

Bauhaus-Universität Weimar  
Schriftenreihe Geotechnik  
Heft 22

Thomas Wolff

Ein methodischer Bemessungsansatz zur Abschätzung des Tragverhalten von Pfahlgründungen in weichem kalkigem Sedimentgestein

Bauhaus-Universität Weimar

Schriftenreihe Geotechnik

Heft 22

*Herausgeber:*

Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt

Bauhaus-Universität Weimar · Fakultät Bauingenieurwesen

Professur Grundbau

Coudraystraße 11c

D-99421 Weimar

Tel: +49 (36 43) 58-45 60 · Fax: +49 (36 43) 58-45 64

<http://www.uni-weimar.de>

ISBN: 978-3-86068-405-4

All Rights Reserved

*Bezugsadresse:*

Verlag der Bauhaus-Universität Weimar 2009

[verlag@uni-weimar.de](mailto:verlag@uni-weimar.de)

Tel.: (0049) 03643/581152

Fax: (0049) 03643/581156

© Herausgeber und Autor 2010

1. Auflage

Druck: docupoint Magdeburg GmbH

Umschlaggestaltung: Projektor Weimar

Diese Veröffentlichung steht online als Volltext im Publikationsportal der Bauhaus-Universität Weimar unter folgender URL zur Verfügung:

<http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2010/1499/>

Bauhaus-Universität Weimar

Schriftenreihe Geotechnik

Heft 22

BAUHAUS  
UNIVERSITÄTSVERLAG

Thomas Wolff

Ein methodischer Bemessungsansatz zur Abschätzung des Tragverhalten von Pfahlgründungen in weichem kalkigem Sedimentgestein



**Ein methodischer Bemessungsansatz  
zur Abschätzung des Tragverhalten von Pfahlgründungen  
in weichem kalkigem Sedimentgestein**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen  
der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Thomas Wolff  
aus Treuen (Vogtland)

Weimar 2009

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
2. Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
3. Prof. Dr.-Ing. habil. Tom Schanz



## Vorwort des Herausgebers

Nahezu alle Hochhäuser und der überwiegende Teil der Ingenieurbauwerke der Infrastruktur werden heute auf Pfählen gegründet. Man könnte bei der Vielzahl von Anwendungen vermuten, dass die Bemessung von Pfählen aus wissenschaftlicher Sicht erschöpfend behandelt sei. Dem ist nicht so. Das Modell des axialen Tragverhaltens ist einleuchtend, einfach zu handhaben, aber sehr grob. Die am Pfahlmantel mobilisierbaren Bodenwiderstände lassen sich auf empirischer Grundlage abschätzen, jedoch nicht aus Bodenkennwerten ableiten. Das Tragverhalten ist physikalisch nicht abgegrenzt, Verformungsprognosen auf der Grundlage von Baugrundkennwerten sind bis heute unbefriedigend. So bleiben nur eine konservative Bemessung mit nicht quantifizierbarer Sicherheitsreserve oder Probelastungen, die aber bei großen Pfahltragfähigkeiten mit einem hohen monetären und zeitlichen Aufwand verbunden sind.

In den Vereinigten Arabischen Emiraten und speziell in Dubai ist die Euphorie an Super-Hochhäusern derzeit zwar etwas gedämpft, es wird aber weiterhin ambitioniert gebaut werden. Plötzlich rückt auch dort die Forderung nach einer Optimierung von Gründungsmaßnahmen in den Vordergrund, was dieser Dissertation eine besondere Aktualität verleiht. Die Baugrundverhältnisse sind in Küstennähe durch schwach verfestigte kalkhaltige Sande gekennzeichnet. Es gibt mittlerweile zwar dokumentierte Erfahrungen zur Tragfähigkeit von Pfahlgründungen in diesem weichen Fels, jedoch bislang noch keine wissenschaftliche Arbeit, welche sich mit der Korrelation zwischen den kennzeichnenden Baugrundkennwerten und dem Tragverhalten von Pfählen unter Berücksichtigung eines geeigneten Stoffgesetzes auseinandersetzt.

Auf diesem Gebiet hat Herr Wolff Pionierarbeit geleistet und einen neuen Bemessungsansatz entwickelt. Die Arbeit stützt sich auf selbst durchgeführte, aufwendig instrumentierte Pfahlprobelastungen, auf die Bestimmung von Stoffparametern in Laborversuchen und auf die Entwicklung eines numerischen Modells, welches den Verbund Pfahl-Boden in Verbindung mit einer Optimierung unscharfer Parameter beschreibt. An konkreten Messergebnissen validiert lassen sich mit der Methode weitere Daten virtueller Probelastungen generieren. Ganz originär ist die Einbindung der Grenzbedingung der Tragfähigkeit in eine Zuverlässigkeitsanalyse, mit der erstmals der Zusammenhang zwischen Parameterstreuung, Teilsicherheitsfaktor und Versagenswahrscheinlichkeit axial belasteter Bohrpfähle transparent dargestellt wird.

Diese Arbeit ist im Rahmen eines umfangreichen Forschungsprojektes der Middle East Foundations Group L.L.C. entstanden. Für die Anregung und für die finanzielle Unterstützung sei Herrn Aidroos Hassan besonders gedankt.





## Vorwort des Verfassers

In der vorliegenden Arbeit wird das Tragverhalten und das Sicherheitsniveau axial belasteter Großbohrpfähle in den pleistozänen Kalkarenit der Küstenregion von Dubai untersucht. Zunächst wird auf der Grundlage von Ergebnissen umfangreicher Baugrundanalysen und Probelastungen das Tragverhalten detailliert beschrieben. Anschließend wird ein auf der Finiten-Elemente-Methode basierendes Strukturmodell zur Simulation des Last-Setzungsverhaltens von Großbohrpfählen im Sinne eines numerischen Versuchsstandes entwickelt. Um herstellungsbedingte Veränderungen der Baugrundeigenschaften in der Kontaktzone Pfahl-Baugrund zu berücksichtigen, die mit boden- und felsmechanischen Elementversuchen gewöhnlich nicht erfassbar sind, werden die Größen der relevanten konstitutiven Parameterwerte iterativ mittels inverser Optimierungsstrategien bestimmt. Abschließend wird eine methodische Vorgehensweise aufgezeigt, wie das Sicherheitsniveau axial belasteter Großbohrpfählen unter Berücksichtigung der räumlichen Variabilität der Baugrundeigenschaften zuverlässig abgeschätzt werden kann.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mentor Herrn Professor Dr.-Ing. K. J. Witt, der die Arbeit initiiert, fachlich betreut und stets durch zahlreiche wertvolle Hinweise und Anregungen förderte. Für die Übernahme der Koreferate, die Diskussionsbereitschaft, die Anregungen und konstruktiven Kritiken bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. T. Schanz und Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Katzenbach.

Für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. A. Hassan, Managing Direktor der lokalen Spezialtiefbaufirma „Middle East Foundations Group L.L.C.“, bedanken. Ebenso danke ich Herrn Dr. Krämer und Herrn Dr. Nottrodt für das in mich gesetzte Vertrauen und das initiale Engagement.

Mein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeitern der geotechnischen Professuren der Bauhaus-Universität Weimar, insbesondere Herrn Dr. J. Meier, dem ich für die vielen Anregungen und die virtuose programmtechnische Umsetzung der diskutierten Fragestellungen sehr verbunden bin, sowie Herrn Dipl.-Ing. R.-B. Wudtke und Frau Studienrätin U. Zeh für die stete Diskussionsbereitschaft bzw. die ständige Einsatzbereitschaft bei der Fertigstellung der schriftlichen Arbeit.

Auf herzlichste bedanke ich mich bei meinem Sohn Soeren und meiner Frau Meeta für die geduldige Unterstützung sowie bei meinem Vater und meiner Mutter, die mir stets eine unerschöpfliche „Energietankstelle“ sind.

Thomas Wolff



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation.....	1
1.2	Ziele .....	2
1.3	Untersuchungsstrategie und Methoden.....	3
<b>2</b>	<b>Pfahlgründungen in karbonatischen Sedimenten</b>	<b>5</b>
2.1	Allgemeines .....	5
2.2	Stand der Forschung und Technik .....	7
2.2.1	Last-Setzungsverhalten	7
2.2.2	Berechnungsverfahren	17
2.2.3	Geomesstechnik	25
2.3	Fazit und Forschungsansätze .....	36
<b>3</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>39</b>
3.1	Testprogramm .....	39
3.2	Baugrund.....	40
3.2.1	Genese	40
3.2.2	Ingenieurgeologie	40
3.3	Boden- und felsmechanische Untersuchungen .....	42
3.3.1	In-situ Tests	42
3.3.2	Laborversuche	47
3.4	Standortspezifisches Baugrundmodell.....	56
3.5	Belastungsversuche.....	63
3.5.1	Allgemeines	63
3.5.2	Verwendete geotechnische Messelemente	63
3.5.3	Pfahlherstellung und Versuchsdurchführung	71
3.6	Messergebnisse .....	73
3.6.1	Last-Setzung	73
3.6.2	Lastabtrag längs der Pfahlachse	75
3.6.3	Lastabtrag am Pfahlfuß	79

3.6.4	Tragverhalten	80
3.6.5	Spannungen im Baugrund neben dem Testpfahl	82
3.6.6	Messabweichungen und Messunsicherheiten	84
3.6.7	Vergleich faseroptischer mit Schwingsaiten Dehnungssensoren	88
3.7	Fazit der experimentellen Untersuchungen.....	92
<b>4</b>	<b>Numerische Modellierung</b>	<b>95</b>
4.1	Vorbemerkungen.....	95
4.2	Strukturmodell.....	96
4.3	Stoffmodell.....	99
4.3.1	Allgemeines	99
4.3.2	Hardening-Soil-Modell	101
4.4	Parameteridentifizierung.....	106
4.4.1	Generelle Betrachtungen	106
4.4.2	Konzeptioneller Ansatz und Grundlagen der Optimierung	107
4.5	Kalibrierung des Strukturmodells.....	114
4.5.1	Validierung des Stoffmodells	114
4.5.2	Verifikation des Strukturmodells	120
4.5.3	Modellkalibrierung (Kalibrierung des Strukturmodells)	126
4.5.4	Einfluss variierender Randbedingungen auf die Systemantwort	133
4.6	Anwendung des Strukturmodells auf einen Bauwerkspfahl.....	138
4.6.1	Geotechnische Verhältnisse, Pfahlgeometrie und Versuchsdurchführung	138
4.6.2	Test- und Simulationsergebnisse	139
4.7	Fazit.....	141
<b>5</b>	<b>Zuverlässigkeitsanalyse</b>	<b>143</b>
5.1	Allgemein.....	143
5.2	Geostatistische Kennwerte der Basisvariablen.....	144
5.2.1	Basisvariablen	144
5.2.2	Autokorrelation	145
5.2.3	Räumliche Mittelung als Funktion des stationären Zufallfeldes	147
5.3	Versagenswahrscheinlichkeit.....	150
5.3.1	Definition und geometrische Deutung	150
5.3.2	Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit, Verfahren	152
5.3.3	Vorgehensweise und Annahmen am Bsp. des Einzelpfahles	153
5.3.4	Ergebnisse der Zuverlässigkeitsbetrachtungen der eigenen Probelastung	158

---

5.4	Fazit.....	162
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>164</b>
6.1	Zusammenfassung.....	164
6.2	Ausblick .....	171
<b>7</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>173</b>
7.1	Literaturverzeichnis .....	173
7.2	Vorschriftenverzeichnis .....	198
<b>Anlage A</b>		<b>201</b>
<b>Anlage B</b>		<b>211</b>
<b>Anlage C</b>		<b>213</b>
<b>Anlage D</b>		<b>217</b>
<b>Anlage E</b>		<b>219</b>