

## **EA-Pfähle: Entwurf Kapitel 13**

### **Vorwort**

Die Arbeitskreise „Baugrunddynamik“ (AK 1.4) und „Pfähle“ (AK 2.1) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) ergänzt durch weitere Fachkollegen haben sich in einem gemeinsamen Unterausschuss mit der Thematik „Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen“ beschäftigt. Unabhängig von den in der Ingenieurpraxis vorliegenden Fragestellungen von nicht ruhenden Lasteinwirkungen auf Pfahlgründungen, z. B. im Verkehrswegebau, bei Schleusen und Silos, usw. hat die Thematik in jüngster Zeit im Zusammenhang mit der Gründung von Offshore-Windenergieanlagen eine besondere Aktualität erhalten.

Der vorliegende Entwurf von Kapitel 13 basiert auf den neuen Regelwerken DIN EN 1997-1:2009-09 (Eurocode 7-1), DIN 1054:2010-12 und DIN EN 1997-1 NA:2010-12, die auch Grundlage für die in der 2. Hälfte 2011 vorgesehene 2. Auflage der EA-Pfähle sein werden.

Dem Unterausschuss gehören als Mitglieder an:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Savidis (Obmann AK 1.4)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert (Obmann AK 2.1)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Achmus

Dr.-Ing. J. Dührkop

Dr.-Ing. H.-G. Hartmann

Dr.-Ing. U. Hartwig

Dr.-Ing. F. Kirsch

PD Dr.-Ing. K. Lesny

Dr.-Ing. F. Rackwitz

Prof. Dr.-Ing. T. Richter

Dr.-Ing. P. Schwarz

Dipl.-Ing. E. Taşan

Dipl.-Ing. S. Thomas

Dr.-Ing. S. Weihrauch

Dr.-Ing. J. Wiemann

Hinweise und Änderungswünsche werden erbeten an:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Savidis ([savidis@tu-berlin.de](mailto:savidis@tu-berlin.de))

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert ([kempfert@kup-geotechnik.de](mailto:kempfert@kup-geotechnik.de))

## Inhaltsverzeichnis

<b>13</b>	<b>Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen (Entwurf)</b> .....	<b>5</b>
13.1	Allgemeines.....	5
13.2	Zyklische, dynamische und stoßartige Einwirkungen.....	6
13.2.1	Einwirkungs- und Belastungsformen.....	6
13.2.2	Einwirkungen bei zyklischer Belastung.....	7
13.2.3	Einwirkungen bei dynamischer Belastung.....	11
13.2.4	Einwirkungen bei stoßartiger Belastung.....	12
13.3	Ergänzende geotechnische Untersuchungen.....	14
13.4	Tragverhalten und Widerstände bei zyklischer Belastung.....	17
13.4.1	Allgemeines.....	17
13.4.2	Axiale Belastung.....	17
13.4.3	Querbelastung.....	20
13.5	Tragverhalten und Widerstände bei dynamischer Belastung.....	22
13.6	Tragverhalten und Widerstände bei stoßartiger Belastung.....	23
13.6.1	Allgemeines.....	23
13.6.2	Axiale Belastung.....	23
13.6.3	Querbelastung.....	23
13.7	Standsicherheitsnachweise zyklisch axial belasteter Pfähle.....	25
13.7.1	Nachweis der Tragfähigkeit eines Einzelpfahls.....	25
13.7.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit eines Einzelpfahls.....	26
13.8	Standsicherheitsnachweise zyklisch querbelasteter Pfähle.....	27
13.8.1	Nachweis der Tragfähigkeit eines Einzelpfahls.....	27
13.8.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit eines Einzelpfahls.....	28
13.9	Standsicherheitsnachweise dynamisch oder stoßartig belasteter Pfähle.....	29
13.10	Literatur.....	30

## Anhangsverzeichnis

<b>D</b>	<b>Berechnungsverfahren und -beispiele für zyklisch belastete Pfähle</b> .....	<b>3</b>
D.1	Anwendungshinweise .....	3
D.2	Zyklisch axial belastete Pfähle.....	4
D.2.1	Berechnungsverfahren .....	4
D.2.1.1	Nachweis der Pfahltragfähigkeit auf der Grundlage von Interaktionsdiagrammen .....	4
D.2.1.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit einem empirischen Verschiebungsansatz.....	8
D.2.1.3	Näherungsverfahren zur Berechnung des charakteristischen Pfahltragverhaltens .....	9
D.2.2	Berechnungsbeispiele .....	12
D.2.2.1	Nachweis der Pfahltragfähigkeit auf der Grundlage von Interaktionsdiagrammen .....	12
D.2.2.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit einem empirischen Verschiebungsansatz.....	14
D.2.2.3	Beispiel für den Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit mit dem Verfahren nach D.2.1.3.....	16
D.3	Zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle.....	21
D.3.1	Berechnungsverfahren .....	21
D.3.1.1	Empirisches Verfahren für die Abschätzung der Verschiebungsakkumulation.....	21
D.3.1.2	Prognose der Verschiebungsakkumulation unter Verwendung von Elementversuchen.....	22
D.3.2	Berechnungsbeispiele .....	26
D.3.2.1	Beispiel für die Abschätzung der Verschiebungsakkumulation .....	26
D.3.2.2	Prognose der Verformungsakkumulation unter Verwendung von Elementversuchen.....	28
D.4	Verfahren zur Ermittlung eines äquivalenten Ein-Stufen-Lastkollektivs.....	29
D.4.1	Berechnungsverfahren .....	29
D.4.1.1	Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch axial belastete Pfähle.....	29
D.4.1.2	Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle.....	30
D.4.2	Berechnungsbeispiele .....	32
D.4.2.1	Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch axial belastete Pfähle.....	32
D.4.2.2	Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle.....	34



## **13 Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen (Entwurf)**

### **13.1 Allgemeines**

(1) Hinweise zur Einordnung der Thematik Pfahlgründungen unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen in Eurocode EC 7-1 bzw. DIN 1054 finden sich in 4.1 und 5.9.

(2) Unter den in 13 behandelten erheblichen Einwirkungen auf Pfähle sind zyklische, dynamische und stoßartige Einwirkungen im Sinne von 13.2 und DIN 1054:2010-12, A 2.4.2.1, A(8b) zu verstehen.

(3) Im Zusammenhang mit Pfahlgründungen gelten diejenigen Einwirkungen als erheblich und sind im Sinne dieses Kapitels zu behandeln, bei denen das Pfahltragverhalten durch Entfestigungseffekte, Verformungs- oder Porenwasserdruckakkumulationen beeinflusst wird.

(4) Pfähle unter erheblichen zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen im Sinne von DIN 1054:2010-12, A 2.4.2.1, A(8b) sind in die Geotechnische Kategorie 3 einzustufen.

(5) Bei erheblichen zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen auf Pfähle ist gegenüber ruhenden sowie üblichen veränderlichen Einwirkungen im Sinne von DIN 1054:2010-12, A 2.4.2.1, A(8a) aus „quasi-statischen“ Lasten je nach Randbedingungen mit einem stark veränderten Pfahltragverhalten zu rechnen. Dieses Verhalten ist nach Eurocode EC 7-1 bzw. DIN 1054 bei der Berechnung und Bemessung von Pfahlgründungen zu berücksichtigen.

(6) Allerdings liegt z. Z. zum Pfahltragverhalten unter dynamischen oder stoßartigen sowie besonders unter zyklischen Einwirkungen nur ein geringer Kenntnisstand vor. In der Literatur finden sich unterschiedlich gut dokumentierte Ergebnisse von Modellversuchen und Pfahlprobelastungen, die z. B. für zyklische Einwirkungen mit bis zu etwa  $10^6$  Lastzyklen ausgeführt wurden. Eine Übersicht aus der Literatur findet sich z. B. in [Mittag/Richter 2005], [Kempfert 2009], [Dührkop 2009], [LeBlanc 2009], [Taşan 2011], [Thomas 2011]. Für axiale zyklische Belastung werden die Versuchsergebnisse häufig in Interaktionsdiagrammen dargestellt, mit deren Hilfe Versagenszustände identifiziert werden können.

(7) Die in DIN 1054:2010-12 enthaltende Forderung nach Pfahlprobelastungen zur Abbildung von wirklichkeitstreuem Belastungssituationen ist besonders bezüglich der Anzahl der Lastzyklen in der Praxis kaum umzusetzen. Hinweise finden sich auch in 9.2.2.6. Aber auch eine geringe Anzahl der Lastzyklen kann bei einer Pfahlprobelastung wichtige Hinweise für ein gegenüber statischer Belastung verändertes Pfahlverhalten liefern, siehe z. B. [Kempfert/Lauffer 1991]. Andererseits wird in [Schwarz 2002] berichtet, dass bei axialen Wechsellast-Versuchen mit Mikropfählen, erst nachdem einige tausend Zyklen abgeschlossen waren, nach wenigen weiteren Zyklen sich die Pfahltragfähigkeit überproportional zunehmend verschlechtert hat.

## 13.2 Zyklische, dynamische und stoßartige Einwirkungen

### 13.2.1 Einwirkungs- und Belastungsformen

(1) Zu den generellen Einwirkungen und Beanspruchungen auf Pfähle siehe 4.1.

(2) Bei veränderlichen Einwirkungen sind die Pfahlbelastungen

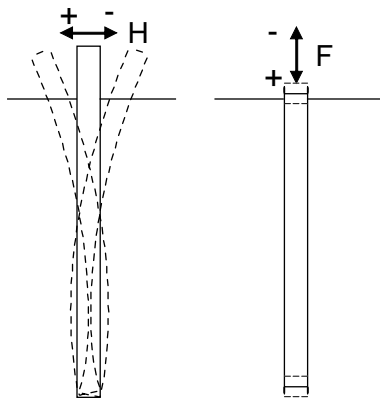
- $F_{Q,rep}$  als repräsentative Einwirkung in axialer Richtung
- $H_{Q,rep}$  als repräsentative Einwirkung quer zur Pfahlachse
- $M_{Q,rep}$  als Moment infolge repräsentativer Einwirkungen

jeweils gemäß DIN 1054:2010-12, A 2.4.2.1, A(8b) bzw. 4.1 (1) und 4.2 (4) durch die erheblichen Einwirkungen aus

- zyklischer Belastung,
- dynamischer Belastung,
- stoßartiger Belastung,

zu ergänzen, z. B.  $F_{Q,rep,zyk}$ ,  $F_{Q,rep,dyn}$  oder  $F_{Q,rep,sto}$ , verkürzt als  $F_{zyk}$ ,  $F_{dyn}$  bzw.  $F_{sto}$ .

Bild 13.1 zeigt dazu schematisch das Pfahlverschiebungsverhalten.



**Bild 13.1**

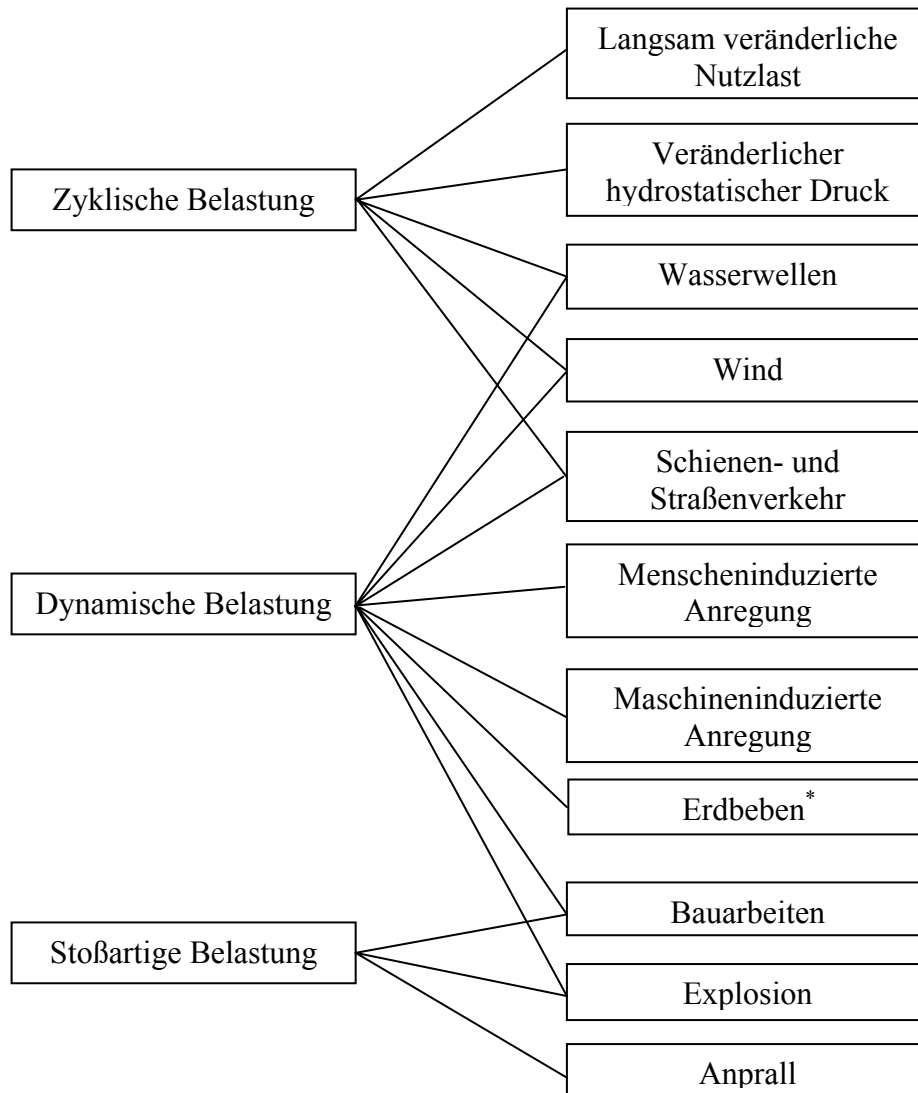
Generelles Verschiebungsverhalten von Pfählen unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen

(3) Eine eindeutige Abgrenzung zwischen den Begriffen zyklisch, dynamisch und stoßartig ist schwierig, da die Übergänge fließend sind. Bild 13.2 zeigt Beispiele und Kategorien typischer zyklischer, dynamischer und stoßartiger Einwirkungen. Im Zusammenhang mit Pfahlgründungen sollten die Begriffe wie folgt verstanden werden:

- Zyklische Einwirkungen: Darunter werden sich wiederholende Einwirkungen auf die Pfähle verstanden, bei denen Trägheitskräfte des Pfahl-Boden-Systems nicht berücksichtigt werden müssen, siehe auch 13.2.2.
- Dynamische Einwirkungen: Darunter werden sich wiederholende Einwirkungen auf die Pfähle verstanden, bei denen Trägheitskräfte des Pfahl-Boden-Systems berücksichtigt werden müssen, siehe auch 13.2.3.

- Stoßartige Einwirkungen: Darunter werden einmalige Einwirkungen auf die Pfähle verstanden, die nur eine kurze Zeit wirksam sind. Dabei sind ggf. die Trägheitskräfte des Pfahl-Boden-Systems zu berücksichtigen, siehe auch 13.2.4.

In den folgenden Abschnitten sind weitere Definitionen und Zusammenhänge zu den zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen auf Pfahlgründungen gegeben.



\*) Erdbebeneinwirkungen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Empfehlungen

**Bild 13.2** Beispiele zyklischer, dynamischer und stoßartiger Einwirkungen auf Pfahlgründungen

### 13.2.2 Einwirkungen bei zyklischer Belastung

(1) Bei zyklischer Belastung wird zwischen dem mittleren Lastanteil  $F_{\text{mitt}}$  oder  $H_{\text{mitt}}$  sowie dem zyklischen Lastanteil  $F_{\text{zyk}}$  oder  $H_{\text{zyk}}$  unterschieden, siehe Bild 13.3 und 13.4. Der

zyklische Lastanteil wird auch als Lastspanne bezeichnet. Die halbe Lastspanne  $F'_{zyk}$  oder  $H'_{zyk}$  definiert die Lastamplitude.

(2) Bei einer Schwellbelastung ist die Lastspanne die Laständerung zwischen betragsmäßig kleinster  $F_{min}$  oder  $H_{min}$  sowie größter  $F_{max}$  oder  $H_{max}$  Last. Bei einer Wechselbelastung ist die Lastspanne die Laständerung zwischen größter Zuglast und größter Drucklast. Für zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle gelten Bild 13.3 und 13.4 sinngemäß.

(3) Bei zyklisch axial belasteten Pfählen gibt das mittlere Lastniveau  $X_{mitt}$  das Verhältnis des mittleren Lastanteils bezogen auf den charakteristischen Druck- oder Zugwiderstand des Pfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei ständigen Einwirkungen vor einer zyklischen Belastung wieder. Das zyklische Lastniveau  $X_{zyk}$  gibt das Verhältnis der zyklischen Lastamplitude bezogen auf den charakteristischen Druck- oder Zugwiderstand des Pfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei ständigen Einwirkungen wieder.

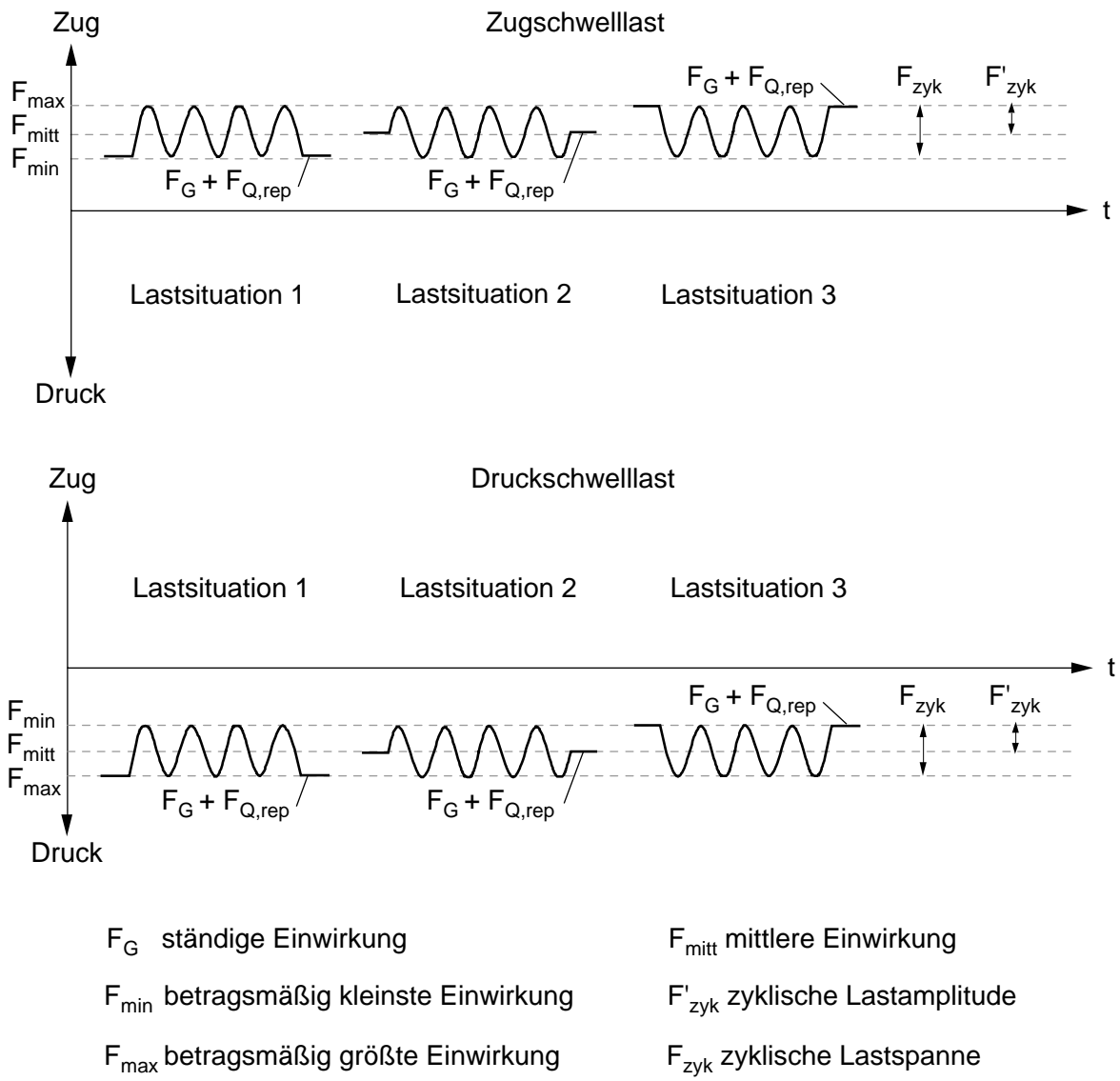
$$X_{mitt} = F_{mitt} / R_{ult,k} \quad \text{oder} \quad X_{mitt} = H_{mitt} / R_{ult,k} \quad (13.1)$$

$$X_{zyk} = F'_{zyk} / R_{ult,k} \quad \text{oder} \quad X_{zyk} = H'_{zyk} / R_{ult,k} \quad (13.2)$$

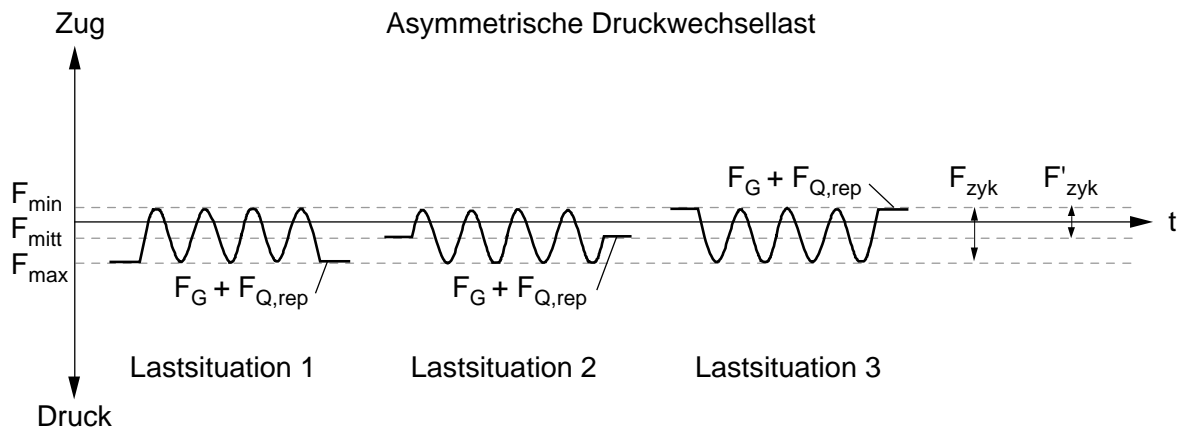
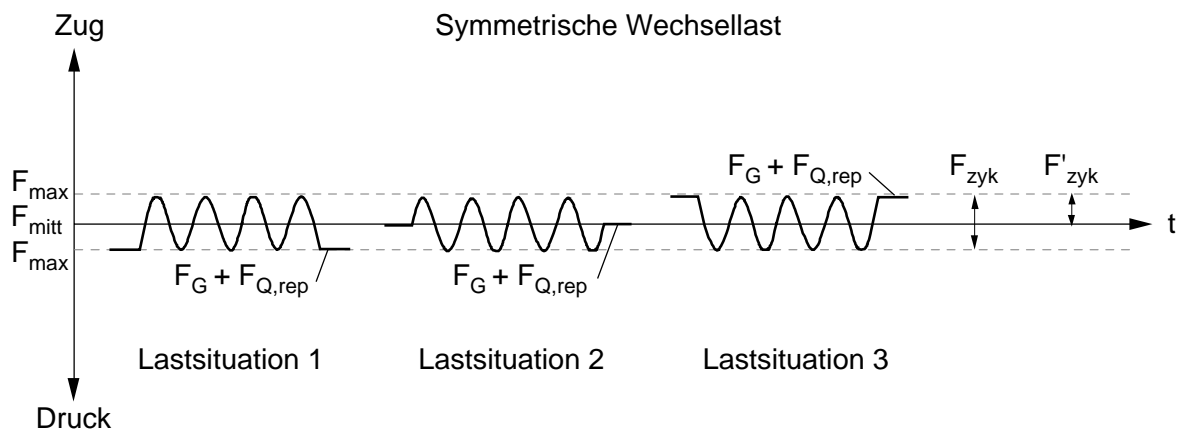
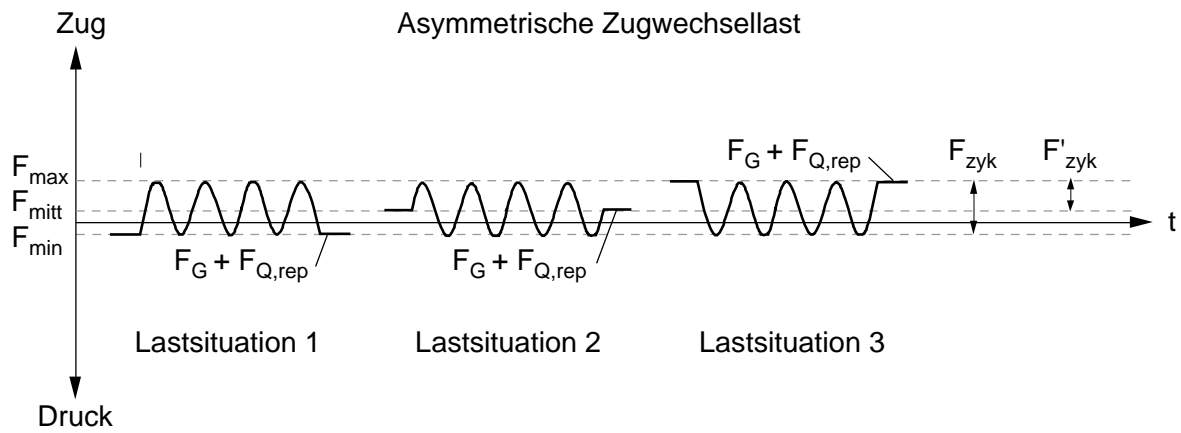
(4) Bei zyklisch quer zur Pfahlachse belasteten, biegeweichen, langen Pfählen nach DIN 1054:2010-12, Zu 7.7.1 A(3a) ist eine Angabe von charakteristischen Druck- oder Zugwiderständen des Pfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit schwierig und nicht eindeutig, siehe auch 5.8. Die Gleichungen (13.1) und (13.2) gelten daher zunächst nur für zyklisch axial belastete Pfähle und kurze zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle.

(5) Die in den Bildern 13.3 und 13.4 dargestellten Belastungs- und Einwirkungssituationen auf Pfähle sollen zunächst die wesentlichen Begriffe definieren und stellen im Hinblick auf eine harmonische zyklische Pfahlbelastung den Idealfall dar. In der Ausführungspraxis können dem gegenüber unterschiedliche zyklische Belastungssituationen auf Pfähle einwirken, z. B. bei Wellenbelastung verschiedener Höhe und zeitlicher Abfolge. Des Weiteren sind auch zeitliche Unterbrechungen der zyklischen Einwirkung auf die Pfahlgründung denkbar. Damit können auch bei zyklischen Pfahlbelastungen ansatzweise transiente Einwirkungen vorliegen, siehe auch 13.2.3 (4) und (5).





**Bild 13.3** Belastungs- und Einwirkungssituationen bei zyklisch belasteten Pfählen für Schwelllasten



$F_G$  ständige Einwirkung

$F_{min}$  betragsmäßig kleinste Einwirkung

$F_{max}$  betragsmäßig größte Einwirkung

$F_{mitt}$  mittlere Einwirkung

$F'_{zyk}$  zyklische Lastamplitude

$F_{zyk}$  zyklische Lastspanne

**Bild 13.4** Belastungs- und Einwirkungssituationen bei zyklisch belasteten Pfählen für Wechsellasten

(6) Sofern unterschiedliche Lastspannen zu berücksichtigen sind, darf näherungsweise davon ausgegangen werden, dass die sich akkumulierende Pfahlverschiebung unabhängig von der Lastreihenfolge ist und die Miner-Regel gilt, siehe dazu z.B. [Wichtmann et al. 2006]. Es darf daher eine zyklische Ersatzbelastung, bestehend aus einer äquivalenten Beanspruchung bestehend aus  $(F_{\text{mitt}}, F_{\text{zyk}})_{\text{eq}}$  und einer zugehörigen äquivalenten Anzahl der Lastzyklen  $N_{\text{eq}}$ , abgeleitet werden. Zu möglichen Vorgehensweisen zur Berechnung äquivalenter Lastzyklenzahlen siehe 13.4.

### 13.2.3 Einwirkungen bei dynamischer Belastung

(1) Dynamische Belastungen können harmonische, periodische oder transiente Funktionen der Zeit sein. Als solche sind sie deterministisch, d. h. physikalisch eindeutig bestimmt.

(2) Stochastische Einwirkungen auf Pfahlgründungen sind durch zufällige zeitliche Schwankungen gekennzeichnet. Oftmals können sie auf äquivalente deterministische Einwirkungen zurückgeführt werden.

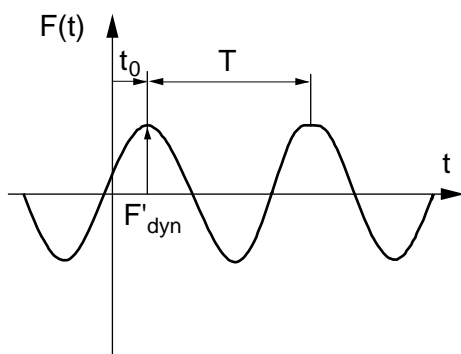
(3) Harmonische Belastungen gemäß Bild 13.5 können nach Gleichung (13.3) beschrieben werden.

$$F(t) = F'_{\text{dyn}} \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t - t_0}{T}\right) \quad (13.3)$$

mit

$T$                       Periodendauer

$F'_{\text{dyn}}$                 Amplitude



**Bild 13.5**

Harmonische Belastung

(4) Periodische Belastungen lassen sich als Fourierreihenentwicklung, d. h. als Summe harmonischer Belastungen unterschiedlicher Frequenz darstellen. In der Praxis genügt es häufig einige wenige Reihenglieder zu berücksichtigen. Beispiele für periodische Lasten sind Massenkraften aus Maschinen oder Wasserdruck aus Wellen.

(5) Transiente Belastungen sind nicht periodische Vorgänge von begrenzter Dauer, z. B. Einwirkungen aus Verkehr. Mit dem Verfahren der Schnellen Fourier Transformation (FFT) lassen sich diese ebenfalls in den Frequenzbereich überführen.

(6) Ob eine zyklische oder dynamische Belastung auf Pfähle vorliegt und Trägheitskräfte näherungsweise vernachlässigbar sind bzw. zu berücksichtigen sind, kann z. B. nach Gleichung (13.4) abgeschätzt werden. Trägheitseffekte dürfen vernachlässigt werden, wenn der Trägheitsausdruck in (13.4) weniger als 10 % der elastischen bzw. elasto-plastischen Steifigkeit gemäß Gleichung (13.4) in einer Pfahlgründung ausmachen.

$$M \cdot \omega^2 < 0.1 \cdot K \quad (13.4)$$

mit

$\omega = 2 \cdot \pi / T$     Kreisfrequenz der dynamischen Belastung

$f$                     Frequenz der dynamischen Belastung (in [Hz])

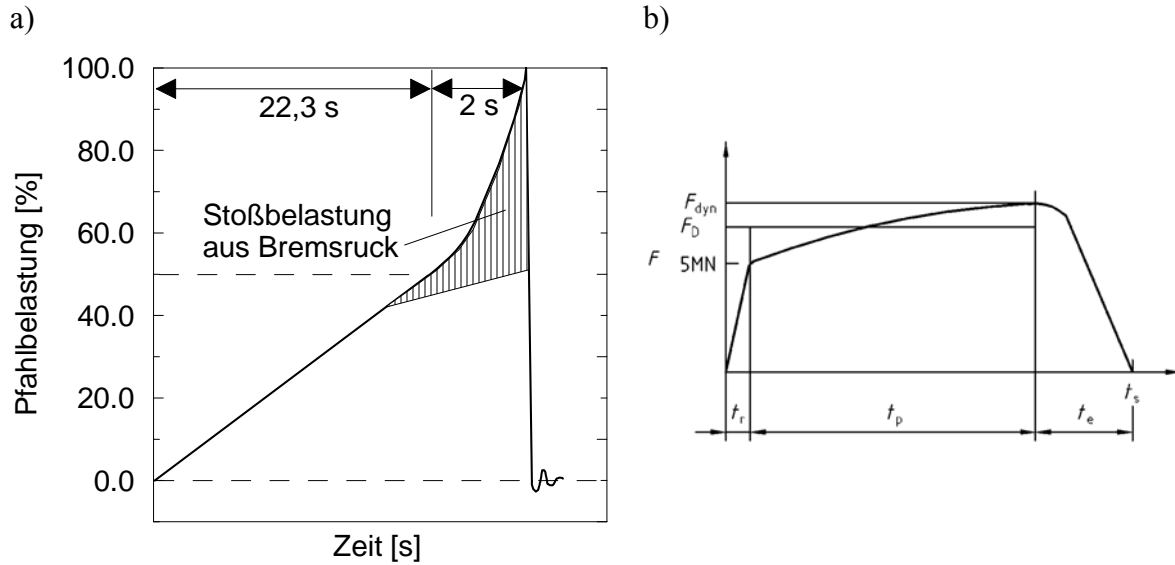
$M$                     Wirksame Masse der Pfahlgründung (in [t])

$K$                     Linear-elastische Steifigkeit bzw. Sekantensteifigkeit der Pfahlgründung (in [kN/m])

Bei Einzelpfählen kann als wirksame Masse die Pfahlmasse über die elastische Länge angesetzt werden. Bei Pfahlgruppen ist die Masse des von den Pfählen eingefassten Bodens zu berücksichtigen.

#### **13.2.4 Einwirkungen bei stoßartiger Belastung**

(1) Unter stoßartiger Belastung werden Einwirkungen über eine kurze Zeit auf die Pfähle verstanden, siehe Bild 13.6. Die Einwirkungszeit kann im Millisekundenbereich bis zu einigen Sekunden liegen. Entsprechende Einwirkungen können z. B. Bremsanteile (Bremsruck), Anprall- und Explosionslasten usw. sein, siehe auch DIN 1055-9.



**Bild 13.6** Beispiele von stoßartiger Belastung auf Pfähle; a) infolge Bremslastwirkung bei pfahlgegründeten Eisenbahn-Brückenpfeilern, b) Stoßkraft-Zeitverlauf gemäß DIN 1055-9:2003-08, Bild 9b

(2) Die Einwirkungen können in Form einer Stoßlastfunktion auf die Pfähle mit dem Maximalwert  $F_{dyn}$  oder  $F'_{dyn}$  angegeben werden.

### 13.3 Ergänzende geotechnische Untersuchungen

- (1) Grundsätzliche Anforderungen an geotechnische Untersuchungen bei Pfahlgründungen sind in 3.2 beschrieben.
- (2) Ziel der ergänzenden geotechnischen Untersuchungen ist die Ermittlung des Bodenverhaltens infolge zyklischer und dynamischer Beanspruchung und die Wahl geeigneter Untersuchungsverfahren, welche die veränderliche Beanspruchung in geeigneter Weise abbilden, sowie die Ableitung charakteristischer Bodenkennwerte.
- (3) Die Art und der Umfang der ergänzenden Untersuchungen, der hierfür erforderlichen Probenqualität und der abzuleitenden Bodenkennwerte sind unter Berücksichtigung der Beanspruchung der Pfahlgründung sowie der anzuwendenden Bemessungsmodelle durch den Sachverständigen für Geotechnik für jeden Einzelfall festzulegen.
- (4) Bei der Planung der ergänzenden Untersuchungen und der Auswahl geeigneter Untersuchungsmethoden sind die zu erwartenden Belastungsamplituden, das mittlere und zyklische Belastungsniveau, die Belastungsrichtungen, die Zyklusanzahl sowie die Nachweisverfahren nach Abschnitt 13.7 zu berücksichtigen. Sofern zum Untersuchungszeitpunkt noch keine hinreichenden Angaben zur Verfügung stehen, ist zumindest eine ausreichende Anzahl von Sonderproben von den Hauptbodenarten für spätere ergänzende Laboruntersuchungen zurück zu stellen.
- (5) In Tabelle 13.1 sind gebräuchliche Untersuchungsmethoden für zyklisch, dynamisch oder stoßartig beanspruchte Böden getrennt nach Feld- und Laboruntersuchungen zusammengestellt und Hinweise für das mit der jeweiligen Methode feststellbare Bodenverhalten gegeben. Sofern zu den zyklischen Laborversuchen eine normative Regelung für den entsprechenden statischen Versuch existiert, können dessen Regelungen auch auf die zyklischen Versuche übertragen werden.
- (6) Ein Überblick zum allgemeinen Bodenverhalten unter zyklischen und dynamischen Belastungen sowie Erläuterungen zu den in Tabelle 13.1 angegebenen Untersuchungsmethoden sind z. B. in [Vrettos 2008], [Studer et al. 2007], [Savidis/Vrettos 2011] zu finden. In den Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruddynamik der DGGT [DGGT 2002] sind Erfahrungswerte und Korrelationen für dynamische Bodenkennwerte enthalten.

**Tabelle 13.1** Untersuchungsmethoden für zyklisch und dynamisch beanspruchte Böden

Eignung der Versuche: ++ sehr gut + gut o bedingt - ungeeignet	Untersuchungsgegenstand					
	Porenwasserdruckentwicklung	Ver-/Entfestigung	Volumenänderung	kleine Verzerrungen	Materialdämpfung	Wellengeschwindigkeiten
Untersuchungsmethode						
<b>Laboruntersuchungen</b>						
Zyklischer Triaxialversuch (undränniert)	++	+	-	o	o	-
Zyklischer Triaxialversuch (dränniert)	-	+	++	o	o	-
Zyklischer Einfach-Scherversuch (Simple Shear) (volumenkonstant)	++	+	-	o	o	-
Zyklischer Einfach-Scherversuch (Simple Shear) (dränniert)	-	+	++	o	o	-
Zyklischer Rahmen-Scherversuch (dränniert)	-	+	+	o	o	-
Zyklischer Rahmen-Scherversuch (dränniert) unter CNS (constant normal stiffness) Bedingungen	-	+	+	o	-	-

Zyklischer Einaxialer Kompressionsversuch mit behinderter Seitendehnung (Ödometerversuch)	-	0	+	-	0	-
Zyklischer Torsionsscherversuch (undränniert)	+	+	-	0	0	-
Zyklischer Torsionsscherversuch (dränniert)	-	+	+	0	0	-
Resonanzsäulen (Resonant Column) Versuch	-	+	0	++	++	++
Bender (Piezo-)Element Versuch, Tension-Compression (Piezo-)Element Versuch	-	-	-	+	-	++
<b>Felduntersuchungen</b>						
Oberflächen-Geophysik (Reflexions-/Refraktions-Seismik, Harmonischer Schwingerreger)	-	-	-	+	-	+
Bohrloch-Geophysik (Cross-Hole, Down-/Up-Hole)	-	-	-	+	-	+
Seismic Piezocone (SCPTU)	+	-	-	+	-	+
Zyklischer Dilatometer-Versuch	-	+	-	-	0	-



## 13.4 Tragverhalten und Widerstände bei zyklischer Belastung

### 13.4.1 Allgemeines

(1) Erhebliche zyklische Pfahlbelastungen gemäß 4.1 (1) und 13.1 (2) können zu einem stark veränderten Pfahltragverhalten führen. Hierbei ist zu beachten, dass für Böden wenige große Lasten im Vergleich zu vielen kleinen Lasten von größerer Bedeutung sind als für andere Materialien. Dabei darf näherungsweise die Lastreihenfolge vernachlässigt werden, wenn ein ausreichender Abstand zum Grenzzustand der Tragfähigkeit vorliegt.

(2) Das veränderte Pfahltragverhalten zyklisch belasteter Pfähle ist durch die Zunahme (Akkumulation) der plastischen Verschiebung  $s_{zyk}(N)$  bzw.  $y_{zyk}(N)$  des Pfahls mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen  $N$  und ggf. durch die Änderung des post-zyklischen Pfahlwiderstands  $R_{ult}(N)$  gekennzeichnet. Diese beiden Phänomene haben somit Einfluss auf die Standsicherheitsnachweise nach 13.7 bis 13.9.

(3) Die Größe der plastischen Verschiebung und ggf. die Änderung der Pfahltragfähigkeit nach  $N$  Lastzyklen sind abhängig von Belastungsparametern, Bodenkenngrößen und Pfahleigenschaften. Hinweise zum generellen zyklischen Pfahltragverhalten und zur Ermittlung des charakteristischen Pfahltragverhaltens sind je nach Belastungsrichtung in 13.4.2, 13.4.3 und 13.4.4 gegeben.

### 13.4.2 Axiale Belastung

(1) Eine zusammenfassende Auswertung einer Vielzahl von in der Literatur dokumentierten zyklisch axialen Pfahlversuchen hat gezeigt, dass das Tragverhalten der Pfähle durch die zyklische Belastung sich stark verändern kann, wenn die zyklische Lastspanne  $F_{zyk}$  im Sinne von DIN 1054:2010-12, A 2.4.2.1, A(8b) größer als 20 % bzw. die zyklische Lastamplitude  $F'_{zyk}$  größer 10 % des charakteristischen statischen Pfahlwiderstandes  $R_{ult}$  im Grenzzustand der Tragfähigkeit ist.

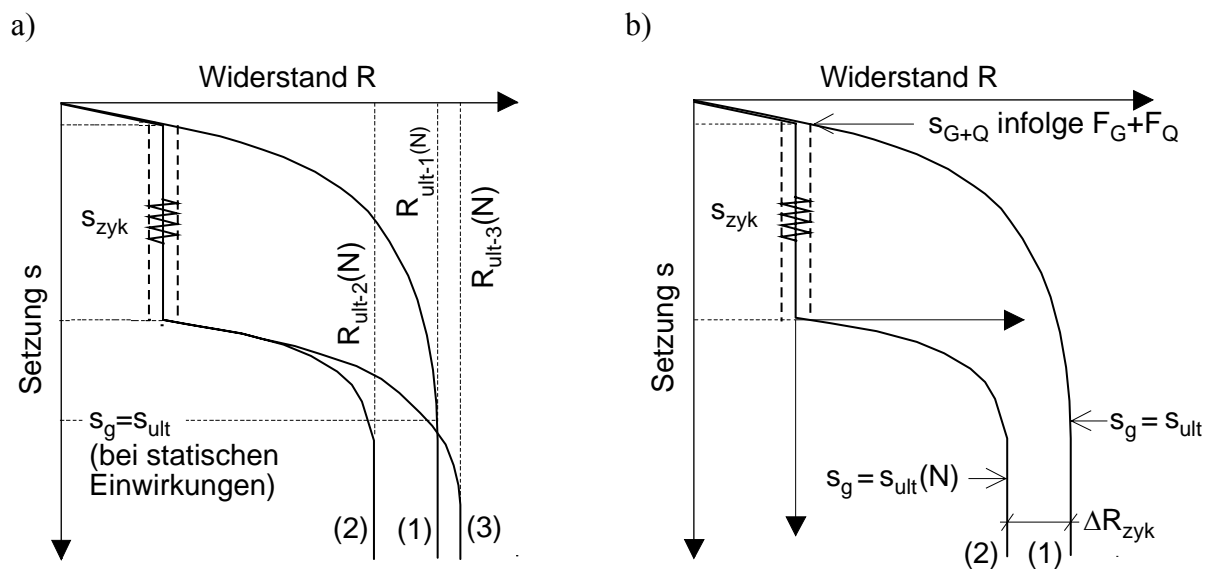
*Anmerkung:* Bisher wurde diese Grenze z. B. in DIN 1054:2005-01 oder [[Kempfert 2009]] etwas konservativer eingeschätzt.

(2) Wenn diese Randbedingungen vorliegen, muss die zyklische Belastung nach DIN 1054 bei den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit von Pfählen berücksichtigt werden, siehe auch 13.7.

(3) Das Pfahltragverhalten bei erheblichen zyklischen Lastanteilen zeichnet sich in der Regel gegenüber ruhender oder „quasi-statisch“ zu behandelnder Belastung (siehe Kurve (1) in Bild 13.7a) einerseits durch vergrößerte Verschiebungen  $s_{zyk}(N)$  im Gebrauchszustand und andererseits durch die Abnahme des Druck- oder Zugwiderstands des Pfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit  $R_{ult}(N)$  aus, siehe Kurve 2 in Bild 13.7a.

(4) Das veränderte Tragverhalten ist im Wesentlichen auf eine Reduktion des Mantelwiderstands zurückzuführen. Im Regelfall kann davon ausgegangen werden, dass der Pfahlfußwiderstand durch zyklische Belastung nicht verändert wird.

(5) In seltenen Fällen bei bestimmten Randbedingungen kann es bei Druckschwelllasten auch zur Zunahme von  $R_{ult}(N)$  kommen, siehe Kurve 3 in Bild 13.7a. Aus diesem Grunde darf bei einem erheblichen Pfahlfußwiderstandsanteil am Gesamtwiderstand des Pfahls die Ermittlung der Tragfähigkeitsminderung wie auch das 20%-Kriterium für die Lastspanne bzw. das 10 %-Kriterium für die Lastamplitude nach (1) infolge zyklischer Belastung auf den Mantelwiderstandsanteil beschränkt werden.



**Bild 13.7** a) Beispiele von Widerstand-Setzungs-Linien ohne zyklische Belastung (1) und nach zyklischer Belastung (post-zyklischer Belastung) (2) und (3), b) Ermittlung von  $\Delta R_{zyk}$

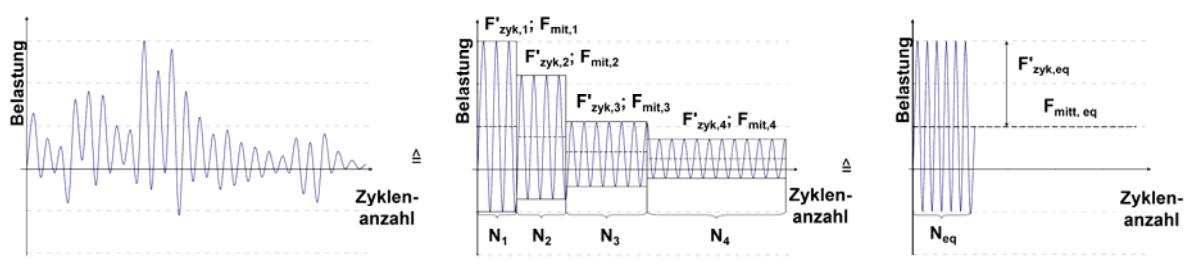
(6) Beim Vergleich von Widerstands-Setzungs-Linien statisch belasteter Pfähle mit zyklisch belasteten Pfählen ist zu erwarten, dass die Grenzsetzung  $s_g$  für die beiden Belastungsarten sich unterschiedlich einstellen, siehe Bild 13.7b. Dabei kann die Grenzsetzung zyklisch vorbelasteter Pfähle zu  $s_g = s_{ult}(N) \leq 0,1D + s_{zyk}$  abgeschätzt werden, sofern keine anderen Kriterien zur Anwendung kommen.

(7) Pfähle unter symmetrischen Wechsellasten oder asymmetrischen Wechsellasten mit niedrigen mittleren Lastniveaus weisen in der Regel in den ersten Lastzyklen geringere plastische Verschiebungen auf als mit vergleichbaren zyklischen Lastniveaus belastete Pfähle unter Schwelllasten. Eine Extrapolation der Verschiebungen ist in diesen Fällen nicht zulässig, weil bei höheren Zyklenzahlen eine überproportionale Zunahme der plastischen Verschiebungen verbunden mit einem Versagen des Pfahles eintreten kann. Pfähle unter Wechsellasten haben in der Regel auch geringere post-zyklische Pfahltragfähigkeiten. Abhängig von der Anzahl der Lastzyklen und der zyklischen Lastspanne sowie den Drainagebedingungen kann sich Porenwasserdruck akkumulieren, was zu einer Reduktion der

effektiven Spannungen, im Grenzfall bis hin zur Verflüssigung des anstehenden Bodens führen kann.

(8) Die zyklischen Einwirkungen können vor allem in nichtbindigen Böden Veränderungen der Lagerungsverhältnisse und Kornumlagerung im Pfahlnahbereich bewirken, die Auswirkungen auf das Pfahltragverhalten haben. In nichtbindigen Böden ist in der Regel mit einem ungünstigeren zyklischen Pfahltragverhalten zu rechnen als in überkonsolidierten bindigen oder gemischtkörnigen Böden.

(9) Die zum gegenwärtigen Kenntnisstand vorliegenden Berechnungsverfahren zur Beschreibung des Pfahltragverhaltens unter zyklischen Einwirkungen gemäß (1) erfordern die Festlegung eines der tatsächlichen Beanspruchung äquivalenten Einstufenkollektivs  $F_{zyk,eq}$  ( $N_{eq}$ ), s. Bild 13.8 und 13.2.2 (6). Ein mögliches Verfahren ist in Anhang D4.1.1 und ein entsprechendes Beispiel in Anhang D4.2.1 dargestellt.



**Bild 13.8** Beispiel für die Ableitung eines äquivalenten Einstufenkollektivs aus dem tatsächlichen Beanspruchungsverlauf auf die Pfähle

(10) Das charakteristische Verschiebungsverhalten des Pfahls nach  $N$  Lastzyklen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) sollte aus zyklischen Pfahlprobebelastungen abgeleitet werden. Wenn dies nicht oder nicht in ausreichendem Umfang realisiert werden kann, siehe auch 13.1 (7), darf eine Abschätzung der plastischen Verschiebungen  $s_{zyk}(N)$  auf der Grundlage von an Versuchen kalibrierten Rechenmodellen erfolgen.

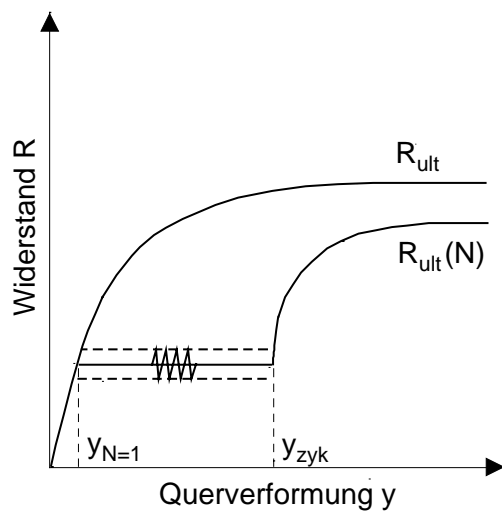
(11) Die Änderung des charakteristischen Druck- oder Zugwiderstands des Pfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) nach  $N$  Lastzyklen  $R_{ult}(N)$  sollte aus post-zyklischen statischen Pfahlprobebelastungen abgeleitet werden. Darunter sind Belastungsversuche zu verstehen, bei denen unmittelbar im Anschluss an die Aufbringung einer erforderlichen Anzahl an Lastzyklen der Versuch unter statischer Last bis zum Grenzzustand der Tragfähigkeit gefahren wird. Sofern dies analog zu (7) nicht realisiert werden kann, dürfen ebenfalls Rechenmodelle für den Pfahlwiderstand  $R_{ult}(N)$  angewendet werden, die an Versuchen kalibriert wurden. Die Ermittlung des charakteristischen Pfahlwiderstands  $R_{ult}(N)$  darf setzungsunabhängig erfolgen, d. h.  $s_{ult} \neq s_{ult}(N)$ , siehe Bild 13.7b.

(12) Eine Auswahl von Rechenmodellen zur Beschreibung des Pfahltragverhaltens nach (10) und (11) findet sich zusammen mit Berechnungsbeispielen in Anhang D2.

(13) Unter Wechsellasten ist der Widerstand des Pfahls in beiden Richtungen zu berücksichtigen, da  $R_{c,ult}(N) \neq R_{t,ult}(N)$  ist.

### 13.4.3 Querbelastung

(1) Das Pfahltragverhalten bei erheblichen zyklischen Lastanteilen quer zur Pfahlachse zeichnet sich in der Regel gegenüber üblichen veränderlichen oder „quasi-statischen“ Einwirkungen durch eine Änderung der Boden- bzw. Bettungseigenschaften aus. Dies führt analog zu axial belasteten Pfählen zur Akkumulation der Pfahlverschiebungen mit den Lastzyklen, siehe Bild 13.9. Außerdem kann es zu einer Reduktion der Pfahltragfähigkeit kommen, wenn z. B. durch die zyklische Beanspruchung Porenwasserüberdrücke entstehen.



**Bild 13.9**

Widerstand-Verschiebungs-Linien bei statischer Querbelastung ohne und mit zyklischer Vorbelastung

(2) Schwelllasten führen bei querbelasteten Pfählen im Allgemeinen zu größeren akkumulierten Verformungen als symmetrische Wechsellasten.

*Anmerkung:* Nach Untersuchungen in [LeBlanc 2009] kann eine asymmetrische Wechsellast auch deutlich größere zyklische Verformungen als eine Schwelllast hervorrufen. Nach [Dührkop/Grabe 2008] kann sich bei einer unregelmäßigen geringfügigen Lastrichtungsänderung ebenfalls eine deutlich erhöhte Verformungszunahme ergeben.

(3) Einige der vorliegenden Berechnungsverfahren zur Beschreibung des Pfahltragverhaltens unter zyklischer Querbelastung erfordern die Festlegung eines dem tatsächlichen Beanspruchungsverlauf äquivalenten Einstufenkollektivs  $H_{zyk,eq}(N_{eq})$ , siehe Bild 13.8 und 13.2.2 (6). Ein mögliches Verfahren ist zusammen mit einem Berechnungsbeispiel in Anhang D4 dargestellt.

(4) Das charakteristische Verschiebungsverhalten des Pfahls nach N Lastzyklen sollte aus zyklischen Pfahlprobelastungen abgeleitet werden. Wenn dies nicht oder nicht in ausreichendem Umfang realisiert werden kann, siehe auch 13.1 (7), kann eine rechnerische Abschätzung der Pfahlverschiebungen bei Schwelllastbeanspruchung abhängig von der Zyklenanzahl durch Berechnungsverfahren, die unter Verwendung von zyklischen

Laborversuchen die Prognose der Verschiebungen ermöglichen, sowie durch empirische Ansätze erfolgen, sofern vergleichbare Randbedingungen, d. h. Pfahleigenschaften, Pfahlherstellung, Bodenkenngrößen und Belastungsparameter, mit den zugrundeliegenden Versuchen vorliegen, siehe hierzu Anhang D3.

(5) Eine rechnerische Abschätzung des Tragverhaltens zyklisch quer belasteten Pfähle kann z.B. auf der Grundlage von p-y Kurven durchgeführt werden, siehe z. B. [Lesny, 2010]. Die Form der p-y Kurven und die Größe des Grenzwertes der aufnehmbaren Bettungsspannungen ist abhängig von der zyklischen Beanspruchung und der Porenwasserdruckakkumulation des Baugrundes tiefen- und spannungsabhängig zu bestimmen. Diese Werte sind unter Heranziehung der Ergebnisse von zyklischen Elementversuchen oder auf der Grundlage von gesicherten Erfahrungen bei vergleichbaren Randbedingungen zu bestimmen. Die für die Berechnungen von zyklisch querbelasteten Pfählen angesetzten charakteristischen p-y-Kurven sind vom Sachverständigen für Geotechnik zu bestätigen.

(6) Hinweise bzw. Ansätze zur Abminderung der Bettungsspannungen bzw. der Erdwiderstände infolge zyklischer Belastung finden sich z. B. in [DIN EN ISO 19902], [API RP 2A-WSD, 2007 oder API RP 2A-LRFD, 1993], [Dührkop 2009].

(7) Eine Auswahl von Rechenmodellen zur Beschreibung des Pfahltragverhaltens unter zyklischer Querbeltung findet sich zusammen mit Berechnungsbeispielen in Anhang D3.

(8) Für genauere Untersuchungen dürfen auch numerische Verfahren angewendet werden, wenn die Beschreibung des Systemverhaltens unter zyklischer Belastung realitätsnah erfolgt. Auch diese Berechnungsmodelle sollten an vergleichbaren Pfahlprobelastungen kalibriert werden.

(9) Für eine erste Abschätzung der Pfahllänge unter zyklischer Belastung kann die Einbindetiefe eines biegeweichen Pfahls ergänzend auch durch Betrachtung der Pfahlbiegeline beurteilt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass, sofern die Pfahlfußverschiebung klein bleibt und die Pfahlbiegeline durch eine rechnerische Vergrößerung der Pfahllänge nur unwesentlich beeinflusst wird, in der Regel von stabilem Pfahlverhalten unter zyklischen Lasten ausgegangen werden kann.

(10) Unabhängig von (9) sind genauere Betrachtungen zur Größe der zu erwartenden Verformungen und die Einflüsse auf die Schnittgrößen unter zyklischer Belastung zu berücksichtigen.

(11) Für kurze, annähernd starre Pfähle von Lärmschutzwänden an Eisenbahnstrecken wird in [Raithel 2005] ein aus Versuchsergebnissen abgeleiteter indirekter Gebrauchstauglichkeitsnachweis über den Nachweis einer erhöhten Globalsicherheit beschrieben. Sofern die Anwendungsvoraussetzungen erfüllt sind, kann der Gebrauchstauglichkeitsnachweis über den Nachweis eines entsprechend reduzierten Ausnutzungsgrads erfolgen.

### 13.5 Tragverhalten und Widerstände bei dynamischer Belastung

(1) Eine dynamische Pfahlbelastung gemäß 13.2.3 kann zu einem stark veränderten Pfahltragverhalten führen, siehe auch 13.1 (5).

(2) Bei dynamischen Einwirkungen werden Trägheitskräfte wirksam und der Pfahlwiderstand kann sich gegenüber statischer Belastung stark verringern. Ein im Baugrund durch die dynamische Einwirkung bewirkter Porenwasserdruckanstieg kann bis hin zu einem Versagen infolge Bodenverflüssigung führen.

(3) Es gelten grundsätzlich die gleichen Überlegungen wie bei einer zyklischen Belastung. Ist die dynamische Lastspanne so groß, dass Scherbeanspruchungen im Baugrund erzeugt werden, die eine Strukturveränderung der Bodenmatrix bedingen, ist auch hier mit einer Akkumulation der plastischen Verschiebung und mit der Abnahme des charakteristischen Druck- oder Zugwiderstands des Pfahls  $R_{ult}$  zu rechnen. Erste Hinweise für Grenzwerte für von Scherbeanspruchungen (Scherdehnungen) sind z. B. [Vucetic 1994] zu entnehmen. Hierzu sind noch weitere Untersuchungen erforderlich.

## **13.6 Tragverhalten und Widerstände bei stoßartiger Belastung**

### **13.6.1 Allgemeines**

(1) Eine stoßartige Pfahlbelastung gemäß 13.2.4 kann zu einem stark veränderten Pfahltragverhalten führen, siehe auch 13.1 (5).

(2) Bei stoßartigen Einwirkungen kann sich aufgrund von Trägheits- und Dämpfungskräften der Bodenwiderstand in der Pfahlumgebung steifer verhalten kann als bei rein statischer bzw. langsam transients Pfahlbeanspruchung. Ein ähnliches Verhalten ist auch für die Pfahl- und Bodenwiderstände für jeweils den einzelnen Zyklus einer zyklischen Pfahlbeanspruchung zu möglich, sofern sich das Pfahltragverhalten nicht insgesamt durch die zyklische Belastung maßgeblich verschlechtert hat.

*Anmerkung:* Letzteres ist nur bei überwiegend kurzzeitig-stoßartiger Beanspruchung bzw. größeren Ruhephasen zwischen den zyklischen Beanspruchungen gegeben.

(3) Die nachfolgenden Regelungen beziehen sich auf eine stoßartige Belastung geringer Intensität. Weitergehende Regelungen für stoßartige Belastungen hoher Intensität siehe [Empfehlungen AK 1.4, 2011].

*Anmerkung:* Eine hohe Intensität liegt vor, wenn ein Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit nicht geführt werden kann.

### **13.6.2 Axiale Belastung**

(1) Für axial belastete Pfähle unter stoßartiger Belastung darf bis auf weiteres analog zu 13.6.3 wie bei querbelasteten Pfählen verfahren werden.

### **13.6.3 Querbelastung**

(1) War es bisher bei Bohrpfählen nach DIN 4014:03-1990 bei stoßartigen waagerechten Einwirkungen im Sinne von Anprall-Lasten üblich und zulässig, horizontale Bettungsmoduln ohne weitere Nachweise bis um den Faktor 3 gegenüber einem statischen Bettungsmodul zu erhöhen, so haben die Untersuchungen an trockenem enggestuftem Sand in [57] gezeigt, dass bei stoßartigen Belastungen auch Einwirkungen aus Massenträgheitskräften und Auswirkungen von Bodenstrukturumlagerungen auftreten können, die ein weiches Pfahlverhalten insbesondere im Pfahlkopfbereich bewirken .

(2) Der Baugrund reagiert in der Pfahlumgebung bei bestimmten Randbedingungen und stoßartigen Belastungen steifer als bei ruhenden Beanspruchungen, dieser Effekt kann aber durch die erhöhten Belastungen aus den Trägheitskräften und durch Bodenstrukturumlagerungen kompensiert werden.

(3) Im Falle von wassergesättigten Böden bedingt das Porenwasser eine Bodendämpfung die bei kurzzeitiger Belastung eine Steifigkeitserhöhung.

(4) Unter Berücksichtigung dieser Effekte darf zunächst vereinfachend für stoßartige Einwirkungen bei trockenen und erdfeuchten Böden der gleiche Bettungsmodul wie für statische Einwirkungen verwendet werden, sofern mit statischen Ersatzlasten (ohne Berücksichtigung von Trägheitskräften) gerechnet wird. Bei wassergesättigten Böden darf vereinfachend der dreifache Bettungsmodul gegenüber dem statischen Modul angesetzt werden. Dieser Ansatz ist nur zulässig, soweit die Stoßdauer kurz ist und bei mehrfachen Stößen der zeitliche Abstand einen Abbau möglicher Porenwasserdrücke ermöglicht.

(5) Auf Grundlage genauerer dynamischer Untersuchungen kann eine erhöhte Baugrundsteifigkeit in Ansatz gebracht werden.

(6) Siehe auch 13.6.1 (2).



## 13.7 Standsicherheitsnachweise zyklisch axial belasteter Pfähle

### 13.7.1 Nachweis der Tragfähigkeit eines Einzelpfahls

(1) Beim Nachweis der „äußeren“ Tragfähigkeit (Lastübertragung auf den Baugrund) eines zyklisch axial belasteten Einzelpfahles einer Pfahlgründung für die maßgeblichen Bemessungssituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ist in Anlehnung an 6.2.1 (1) wie folgt vorzugehen:

- a) An dem vorgegebenen System aus gewählter Pfahlart und -abmessung, Pfahlkopfkonstruktion und aufgehender Konstruktion werden die charakteristischen axialen Einwirkungen  $F_k$  am Pfahlkopf in Form von Gründungslasten aus dem Bauwerk und ggf. geotechnischen Einwirkungen (z. B. negative Mantelreibung) getrennt nach ständigen, veränderlichen und zyklischen Einwirkungen ermittelt.
- b) Aus den charakteristischen Einwirkungen auf den Pfahl ergeben sich unter Berücksichtigung von zyklisch axialen Einwirkungen  $F'_{zyk}$  die Bemessungswerte der Einwirkungen zu

$$F_d = F_{\max,d} = F_{G,k} \cdot \gamma_G + F_{Q,rep} \cdot \gamma_Q + F'_{zyk} \cdot \gamma_Q \quad (13.7)$$

mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$  nach DIN 1054:2010-12, Tabelle A2.1 bzw. Anhang A2. Dabei wird angenommen, dass die in Bild 13.3 und 13.4 idealisierten Lastsituationen 1 bis 3 näherungsweise das gleiche Pfahltragverhalten verursachen.

- c) Aus den nach 13.4.2 ermittelten charakteristischen Pfahlwiderständen  $R_{ult}(N) = R_c(N)$  bzw.  $R_{ult}(N) = R_t(N)$  bei zyklischen Einwirkungen ergeben sich aus den Ansätzen

$$R_{c,d}(N) = R_{c,d} - \Delta R_{zyk,d} \quad \text{für Druckpfahlwiderstand} \quad (13.8a)$$

bzw.

$$R_{t,d}(N) = R_{t,d} - \Delta R_{zyk,d} \quad \text{für Zugpfahlwiderstand} \quad (13.8b)$$

mit

$$\Delta R_{zyk,d} = \gamma_Q \cdot \eta_{zyk} \cdot \Delta R_{zyk,k} \quad (13.9)$$

und mit dem Modellfaktor  $\eta_{zyk}$  nach (2) sowie mit  $\gamma_t$  oder  $\gamma_{s,t}$  nach DIN 1054:2010-12, Tabelle A2.3 bzw. Anhang A3.2, die Bemessungswerte der Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Der Teilsicherheitsbeiwert bei Druckpfählen beschreibt dabei gleichermaßen den Fuß- und den Mantelwiderstand.

- (2) Sofern zyklische Pfahlprobelastungen ausgeführt werden, darf der Modellfaktor  $\eta_{zyk} = 1$  gewählt werden. Für rechnerische Näherungsverfahren ist ein Modellfaktor  $\eta_{zyk} > 1$  zu wählen, siehe z. B. Anhang D2. Bei der Anwendung anderer Verfahren ist die Größenordnung des Modellfaktors durch den geotechnischen Fachplaner bzw. geotechnischen Sachverständigen zu bestätigen.

(3) Mit den ermittelten axialen Bemessungseinwirkungen und Bemessungswiderständen ist für den Pfahl für jede maßgebende Einwirkungskombination gemäß EC 7-1 bzw. 6.2 (2) die Grenzzustandsbedingung nach Gleichung (13.10) bzw. (13.11) einzuhalten.

$$F_{c,d} \leq R_{c,d}(N) \quad \text{für Druckpfahlwiderstände} \quad (13.10)$$

$$F_{t,d} \leq R_{t,d}(N) \quad \text{für Zugpfahlwiderstände} \quad (13.11)$$

(3) Wird zur Ermittlung der Pfahlwiderstände das auf empirischer Grundlage basierende Verfahren nach Anhang D2.1.1 angewendet, darf alternativ zu (3) der Nachweis der Standsicherheit mit der Grenzzustandsbedingung nach Gleichung (D2.2) geführt werden.

(4) Sofern die Grenzzustandsbedingungen nicht erfüllt sind, müssen die Pfahlabmessungen entsprechend vergrößert werden.

(5) Die Sicherheit gegen Materialversagen („innere Pfahltragfähigkeit“) ist nach 6.2.3 unter Berücksichtigung von 5.10 nachzuweisen.

(6) Anhang D2.2 enthält Beispiele zum Nachweis der äußeren Tragfähigkeit von zyklisch axial belasteten Einzelpfählen.

### 13.7.2 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit eines Einzelpfahls

(1) Ergibt eine entsprechende Prüfung, dass die Verschiebungen der Pfahlgründung für das Gesamttragwerk von Bedeutung sind, dann ist der Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) für die maßgeblichen Bemessungszustände zu führen.

(2) Der Nachweis darf über die aus der Tragwerksplanung vorzugebende zulässige Setzungen  $s_k$  oder Hebungen  $s_{h,k}$  unter charakteristischen Beanspruchungen der Pfahlgründung im Gebrauchszustand wie folgt geführt werden:

$$\text{vorh. } s_k \leq \text{zul. } s_k \quad \text{bzw.} \quad \text{vorh. } s_{h,k} \leq \text{zul. } s_{h,k} \quad (13.12)$$

und

$$\text{vorh. } s_k = s_{G+Q,k} + s_{\text{zyk},k} \quad \text{bzw.} \quad \text{vorh. } s_{h,k} = s_{G+Q,k} + s_{\text{zyk},k} \quad (13.13)$$

mit

$s_{G+Q,k}$  Verschiebung aus ständiger und veränderlicher Einwirkung

$s_{\text{zyk},k}$  Verschiebung aus zyklischer Einwirkung

(3) Anhang D2.2 enthält Beispiele zum Gebrauchstauglichkeitsnachweis von zyklisch axial belasteten Einzelpfählen.

## 13.8 Standsicherheitsnachweise zyklisch querbelasteter Pfähle

### 13.8.1 Nachweis der Tragfähigkeit eines Einzelpfahls

(1) Für den Nachweis der „äußeren“ Tragfähigkeit eines zyklisch quer belasteten Pfahles sind zunächst Grenzwerte der mobilisierbaren Erdwiderstandsspannung bzw. des Bettungsreaktionsdruckes  $e_{ph,k,zyk}$  festzulegen. In welchem Maß mit einer Reduktion im Vergleich zum Grenzwert für statische Belastung zu rechnen ist, ist allgemein abhängig von Pfahlssystem und Pfahlgeometrie, Bodenart, Lastfrequenz und Lastzyklenzahl. Hinweise hierzu enthalten 13.4.3. (5) und (6).

(2) Der Nachweis der Tragfähigkeit biegeweicher Pfähle kann ansonsten mit den zyklischen Erdwiderstandsspannungen und unter Ansatz von Bettungssteifigkeiten für zyklische Belastung wie unter 6.2.2 (1) für statische Lasten beschrieben erfolgen:

- Berechnung der charakteristischen Normalspannungen  $\sigma_{h,k}$  zwischen Pfahl und Boden und der charakteristischen Schnittgrößen. Dabei ist nachzuweisen, dass die charakteristische Normalspannung  $\sigma_{h,k}$  den Grenzwert des mobilisierbaren Erdwiderstands  $e_{ph,k,zyk}$  an keiner Stelle überschreitet:

$$\sigma_{h,k} \leq e_{ph,k,zyk} \quad (13.14)$$

*Anmerkung:* Bei Anwendung eines Bettungsmodulverfahrens mit nichtlinearen p-y-Kurven (p-y-Methode) wird die Einhaltung dieser Bedingung in der Regel automatisch erfüllt.

- Ermittlung der charakteristischen Auflagerkraft  $B_{h,k}$  bis zur Tiefe des Pfahldrehpunkts durch Integration der charakteristischen Normalspannungen über die Pfahlfläche bis zum Pfahldrehpunkt.
- Nachweis der äußeren Tragfähigkeit (Bodenwiderstand):

$$B_{h,d} \leq R_{ult,d,zyk} \quad (13.15)$$

Hierin ist  $R_{ult,d,zyk}$  der Bemessungswert des mobilisierbaren Erdwiderstands bis zum Pfahldrehpunkt, welcher sich aus der Integration der mobilisierbaren Erdwiderstandsspannungen  $e_{ph,zyk}$  ergibt.

- Nachweis der „inneren“ Tragfähigkeit durch Gegenüberstellung der Bemessungswerte der Beanspruchungen (Schnittgrößen) mit den Bemessungswerten des Materialwiderstands:

$$E_d \leq R_{M,d} \quad (13.16)$$

(3) Der Nachweis der Tragfähigkeit kurzer, annähernd starrer Pfähle kann unter Ansatz der zyklischen Grenzwerte der Erdwiderstandsspannungen  $e_{ph,k,zykl}$  wie unter 6.2.2 (3) für statische Lasten beschrieben erfolgen:

- Mit vorgeschätzter Pfahllänge werden die charakteristischen Auflagerkräfte und Schnittgrößen unter Verwendung der Gleichgewichtsbedingungen ermittelt.

- Die charakteristischen Auflagerkräfte  $B_{h,k}$  sind durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten in Bemessungskräfte umzuwandeln und den Bemessungswerten der mobilisierbaren Erdwiderstände  $R_{ult,d,zyk}$  gemäß Gleichung (13.15) gegenüberzustellen.

Der Nachweis der „inneren“ Tragfähigkeit erfolgt durch Gegenüberstellung der Bemessungswerte der Beanspruchungen (Schnittgrößen) mit den Bemessungswerten des Materialwiderstands gemäß Gleichung (13.16).

(4) Anhang D3.3 enthält ein vergleichendes Beispiel zum Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von zyklisch quer zur Pfahlachse belasteten Pfählen.

### 13.8.2 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit eines Einzelpfahls

(1) Sofern die Verformungen der Pfahlgründung unter Querbelastung für das Gesamttragwerk von Bedeutung sind, ist nachzuweisen, dass die unter zyklischer Last über die geplante Lebensdauer sich akkumulierenden Verschiebungen  $\delta_k$  und Verdrehungen  $\theta_k$  des Pfahls kleiner bleiben als projektspezifisch festzulegende Grenzwerte:

$$\text{vorh. } \delta_k \leq \text{zul. } \delta_k \quad (13.17)$$

und

$$\text{vorh. } \theta_k \leq \text{zul. } \theta_k \quad (13.18)$$

vorh.  $\delta_k$  und vorh.  $\theta_k$  sind hierin die sich aus ständigen, veränderlichen und zyklischen Einwirkungen ergebenden Gesamtverschiebungen und -verdrehungen.

(2) Der Nachweis nach (1) kann entweder auf Grundlage erfahrungsbasierter Bemessungskriterien oder durch rechnerische Untersuchungen, ggf. unter Berücksichtigung der Ergebnisse zyklischer bodenmechanischer Elementversuche, erfolgen, siehe hierzu 13.4.3 (4) bis (8).

(3) Für kurze, annähernd starre Pfähle kann unter bestimmten, in Grundsatzuntersuchungen berücksichtigten Randbedingungen ein indirekter Nachweis der Gebrauchstauglichkeit über die Einhaltung eines projektspezifisch festzulegenden, reduzierten Ausnutzungsgrads  $\mu$  beim Nachweis der Tragfähigkeit erfolgen, siehe auch 13.4.3 (10):

$$\mu = B_{h,d} / R_{ult,d,zyk} \leq \text{erf. } \mu \quad (13.19)$$

mit

$B_{h,d}$ : Bemessungswert der unter Verwendung von Gleichgewichtsbedingungen ermittelten charakteristischen Auflagerkraft, s. 13.8.1. (3), und

$R_{ult,d,zyk}$ : Bemessungswert des mobilisierbaren Erdwiderstands.

(4) Anhang D3.3 enthält ein vergleichendes Beispiel zum Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von zyklisch quer zur Pfahlachse belasteten Pfählen.

### **13.9 Standsicherheitsnachweise dynamisch oder stoßartig belasteter Pfähle**

(1) Für die Standsicherheitsnachweise dynamisch oder stoßartig belasteter Pfähle liegen derzeit keine ergänzenden Regelungen vor.

(2) Die nach (1) beanspruchten Pfähle sind im Sinne der Eurocodes unter Berücksichtigung nationaler Ergänzungen bzw. Literaturangaben zu berechnen.

(3) Zum Tragverhalten von dynamisch und stoßartig belasteten Pfählen finden sich Hinweise in 13.5 und 13.6.

[[detaillierte Regelungen später]]

## 13.10 Literatur

[[Literatur zu Kapitel 13]]

- [XY] API RP 2A-WSD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design; 21st Edition, American Petroleum Institute, Washington, 2007.
- [XY] DGGT AK 1.4: Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunddynamik“: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Berlin 2002.
- [XY] Dührkop, J.: Zum Einfluss von Aufweitungen und zyklischen Lasten auf das Verformungsverhalten lateral beanspruchter Pfähle in Sand. Veröffentlichungen des Instituts Geotechnik und Baubetrieb, Technische Universität Hamburg-Harburg, Band 20, 2009.
- [XY] Dührkop J., Grabe J.: Monopilegründungen von Offshore-Windenergieanlagen - Zum Einfluss einer veränderlichen zyklischen Lastangriffsrichtung. Bautechnik, 85(5), 2008, S. 317–321.
- [XY] Kempfert, H.-G.: Pfahlgründungen; Grundbau-Taschenbuch Teil 3: Gründungen und geotechnische Grundlagen. Ernst & Sohn, Berlin, 7. Auflage, 2009.
- [XY] Kempfert, H.-G., Lauffer, J.: Pfahlprobelastung in weniger tragfähigen Böden unter statischer und wechselnder Belastung; Geotechnik 14, 1991, S. 105-112.
- [XY] LeBlanc, C: Design of Offshore Wind Turbine Support Structures, Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark, DCE Thesis No. 18, 2009.
- [XY] Lesny, K.: Foundations for Offshore Wind Turbines – Tools for Planning and Design. VGE Verlag Essen, 2010.
- [XY] Mittag, J., Richter, Th.: Beitrag zur Bemessung von vertikal zyklisch belasteten Pfählen. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel. Heft 18, 2005, S. 337-354.
- [XY] Raithel, M.: Lärmschutzwände auf horizontal belasteten Pfählen bei zyklischen/dynamischen Einwirkungen - Versuchsergebnisse und Berechnungsansätze. Symposium Geotechnik, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 18, 2005, S. 21-34.
- [XY] Savidis, S., Vrettos, C.: Baugrunddynamik. In: K. Zilch, C. J. Diederichs, R. Katzenbach (Hrsg.), Handbuch für Bauingenieure, Springer Verlag, 2011.
- [XY] Schwarz, P.: Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung; Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, Heft 33, Dissertation, 2002.

- [XY] Studer, J. A., Laue, J., Koller, M. G.: Bodendynamik; 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [XY] Taşan, H. Ercan : Zur Dimensionierung der Monopile-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 52, 2011.
- [XY] Thomas, S.: Zum Tragverhalten zyklisch axial belasteter Pfähle (Arbeitstitel); Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel; Heft 25, Dissertation, 2011 (in Vorbereitung).
- [XY] Vrettos, Ch.: Bodendynamik. In: Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, 7. Aufl., S. 451–500, Verlag Ernst & Sohn, 2008.
- [XY] Wichtmann T., Niemunis A., Triantafyllidis T.: Gilt die Minerische Regel für Sand?. Bautechnik, 83(5), 2006, S. 341-350.
- [[Literatur zu Anhang D]]
- [XY] Alizadeh, M., Davisson, M. T.: Lateral load test on piles-Arkansas River project, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. 5, 1970, pp. 1583-1604.
- [XY] Ashour, M., Norris, G.: Lateral Loading of a Pile in Layered Soil using the Strain Wedge Model. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124 (4), 1998, pp. 303-315.
- [XY] Cooke, R. W.: The settlement of friction pile foundations. In: Proc. Conf. Tall Buildings, Kuala Lumpur, Vol. 3, S. 1–16, 1974.
- [XY] Duncan, Chang: Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. In: American Society of Civil Engineers, SM 5, 1970.
- [XY] Hettler, A.: Verschiebungen starrer und elastischer Gründungskörper in Sand bei monotoner und zyklischer Belastung. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 90, 1981.
- [XY] Hinz, P.: Beurteilung des Langzeitverhaltens zyklisch horizontal belasteter Monopile-Gründungen, Universität Duisburg-Essen, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Heft 37, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. W. Richwien, VGE Verlag Essen, 2009.
- [XY] Kempfert, H.-G., Thomas, S.: Zum axialen Pfahltragverhalten unter zyklisch-dynamischer Belastung; Beitrag zur VDI-Fachtagung Baudynamik, VDI-Berichte Nr. 1941, Kassel, 2006, S. 521-535.

- [XY] Kempfert, H.-G., Thomas, S., Gebreselassie, B.: Untersuchungen zum Pfahltragverhalten unter zyklisch axialer Belastung in bindigen und nichtbindigen Böden; DFG-Forschungsbericht, Universität Kassel, 2007, unveröffentlicht.
- [XY] Kirsch, F., Richter, Th.: Ein analytisch-empirischer Ansatz zur Bestimmung der Tragfähigkeit und der Verformungen von axial zyklisch belasteten Pfählen, Veröffentlichung des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, KIT Süd, Workshop „Offshore- Gründungen von Windkraftanlagen“, Heft 172, 2010.
- [XY] Kirsch, F., Richter, Th.: Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen, Bautechnik Heft 2, 2011.
- [XY] Lesny, K., Hinz, P.: Design of Monopile Foundations for Offshore Windenergy Converters. International Foundation Congress & Equipment Expo '09, Orlando, March 15-19, 2009.
- [XY] Little, R.L., Briaud, J.-L.: Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand. Miscellaneous paper GL-88-27, Geotechnical Division, Texas A&M University, College Station, Texas, 1988.
- [XY] Lin, S.-S., Liao, J.-C.: Permanent strains of piles in sand due to cyclic lateral loads. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 9, 1999, pp. 798-802.
- [XY] Long, J. H.; Vanneste, G.: Effects of cyclic lateral loads on piles in sand. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 1, 1994.
- [XY] Norris, G.: Theoretically Based BEF Laterally Loaded Pile Analysis. 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, France, 1986, pp. 361-386.
- [XY] Peralta, P., Achmus, M.: An Experimental Investigation of Piles in Sand Subjected to Lateral Cyclic Loads. 7th Int. Conf. on Physical Modeling in Geotechnics (ICPMG 2010), Zurich, Switzerland, 2010.
- [XY] Richter, Th.; Kirsch, F.; Mittag, J.: Bemessungskonzepte für axial-zyklisch belastete Pfähle – Ein Überblick und neue Ansätze. In: DGGT (Hrsg.) Vorträge zur Baugrundtagung München, 2010.
- [XY] Stewart, H. E.: Permanent strains from cyclic variable-amplitude loadings. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 6, 1986, pp. 646-660.