand in Geschiebemergel  
Fig. 6. Pile base resistance in boulder clay

können für Fertigrammpfähle und Simplexpfähle infolge des vergleichbaren Herstellungsverfahrens beider Pfahlsysteme einheitliche Erfahrungswerte angegeben werden.

Dem gegenüber weisen die Rammfähle im Unterschied zu anderen Pfahlsystemen eine geringere Bruchmantelreibung auf, siehe Bilder 8b und 9.

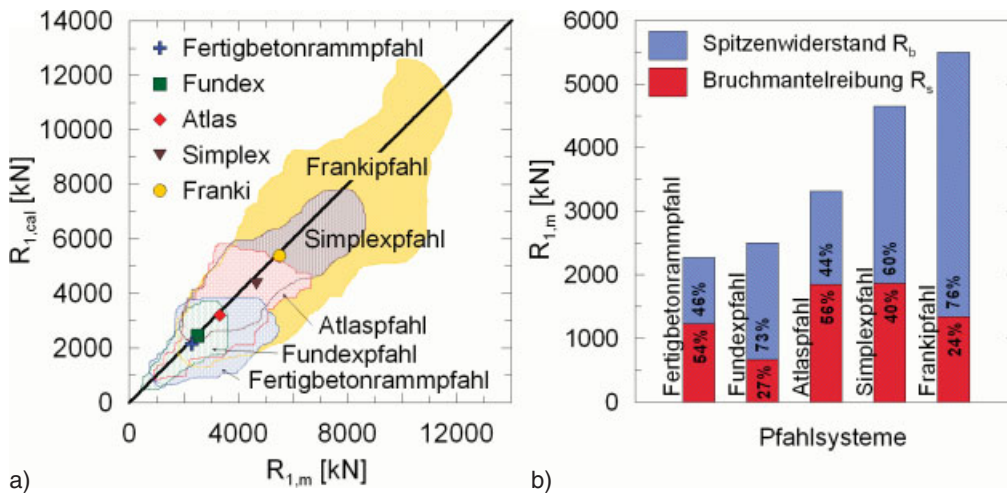


Bild 7. a) Vergleich der Gesamttragfähigkeiten (Symbole = Mittelwerte) und b) mittlere Aufteilungsverhältnisse der verschiedenen Pfahlsysteme aus den untersuchten Pfahlprobebelastungen

Fig. 7. a) Comparison of the total load capacities (symbols = average values) and b) the mean proportion of the base and shaft resistances for the different pile systems

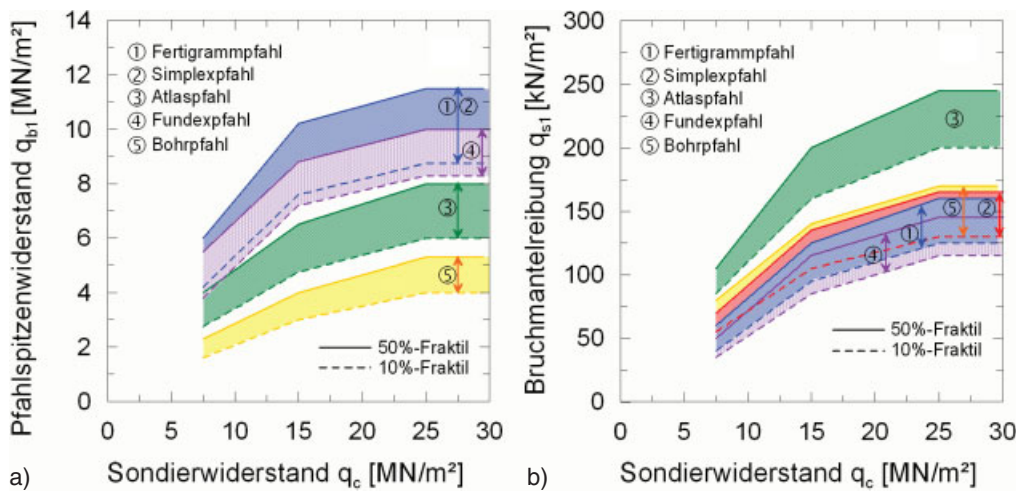


Bild 8. Obere und untere Erfahrungswerte für a) Pfahlspitzenwiderstand und b) Bruchmantelreibung in nichtbindigen Böden

Fig. 8. Upper and lower empirical values of different piles in noncohesive soils for a) base resistance and b) skin friction

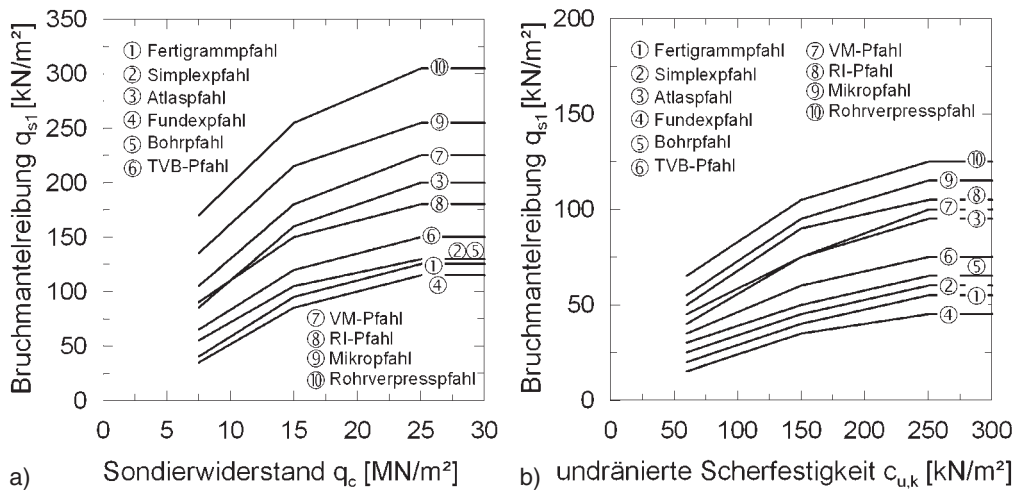


Bild 9. Untere Erfahrungswerte der Bruchmantelreibung in a) nichtbindigen Böden und b) bindigen Böden

Fig. 9. Lower empirical values of skin friction for different piles in a) noncohesive soils and b) cohesive soils



Der Verdrängungs- und Verdichtungseffekt des Herstellungsverfahrens von Fundexpfählen, die durch eine drehende und drückende Bewegung abgeteuft werden, führt im Vergleich zu den geramnten Simplexpfählen zu etwas geringeren Erfahrungswerten des Pfahlspitzenwiderstandes. Beide Pfahlssysteme verfügen über eine Pfahlspitze mit Überstand, die nach dem Abteufen als verlorene Spitze im Boden verbleibt. Der Überstand der Pfahlspitze verursacht beim Herstellungsvorgang eine anfängliche Auflockerung des Baugrunds im Pfahlschaftbereich und führt zu einer Reduzierung der Pfahlmantelreibung.

Der Schneidkopf des Atlaspfahls wird als Schraubpfahl analog zu dem Fundexpfahl mit einer drehenden und drückenden Bewegung in den Boden eingebracht. Durch die schraubenförmige Ausbildung des Pfahlschaftes können höhere Erfahrungswerte der Mantelreibung erzielt werden.

Bohrpfähle und Teilverdrängungsbohrpfähle weisen auf Grund des Bohrvorgangs und der damit verbundenen Entspannung des Bodens im Pfahlfußbereich im Unterschied zu den übrigen Pfahlssystemen einen geringeren Pfahlspitzenwiderstand auf.

Die vollständigen Angaben der Tabellen für alle ausgewerteten Systeme finden sich in [1].

## 7 Zusammenfassung und Danksagung

Die durchgeführten Untersuchungen liefern empirisch weitgehend abgesicherte Spannen von Erfahrungswerten für den Pfahlspitzenwiderstand und die Pfahlmantelreibung in Abhängigkeit der Baugrundverhältnisse für die derzeit in der Baupraxis überwiegend zur Ausführung kommenden Pfahlssysteme. Die vergleichende statistische Auswertung von Probelastungen ermöglicht eine einheitliche Beurteilung des Tragverhaltens der verschiedenen Pfahlssysteme und somit eine sichere und je nach Aufwand für die geotechnischen Voruntersuchungen auch wirtschaftliche Ableitung der Pfahltragfähigkeiten. Dabei wird allerdings die Unsicherheit größer, je stärker die Herstellungseinflüsse auf die Tragfähigkeit sind, z. B. verpresste Mikropfähle.

Die vorliegenden Ergebnisse und die beschriebenen Grundlagen der empirischen Ableitung von axialen Pfahlwiderständen sind in die vom Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der DGGT bearbeiteten neuen Empfehlung EA-Pfähle eingeflossen. Auf die in Abschn. 4.4 aufgeführte Berichtigung zu [1], Tabelle 5.5 wird nochmals hingewiesen.

Für bestimmte Pfahlssysteme werden Erfahrungswerte für den Pfahlspitzenwiderstand in Geschiebemergel angegeben. Darüber hinaus werden in [8] die Grundlagen der Auswertung an klassischen Ortbetonrammpfählen System Franki dargelegt, deren Tragfähigkeitsangaben sich ebenfalls in der EA-Pfähle finden.

Die Verfasser bedanken sich bei allen Firmen und Institutionen, die Ergebnisse von Pfahlprobelastungen für die Auswertung zur Verfügung gestellt haben. Dies waren besonders Franki Grundbau GmbH & Co KG, Hamburg Port Authority, Centrum Pfähle GmbH, Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR und BSU-Prüfstelle für Baustatik, Hamburg.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass die in EA-Pfähle aufgeführten Bedingungen für die Anwendung der Spannen der Erfahrungswerte der Pfahltragfähigkeiten sorgfältig eingehalten werden sollten und re-

gionale Erfahrungen mit zu berücksichtigen sind. Dazu empfiehlt sich i. d. R. immer die Einschaltung eines Sachverständigen für Geotechnik, was auch die DIN 1054 sinngemäß fordert.

## Literatur

- [1] EA-Pfähle: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Arbeitskreis 2.1. Berlin: Ernst & Sohn, 2007.
- [2] *Witzel, M.*: Zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von vorgefertigten Verdrängungspfählen in bindigen und nichtbindigen Böden. Universität Kassel, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 15, 2004.
- [3] *Melchin, G.*: Auswertung von Pfahlprobelastungen an Frankipfählen und Ableitung von Erfahrungswerten der Pfahlwiderstände. Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Diplomarbeit, 2005.
- [4] *Käding, F.*: Statistische Auswertung der Tragfähigkeiten unterschiedlicher Pfahlssysteme und vergleichende Analyse in einem Gesamtkonzept zum Tragverhalten von Pfahlssystemen. Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Diplomarbeit, 2005.
- [5] *Werner, S.*: Statistische Auswertung zum Tragverhalten von Pfahlssystemen und numerische Sensibilitätsanalyse zum Tragverhalten im Pfahlnahbereich. Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Diplomarbeit, 2006.
- [6] *Elborg, E.-A.*: Verbesserung der Vorhersagbarkeit des Last-Setzungsverhaltens von Bohrpfählen auf empirischer Grundlage. Technische Hochschule Darmstadt, D 17, 1993.
- [7] *Moormann, C.*: Pfahlverhalten in festen und veränderlich festen Gesteinen. Universität Kassel, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 18 (2005), S. 257–280.
- [8] *Kempfert, H.-G., Brieke, W., Becker, P.*: Axiale Pfahlwiderstände von Frankipfählen aus Erfahrungswerten. Bautechnik (in Vorbereitung).
- [9] *Hartung, J., Elpelt, B., Klösener, K.-H.*: Statistik, Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 13. Auflage. München: Oldenbourg, 2002.
- [10] *Bruns, T.*: Untersuchung des Tragverhaltens von Ortbeton-schraubpfählen. Universität Hannover, Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Heft 48, 1998.
- [11] *Ebener, H.*: Über die Tragfähigkeit von Stahlbetonpfählen. Hamburg, 1960. Forschungsbericht. Forschungsprojekt III B1-4115 Nr. 36 im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnungswesen, Städtebau und Raumordnung.
- [12] *Petermann, H., Lackner, E., Schenck, W.*: Tragfähigkeit von Pfählen – Großversuche und ihre Auswertung. Berichte aus der Bauforschung, Heft 49, Berlin, 1967.
- [13] *De Beer, E., De Jonghe, A., Carpentier, R., Hever, M., Scholtes, P.*: H Steel Piles in dense sand. Proceedings of the 10<sup>th</sup> ICSMFE, Stockholm (1981), pp. 693–698.
- [14] *Kempfert, H.-G., Becker, P.*: Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik: Ableitung von Spitzenwiderstand und Mantelreibung vertikal belasteter Spundwände und Großrohrpfähle für die Anwendung im Hafenbereich. Kassel, 2005. Forschungsbericht – unveröffentlicht.
- [15] Centrum Pfähle GmbH: Probelastung – Vergleich zwischen statischer und dynamischer. Hamburg. Firmenprospekt.
- [16] *Schröder, E.*: S-Verfahren: Zur Abschätzung der äußeren Tragfähigkeit (Grenzlast) von geramnten Betonfertiggpfählen in nichtbindigen Böden. Hamburg, 1996 – unveröffentlicht.

## Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dipl.-Ing. Patrick Becker, Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Fachgebiet Geotechnik, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel