

# **Zum Einfluss von Aufweitungen und zyklischen Lasten auf das Verformungsverhalten lateral beanspruchter Pfähle in Sand**

von

**Jan Dührkop**

Herausgegeben von

**J. Grabe**

Technische Universität Hamburg-Harburg  
Institut für Geotechnik und Baubetrieb

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Allgemeines . . . . .	5
2.2	Begriffe und Definitionen . . . . .	5
2.3	Untersuchungen zur Grenztragfähigkeit . . . . .	8
2.3.1	Konventionelle Pfähle unter monotoner Horizontallast . . . . .	8
2.3.2	Aufgeweitete Pfahlquerschnitte . . . . .	11
2.4	Untersuchungen zum Verformungsverhalten . . . . .	12
2.4.1	Konventionelle Pfähle unter monotoner Horizontallast . . . . .	13
2.4.2	Aufgeweitete Pfahlquerschnitte . . . . .	20
2.4.3	Berücksichtigung einer zyklischen Belastung . . . . .	20
2.5	Fazit . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchungsmethoden</b>	<b>33</b>
4.1	Allgemeines . . . . .	33
4.2	1g-Modellversuche . . . . .	35
4.2.1	Wahl des Modellgesetzes . . . . .	35
4.2.2	Versuchsstand . . . . .	38
4.2.3	Untersuchung von Aufweitungen . . . . .	41
4.2.4	Untersuchung von zyklischen Lasten . . . . .	43
4.3	Feldversuch . . . . .	53
4.3.1	Versuchsfeld . . . . .	53
4.3.2	Versuchspfähle . . . . .	54
4.3.3	Versuchsaufbau . . . . .	58

4.3.4	Verwendete Messtechnik . . . . .	59
4.4	Finite Elemente Methode . . . . .	60
4.4.1	FE-Modell zum Einfluss von Aufweitungen . . . . .	60
4.4.2	FE-Modell zum Einfluss zyklischer Lasten . . . . .	63
4.5	Diskrete Elemente Methode . . . . .	65
4.5.1	Kurzbeschreibung der Methode . . . . .	65
4.5.2	Untersuchtes Modell . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Einfluss von Aufweitungen</b>	<b>67</b>
5.1	Last-Verformungsverhalten . . . . .	67
5.1.1	1g-Modellversuche . . . . .	67
5.1.2	Feldversuch . . . . .	69
5.2	Mobilisierung von Bettungswiderständen . . . . .	72
5.2.1	Numerische Analyse . . . . .	72
5.2.2	Feldversuch . . . . .	76
5.3	Fazit . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Einfluss zyklischer Lasten</b>	<b>85</b>
6.1	Statische Last-Verschiebungskurven . . . . .	85
6.2	Abhängigkeit von Pfahl und Boden . . . . .	87
6.3	Zyklische Belastung . . . . .	88
6.4	Belastungsgeschichte . . . . .	89
6.5	Zyklisches Lastverhältnis . . . . .	92
6.6	Extremereignisse . . . . .	93
6.7	Veränderlicher Lastangriffswinkel . . . . .	94
6.7.1	Modellversuche . . . . .	94
6.7.2	Diskrete Elemente Analyse zur Pfahldrift . . . . .	98
6.8	Pfahlschaftaufweitung . . . . .	99
6.9	Änderung der Bettungseigenschaften . . . . .	100
6.10	Fazit . . . . .	103

<b>7</b>	<b>Prognosemodelle für Pfahlverformungen</b>	<b>105</b>
7.1	Modell zur Berücksichtigung einer Schaftaufweitung . . . . .	105
7.1.1	Flügelfaktor . . . . .	105
7.1.2	Implementierung in das Strain-Wedge Modell . . . . .	108
7.1.3	Implementierung in das P-y Verfahren . . . . .	109
7.1.4	Validierung des Modells . . . . .	109
7.2	Akkumulationsmodell für Pfahlkopfverschiebungen . . . . .	116
7.2.1	Anwendung bestehender Ansätze auf die eigenen 1g-Versuche . . . . .	116
7.2.2	Ableitung eines überlogarithmischen Ansatzes . . . . .	124
7.2.3	Validierung anhand der 1g-Modellversuche . . . . .	128
7.2.4	Vergleichsrechnung eines Feldversuchs aus der Literatur . . . . .	128
7.3	Kombination der Modelle . . . . .	130
7.4	Fazit . . . . .	131
<b>8</b>	<b>Parameterstudie zu Pfahlschaftaufweitungen</b>	<b>133</b>
8.1	Offshore-Monopiles mit nichtlinearen P-y Kurven . . . . .	133
8.1.1	Randbedingungen der Variation . . . . .	133
8.1.2	Auswertung mit CLM . . . . .	134
8.1.3	Einfluss der Pfahllänge . . . . .	135
8.1.4	Pfahlkopfsteifigkeitsmatrix eines Monopiles . . . . .	135
8.1.5	Einfluss der Flügeltiefenlage $h_1$ . . . . .	137
8.1.6	Einfluss der Flügelgröße . . . . .	138
8.1.7	Vorbemessungsverfahren für Monopiles mit Aufweitung . . . . .	138
8.1.8	Bemessungsbeispiel . . . . .	140
8.2	Bettungsmodulverfahren . . . . .	141
8.2.1	Randbedingungen der Variation . . . . .	142
8.2.2	Pfahl ohne Flügel . . . . .	142
8.2.3	Berücksichtigung der Flügel . . . . .	143
8.2.4	Anwendungsbeispiel . . . . .	144
8.3	Fazit . . . . .	147

<b>9 Pfahlbemessung für zyklische Lasten</b>	<b>149</b>
9.1 Bettungsmodulverfahren . . . . .	149
9.1.1 Starrer Pfahl, konstanter Bettungsmodul . . . . .	149
9.1.2 Starrer Pfahl, linear zunehmender Bettungsmodul . . . . .	150
9.1.3 Biegeweicher Pfahl, konstanter Bettungsmodul . . . . .	150
9.1.4 Biegeweicher Pfahl, linear zunehmender Bettungsmodul . . . . .	151
9.2 P-y Verfahren . . . . .	153
9.3 Strain-Wedge Modell . . . . .	157
9.4 Fazit . . . . .	159
<b>10 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>161</b>
10.1 Zusammenfassung . . . . .	161
10.2 Ausblick . . . . .	163
10.3 Summary and perspectives . . . . .	165
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>176</b>
<b>Anhang</b>	<b>176</b>
<b>A Laborversuche Wunder Sand</b>	<b>177</b>
A.1 Indexwerte . . . . .	177
A.2 Kornverteilung . . . . .	178
A.3 Ödometerversuche . . . . .	178
A.4 Direkter Scherversuch . . . . .	179
A.5 Zyklischer triaxialer Versuch (CD-Versuch) . . . . .	180
<b>B Baugrunduntersuchungen zum Testfeld Blumensand</b>	<b>183</b>
B.1 Indexwerte . . . . .	183
B.2 Kornverteilung . . . . .	184
B.3 Triaxialversuch (CD-Versuch) . . . . .	184
B.4 Einaxialer Versuch . . . . .	185
<b>C Ergebnisse der Modellversuche mit Wunder Sand</b>	<b>187</b>
<b>D Symbole und Einheiten</b>	<b>197</b>