

# Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ EA-Pfähle

Herausgegeben von der  
Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Mitglieder des Arbeitskreises AK 2.1 „Pfähle“</b> .....	<b>V</b>
--	----------

<b>Vorwort und Benutzerhinweise</b> .....	<b>VII</b>
---	------------

<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 Teilsicherheits- konzept .....	2
1.2.1	Neue Normengeneration und Übergangsregelungen .....	2
1.2.2	Beanspruchungen und Widerstände .....	3
1.2.3	Grenzzustände .....	4
1.2.4	Anwendung der EA-Pfähle im Zusammenhang mit DIN EN 1997-1 .....	6
1.3	Entwurfsverfasser, Fachplaner und Sachverständiger für Geotechnik .....	8
<b>2</b>	<b>Pfahlsysteme</b> .....	<b>9</b>
2.1	Übersicht und Zuordnung zu den Pfahlsystemen .....	9
2.2	Pfahlherstellung .....	11
2.2.1	Bohrpfähle .....	11
2.2.1.1	Bohrpfähle mit verrohrter Bohrung .....	11
2.2.1.2	Unverroehrt hergestellte Bohrpfähle .....	12
2.2.1.3	Unverroehrt hergestellte Bohrpfähle mit suspensionsgestützter Bohrlochwandung .....	12
2.2.1.4	Unverroehrt hergestellte Bohrpfähle mit durchgehender Bohrschnecke .....	13
2.2.1.5	Unverroehrt hergestellte Bohrpfähle mit teilweise durchgehender Bohrschnecke .....	14
2.2.1.6	Bohrpfähle mit Fußaufweitungen .....	14
2.2.1.7	Schlitzwandelemente/Barette .....	14
2.2.2	Fertigrammpfähle .....	15
2.2.2.1	Allgemeines .....	15
2.2.2.2	Fertigrammpfähle aus Beton .....	15
2.2.2.3	Fertigrammpfähle aus Stahl .....	16
2.2.2.4	Fertigrammpfähle aus Holz .....	16
2.2.3	Ortbetonrammpfähle .....	16
2.2.3.1	Ortbetonrammpfahl mit Innenrohrummung (Frankipfahl) .....	16
2.2.3.2	Ortbetonrammpfahl mit Kopframmung (Simplexpfahl) .....	17
2.2.4	Schraubpfähle (Vollverdrängungsbohrpfähle) .....	18
2.2.4.1	Allgemeines .....	18

2.2.4.2	Atlaspfahl	18
2.2.4.3	Fundexpfahl	19
2.2.5	Verpresste Verdrängungspfähle	20
2.2.5.1	Verpressmörtelpfähle (VM-Pfähle)	20
2.2.5.2	Rüttelinjektionspfähle (RI-Pfähle)	20
2.2.6	Mikropfähle	21
2.2.7	Rohrverpresspfähle	22
2.3	Pfahlähnliche Elemente	23
<b>3</b>	<b>Grundsätze zu Entwurf und Berechnung von Pfahlgründungen</b>	<b>25</b>
3.1	Pfahlgründungssysteme	25
3.1.1	Einzelpfahllösungen	25
3.1.2	Pfahlroste	26
3.1.3	Pfahlgruppen	27
3.1.4	Kombinierte Pfahl-Plattengründungen (KPP)	28
3.2	Baugrunderkundung bei Pfahlgründungen	30
3.3	Zuordnung der Böden bei Pfahlgründungen	37
3.4	Pfahlkonstruktionen zur Baugrubenherstellung und Sicherung von Geländesprüngen	38
3.4.1	Allgemeines	38
3.4.2	Anordnung der Pfähle	38
3.4.3	Pfahlsysteme und spezielle Ausführungsanforderungen	39
3.4.4	Berechnung und Bemessung	40
3.4.5	Bewehrung	40
3.4.6	Beton	40
3.4.7	Wasserdichtigkeit von Bohrpfahlwänden	40
3.5	Pfahlkonstruktionen zur Böschungssicherung	41
<b>4</b>	<b>Einwirkungen und Beanspruchungen</b>	<b>43</b>
4.1	Allgemeines	43
4.2	Pfahlgründungslasten aus dem Bauwerk	44
4.3	Herstellungsbedingte Beanspruchungen von Verdrängungspfählen	44
4.4	Negative Mantelreibung	44
4.4.1	Allgemeines	44
4.4.2	Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus negativer Mantelreibung	45
4.4.3	Negative Mantelreibung infolge Hebung des Bodens in der Pfahlumgebung	49
4.4.4	Ermittlung der Bemessungsgrößen der Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und Nachweisführung	50
4.5	Seitendruck	51
4.5.1	Allgemeines	51

4.5.2	Notwendigkeit einer Pfahlbemessung auf Seitendruck .....	52
4.5.3	Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus Fließdruck .....	54
4.5.4	Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus dem resultierenden Erddruck .....	55
4.5.5	Entfernungseinfluss und Mindestmomentenbeanspruchung .....	57
4.5.6	Beanspruchungen der Pfähle .....	58
4.6	Zusatzbeanspruchung von Schrägpfählen aus Baugrundverformung .....	59
4.7	Gründungspfähle in Böschungen und an Geländesprüngen .....	59
4.7.1	Gründungspfähle in Böschungen .....	59
4.7.2	Gründungspfähle an Geländesprüngen .....	61
<b>5</b>	<b>Tragverhalten und Widerstände von Einzelpfählen .....</b>	<b>63</b>
5.1	Allgemeines .....	63
5.2	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus statischen Pfahlprobelastungen .....	64
5.2.1	Grundlagen .....	64
5.2.2	Charakteristische Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	65
5.2.3	Charakteristische Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	66
5.3	Ermittlung von Pfahlwiderständen aus dynamischen Pfahlprobelastungen .....	66
5.4	Axiale Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten .....	68
5.4.1	Anwendungsbereich der bisherigen Regelungen .....	68
5.4.2	Anwendungsbereich der neuen Regelungen .....	68
5.4.3	Anwendungsgrundlagen und Einschränkungen der Tabellenwerte .....	70
5.4.4	Fertigrammpfähle .....	72
5.4.4.1	Allgemeines .....	72
5.4.4.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzenwiderstand und Pfahlmantelreibung von Fertigrammpfählen .....	75
5.4.5	Ortbetonrammpfähle .....	77
5.4.5.1	Allgemeines .....	77
5.4.5.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzenwiderstand und Pfahlmantelreibung von Simplexpfählen .....	79
5.4.5.3	Erfahrungswerte von Pfahlfußwiderstand und Pfahlmantelreibung von Frankipfählen .....	81
5.4.6	Bohrpfähle .....	89
5.4.6.1	Allgemeines .....	89
5.4.6.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzenwiderstand und Pfahlmantelreibung von Bohrpfählen .....	90
5.4.6.3	Erfahrungswerte von Pfahlspitzenwiderstand und Pfahlmantelreibung bei Fels und felsähnlichen Böden .....	92

5.4.6.4	Schlitzwandelemente.....	96
5.4.6.5	Bohrpfahlwände und Schlitzwände .....	96
5.4.7	Teilverdrängungsbohrpfähle .....	97
5.4.8	Schraubpfähle.....	98
5.4.8.1	Allgemeines .....	98
5.4.8.2	Erfahrungswerte von Pfahlspitzenwiderstand und Pfahlmantelreibung von Schraubpfählen.....	98
5.4.9	Verpresste Verdrängungs- und Mikropfähle.....	101
5.4.9.1	Allgemeines .....	101
5.4.9.2	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von Verpressmörtelpfählen (VM-Pfähle) .....	102
5.4.9.3	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von Rüttelinjektionspfählen (RI-Pfähle) .....	103
5.4.9.4	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von verpressten Mikropfählen .....	103
5.4.9.5	Erfahrungswerte der Pfahlmantelreibung von Rohrverpress- pfählen .....	104
5.4.10	Anwendungen auf Zugpfähle .....	105
5.5	Bohrpfähle mit Fußaufweitung .....	105
5.6	Weitere Verfahren nach DIN EN 1997-1 .....	106
5.7	Pfahlwiderstände bei Mantel- und Fußverpressung.....	106
5.8	Horizontale Pfahlwiderstände .....	108
5.9	Pfahlwiderstände bei nichtruhenden Einwirkungen .....	108
5.9.1	Allgemeines .....	108
5.9.2	Axiale Pfahlwiderstände bei zyklischen Einwirkungen .....	110
5.9.3	Horizontale Pfahlwiderstände bei zyklischen Einwirkungen.....	112
5.9.4	Horizontale Pfahlwiderstände bei stoßartigen Einwirkungen ....	113
5.10	Innere Tragfähigkeit von Pfählen .....	113
5.11	Widerstand von Pfählen gegen Knickversagen in Boden- schichten mit geringer seitlicher Stützung und Knicksicherheitsnachweis .....	113
5.12	Numerische Berechnungen zur Tragfähigkeit von Einzel- pfählen .....	115
<b>6</b>	<b>Standssicherheitsnachweise .....</b>	<b>117</b>
6.1	Allgemeines .....	117
6.2	Nachweis der Tragfähigkeit.....	117
6.2.1	Axial belastete Pfähle .....	117
6.2.2	Quer zur Pfahlachse belastete Pfähle .....	118
6.2.3	Materialversagen von Pfählen .....	120
6.3	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit.....	120
6.4	Pfahlgruppen und Pfahlroste .....	122
6.5	Kombinierte Pfahl-Plattengründungen.....	123

<b>7</b>	<b>Berechnung von Pfahlrosten</b> .....	125
7.1	Berechnungsmodelle und Verfahren .....	125
7.2	Nichtlineares Pfahltragverhalten in der Pfahlrostberechnung .....	126
<b>8</b>	<b>Berechnung und Nachweise von Pfahlgruppen</b> .....	127
8.1	Einwirkungen und Beanspruchungen .....	127
8.1.1	Druckpfahlgruppen .....	127
8.1.2	Zugpfahlgruppen .....	127
8.1.3	Quer zur Pfalachse belastete Pfahlgruppen .....	129
8.2	Tragverhalten und Widerstände von Pfahlgruppen .....	130
8.2.1	Druckpfahlgruppen .....	130
8.2.1.1	Allgemeines .....	130
8.2.1.2	Gruppenwirkung bezogen auf die Setzungen von Bohrpfahlgruppen .....	130
8.2.1.3	Widerstände der (gebohrten) Gruppenpfähle .....	138
8.2.1.4	Verdrängungspfahlgruppen .....	143
8.2.1.5	Mikropfahlgruppen .....	144
8.2.1.6	Geschichteter Baugrund .....	144
8.2.2	Zugpfahlgruppen .....	145
8.2.3	Quer zur Pfalachse belastete Gruppen .....	145
8.3	Nachweis der Tragfähigkeit .....	149
8.3.1	Druckpfahlgruppen .....	149
8.3.1.1	Äußere Tragfähigkeit .....	149
8.3.1.2	Materialnachweise Pfahlkopfplatte .....	151
8.3.2	Zugpfahlgruppen .....	151
8.3.2.1	Allgemeines .....	151
8.3.2.2	Nachweis des angehängten Bodenkörpers im Grenzzustand GZ 1A .....	152
8.3.2.3	Nachweis der Tragfähigkeit des einzelnen Zugpfahls im Grenzzustand GZ 1B .....	153
8.3.3	Materialversagen von Gruppenpfählen und Pfahlkopfkonstruktionen .....	153
8.4	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit .....	154
8.4.1	Druckpfahlgruppen .....	154
8.4.2	Zugpfahlgruppen .....	155
8.4.3	Quer zur Pfalachse belastete Pfahlgruppen .....	155
8.5	Genauere Nachweise bei Pfahlgruppen .....	155
<b>9</b>	<b>Statische Pfahlprobelbelastungen</b> .....	157
9.1	Allgemeines .....	157
9.2	Statische axiale Pfahlprobelbelastungen .....	157
9.2.1	Herstellung der Probepfähle .....	157
9.2.2	Versuchsplanung .....	158

9.2.2.1	Allgemeine Hinweise	158
9.2.2.2	Anzahl der Probepfähle	159
9.2.2.3	Prüflast	159
9.2.2.4	Baugrunduntersuchungen	161
9.2.2.5	Grundsätze der Instrumentierung	161
9.2.2.6	Besondere Belastungszustände	162
9.2.3	Belastungseinrichtung	162
9.2.3.1	Allgemeines	162
9.2.3.2	Widerlager	164
9.2.3.3	Pressen	165
9.2.3.4	Belastung durch einbetonierte Pressen	165
9.2.3.5	Pfahlkopf	167
9.2.4	Instrumentierung und Messverfahren	168
9.2.4.1	Setzungs- und Hebungsmessungen	168
9.2.4.2	Kraftmessung am Pfahlkopf	170
9.2.4.3	Erfassung des Spitzenwiderstandes	170
9.2.4.4	Erfassung der Pfahllängskraft und der Mantelreibung	172
9.2.4.5	Dehnungs- und Stauchungsmessungen	172
9.2.4.6	Erfassung der Pfahlquerschnittsfläche und der Verformungseigenschaften	173
9.2.4.7	Schutz der Messvorrichtungen	174
9.2.5	Versuchsdurchführung	174
9.2.5.1	Versuchszeitpunkt	174
9.2.5.2	Belastungsstufen und -geschwindigkeiten	175
9.2.5.3	Messintervalle	177
9.2.5.4	Aufzeichnungen	177
9.2.6	Auswertung	178
9.2.7	Dokumentation und Berichte	180
9.2.7.1	Allgemeines	180
9.2.7.2	Datenbericht	181
9.2.7.3	Bericht mit den Auswertungen	182
9.3	Statische Pfahlprobebelastungen quer zur Pfalachse	182
9.3.1	Allgemeines	182
9.3.2	Grundlagen	183
9.3.3	Versuchsplanung	184
9.3.3.1	Allgemeine Grundsätze	184
9.3.3.2	Probepfähle	184
9.3.3.3	Baugrunduntersuchungen	185
9.3.4	Grundsätze der Instrumentierung	185
9.3.5	Belastungszustände	186
9.3.6	Belastungseinrichtung	187
9.3.7	Instrumentierung und Messverfahren	188
9.3.7.1	Kraftmessung am Pfahlkopf	188
9.3.7.2	Pfahlkopfverschiebungs- und -verdrehungsmessungen	188

9.3.7.3	Messung der Biegelinie und der Biegemomente des Pfahlschaftes .....	190
9.3.7.4	Schutz der Messvorrichtungen .....	191
9.3.8	Versuchsdurchführung .....	191
9.3.8.1	Regelfall .....	191
9.3.8.2	Sonderfälle .....	192
9.3.9	Auswertung .....	193
9.3.9.1	Last-Verschiebungs-Linien .....	193
9.3.9.2	Bettungsmodul .....	194
9.3.10	Dokumentation und Versuchsbericht .....	195
9.3.10.1	Allgemeines .....	195
9.3.10.2	Datenbericht .....	195
9.3.10.3	Bericht mit den Auswertungen .....	196
<b>10</b>	<b>Dynamische Pfahlprobebelastungen .....</b>	<b>199</b>
10.1	Ziele und Anwendungsbereich .....	199
10.2	Prinzip der dynamischen Probebelastungen .....	201
10.3	Grundlagen und Entwicklungen .....	201
10.3.1	Theoretische Einordnung .....	201
10.3.2	High-Strain-Verfahren .....	202
10.3.3	Rapid Load Test .....	202
10.4	Anforderungen an die Prüfungen .....	203
10.4.1	Pfahlvorbereitung .....	203
10.4.2	Prüfzeitpunkt .....	204
10.4.3	Prüfvorgang .....	204
10.4.4	Messgeräte .....	206
10.5	Weitere Hinweise für die Vorbereitung und Durchführung der Prüfung .....	207
10.6	Auswertung der Messungen .....	207
10.6.1	Allgemeines .....	207
10.6.2	Direkte Verfahren .....	208
10.6.2.1	Grundlagen .....	208
10.6.2.2	Case-Verfahren .....	210
10.6.2.3	TNO-Verfahren .....	211
10.6.2.4	Unloading Point Methode .....	212
10.6.3	Erweiterte Verfahren mit vollständiger Modellbildung .....	213
10.6.4	Ermittlung der charakteristischen Pfahlwiderstände aus den dynamischen Messwerten .....	216
10.7	Prüfung der Rammgeräteeignung .....	217
10.8	Qualifikation der Prüfinstitute und des Personals .....	218
10.9	Dokumentation und Berichterstellung .....	218



<b>11</b>	<b>Qualitätssicherung bei der Bauausführung</b>	<b>221</b>
11.1	Allgemeines	221
11.2	Bohrpfähle	221
11.2.1	Grundsätze zum Bohren	221
11.2.2	Bohren im Grundwasser	222
11.2.2.1	Grundsätze	222
11.2.2.2	Durchmesser und Ziehgeschwindigkeit des Bohrwerkzeugs	223
11.2.2.3	Reinigung der Bohrlochosole	224
11.2.3	Fußaufweitung	224
11.2.4	Einbau der Bewehrung	225
11.2.5	Betonieren	226
11.2.5.1	Betonmischung	226
11.2.5.2	Betoniervorgang	227
11.2.6	Bohrpfähle mit durchgehender Bohrschnecke	228
11.3	Verdrängungspfähle	229
11.3.1	Betonfertigpfähle – Hinweise zu Transport, Lagerung und Einbringung	229
11.3.2	Ortbetonverdrängungspfähle	230
11.3.2.1	Wasser-/Bodeneintritt ins Vortreibrohr	230
11.3.2.2	Betonieren	230
11.3.3	Verdrängungswirkung in bindigen Böden	230
<b>12</b>	<b>Pfahl-Integritätsprüfungen</b>	<b>233</b>
12.1	Zweck von Integritätsprüfungen	233
12.2	Dynamische Integritätsprüfungen	233
12.2.1	Ziele und Anwendungsbereich	233
12.2.2	Vorbereitung und Durchführung der Prüfung	235
12.2.3	Messungen und Messgeräte	236
12.2.4	Aus- und Bewertung der Prüfergebnisse	236
12.2.5	Beurteilungsklassen	238
12.2.6	Wellengeschwindigkeit	239
12.2.7	Dokumentation und Berichterstattung	240
12.3	Ultraschall-Integritätsprüfung	241
12.3.1	Ziel und Anwendungsbereich	241
12.3.2	Prinzip der Ultraschall-Integritätsprüfung	241
12.3.3	Durchführung der Messung	242
12.3.4	Vorbereitung und Durchführung der Prüfung	243
12.3.4.1	Auswahl der Prüfpfähle	243
12.3.4.2	Versuchsdurchführung	245
12.3.5	Versuchsauswertung	246
12.3.5.1	Signalverläufe	246
12.3.5.2	Signalanalyse	247
12.3.5.3	Pfahlbewertung	249
12.3.6	Dokumentation und Berichterstellung	249

12.4	Pfahlprüfungen durch Kernbohrungen .....	250
12.4.1	Allgemeines .....	250
12.4.2	Ausführung von Kernbohrungen .....	251
12.4.3	Auswertung .....	251
12.4.3.1	Allgemeines .....	251
12.4.3.2	Visuelle Bewertung .....	252
12.4.4	Betonfestigkeit und Dauerhaftigkeit .....	253
12.4.5	Untersuchungen im Bohrloch .....	253

## **Anhang A**

### **Begriffe, Teilsicherheitsbeiwerte und Berechnungsgrundlagen .....**

A1	Begriffe und Formelzeichen .....	255
A2	Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Beanspruchungen nach DIN 1054:2005-01, Tabelle 2 .....	259
A3	Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände nach DIN 1054:2005-01, Tabelle 3 .....	260
A4	Streuungsfaktoren $\xi$ zur Ermittlung der charakteristischen Pfahlwiderstände aus den Messwerten von Pfahlprobelastungen nach DIN 1054:2005-01 .....	261
A5	Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes von Pfählen gegen Knickversagen in Bodenschichten mit geringer seitlicher Stützung .....	262

## **Anhang B**

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

B1	Ermittlung der axialen Pfahlwiderstände aus statischen Pfahlprobelastungen sowie Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit .....	269
B2	Axiale Pfahlwiderstände aus dynamischen Probelastungen ....	273
B3	Ermittlung der axialen charakteristischen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für einen Bohrpfahl .....	274
B4	Ermittlung der axialen charakteristischen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für einen Fertigrammpfahl .....	277
B5	Ermittlung der axialen charakteristischen Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten für einen Fundexpfahl .....	281
B6	Grundlage der Auswertung einer statischen Pfahlprobelastung am Beispiel eines Fertigrammpfahls und Vergleich mit Erfahrungswerten nach 5.4.4.2 .....	284
B7	Vorbemessung und Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit von Frankipfählen auf der Grundlage von Erfahrungswerten und Vergleich mit einem Probelastungsergebnis .....	288
B8	Negative Mantelreibung bei einem Verdrängungspfahl infolge Geländeaufschüttung .....	295

B9	Ermittlung der charakteristischen Beanspruchung eines quer zur Pfahlachse belasteten Pfahls und Nachweis gegen Materialversagen .....	300
B10	Auf Seitendruck beanspruchte Pfähle.....	316
B11	Pfeilergründung auf 9 Pfählen bei homogenem und geschichtetem Baugrund – Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung von Gruppenwirkung .....	320
B12	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit einer Zugpfahlgruppe .....	329
B13	Quer zur Pfahlachse belastete Pfahlgruppen: Ermittlung der Verteilung der horizontalen Bettungsmoduln .....	332

## **Anhang C**

### **Beispiele zur dynamischen Pfahlprobelastung und**

### **Integritätsprüfung..... 335**

C1	Auswertungsbeispiel dynamische Pfahlprobelastungen nach dem direkten Verfahren.....	335
C2	Auswertungsbeispiel für dynamische Pfahlprobelastungen nach dem Erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung .....	337
C3	Fallbeispiele „Low-Strain“-Integritätsprüfung.....	341
C4	Rammbegleitende und/oder „High-Strain“-Integritätsprüfung ....	342
C5	Fallbeispiel einer Ultraschallprüfung.....	348

### **Literatur ..... 352**