

# Jahresbericht 2014 des Arbeitskreises „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)

## 1 Allgemeines

Der bereits 1952 gegründete Arbeitskreis 2.1 „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) bearbeitet traditionell alle im Zusammenhang mit der Bemessung und Ausführung von Pfählen maßgeblichen technischen Fragestellungen. Die Arbeitsergebnisse fließen in nationale Normen und Empfehlungen ein. Gleichzeitig ist der Arbeitskreis Spiegelausschuss für die europäische Normung zu Pfählen und wirkt an ihrer Fortentwicklung aktiv mit. Im Arbeitskreis 2.1 „Pfähle“ sind im Hauptausschuss derzeit 24 Experten aus Ingenieurbüros, Bauunternehmen, Wissenschaft und Forschung sowie Öffentlicher Hand bzw. Bauaufsicht aktiv tätig. Zusätzlich besteht ein Unterausschuss „Dynamische Pfahlprüfungen“ mit 19 Mitgliedern und ein Unterausschuss „KPP- und Pfahlgruppen-Gründungen“ sowie eine Unterausschuss „Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen“.

Der Arbeitskreis 2.1 „Pfähle“ der DGGT arbeitet in Personalunion als Normenausschuss NA 005-05-07 AA „Baugrund – Pfähle“. Der Aufgabenschwerpunkt des Normenausschusses liegt hinsichtlich der Berechnung und Bemessung von Pfählen in der Bearbeitung und Fortschreibung des Pfahlabschnittes im Normenhandbuch Eurocode 7, Teil 1. Der Ausschuss hat ferner die Aufgabe, die europäischen Ausführungsnormen DIN EN 1536 (Bohrpfähle), DIN EN 12699 (Verdrängungspfähle) und DIN EN 14199 (Mikropfähle) als nationaler Spiegelausschuss zu begleiten und die nationalen Anwendungsdokumente zu formulieren. Der Normenausschuss „Baugrund – Pfähle“ ist zudem Spiegelausschuss zu TC 341/WG4 und WG7 und damit für die derzeit entstehenden internationalen Normen zur Prüfung und Probelastung von Pfählen zuständig.

Der Arbeitskreis 2.1 „Pfähle“ hat 2007 in einer ersten Auflage die „Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle“, kurz „EA-Pfähle“, veröffentlicht, um die für die Planung, die Bemessung und die Ausführung von Pfählen bestehenden Empfehlungen und Regelwerke zu bündeln und fortzuschreiben. Die Empfehlungen haben sich schnell als Standardwerk etabliert. 2012 wurde die zweite, ergänzte und erweiterte Auflage der „EA-Pfähle“ veröffentlicht. In der knapp 500 Seiten umfassenden zweiten Auflage wurde u.a. ein neues Kapitel zum Pfahltragverhalten und den Nachweisformen von Pfählen unter veränderli-

chen Einwirkungen aufgenommen, das insbesondere für das Tragverhalten von Pfählen unter zyklischen Einwirkungen, wie sie u.a. bei Windenergieanlagen, aber auch im Verkehrswegebau häufig maßgebend werden, erstmals Empfehlungen enthält.

Der Arbeitskreis „Pfähle“ wird aufbauend auf der „EA-Pfähle“ zukünftig regelmäßig Technische Jahresberichte veröffentlichen, um über aktuelle Entwicklungen in der Normung sowie neue Empfehlungen zeitnah zu berichten. Mit diesem Technischen Jahresbericht 2014 wird der erste Jahresbericht veröffentlicht, mit dem Änderungen und Ergänzungen der „EA-Pfähle“, 2. Auflage, seit deren Veröffentlichung 2012 bekannt gemacht werden.

Als weiteres ordentliches Mitglied des Arbeitskreises „Pfähle“ wurde seit 2012 Herr Dr.-Ing. K. BECKHAUS, Schrobenhausen, berufen.

## 2 Neues aus der Pfahl-Normung

Zur Vorbereitung der nächsten Ausgabe des Eurocode 7 finden auf europäischer Ebene, hier im CEN/TC250/SC7, vorbereitende Arbeiten statt, in deren Rahmen innerhalb sogenannter Evolution Groups Anregungen zur Überarbeitung und Ergänzung der bestehenden Regelungen erarbeitet werden. Herr Prof. MOORMANN ist seit 2011 Convenor (Obmann) der Evolution Group 7 „Pile Foundations“, so dass eine enge Verzahnung zwischen nationaler und europäischer Normungsarbeit gewährleistet ist. Mit einer neuen Ausgabe des Eurocode 7 ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht vor 2019/20 zu rechnen, gleichwohl können Veränderungen im deutschen Interesse, insbesondere auch hinsichtlich Straffung und Benutzerfreundlichkeit, nur durch eine frühzeitige kontinuierliche Mitarbeit erreicht werden. In diesem Zusammenhang hat der Arbeitskreis „Pfähle“ auch eng mit der Initiative „Praxis-Regeln-Bau“ zusammengearbeitet.

Da alle Festlegungen zum Frischbeton und dessen Materialien in der Neuausgabe der Beton-Norm DIN EN 206 gebündelt werden, wurde eine Überarbeitung der EN 1536 „Ausführung von geotechnischen Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle“, erforderlich. Das einstufige Annahmeverfahren (UAP) für die neue EN 1536 hat begonnen und wird am 15.03.2015 enden. Im Rahmen der Änderung von DIN EN 1536 muss DIN SPEC 18140 „Ergänzende Rege-

lungen zu DIN EN 1536“ ebenfalls angepasst werden, wobei geplant ist, dass anstelle der DIN SPEC 18140 zukünftig ein nationales Vorwort tritt, nachdem es unter aktiver Mitwirkung von Mitgliedern des deutschen Normenausschusses „Pfähle“ im europäischen Ausschuss CEN/TC 288 gelungen ist, maßgebende ergänzende Festlegungen der DIN SPEC 18140 in die neue EN 1536 zu übernehmen, so dass der Umfang ergänzender deutscher Regelungen deutlich reduziert werden konnte.

Die Normen EN 12699 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Verdrängungspfähle“ und EN 14199 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Pfähle mit kleinem Durchmesser (Mikropfähle)“ wurden innerhalb der CEN/TC 288/WG 16 überarbeitet. Als wesentliche Änderung der neuen Normen ist zu berücksichtigen, dass zukünftig alle Verdrängungspfähle, auch jene mit Querschnittsabmessungen unter 150 mm, in EN 12699 genormt sind. Beide Manuskripte werden Ende 2014 zum Formal Vote gestellt, so dass mit einer deutschsprachigen Veröffentlichung im Laufe des Jahres 2015 zu rechnen ist.

Der deutsche Normenausschuss hat den europäischen Antrag auf Reaktivierung des Normungsprojekts EN ISO 22477-1 „Geotechnical investigation and testing – Testing of geotechnical structures – Part 1: Pile load test by static axially loaded compression“ im April 2014 abgelehnt, da eine Notwendigkeit, dieses Thema auf europäischer Ebene zu normen, nicht gesehen wird.

Im CEN/TC 341/WG 7 wird an einer neuen Norm EN ISO 22477-10 „Rapid Load Testing“ gearbeitet; der deutsche Normenausschuss hat im April 2014 einen auf europäischer Ebene vorgelegten Normen-Entwurf aus fachlichen Gründen abgelehnt.

### 3 Ergänzungen und Korrekturen der EA-Pfähle, 2. Auflage, 2012

#### 3.1 Englische Ausgabe der EA-Pfähle

Im Berichtszeitraum hat der Arbeitskreis „Pfähle“ mit großem Engagement eine englischsprachige Fassung der „EA-Pfähle“ erarbeitet mit dem Ziel, die deutschen Erfahrungen und Empfehlungen auch international zugänglich zu machen und zu etablieren. Die englischsprachige Ausgabe ist unter dem Titel „Recommendations on Piling (EA-Pfähle)“ im Herbst 2013 im Verlag Ernst & Sohn erschienen.

#### 3.2 Korrekturen in der EA-Pfähle, 2. Auflage

Eine Tabelle mit Korrekturen wurde erstellt und kann auf der Internetseite des Verlags Ernst & Sohn ([http://www.ernst-und-sohn.de/sites/default/files/uploads/produkte/buecher/erratum/Erratum-EAPfaehle\\_2Aufl\\_Stand\\_Mai\\_2014.pdf](http://www.ernst-und-sohn.de/sites/default/files/uploads/produkte/buecher/erratum/Erratum-EAPfaehle_2Aufl_Stand_Mai_2014.pdf)) abgerufen werden.

### 3.3 Negative Mantelreibung

Im Abschnitt 4.4.2 Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus negativer Mantelreibung sind hinsichtlich der Ermittlung des neutralen Punktes im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) und im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) folgende Modifikationen zu berücksichtigen:

#### 4.4.2 Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus negativer Mantelreibung

(10) Für die Bestimmung der Tiefenlage des neutralen Punktes im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und somit der Größe der charakteristischen Einwirkung  $F_{n,k}(SLS)$  wird empfohlen, die Verformungen des den Pfahl umgebenden Bodens, i. d. R. für den Endzustand, also unter Berücksichtigung von Konsolidations- und Kriechverformungen  $s_{\text{p}} s_{\text{Boden}}$ , mit charakteristischen Größen zu bestimmen.

Ein Verformungsvergleich der Pfahlsetzungen  $s_{\text{Pfahl}}$  mit den Setzungen der umgebenden Weichschicht  $s_{\text{p}} s_{\text{Boden}}$  ergibt die Lage des neutralen Punktes.

(11) Im Grenzzustand der Tragfähigkeit („äußere“ Pfahltragfähigkeit) wird zur Ermittlung des neutralen Punktes und somit der Größe der charakteristischen Einwirkung  $F_{n,k}(ULS)$  empfohlen, die Festlegung der Setzung  $s_{\text{Pfahl}} = s_g = s_{\text{ult}}$  des Pfahles im Grenzzustand der Tragfähigkeit entsprechend Kapitel 5 je nach gewählter Pfahltragfähigkeitsermittlung vorzunehmen.

Ein Verformungsvergleich von  $s_{\text{Pfahl}} = s_g = s_{\text{ult}}$  mit den Setzungen der umgebenden Weichschichten  $s_{\text{p}} s_{\text{Boden}}$  ergibt die Lage des neutralen Punktes für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ULS, der in einer anderen Tiefenlage als im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit SLS liegen kann.

#### 4.4.3 Ermittlung der Bemessungsgrößen der Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und Nachweisführung

(3) „Äußere“ Pfahltragfähigkeit:

a) Gebrauchstauglichkeit (SLS): Die charakteristische Einwirkung  $F_{n,k}(SLS)$  und die Lage des neutralen Punktes ergeben sich aus dem Verformungsverhalten der Pfahlsetzung  $s$  mit den Setzungen der Weichschicht  $s_{\text{p}} s_{\text{Boden}}$ . Der Bemessungswert der Beanspruchung lautet:

$$F_d = F_k = F_{G,k} + F_{n,k}(SLS) + F_{Q,rep} \quad (4.3)$$

b) Tragfähigkeit (ULS): Die charakteristische Einwirkung  $F_{n,k}(ULS)$  und die Lage des neutralen Punktes ergibt sich aus dem Verformungsvergleich der Pfahlset-

zung  $s_{\text{Pfahl}} = s_g = s_{\text{ult}}$  mit den Setzungen der Weichschicht  $s_{\text{Boden}}$ . Die Lage des neutralen Punktes liegt dabei i. d. R. höher als beim Grenzzustand ULS-SLS, da die fiktive Pfahlsetzung  $s_{\text{Pfahl}} = s_{\text{ult}}$  größer ist als  $s(\text{SLS})$  (außer z.B. bei Pfählen auf Fels). Der Bemessungswert der Beanspruchung lautet:

$$F_d = (F_{G,k} + F_{n,k}(\text{ULS})) \cdot \gamma_G + F_{Q,\text{rep}} \cdot \gamma_Q \quad (4.4)$$

### 3.4 Fertigrammpfähle

Der axiale Pfahlwiderstand von offenen Profilen, also von Stahlrohrpfählen und einfachen oder doppelten Stahlträgerprofilen, konnte bisher nach den Empfehlungen der EA-Pfähle, Abs. 5.4.4, und alternativ nach den Empfehlungen der EAU, Abs. 2.2.4, auf der Grundlage von Erfahrungswerten ermittelt werden. Vergleichend angewendet führten die in diesen beiden Empfehlungen dokumentierten, auf – insbesondere hinsichtlich der Propfenbildung – unterschiedlichen Modellen beruhenden Ansätze jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen, die in der Ingenieurpraxis zu Unsicherheiten beim Anwender führten.

Basierend auf statistischen Auswertungen werden in der EA-Pfähle, 2012, Abs. 5.4.4, Erfahrungswerte für Fertigrammpfähle in bindigen und nichtbindigen Böden für ein 10 % Quantil (unterer Wert) und ein 50 % Quantil (Mittelwert) vorgegeben. Über Modellfaktoren werden diese Erfahrungswerte auf unterschiedliche Pfahltypen (einfache und doppelte Stahlträgerprofile, offene Stahlrohre und Hohlkästen) übertragen. Diese Modellfaktoren werden für den Pfahlmantelwiderstand und den Pfahlfußwiderstand jeweils in Abhängigkeit des Verhältnisses der Höhe des Stahlträgerflansches  $h$  zur Flanschbreite  $b_F$  bzw. in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers formuliert. Dabei wird rechnerisch der Pfahl fiktiv als unten geschlossen betrachtet und eine Pfropfenbildung vorausgesetzt („Modell 1“). Der Anwendungsbereich ist bei den Stahlrohrpfählen auf den Pfahldurchmessern bezogen und liegt zwischen  $0,3 \text{ m} \leq D \leq 1,6 \text{ m}$ . Bei den Stahlträgerprofilen liegt der Anwendungsbereich bei  $b_F \leq 0,5 \text{ m}$  und  $h/b_F \leq 1,5$ .

Die EAU 2012, Abs. 2.2.4, nannte bisher ebenfalls Erfahrungswerte für Pfahlspitzendruck in der Profilaufstandsfläche und Pfahlmantelreibung für nichtbindige Böden. Die Erfahrungswerte sind nach EAU für Pfahldurchmesser ab  $D \geq 0,8 \text{ m}$  und für einfache und doppelte Stahlträgerprofile mit einer Flanshhöhe von  $h > 0,5 \text{ m}$  gültig. Die darin abgeleitete Pfahlmantelreibung dürfen auf alle Außen- und Innenflächen angesetzt werden, sofern eine Pfropfenbildung ausgeschlossen werden kann, wobei Kriterien zur Überprüfung einer Pfropfenbildung nicht formuliert wurden. Die innenliegende Pfahlmantelfläche ist auf 80 % der Einbindelänge in den tragfähigen Baugrund zu reduzieren („Modell 2“).

Mit den nachfolgend dokumentierten Regelungen werden aufbauend auf Untersuchungen von LÜKING & BE-

CKER [1] beide Berechnungsverfahren miteinander harmonisiert, indem letztlich zwischen den beiden vorgenannten Modellen interpoliert wird. Hierzu wurden basierend auf einer Datenbank mit dynamischen und statischen Pfahlprobelastungsergebnissen mit statistischen Methoden neue Erfahrungswerte zur Tragfähigkeitsberechnung abgeleitet. Hierbei wird die Pfropfenbildung über einen vereinfachten Berechnungsansatz in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers berücksichtigt. Aufgrund der großen Datenmenge kann dieses Verfahren als weitgehend abgesichert angesehen werden und wird für beide Regelwerke zur Anwendung empfohlen.

Im Ergebnis wurde der Abschnitt 5.4.4 „Fertigrammpfähle“ wie folgt neu gefasst:

#### 5.4.4 Fertigrammpfähle

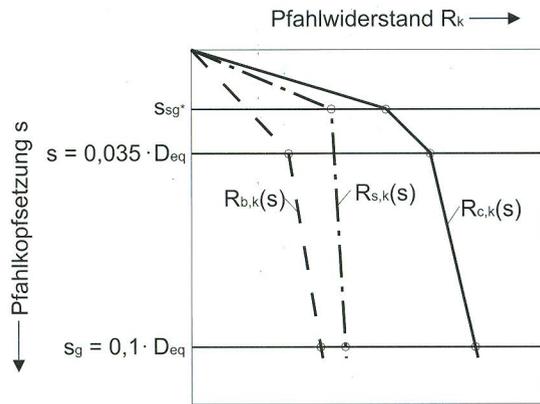
##### 5.4.4.1 Allgemeines

(1) Im Folgenden sind Angaben zum charakteristischen Pfahlspitzendruck und der Pfahlmantelreibung aus Erfahrungswerten für Fertigrammpfähle aufgrund von neueren Untersuchungen in Anlehnung an [57] zusammengestellt und Anwendungshinweise gegeben. Unter Fertigrammpfählen werden nach DIN EN 12699:2001-05 vorgefertigte Beton-, Stahl-, Holz- und Gusseisenpfähle verstanden, siehe auch 2.2.2.

*Anmerkung:* Eine Änderung in der Darstellung und in den Berechnungsgleichungen und Tabellen für die axialen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten von Fertigrammpfählen gegenüber den Festlegungen in der EA-Pfähle, 2. Auflage (2012), ist darin begründet, für offene Stahlrohr- und Stahlträgerpfähle eine Abstimmung mit den Festlegungen in der EAU [c] für vergleichbare Pfahlarten zu erreichen. Siehe hierzu auch [a].

(2) Die nachfolgenden Tabellenwerte gelten nicht für Holz- und Gusseisenpfähle. Die Tragfähigkeit von Holzpfählen darf auf der Grundlage von DIN 4026:1975-08 abgeschätzt werden. Für Gusseisenpfähle sind die Pfahlwiderstände auf der Grundlage von statischen Probelastungen nach 5.2 oder anhand von vergleichbaren Pfahlprobelastungen nach 5.2.1 (3) und (4) zu ermitteln.

(3) In Bild 5.4 sind die Elemente der charakteristischen Widerstands-Setzungs-Linie nach den Vorschlägen von [57] bis zu einer Setzung von  $s_{\text{ult}} = s_g$  für vorgefertigte Verdrängungspfähle (Fertigrammpfähle) dargestellt. Bezüglich  $s_{\text{ult}}$  und  $s_g$  siehe 5.2.2 (3).



**Bild 5.4** Elemente der charakteristischen Widerstands-Setzungs-Linie für Fertigrampfpfähle

(4) Es ist zu unterscheiden zwischen dem setzungsabhängigen Pfahlfußwiderstand  $R_b(s)$  und dem Pfahlmantelwiderstand  $R_s(s)$ .

(5) Für  $R_{b,k}(s_{ult} = s_g)$  gilt die Grenzsetzung analog zu Gl. (5.1):

$$s_{ult} = s_g = 0,10 \cdot D_{eq} = 0,10 \cdot D_b \quad (5.3)$$

Dabei ist:

$D_b$  der Fußdurchmesser runder Pfähle [m];  
 $D_{eq}$  der äquivalente Durchmesser des Pfahlfußes [m] anderer Pfahlquerschnittsflächen.

Für quadratische und rechteckige Fertigteilpfähle wird der äquivalente Pfahlfußdurchmesser nach Gl. (5.4) berechnet.

$$D_{eq} = 1,13 \cdot a_s \quad (5.4a)$$

für quadratische Pfähle und

$$D_{eq} = 1,13 \cdot a_s \cdot \sqrt{a_L/a_s} \quad (5.4b)$$

für rechteckige Pfähle

mit:

$a_s$  Seitenlänge eines Pfahls mit quadratischem Querschnitt bzw. Länge der kleineren Seite des Querschnitts bei rechteckigen Fertigteilpfählen;  
 $a_L$  Länge der größeren Seite des Querschnitts bei rechteckigen Fertigteilpfählen.

(6) Für  $R_{s,k}(s_{sg*})$  in MN gilt bei Mobilisierung des Bruchzustands eine charakteristische Setzung:

$$s_{sg*} [cm] = 0,5 \cdot R_{s,k}(s_{sg*}) [MN] \leq 1 [cm] \quad (5.5)$$

#### 5.4.4.2 Erfahrungswerte von Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung von Fertigrampfpfählen aus Stahlbeton, Spannbeton und geschlossenen Stahlrohrpfählen

(1) Die in Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.4 angegebenen Erfahrungswerte von Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung gelten für

- vorgefertigte Stahlbeton- und Spannbeton-Rampfpfähle von  $D_{eq} = 0,25$  bis  $0,50$  m unter Verwendung von Modellfaktoren für den Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung von  $\eta_b = 1,00$  und für die Pfahlmantelreibung von  $\eta_s = 1,00$  für Gl. (5.6);
- geschlossene Stahlrohrpfähle mit einem Durchmesser bis  $800$  mm unter Verwendung von Modellfaktoren für den Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung von  $\eta_b = 0,80$  und für die Pfahlmantelreibung von  $\eta_s = 0,80$  für Gl. (5.6),

die mindestens  $2,50$  m in eine tragfähige Schicht einbinden.

Die Tabellenwerte gelten für gerammte Fertigpfähle. Für einvibrierte Pfähle müssen die Tabellenwerte abgemindert werden. Da bei einvibrierten Pfählen vereinzelt erhebliche Tragfähigkeitsreduzierungen festgestellt wurden, siehe z. B. [92], ist der Betrag der Abminderung durch den geotechnischen Sachverständigen zu bestätigen. Für die Spitzenwertwerte entfällt die Abminderung, wenn der Pfahl auf den letzten  $8 \cdot D_{eq} \leq 4$  m in den tragfähigen Boden gerammt wird.

(2) Die Tabellenwerte sind abhängig

- vom über die Tiefe gemittelten Spitzenwiderstand  $q_c$  der Drucksonde bei nichtbindigen Böden und
- von der Scherfestigkeit des undrännierten Bodens  $c_{u,k}$  bei bindigen Böden.

(3) Bei der Festlegung des maßgebenden mittleren Spitzenwiderstandes  $q_c$  der Drucksonde bzw. der charakteristischen undrännierten Scherfestigkeit  $c_{u,k}$  ist zwischen dem

- für den Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung maßgebenden Bereich ( $1 \cdot D_{eq}$  ober- bis  $4 \cdot D_{eq}$  unterhalb des Pfahlfußes) und dem
- für die Pfahlmantelreibung maßgebenden Bereich (Mittelwert der betreffenden Schicht)

des Bodens zu unterscheiden. Hat die Bodenschichtung einen großen Einfluss auf den Spitzenwiderstand der Drucksonde bzw. auf die undrännierte Scherfestigkeit, dann sind für die Pfahlmantelreibung zwei oder mehr mittlere Bereiche getrennt festzulegen.

(4) Für die Anwendung der Werte nach Tabelle 5.1 und Tabelle 5.3 wird vorausgesetzt, dass

- die Mächtigkeit der tragfähigen Schicht unterhalb der Pfahlfußfläche nicht weniger als fünf Pfahlersatzfußdurchmesser, mindestens aber 1,50 m beträgt und
- in diesem Bereich  $q_c \geq 7,5 \text{ MN/m}^2$  bzw.  $c_{u,k} \geq 100 \text{ kN/m}^2$  nachgewiesen ist.

Unabhängig davon wird empfohlen, die Pfahlfüße bei nichtbindigen Böden in Bereiche mit  $q_c \geq 10 \text{ MN/m}^2$  abzusetzen.

(5) Wenn die genannten geometrischen Werte unterschritten werden, ist ein Nachweis gegen Durchstanzen zu führen. Außerdem ist dann nachzuweisen, dass der darunter liegende Boden das Setzungsverhalten nicht maßgeblich beeinträchtigt.

(6) Bei näherungsweise Anwendung der Tabellen 5.1 bis 5.5 auf gemischtkörnige Böden dürfen die Definitionen für bindige und nichtbindige Böden nach Handbuch EC 7-1 [44] bzw. 3.3 angewendet werden. Für die Anwendung der Tabellenwerte auf gemischtkörnige Böden sollte 5.4.2 (5) besonders sorgfältige Beachtung finden.

(7) Zu den Anwendungsbedingungen der Tabellenwerte siehe auch 5.4.3.

**Tabelle 5.1** Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzendruck  $q_{b,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden

Bezogene Pfahlkopfsetzung	Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde [MN/m <sup>2</sup> ]		
s/D <sub>eq</sub>	7,5	15	25
0,035	2.200 – 5.000	4.000 – 6.500	4.500 – 7.500
0,100	4.200 – 6.000	7.600 – 10.200	8.750 – 11.500

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

**Tabelle 5.2** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in nichtbindigen Böden

Setzung	Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde in [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	25
$s_{sg}^*$	30 – 40	65 – 90	85 – 120
$s_{sg} = s_g = 0,1D_{eq}$	40 – 60	95 – 125	125 – 160

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

**Tabelle 5.3** Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzendruck  $q_{b,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden

Bezogene Pfahlkopfsetzung	Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undrained Bodens [kN/m <sup>2</sup> ]		
s/D <sub>eq</sub>	100	150	250
0,035	350 – 450	550 – 700	800 – 950
0,100	600 – 750	850 – 1.100	1.150 – 1.500

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

**Tabelle 5.4** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton und Spannbeton in bindigen Böden

Setzung	Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undrained Bodens [kN/m <sup>2</sup> ]		
	60	150	250
$s_{sg}^*$	20 – 30	35 – 50	45 – 65
$s_{sg} = s_g = 0,1D_{eq}$	20 – 35	40 – 60	55 – 80

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

*Anmerkung:* Für die Angaben bei Fertigrampfpfählen in bindigen Böden nach den Tabellen 5.3 und 5.4 liegt nur eine geringe Datenbasis von Pfahlprobelastungen vor. Insofern wurden die Erfahrungswerte vorsichtig gewählt und ergeben i.d.R. kleinere Pfahlwiderstände als sie z.B. in der alten DIN 4026:1975-08 pauschal ausgewiesen sind. Außerdem lag den Werten der DIN 4026 ein niedriger vergleichbarer Global-sicherheitsbeiwert von  $\eta \approx 1,5$  gegenüber heutigen Regelungen zugrunde.

(8) Die charakteristische axiale Pfahlwiderstandskraft ist aus dem Ansatz

$$R_{c,k}(s) = R_{b,k}(s) + R_{s,k}(s) = \eta_b \cdot q_{b,k} \cdot A_b + \sum_i \eta_s \cdot q_{s,k,i} \cdot A_{s,i} \quad (5.6)$$

zu ermitteln. Dabei ist:

- $A_b$  der Nennwert der Pfahlfußfläche;
- $A_{s,i}$  der Nennwert der Pfahlmantelfläche in der Schicht  $i$ ;
- $q_{b,k}$  der charakteristische Wert des Pfahlspitzendrucks, abgeleitet nach Tabelle 5.1 und 5.3;
- $q_{s,k,i}$  der charakteristische Wert der Pfahlmantelreibung in der Schicht  $i$ , abgeleitet nach Tabelle 5.2 und 5.4;
- $\eta_b$  der Modellfaktor des Pfahlspitzendrucks nach (1) für Gl. (5.6);
- $\eta_s$  der Modellfaktor der Pfahlmantelreibung nach (1) für Gl. (5.6);
- $R_{c,k}(s)$  der setzungsabhängige charakteristische Druckpfahlwiderstand;

- $R_{b,k}(s)$  der setzungsabhängige charakteristische Pfahlfußwiderstand;
- $R_{s,k}(s)$  der setzungsabhängige charakteristische Pfahlmantelwiderstand;
- $s_{sg}^*$  die charakteristische Setzung bei der die Mobilisierung der Bruchmantelreibung für den setzungsabhängigen charakteristischen Pfahlmantelwiderstand beginnt;
- $s_{sg}$  die Grenzsetzung für den setzungsabhängigen charakteristischen Pfahlmantelwiderstand ( $s_{sg} = s_g$ ).

(9) Ein Beispiel für die Ermittlung der charakteristischen Widerstände von Fertigrammpfählen aus Beton enthält Anhang B4.

#### 5.4.4.3 Erfahrungswerte zum Pfahltragverhalten von offenen Stahlrohren, Hohlkästen, Stahlträgerprofilen und doppelten Stahlträgerprofilen

(1) Bei der Rammung von offenen Stahlrohren, Hohlkästen und doppelten Stahlträgerprofilen in nichtbindigen Böden kann sich im Pfahlfußbereich eine Verspannung des eindringenden Bodens zwischen den inneren Mantelflächen einstellen. Dadurch wird eine erhöhte innere Pfahlmantelreibung über eine begrenzte Höhe im Pfahlfußbereich mobilisiert, die auch durchmesserabhängig als Pfropfen bezeichnet werden kann.

(2) Zusätzlich können sich bei Stahlträgerprofilpfählen (einfache und doppelte Stahlträgerprofile) mit geringen Profilhöhen auch Verspannungen zwischen den gegenüberliegenden Innenflanschflächen ergeben, die zu einer erhöhten äußeren Pfahlmantelreibung in diesen Teilflächen führen.

(3) Unabhängig von den Verspannungseffekten innerhalb des offenen Pfahlprofils und der sich dabei ausbildenden inneren Pfahlmantelreibung nach (1) und (2) sowie weiterer Einflussfaktoren auf das Pfahltragverhalten bei den verschiedenen Profilformen, sind in der vorliegenden Empfehlung vereinfachte Nachweisverfahren für die Ermittlung der charakteristischen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für offene Stahlrohr- und Hohlkastenprofile sowie Stahlträgerprofilpfählen auf der Grundlage von statistischen Auswertungen vorliegender Pfahlprobelastungen, vergleichbar wie in 5.4.3 dargestellt, angegeben.

(4) Aufgrund von Modellunsicherheiten wird für die innere Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  von offenen Stahlrohren und Hohlkästen im Bruchzustand bei Setzungen nach Gl. (5.3) näherungsweise nur der halbe Wert der äußeren Pfahlmantelreibung  $q_s$  angesetzt.

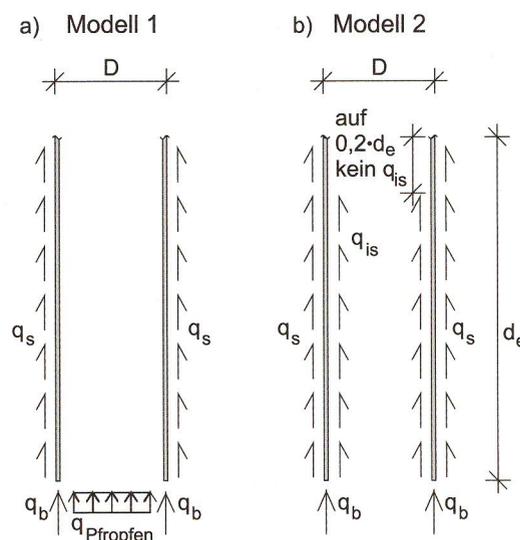
*Anmerkung:* Diese Vorgehensweise der Aufteilung von innerer und äußerer Pfahlmantelreibung darf ohne weitere Nachweise bei

der Auswertung von Pfahlprobelastungen nicht angewendet werden, da die wirkliche Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung stark abhängig ist vom Pfahldurchmesser und Verspannungseffekten.

(5) Die innere Pfahlmantelreibung verringert sich mit zunehmendem Pfahldurchmesser und abnehmender Lagerungsdichte. Eine hohe Dilatanz des nichtbindigen Bodens wirkt sich dagegen positiv auf die Größe der inneren Pfahlmantelreibung aus.

(6) Weitere Hinweise zum Lastabtrag im Pfropfen sowie eine Literaturzusammenstellung finden sich in [85], [86], [b].

(7) Bei den nachfolgend dargestellten vereinfachten Nachweisverfahren zur axialen Tragfähigkeit aus Erfahrungswerten liegen die beiden Modellvorstellungen nach Bild 5.5a zugrunde. Zu den Modellen und zu den statistischen Auswertungen auf der Grundlage von Pfahlprobelastungen siehe [a]



**Bild 5.5a** Modelle der vereinfachten Nachweisverfahren für offene Rohrpfähle, Hohlkastenpfähle und Trägerpfähle: Modell 1 mit vollständiger Pfropfenbildung und Modell 2 ohne Pfropfenbildung, nach [a]

(8) In Bild 5.5a wird für offene Stahlrohrpfähle und Hohlkastenpfähle bei Modell 1 eine vollständige Pfropfenbildung angesetzt, bei der die äußere Pfahlmantelreibung  $q_s$ , ein Spitzendruck auf die Profilaufstandsfläche  $q_b$  und ein Spitzendruck auf die Unterseite des Pfropfens  $q_{\text{Pfropfen}}$  wirken. Dieses Modell wird für kleine Pfahldurchmesser bis  $D \leq 0,5$  m verwendet. In Modell 2 wird in Bild 5.5a statt des Spitzendrucks auf den Pfropfen eine innere Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  angesetzt. Dabei werden die obersten 20 % der Pfahleinbindetiefe aufgrund von Sackungseffekten während der Pfahleinbringung nicht berücksichtigt. Das Modell 2 wird für Pfahldurchmesser  $D \geq 1,5$  m angewendet. Für doppelte Stahlträgerprofile und näherungsweise

auch für einfache Stahlträgerprofile wird nachfolgend nur das Modell 1 verwendet.

(9) Für die Anwendung der Tabellen 5.5a bis 5.5e gelten die Anwendungsbedingungen nach 5.4.4.1 (3) bis (6) und 5.4.4.2 (2) bis (7) analog. Des Weiteren sollte das hier dargestellte vereinfachte Nachweisverfahren zur axialen Tragfähigkeit von Stahlpfählen nur für Pfahllängen von mindestens 2,5 m bis zu etwa maximal 30 m Einbindung in die tragfähigen Bodenschichten angewendet werden.

*Anmerkung:* Die empirische Datengrundlage für das abgeleitete vereinfachte Verfahren auf der Grundlage von Erfahrungswerten bezieht sich auf Pfahlprobelastungen aus dem üblichen Ingenieurbau und sollte zunächst ohne weitere Untersuchungen nicht auf Offshore-Konstruktionen, z. B. Windkraftwerke, usw., angewendet werden.

(10) Die in den Tabellen 5.5a bis 5.5c angegebenen Erfahrungswerte für Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung von offenen Stahlrohrpfählen, Hohlkastenpfählen und doppelten Stahlträgerprofilpfählen gelten für das Modell 1 nach Bild 5.5a).

(11) Die in den Tabellen 5.5c bis 5.5e angegebenen Erfahrungswerte für Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung von offenen Stahlrohrpfählen und Hohlkastenpfählen gelten für das Modell 2 nach Bild 5.5b).

**Tabelle 5.5a** Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung auf den Pfropfen  $q_{P\text{fropfen},k}$  für offene Stahlrohrpfähle, Hohlkastenpfähle und doppelte Stahlträgerprofilpfähle in nichtbindigen Böden bei Anwendung von Modell 1 nach Bild 5.5a)

Bezogene Pfahlkopfsetzung	Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung auf den Pfropfen $q_{P\text{fropfen},k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	Spitzenwiderstand der Drucksonde $q_c$ [MN/m <sup>2</sup> ]		
$s/D_{eq}$	7,5	15	25
0,035	1.200 – 3.300	2.100 – 4.000	2.500 – 4.750
0,100	2.250 – 4.000	4.000 – 6.250	4.750 – 7.250

**Tabelle 5.5b** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische äußere Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  für offene Stahlrohrpfähle, Hohlkastenpfähle, Stahlträgerprofilpfähle und doppelte Stahlträgerprofilpfähle in nichtbindigen Böden bei Anwendung von Modell 1 nach Bild 5.5a)

Setzung	Äußere Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	Spitzenwiderstand der Drucksonde $q_c$ [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	25
$s_{sg}^*$	15 – 25	35 – 50	40 – 70
$s_{sg} = s_g = 0,1 D_{eq}$	25 – 35	50 – 70	60 – 90

**Tabelle 5.5c** Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung  $q_{b,k}$  für offene Stahlrohrpfähle, Hohlkastenpfähle, Stahlträgerprofilpfähle und doppelte Stahlträgerprofilpfähle in nichtbindigen Böden bei Anwendung von Modell 1 und Modell 2 nach Bild 5.5a)

Bezogene Pfahlkopfsetzung	Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung $q_{b,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	Spitzenwiderstand der Drucksonde $q_c$ [MN/m <sup>2</sup> ]		
$s/D_{eq}$	7,5	15	25
0,035	3.900 – 7.500	7.900 – 11.500	10.300 – 16.300
0,100	7.500 – 9.000	15.000 – 18.000	20.000 – 25.000

**Tabelle 5.5d** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische äußere Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  für offene Stahlrohrpfähle und Hohlkastenpfähle in nichtbindigen Böden bei Anwendung von Modell 2 nach Bild 5.5b)

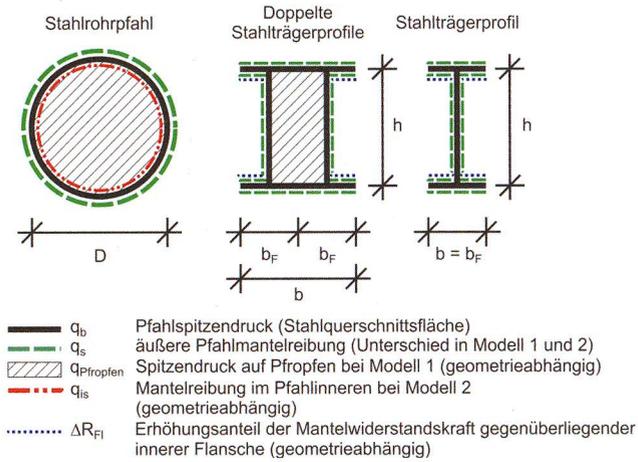
Setzung	Äußere Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	Spitzenwiderstand der Drucksonde $q_c$ [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	25
$s_{sg}^*$	15 – 20	30 – 45	35 – 60
$s_{sg} = s_g = 0,1 D_{eq}$	20 – 30	40 – 60	50 – 80

**Tabelle 5.5e** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische innere Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  für offene Stahlrohrpfähle und Hohlkastenpfähle in nichtbindigen Böden bei Anwendung von Modell 2 nach Bild 5.5b)

Setzung	Innere Pfahlmantelreibung $q_{is,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]		
	Spitzenwiderstand der Drucksonde $q_c$ [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	25
$s_{sg}^*$	5 – 10	10 – 20	15 – 25
$s_{sg} = s_g = 0,1 D_{eq}$	10 – 15	20 – 30	25 – 40

*Anmerkung:* Für die Angaben von offenen Stahlrohrpfählen, Hohlkastenpfählen und Stahlträgerprofilpfählen in bindigen Böden liegt nur eine geringe Datenbasis von Pfahlprobelastungen vor, auf deren Basis noch keine abgesicherten Tabellenwerte für Pfahlspitzen- und Pfahlmantelreibung angegeben werden können. Sollen die hier vorgestellten Verfahren auch für in die nichtbindige Schichten eingelagerte bindige Schichten angewendet werden, sollten Mantelreibungswerte für die bindigen Schichten nach örtlichen Erfahrungen in Abstimmung mit dem Sachverständigen für Geotechnik gewählt werden.

(12) Die bei dem vereinfachten Näherungsverfahren anzusetzenden Nennwerte der Pfahlfußflächen und Pfahlmantelflächen von offenen Stahlrohrpfählen und Stahlträgerprofilpfählen zeigt Bild 5.5b



**Bild 5.5b** Nennwerte der Pfahlfußflächen und Pfahlmantelflächen von offenen Stahlrohrpfählen und Stahlträgerprofilpfählen, nach [a]

(13) Die charakteristische axiale Druckpfahlwiderstandskraft nach Bild 5.4 für das Modell 1 mit  $D = 0,5$  m nach Bild 5.5a für offene Stahlrohrpfähle nach Bild 5.5b ergibt sich aus Gleichung (5.6.a)

$$R_{c,k,\text{Modell 1}}(s) = \eta_{\text{Pfropfen}} \cdot q_{\text{Pfropfen},k} \cdot A_{\text{Pfropfen}} + q_{b,k} \cdot A_b + \sum \eta_s \cdot q_{s,k,j} \cdot A_{s,j} \quad (5.6.a)$$

mit:

$\eta_{\text{Pfropfen}}$	$= 2,52 \cdot e^{-1,85 \cdot D}$ [-]	Modellfaktor Pfropfen, charakteristischer Wert des Pfahlspitzenwerts auf den Pfropfen nach Tabelle 5.5a,
$q_{\text{Pfropfen},k}$		Nennwert der Pfropfenaufstandsfläche [m <sup>2</sup> ],
$A_{\text{Pfropfen}}$		äußerer Pfahldurchmesser in [m],
$D = D_{\text{eq}}$		charakteristischer Wert des Pfahlspitzenwerts der Profilaufstandsfläche nach Tabelle 5.5c,
$q_{b,k}$		Nennwert der Profilaufstandsfläche [m <sup>2</sup> ],
$A_b$		Modellfaktor Mantelreibung,
$\eta_s = 1,53 \cdot e^{-0,85 \cdot D}$ [-]		charakteristischer Wert der äußeren Pfahlmantelreibung in der Schicht j nach Tabelle 5.5b
$q_{s,k,j}$		Nennwert der äußeren Pfahlmantelfläche [m <sup>2</sup> ] in der Schicht j.
$A_{s,j}$		

(14) Die charakteristische axiale Druckpfahlwiderstandskraft nach Bild 5.4 für das Modell 2 mit  $D = 1,5$  m nach Bild 5.5 a für offene Stahlrohrpfähle nach Bild 5.5b ergibt sich aus Gleichungen (5.6.b)

$$R_{c,k,\text{Modell 2}}(s) = q_{b,k} \cdot A_b + \sum q_{s,k,j} \cdot A_s + \sum q_{is,k,j} \cdot A_{is,j} \quad (5.6.b)$$

mit:

$q_{b,k}$	charakteristischer Wert des Pfahlspitzenwerts der Profilaufstandsfläche nach Tabelle 5.5c,
$A_b$	Nennwert der Profilaufstandsfläche [m <sup>2</sup> ],
$q_{s,k,j}$	charakteristischer Wert der äußeren Pfahlmantelreibung in der Schicht j nach Tabelle 5.5d,
$A_{s,j}$	Nennwert der äußeren Pfahlmantelfläche [m <sup>2</sup> ] in der Schicht j,
$q_{is,k,j}$	charakteristischer Wert der inneren Pfahlmantelreibung in der Schicht j nach Tabelle 5.5e,
$A_{is,j}$	Nennwert der inneren Pfahlmantelfläche [m <sup>2</sup> ] in der Schicht j, abzgl. der oberen 20% aufgrund Pfropfenbildung und Sackungseffekten im Pfahlinneren

sowie

$s_{sg}^*$	die charakteristische Setzung, bei der die Mobilisierung der Bruchmantelreibung für den setzungsabhängigen charakteristischen Pfahlmantelwiderstand nach Gl. (5.5) beginnt,
$s_{sg}$	die Grenzsetzung für den setzungsabhängigen charakteristischen Pfahlmantelwiderstand ( $s_{sg} = s_g$ ) nach Gl. (5.3).

(15) Die charakteristische axiale Druckpfahlwiderstandskraft nach Bild 5.4 für offene Stahlrohrpfähle nach Bild 5.5b mit einem Durchmesser  $D = D_{\text{eq}}$  von 0,5 m bis 1,5 m ist aus dem Ansatz (Interpolation)

$$R_{c,k}(s) = \psi \cdot R_{c,k,\text{Modell 1}}(s) + \chi \cdot R_{c,k,\text{Modell 2}}(s) \quad (5.6.c)$$

mit den Gln. (5.6.a) und (5.6.b) zu ermitteln.

Die Interpolationsfaktoren  $\psi$  und  $\chi$  in Gl. (5.6.c) ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} \psi &= 1; & \text{für } D < 0,5 \text{ m,} \\ \psi &= -D + 1,5; & \text{für } 0,5 \text{ m} \leq D \leq 1,5 \text{ m,} \\ \psi &= 0; & \text{für } D > 1,5 \text{ m,} \end{aligned}$$

$D$  = äußerer Pfahldurchmesser in [m],

$$\begin{aligned} \chi &= 0; & \text{für } D < 0,5 \text{ m,} \\ \chi &= -0,52 \cdot D^2 + 2,04 \cdot D - 0,89; & \text{für } 0,5 \text{ m} \leq D \leq 1,5 \text{ m,} \\ \chi &= 1; & \text{für } D > 1,5 \text{ m.} \end{aligned}$$

**Anmerkung:** Eine direkte Interpolation zwischen den berechneten Werten der Pfahlwiderstandskraft nach Modell 1 und Modell 2 für offene Stahlrohrpfähle mit einem Durchmesser  $0,5 \text{ m} < D < 1,5 \text{ m}$  wird nicht empfohlen, da der Interpolationsfaktor  $\chi$  nichtlinear ist und somit maßgebliche Abweichungen aus der linearen Interpolation bezüglich der ermittelten

Pfahlwiderstandskraft insbesondere bei kleineren Durchmessern erfolgen können.

(16) Für offene nicht runde Hohlkästen dürfen die Spannen der Erfahrungswerte nach den Tabellen 5.5a bis 5.5e und den Ansätzen nach (13) bis (15) näherungsweise ebenfalls verwendet werden. Dabei kann ein Ersatzdurchmesser  $D_{eq}$  für ein fiktives Rohrprofil über die Flächengleichheit aus der jeweiligen Pfahlfußfläche bestimmt werden.

(17) Die charakteristische axiale Druckpfahlwiderstandskraft nach Bild 5.5b für einfache und doppelte Stahlträgerprofile mit Flanschbreiten  $b_F$  von 290 mm bis 500 mm und Profilhöhen von 300 mm bis 1000 mm sind aus folgenden Ansätzen zu ermitteln, wobei nur das Modell 1 nach Bild 5.5a verwendet wird:

a) Stahlträgerprofile

$$R_{c,k}(s) = R_{b,k}(s) + R_{s,k}(s) + \Delta R_{Fl,k}(s) \quad (5.6d)$$

$$R_{c,k}(s) = q_{b,k} \cdot A_b + \sum(q_{s,k,j} \cdot A_{s,j}) + \eta \cdot \sum(q_{s,k,i} \cdot A_{s,Fl,j}) \quad (5.6e)$$

b) Doppelte Stahlträgerprofile

$$R_{c,k}(s) = R_{b,k}(s) + R_{Ppropfen,k}(s) + R_{s,k}(s) + \Delta R_{Fl,k}(s) \quad (5.6f)$$

$$R_{c,k} = q_{b,k} \cdot A_b + \eta \cdot q_{Ppropfen,k} \cdot A_{Ppropfen} + \sum(q_{s,k,j} \cdot A_{s,j}) + \eta \cdot \sum(q_{s,k,j} \cdot A_{s,Fl,j}) \quad (5.6g)$$

mit:

$q_{b,k}$	charakteristischer Wert des Pfahlspitzendrucks der Profilaufstandsfläche nach Tabelle 5.5c,
$A_b$	Nennwert der Profilaufstandsfläche [m <sup>2</sup> ],
$q_{s,k,j}$	charakteristischer Wert der äußeren Pfahlmantelreibung in der Schicht j nach Tabelle 5.5.b,
$A_{s,j}$	Nennwert der äußeren Pfahlmantelfläche [m <sup>2</sup> ] in der Schicht j,
$A_{s,Fl,j}$	Nennwert der inneren Flanschmantelfläche [m <sup>2</sup> ] in der Schicht j, nach Bild 5.5b
$\Delta R_{Fl,k}$	Erhöhungsanteil der Mantelwiderstandskraft gegenüberliegender innerer Flanche (geometrieabhängig) nach Bild 5.5b
$q_{Ppropfen,k}$	charakteristischer Wert des Pfahlspitzendrucks bei doppelten Stahlträgerprofilen auf den Ppropfen nach Tabelle 5.5a
$A_{Ppropfen}$	Nennwert der Ppropfenaufstandsfläche [m <sup>2</sup> ], nach Bild 5.5b
$\eta = 0,65 \cdot e^{-2,20 \cdot h \cdot b}$ [-]	Modellfaktor zur Berücksichtigung von Verspannungseffekten nach Gl. (5.6e) und (5.6g)

$h =$	Profilhöhe, mit $300 \text{ mm} < h \leq 1000 \text{ mm}$
$b_F =$	Flanschbreite eines einzelnen Stahlträgerprofils, mit $290 \text{ mm} < b \leq 500 \text{ mm}$
$b =$	Breite des Stahlträgerprofils mit $b = b_F$ bzw. des doppelten Stahlträgerprofils mit $b = 2b_F$

$$D_{eq} = (4hb/\pi)^{0,5} \quad (5.6h)$$

sowie

$s_{sg}^*$  die charakteristische Setzung, bei der die Mobilisierung der Bruchmantelreibung für den setzungsabhängigen charakteristischen Pfahlmantelwiderstand nach Gl. (5.5) beginnt,

$s_{sg}$  die Grenzsetzung für den setzungsabhängigen charakteristischen Pfahlmantelwiderstand ( $s_{sg} = s_g$ ) nach Gl. (5.3).

(18) Zu hohe Rammenergien bei der Pfahlrammung bewirken ein Durchrutschen des Ppropfens von offenen Stahlrohren, Hohlkästen und Stahlträgerprofilen und verringern die Pfahltragfähigkeit. Bei anderen Pfahleinbringmethoden, wie z. B. dem Einpressen oder Einvibrieren, ist ebenfalls eine Verringerung der inneren Pfahlmantelreibung zu erwarten, siehe 5.4.4.2 (1). Bei Verwendung einer Aufdopplung am Pfahlfuß kann ggf. die Rammenergie gesenkt werden, jedoch wird dadurch auch die Pfahlmantelreibung reduziert.

#### Hinzugefügte Literatur

- [a] Lükking, J, Becker, P.: Harmonisierung der Berechnungsverfahren der axialen Tragfähigkeit für offene Profile nach EA-Pfähle und EAU (in: Bautechnik 02/2015).
- [b] Henke, S.: Untersuchungen zur Ppropfenbildung infolge der Installation offener Profile in granularen Böden. Veröffentlichung des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb, TU Hamburg Harburg, 2013, Heft 29.
- [c] Technischer Jahresbericht 2014 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Bautechnik 12/2014, S. 904–921.

### 3.5 Anwendung der Erfahrungswerte auf Zugpfähle

Hinsichtlich der für Zugpfähle – nur in begründeten Ausnahmefällen zulässigen – Anwendung von Erfahrungswerten werden in Abschnitt 5.4.10 „Anwendung der Erfahrungswerte auf Zugpfähle“, Absatz (4), die Angaben zu der zulässigen rechnerischen Länge der Verpresskörper bei Verpressmörtelpfählen und Rüttelinjektionspfählen sowie Rohrverpresspfählen und Mikropfählen erweitert wie folgt definiert:

#### 5.4.10 Anwendung der Erfahrungswerte auf Zugpfähle

(4) Wenn Erfahrungswerte nach 5.4.9 angewendet werden, sollte die rechnerische Länge der Verpresskörper bei Verpressmörtelpfählen (VM-, MV- oder RV-Pfähle) oder Rüttelinjektionspfählen auf maximal 15 m und bei Rohrverpresspfählen oder Mikropfählen maximal 12 m begrenzt werden, da dies dem bisherigen Erfahrungsbereich entspricht. Bei größeren Verpresskörperlängen sind Pfahlprobelastungen durchzuführen bzw. in Abstimmung mit dem Sachverständigen für Geotechnik Abminderungen der charakteristischen Mantelreibung vorzunehmen.

### 3.6 Zugpfahlgruppen

Die Formel zur Ermittlung der Gewichtskraft des angehängten Bodenkörpers bei Zugpfahlgruppen ist in Abschnitt 8.1.2 „Zugpfahlgruppen“, Abs. (4) wie folgt zu korrigieren:

$$G_{E,k} = n_Z \cdot \left[ l_a \cdot l_b \left( L - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{l_a^2 + l_b^2} \cdot \cot \varphi \right) \right] \cdot \eta_Z \cdot \gamma \quad (8.3)$$

### 3.7 Quer zur Pfahlachse belastete Gruppen

Es wird darauf hingewiesen, dass in Abschnitt 8.2.3 „Quer zur Pfahlachse belastete Gruppen“ die Bilder 8.12, 8.13 und 8.14 zum Ansatz der Abminderungsfaktoren in der 2. Auflage der EA-Pfähle (2012) mit falscher Beschriftung abgedruckt wurden. Die korrekten Bilder finden sich in der 1. Auflage der EA-Pfähle (2007) bzw. in der Korrekturtabelle (Abs. 3.2).

### 3.8 Streuungsfaktoren bei dynamischen Pfahlprobelastungen für den Sonderfall „n = n“

Von verschiedenen Seiten wurde an den Arbeitskreis „Pfähle“ bzw. den gleichlautenden Normenausschuss die Frage herangetragen, welche Streuungsfaktoren in dem Fall anzusetzen sind, dass an allen Pfählen einer Pfahlgründung eine dynamische Probelastung ausgeführt wird. Hintergrund sind insbesondere Anwendungen im Offshore-Bereich, beispielsweise die Gründung von Plattformen, die auf meist vier bis acht Pfählen gegründet werden, wobei teilweise jeder dieser Pfähle einer dynamischen Probelastung unterzogen wird.

Die diesbezüglichen Regelungen im deutschen Normenhandbuch Eurocode 7, Band 1, hier: Eurocode 7, Abs. 7.6.2.4 und DIN 1054:2010-12, Abs. 7.6.2.4(A2) in Verbindung mit Tabelle A 7.2 und Bild A 7.1 beinhalten, dass die Grundwerte der Streuungsfaktoren  $\xi_{0,5}$  und  $\xi_{0,6}$  in Abhängigkeit von der Anzahl n der getesteten Pfähle angegeben werden, indes der Fall, dass alle Pfähle einer Pfahlgründung oder auch ein hoher prozentualer Anteil aller

Pfähle einer Tiefgründung getestet werden, keine explizite Erwähnung findet.

Unter Berücksichtigung der bestehenden Regelungen wird in Abschnitt 5.3 der EA-Pfähle folgende Empfehlung für den Ansatz der Streuungsfaktoren für den Sonderfall „n = n“ (100 % aller Pfähle dynamisch getestet) aufgenommen, die in MOORMANN (2015) [2] näher erläutert wird:

### 5.3 Ermittlung von Pfahlwiderständen aus dynamischen Pfahlprobelastungen

(11) In dem besonderen Fall, dass an allen Pfählen einer Pfahlgründung mit  $n \geq 3$  Pfählen eine dynamische Probelastung ausgeführt wird, kann der Ansatz der Streuungsfaktoren wie folgt erfolgen:

- Jeder Pfahl wird individuell betrachtet. In diesem Fall entfällt eine Mittelwertbildung, das Ergebnis der dynamischen Pfahlprobelastung ( $R_{c,m}$ ) ist jeweils als Kleinstwert ( $R_{c,m}$ )<sub>min</sub> zu betrachten.
- Der charakteristische Pfahlwiderstand wird für jeden Pfahl individuell aus dem jeweiligen Messwert ( $R_{c,m}$ ) unter Ansatz eines reduzierten Grundwertes für den Streuungsfaktor von

$$\xi_{0,6} = 1,25$$

abgeleitet. Für den resultierenden Streuungsfaktor  $\xi_{0,6}$  muss gelten:

$$\xi_6 = (\xi_{06} + \Delta\xi) \cdot \eta_D \geq 1,15$$

- Dabei wird, insbesondere bei Anwendungen mit hohen Anforderungen wie Offshore-Gründungen, empfohlen, diesen Ansatz damit zu verknüpfen, dass nicht nur die Durchführung der Probelastung und die Auswertung des Messsignals mit einem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung von einem Experten vorgenommen wird, der über durch Referenzen nachgewiesene besondere Sachkunde und Erfahrung bei der Durchführung von dynamischen Probelastungen verfügt, sondern dass auch eine unabhängige Auswertung der Messsignale von einem zweiten vergleichbar erfahrenen Experten ebenfalls mit einem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung erfolgt. Die Ergebnisse der beiden unabhängig voneinander vorgenommenen Auswertungen sollten verglichen und unter Bewertung der gewählten Modellbildung und Modellparameter ein letztgültiger Messwert  $R_{c,m}$  festgelegt werden; im Zweifelsfall sollte das ungünstigere Ergebnis der beiden Auswertungen der Ableitung des charakteristischen Pfahlwiderstandes  $R_{c,k}$  zu Grunde gelegt werden.

Mit dieser Empfehlung ergibt sich für den Fall, dass der Erhöhungsfaktor  $\Delta\xi = 0,1$  beträgt, da die Kalibrierung des dynamischen Auswerteverfahrens an statischen Pfahlprobelastungsergebnissen an einer vergleichbaren Baumaßnahme erfolgt, und ein Verfahren mit vollständiger Modellbildung (z.B. CAPWAP-Verfahren) zur Anwendung kommt und damit der Modellfaktor auf  $\eta_D = 0,85$  reduziert werden darf, der letztlich maßgebliche Streuungsfaktor  $\xi_6$  nach Handbuch Eurocode 7, Band 1, zu:

$$\xi_6 = (\xi_{0,6} + \Delta\xi) \cdot \eta_D = 1,148$$

Mit diesem Streuungsfaktor ergibt sich für  $\gamma_G = 1,35$  ein äquivalenter „globaler“ Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_{ges} = 1,70$ , für  $\gamma_F = 1,4$  von  $\gamma_{ges} = 1,77$ , im Mittel also etwa  $\gamma_{ges} = 1,75$ . Zum Vergleich: würde jeder Pfahl statisch geprüft, ergäbe sich mit  $\xi_2 = 1,0$  und  $\gamma_t = 1,1$  ein „globaler“ Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_{ges} = 1,49$  für  $\gamma_G = 1,35$  und von  $\gamma_{ges} = 1,54$  für  $\gamma_F = 1,4$ , im Mittel also ein äquivalenter „globaler“ Sicherheitsbeiwert von  $\gamma_{ges} = 1,50$ . Die größere „Unschärfe“ bei der Auswertung dynamischer Pfahlprobelastungen wird also bei dem vorgeschlagenen Ansatz gegenüber statischen Probelastungen durch rund 15 % höhere globale Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt.

#### 4 Zukünftiges Arbeitsprogramm

Der AK 2.1 sieht eine zentrale Aufgabe in der gestalten der Brückenfunktion zwischen der nationalen Normenentwicklung, die durch die Initiative „PraxisRegelnBau“ neue Impulse erfahren hat, und der Fortschreibung der Normen auf europäischer Ebene, wobei die Überarbeitung des Kapitels „Pfahlgründungen“ des EC 7-1 einen Schwerpunkt der zukünftigen Arbeit bilden wird.

Inhaltliche Ansatzpunkte bei der Fortentwicklung der „EA-Pfähle“ werden unter anderem bei der Fortschreibung der Ansätze für die Ermittlung von Pfahlwiderständen, u.a. für Pfähle unter veränderlichen Einwirkungen, bei der Fortentwicklung von Berechnungsansätzen, hier insbesondere für horizontal belastete Pfähle und für Pfahlgruppen und Kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP) sowie bei Aspekten der Ausführung und Qualitätssicherung von Pfählen liegen.

Ein besonderer Schwerpunkt wird ferner die Fortschreibung der Bemessungsansätze und Rechenmodelle für Pfähle unter zyklischen und dynamischen Einwirkungen bilden, mit der der AK 2.1 u.a. den aus der Gründung von Windenergieanlagen im on- und offshore-Bereich resultierenden Herausforderungen Rechnung trägt.

#### 5 Schlussbemerkungen

Verbunden mit dem Dank an die Mitglieder für ihre aktive Mitarbeit bittet der Arbeitskreis alle Fachkollegen um inhaltliche und formale Anregungen zur Weiterentwicklung der EA-Pfähle und zur Arbeit des Arbeitskreises. Kontaktaufnahme bitte über den Obmann.

##### Kontaktadresse:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann  
Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik  
Pfaffenwaldring 35  
D-70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685-62437  
Fax.: +49 (0)711 685-62439  
E-Mail: christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de

#### 6 Literatur

- [1] LÜKING, J, BECKER, P.: *Harmonisierung der Berechnungsverfahren der axialen Tragfähigkeit für offene Profile nach EA-Pfähle und EAU*. Bautechnik 92 (2015), Heft 2 DOI 10.1002/bate.201400047.
- [2] MOORMANN, CH.: *Ansatz von Streuungsfaktoren bei statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen* (Veröffentlichung geplant Bautechnik 02/2015).

##### Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann  
Universität Stuttgart  
Institut für Geotechnik  
Pfaffenwaldring 35  
D-70569 Stuttgart  
christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de

Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert  
Potosistraße 27  
D-22587 Hamburg  
kempfert@kup-geotechnik.de