

# Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“

# EA-Pfähle





**Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“  
EA-Pfähle**

**2. Auflage**

**Herausgegeben von der  
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.**



---

# **Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ EA-Pfähle**

---

**2. Auflage**

**Herausgegeben von der  
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.**

Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der  
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.  
Obmann: Univ.-Prof.(em) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert  
Potosistraße 27  
D-22587 Hamburg  
kempfert@kup-geotechnik.de

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

© 2012 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstr. 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form – by photoprinting, microfilm, or any other means – nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publisher.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Umschlaggestaltung: Design Pur GmbH  
Satz: Beltz Bad Langensalza GmbH, Bad Langensalza  
Gesamtherstellung: pagina GmbH, Tübingen  
Druck und Bindung: betz-Druck GmbH, Darmstadt

Printed in the Federal Republic of Germany.  
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

2. ergänzte und erweiterte Auflage

**Print ISBN:** 978-3-433-03005-9  
**ePDF ISBN:** 978-3-433-60156-3  
**ePub ISBN:** 978-3-433-60155-6  
**mobi ISBN:** 978-3-433-60154-9  
**oBook ISBN:** 978-3-433-60111-2

## Mitglieder des Arbeitskreises AK 2.1 „Pfähle“

Zum Zeitpunkt der Herausgabe der vorliegenden Sammelveröffentlichung setzte sich der Arbeitskreis „Pfähle“ wie folgt zusammen:

Univ.-Prof. (em) Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Hamburg (Obmann)  
Dr.-Ing. W.-R. Linder, Essen (stellvertr. Obmann)  
Dipl.-Ing. B. Böhle, Essen  
Dipl.-Ing. W. Brieke, Düsseldorf  
Dipl.-Ing. G. Dausch, Mannheim  
Dipl.-Ing. E. Dornecker, Karlsruhe  
Dipl.-Ing. A. Ellner, Nürnberg  
Dipl.-Ing. M. Glimm, Hamburg  
Dipl.-Ing. R. Jörger, Wiesbaden  
Dr.-Ing. O. Klingmüller, Mannheim  
Dipl.-Ing. O. Krist, München  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Chr. Moormann, Stuttgart  
Dr.-Ing. K. Morgen, Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. D. Placzek, Essen  
Prof. Dr.-Ing. B. Pläßmann, Mainz  
Dipl.-Ing. U. Plohmann, Eggenstein  
Dr.-Ing. habil. K. Röder, Leipzig  
Dr.-Ing. P. Schwarz, München  
Dr.-Ing. W. Schwarz, Schrobenshausen  
Dr.-Ing. S. Weihrauch, Hamburg  
Dipl.-Ing. J. Voth, Hamburg

Weitere Mitglieder des Arbeitskreises „Pfähle“ seit Herausgabe der 1. Auflage (2007) waren:

Dipl.-Ing. W. Körner, Hamburg  
Dr.-Ing. H.G. Schmidt, Ladenburg

Bei der Bearbeitung der EA-Pfähle haben folgende Unterausschüsse mitgearbeitet bzw. mitgewirkt:

**Unterausschuss „Dynamische Pfahlprüfungen“:** Bearbeitung Kapitel 10, 12 und Anhang C

Dr.-Ing. O. Klingmüller, Mannheim (Obmann)  
Dipl.-Ing. A. Beneke, Achim  
Dr.-Ing. U. Ernst, Nürnberg  
Dipl.-Ing. J. Fischer, Braunschweig  
Dr.-Ing. M. Fritsch, Braunschweig  
Dipl.-Ing. P. Grud, Dänemark  
Dipl.-Ing. G. Kainrath, Österreich

Dr.-Ing. F. Kirsch, Berlin  
P. Middendorp, MSc, Holland  
Dr. rer.nat. E. Niederleithinger, Berlin  
Dr. F. Rausche, USA  
Prof. Dr.-Ing. W. Rücker, Berlin  
Dr.-Ing. M. Schallert, Mannheim  
D. Schau, Büdelsdorf  
Dr.-Ing. W. Schwarz, Schrobenhausen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann, Braunschweig  
R. Skov, MSc, Dänemark  
Dr.-Ing. G. Ulrich, Leutkirch  
Dr.-Ing. B. Wienholz, Oldenburg

**Unterausschuss „KPP- und Pfahlgruppen-Gründungen“:** Mitwirkung zu Abschnitt 8.1.1, 8.2.1, 8.3.1 und 8.4.1 (bis 2007)

Prof. Dr.-Ing. Th. Richter, Berlin (Obmann)  
Dipl.-Ing. U. Barth, Mannheim  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Katzenbach, Darmstadt  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Kassel  
Prof. Dr.-Ing. B. Lutz, Berlin  
Dr.-Ing. Y. El-Mossallamy, Darmstadt  
Dr.-Ing. H. Wahrmund, Köln  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Chr. Moormann, Stuttgart

**Gemeinsamer Unterausschuss AK 1.4 „Baugrunddynamik“ und AK 2.1 „Pfähle“:** Bearbeitung Kapitel 13 und Anhang D

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. S. Savidis, Berlin (Obmann Ak 1.4)  
Univ.-Prof. (em) Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Hamburg (Obmann Ak 2.1)  
Dr.-Ing. J. Dührkop, Hamburg  
Dr.-Ing. H.-G. Hartmann, Frankfurt  
Dr.-Ing. U. Hartwig, Stuttgart  
Dr.-Ing. F. Kirsch, Berlin  
PD Dr.-Ing. habil. K. Lesny, Essen  
Dr.-Ing. F. Rackwitz, Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Th. Richter, Berlin  
Dr.-Ing. E. Tasan, Berlin  
Dr.-Ing. S. Thomas, Kassel  
Dr.-Ing. S. Weihrauch, Hamburg  
Dr.-Ing. J. Wiemann, Hamburg

# Vorwort und Benutzerhinweise

Die Normung über die Ausführung und Bemessung von Pfahlgründungen und einzelnen Pfahlsystemen hat in Deutschland eine lange Tradition. Dabei arbeitet der Normenausschuss „Pfähle“ (NA 005-05-07 AA) und der Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) langjährig in Personalunion zusammen. Dieser gemeinsame Ausschuss hat in den vergangenen Jahrzehnten die im letzten Jahrhundert in der Praxis bekanntesten und eingeführten Pfahlnormen DIN 4026 (Ramppfähle), DIN 4014 (Bohrpfähle) und DIN 4128 (Verpresspfähle) sowie den Pfahlteil der DIN 1054 (Abschnitt 5) bearbeitet und in den einzelnen Ausgaben dem Stand der Technik angepasst.

Seit Beginn der europäischen Normung Ende der 1980iger Jahre hat der Ausschuss die Aufgabe, die europäischen Ausführungsnormen DIN EN 1536 (Bohrpfähle), DIN EN 12699 (Verdrängungspfähle) und DIN EN 14199 (Mikropfähle) als nationaler Spiegelausschuss zu begleiten. Bezüglich der Berechnung und Bemessung von Pfählen lag sein Aufgabenschwerpunkt bei der Bearbeitung der Pfahlabschnitte der DIN 1054:2005-01 und DIN 1054:2010-12 unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes. In Ergänzung dazu hatte sich der AK 2.1 entschlossen, eine zusammenfassende Empfehlung zur Berechnung und Bemessung von Pfählen national herauszugeben, die 2007 in 1. Auflage als „EA-Pfähle“ veröffentlicht wurde und nun als 2. Auflage vorliegt. Die „EA-Pfähle“ sieht sich damit in der Tradition vergleichbarer Empfehlungen der DGGT, wie z. B. EAB, EBGEO, usw., die sich als Regeln der Technik etabliert haben.

Mit der Herausgabe der Normenhandbücher der Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau und für die Geotechnik des Handbuchs Eurocode 7, Geotechnische Bemessung – Band 1: Allgemeine Regeln (1. Auflage 2011), ist die europäische Normung für diesen Bereich zunächst zu einem Abschluss gekommen. Es ist geplant, die Normen mit einer Stichtagslösung voraussichtlich noch in 2012 bauaufsichtlich einzuführen. Das Handbuch Eurocode 7, Geotechnische Bemessung – Band 1: Allgemeine Regeln, enthält zusammengefasst die DIN EN 1997-1:2009-09 (Eurocode EC 7-1: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln). Zusätzlich die DIN 1054:2010-12 (Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regeln zu DIN EN 1997-1) und die DIN EN 1997-1/NA: 2010-12 (Nationaler Anhang).

Für die Berechnung und Bemessung von Pfählen wird in der DIN 1054:2010-12 an verschiedenen Stellen auf die „EA-Pfähle“ verwiesen, z. B. auf die Tabellenwerte der Pfahltragfähigkeiten aus Erfahrungswerten. Aus formalen Gründen verweist die DIN 1054:2010-12 zwar auf die 1. Auflage der „EA-Pfähle“, aber erst mit der nunmehr vorliegenden 2. Auflage ist die technische Verbindung zum Handbuch EC 7-1 [44] auch inhaltlich verbessert vorgenom-

men worden. Dies gilt besonders für die Nachweisformen und für die Schreibweisen mit Bezug auf das Handbuch EC 7-1 [44], sodass für den Anwender bei der Berechnung und Bemessung von Pfahlgründungen in sich geschlossene und untereinander abgestimmte Regelungen vorliegen.

In Ergänzung dazu finden sich in der „EA-Pfähle“ auch ausführungstechnische Belange mit Bezug auf die europäischen Pfahlausführungsnormen DIN EN 1536, DIN EN 12699 und DIN 14199. Eine vergleichende Einordnung der in der Praxis vorhandenen Pfahlsysteme (Kapitel 2) erleichtert die Zuordnung zu diesen Normen. Detaillierte Regelungen zu statischen und dynamischen Pfahlprobebelastungen (Kapitel 9 und 10) sowie qualitätssichernde Hinweise und Verfahren (Kapitel 11 und 12) sollen helfen, eine hochwertigen technische Ausführung von Pfählen sicherzustellen.

Ein gegenüber der 1. Auflage neues Kapitel 13 behandelt das Pfahltragverhalten und die Nachweisformen von Pfählen unter veränderlichen Einwirkungen. Dabei wurde ein besonderer Schwerpunkt auf das Tragverhalten von Pfählen unter zyklischen Belastungen gelegt, die insbesondere für Windenergieanlagen (offshore, onshore), aber auch im Verkehrswegebau, usw., häufig angewendet werden.

Nachdem die 1. Auflage der EA-Pfähle zunächst als Entwurf zu verstehen war, die seinerzeit zur probeweisen Anwendung empfohlen wurde, entfällt ab der 2. Auflage der Entwurfscharakter, da zwischenzeitlich die Fachöffentlichkeit Gelegenheit hatte, die Regelungen zu erproben und Hinweise und Änderungsvorschläge an den Ausschuss zu geben. Dies gilt auch für das neue Kapitel 13, welches auf verschiedenen Wegen vorveröffentlicht wurde. Alle Einsprüche zur 1. Auflage wurden bei der Bearbeitung der 2. Auflage vom Ausschuss diskutiert und, wenn berechtigt, in die 2. Auflage mit eingearbeitet. Die Anhänge A5, A6 und Anhang D enthalten „informative“ technische Hinweise, die noch nicht als Stand der Technik einzustufen sind, sondern eher den Stand der Wissenschaft darstellen.

Der Anwender wird bezüglich der Verbindlichkeit der vorliegenden Empfehlungen „EA-Pfähle“, 2. Auflage, auf die Benutzerhinweise der EAB (2006), 4. Auflage, Verlag Ernst & Sohn, verwiesen, die hier in vergleichbarer Weise anzuwenden sind.

Der Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) bittet für die Weiterentwicklung der vorliegenden Empfehlungen um Hinweise und Zuschriften an den Obmann des AK 2.1 (Adresse siehe Impressum).

Hamburg, 2012

*Hans-Georg Kempfert*

# Inhaltsverzeichnis

Mitglieder des Arbeitskreises AK 2.1 „Pfähle“ .....	V
---	---

Vorwort und Benutzerhinweise .....	VII
------------------------------------	-----

<b>1</b>	<b>Einleitung und Anwendungsgrundlagen der Empfehlungen</b>	<b>1</b>
1.1	Nationale und internationale Vorschriften für Pfähle .....	1
1.2	Nachweisformen und Grenzzustände nach dem Teilsicherheitskonzept .....	2
1.2.1	Neue Normengeneration und Anwendung auf Pfahlgründungen ..	2
1.2.2	Einwirkungen, Beanspruchungen und Widerstände .....	3
1.2.3	Grenzzustände und nationale Anwendung des Handbuchs EC 7-1 .....	4
1.2.4	Übergangsregelungen zur Anwendung der EA-Pfähle im Zusammenhang mit dem Handbuch EC 7-1 .....	7
1.3	Planung und Prüfung von Pfahlgründungen .....	8
<b>2</b>	<b>Pfahlsysteme</b> .....	<b>9</b>
2.1	Übersicht und Zuordnung zu den Pfahlsystemen .....	9
2.2	Pfahlherstellung .....	13
2.2.1	Bohrpfähle .....	13
2.2.1.1	Verbohrt hergestellte Bohrpfähle .....	13
2.2.1.2	Ungestützt hergestellte Bohrpfähle .....	14
2.2.1.3	Flüssigkeitsgestützt hergestellte Bohrpfähle .....	15
2.2.1.4	Erdgestützt mit durchgehender Bohrschnecke hergestellte Bohrpfähle .....	15
2.2.1.5	Erdgestützt mit teilweise durchgehender Bohrschnecke hergestellte Bohrpfähle .....	16
2.2.1.6	Bohrpfähle mit Fußaufweitungen .....	17
2.2.1.7	Schlitzwandelemente/Barette .....	18
2.2.2	Fertigrammpfähle .....	18
2.2.2.1	Allgemeines .....	18
2.2.2.2	Fertigrammpfähle aus Beton .....	18
2.2.2.3	Fertigrammpfähle aus Stahl und Gusseisen .....	19
2.2.2.4	Fertigrammpfähle aus Holz .....	20
2.2.3	Ortbetonrammpfähle .....	21
2.2.3.1	Ortbetonrammpfahl mit Innenrohrummung (Frankipfahl) .....	21
2.2.3.2	Ortbetonrammpfahl mit Kopframmung (z. B. Simplexpfahl) .....	22
2.2.4	Schraubpfähle (Vollverdrängungsbohrpfähle) .....	23

2.2.4.1	Allgemeines .....	23
2.2.4.2	Atlaspfahl .....	23
2.2.4.3	Fundexpfahl .....	24
2.2.5	Verpresste Verdrängungspfähle .....	24
2.2.5.1	Verpressmörtelpfähle (VM-Pfähle) .....	24
2.2.5.2	Rüttelinjektionspfähle (RI-Pfähle) .....	24
2.2.6	Mikropfähle .....	25
2.2.7	Rohrverpresspfähle .....	26
2.3	Pfahlähnliche Elemente .....	27
<b>3</b>	<b>Grundsätze zu Entwurf und Berechnung von Pfahlgründungen</b> .....	<b>29</b>
3.1	Pfahlgründungssysteme .....	29
3.1.1	Einzelpfahlösungen .....	29
3.1.2	Pfahlroste .....	31
3.1.3	Pfahlgruppen .....	31
3.1.4	Kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP) .....	33
3.2	Baugrunderkundung bei Pfahlgründungen .....	34
3.3	Zuordnung der Böden bei Pfahlgründungen .....	42
3.4	Pfahlkonstruktionen zur Baugrubenherstellung und Sicherung von Geländesprüngen .....	43
3.4.1	Allgemeines .....	43
3.4.2	Anordnung der Pfähle .....	43
3.4.3	Pfahlssysteme und spezielle Ausführungsanforderungen .....	44
3.4.4	Berechnung und Bemessung .....	45
3.4.5	Bewehrung .....	45
3.4.6	Beton .....	45
3.4.7	Wasserdichtigkeit von Bohrpfahlwänden .....	46
3.5	Pfahlkonstruktionen zur Böschungssicherung .....	46
3.6	Anordnung von Hülsen .....	48
<b>4</b>	<b>Einwirkungen und Beanspruchungen</b> .....	<b>51</b>
4.1	Allgemeines .....	51
4.2	Pfahlgründungslasten aus dem Bauwerk .....	52
4.3	Herstellungsbedingte Beanspruchungen von Pfählen .....	53
4.4	Negative Mantelreibung .....	53
4.4.1	Allgemeines .....	53
4.4.2	Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus negativer Mantelreibung .....	54
4.4.3	Ermittlung der Bemessungsgrößen der Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und Nachweisführung .....	57
4.4.4	Mantelreibung infolge Hebung des Bodens in der Pfahl- umgebung .....	58

4.5	Seitendruck .....	59
4.5.1	Allgemeines .....	59
4.5.2	Notwendigkeit einer Pfahlbemessung auf Seitendruck .....	60
4.5.3	Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus Fließdruck .....	62
4.5.4	Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus dem resultierenden Erddruck .....	63
4.5.5	Entfernungseinfluss und Mindestmomentenbeanspruchung .....	66
4.5.6	Beanspruchungen der Pfähle .....	67
4.6	Zusatzbeanspruchung von Schrägpfählen aus Baugrundverformungen .....	67
4.6.1	Allgemeines .....	67
4.6.2	Zusatzbeanspruchung von Rückverankerungen mit Stahl- und Mikropfählen .....	68
4.7	Gründungspfähle in Böschungen und an Geländesprüngen .....	71
4.7.1	Gründungspfähle in Böschungen .....	71
4.7.2	Gründungspfähle an Geländesprüngen .....	72
<b>5</b>	<b>Tragverhalten und Widerstände von Einzelpfählen .....</b>	<b>75</b>
5.1	Allgemeines .....	75
5.2	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus statischen Pfahlprobelastungen .....	76
5.2.1	Grundlagen .....	76
5.2.2	Charakteristische Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	77
5.2.3	Charakteristische Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	78
5.3	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus dynamischen Pfahlprobelastungen .....	79
5.4	Axiale Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten .....	82
5.4.1	Allgemeines .....	82
5.4.2	Anwendungshinweise .....	83
5.4.3	Anwendungsgrundlagen und Einschränkungen der Tabellenwerte .....	84
5.4.4	Fertigrammpfähle .....	87
5.4.4.1	Allgemeines .....	87
5.4.4.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung von Fertigrammpfählen .....	89
5.4.4.3	Erfahrungswerte zum Pfahltragverhalten von offenen Stahlrohren und Hohlkästen .....	92
5.4.4.4	Erfahrungen mit Fertigpfählen im Fels und sehr dichten bzw. verkitteten Böden .....	93
5.4.5	Ortbetonrammpfähle .....	94
5.4.5.1	Allgemeines .....	94

5.4.5.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung von Simplexpfählen. . . . .	95
5.4.5.3	Erfahrungswerte von Pfahlfußwiderstand und Pfahlmantelreibung von Frankipfählen . . . . .	97
5.4.6	Bohrpfähle. . . . .	104
5.4.6.1	Allgemeines . . . . .	104
5.4.6.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung von Bohrpfählen. . . . .	106
5.4.6.3	Erfahrungswerte von Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung bei Fels und felsähnlichen Böden . . . . .	108
5.4.6.4	Schlitzwandelemente. . . . .	112
5.4.6.5	Bohrpfahlwände und Schlitzwände . . . . .	112
5.4.7	Teilverdrängungsbohrpfähle . . . . .	112
5.4.8	Schraubpfähle. . . . .	114
5.4.8.1	Allgemeines . . . . .	114
5.4.8.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung von Schraubpfählen. . . . .	114
5.4.9	Verpresste Verdrängungs- und Mikropfähle. . . . .	117
5.4.9.1	Allgemeines . . . . .	117
5.4.9.2	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von Verpressmörtel-pfählen (VM-Pfähle) . . . . .	117
5.4.9.3	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von Rüttelinjektions-pfählen (RI-Pfähle) . . . . .	118
5.4.9.4	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von verpressten Mikropfählen . . . . .	119
5.4.9.5	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von Rohrverpress-pfählen . . . . .	120
5.4.9.6	Verbundspannung von verpressten Verdrängungspfählen . . . . .	121
5.4.10	Anwendungen der Erfahrungswerte auf Zugpfähle. . . . .	121
5.5	Bohrpfähle mit Fußaufweitung . . . . .	122
5.6	Weitere Verfahren nach Handbuch EC 7-1 und Handbuch EC 7-2 . . . . .	122
5.7	Pfahlwiderstände bei Mantel- und Fußverpressung. . . . .	123
5.8	Pfahlwiderstände quer beanspruchter Pfähle . . . . .	124
5.9	Pfahlwiderstände bei nicht ruhenden Einwirkungen . . . . .	125
5.10	Innere Tragfähigkeit von Pfählen . . . . .	125
5.10.1	Allgemeines . . . . .	125
5.10.2	Beanspruchbarkeit von Querschnitten . . . . .	126
5.10.3	Widerstand von Pfählen gegen Knickversagen in Bodenschichten mit geringer seitlicher Stützung und Knicknachweis . . . . .	127
5.11	Numerische Berechnungen zur Tragfähigkeit von Einzel-pfählen . . . . .	128

<b>6</b>	<b>Standsicherheitsnachweise</b> .....	129
6.1	Allgemeines .....	129
6.2	Grenzzustandsgleichungen .....	129
6.3	Nachweis der Tragfähigkeit .....	130
6.3.1	Axial belastete Pfähle .....	130
6.3.2	Quer zur Pfahlachse belastete Pfähle .....	131
6.3.3	Materialversagen von Pfählen .....	133
6.4	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit .....	133
6.4.1	Axial belastete Pfähle .....	133
6.4.2	Quer zur Pfahlachse belastete Pfähle .....	135
6.5	Pfahlgruppen und Pfahlroste .....	135
6.6	Kombinierte Pfahl-Plattengründungen .....	136
<b>7</b>	<b>Berechnung von Pfahlrosten</b> .....	137
7.1	Berechnungsmodelle und Verfahren .....	137
7.2	Nichtlineares Pfahltragverhalten in der Pfahlrostberechnung ....	137
<b>8</b>	<b>Berechnung und Nachweise von Pfahlgruppen</b> .....	139
8.1	Einwirkungen und Beanspruchungen .....	139
8.1.1	Druckpfahlgruppen .....	139
8.1.2	Zugpfahlgruppen .....	139
8.1.3	Quer zur Pfahlachse belastete Pfahlgruppen .....	141
8.2	Tragverhalten und Widerstände von Pfahlgruppen .....	142
8.2.1	Druckpfahlgruppen .....	142
8.2.1.1	Allgemeines .....	142
8.2.1.2	Gruppenwirkung bezogen auf die Setzungen von Bohrpfahlgruppen .....	142
8.2.1.3	Widerstände der (gebohrten) Gruppenpfähle .....	151
8.2.1.4	Verdrängungspfahlgruppen .....	155
8.2.1.5	Mikropfahlgruppen .....	156
8.2.1.6	Geschichteter Baugrund .....	157
8.2.2	Zugpfahlgruppen .....	157
8.2.3	Quer zur Pfahlachse belastete Gruppen .....	157
8.3	Nachweis der Tragfähigkeit .....	161
8.3.1	Druckpfahlgruppen .....	161
8.3.1.1	Äußere Tragfähigkeit .....	161
8.3.1.2	Materialnachweise Pfahlkopfplatte .....	163
8.3.2	Zugpfahlgruppen .....	163
8.3.2.1	Allgemeines .....	163
8.3.2.2	Nachweis des angehängten Bodenkörpers im Grenzzustand UPL .....	164
8.3.2.3	Nachweis der Tragfähigkeit des einzelnen Zugpfahls im Grenzzustand GEO-2 .....	165

8.3.3	Materialversagen von Gruppenpfählen und Pfahlkopfkonstruktionen .....	165
8.4	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit .....	165
8.4.1	Druckpfahlgruppen .....	165
8.4.2	Zugpfahlgruppen .....	167
8.4.3	Quer zur Pfahlachse belastete Pfahlgruppen .....	167
8.5	Genauere Nachweise bei Pfahlgruppen .....	167
<b>9</b>	<b>Statische Pfahlprobelastungen .....</b>	<b>169</b>
9.1	Allgemeines .....	169
9.2	Statische axiale Pfahlprobelastungen .....	169
9.2.1.	Herstellung der Probepfähle .....	169
9.2.2	Versuchsplanung .....	170
9.2.2.1	Allgemeine Hinweise .....	170
9.2.2.2	Anzahl der Probepfähle .....	172
9.2.2.3	Prüflast .....	172
9.2.2.4	Grundsätze der Instrumentierung .....	174
9.2.2.5	Besondere Belastungszustände .....	175
9.2.3	Belastungseinrichtung .....	175
9.2.3.1	Allgemeines .....	175
9.2.3.2	Widerlager .....	175
9.2.3.3	Hydraulikzylinder .....	177
9.2.3.4	Einbetonierte Hydraulikzylinder .....	178
9.2.3.5	Pfahlkopf .....	180
9.2.4	Instrumentierung und Messverfahren .....	180
9.2.4.1	Verschiebungsmessungen .....	180
9.2.4.2	Kraftmessung am Pfahlkopf .....	182
9.2.4.3	Erfassung des Pfahlfußwiderstandes .....	182
9.2.4.3	Erfassung des Pfahlmantelwiderstandes .....	183
9.2.4.5	Besonderheiten der Instrumentierung bei Belastung mit einbetonierten Hydraulikzylindern .....	185
9.2.4.6	Erfassung der Pfahlquerschnittsfläche und der Verformungseigenschaften .....	185
9.2.4.7	Schutz der Messvorrichtungen .....	185
9.2.5	Versuchsdurchführung .....	186
9.2.5.1	Belastungsstufen und -geschwindigkeiten .....	186
9.2.5.2	Messintervalle .....	188
9.2.5.3	Aufzeichnungen .....	189
9.2.6	Auswertung .....	190
9.2.7	Dokumentation und Berichte .....	192
9.2.7.1	Allgemeines .....	192
9.2.7.2	Versuchsbericht .....	192
9.2.7.3	Ergebnisbericht .....	193
9.3	Statische Pfahlprobelastungen quer zur Pfahlachse .....	194

9.3.1	Allgemeines .....	194
9.3.2	Herstellung der Probepfähle .....	194
9.3.3	Versuchsplanung .....	194
9.3.3.1	Allgemeine Hinweise .....	194
9.3.3.2	Anzahl der Probepfähle .....	196
9.3.3.3	Prüflast .....	196
9.3.3.4	Baugrunduntersuchungen .....	196
9.3.3.5	Grundsätze der Instrumentierung .....	196
9.3.3.6	Belastungszustände .....	197
9.3.4	Belastungseinrichtung .....	198
9.3.5	Instrumentierung und Messverfahren .....	199
9.3.5.1	Verschiebungsmessungen am Pfahlkopf .....	199
9.3.5.2	Messung der Biegelinie des Pfahlschaftes .....	200
9.3.5.3	Kraftmessung am Pfahlkopf .....	201
9.3.5.4	Schutz der Messvorrichtungen .....	201
9.3.6	Versuchsdurchführung .....	201
9.3.6.1	Belastungsstufen und -geschwindigkeiten .....	201
9.3.6.2	Messintervalle .....	202
9.3.6.3	Aufzeichnungen .....	203
9.3.7	Auswertung .....	203
9.3.8	Dokumentation und Berichte .....	204
9.3.8.1	Allgemeines .....	204
9.3.8.2	Versuchsbericht .....	205
9.3.8.2	Ergebnisbericht .....	206
9.4	Statische axiale Probebelastungen an Mikropfählen (Verbundpfählen) .....	206
9.4.1	Herstellung der Probepfähle .....	206
9.4.2	Versuchsplanung .....	207
9.4.2.1	Allgemeine Hinweise .....	207
9.4.2.2	Anzahl der Probepfähle .....	208
9.4.2.3	Prüflast .....	208
9.4.2.4	Grundsätze der Instrumentierung .....	209
9.4.2.5	Besondere Belastungszustände .....	209
9.4.3	Belastungseinrichtung .....	209
9.4.3.1	Widerlager .....	209
9.4.3.2	Hydraulikzylinder .....	211
9.4.3.3	Pfahlkopf .....	211
9.4.4	Instrumentierung und Messverfahren .....	211
9.4.4.1	Verschiebungsmessungen .....	211
9.4.4.2	Kraftmessung am Pfahlkopf .....	212
9.4.4.3	Erfassung des Pfahlmantelwiderstandes .....	212
9.4.4.4	Schutz der Messvorrichtung .....	213
9.4.5	Versuchsdurchführung .....	213
9.4.5.1	Allgemeines .....	213
9.4.5.2	Belastungsstufen und -geschwindigkeiten für das System A. ....	213

9.4.5.3	Belastungsstufen für das System B	215
9.4.5.4	Messintervalle	216
9.4.5.5	Aufzeichnungen	217
9.4.6	Auswertung	218
9.4.7	Dokumentation und Berichte	219
9.4.7.1	Allgemeines	219
9.4.7.2	Versuchsbericht	219
9.4.7.3	Ergebnisbericht	220
<b>10</b>	<b>Dynamische Pfahlprobelastungen</b>	<b>223</b>
10.1	Allgemeines	223
10.2	Anwendungsbereich und allgemeine Anforderungen	224
10.3	Theoretische Grundlagen	224
10.4	Beschreibung der Prüfverfahren, Versuchsplanung und Durchführung	227
10.4.1	Auswerteverfahren und Probelastungsart	227
10.4.2	Anzahl der Probelastungen	228
10.4.3	Baugrunduntersuchungen und Pfahlherstellungsdokumentation	229
10.4.4	Zeitpunkt der Prüfung und innere Tragfähigkeit	229
10.4.5	Dynamische Probelastungen nach dem High-Strain-Verfahren	230
10.4.5.1	Kurzbeschreibung	230
10.4.5.2	Belastungseinrichtung	230
10.4.5.3	Instrumentierung	231
10.4.5.4	Durchführung der Prüfung	234
10.4.6	Dynamische Probelastungen nach dem Rapid-Load-Verfahren	235
10.4.6.1	Kurzbeschreibung	235
10.4.6.2	Verfahrensarten bzw. Zeitpunkt der Prüfung	236
10.4.6.3	Belastungseinrichtung	237
10.4.6.4	Instrumentierung	238
10.4.6.5	Durchführung der Prüfung	239
10.5	Auswertung und Interpretation der dynamischen Probelastungen	240
10.5.1	Allgemeines	240
10.5.2	Direkte Verfahren mit empirischen Dämpfungswerten	240
10.5.2.1	Grundlagen	240
10.5.2.2	CASE-Verfahren	241
10.5.2.3	TNO-Verfahren	242
10.5.3	Direktes Verfahren zur Auswertung eines Rapid-Load-Tests nach der Unloading-Point-Methode	244
10.5.4	Erweitertes Verfahren mit vollständiger Modellbildung	244
10.6	Kalibrierung der dynamischen Pfahlprobelastungen	247

10.7	Qualifikation der Prüfinstitute und des Personals .....	250
10.8	Dokumentation und Bericht .....	250
10.9	Prüfung der Rammgeräteeignung .....	253
<b>11</b>	<b>Qualitätssicherung bei der Bauausführung .....</b>	<b>255</b>
11.1	Allgemeines .....	255
11.2	Bohrpfähle .....	255
11.2.1	Grundsätze .....	255
11.2.2	Stützung des Bohrloches .....	256
11.2.2.1	Verrohrte Bohrlochwandung .....	256
11.2.2.2	Flüssigkeitsgestützte Bohrlochwandung .....	258
11.2.2.3	Erdgestütztes Bohren mit durchgehender Bohrschnecke .....	258
11.2.3	Aushub .....	258
11.2.3.1	Allgemeines .....	258
11.2.3.2	Bohren im Grundwasser .....	259
11.2.3.3	Durchmesser und Ziehgeschwindigkeit des Bohrwerkzeugs .....	260
11.2.3.4	Reinigung der Bohrlochsohle .....	261
11.2.3.5	Fußaufweitung .....	261
11.2.4	Einbau der Bewehrung .....	262
11.2.5	Betonieren .....	264
11.2.5.1	Betonrezeptur .....	264
11.2.5.2	Betoniervorgang .....	265
11.2.6	Bohrpfähle mit durchgehender Bohrschnecke .....	267
11.2.6.1	Allgemeines .....	267
11.2.6.2	Erdgestütztes Schneckenbohren .....	267
11.2.6.3	Verrohrtes Schneckenbohren .....	268
11.2.6.4	Betonierung und Einbau der Bewehrung .....	268
11.2.7	Mantel- und Fußverpressung .....	269
11.3	Verdrängungspfähle .....	270
11.3.1	Betonfertigpfähle – Hinweise zu Transport, Lagerung und Einbringung .....	270
11.3.2	Ortbetonverdrängungspfähle .....	271
11.3.2.1	Wasser-/Bodeneintritt ins Vortreibrohr .....	271
11.3.2.2	Betonieren .....	271
11.3.3	Verdrängungswirkung in bindigen Böden .....	272
11.4	Verpresste Mikropfähle (Verbundpfähle) .....	272
11.4.1	Allgemeines .....	272
11.4.2	Stabverpresspfähle .....	272
11.4.3	Rohrverpresspfähle .....	273
11.4.4	Prüfung von verpressten Mikropfählen .....	274

<b>12</b>	<b>Pfahl-Integritätsprüfungen</b> .....	277
12.1	Zweck und Verfahren .....	277
12.2	„Low-Strain“-Integritätsprüfung .....	278
12.2.1	Prinzip der „Low-Strain“-Integritätsprüfung .....	278
12.2.2	Anwendungsbereich, Anzahl der zu prüfenden Pfähle und Einschränkungen .....	279
12.2.3	Vorbereitung der Pfähle .....	280
12.2.4	Durchführung der Prüfung .....	280
12.2.5	Messungen und Messgeräte .....	281
12.2.6	Auswertung der Messungen .....	282
12.2.7	Impedanz und Wellengeschwindigkeit .....	284
12.2.8	Beurteilungsklassen .....	287
12.2.9	Dokumentation und Berichterstattung .....	289
12.3	Ultraschall-Integritätsprüfung .....	289
12.3.1	Ziel und Anwendungsbereich .....	289
12.3.2	Prinzip der Ultraschall-Integritätsprüfung .....	290
12.3.3	Durchführung der Messung .....	291
12.3.4	Vorbereitung und Durchführung der Prüfung .....	294
12.3.4.1	Prüfpfähle .....	294
12.3.4.2	Durchführung der Prüfung .....	294
12.3.5	Auswertung .....	295
12.3.5.1	Qualitative Auswertung der Signalverläufe .....	295
12.3.5.2	Quantitative Signalanalyse .....	296
12.3.5.3	Pfahlbewertung .....	298
12.3.6	Dokumentation und Berichterstellung .....	298
12.3.7	Spezialfall: Prüfung von überschnittenen Bohrpfahlwänden und Schlitzwänden .....	299
12.4	Pfahlprüfungen durch Kernbohrungen .....	299
12.4.1	Allgemeines .....	299
12.4.2	Ausführung von Kernbohrungen .....	300
12.4.3	Auswertung .....	300
12.4.3.1	Allgemeines .....	300
12.4.3.2	Visuelle Bewertung .....	301
12.4.4	Betonfestigkeit und Dauerhaftigkeit .....	302
12.4.5	Untersuchungen im Bohrloch .....	302
12.5	Weitere Prüfmethoden .....	302
12.5.1	Allgemeines .....	302
12.5.2	Radiometrische Pfahlprüfung .....	302
12.5.3	Mehrkanalige „Low-Strain“-Prüfung .....	303
12.5.4	Parallel Seismik .....	303
12.5.5	Induktions- und Mise-a-la-Masse-Verfahren .....	304
12.5.6	Weitere bohrlochbasierte Verfahren .....	304

<b>13</b>	<b>Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen</b> .....	307
13.1	Allgemeines .....	307
13.2	Zyklische, dynamische und stoßartige Einwirkungen .....	308
13.2.1	Einwirkungs- und Belastungsformen .....	308
13.2.2	Einwirkungen bei zyklischer Belastung .....	310
13.2.3	Einwirkungen bei dynamischer Belastung .....	313
13.2.4	Einwirkungen bei stoßartiger Belastung .....	314
13.3	Ergänzende geotechnische Untersuchungen .....	315
13.4	Tragverhalten und Widerstände bei zyklischer Belastung .....	317
13.4.1	Allgemeines .....	317
13.4.2	Axiale Belastung .....	317
13.4.3	Querbelastung .....	320
13.5	Tragverhalten und Widerstände bei dynamischer Belastung .....	322
13.6	Tragverhalten und Widerstände bei stoßartiger Belastung .....	323
13.6.1	Allgemeines .....	323
13.6.2	Axiale Belastung .....	324
13.6.3	Querbelastung .....	324
13.7	Standsicherheitsnachweise zyklisch axial belasteter Pfähle .....	325
13.7.1	Nachweis der Tragfähigkeit eines Einzelpfahls .....	325
13.7.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit eines Einzelpfahls .....	328
13.8	Standsicherheitsnachweise zyklisch querbelasteter Pfähle .....	328
13.8.1	Nachweis der Tragfähigkeit eines Einzelpfahls .....	328
13.8.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit eines Einzelpfahls .....	329
13.9	Standsicherheitsnachweise dynamisch oder stoßartig belasteter Pfähle .....	330

## **Anhang A**

<b>Begriffe, Teilsicherheitsbeiwerte und Berechnungsgrundlagen</b> .....	331	
A1	Begriffe und Formelzeichen .....	331
A2	Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_F$ bzw. $\gamma_E$ für Einwirkungen und Beanspruchungen aus Handbuch EC 7-1 [44], Tabelle A 2.1 .....	336
A3	Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Kenngrößen und Widerstände aus Handbuch EC 7-1 [44], Tabelle A 2.2 und A 2.3 .....	338
A4	Streuungsfaktoren $\xi_i$ zur Ermittlung der charakteristischen Pfahlwiderstände für den Grenzzustand der Tragfähigkeit aus den Versuchs- bzw. Messwerten von statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen nach Handbuch EC 7-1 .....	340
A5	Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes von Pfählen gegen Knickversagen in Bodenschichten mit geringer seitlicher Stützung (informativ) .....	344
A6	Verbundspannung von verpressten Verdrängungspfählen (informativ) .....	352

## **Anhang B**

### **Berechnungsbeispiele Pfahlwiderstände und Nachweise** ..... 355

B1	Ermittlung der axialen Pfahlwiderstände aus statischen Pfahlprobelastungen sowie Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. ....	355
B2	Charakteristische axiale Pfahlwiderstände aus dynamischen Probelastungen. ....	360
B3	Ermittlung der axialen charakteristischen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für einen Bohrpfahl. ....	362
B4	Ermittlung der axialen charakteristischen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für einen Fertigrammpfahl. ....	365
B5	Ermittlung der axialen charakteristischen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für einen Fundexpfahl ....	369
B6	Grundlage der Auswertung einer statischen Pfahlprobelastung am Beispiel eines Fertigrammpfahls und Vergleich mit Erfahrungswerten nach 5.4.4.2. ....	372
B7	Vorbemessung und Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit von Frankipfählen auf der Grundlage von Erfahrungswerten und Vergleich mit einem Probelastungsergebnis. ....	378
B8	Negative Mantelreibung bei einem Verdrängungspfahl infolge Geländeaufschüttung. ....	385
B9	Ermittlung der Beanspruchung eines quer zur Pfahlachse belasteten Pfahls und Nachweis gegen Materialversagen. ....	391
B10	Auf Seitendruck beanspruchte Pfähle ....	405
B11	Pfeilergründung auf 9 Pfählen – Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung von Gruppenwirkung ....	408
B12	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit einer Zugpfahlgruppe ....	414
B13	Quer zur Pfahlachse belastete Pfahlgruppen: Ermittlung der Verteilung der horizontalen Bettungsmoduln. ....	417

## **Anhang C**

### **Beispiele zur dynamischen Pfahlprobelastung und Integritätsprüfung** ..... 419

C 1	Auswertungsbeispiel dynamische Pfahlprobelastungen nach dem direkten Verfahren. ....	415
C2	Auswertungsbeispiel für dynamische Pfahlprobelastungen nach dem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung. ....	421
C3	Auswertungsbeispiel eines Rapid-Load-Tests nach der Unloading-Point Methode ....	425

C4	Fallbeispiele „Low-Strain“-Integritätsprüfung.....	428
C5	Rammbegleitende und/oder „High-Strain“-Integritätsprüfung .....	432
C6	Fallbeispiel einer Ultraschallprüfung .....	435

**Anhang D**

<b>Berechnungsverfahren und -beispiele für zyklisch belastete Pfähle (informativ) .....</b>	<b>441</b>
---	------------

D1	Anwendungshinweise .....	441
D2	Zyklisch axial belastete Pfähle .....	442
D3	Zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle .....	465
D4	Verfahren zur Ermittlung eines äquivalenten Ein-Stufen-Lastkollektivs .....	480

<b>Literatur .....</b>	<b>487</b>
------------------------	------------

<b>Inserentenverzeichnis .....</b>	<b>497</b>
------------------------------------	------------

# 1 Einleitung und Anwendungsgrundlagen der Empfehlungen

## 1.1 Nationale und internationale Vorschriften für Pfähle

(1) Mit DIN EN 1997-1:2009-09: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln wird in Deutschland die Berechnung und Bemessung von Pfählen im Kapitel 7 dieses Eurocodes EC 7-1 in Verbindung mit DIN 1054:2010-12: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1 und dem nationalen Anhang zum EC 7-1 DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln geregelt. Diese drei aufeinander abgestimmten Normen sind textlich zusammengefasst im Handbuch Eurocode 7, Band 1 [44].

*Anmerkung:* Sofern in den im Handbuch Eurocode 7, Band 1 [44] enthaltenen Normen Änderungen oder Berichtigungen vorgenommen werden, sind diese zugrunde zu legen, auch wenn sie noch nicht in [44] Eingang gefunden haben.

(2) Weiterhin sind für die einzelnen Pfahlsysteme folgende Herstellungsnormen vorhanden:

- DIN EN 1536: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Bohrpfähle,
- DIN SPEC 18140: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 1536
- DIN EN 12699: Ausführung spezieller geotechnischer Arbeiten (Spezialtiefbau) – Verdrängungspfähle,
- DIN SPEC 18538: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 12699,
- DIN EN 14199: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Pfähle mit kleinen Durchmessern (Mikropfähle),
- DIN SPEC 18539: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 14199,
- DIN EN 12794: Betonfertigteile – Gründungspfähle,
- DIN EN 1993-5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 5: Pfähle und Spundwände.

(3) Da auch Schlitzwandelemente oftmals im Sinne von Pfahlgründungen angewendet werden, ist als Herstellungsnorm

- DIN EN 1538: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Schlitzwände,

in Verbindung mit

- DIN 4126: Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden

zu beachten.

(4) Weiterhin werden auch für einige spezielle Themen zu Pfählen ISO Normen erarbeitet, die in Deutschland voraussichtlich aber nicht bauaufsichtlich eingeführt werden. Derzeit liegt vor

DIN EN ISO 22477-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen – Teil 1: Pfahlprobelastungen durch statische axiale Belastungen.

Für die Durchführung von statischen Pfahlprobelastungen sollten national die Regelungen nach Kapitel 9 angewendet werden.

## **1.2 Nachweisformen und Grenzzustände nach dem Teilsicherheitskonzept**

### **1.2.1 Neue Normengeneration und Anwendung auf Pfahlgründungen**

(1) Laut Beschluss der Europäischen Kommission sind bzw. werden die maßgeblichen nationalen Bemessungs- und Ausführungsnormen im Bauwesen durch Europäische Normen ersetzt. Dazu liegen zwischenzeitlich zahlreiche europäische Bemessungs- und Ausführungsnormen für die Geotechnik und den Spezialtiefbau vor.

(2) Die für die Herstellung von Pfählen maßgeblichen europäischen Ausführungsnormen sind in 1.1 aufgeführt.

(3) Die Berechnung und Bemessung von Pfahlgründungen ist europäisch in DIN EN 1997-1: „Entwurf, Bemessung und Berechnung in der Geotechnik“ (Eurocode EC 7-1) in Verbindung mit DIN 1054 und DIN EN 1997-1/NA behandelt, siehe 1.1

(4) Als Übergangslösung bis zur bauaufsichtlichen Einführung der Eurocodes diene eine neue nationale Normengeneration nach dem Teilsicherheitskonzept für alle Gebiete des konstruktiven Ingenieurbaus. Für Pfahlgründungen sind dazu insbesondere folgende Normen maßgebend:

DIN 1055-100:2001-03: Grundlagen der Tragwerksplanung,  
DIN 1054:2005-01: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau,  
DIN 18800:1990-11: Stahlbauten und  
DIN 1045:2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton.

(5) Die bauaufsichtliche Einführung von Eurocode EC 7-1 in Verbindung mit DIN 1054:2010-12 ist in 2012 voraussichtlich als Stichtagslösung zu erwarten. Eine vorgezogene Anwendung kann in Abstimmung mit den Prüfinstanzen vorgenommen werden.

(6) Die vorliegende Fassung der 2. Auflage der EA-Pfähle beruht auf den vorstehend aufgelisteten Normen nach 1.1 und für die Bemessung besonders Eurocode EC 7-1 in Verbindung mit DIN 1054 und NA nach 1.1 (1).

## 1.2.2 Einwirkungen, Beanspruchungen und Widerstände

(1) Das ursprüngliche Teilsicherheitskonzept ging aus von der Wahrscheinlichkeitstheorie zur Festlegung der einzuhaltenden Sicherheiten auf probabilistischer Grundlage. Demgegenüber folgt die neue Normengeneration in der Geotechnik ab Einführung der DIN 1054:2005-01 einer pragmatischen Aufspaltung der bisher gebräuchlichen Globalsicherheiten in Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände.

(2) Grundlage für Standsicherheitsberechnungen sind die charakteristischen Werte für Einwirkungen und Widerstände. Der charakteristische Wert, gekennzeichnet durch den Index „k“, ist ein Wert, von dem angenommen wird, dass er mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Bauwerks oder der entsprechenden Bemessungssituation nicht über- oder unterschritten wird. In der Regel werden charakteristische Werte aufgrund von Versuchen, Messungen, Rechnungen oder Erfahrungen festgelegt.

(3) Wenn die „innere“ oder „äußere“ Tragfähigkeit von Pfählen nachgewiesen werden muss, werden die Beanspruchungen am Pfahlkopf oder in Schnitten benötigt:

- als Schnittgrößen, z. B. Normalkraft, Querkraft, Biegemoment,
- als Spannungen, z. B. Druck-, Zug-, Biegespannung, Schub- oder Vergleichsspannung.

Darüber hinaus können weitere Auswirkungen von Einwirkungen auftreten:

- als dynamische oder zyklische Beanspruchung,
- als Veränderung am Bauteil, z. B. Dehnung, Verformung oder Rissbreite,
- als Lageveränderung der Einzelpfähle oder der Pfahlgruppe, z. B. Verschiebung, Setzung, Verdrehung.

(4) Bei der Bemessung von Einzelteilen sind der Querschnitt und der innere Widerstand des Materials maßgebend. Dafür sind die einzelnen Bauartnormen zuständig.

(5) Die charakteristischen Werte der Beanspruchungen werden mit Teilsicherheitsbeiwerten multipliziert, die charakteristischen Werte der Widerstände durch Teilsicherheitsbeiwerte dividiert. Die so erhaltenen Größen werden als Bemessungswerte der Beanspruchungen bzw. der Widerstände bezeichnet und durch den Index „d“ gekennzeichnet. Beim Nachweis der Standsicherheit werden unterschiedliche Grenzzustände unterschieden, siehe auch 1.2.3, 1.2.4 und 3.1.1 (4).

(6) Neben den Einwirkungen sind für die Pfahlnachweise, wie bei anderen Bauteilen auch, Bemessungssituationen zu berücksichtigen. Dazu sind die bisherigen Lastfälle LF 1, LF 2 und LF 3 für die Nachweise nach

DIN 1054:2005-01, für die Nachweise nach DIN EN 1997 (EC 7-1) und DIN 1054:2010-12 bzw. DIN EN 1990 in die Bemessungssituationen

- BS-P (Persistent situation),
- BS-T (Transient situation) und,
- BS-A (Accidental situation)

umgewandelt worden. Zusätzlich gibt es die Bemessungssituation infolge Erdbeben BS-E. Weitergehende Hinweise finden sich im Handbuch EC 7-1 [44] und in [133].

### **1.2.3 Grenzzustände und nationale Anwendung des Handbuchs EC 7-1**

(1) Der Begriff „Grenzzustand“ wird in zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet:

- a) Als „Grenzzustand des plastischen Fließens“ wird in der Bodenmechanik der Zustand im Boden bezeichnet, in dem in einer ganzen Bodenmasse oder zumindest im Bereich einer Bruchfuge die Verschiebungen der einzelnen Bodenteilchen gegeneinander so groß sind, dass die mögliche Scherfestigkeit ihren Größtwert erreicht, der auch bei einer weiteren Bewegung nicht mehr größer, gegebenenfalls aber kleiner werden kann. Der Grenzzustand des plastischen Fließens kennzeichnet den aktiven Erddruck, den Erdwiderstand, den Grundbruch, das „äußere“ Pfahlversagen sowie den Böschungs- und Geländebruch.
- b) Ein zweiter Grenzzustand im Sinne des neuen Sicherheitskonzeptes ist ein Zustand des Tragwerks, bei dessen Überschreitung die der Tragwerksplanung zugrunde gelegten Anforderungen nicht mehr erfüllt sind.

(2) Im Sinne des Teilsicherheitskonzeptes werden folgende Grenzzustände unterschieden:

- a) Der Grenzzustand der Tragfähigkeit ist ein Zustand des Tragwerks, dessen Überschreitung unmittelbar zu einem rechnerischen Einsturz oder einer anderen Form des Versagens führt. Er wird in EC 7-1 und DIN 1054 als ultimate limit state ULS bezeichnet. Dabei wird eine weitere Unterteilung nach (5) vorgenommen.
- b) Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist ein Zustand des Tragwerks, bei dessen Überschreitung die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt sind. Er wird in EC 7-1 und DIN 1054 als serviceability limit state (SLS) bezeichnet.

(3) Im Hinblick auf die Nachweise der Sicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) bietet der Eurocode EC 7-1 drei Möglichkeiten an. Die für die Anwendung in Deutschland geltenden ergänzenden Regelungen der DIN 1054 stützen sich bis auf eine Ausnahme (siehe (6) und (9)) auf das Nachweisverfahren 2 nach EC 7-1 in der Form, dass die Teilsicherheitsbeiwerte auf die

Beanspruchungen und auf die Widerstände angewendet werden. Zur Unterscheidung zu der ebenfalls zugelassenen Variante, bei der die Teilsicherheitsbeiwerte nicht auf die Beanspruchungen, sondern auf die Einwirkungen angewendet werden, wird dieses Verfahren in [133] als Nachweisverfahren 2\* bezeichnet, siehe auch Handbuch EC 7-1 [44].

(4) Der Nationale Anhang zu EC 7-1 und die DIN 1054 sind ein formales Bindeglied zwischen dem EC 7-1 und dem nationalen Normenwerk, siehe Handbuch EC 7-1 [44]. In DIN 1054 und dem Nationalen Anhang wird angegeben, welches der zur Auswahl gestellten Nachweisverfahren und welche Teilsicherheitsbeiwerte im nationalen Bereich maßgebend sind. Weiterhin darf angegeben werden, welche nationalen Regelwerke ergänzend anzuwenden sind. Die ergänzenden nationalen Regelungen dürfen dem EC 7-1 nicht widersprechen. Darüber hinaus soll der Nationale Anhang und DIN 1054 keine Angaben wiederholen, die bereits im EC 7-1 enthalten sind.

(5) Eurocode EC 7-1 gliedert den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) auf in folgende Grenzzustände:

- a) EQU: Gleichgewichtsverlust des als starrer Körper angesehenen Tragwerks oder des Baugrundes. Die Bezeichnung ist abgeleitet von „equilibrium“.
- b) STR: Inneres Versagen oder sehr große Verformungen des Tragwerks oder seiner Bauteile, wobei die Festigkeit der Baustoffe für den Widerstand entscheidend ist. Die Bezeichnung ist abgeleitet von „structure failure“.
- c) GEO: Versagen oder sehr große Verformung des Tragwerks oder des Baugrundes, wobei die Festigkeit von Boden oder Fels für den Widerstand entscheidend ist. Die Bezeichnung ist abgeleitet von „geotechnic failure“.
- d) UPL: Gleichgewichtsverlust des Bauwerks oder Baugrundes infolge von Auftrieb oder Wasserdruck. Die Bezeichnung ist abgeleitet von „uplift“.
- e) HYD: Hydraulischer Grundbruch, innere Erosion oder „Piping“ im Boden, verursacht durch Strömungsgradienten. Die Bezeichnung ist abgeleitet von „hydraulic failure“.

(6) In der Terminologie des Handbuchs EC 7-1 [44] wird der Grenzzustand GEO aufgeteilt in GEO-2 und GEO-3:

- a) GEO-2: Versagen oder sehr große Verformung des Baugrundes im Zusammenhang mit der Ermittlung der Schnittgrößen und der Abmessungen, d. h. bei der Inanspruchnahme der Scherfestigkeit beim Erdwiderstand, beim Gleitwiderstand, beim Grundbruchwiderstand und beim Nachweis der Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge sowie bei Spitzendruck und Mantelreibung bei Pfahlgründungen. Der Grenzzustand GEO-2 beinhaltet das Nachweisverfahren 2\*, siehe (3), nach Handbuch EC 7-1 [44].
- b) GEO-3: Versagen oder sehr große Verformung des Baugrundes im Zusammenhang mit dem Nachweis der Gesamtstandsicherheit, d. h. bei der Inanspruchnahme der Scherfestigkeit beim Nachweis der Sicherheit gegen Böschungsbruch und Geländebruch sowie in der Regel beim Nachweis der Standsicherheit von konstruktiven Böschungssicherungen, auch unter Be-

rücksichtigung konstruktiver Elemente, z. B. Anker, Pfähle. Der Grenzzustand GEO-3 beinhaltet das Nachweisverfahren 3 nach Handbuch EC 7-1 [44].

(7) Die Grenzzustände EQU, UPL und HYD beschreiben den Verlust der Lagesicherheit. Dazu gehören:

- a) der Nachweis der Sicherheit gegen Umkippen (EQU),
- b) der Nachweis der Sicherheit gegen Aufschwimmen oder Abheben, z. B. bei einer Zugpfahlgruppe (UPL),
- c) der Nachweis der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch (HYD).

(8) Bei den Grenzzuständen EQU, UPL und HYD gibt es nur Einwirkungen, keine Widerstände.

Maßgebend ist die Grenzzustandsbedingung

$$F_d = F_k \cdot \gamma_{dst} \leq G_k \cdot \gamma_{stb} = G_d \quad (1.1)$$

d. h. die destabilisierenden Einwirkungen  $F_k$  multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{dst} \geq 1,0$  dürfen höchstens so groß werden wie die stabilisierende Einwirkung  $G_k$  multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{stb} < 1,0$ .

(9) Der Grenzzustand GEO-2 beschreibt das Versagen von Bauwerken und Bauteilen bzw. das Versagen des Baugrundes. Dazu gehören:

- a) der Nachweis der Tragfähigkeit von Bauwerken und von Bauteilen, die durch den Baugrund belastet bzw. durch den Baugrund gestützt werden,
- b) der Nachweis, dass die Tragfähigkeit des Baugrundes, z. B. in Form von Erdwiderstand, Grundbruchwiderstand, Pfahlwiderstand oder Gleitwiderstand, nicht überschritten wird.

Dabei wird der Nachweis, dass die Tragfähigkeit des Baugrundes nicht überschritten wird, genau so geführt wie bei jedem anderen Baumaterial. Maßgebend ist immer die Grenzzustandsbedingung

$$E_d = E_k \cdot \gamma_F \leq R_k / \gamma_R = R_d \quad (1.2)$$

d. h. die charakteristische Beanspruchung  $E_k$ , multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_F$  für Einwirkungen bzw. Beanspruchungen, darf höchstens so groß werden wie der charakteristische Widerstand  $R_k$  dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_R$ .

(10) Der Grenzzustand GEO-3 ist eine Besonderheit des Erd- und Grundbaus. Er beschreibt den Verlust der Gesamtstandsicherheit. Dazu gehören:

- a) der Nachweis der Sicherheit gegen Böschungsbruch,
- b) der Nachweis der Sicherheit gegen Geländebruch.

Maßgebend ist immer die Grenzzustandsbedingung

$$E_d \leq R_d \quad (1.3)$$

d. h. der Bemessungswert  $E_d$  der Beanspruchungen darf höchstens so groß werden wie der Bemessungswert  $R_d$  des Widerstandes. Hierbei werden die geotechnischen Einwirkungen und Widerstände mit den Bemessungswerten

$$\tan \varphi'_d = \tan \varphi'_k / \gamma_\varphi \quad \text{und} \quad c'_d = c'_k / \gamma_c \quad \text{bzw.} \quad (1.4a)$$

$$\tan \varphi_{u,d} = \tan \varphi_{u,k} / \gamma_\varphi \quad \text{und} \quad c_{u,d} = c_{u,k} / \gamma_c \quad (1.4b)$$

der Scherfestigkeiten ermittelt, d. h. die Reibung  $\tan \varphi$  und die Kohäsion  $c$  werden von vornherein mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_\varphi$  und  $\gamma_c$  abgemindert.

(11) Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) beschreibt den Zustand des Bauwerks oder Bauteils, bei dem die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt sind, ohne dass seine Tragfähigkeit verloren geht. Dem Nachweis liegt zugrunde, dass die zu erwartenden Verschiebungen und Verformungen mit dem Zweck des Bauwerks vereinbar sind.

#### **1.2.4 Übergangsregelungen zur Anwendung der EA-Pfähle im Zusammenhang mit dem Handbuch EC 7-1**

(1) Die vorliegende 2. Auflage der EA-Pfähle beruht auf den Festlegungen des Handbuchs EC 7-1 [44].

(2) Eine maßgeblich andere Festlegung im Handbuch EC 7-1 [44] gegenüber DIN 1054:2005-01 für Pfahlgründungen sind andere Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_p$  (niedriger) und Streuungsfaktoren  $\xi$  (höher). In der Summe ergeben sich aber aus  $\gamma_p$  und  $\xi$  vergleichbare Größenordnungen auf der widerstehenden Seite wie nach DIN 1054:2005-01, siehe [59].

(3) Die bisherigen Grenzzustände nach DIN 1054:2005-01 werden im Handbuch EC 7-1 [44] wie folgt ersetzt:

- a) Dem bisherigen Grenzzustand GZ 1A nach DIN 1054:2005-01 entsprechen ohne Einschränkung die Grenzzustände EQU, UPL und HYD nach Handbuch EC 7-1 [44].
- b) Dem bisherigen Grenzzustand GZ 1B nach DIN 1054:2005-01 entspricht ohne Einschränkung der Grenzzustand STR nach Handbuch EC 7-1 [44] als „innere“ Pfahltragfähigkeit (Materialfestigkeit). Hinzu kommt der Grenzzustand GEO-2 nach Handbuch EC 7-1 [44] im Zusammenhang mit der „äußeren“ Bemessung der Gründungselemente, z. B. „äußere“ Pfahltragfähigkeit.
- c) Dem bisherigen Grenzzustand GZ 1C nach DIN 1054:2005-01 entspricht der Grenzzustand GEO-3 nach Handbuch EC 7-1 [44] im Zusammenhang mit dem Nachweis der Gesamtstandsicherheit, d. h. bei Inanspruchnahme der Scherfestigkeit beim Nachweis der Sicherheit gegen Böschungsbruch und Geländebruch.