

Untersuchungen zum Tragverhalten von Pfählen unter aktiver Horizontalbelastung

vom Fachbereich D,
Abteilung Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation

von
Tim Welskopf, Solingen

Dissertation eingereicht am: 15.10.2012

Datum der mündlichen Prüfung: 28.02.2012

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort
Bergische Universität Wuppertal

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Achmus
Leibniz Universität Hannover



Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D

Abteilung Bauingenieurwesen

**Berichte des Lehr- und
Forschungsgebietes Geotechnik**

Nr. 33

September 2012

Tim Welskopf

**Untersuchungen zum Tragverhalten von Pfählen
unter aktiver Horizontalbelastung**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort

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.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1302-3

ISSN 1867-3325

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Zusammenfassung:

Vertikale Pfähle tragen horizontale Belastungen am Pfahlkopf im umgebenden Boden durch horizontale Bettungsspannungen ab. In diesem Prozess wird der mobilisierbare Pfahlwiderstand durch die Pfahl-Boden-Interaktion bestimmt. Trotz zahlreicher Untersuchungen in den vergangenen Jahren ist der aktuelle Wissensstand bezüglich der horizontalen Pfahl-Boden-Interaktion noch immer unzureichend. In der Praxis wird sie häufig vernachlässigt oder in stark vereinfachter Form, wie im sogenannten Bettungsmodulverfahren, berücksichtigt, was zu unwirtschaftlichen oder sogar fehlerhaften Entwürfen führen kann. Die schon bei statischer Belastung zu beobachtende Komplexität der Pfahl-Boden-Interaktion ist auf das nichtlineare Tragverhalten des Bodens, die Phänomene in der Kraftübertragung zwischen Pfahl und Boden sowie die räumliche Komponente des Problems zurückzuführen. Im Falle einer zyklischen oder dynamischen Belastung des Pfahles wird der Schwierigkeitsgrad zusätzlich durch die unterschiedliche Steifigkeit des Bodens bei einem Richtungswechsel der Beanspruchung sowie die belastungsinduzierte Veränderung der Lagerungsdichte erhöht. Deshalb sind nur solche Methoden zur Untersuchung der Pfahl-Boden-Interaktion geeignet, die der Komplexität des Problems gerecht werden. Dementsprechend wurden in dieser Arbeit kleinmaßstäbliche Modellversuche sowie numerische Untersuchungen mit Hilfe dreidimensionaler Finite-Elemente-Modelle durchgeführt.

In den physikalischen Modellversuchen mit unterschiedlich dicht gelagertem trockenem Sand wurden Einzelpfähle (schwimmend) unter statischer, zyklischer und dynamischer ($f \leq 7 \text{ Hz}$) Horizontalbelastung betrachtet; Ergebnisse waren Last-Verschiebungskurven des Pfahlkopfes sowie aus den Dehnungsmessungen am Pfahlschaft zurückgerechnete Momentenverteilungen. Der geometrische Modellmaßstab betrug 1:12, wobei als Prototyp ein Stahlbetonpfahl mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Einbindetiefe von 5 m diente. Um herstellungsbedingte Einflüsse zu berücksichtigen, erfolgte der Einbau der Modellpfähle durch vertikales Einpressen.

Das entwickelte FE-Modell des umgebenden Bodens, das auf dem hypoplastischen Stoffgesetz - erweitert um das Konzept der intergranularen Dehnung - basiert, wurde zur Nachrechnung der Modellversuche, der Verbesserung des Modellgesetzes und für Parameterstudien am Prototyp verwendet. Es ist in der Lage, die Veränderung der Bodeneigenschaften während der statischen, der zyklischen oder der dynamischen Belastung zu simulieren. Während die Pfahl-Boden-Interaktion bei Bohrpfählen zufriedenstellend beschrieben wird, so dass verschiedene Parameterstudien bezüglich der Boden- und Kontakteigenschaften durchgeführt werden konnten, lässt sich das im Modellversuch beobachtete Verhalten eines Verdrängungspfahles unter zyklischer oder dynamischer Belastung noch nicht zutreffend reproduzieren. Hier sind weitere Untersuchungen zur Verbesserung des numerischen Modells notwendig.

Abstract:

Vertical piles carry off lateral loads at the pile head towards the surrounding soil by means of horizontal bedding stresses. In this process the pile's bearing performance is determined by the pile-soil-interaction. Despite numerous investigations throughout the past years, the actual knowledge in lateral pile-soil-interaction is still insufficient. In practice, the pile-soil-interaction is commonly disregarded or represented in extremely simplified forms like subgrade reaction models, which can lead to uneconomic or even defective design. The complexity of pile-soil-interaction is due to the non-linear behaviour of the soil, the contact phenomena developing in direct transition of pile surface and soil and - last but not least - to the spatial circumstances of the matter. In case of a periodic or dynamic loading at the pile head, the level of complexity is even elevated by the extreme disparities of rigidity of the soil for loading and unloading as well as by the simultaneous change of the soil's density. Therefore only those techniques are suited for the examination of pile-soil-interaction, which allow consideration to the complexity of the problem. Accordingly, in this thesis small-scale simulation tests in a sand box as well as numerical investigations by means of the Finite Element Analysis under three-dimensional conditions were carried out.

In the physical model tests in dry sand of different initial densities, the single floating pile models were exposed to static, cyclic and dynamic (up to 7 Hz) lateral loads, leading to results like load-displacement-curves of the pile top and the distribution of the bending moments, which were counted back from strain measurements along the pile shaft. The geometrical scale in the physical modeling was taken to 1:12, representing a prototype reinforced concrete pile of 30 cm in diameter and 5 m in embedded length. The model piles were jacked, in order to take the installation process into account.

A Finite-Element-model of the surrounding soil, based upon the hypoplastic material law with intergranular strain, was developed, which was used for the recalculation of the small scale model tests leading to a calibration of the model law figures as well as in order to vary several parameters in the prototype scale. This model is able to simulate the change of soil properties during the excitation under static, cyclic or dynamic loading. While pile-soil-interaction of bored piles in prototype scale can be described sufficiently, so that different parameter studies concerning soil and contact properties could be conducted successfully, the model is still failing in predicting the behaviour of a jacked pile under cyclic or dynamic loading as observed in the physical model tests. Here further research is needed to enhance the numerical model.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Erläuterungen zum Tragverhalten horizontal belasteter Pfähle	3
2.1	Einführung	3
2.2	Einfluss der Belastung	6
2.3	Einfluss der Pfahleigenschaften	9
2.4	Einfluss der Bodeneigenschaften	11
2.5	Einfluss der Belastungsgeschichte	19
3	Aktueller Stand zur Berechnung des Tragverhaltens horizontal belasteter Pfähle	24
3.1	Einführung	24
3.2	Bettungsmodulverfahren	25
3.3	Methode der Finiten Elemente	29
4	Modellversuche zur Untersuchung des Tragverhaltens horizontal belasteter Pfähle	37
4.1	Einführung	37
4.2	Eigenschaften des verwendeten Versuchsbodens	39
4.2.1	Materialverhalten im Triaxialversuch	39
4.2.2	Materialverhalten im Kompressionsversuch	44
4.3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	49
4.3.1	Aufbau des Modellpfahles	50
4.3.2	Versuchsanlage	54
4.3.3	Versuchsdurchführung	57
4.4	Ermittelte Einpresskurven	60
4.5	Ergebnisse der Versuche unter statischer Belastung	65
4.6	Ergebnisse der Versuche unter zyklischer Belastung	76
4.6.1	Tragverhalten des Pfahles unter zyklischer weggesteuerter Wechselbelastung	78
4.6.2	Tragverhalten des Pfahles unter zyklischer kraftgesteuerter Wechselbelastung	92
4.6.3	Tragverhalten des Pfahles unter zyklischer kraftgesteuerter Schwellbelastung	107
4.7	Ergebnisse der Versuche unter dynamischer Belastung	114

4.7.1 Tragverhalten des Pfahles unter dynamischer weggesteuerter symmetrischer Wechselbelastung	116
4.7.2 Tragverhalten des Pfahles unter dynamischer wegge- steuerter stark unsymmetrischer Wechselbelastung	148
5 Numerische Untersuchung des Tragverhaltens horizontal belasteter Pfähle	161
5.1 Einführung	161
5.2 Nachrechnung der Modellversuche	162
5.2.1 Einpresskurven	163
5.2.2 statische Belastung	177
5.2.3 zyklische Belastung	196
5.2.3.1 wegesteuerte Belastung in Versuchsreihe 1	197
5.2.3.2 kraftgesteuerte Belastung in Versuchsreihe 3	201
5.2.4 dynamische Belastung	205
5.3 Berechnungen am Prototyp (Verdrängungspfahl)	210
5.3.1 Einpresskurven	211
5.3.2 statische Belastung	213
5.3.3 nicht ruhende Belastung	223
5.4 Berechnungen am Prototyp (Bohrpfahl)	225
5.4.1 statische Belastung	227
5.4.1.1 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden	227
5.4.1.2 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kombinierter Einwirkung von Horizontal- und Vertikallasten	231
5.4.1.3 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter Verwendung des hypoplastischen Kontaktmodells	231
5.4.1.4 Tragverhalten des Pfahles in wassergesättigtem nichtbindigen Boden unter drainierten Verhältnissen	232
5.4.1.5 Tragverhalten des Pfahles in wassergesättigtem nichtbindigen Boden unter teilweise drainierten Verhältnissen	235
5.4.2 zyklische Belastung	237
5.4.2.1 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter symmetrischer Wechselbelastung	238
5.4.2.2 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter Schwellbelastung	247

5.4.2.3 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter weggesteuerter Belastung	255
5.4.2.4 Tragverhalten des Pfahles in wassergesättigtem nichtbindigen Boden unter Wechselbelastung und teilweise drainierten Verhältnissen	260
5.4.2.5 Tragverhalten des Pfahles unter Wechsel- und Schwellbelastung in kohäsivem Boden	261
5.4.3 dynamische Belastung	267
5.4.3.1 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter symmetrischer Wechselbelastung	268
5.4.3.2 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter Schwellbelastung	272
6 Zusammenfassung und Ausblick	276
Literaturverzeichnis	282
Anhang A drainierte Triaxialversuche zur Beschreibung des Spannungs-Verformungsverhaltens des Versuchsbodens	291
Anhang B Modellversuche	293
B.1 Modellgesetze	293
B.2 Kalibrierung des Modellpfahles	303
B.3 Zustandslinien des Pfahles unter statischer Belastung – Einkleidung der Versuchsergebnisse	306
B.4 Messtechnische Besonderheiten (Dynamik)	320
Anhang C Einzelheiten der numerischen Untersuchungen	330
C.1 verwendete Stoffgesetze und Kalibrierung der numerischen Parameter	330
C.2 Aspekte der Modellierung	352
C.2.1 allgemeine Hinweise zu ABAQUS/Explicit und ABAQUS/Standard	352
C.2.2 Generierung des Ausgangszustandes der Berechnung	362
C.2.3 numerische Simulation des Einpressvorganges	365
C.2.4 verwendete FE-Netze	366
C.2.5 Einfluss der Form des Pfahlfußes	370
C.2.6 hypoplastisches Kontaktmodell	374

C.2.7 infinite Elemente	376
C.2.8 Mehrphasenmodell von ABAQUS für statische und zyklische Belastung	380
Anhang D Berechnungen für Bohrpfähle im Prototypmaßstab	384
D.1 statische Belastung	390
D.1.1 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden	390
D.1.2 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kombinierter Einwirkung von Horizontal- und Vertikallasten	408
D.1.3 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter Verwendung des hypoplastischen Kontaktmodells	412
D.1.4 Tragverhalten des Pfahles in wassergesättigtem nichtbindigen Boden unter drainierten Verhältnissen	416
D.1.5 Tragverhalten des Pfahles in wassergesättigtem nichtbindigen Boden unter teilweise drainierten Verhältnissen	422
D.2 zyklische Belastung	433
D.2.1 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter symmetrischer Wechselbelastung	434
D.2.2 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter Schwellbelastung	479
D.2.3 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter weggesteuerter Belastung	530
D.2.4 Tragverhalten des Pfahles in wassergesättigtem nichtbindigen Boden unter Wechselbelastung und teilweise drainierten Verhältnissen	560
D.2.5 Tragverhalten des Pfahles unter Wechsel- und Schwellbelastung in kohäsivem Boden	570
D.3 dynamische Belastung	624
D.3.1 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter symmetrischer Wechselbelastung	642
D.3.2 Tragverhalten des Pfahles in trockenem nichtbindigen Boden unter kraftgesteuerter Schwellbelastung	660

verwendete Symbole

Kapitel 2

Symbol	Einheit	Bedeutung
e	[-]	Porenzahl
e_c	[-]	kritische Porenzahl
f	[Hz]	Frequenz
f_B	[Hz]	Frequenz
f_φ	[-]	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit
H	[N]	Kraft am Pfahlkopf
L	[m]	Einbindetiefe des Pfahles
M	[Nm]	Moment am Pfahlkopf
N	[-]	Lastspielzahl bzw. Anzahl der Lastspiele
p	[Pa]	Bettungsspannungen
p	[Pa]	mittlere Spannung bzw. mittlerer Druck
q	[Pa]	Deviatorspannung
$q_{\text{Amp.}}$	[Pa]	Amplitude der Deviatorspannung
q^{ampl}	[Pa]	Amplitude der Deviatorspannung
q_c	[Pa]	undrainierte zyklische Belastung
q_c	[Pa]	Spitzenwiderstand aus Drucksondierung
q_f	[Pa]	statische Festigkeit nach undrainierter zyklischer Belastung
$q_{\text{Mw.}}$	[Pa]	Mittelwert der Deviatorspannung
q_{su}	[Pa]	statische Festigkeit vor undrainierter zyklischer Belastung
t	[s]	Zeit
T	[s]	Periode, Schwingungsdauer
u	[m]	Biegelinie des Pfahles
X	[-]	Verhältnis der zyklisch-dynamischen Deviatorspannung zur statischen Deviatorspannung im Bruchzustand
z	[m]	z-Koordinate in Tiefenrichtung
ε	[-]	axiale Dehnung
ε_a	[-]	akkumulierte plastische axiale Dehnung
ε_{a1}	[-]	akkumulierte plastische axiale Dehnung nach dem 1. Lastspiel
ε^{acc}	[-]	akkumulierte plastische axiale Dehnung
ε_{ar}	[-]	Verhältnis der axialen Dehnungen $\varepsilon_a/\varepsilon_{a1}$
ε_{cp}	[-]	akkumulierte plastische axiale Dehnung
$\varepsilon_{\text{cp},N=1}$	[-]	akkumulierte plastische axiale Dehnung nach dem 1. Lastspiel

σ	[Pa]	Normalspannungen
σ_3	[Pa]	Zelldruck im Triaxialversuch
τ	[Pa]	Schubspannungen
φ	[°]	Reibungswinkel des Bodens
φ_c	[°]	kritischer Reibungswinkel des Bodens

Kapitel 3

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	[-]	Exponent zur Beschreibung des Verlaufes des Bettungsmoduls
b	[-]	Exponent zur Beschreibung des Verlaufes des Bettungsmoduls
d	[m]	Pfahldurchmesser
d_0	[m]	Mindestabstand der Kontaktpartner
EI	[Nm ²]	Biegesteifigkeit des Pfahles
F	[N]	Kraft am Pfahlkopf bzw. Pfahlwiderstand
$F_{2d, t=d}$	[N]	im zweidimensionalen FE-Modell ermittelter Pfahlwiderstand bei einer Lasteinflussbreite $t = d$
F_{3d}	[N]	im dreidimensionalen FE-Modell ermittelter Pfahlwiderstand
$F_{3d, u/d=1}$	[N]	im dreidimensionalen FE-Modell ermittelter Pfahlwiderstand bei einer bezogenen Pfahlkopfverschiebung $u/d = 1$
h	[-]	vom Porenanteil abhängige Dichtefunktion
k	[N/m ³]	Bettungsmodul
k_0	[N/m ³]	Ausgangswert des Bettungsmoduls in der Tiefe z_0
k_{ref}	[N/m ³]	Referenzwert des Bettungsmoduls in der Tiefe z_{ref}
L	[m]	Einbindetiefe des Pfahles
m	[-]	Exponent zur Beschreibung des Verlaufes des Bettungsspannungen
N	[N]	Normalkraft im Pfahl
p	[Pa]	Bettungsspannungen
p	[N/m]	linienförmige Bettungsreaktion
p_u	[Pa]	Fließdruck
t	[m]	Tiefe des Berechnungsausschnittes im zweidimensionalen FE-Modell
u	[m]	Verschiebung des Pfahlkopfes
w	[m]	horizontale Komponente der Biegelinie des Pfahles
y	[m]	Verschiebung bzw. horizontale Komponente der Biegelinie des Pfahles
y_c	[m]	Referenzwert der Verschiebung zur Mobilisierung des Fließdruckes
z	[m]	z-Koordinate in Tiefenrichtung
z_0	[m]	z-Ordinate zur Beschreibung des Verlaufes des Bettungsmoduls
z_{ref}	[m]	z-Ordinate zur Beschreibung des Verlaufes des Bettungsmoduls

γ	[N/m ³]	Wichte des Bodens
ε_{50}	[-]	axiale Dehnung im Triaxialversuch bei 50 % der maximalen Deviatorspannung

Kapitel 4 bzw. Anhang B

Symbol	Einheit	Bedeutung
a		mathematischer Freiwert
a	[m]	1/3 des Umfanges des Messingrohres
$a_0 \dots a_3$		mathematische Freiwerte
A		Amplitudenwert
A	[-]	empirischer Koeffizient
A	[-]	Untermatrix der Dimensionsmatrix
b		mathematischer Freiwert
$b_0 \dots b_2$		mathematische Freiwerte
B	[-]	Untermatrix der Dimensionsmatrix
c		mathematischer Freiwert
$c_0 \dots c_2$		mathematische Freiwerte
C	[-]	Untermatrix zur Ermittlung der Ähnlichkeitskennzahlen
C_c	[-]	Krümmungszahl
C_{ij}	[-]	Komponenten der Untermatrix C
C_u	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d	[m]	Probendurchmesser
d		mathematischer Freiwert
d	[m]	Pfahldurchmesser
d_{50}	[m]	mittlerer Korndurchmesser
d_a	[m]	Außendurchmesser
d_{ij}	[-]	Komponenten der Dimensionsmatrix
D	[m]	Pfahldurchmesser
D	[-]	Untermatrix zur Ermittlung der Ähnlichkeitskennzahlen
D_B	[m]	Behälterdurchmesser
D_{ij}	[-]	Komponenten der Untermatrix D
D_S	[m]	Sondendurchmesser
e	[-]	Porenzahl
e_0	[-]	Ausgangsporenzahl
$e_{\max}$	[-]	Porenzahl bei lockerster Lagerung nach DIN 18126
$e_{\min}$	[-]	Porenzahl bei dichtester Lagerung nach DIN 18126

e_p	[-]	zum Peak-Reibungswinkel zugehörige Porenzahl
E	[Pa]	E-Modul
EI	[Nm ²]	Biegesteifigkeit des Pfahles
E_s	[Pa]	Steifemodul des Bodens
f		mathematische Funktion
f	[m]	Freibord
f	[Hz]	Frequenz
f_k	[-]	Korrekturfaktor
f_s	[Hz]	Messrate
F	[N]	Kraft am Pfahlkopf bzw. Pfahlwiderstand
F		mathematische Funktion
$F_{0,1d}$	[N]	mobilisierter Pfahlwiderstand bei einer Pfahlkopfverschiebung von $u = 0,1 \cdot d$
$F_{Amp.}$	[N]	Amplitude der Kraft am Pfahlkopf
F_{ist}	[N]	Istwert der Kraft am Pfahlkopf
F_{soll}	[N]	Sollwert der Kraft am Pfahlkopf
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
g		mathematische Funktion
G		mathematische Funktion
h	[m]	Probenhöhe
h	[m]	Hebelarm der Kraft am Pfahlkopf
h_s	[Pa]	Granulathärte
h_{soll}	[m]	planmäßiger Hebelarm der Kraft am Pfahlkopf
H	[N]	Kraft am Pfahlkopf
I_D	[-]	bezogene Lagerungsdichte
k	[-]	Anzahl der Grundgrößen
k_0	[-]	Ruhedruckbeiwert
l	[m]	Länge des Messingrohres
L	[m]	Einbindetiefe des Pfahles
L	[m]	Abstand der Auflager
L_{ges}	[m]	Solleinbindetiefe des Modellpfahles
L_{soll}	[m]	Solleinbindetiefe
m	[-]	Anzahl der dimensionslosen Potenzprodukte
M	[Nm]	Moment
M_y	[Nm]	Moment um die y-Achse
M_z	[Nm]	Moment um die z-Achse
n	[-]	Anzahl der physikalischen bzw. dimensionsbehaftete Größen
n	[-]	Exponent im Kompressionsgesetz
n	[-]	Maßstabszahl
N	[-]	Anzahl der Messwerte

N	[N]	Normalkraft
N	[-]	Lastspielzahl bzw. Anzahl der Lastspiele
p	[Pa]	mittlere Spannung bzw. mittlerer Druck
$p_1 \dots p_7$		mathematische Freiwerte
p_{ref}	[Pa]	Referenzdruck
q	[N/m]	Linienlast
q_c	[Pa]	Spitzenwiderstand aus Drucksondierung
Q	[N]	Querkraft
r	[-]	Rang der Dimensionsmatrix
R_k	[N]	Einpesswiderstand
s	[m]	Hebelarm der Kraft am Pfahlkopf
S	[-]	Signal
S_i	[-]	Skalierungsfaktor der Größe i
t	[m]	Wandstärke
t	[s]	Zeit
Δt	[s]	Zeitintervall
T_{ges}	[s]	gesamter betrachteter Zeitraum
u	[m]	Verschiebung des Pfahlkopfes
Δu	[m]	Verschiebungszuwachs
$u_{\text{Amp.}}$	[m]	Amplitude der Pfahlkopfverschiebung
u_{ist}	[m]	Istwert der Verschiebung des Pfahlkopfes
u_{soll}	[m]	Sollwert der Verschiebung des Pfahlkopfes
w	[m]	Durchbiegung in Feldmitte
w	[m]	Biegelinie des Pfahles
W	[J]	Energie
ΔW	[J]	dissipierte Energie
W_{el}	[J]	gespeicherte bzw. elastische Energie
W_{in}	[J]	zugeführte Energie
x		unabhängige dimensionsbehaftete Größe
x	[m]	x-Koordinate in Richtung der Pfahlachse beginnend am Pfahlkopf
y		abhängige dimensionsbehaftete Größe
y, z	[m]	Koordinatensystem in der Querschnittsfläche des Pfahles
y^*, z^*	[m]	Koordinatensystem in der Querschnittsfläche des Pfahles
z	[m]	z-Koordinate in Tiefenrichtung
α	[-]	empirischer Koeffizient
α	[-]	Exponent des Modellgesetzes
α	[1/N]	Linearitätskonstante
α_{ij}	[-]	Exponenten zur Bildung der Ähnlichkeitskennzahl

β	[-]	empirischer Koeffizient
β	[°]	gemessene unplanmäßige Verdrehung des Pfahles
β^*	[°]	berechnete unplanmäßige Verdrehung des Pfahles
γ	[N/m ³]	Wichte des Bodens
δ	[°]	Wandreibungswinkel
ε	[-]	axiale Dehnung bzw. Stauchung
κ_y	[-]	Verkrümmung um die y-Achse
κ_z	[-]	Verkrümmung um die z-Achse
κ_{y^*}	[-]	Verkrümmung um die y [*] -Achse
κ_{z^*}	[-]	Verkrümmung um die z [*] -Achse
μ	[-]	Reibungsbeiwert
ν_p	[°]	zum Peak-Reibungswinkel zugehöriger Dilatanzwinkel
ξ	[m]	ξ -Koordinate in Richtung der Pfahlachse beginnend auf Höhe der Geländeoberfläche
π	[-]	dimensionsloses Potenzprodukt bzw. Ähnlichkeitskennzahl
ρ_s	[kg/m ³]	Korndichte
σ	[Pa]	vertikale Spannung
σ_0	[Pa]	Ausgangsspannung
σ_1	[Pa]	vertikale Spannung im Triaxialversuch
σ_3	[Pa]	Zelldruck im Triaxialversuch
σ'_v	[Pa]	vertikale effektive Spannung im Boden
φ	[°]	Reibungswinkel des Bodens
φ_c	[°]	kritischer Reibungswinkel des Bodens
φ_p	[°]	Peak-Reibungswinkel des Bodens
ϕ	[-]	Verdrehung
ψ	[-]	spezifische Dämpfungskapazität

Kapitel 5 bzw. Anhang C und D

Symbol	Einheit	Bedeutung
a		Tensor 2. Stufe
a	[-]	Parameter der Grenzbedingung
a_{ij}		Komponenten eines Tensors 2. Stufe
A		Tensor 4. Stufe
A		Amplitudenwert
A_{ijkl}		Komponenten eines Tensors 4. Stufe
b		Tensor 2. Stufe

b_{ij}		Komponenten eines Tensors 2. Stufe
c	[Pa]	Betrag der Kohäsion
c_1	[-]	Parameter des Stoffgesetzes
c_2	[-]	Parameter des Stoffgesetzes
c_d	[m/s]	Wellengeschwindigkeit
$\mathbf{d}$	[1/s]	Tensor der Dehnungsrate
d	[m]	Pfahldurchmesser
$d_{\perp}$	[1/s]	Dehnungsrate orthogonal zur Scherfuge
d_{50}	[m]	mittlerer Korndurchmesser
d_{ij}	[1/s]	Komponenten des Tensors der Dehnungsrate
d_s	[m]	Dicke der imaginären Kontaktfuge
d_w	[m]	wirksame Korndurchmesser
D	[m]	Pfahldurchmesser
D_{ijkl}	[Pa]	Komponenten der orthotropen Elastizitätsmatrix
e	[-]	Porenzahl
Δe	[-]	Änderung der Porenzahl
e_0	[-]	Ausgangsporenzahl
e_c	[-]	kritische Porenzahl
e_{c0}	[-]	kritische Porenzahl bei $p = 0$ Pa
e_d	[-]	Porenzahl bei maximaler Verdichtung
e_{d0}	[-]	Porenzahl bei maximaler Verdichtung und $p = 0$ Pa
e_i	[-]	maximale Porenzahl bei idealer Kompression
e_{i0}	[-]	maximale Porenzahl bei idealer Kompression und $p = 0$ Pa
$e_{\max}$	[-]	Porenzahl bei lockerster Lagerung nach DIN 18126
$e_{\min}$	[-]	Porenzahl bei dichtester Lagerung nach DIN 18126
e_{Mittel}	[-]	Mittelwert der Porenzahl im Ausgangszustand
E	[Pa]	E-Modul
EI	[Nm ²]	Biegesteifigkeit des Pfahles
E_s	[Pa]	Steifemodul des Bodens
f	[Hz]	Frequenz
f_d	[-]	druck- und porenzahlabhängiger Faktor
f_s	[-]	druck- und porenzahlabhängiger Faktor
$\bar{f}_s$	[-]	druck- und porenzahlabhängiger Faktor
f_{φ}	[-]	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit
F	[-]	Spannungsfunktion bzw. Grenzbedingung
F	[N]	Kraft am Pfahlkopf bzw. Pfahlwiderstand
$F_{\text{Amp.}}$	[N]	Amplitude der Kraft am Pfahlkopf
$F_{\text{max.}}$	[N]	maximale Kraft am Pfahlkopf bzw. maximaler Pfahlwiderstand
F_v	[N]	vertikale (Druck-) Kraft am Pfahlkopf
G	[Pa]	Schubmodul

G_k	[N]	Gewichtskraft des Pfahles
h_s	[Pa]	Granulathärte
$\mathbf{H}$	[Pa/s]	tensorwertige Funktion (vierstufig)
$\mathbf{i}$		Identitätstensoren 2. Stufe
$\mathbf{I}$		Identitätstensoren 4. Stufe
$\mathbf{l}$	[N]	Vektor der inneren Kräfte
l_D	[-]	bezogene Lagerungsdichte
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
k	[N/m]	Steifigkeit
k_0	[-]	Ruhedruckbeiwert
K	[Pa]	Kompressionsmodul
l_E	[m]	charakteristische (Element-) Länge
$\mathbf{L}$	[Pa/s]	tensorwertige Funktion; vierstufiger linearer „Steifigkeitstensor“
L	[m]	Einbindetiefe des Pfahles
m	[kg]	Masse
m_R	[-]	Materialkonstante des Konzeptes der intergranularen Dehnung
m_T	[-]	Materialkonstante des Konzeptes der intergranularen Dehnung
$\mathbf{M}$	[Pa/s]	tensorwertige Funktion; vierstufiger nichtlinearer „Steifigkeitstensor“
$\mathbf{M}$	[kg]	Massenmatrix
M	[Nm]	Moment im Pfahl
M_{ijkl}	[Pa/s]	Komponenten der tensorwertige Funktion $\mathbf{M}$
$M_{\max}$	[Nm]	maximales Moment im Lastspiel
$M_{\min}$	[Nm]	minimales Moment im Lastspiel
$\mathbf{n}$	[Pa/s]	tensorwertige Funktion; zweistufiger nichtlinearer „Steifigkeitstensor“
n	[-]	Exponent im Kompressionsgesetz
n	[-]	Porenanteil
n	[-]	Maßstabszahl
N	[-]	Lastspielzahl bzw. Anzahl der Lastspiele
N	[N]	Normalkraft im Pfahl
p	[Pa]	mittlere Spannung bzw. mittlerer Druck
$\Delta p_{\min}$	[Pa]	untere Grenze der Änderung des Porenwasserdruckes
p_a	[Pa]	isotroper Druck in der gasförmigen Phase
p_w	[Pa]	isotroper Druck in der flüssigen Phase
$\mathbf{P}$	[N]	Vektor der äußeren Kräfte
P	[N]	Referenzwert zur Ermittlung von ΔR
q	[Pa]	Deviatorspannung
$q^{\text{ampl.}}$	[Pa]	Amplitude der Deviatorspannung
$q_{\max}$	[Pa]	maximale Deviatorspannung
$q_{\min}$	[Pa]	minimale Deviatorspannung
Q	[N]	Querkraft im Pfahl

r	[-]	Parameter des Stoffgesetzes
R	[-]	Materialkonstante des Konzeptes der intergranularen Dehnung
R	[N]	Einpresswiderstand
ΔR	[N]	Toleranzwert des „Half-Step“-Residuum
s	[-]	Sättigungsgrad
S_i	[-]	Skalierungsfaktor der Größe i
S_{iso}	[Pa/s]	tangentiale Steifigkeit bei isotroper Kompression
$S_{triax,iso}$	[Pa/s]	tangentiale Steifigkeit bei triaxialer Kompression mit isotropem Ausgangsspannungszustand
t	[s]	Zeit
Δt	[s]	Zeitinkrement bzw. Zeitintervall
t_{krit}	[s]	kritischer Zeitschritt
T	[s]	Periode, Schwingdauer
$\mathbf{u}$	[m]	Verschiebungsvektor eines Knoten der Pfahlmittelachse
u	[m]	Verschiebung des Pfahlkopfes
Δu_α	[m]	gegenseitige Verschiebung der Kontaktpartner ($\alpha = 1, 2$)
$\dot{u}_\alpha$	[m/s]	zeitliche Ableitung der gegenseitigen Verschiebung der Kontaktpartner ($\alpha = 1, 2$)
$\ddot{u}$	[m/s ²]	Beschleunigungsfeld
$u_{Amp.}$	[m]	Amplitude der Pfahlkopfverschiebung
u_{lim}	[m]	Grenzwert der Pfahlkopfverschiebung
u_{max}	[m]	maximaler Wert der Pfahlkopfverschiebung
u_{min}	[m]	minimaler Wert der Pfahlkopfverschiebung
v_B	[m/s]	Belastungsgeschwindigkeit
$\dot{v}_B$	[N/s]	Belastungsgeschwindigkeit
w	[m]	Biegelinie des Pfahles
w'	[-]	Ableitung der Biegelinie des Pfahles (Verdrehung)
W_{el}	[J]	gespeicherte bzw. elastische Energie
W_{in}	[J]	zugeführte Energie
x	[m]	x-Koordinate in Richtung der Pfahlachse beginnend am Pfahlkopf
α	[-]	Exponent des Modellgesetzes
α	[-]	Exponent im Faktor f_d und f_s
α	[-]	Parameter des impliziten Zeitintegrationsverfahrens
β	[-]	Exponent im Faktor f_s
β	[-]	empirischer Faktor zur Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes
β	[-]	Parameter des impliziten Zeitintegrationsverfahrens
β_R	[-]	Materialkonstante des Konzeptes der intergranularen Dehnung

γ	[-]	Parameter des impliziten Zeitintegrationsverfahrens
$\Delta\gamma_\alpha$	[-]	Scherbeanspruchung des Bodenvolumens in der Kontaktfuge ($\alpha = 1, 2$)
$\dot{\gamma}_\alpha$	[1/s]	Rate der Scherbeanspruchung des Bodenvolumens in der Kontaktfuge ($\alpha = 1, 2$)
γ_{ij}	[-]	Schubverzerrungen bzw. Gleitungen ($\gamma_{ij} = 2 \cdot \varepsilon_{ij}$ mit $i \neq j$)
γ_w	[N/m ³]	Wichte des Wassers
δ	[-]	Tensor der intergranularen Dehnung
$\dot{\delta}$	[1/s]	Tensor der Rate der intergranularen Dehnung
$\hat{\delta}$	[-]	Tensor der Richtung der intergranularen Dehnung
$\delta_\perp$	[-]	Komponente der intergranularen Dehnung orthogonal zur Scherfuge
δ_α	[-]	Komponente der intergranularen Dehnung in der Kontaktfuge ($\alpha = 1, 2$)
δ_{ij}	[-]	Komponenten des Tensors der intergranularen Dehnung
$\delta_{\max}$	[°]	maximaler Wandreibungswinkel
ε_1	[-]	axiale Dehnung
ε_{ij}	[-]	Komponenten des Dehnungstensors
ε_v	[-]	Volumendehnung
η	[N·s/m ²]	dynamische Viskosität
Θ	[°]	Lode-Winkel
κ	[-]	Parameter des hypoplastischen Reibungsmodells
μ	[-]	Reibungsbeiwert nach Mohr-Coulomb
ν	[-]	Querdehnungszahl
ξ	[-]	Exponent im Stoffgesetz
ξ	[m]	ξ -Koordinate in Richtung der Pfahlachse beginnend auf Höhe der Geländeoberfläche
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ	[-]	Mobilisierungsgrad der intergranularen Dehnung
ρ_0	[-]	Ausgangszustand des Mobilisierungsgrades der intergranularen Dehnung
σ	[Pa]	Spannungstensor bzw. Tensor der totalen Spannungen
σ'	[Pa]	Tensor der effektiven Spannungen
$\hat{\sigma}$	[-]	auf den mittleren Druck bezogener Spannungstensor
$\hat{\sigma}^*$	[-]	Deviator von $\hat{\sigma}$
$\dot{\sigma}$	[Pa/s]	Tensor der Spannungsrate
$\sigma_\perp$	[Pa]	Kontaktdruck in der Scherfuge
$\dot{\sigma}_\perp$	[Pa/s]	Rate des Kontaktdruckes in der Scherfuge
σ_1	[Pa]	vertikale Spannung im Triaxialversuch
$\Delta\sigma_1$	[Pa]	Änderung vertikale Spannung im Triaxialversuch

σ_{11}	[Pa]	Normalspannung in 1-Richtung
$\Delta\sigma_{11}$	[Pa]	Änderung der Normalspannung in 1-Richtung
σ_2	[Pa]	horizontale Spannung im Triaxialversuch (Zelldruck)
σ_{22}	[Pa]	Normalspannung in 2-Richtung
σ_3	[Pa]	horizontale Spannung im Triaxialversuch (Zelldruck)
σ_{ij}	[Pa]	Komponenten des Spannungstensors
$\sigma_{\min}$	[Pa]	minimale Hauptspannung
$\sigma_{\max}$	[Pa]	maximale Hauptspannung
σ_v	[Pa]	vertikale Spannung
τ_α	[Pa]	Schubspannungen in der Kontaktfuge ($\alpha = 1, 2$)
$\Delta\tau_\alpha$	[Pa]	Änderung der Schubspannungen in der Kontaktfuge ($\alpha = 1, 2$)
$\dot{\tau}_\alpha$	[Pa/s]	Rate der Schubspannungen in der Kontaktfuge ($\alpha = 1, 2$)
φ	[°]	Reibungswinkel des Bodens
φ_c	[°]	kritischer Reibungswinkel
φ_m	[°]	mobilisierter Reibungswinkel
ϕ	[°]	Nullphasenwinkel
$\Delta\phi$	[°]	Phasenverschiebung
χ	[-]	Faktor im Mehrphasenmodell
χ	[-]	Materialkonstante des Konzeptes der intergranularen Dehnung
ψ	[°]	Winkel zur Beschreibung des Spannungszustandes
ω	[Hz]	(Eigen-) Kreisfrequenz