

Zur Entwicklung der nationalen Pfahlbemessungsverfahren

Univ.-Prof.(em.) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert

Institut für Geotechnik und Geohydraulik / Universität Kassel

1 Einleitung

In der nationalen und internationalen geotechnischen Literatur finden sich umfangreiche Darstellungen zum äußeren Tragverhalten und zu den Bemessungsverfahren von Pfählen. Bei diesen Quellen ist im Wesentlichen zu unterscheiden zwischen

- analytischen Berechnungsverfahren und
- empirischen Pfahltragfähigkeitsangaben.

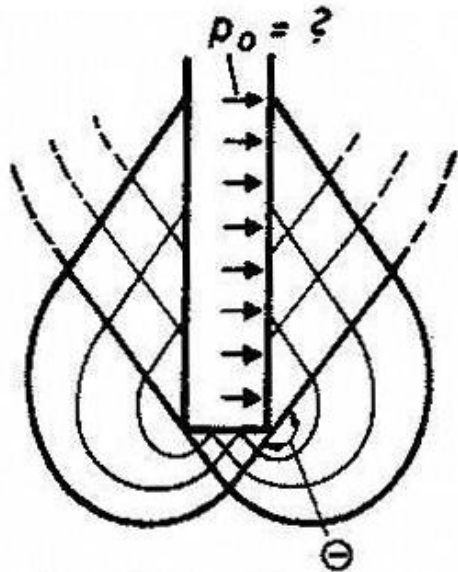
Dabei beziehen sich die Angaben zu mindestens aus der älteren Literatur vorwiegend auf die Bruchtragfähigkeit der Pfähle.

Im Folgenden ist ohne Anspruch auf Vollständigkeit die Entwicklung der Pfahlbemessungsverfahren für die äußere axiale Tragfähigkeit zusammengestellt. Unter äußerer Pfahltragfähigkeit verstehen wir in Deutschland die Abtragung der Bauwerkslasten über die Pfähle in den Baugrund. Insgesamt ist im Sinne der neueren Nomenklatur zu unterscheiden zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, also im Bruchzustand und beim Verhalten unter den tatsächlichen Bauwerkslasten (charakteristischen Einwirkungen).

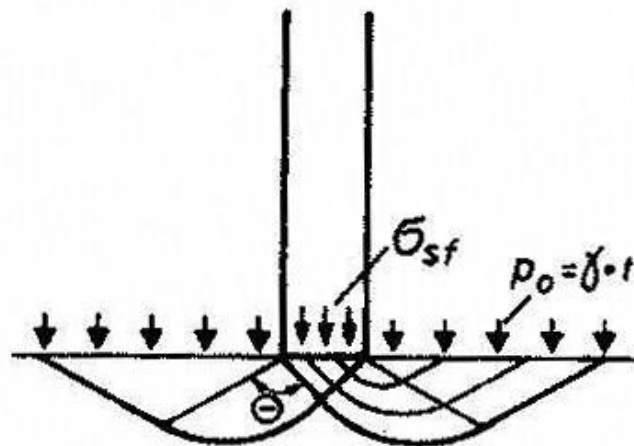
Der Schwerpunkt des Beitrages bezieht sich auf die nationale Entwicklung und soll den Bogen schlagen zu den Vorgaben, die nunmehr im Zusammenhang mit den europäischen Normen (Eurocode 7-1) auch in Deutschland zu beachten sind.

2 Auswahl von analytischen und empirischen Berechnungsverfahren zur Pfahltragfähigkeit

2.1 Verfahren mit Bruchmodellen



„tiefer“ Bruch wie etwa bei de Beer, Meyerhof u.a

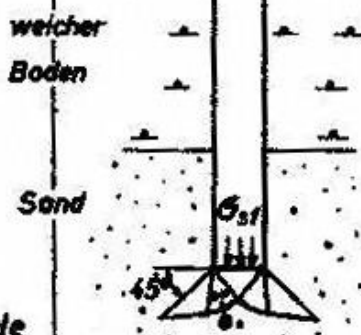


DIN 4017 (für Halbraum)

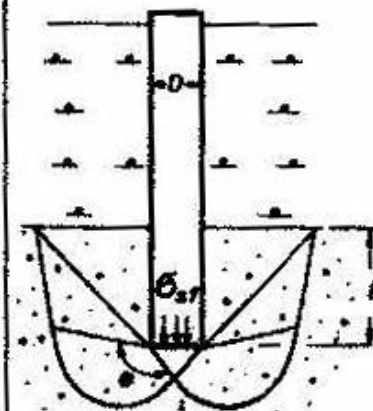
-örtl. begrenztes Fließen -



a) reale Bruchfigur bei zusammendrückbarem Boden



b) Bruchkörper, nach Berezantsev (1965), an a) angenähert



c) maximale Größe des Bruchkörpers (z. B. unzusammendrückbarem Boden)

Abb. 2.1: Bruchkörpermodelle für den Pfahlfuß, aus [6]

Aus den zahlreich vorliegenden Ansätzen sei beispielhaft nach [1], [2], [3], [4], [5] mit Bezug auf Abb. 2.1 Tragfähigkeitsmodelle herausgegriffen, die im Wesentlichen auf Bruchkörpermodellen analog zur Grundbruchtheorie basieren. Allerdings gehen diese Modelle ursprünglich vom ebenen Zustand aus und müssen auf das räumliche Pfahlmodell transferiert werden. Der Vorteil der Verfahren wurde darin gesehen, dass geschlossene Lösungen auf der Grundlage von Bodenkenngrößen vorlagen. Allerdings waren erhebliche Abweichungen der Ergebnisse im Vergleich zu Pfahlprobebelastungen vorhanden. Man versuchte daraufhin Anpassungen mit Faktoren vorzunehmen. Diese Verfahren wurden ab etwa 1980 national nicht weiter verfolgt.

2.2 Erweiterung von Modellvorstellungen

Nach [7] setzten sich zunehmend etwas andere Modellvorstellungen zum Lastabtrag der Pfähle in den Baugrund national durch, wobei die folgenden Ausführungen weitgehend aus [8] entnommen worden sind.

Danach wird bezüglich der äußeren Pfahlwiderstände des Einzeldruckpfahls in axialer Richtung unterschieden in die Anteile Fußwiderstand (base resistance) $R_b(s)$ und Mantelwiderstand (shaft resistance) $R_s(s)$, wobei der Pfahlwiderstand abhängig von der Pfahlsetzung s ist und sollte über den gesamten Widerstandsbereich durch eine Widerstands-Setzungslinie (WSL) beschrieben werden. Abb. 2.2 zeigt, dass die Form der WSL des Pfahlsplitzendrucks q_b und der Pfahlmantelreibung q_s unterschiedlich sind. q_b verläuft etwa parabolisch, q_s kann durch einen bilinear elastisch-plastischen Verlauf gut angenähert werden. Insofern wird nur bei einem Mantelreibungspfahl ein echter Bruchzustand in dem Sinne erreicht, dass keine Laststeigerung mehr möglich ist.

Es gilt

$$R = R_b(s) + R_s(s) \quad (2.1)$$

und im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)

$$R = R_{ult} = R_g = R_b + R_s = q_b \cdot A_b + \sum_i q_{s,i} \cdot A_{s,i} \quad (2.2)$$

Je mehr Fußwiderstandsanteil vorhanden ist, umso weniger kann ein Bruchzustand der beschriebenen Art zustande kommen, siehe Abb. 2.2. Um dennoch Widerstände für

den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) angeben zu können, hat sich auch international als Hilfskriterium eine Grenzsetzung nach Gl. 2.3 durchgesetzt.

$$s_{ult} = s_g = 0,1 \cdot D \tag{2.3}$$

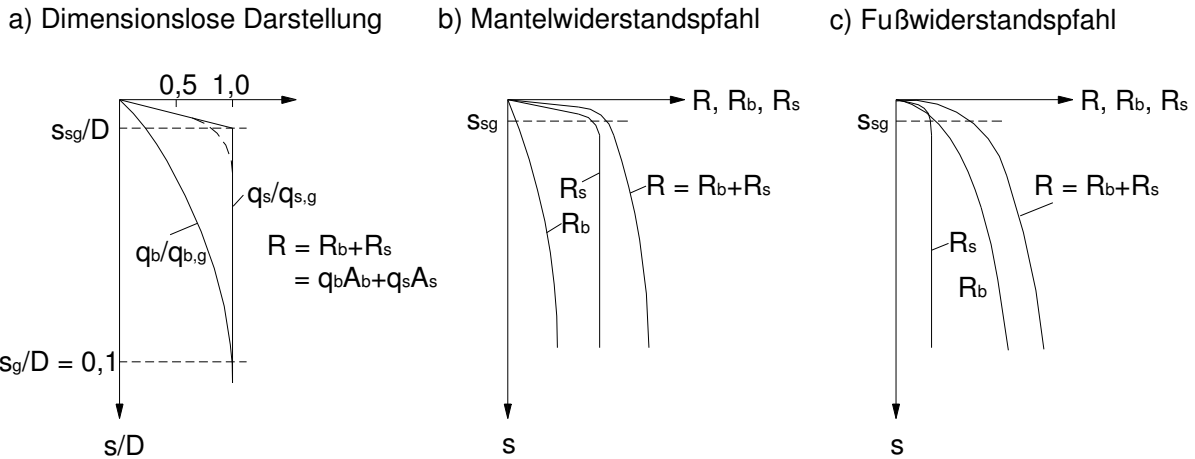


Abb. 2.2: Qualitativer Verlauf der Widerstands-Setzungslinien von Pfahlfußwiderstand und Mantelwiderstand sowie Unterscheidungen bei Mantelwiderstands- und Fußwiderstandspfählen, aus [8]

2.3 Durchmesserabhängigkeit des Pfahlsitzendrucks

Insbesondere Franke [5] hat die Durchmesserabhängigkeit des Pfahlsitzendrucks herausgearbeitet, was mit den in der 2. Hälfte des letzten Jahrhunderts aufkommenden Großbohrpfählen eine zunehmende Bedeutung hatte, siehe hierzu beispielhaft Abb. 2.3.

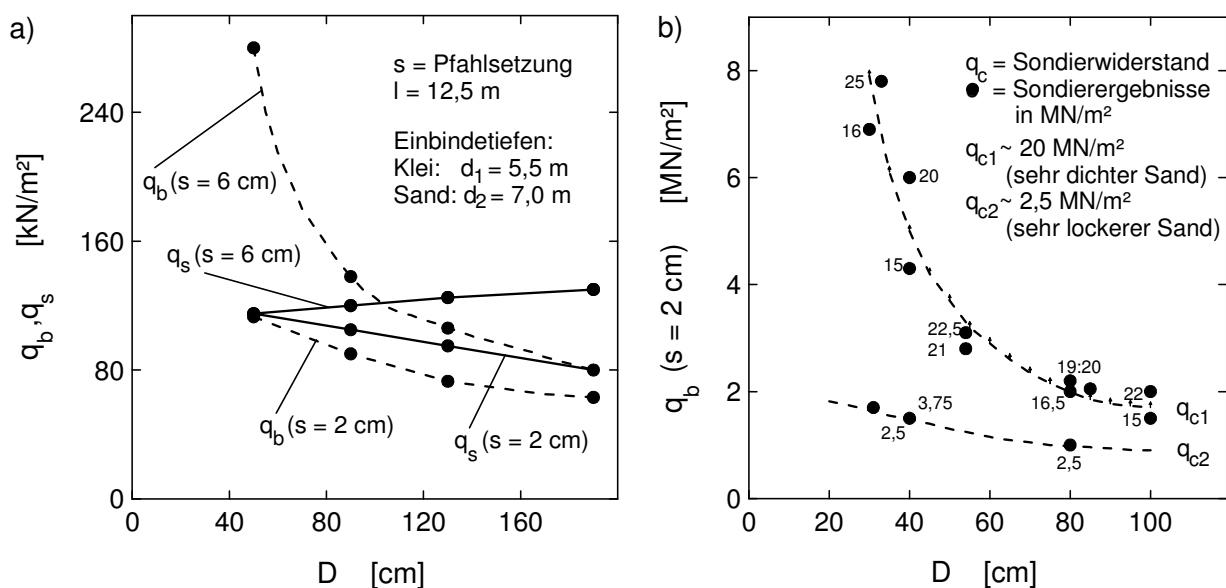


Abb. 2.3: *Durchmesserabhängigkeit des Pfahlspitzendrucks q_b nach: a) Ergebnissen aus Berechnungen mit der FEM (nach [9]) für Pfähle in Sand bei Setzungen $s = 2$ cm und $s = 6$ cm, wobei die Mantelreibung nur untergeordnet durchmesserabhängig ist; b) Probelastungsergebnissen von Bohrpfählen im Sand (nach [10]) bezogen auf Setzungen $s = 2$ cm aber unterschiedliche Baugrundfestigkeit*

2.4 Empirische und erdstatische Verfahren

2.4.1 In nichtbindigen Böden anhand von Drucksondierungen

Die nachfolgend angesprochenen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) empirischen und erdstatischen Verfahren wurden und werden vereinzelt in der nationalen Pfahlbemessungspraxis verwendet, z. B. auch im Offshore-Bereich, usw. Umfangreichere Zusammenstellungen finden sich u. a. auch in [8], [15].

Besonders das Verfahren nach Abschnitt 2.4.5 war national im Hafenbau verbreitet.

2.4.2 In nichtbindigen Böden anhand von Drucksondierungen

Für die Ermittlung des Pfahlspitzendrucks wird in den meisten Fällen der mittlere charakteristische Sondierwiderstand der Drucksonde q_c in Höhe des Pfahlfußes oder in einem definierten Bereich um den Pfahlfuß verwendet und mit einem empirischen Faktoren ω_b abgemindert. Dieser Faktor berücksichtigt global die verschiedenen Einflüsse auf den Spitzendruck des Verdrängungspfahls.

$$q_b = \omega_b \cdot q_c \quad (2.4)$$

Die Verfahren zur Ermittlung der charakteristischen Pfahlmantelreibung auf der Grundlage von Drucksondierungsergebnissen können in zwei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe nutzt als Eingangsgröße für die Berechnung den gemittelten charakteristischen Sondierwiderstand q_c , siehe Gl. (2.5), die Verfahren der zweiten Gruppe legen die gemessene lokale Mantelreibung f_s der Sonde zu Grunde.

$$q_s = \omega_{s,q} \cdot q_c \quad (2.5)$$

In den Abb. 2.4 und 2.5 sind einige der gebräuchlichen Faktoren ω für die Gl. (2.4) und (2.5) vergleichend dargestellt.

Weitere detaillierte Ausführungen dazu siehe [8], [15].

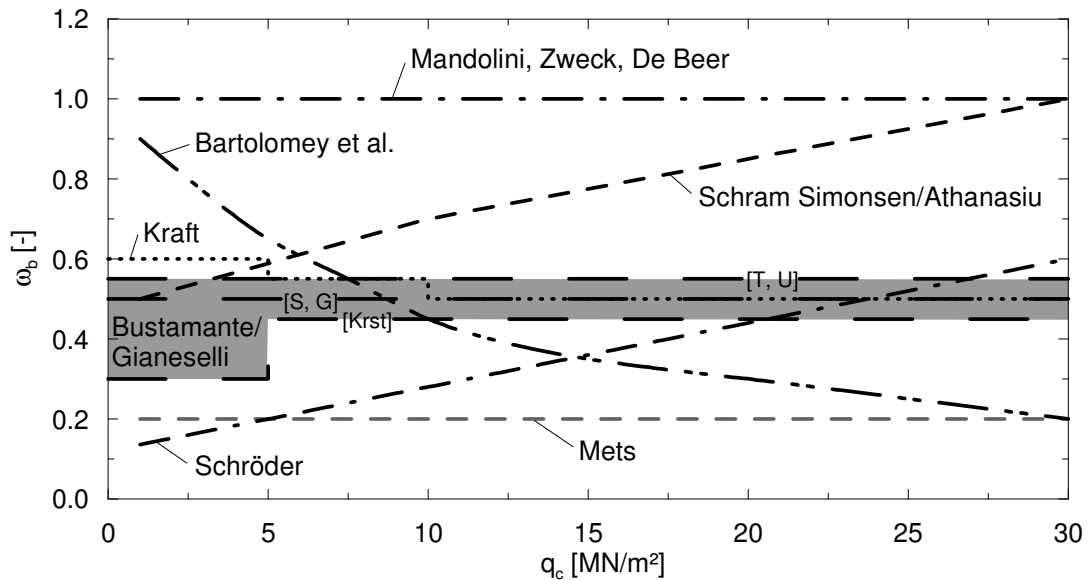


Abb. 2.4: Zusammenstellung der Faktoren ω_b nach verschiedenen Literaturquellen, aus [8], [15]

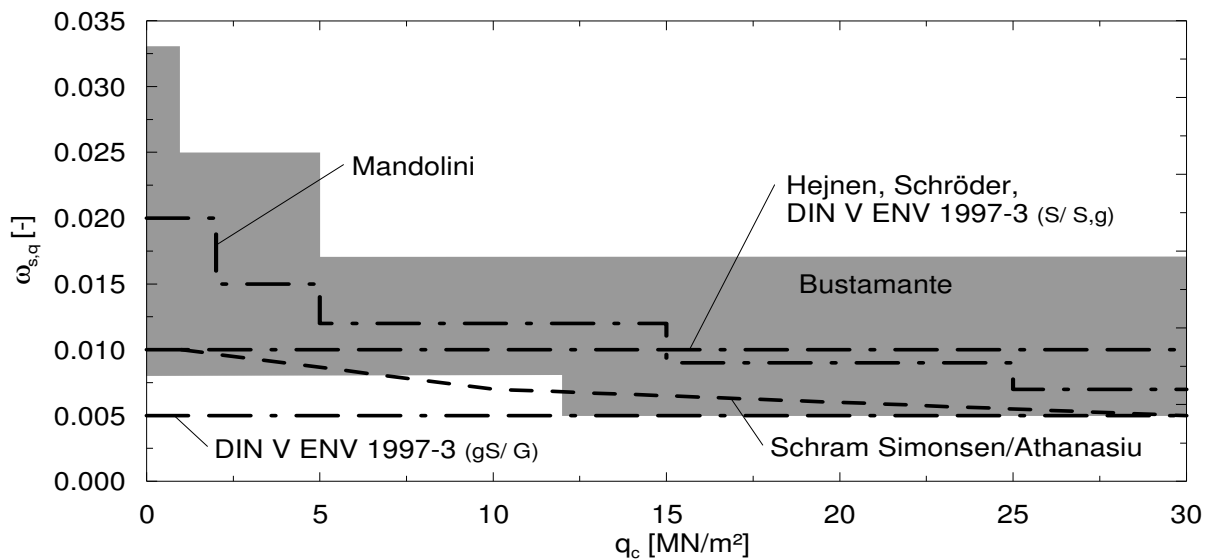


Abb. 2.5: Zusammenstellung der Faktoren $\omega_{s,q}$ nach verschiedenen Literaturquellen, aus [8], [15]

2.4.3 In bindigen Böden anhand der undrännierten Kohäsion

Bei der Ermittlung von Spitzendruck und Mantelreibung für bindige Böden auf der Grundlage der Scherfestigkeit des undrännierten Bodens c_u (α -Methode) handelt es sich um ein semi-empirisches Verfahren auf der Grundlage von totalen Scherparametern. Der Pfahlspitzendruck eines Verdrängungspfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann nach Gl. (2.6) bestimmt werden für Pfähle mit $d/D \geq 3$ (d = Einbindetiefe in die tragfähige Schicht, D = Pfahldurchmesser).

$$q_b = \alpha_b \cdot c_u = 9 \cdot c_u \quad (2.6)$$

Die Pfahlmantelreibung wird nach Gl. (2.7) über den Adhäsionskoeffizienten α_s ebenfalls direkt mit der Scherfestigkeit des undrännierten Bodens korreliert.

$$q_s = \alpha_s \cdot c_u \quad (2.7)$$

Gebräuchliche Werte für den Adhäsionskoeffizienten α_s sind in Abb. 2.6 zusammengestellt.

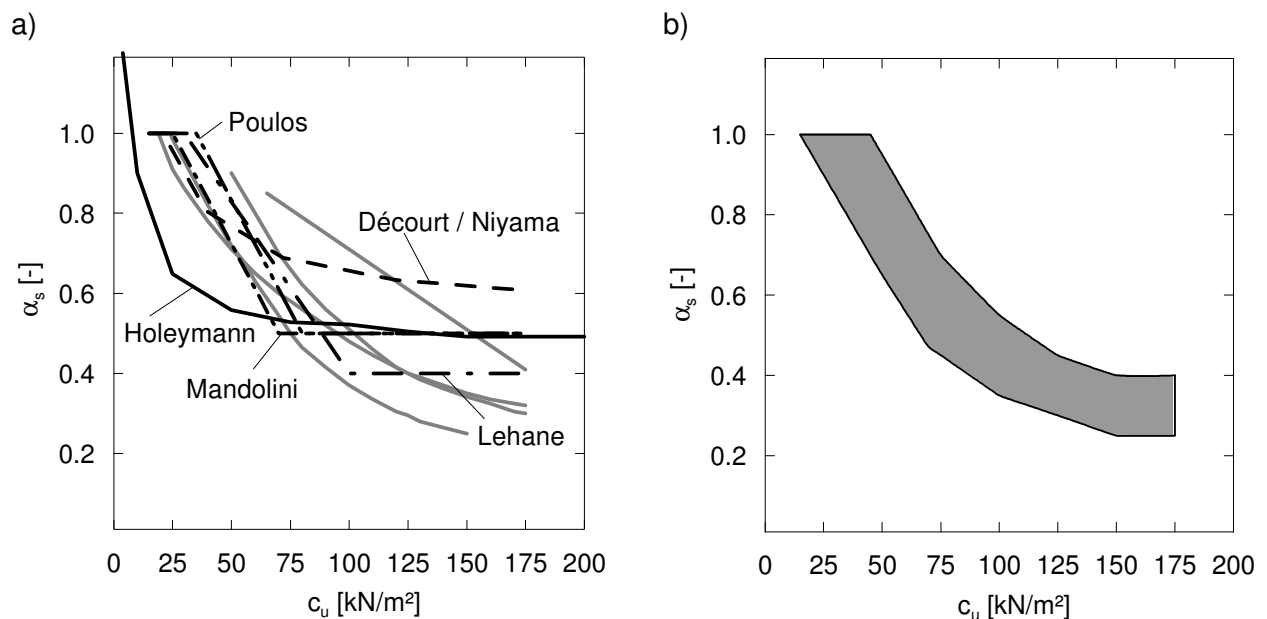


Abb. 2.6: Zusammenstellung Zusammenhang zwischen dem Adhäsionskoeffizienten α_s und der Scherfestigkeit des undrännierten Bodens c_u , aus [8]

2.4.4 Verfahren mit effektiven Spannungen

Bei den Verfahren mit effektiven Spannungen wird der Spitzendruck häufig mit modifizierten Grundbruchformeln ermittelt.

Die Ermittlung der Pfahlmantelreibung geht ursprünglich von einem Festigkeitsansatz (Reibung δ und Adhäsion c_a) in der Fuge Pfahl-Boden aus, mit der Normalspannung $\sigma'_x = K \cdot \sigma'_z$.

$$q_s = \sigma'_x \cdot \tan \delta + c_a = K \cdot \sigma'_z \cdot \tan \delta + c_a \quad (2.8)$$

Ein vereinfachter Ansatz, der sowohl in Sand als auch in Tonböden angewendet wird, lautet

$$q_s = \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi' \cdot K = \gamma \cdot z \cdot \beta \quad (2.9)$$

Dabei wird häufig wegen der geringen Abhängigkeit der Gl. (2.8) von φ'

$$\beta = K \cdot \tan \varphi' = K_0 \cdot \tan \varphi' = (1 - \sin \varphi) \cdot \tan \varphi' \approx 0,25 \quad (2.10)$$

für nichtbindige und normalkonsolidierte bindige Böden verwendet.

2.4.5 Verfahren nach Schenck

Im norddeutschen Raum wurden in der Vergangenheit häufig die in [11] angegebenen Werte für q_b und q_s verwendet, siehe auch [8].

3 Tragfähigkeitsangaben in den Pfahlnormen mit Globalsicherheiten

Als zentrale Grundbaunorm in Deutschland lag bekanntlich die DIN 1054 vor, die sich in allen Ausgaben auch mit der Tragfähigkeit von Pfählen beschäftigt hat. In der 1. Ausgabe aus dem Jahr 1934 finden sich nur die kurzen Ausführungen: „Bei Pfahlgründungen ist stets die Tragfähigkeit der Pfähle an Hand von Erfahrungswerten für den anstehenden Baugrund (Fußwiderstand, Mantelreibung) oder, wenn solche nicht vorliegen, durch Probelastungen nachzuprüfen.“ Dabei entwickelte sich die Pfahlnormung in Deutschland historisch entsprechend Tabelle 1 [12].

Tabelle 1: Verschiedene Ausgaben von Normen in Deutschland mit Inhalten zur Pfahltragfähigkeit auf der Grundlage Globalsicherheiten

	Zul. Belastung des Baugrundes	Ramppfähle	Bohrpfähle	
			Normale Bohrpfähle	Großbohrpfähle
1934	DIN 1054:1934-08			
1940	DIN 1054:1940-08			
1953	DIN 1054:1953-10			
1960		DIN 4026:1960-12		
1969	DIN 1054:1969-11		DIN 4014:1969-11	
1975		DIN 4026:1975-08	DIN 4014/1:1975-08	
1976	DIN 1054:1976-11			
1977				DIN 4014/2:1977-09
1990			DIN 4014:1990-03	

Die zulässige Pfahlbelastung zul. Q ergab sich bekanntlich, indem die Grenzlast Q_g nach Gleichung (3.1) durch eine globale Sicherheit η nach Tabelle 2 dividiert wird.

$$\text{zul. } Q = \frac{Q_g}{\eta} \quad (3.1)$$

Tabelle 2: Globalsicherheitsbeiwerte η nach DIN 1054:1976-11 (dort Tabelle 8) für Pfähle

Pfährlart	Anzahl der unter gleichen Verhältnissen ausgeführ- ten Probelastungen	Sicherheit bei Lastfall		
		1	2 mindestens	3
Druckpfähle	1	2	1,75	1,5
	≥ 2	1,75	1,5	1,3
Zugpfähle mit Neigungen bis 2:1 ¹⁾	1	2	2	1,75
	≥ 2	2	1,75	1,5
Zugpfähle mit einer Neigung bis 1:1 ¹⁾	≥ 2	1,75	1,75	1,5

Pfähle mit größerer Wechselbeanspruchung (Zug und Druck)	≥ 2	2	2	1,75
¹⁾ Bei Zugpfählen mit Neigungen zwischen 2:1 und 1:1 ist die Sicherheit in Abhängigkeit vom Neigungswinkel geradlinig zwischen den Werten der Zeilen 3 und 4 zu interpolieren				

Besonders hinzuweisen ist auf die Untersuchungen von Petermann/ Lackner / Schenck [13] für Rammpfähle, die letztlich mit nur geringen Modifikationen in die Tragfähigkeitsangaben der über viele Jahrzehnte gültigen Norm DIN 4026:1975-08 eingeflossen sind. Dabei ist zu beachten, dass bei diesen Angaben der Globalsicherheitsbeiwert seinerzeit mit $\eta = 1,5$ angegeben wurde, was vereinzelt dazu führte, dass die im Vergleich zu Pfahlprobelastungen anzusetzenden zulässigen Belastungen der Norm nur knapp bestätigt wurden. Insbesondere scheinen die in der Norm angegebenen Rammpfahltragfähigkeiten für bindige Böden nicht immer auf der sicheren Seite zu liegen.

4 Teilsicherheitskonzept und Europäische Pfahlnormung

4.1 DIN 1054:2005-01

Nach der DIN 1054:2005-01 auf der Grundlage des Teilsicherheitskonzeptes wird der charakteristische Widerstand $R_{1,k}$ entweder aus dem Mittelwert oder dem Mindestwert der Versuchsergebnisse der Pfahlprobelastungen durch Division mit einem Streufaktor ξ zwischen 1,00 und 1,15 bei statischen Probelastungen bestimmt.

Die Bemessungswerte für Pfahldruckwiderstände ergeben sich bekanntlich dann aus

$$R_{1,d} = R_{1,k} / \gamma_{Pc} \quad (4.1)$$

mit γ_{Pc} aus Tabelle 3. Im Fall der Ableitung von Zugpfahlwiderständen ist γ_{Pc} durch γ_{Pt} zu ersetzen. Sinngemäß ist bei der Ableitung aufgrund von Erfahrungswerten zu verfahren.

Tabelle 3: Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände bei Pfahlprobelastungen und bei Anwendung von Erfahrungswerten nach DIN 1054:2005-01 (dort Tabelle 3)

Widerstand	Formelzeichen	Lastfall		
		LF 1	LF 2	LF 3

GZ 1B: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken und Bauteilen				
Pfahldruckwiderstand bei Probelastung	γ_{Pc}	1,20	1,20	1,20
Pfahlzugwiderstand bei Probelastung	γ_{Pt}	1,30	1,30	1,30
Pfahlwiderstand auf Zug und Druck aufgrund von Erfahrungswerten	γ_P	1,40	1,40	1,40

4.2 Eurocode EC 7-1 / DIN 1054:2010-12

In ähnlicher Weise wie in Abschnitt 4.1 ausgeführt, geht Eurocode EC 7-1/DIN 1054-2010-12 vor. Dabei liegen die Streuungsfaktoren ξ allerdings deutlich höher zwischen 1,00 und 1,35 bei statischen Probelastungen. Demgegenüber liegen die Teilsicherheitsbeiwerte gemäß Tabelle 4 niedriger und folgen den Vorgaben von EC 7-1.

Tabelle 4 Teilsicherheitsbeiwerte γ_R für Widerstände bei Pfahlgründungen nach Eurocode EC 7-1 (Zeile 2–5) und nationale Ergänzungsvorschläge (Zeile 6–7); aufgenommen in DIN 1054:2010-12

	Widerstand	Symbol	Werte R2
Pfahlwiderstände aus statischen und dynamischen Pfahlprobebelastungen	Pfahlfußwiderstand	γ_b	1,10
	Pfahlmantelwiderstand (Druck)	γ_s	1,10
	Gesamtwiderstand (Druck)	γ_t	1,10
	Pfahlmantelwiderstand (Zug)	$\gamma_{s,t}$	1,15
Pfahlwiderstände auf Grundlage von Erfahrungswerten ¹⁾	Druckpfähle	$\gamma_b, \gamma_s, \gamma_t$	1,40
	Zugpfähle (nur in Ausnahmefällen)	$\gamma_{s,t}$	1,50

¹⁾ Die Teilsicherheitsbeiwerte für Erfahrungswerte enthalten bereits Modellfaktoren, siehe DIN 1054:2010-12

4.3 Vergleichsuntersuchen zu den verschiedenen Regelungen

Die in Eurocode EC 7-1 / DIN 1054:2010-12 nunmehr gewählte Art der Ermittlung des Grenzwertes von Pfahlwiderständen unterscheidet sich deutlich von den bisherigen

Regelungen DIN 1054:1976-11, die sich durch ihre langjährige Anwendung bei der Bemessung von Pfählen in der Praxis bewährt haben. Die DIN 1054:2005-01 ist zwar im Vorgriff auf den Eurocode EC 7-1 formal ähnlich vorgegangen, enthält aber vollkommen andere Zahlenwerte für die Teilsicherheitsbeiwerte und die Streuungsfaktoren

In einer umfangreichen Studie [16] wurden Vergleichsuntersuchungen zur Ableitung von Streuungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerten für Pfahlwiderstände aus Ergebnissen von Probelastungen und Erfahrungswerten nach den unterschiedlichen Normen durchgeführt.

Zur Kalibrierung von Streuungsfaktoren in Verbindung mit Teilsicherheitsbeiwerten bei Pfahlgründungen wurden in [16] umfangreiche Untersuchungen mit folgenden drei Schwerpunkte durchgeführt:

- a) Vergleichsberechnungen bezüglich der Standsicherheit mit vorgegebenen Streuungsfaktoren.
- b) Vergleichsberechnungen mit vorgegebenem Mittelwert und variabler Streuung an fiktiven Pfahlprobelastungsergebnissen.
- c) Vergleichsberechnungen für reale Pfahlprobelastungsergebnisse.

In Abb. 4.1 ist auszugsweise der Ergebnisvergleich der unterschiedlichen Normenregelungen exemplarisch für „weiche“ Fertigrammpfähle aus Stahlbeton wiedergegeben. Zum direkten Vergleich sind die Pfahltragfähigkeiten im Grenzzustand der Tragfähigkeit $R_{c,k}$ mit durchgezogenen Linien und die zulässigen Belastungen $zul. F_k$ mit ausgefüllten Balken für die untersuchten Baufelder dargestellt. Die Abszisse des Balkendiagramms enthält Angaben zur Anzahl der untersuchten Probelastungsergebnisse n , dem Variationskoeffizienten und der Abweichung vom Mittelwert. Die Nummer unter der Abszisse kennzeichnet unterschiedliche Baufelder, die in [16] näher beschrieben sind.

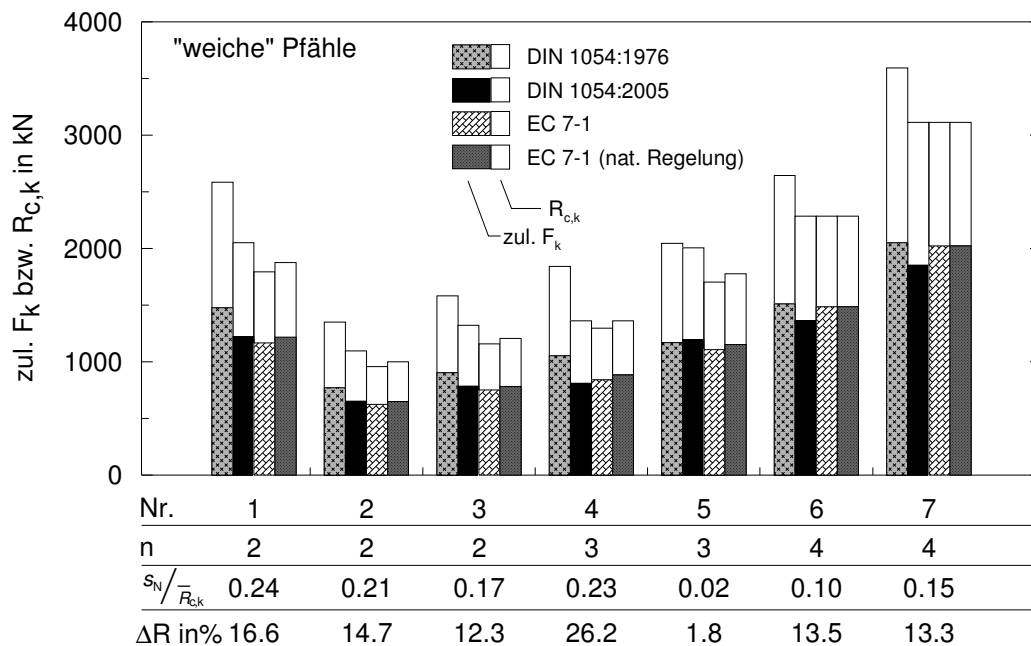


Abb. 4.1: Beispiel zu den vergleichenden Pfahlwiderständen und zulässige Belastungen von Fertigrammpfählen (Stahlbeton) bei „weichen“ Pfählen und $\gamma_{G,Q} = 1,40$ aus verschiedenen statischen Probelastungen, aus [16]

Die national modifizierten Regelungen in EC 7-1 / DIN 1054:2010-12 führen insgesamt zu etwa vergleichbaren Resultaten wie die bisherige DIN 1054:2005-01. Die Vorzüge des Verfahrens nach Eurocode EC 7-1 liegen in der konsequenten Verringerung der Streuungsfaktoren mit zunehmender Anzahl der Probelastungen, wodurch der Aufwand, mehrere Probelastungen durchzuführen „belohnt“ wird. Gleichzeitig ergeben sich bei dieser Herangehensweise keine technisch unplausiblen Sprünge bei den berechneten zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$, wie dies in den bisherigen Regelungen der DIN 1054:2005-01 und der DIN 1054:1976-11 der Fall war.

5 EA-Pfähle der DGGT

5.1 Zielsetzung

Mit der bauaufsichtlichen Einführung der DIN EN 1997-1 (Eurocode EC 7-1) voraussichtlich im Jahr 2012 sind nur noch geringe Möglichkeiten vorhanden, nationale technische Vorstellungen und Erfahrungen in die europäische Normung einzubringen. Der Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der DGGT, der in Personalunion auch Normenausschuss NA005-05-07 „Pfähle“ ist, hat die europäische und nationale Situation der Normung für die Pfahlthematik zum Anlass genommen, analog zu EAB, EAU, EBGE0 usw. die maßgeblichen besonders national geprägten Erfahrungen und Festle-

gungen verstreut in unterschiedlichen Publikationen in Form einer DGGT-Empfehlung unter dem Titel „EA-Pfähle“ [18] zusammenzufassen. Die Empfehlungen wurden in 2007 im Verlag Ernst & Sohn, Berlin, als Sammelband in 1. Auflage veröffentlicht. Eine 2. Auflage auf der Grundlage von Eurocode EC 7-1 / DIN 1054:2010-12 erscheint in der 2. Jahreshälfte 2011.

5.2 Gliederung und Inhalte

Die Hauptabschnitte der DGGT-Empfehlung EA-PFÄHLE sind folgende:

- 1 Einleitung und Anwendungsgrundlagen der Empfehlungen
- 2 Pfahlsysteme
- 3 Grundsätze zu Entwurf und Berechnung von Pfahlgründungen
- 4 Einwirkungen und Beanspruchungen
- 5 Tragverhalten und Widerstände von Einzelpfählen
- 6 Standsicherheitsnachweise
- 7 Berechnung von Pfahlrosten
- 8 Berechnung und Nachweise von Pfahlgruppen
- 9 Statische Pfahlprobelastungen
- 10 Dynamische Pfahlprobelastungen
- 11 Qualitätssicherung bei der Bauausführung
- 12 Pfahl-Integritätsprüfungen

Anhang A: Tabellen und Verfahren

Anhang B: 13 Berechnung- und Auswertungsbeispiele

Anhang C: 5 Fallbeispiele zur dynamischen Pfahlprobelastung und Integritätsprüfung

5.3 Angaben zur Pfahltragfähigkeit aufgrund von Erfahrungswerten

Eurocode EC 7-1 / DIN 1054:2010-12 enthalten keine zahlenmäßigen Angaben mehr über charakteristische Werte von Pfahlspitzendruck und Mantelreibung. Diese finden sich nunmehr in der EA-Pfähle, worauf die DIN 1054:2010-12 auch hinweist. Für die in der EA-Pfähle enthaltenden zahlreichen Tabellenwerten liegen umfangreiche statistische Auswertungen an der Universität Kassel von durchgeführten Pfahlprobelastungen zugrunde, siehe z.B. [17]. Dabei wurden deskriptive und analytische statistischen Methoden zur Ableitung der Pfahltragfähigkeiten aus Erfahrungswerten verwendet.

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 Probebelastung folgende Angaben:

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

Weitere Details zur Auswertung und zu den Randbedingungen siehe [17].

Nachfolgend sind einige Kriterien aus den empirischen Untersuchungen vergleichend bewertet. Zur Verdeutlichung werden in Abb. 5.1 die zusammengefassten Ergebnisse der ausgewerteten Probebelastungen $R_{1,m}$ und die aus den statistischen Untersuchungen abgeleiteten Erfahrungswerte $R_{1,cal}$ der verschiedenen Pfahlsysteme gegenübergestellt. Vergleicht man die Spitzendrücke der einzelnen Pfahlsysteme aus Abb. 5.2a untereinander, so lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Art der Pfahlherstellung und der Systeme sowie deren Tragfähigkeiten erkennen. Rammpfähle haben im Allgemeinen einen größeren Spitzenwiderstand, da infolge des Einrammens in den Baugrund eine Verdrängung und Verdichtung des Bodens unterhalb der Pfahlspitze erfolgt. In nicht-bindigen Böden können für Fertigrammpfähle und Simplexpfähle infolge der vergleichbaren Herstellungsverfahren beider Pfahlsysteme einheitliche Erfahrungswerte angegeben werden. Demgegenüber weisen die Rammpfähle im Unterschied zu anderen Pfahlsystemen eine geringere Bruchmantelreibung auf, siehe Abb. 5.2b und 5.3.

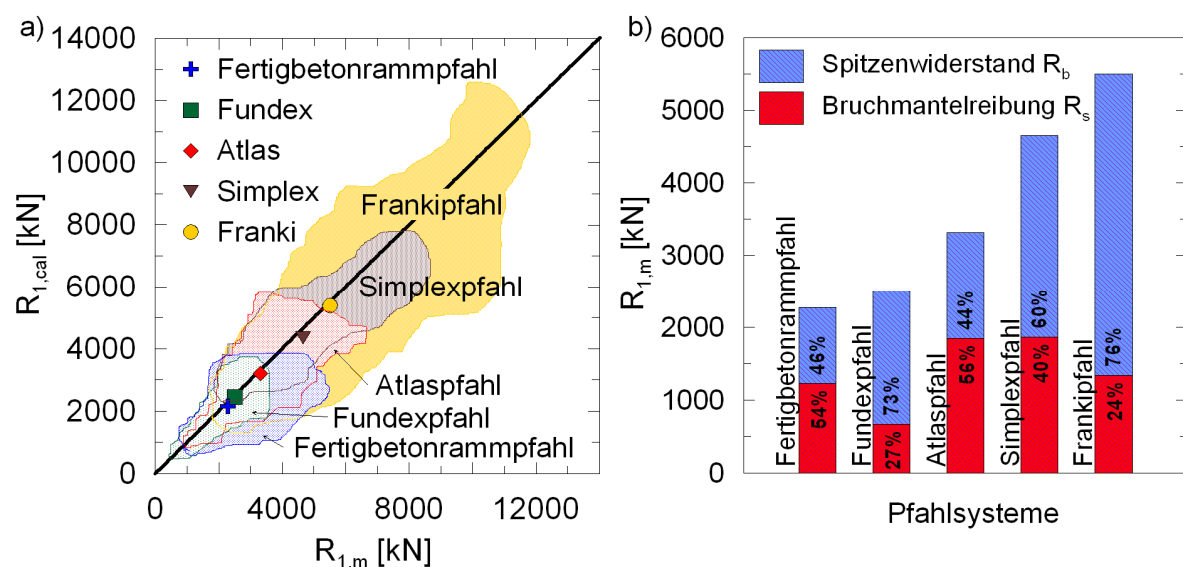


Abb. 5.1: a) Vergleich der Gesamttragfähigkeiten (Symbole = Mittelwerte) und b) mittlere Aufteilungsverhältnisse der verschiedenen Pfahlsysteme aus den untersuchten Pfahlprobelbelastungen, aus [17]

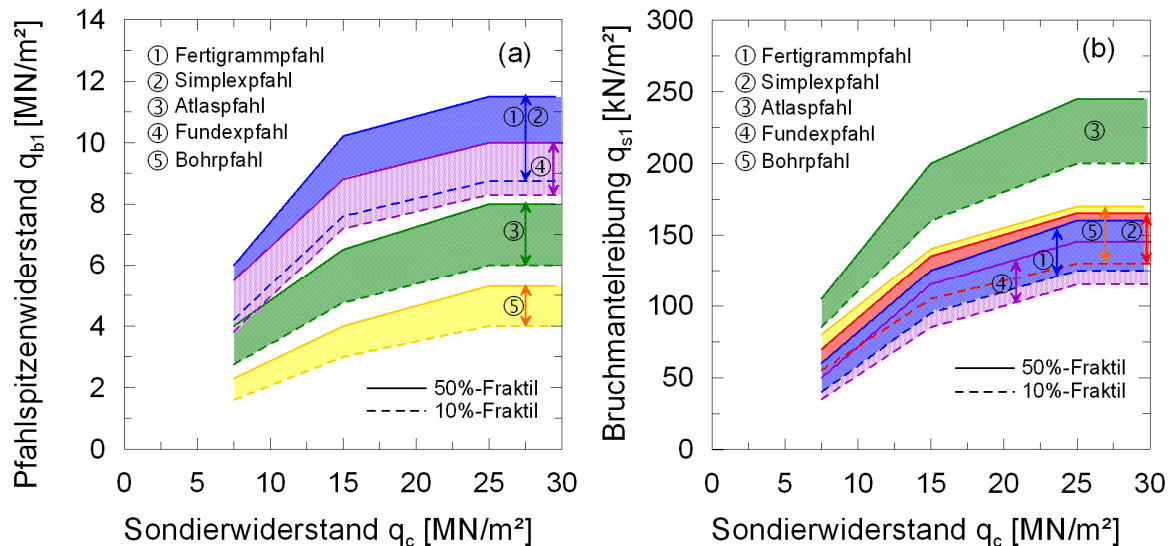


Abb. 5.2: Obere und untere Erfahrungswerte für a) Pfahlspitzenwiderstand und b) Bruchmantelreibung in nichtbindigen Böden, aus [17]

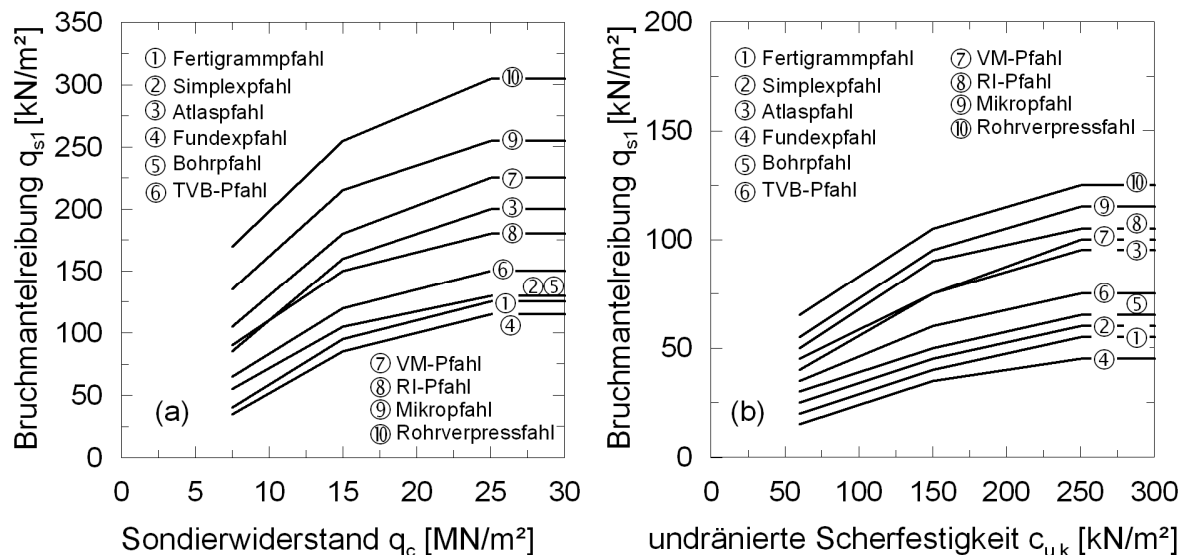


Abb. 5.3: Untere Erfahrungswerte der Bruchmantelreibung in a) nichtbindigen Böden und b) bindigen Böden, aus [17]

Der Verdrängungs- und Verdichtungseffekt des Herstellungsverfahrens von Fundexpfählen, die durch eine drehende und drückende Bewegung abgeteufelt werden, führt im Vergleich zu den gerammten 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 Baugrundes 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 [18].

Die durchgeführten Untersuchungen liefern empirisch weitgehend abgesicherte Spannen von Erfahrungswerten für den Pfahlspitzenwiderstand (neu wieder als Pfahlspitzendruck bezeichnet) und die Pfahlmantelreibung in Abhängigkeit der Baugrundverhältnisse für die derzeit überwiegend in der Baupraxis 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.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die in EA-Pfähle aufgeführten Bedingungen für die Anwendung der Spannen der Erfahrungswerte der Pfahltragfähigkeiten sorgfältig eingehalten werden sollten und regionale Erfahrungen mit zu berücksichtigen sind. Dazu empfiehlt sich i.d.R. immer die Einschaltung eines Sachverständigen für Geotechnik.

Literatur

- [1] De Beer, E. (1945): Etudes des fondation sur pilotis et de fondations direct. Annales de Travaux Publics de Belgique, 46.
- [2] Berezantzev, V. G., Khristoforov, V. S. und Golubkov, V. N.: Load bearing capacity and deformation of piled foundations; V ICSMFE, Volume 2, Paris, 1961, pp. 11–15.
- [3] Meyerhof, G. G. (1951): The ultimate bearing capacity of foundations. Geotechnique 4.
- [3] Skempton, A. W.: The bearing capacity of clays. Proc. of the Building Research Congress, div. I, London 1951, p. 180.
- [4] Vesic, A. S.: Bearing capacity of deep foundations in sand. Highway Research Record (39), 1963, p. 112.
- [5] Franke, E. (1976): Die Tragfähigkeit von Pfählen in Abhängigkeit von Pfahldurchmesser und ihre Ermittlung mit Sonden in nichtbindigen Böden. Mitt. der Degebo, Heft 32, 1976.
- [6] Franke, E. (1977): Übersicht über die Tätigkeit des Arbeitskreises 5 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG) In: Stand von Normung, Bemessung und Ausführung von Pfählen und Pfahlwänden. DGEG Eigenverlag, S. 15-25.
- [7] Franke, E. (1997): Abschnitt 3.3 „Pfähle“. Grundbautaschenbuch, 5. Auflage, Teil 3, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [8] Kempfert, H.-G. (2009): 3.2 Pfahlgründungen. In: Grundbau-Taschenbuch, Teil 3, 7. Auflage. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 73-277.
- [9] Meißner, H. und Wibel, A. R.: Sandverformungen und Spannungsverteilungen in der Umgebung von Bohrpfählen. Vortragsband der Baugrundtagung Frankfurt, DGEG Essen 1974, S. 449–470.
- [10] Muhs, H.: Versuche mit Bohrpfählen. 2. Auflage, Bauverlag Wiesbaden/Berlin 1967.
- [11] Schenck, W. (1966): Pfahlgründungen. Grundbau-Taschenbuch, 2. Auflage, Ernst&Sohn.
- [12] Weinhold, H. (1977): Wandel und Entwicklung bei der Bemessung und Ausführung von Pfählen. In: Vortragsband Symposium „Stand von Normung, Bemessung und Ausführung von pfählen und Pfahlwänden“ in München (DGEG), S. 9-14.
- [13] Petermann, Lackner, Schenck (1967): Tragfähigkeit von Pfählen. Großversuche und ihre Auswertung. 2. Versuchsreihe 1958-59, Berichte aus der Bauforschung, H. 49, Ernst u. Sohn, Berlin.
- [14] Tomlinson, M. J. (1994): Pile design and construction practice; 4th edition, E & FN Spon, Chapman & Hall, London.
- [15] Witzel, M. (2004): Zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von vorgefertigten Verdrängungspfählen in bindigen und nichtbindigen Böden. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 15.
- [16] Kempfert, H.-G., Hörtkorn, F. und Becker, P. (2008): Ableitung von Streuungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerten für Pfahlwiderstände aus Ergebnissen von Probelastungen und Erfahrungswerten für den Eurocode EC 7-1 – Kalibrierung

- am bisherigen deutschen Sicherheitsstandard –. Forschungsbericht Universität Kassel für das DIBt, IRB Verlag, Stuttgart.
- [17] Kempfert, H.-G. und Becker, P. (2007): Grundlagen und Ergebnisse der Ableitung von axialen Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten für die EA-Pfähle. Bautechnik 84 (2007), Heft 7, S. 441–449.
- [18] EA-Pfähle (2007): Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, Verlag Ernst & Sohn.