

# Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ EA-Pfähle

2. Auflage



 **Ernst & Sohn**  
A Wiley Company

**DGGT**   
Deutsche Gesellschaft  
für Geotechnik e. V.  
German Geotechnical Society

## D2 Zyklisch axial belastete Pfähle

### D2.1 Berechnungsverfahren

#### D2.1.1 Pfahlwiderstand im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf der Grundlage von Interaktionsdiagrammen

(1) Der Nachweis der Tragfähigkeit kann näherungsweise mit Hilfe von so genannten Interaktionsdiagrammen erfolgen, siehe Bild D2.1 und Bild D2.2. Dabei wird mit Hilfe eines Ausnutzungsgrades  $\mu$  eine reduzierte Pfahltragfähigkeit ermittelt.

(2) Es kann wie folgt vorgegangen werden: Nach Eintragung der Lastniveaus  $X_{zyk}$  und  $X_{mitt}$  in ein Interaktionsdiagramm wird durch Änderung des Pfahlwiderstands im Grenzzustand der Tragfähigkeit  $R_{ult}$  derjenige Punkt gesucht, an dem die vorhandene Einwirkung aus  $F_{mitt}$  und  $F'_{zyk}$  die entsprechende Grenzlinie für die vorhandenen Lastzyklen erreicht, wodurch man den zugehörigen Wert  $R_{ult}^*$  erhält. Der Ausnutzungsgrad des Systems wird dann wie folgt definiert:

$$\mu = R_{ult}^* / R_{ult} \quad (D2.1)$$

mit

$R_{ult}$   $R_{c,k}$  bzw.  $R_{t,k}$  oder  $R_{(c,m)mitt}$  bzw.  $R_{(t,m)mitt}$  nach 13.2.2 (4) bzw. D1 (3)  
 $R_{ult}^*$  statischer Pfahlwiderstand, der unter der gleichen Einwirkung nach N Lastzyklen zum Versagen führt.

Praktisch bedeutet dies, dass  $\mu$  mit den Bezeichnungen aus Bild D2.1 aus folgender Gleichung ermittelt wird:

$$\mu = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \quad (D2.2)$$

Für den Fall  $\mu = 1,0$  liegt der betrachtete Punkt auf der Grenzlinie für die betrachtete Lastzyklenzahl (dann wäre  $l_2 = 0$ ) und die maximale zyklische Tragfähigkeitsreduktion (Fälle mit  $\mu > 1$  sind unzulässig), bezogen auf den durch die Gesamtlänge  $l_1 + l_2 + l_3$  repräsentierten statischen Pfahlwiderstand, ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\Delta R_{zyk,max} = \frac{l_3}{l_1 + l_2 + l_3} \cdot R_{ult} \quad (D2.3)$$

mit

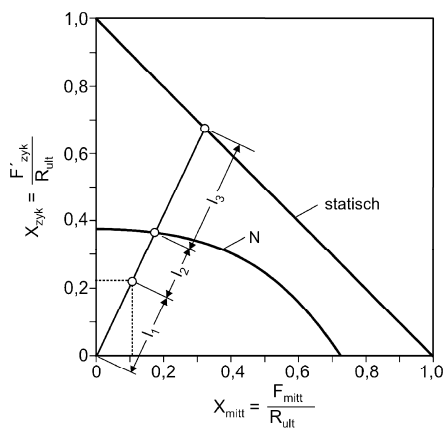
$l_1, l_2, l_3$  aus dem Interaktionsdiagramm gemäß Bild D2.1 abzuleitende Längen.

Für den Fall  $\mu < 1,0$  ist die zyklische Tragfähigkeitsreduktion geringer, für  $\mu = 0$  ergibt sich keine Reduktion. In erster Näherung wird angenommen, dass sich  $\Delta R_{zyk}$  linear mit  $\mu$  entwickelt. Die zyklische Tragfähigkeitsreduktion ergibt sich dann aus Gl. (D2.4).

$$\Delta R_{zyk} = \mu \cdot \frac{l_3}{l_1 + l_2 + l_3} \cdot R_{ult} \quad (D2.4)$$

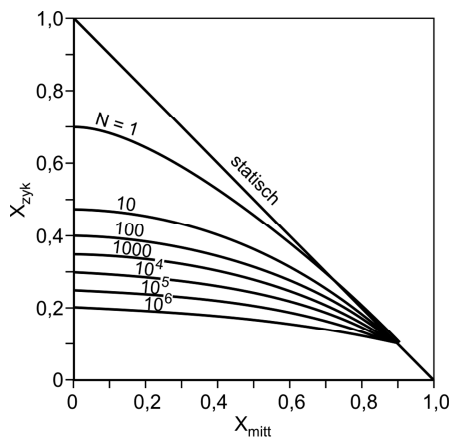
Damit ist der Standsicherheitsnachweis gemäß 13.7.1 im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) zu führen. Für das in Bild D2.2 dargestellte Interaktionsdiagramm darf der Modellfaktor  $\eta_{zyk} = 1,2$  gewählt werden.

(3) Interaktionsdiagramme, die auf Grundlage von Modell- und Feldversuchen sowie zyklischen Pfahlprobelbelastungen erstellt wurden, finden sich in verschiedenen Literaturquellen, siehe z. B. [98], [56], [59] und [67].



**Bild D2.1** Zur Auswertung eines Interaktionsdiagramms

(4) Für nichtbindige Böden wird das Interaktionsdiagramm nach Bild D2.2 empfohlen.



Analytische Beschreibung  
der Interaktionskurven:

$$X_{zyk} = \kappa [1 - 1,11^{EXP} \cdot X_{mitt}^{EXP}] + 0,1235 \cdot X_{mitt}^{EXP}$$

$$\text{mit } \kappa = 0,5 + 0,67[\log(N+1) - 1,0746 \log(N)]$$

$$EXP = 2 - 1,5[\log(N+1) - \log(N)]$$

**Bild D2.2** Interaktionsdiagramm, aus [67]

(5) Für bindige Böden darf der Wert  $\kappa$  nach Bild D2.2 mit dem Erhöhungsfaktor 1,3 für  $N \geq 10$  erhöht werden. Für  $N = 1$  ist der Erhöhungsfaktor zu 1,0 zu setzen. Werte zwischen  $N = 1$  und 10 dürfen linear interpoliert werden.

### D2.1.2 Verschiebungsakkumulation mit einem empirischen Ansatz

(1) Das zyklische Pfahlsetzungs- bzw. Pfahlhebungsverhalten infolge charakteristischer zyklischer Einwirkungen kann näherungsweise durch Gl. (D2.5) beschrieben werden, siehe z. B. [135]. Die Verschiebung und die Verschiebungsrate nach dem ersten Lastzyklus sowie der Neigungsbeiwert sollten durch eine zyklische Pfahlprobelastung zumindest mit einigen wenigen Lastzyklen ermittelt werden. Der weitere Verlauf der zyklischen Verschiebung kann dann nach Gl. (D2.5) abgeschätzt werden.

(2) Der Neigungsbeiwert  $\lambda$  in Gl. (D2.5) ergibt sich abhängig von Boden-, Belastungs- und Pfahlart. Entsprechende Werte sind z. B. in [59] auf Grundlage von Modell- und Feldversuchen sowie zyklischen Pfahlprobelastungen angegeben. Dabei ist zu beachten, dass diese Werte aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen starken Streuungen unterworfen sind. Für ein Verhältnis von zyklischem zu mittlerem Lastniveau  $X_{\text{zyk}}/X_{\text{mitt}}$  zwischen 0,15 und 0,40 kann in erster Näherung für Pfähle in nichtbindigen Böden unter Schwelllast für  $\lambda$  ein Wert von 0,7 bis 0,9 verwendet werden. Vorzugsweise sollte der Neigungsbeiwert aber projektbezogen durch eine statische Pfahlprobelastung mit Ent- und Wiederbelastung bestimmt werden.

$$s_{\text{zyk},k} = s^1 + \frac{\dot{s}_{\text{pl}}^1}{1-\lambda} \cdot (N^{1-\lambda} - 1) \quad \text{für } \lambda \neq 1 \quad (\text{D2.5})$$

mit

$s_{\text{zyk},k}$	axiale Verschiebung nach N Lastzyklen
$s^1$	Verschiebung nach dem ersten Lastzyklus
$\dot{s}_{\text{pl}}^1$	plastische Verschiebungsrate nach dem ersten Lastzyklus
$\lambda$	Neigungsbeiwert.

(3) Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) kann nach 13.7.2 näherungsweise nach Gleichung (13.12) und (13.13) in Verbindung mit Gleichung (D2.5) geführt werden.

### D2.1.3 Näherungsverfahren zur Berechnung des Pfahltragverhaltens bei zyklischer Belastung nach [66]

#### D2.1.3.1 Allgemeines

(1) Das hier vorgestellte Rechenverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit und zur Ermittlung der Verformungen axial zyklisch beanspruchter Pfähle ist detailliert in [66] beschrieben. Vergleiche des Verfahrens mit in situ-Versuchsergebnissen enthält [122].

(2) Das Verfahren liefert auf der Grundlage eines einfachen Ingenieurmodells den Wert der zyklischen Tragfähigkeitsminderung  $\Delta R_{zyk}$  und die axialen Verschiebungen vorh.  $s_k$  von axial zyklisch beanspruchten Pfählen in nichtbindigen Böden ober- und unterhalb des Grundwasserspiegels sowie in überkonsolidierten bindigen Böden.

(3) Das Verfahren berücksichtigt die Entfestigung am Pfahlmantel infolge einer Verdichtung des den Pfahl umgebenden Bodens unter zyklischer Scherbeanspruchung.

(4) Infolge der zyklischen Lastamplitude  $F'_{zyk}$  der axial zyklischen Beanspruchung entstehen akkumulierte Verformungen, die sich aus einem Verformungsanteil infolge zyklischer Verdichtung und einem weiteren Anteil infolge zyklischen Kriechens zusammensetzen.

(5) Es wird vorausgesetzt, dass der Pfahl durch ein äquivalentes Ein-Stufen-Kollektiv im Sinne von D4.1.1 beansprucht wird, wobei die mittlere Einwirkung nicht Null sein darf.

(6) Zur Berechnung der Gesamtverschiebungen werden Scherdehnungen  $\gamma$  am Pfahlmantel infolge der mittleren Belastung  $F_{mitt}$  und der zyklischen Lastamplitude  $F'_{zyk}$  addiert.

(7) Die Pfahlverschiebungen werden aus den Gesamtscherdehnungen  $\gamma_{ges}$  unter Ansatz der Reichweitenabschätzung nach [15] berechnet.

(8) Die Aufteilung des Pfahlwiderstandes infolge der zyklischen Beanspruchung auf einzelne Abschnitte am Pfahlmantel und am Pfahlfuß erfolgt iterativ über die Bedingung gleicher getrennt ermittelter Verschiebungen, indem zunächst die jeweiligen Anteile vorgeschätzt werden und die Verschiebungen gemäß D2.1.3.3 berechnet werden. Die Einwirkungsverteilung wird dann solange iterativ angepasst, bis alle Mantelelemente sowie das Pfahlfußelement nach der zyklischen Belastung die gleiche Verschiebung erfahren.

### D2.1.3.2 Pfahlwiderstand im Grenzzustand der Tragfähigkeit

(1) Die Minderung der Grenzmantelreibung am Pfahlmantel infolge zyklischer Verdichtung nichtbindiger Böden kann durch folgende Gleichung ermittelt werden:

$$\Delta\tau(N) = 2 \cdot G_w \cdot \tan \delta \cdot \Delta D^* \cdot \left( \gamma_{zyk} \cdot \left( \frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \gamma_{grenz} \left[ \left( \frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} \right)^2 - 1 \right] \right) \quad (D2.6)$$

mit

$$\gamma_{zyk} = \tau_{zyk} / G_{zyk}$$

und

$$\Delta D^* = \Delta D \cdot \log(N+1) = 0,5 \cdot I_d^{-2,32} \cdot \log(N+1) \quad (D2.7)$$

mit

N	Zyklenanzahl
$G_w$	Schubmodul bei Wiederbelastung
$\delta$	aktivierter Wandreibungswinkel
$I_D$	initiale Lagerungsdichte
$\gamma_{zyk}$	zyklische Scherdehnung
$\tau_{zyk}$	zyklische Schubspannung
$G_{zyk}$	Schubmodul für zyklische Belastung, abhängig von $\gamma_{zyk}$ , siehe [18]
$\gamma_{grenz}$	Grenzscherdehnung
$\alpha$	Dilatationsparameter.

(2) Dabei können für die einzelnen Größen entweder Erfahrungswerte oder Ergebnisse von Laborversuchen herangezogen werden, siehe z. B. D2.2.3.

(3) Die zyklische Tragfähigkeitsreduktion ergibt sich aus der Minderung der Grenzmantelreibung  $\Delta\tau(N)$  multipliziert mit der Pfahlmantelfläche  $A_m$  zu

$$\Delta R_{zyk} = \Delta\tau(N) \cdot A_m \quad (D2.8)$$

(4) Für den Nachweis der Tragfähigkeit nach Gl. (13.8) bzw. (13.9) ist der Modellfaktor nach derzeitigem Kenntnisstand zu  $\eta_{zyk} = 1,20$  zu wählen.

### D2.1.3.3 Verschiebungsakkumulation im Gebrauchszustand

(1) Die Scherdehnung aus zyklischer Verdichtung, d. h. aus der Abnahme der Grenzschubspannung und damit der Erhöhung des Ausnutzungsgrades, errechnet sich zu

$${}_1\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 \quad (D2.9)$$

mit

$$\gamma_2 = \frac{\kappa_2}{1 - \kappa_2/c} \cdot \gamma_r \quad (D2.10)$$

$$\gamma_1 = \frac{\kappa_1}{1 - \kappa_1/c} \cdot \gamma_r \quad (D2.11)$$

und den Lastniveaus  $\kappa_1$  und  $\kappa_2$

$$\kappa_1 = (\tau_{mitt} + \tau_{zyk}) / \tau_{ult} \quad (D2.12)$$

$$\kappa_2 = (\tau_{mitt} + \tau_{zyk}) / \tau_{ult}(N) = (\tau_{mitt} + \tau_{zyk}) / (\tau_{ult} - \Delta\tau(N)) \quad (D2.13)$$

und

- $\tau_{\text{mitt}}$  mittlere Schubspannung
- $\tau_{\text{zyk}}$  zyklische Schubspannungsamplitude
- $\tau_{\text{ult}}$  der Grenzscherubspannung (entspricht  $q_{s,k}$ )
- $c$  Krümmung der Hystereseschleife.

Die Bedeutung der Indizes 1 und 2 ist im Beispiel D2.2.3 erläutert.

(2) Die Scherdehnung aus zyklischem Kriechen errechnet sich zu

$${}_2\Delta\gamma = {}_2\Delta\gamma_1 \cdot (1 + \zeta \cdot \ln(N)) \quad (\text{D2.14})$$

mit

$${}_2\Delta\gamma_1 = \gamma_r \left[ \frac{\kappa_1}{1 - \kappa_1/c} - \frac{\kappa_1}{1 + \kappa_1/c} \right]$$

und

$$\gamma_r = \tau_{\text{ult}} / G_{\text{max}}$$

mit

$\zeta$  Beruhigungskonstante.

(3) Damit ergeben sich die Pfahlverschiebungen infolge charakteristischer zyklischer Einwirkungen zu

$$s_{\text{zyk},k} = ({}_1\Delta\gamma + {}_2\Delta\gamma) \cdot r_0 \cdot \ln(r_m / r_0) \quad (\text{D2.15})$$

mit

$$r_m = 2,5 \cdot L \cdot (1 - \nu) \quad (\text{D2.16})$$

mit

- $r_0$  Pfahlradius
- $L$  Einbindelänge
- $\nu$  Querdehnzahl des Bodens.

(4) Mit Gl. (D2.17) ergeben sich die Gesamtverschiebungen zu

$$\text{vorh. } s_k = s_{G,k} + s_{Q,k} + s_{\text{zyk},k} \quad (\text{D2.17})$$

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit kann dann mit Gl. (13.12) geführt werden.

#### **D2.1.4 Näherungsverfahren zur Berechnung des Pfahltragverhaltens bei zyklischer Belastung nach [142]**

(1) Das nachfolgend beschriebene Berechnungsmodell ZYKLAX [142], [144] dient der näherungsweise Ermittlung des statischen, zyklischen und post-

zyklischen Pfahltragverhaltens. Das Berechnungsmodell liefert sowohl den Wert der Änderung (Zu- oder Abnahme) der Pfahltragfähigkeit  $\Delta R_{\text{zyk}}$  als auch die plastische Verschiebung  $s_{\text{pl}} = s_{\text{zyk}}$  nach  $N$  Lastzyklen sowie eine vollständige statische und zyklische Widerstands-Setzungs-Linie analog zu Bild 13.7 oder Widerstands-Hebungs-Linie, womit sich die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit nach 13.7.1 bzw. 13.7.2 führen lassen.

(2) Es wird vorausgesetzt, dass der Pfahl durch ein äquivalentes Ein-Stufen-Kollektiv im Sinne von D4.1.1 beansprucht wird.

(3) Die verwendeten Berechnungsansätze betrachten den Pfahlmantel und Pfahlfuß zunächst separat. Das statische Tragverhalten wird durch analytische Ansätze nach [32] und [71] modelliert. Die zyklischen Berechnungsansätze erweitern die statischen Ansätze unter Verwendung modifizierter *Masing*-Regeln [89]. Zur Berücksichtigung mehrerer Bodenschichten wurde ein auf dem Lastabtragungsansatz [16] basierendes Berechnungsprogramm entwickelt. Für eine Berechnung des Pfahltragverhaltens im homogenen Boden kann die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise angewendet werden. Andernfalls kann der in [142] beschriebene Quellcode verwendet werden, wo auch ausführlicher auf das Berechnungsmodell eingegangen wird.

(4) Der Ansatz von [32] wird zur Modellierung der Verschiebung des Pfahlmantels  $s_s$  bei Erstbelastung des Pfahls und bei post-zyklischer Belastung verwendet:

$$s_s = \frac{\tau_0 \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \ln \left( \frac{\left( \frac{r_m}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{ult}} \right)^{g_s}}{1 - R_{fs} \left( \frac{\tau_0}{\tau_{ult}} \right)^{g_s}} \right) \quad (\text{D2.18})$$

mit

$\tau_0$	Schubspannung am Pfahlmantel
$\tau_{ult}$	Pfahlmantelreibung im Bruchzustand ( $q_s$ )
$G_0$	Schubmodul bei kleinen Dehnungen
$r_0$	Pfahlradius
$r_m$	Einflussradius nach Gl. (D2.20)
$R_{fs}$	empirischer Modellparameter
$g_s$	empirischer Modellparameter.

(5) Die Verschiebung des Pfahlfußes unter statischer, zyklischer und post-zyklischer Belastung wird auf Grundlage des Ansatzes von [71] modelliert, wobei der Ansatz durch einen Parameter  $g_b$  erweitert wird:

$$s_b = \frac{R_b \cdot (1 - \nu)}{4 \cdot G_0 \cdot r_0 \cdot \left( 1 - R_{fb} \cdot \left( \frac{R_b}{R_{b,ult}} \right)^{g_b} \right)} \quad (\text{D2.19})$$



mit

- $R_b$  Pfahlfußwiderstand
- $R_{fb}$  empirischer Modellparameter
- $g_b$  empirischer Modellparameter
- $R_{b,ult}$  Pfahlfußwiderstand im Bruchzustand
- $\nu$  Querdehnzahl.

(6) Für den Einflussradius  $r_m$  bei Erstbelastung wird abweichend vom Vorschlag von [120] folgender Ansatz gewählt:

$$r_m = D \quad (D2.20)$$

mit

$D$  Pfahldurchmesser .

(7) Die zyklische Belastung wird durch eine Ent- und Wiederbelastungskurve beschrieben, die auf Grundlage der Regeln von [89] modelliert wird. Die Regeln werden durch die Modellparameter  $\kappa$ ,  $\delta_N$ ,  $\beta_N$  und  $r_m$  erweitert. Die Last-Verschiebungs-Beziehung des Pfahlmantels kann dann bei Entlastung des Pfahls durch

$$s_{s,E}(N) = s_{max} + \frac{(\tau_0 - \tau_{max}) \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{r_m}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{max}|}{\kappa \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}}{1 - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{max}|}{\kappa \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}} \right) \quad (D2.21)$$

mit

- $s_{s,E}(N)$  Verschiebung des Pfahlmantels bei Entlastung im Lastzyklus  $N$
- $s_{max}$  Verschiebung des Pfahlmantels zu Beginn der Entlastung bei  $F = F_{max}$
- $\tau_{max}$  Schubspannung zu Beginn der Entlastung bei  $F = F_{max}$
- $\kappa$  Modellparameter zur Beschreibung der Form der Hysterese
- $\beta_N$  Modellparameter zur Beschreibung der Änderung der Pfahltragfähigkeit

beschrieben werden und bei Wiederbelastung des Pfahls durch

$$s_{s,W}(N) = s_{min} + \frac{(\tau_0 - \tau_{min}) \cdot r_0}{G_0 \cdot g_s} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{r_m}{r_0} \right)^{g_s} - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{min}|}{\kappa \cdot \delta_N \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}}{1 - R_{fs} \cdot \left( \frac{|\tau_0 - \tau_{min}|}{\kappa \cdot \delta_N \cdot \beta_N \cdot \tau_{ult}} \right)^{g_s}} \right) \quad (D2.22)$$

mit

- $s_{s,w}(N)$  Verschiebung des Pfahlmantels bei Wiederbelastung im Lastzyklus  $N$
- $s_{\min}$  Verschiebung des Pfahlelements zu Beginn der Wiederbelastung bei  $F = F_{\max}$
- $\tau_{\min}$  Schubspannung zu Beginn der Wiederbelastung bei  $F = F_{\min}$
- $\delta_N$  Modellparameter zur Beschreibung der Akkumulation der plastischen Verschiebung.

Die Minderung oder Steigerung der Pfahltragfähigkeit wird mit Hilfe des Parameters  $\beta_N$  in Gl. (D2.22) ermöglicht, der den Bruchwert der Scherfestigkeit des Bodens bzw. der Pfahlmantelreibung verändert. Dieser Parameter wird in Anlehnung an den Ansatz von [91] wie folgt bestimmt:

$$\beta_N = (1 - \dot{\beta}) \cdot (\beta_{N-1} - \beta_{\lim}) + \beta_{\lim} \quad \text{für } N > 1 \quad (\text{D2.23})$$

$$\beta_N = 1.0 \quad \text{für } N = 1 \quad (\text{D2.24})$$

mit

- $\beta_{N-1}$  Änderungsfaktor im vorherigen Lastzyklus
- $\beta_{\lim}$  unterer bzw. oberer Grenzwert für den Änderungsfaktor
- $\dot{\beta}$  Abminderungsrate.

Die Änderung des Bruchwertes der Scherfestigkeit bzw. der Bruchwert der Pfahlmantelreibung während der zyklischen Belastung wird durch den Parameter  $\beta_{\lim}$  festgelegt. Der Parameter  $\dot{\beta}$  bestimmt, innerhalb wie vieler Lastzyklen der Grenzwert  $\beta_{\lim}$  erreicht wird.

Die Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahlmantels bei abnehmender Verschiebungsrate wird in Gl. (D2.22) durch den Parameter  $\delta_N$  beschrieben, der den Sekantenmodul bei Wiederbelastung des Pfahls wie folgt verändert:

$$\delta_N = 1 - \frac{1}{a \cdot N^b} \quad (\text{D2.25})$$

mit

- $a, b$  empirische Modellparameter.

Sofern eine progressive Zunahme der Verschiebungsrate modelliert werden soll, kann dieses Verhalten durch folgenden Ansatz berücksichtigt werden:

$$\delta_N = \delta_{N-1} \cdot \left(1 + \frac{1}{c}\right)^N \quad \text{für } N > 1 \quad (\text{D2.26})$$

mit

$\delta_{N-1}$  Wert von  $\delta_N$  im vorherigen Lastzyklus  
 $c$  empirischer Modellparameter.

(8) Eine Umkehr der Verschiebungsrate nach  $N$  Lastzyklen kann durch das Grenzkriterium für das maximale Lastniveau  $X_{\text{grenz}}$  gemäß Gl. (D2.27) berücksichtigt werden.

$$X_{\text{max}}(N) = \frac{F_{\text{max}}}{\beta_N \cdot R_{\text{ult}}} > X_{\text{grenz}} \quad (\text{D2.27})$$

mit

$\beta_N$  Modellparameter nach Gl. (D2.23)

(9) Das Berechnungsmodell ermöglicht weiterhin, einen lastzyklen-abhängigen Einflussradius zu modellieren. Dies kann in nichtbindigen Böden sinnvoll sein, wie die Modellversuche zum Bodenverhalten in [142] zeigen.

$$r_{m,N} = (1 - \dot{r}_m) \cdot (r_{m,N-1} - r_{m,\text{lim}}) + r_{m,\text{lim}} \quad \text{für } N > 1 \quad (\text{D2.28})$$

$$r_{m,N} = D \quad \text{für } N = 1 \quad (\text{D2.29})$$

mit

$r_{m,N-1}$  Einflussradius im vorherigen Lastzyklus  
 $r_{m,\text{lim}}$  oberer Grenzwert für den Einflussradius  
 $\dot{r}_m$  Zuwachsrate

Für den Einflussradius im ersten Lastzyklus kann der statische Ansatz nach Gl. (D2.20) verwendet werden. In bindigen und gemischtkörnigen Böden sollte ebenfalls der statische Ansatz verwendet werden.

(10) Die in den Ansätzen benötigten Modellparameter sind in optimaler Weise aus statischen und zyklischen Pfahlprobebelastungen abzuleiten. Dabei sollten die statischen Modellparameter zunächst an statischen Pfahlprobebelastungen kalibriert werden und anschließend in die zyklische Berechnung unverändert übernommen werden.

Anhaltswerte für die zyklischen Modellparameter enthält Tabelle D2.1. Aus Modellversuchen und Pfahlprobebelastungen abgeleitete Anhaltswerte für die statischen Modellparameter werden im Folgenden angegeben: Bei den Untersuchungen in [142] haben sich für die Parameter  $R_{\text{fs}}$  und  $R_{\text{fb}}$  Werte im Bereich von 0,97 bis 1,00 als geeignet erwiesen. Dabei wurden die Parameter  $g_{\text{s}}$  und  $g_{\text{b}}$  im Bereich von 0,01 bis 0,30 angesetzt. Weitere Hinweise zur Ermittlung der Modellparameter finden sich in [142].

(11) Es wird erwartet, dass mit zunehmender Anwendungserfahrung die Modellparameter näherungsweise auch aus geeigneten zyklischen Scherversuchen abgeleitet werden können.

**Tabelle D2.1** Anhaltswerte für die zyklischen Modellparameter, abgeleitet in [142] aus Modellversuchen

a [-]	b [-]	c [-]	$\kappa$ [-]	$\beta_{lim}$ [-]	$\hat{\beta}$ [-]	$r_{m,lim}$ [m]	$\hat{r}_m$ [-]
1,40 bis 15	0,40 bis 2,00	500 bis 5.000	0,70 bis 2,00	0,50 bis 1,30	0,001 bis 0,010	D bis 3 D	0,001 bis 0,010

## D2.2 Berechnungsbeispiele

### D2.2.1 Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit auf der Grundlage von Interaktionsdiagrammen nach D2.1.1

Als Beispiel dient ein zyklisch auf Zug belasteter Stahlbetonrammpfahl ( $\varnothing$  0,46 m) mit einer Länge von 19,0 m. Aufgrund von Probelastungen kann die statische Grenztragfähigkeit des in den nichtbindigen Baugrund einbindenden Pfahls mit  $R_{ult} = (R_{t,m})_{mitt} = 2.500$  kN angenommen werden. Es sollen drei statische Pfahlprobelastungen ausgeführt worden sein, so dass nach Handbuch EC 7-1 [44] der charakteristische Zugpfahlwiderstand  $R_{t,k} = (R_{t,m})_{mitt} / \xi_1 = 2.500 / 1,15 = 2.174$  kN vorliegt.  $(R_{t,m})_{min}$  soll hier nicht maßgebend sein.

Der Pfahl wird mit einer Zugschwelllast beaufschlagt. Diese beträgt  $F_{mitt} = 700$  kN (mittlere Einwirkung angenommen als ständige Einwirkung) und  $F'_{zyk} = 700$  kN (zyklische Lastamplitude). Der Pfahl wird mit einer Zyklenanzahl von  $N = 200$  belastet.

Zunächst ist zu prüfen, ob die vorliegende zyklische Belastung eine gesonderte Untersuchung erforderlich macht:

$$\frac{F'_{zyk}}{R_{ult}} = \frac{700}{2.500} = 0,28 > 0,10$$

Somit muss nach 13.4.2 (1) die zyklische Einwirkung berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Beispiel erfolgt der Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit auf Grundlage des in [67] vorgestellten Interaktionsdiagramms (Bild D2.2). Für  $X_{mitt} = X_{zyk} = 0,28$  ergibt sich mit Hilfe von Gl. (D2.2) und Bild D2.1 ein Ausnutzungsgrad von  $\mu = 0,81$ . Die zu  $\mu = 1,0$  gehörige maximale Tragfähigkeitsreduktion ergibt sich nach Gl. (D2.3) zu  $0,31 R_{ult}$ . Die tatsächliche Tragfähigkeitsreduktion  $\Delta R_{zyk}$  beträgt gemäß Gl. (D2.4) somit 628 kN.

Die Grenzzustandsbedingung (ULS) ergibt sich gemäß 13.7.1 wie folgt:

$$F_{t,d} = F_{mitt} \cdot \gamma_G + F'_{zyk} \cdot \gamma_Q \leq R_{t,d}(N) = R_{t,d} - \eta_{zyk} \cdot \Delta R_{zyk} = \frac{R_{t,k}}{\gamma_{s,t}} - \eta_{zyk} \cdot \Delta R_{zyk}$$

Unter Ansatz der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_G = 1,35$ ,  $\gamma_Q = 1,50$ ,  $\gamma_{s,t} = 1,15$  und  $\eta_{zyk} = 1,20$  ergeben sich daraus folgende Ergebnisse:

$$F_{t,d} = 700 \cdot 1,35 + 700 \cdot 1,50 = 1.995,0 \text{ kN}$$

$$R_{t,d} = \frac{2.174}{1,15} - 1,20 \cdot 628 = 1.136,8 \text{ kN .}$$

Der Bemessungswert des Widerstands ist kleiner als der Bemessungswert der Einwirkungen von 1.995 kN, die Beanspruchung ist somit als unzulässig zu bewerten.

### D2.2.2 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit einem empirischen Verschiebungsansatz nach D2.1.2

In diesem Beispiel soll der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eines Stahlbetonrammpfahls (Durchmesser: 0,66 m, Länge: 15,0 m) im nichtbindigen Boden geführt werden, der durch Zugschwelllasten beansprucht wird. Es wird davon ausgegangen, dass das äquivalente Ein-Stufen-Kollektiv im Sinne von D4.1.1 bereits ermittelt wurde. Somit wird der Pfahl durch eine mittlere Einwirkung von  $F_{\text{mitt}} = 800 \text{ kN}$  und eine zyklische Lastamplitude von  $F'_{\text{zyk}} = 300 \text{ kN}$  mit einer äquivalenten Lastzyklenzahl von  $N_{\text{eq}} = 1.000$  belastet. Die zulässige Verschiebung des Pfahls soll zul.  $s_k = 3 \text{ cm}$  betragen.

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit gemäß Gl. (13.12) muss die Verschiebung des Pfahls nach  $N_{\text{eq}}$  Lastzyklen bekannt sein, die nach Gl. (D2.5) ermittelt werden kann. Dazu wird die Verschiebung und die Verschiebungsrate nach dem ersten Lastzyklus sowie der Neigungsbeiwert  $\lambda$  benötigt. Diese Werte können entweder aus einer zyklischen Pfahlprobelastung mit wenigen Lastzyklen ermittelt werden oder lassen sich alternativ aus einer statischen Pfahlprobelastung abschätzen, bei der der Pfahl bei  $F_{\text{max}}$  entlastet und bei  $F_{\text{min}}$  wiederbelastet wird.

In diesem Beispiel wurde eine statische Pfahlprobelastung auf Zug durchgeführt, bei der der Pfahl ent- und wiederbelastet wurde (Bild D2.3). Der Neigungsbeiwert  $\lambda$  wird gemäß D2.1.2 (2) zu 0,75 gewählt. Mit Hilfe der Widerstands-Hebungs-Linie des Pfahls (Bild D2.3) wird die zyklische Pfahlhebung nach 1.000 Lastzyklen gemäß Gl. (D2.5) wie folgt abgeschätzt:

$$s_{\text{zyk},k} = 0,45 + \frac{0,10}{1 - 0,75} \cdot (1000^{1-0,75} - 1) = 2,30 \text{ cm .}$$

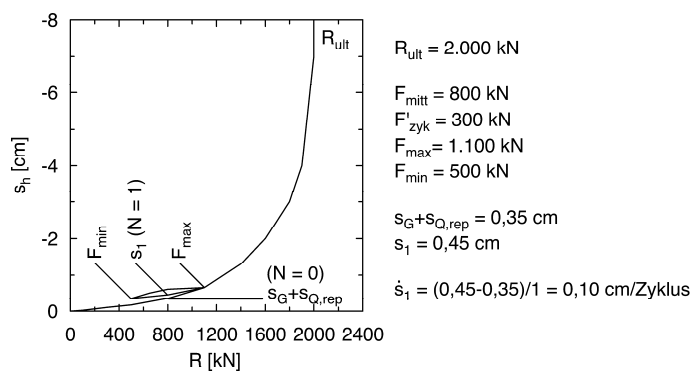
Die gesamte Pfahlhebung ergibt sich nach Gl. (13.13) unter Berücksichtigung der Hebungen aus ständigen und üblichen veränderlichen Einwirkungen zu

$$\text{vorh } s_{h,k} = s_G + s_{Q,\text{rep}} + s_{\text{zyk},k} = 0,35 + 2,30 = 2,65 \text{ cm .}$$

Der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann nun gemäß Gl. (13.12) geführt werden:

$$\text{vorh } s_k = 2,65 \text{ cm} < 3,00 \text{ cm} = \text{zul } s_k .$$

Somit ist der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach 1.000 Lastzyklen erfüllt.



**Bild D2.3** Parameterermittlung aus der Widerstands-Hebungs-Linie mit einem Entlastungszyklus einer statischen Pfahlprobebelastung

## D2.2.3 Beispiel für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit mit dem Verfahren nach D.2.1.3

### D2.2.3.1 Aufgabenstellung

Nachfolgend wird ein 20 m langer Pfahl im Hinblick auf seine Tragfähigkeit auf Zug und seine Verschiebungen unter asymmetrischer Zug-Wechselast mit dem analytischen Ansatz nach [66] untersucht. Dabei wird für die Handrechnung vereinfacht eine Schicht über die gesamte Pfahllänge angesetzt. Für die praktische Anwendung ist der Boden in mehrere Schichten zu unterteilen und die Tragfähigkeitsminderung unter der Bedingung gleicher Verschiebung infolge der zyklischen Belastung schichtbezogen zu ermitteln. Die zulässige Verschiebung sei  $\text{zul. } s_k = 2 \text{ cm}$ .

### D2.2.3.2 Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

Nachfolgende Tabelle enthält die Eingangswerte der Berechnung.

**Tabelle D2.2** Gewählte und abgeleitete Eingangswerte

Pfahllänge	$L = 20$	[m]
Pfahlradius	$r_o = 0,4$	[m]
axialer Pfahlwiderstand am Mantel aus Erfahrungswerten, so dass $R_{ult} = R_{t,k}$	$R_{ult} = 4.500$	[kN]
axialer Pfahlwiderstand am Fuß	$R_{b,k} = 0$	[kN]
Wandreibungswinkel des Bodens	$\varphi = 29$	[°]
bezogene Lagerungsdichte des Bodens	$I_o = 0,75$	[-]
Porenzahl des Bodens	$e = 0,45$	[-]
Verhältnis zwischen Wiederbelastungssteifigkeit und maximaler Steifigkeit des Bodens (aus Laborversuchen, z. B. aus ResCol-Versuch)	$\frac{G_W}{G_{max}} = 0,2$	[-]
Steifigkeitsverhältnis bei zugehörigen $\gamma_{zyk}$ und maximalem Schubmodul des Bodens (aus Laborversuchen, z. B. aus ResCol-Versuch)	$\frac{G_{zyk}}{G_{max}} = 0,4$	[-]
Querdehnzahl des Bodens	$\nu = 0,35$	[-]
Grenzscherdehnung, bei der keine Volumenveränderung mehr eintritt (aus Laborversuchen, z. B. aus ResCol-Versuch)	$\gamma_{grenz} = 2 \cdot 10^{-4}$	[-]
zyklischer Dilatationsparameter (aus Laborversuchen, z. B. Simple-Shear-Versuch)	$\alpha = 0,5$	[-]
Konstante zur Beschreibung der Krümmung der Hysterese der Erstbelastung (aus Laborversuchen, z. B. Simple-Shear-Versuchen oder $c_1 = 1,0$ nach [25])	$c_1 = 1,0$	[-]
Konstante zur Beschreibung der Krümmung der Hysterese in den nachfolgenden Lastzyklen (aus Laborversuchen, z. B. Simple-Shear-Versuchen oder $c_2 = 2,0$ nach [150])	$c_2 = 2,0$	[-]
Referenzscherdehnung (aus Laborversuchen, z. B. Simple-Shear-Versuchen)	$\gamma_r = 1 \cdot 10^{-3}$	[-]
Faktor für zyklisches Kriechen (aus Laborversuchen, z. B. Simple-Shear-Versuchen)	$\zeta = 2,0$	[-]
mittlere axiale Zugbelastung, hier angenommen: nur ständige Einwirkungen	$F_{mitt} = 600$	[kN]
zyklische Lastamplitude	$F'_{zyk} = 1.200$	[kN]
Zyklenzahl	$N = 1.000$	[-]

Die Berechnung der Tragfähigkeitsminderung am Pfählmantel infolge der zyklischen Belastung erfolgt, indem zunächst die Gesamtmantelreibung in einen zyklischen und einen statischen Anteil getrennt wird.

$$\tau_{\text{zyk}} = \frac{F'_{\text{zyk},s}}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot L} = \frac{1.200}{(2 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 20)} = 23,9 \text{ kN/m}^2 \quad \text{und}$$

$$\tau_{\text{mitt}} = \frac{F_{\text{mitt},s}}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot L} = \frac{600}{(2 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 20)} = 11,9 \text{ kN/m}^2$$

Die Grenzmantelreibung ergibt sich zu

$$\tau_{\text{ult},k} = \frac{R_{s,k}}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot L} = \frac{4.500}{(2 \cdot \pi \cdot 0,4 \cdot 20)} = 89,5 \text{ kN/m}^2.$$

Bestimmung eines für die zyklische Belastung repräsentativen Normalspannungszustands am Pfählmantel:

$$\sigma_0 = \frac{\tau_{\text{ult},k} + \tau_{s,k} \text{ (N)}}{2 \cdot \tan \varphi} = \frac{89,5 + (89,5 - 6,8)}{2 \cdot \tan 29^\circ} = 155,4 \text{ kN/m}^2$$

Bestimmung des maximalen Schubmoduls  $G_{\text{max}}$  (Formel aus [18] nicht einheitentreu):

$$G_{\text{max}} = 6,9 \cdot \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \cdot \sigma_0^{0,5} = 6,9 \cdot \frac{(2,17 - 0,45)^2}{1 + 0,45} \cdot 155,4^{0,5} \\ = 175.494 \text{ kN/m}^2$$

Berechnung der zyklischen Scherdehnung aus:

$$\gamma_{\text{zyk}} = \frac{\tau_{\text{zyk}}}{G_{\text{zyk}}} = \frac{23,9}{(0,4 \cdot 175.494)} = 3,4 \cdot 10^{-4}$$

Berechnung der aktivierten Wandreibung aus:

$$\tan \delta = \tan \varphi \cdot \frac{(F_{\text{mitt}} + F'_{\text{zyk}})}{(R_{s,k} - \Delta \tau_k \text{ (N)} \cdot \pi \cdot D \cdot L)} \\ = \tan 29^\circ \cdot \frac{(600 + 1.200)}{4.500 - 6,8 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 20} = 0,24$$



Berechnung der zyklischen Minderung der Grenzmantelreibung:

$$\Delta\tau_k(N) = 2 \cdot G_w \cdot \tan \delta \cdot \Delta D^* \cdot \left[ \gamma_{zyk} \cdot \left( \frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \gamma_{grenz} \left[ \left( \frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} \right)^2 - 1 \right] \right]$$

$$= \left[ 2 \cdot (0,2 \cdot 175,494) \cdot 0,24 \cdot 2,92 \cdot \left[ 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{3,4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \left[ \left( \frac{3,4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} \right)^2 - 1 \right] \right] \right]$$

$$= 6,8 \text{ kN/m}^2$$

mit

$$\Delta D^* = \Delta D \cdot \log(N+1) = 0,5 \cdot I_D^{-2,32} \cdot \log(N+1) = 0,5 \cdot 0,75^{-2,32} \cdot \log 1,001 = 2,92$$

Der charakteristische Ausnutzungsgrad ergibt sich zu

$$\mu_k = \frac{(F'_{zyk} + F_{mitt})}{(R_{s,k} - \Delta\tau_k(N) \cdot \pi \cdot D \cdot L)} = \frac{(1.200+600)}{(4.500 - 6,8 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 20)} = 0,43$$

Der Bemessungswert des Pfahlwiderstandes ergibt sich nach Gl. (13.9b)

$$R_{t,d}(N) = R_{t,d} - \eta_{zyk} \cdot \Delta R_{zyk}$$

$$= R_{t,k} / \gamma_{s,t} - \eta_{zyk} \cdot \Delta\tau(N) \cdot \pi \cdot D \cdot L$$

$$= 4.500 / 1,50 - 1,20 \cdot 6,8 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 20 = 2.590 \text{ kN}$$

$$\text{mit } \gamma_{s,t} = 1,50, \eta_{zyk} = 1,20$$

Der Bemessungswert der Einwirkung errechnet sich zu

$$F_d = F_{mitt} \cdot \gamma_G + F'_{zyk} \cdot \gamma_Q = 600 \cdot 1,35 + 1.200 \cdot 1,50 = 2.610 \text{ kN}$$

$$\text{mit } \gamma_G = 1,35, \gamma_Q = 1,50$$

Die Belastung ist knapp nicht zulässig und eine geringfügige Pfahlverlängerung wäre erforderlich.

### D2.2.3.3 Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Es wird die Berechnung der Verschiebungen am Pfahlmantel durchgeführt, der hier aus Gründen der Nachvollziehbarkeit des Beispiels nicht in einzelne Abschnitte unterteilt wird. Diese setzen sich aus Anteilen infolge zyklischer Verdichtung und zyklischem Kriechen zusammen. Die Berechnung der Scherdehnungen infolge zyklischer Verdichtung erfolgt, indem zunächst die verminderte Grenztragfähigkeit bestimmt wird:

$$\tau_{s,k}(N) = \tau_{ult} - \Delta\tau(N) = 89,5 - 6,8 = 82,7 \text{ kN/m}^2$$

mit

$\tau_{ult}$  charakteristische Bruchschubspannung am Pfahlmantel (entspricht  $q_s = q_{s,k}$ , hier aus Erfahrungswerten).

Die Ermittlung der Beanspruchungsniveaus  $\kappa_1$  und  $\kappa_2$  vor bzw. nach der zyklischen Beanspruchung errechnet sich aus:

$$\kappa_1 = \frac{(\tau_{zyk} + \tau_{mitt})}{\tau_{ult}} = \frac{(23,9 + 11,9)}{89,5} = 0,4$$

$$\kappa_2 = \frac{(\tau_{zyk} + \tau_{mitt})}{\tau_{s,k} (N)} = \frac{(23,9 + 11,9)}{82,7} = 0,433$$

mit

$\tau_{mitt}$  mittlere Schubbeanspruchung,  
 $\tau_{zyk}$  zyklische Schubbeanspruchung.

Berechnung der Scherdehnung aus Verdichtung

$${}_1 \Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 = (7,64 - 6,67) \cdot 10^{-4} = 9,7 \cdot 10^{-5}$$

mit

$$\gamma_2 = \frac{\kappa_2}{1 - \kappa_2 / c_1} \cdot \gamma_r = \left( \frac{0,433}{1 - \frac{0,433}{1}} \right) \cdot 10^{-3} = 7,64 \cdot 10^{-4}$$

und

$$\gamma_1 = \frac{\kappa_1}{1 - \kappa_1 / c_1} \cdot \gamma_r = \left( \frac{0,4}{1 - \frac{0,4}{1}} \right) \cdot 10^{-3} = 6,67 \cdot 10^{-4}$$

Die Berechnung der Scherdehnungen infolge zyklischen Kriechens wird getrennt über den ersten und die nachfolgenden Zyklen betrachtet.

Zyklisches Kriechen im ersten Zyklus:

$${}_2 \Delta\gamma = \gamma_r \left[ \frac{\kappa}{1 - \kappa / c_2} - \frac{\kappa}{1 + \kappa / c_2} \right] = 10^{-3} \left[ \left( \frac{0,4}{1 - \frac{0,4}{2}} - \frac{0,4}{1 + \frac{0,4}{2}} \right) \right] = 1,7 \cdot 10^{-4}$$

mit

$$\kappa = \frac{(F_{\text{mitt}} + F'_{\text{zyk}})}{R_{s,k}} = \frac{(600 + 1.200)}{4.500} = 0,4$$

Zyklisches Kriechen in den nachfolgenden Zyklen:

$${}_2 \Delta\gamma_{\text{zyk}} = {}_2 \Delta\gamma (1 + \zeta \cdot \ln N) = 1,7 \cdot 10^{-4} (1 + 2,0 \cdot \ln 1.000) = 2,5 \cdot 10^{-3}$$

Zur Berechnung der Gesamtverformungen werden hier ergänzend die Scherdehnungen unter der statischen Gesamtlast berechnet. Alternativ können hier auch Ergebnisse von Probelastungen zur Ermittlung von  $s_{\text{stat}}$  verwendet werden.

$$\gamma_{\text{stat}} = \frac{(\tau_{\text{zyk}} + \tau_{\text{mitt}})}{G_{\text{stat}}} = \frac{(23,9 + 11,9)}{21.057} = 1,7 \cdot 10^{-3}$$

Mit

$$G_{\text{statisch}} = 21.057 \text{ kN/m}^2 \text{ aus Hyperbelfunktion}$$

und

$$r_m = 2,5 \cdot L (1 - \nu) = 2,5 \cdot 20 (1 - 0,35) = 32,5 \text{ m}$$

ergeben sich die Gesamtverschiebungen aus der Summation der einzelnen Verformungsanteile:

$$\begin{aligned} s_{\text{ges}} &= ({}_1 \Delta\gamma + {}_2 \Delta\gamma_{\text{zyk}} + \gamma_{\text{stat}}) \cdot r_0 \cdot \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \\ &= (9,7 \cdot 10^{-5} + 2,5 \cdot 10^{-3} + 1,7 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,4 \ln\left(\frac{32,5}{0,4}\right) \\ s_{\text{ges}} &= 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 7,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Der Nachweis für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit erfolgt nach Gl. (13.12).

$$\text{vorh } s_k = 0,8 \text{ cm} < 2,0 \text{ cm} = \text{zul } s_k$$

Damit ist der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach 1.000 Lastzyklen erfüllt.

## **D2.2.4 Beispiel für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit mit dem Verfahren nach D2.1.4**

### **D2.2.4.1 Aufgabenstellung**

In diesen Beispielen sollen die Standsicherheitsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit eines zyklisch axial belasteten Bohrpfahls (Durchmesser: 1,20 m, Länge: 8,50 m) im nichtbindigen Boden nach [142] geführt werden.

Es wird davon ausgegangen, dass das äquivalente Ein-Stufen-Kollektiv im Sinne von D4.1.1 bereits ermittelt wurde und die maximale Einwirkung  $F_{\max}$  nicht größer als  $(F_{\text{mitt}} + F'_{\text{zyk}})_{\text{eq}}$  ist. Folgende Belastungssituationen werden betrachtet:

- a) Der Pfahl wird durch eine statische Grundlast auf Druck von  $F_G = 400$  kN und eine zyklische Lastspanne von  $F_{\text{zyk,eq}} = 1.200$  kN entsprechend Lastsituation 3 in Bild 13.3, jedoch ohne repräsentative veränderliche Einwirkungen, beansprucht. Die äquivalente Lastzyklenzahl sei  $N_{\text{eq}} = 500$ .
- b) Der Pfahl wird durch eine statische Grundlast auf Zug von  $F_G = 200$  kN und eine zyklische Lastspanne von  $F_{\text{zyk,eq}} = 600$  kN entsprechend Lastsituation 1 in Bild 13.3, ebenfalls ohne repräsentative veränderliche Einwirkungen, beansprucht. Die äquivalente Lastzyklenzahl sei  $N_{\text{eq}} = 100$ .

Die zulässige Verschiebung des Pfahls soll in beiden Belastungssituationen 3 cm betragen.

### **D2.2.4.2 Berechnung von Teilaufgabe a) (Druckschwelllast)**

Das statische Pfahltragverhalten wurde in einer statischen Pfahlprobebelastung [154] ermittelt (Bild D2.4). Die Grenztragfähigkeit beträgt demnach etwa  $R_{\text{ult}} = R_{\text{c,m}} = 4.600$  kN. Für die statische Berechnung mit ZYKLAX wurde der Modellparameter  $q_{\text{s,ult}}$  aus dem Pfahlmantelwiderstand und der Parameter  $q_{\text{b,ult}}$  mit dem Hyperbelverfahren [123] ermittelt. Der Schubmodul  $G_0$  wurde aufgrund der Angaben in [154] geschätzt. Die Parameter  $g_s$  und  $g_b$  sind an der statischen Pfahlprobebelastung kalibriert, d. h. derart gewählt, dass die berechneten und gemessenen Widerstands-Setzungs-Linien näherungsweise übereinstimmen.

Zur Ermittlung des zyklischen Pfahltragverhaltens mit dem Modell ZYKLAX werden zyklische Modellparameter benötigt, die optimaler Weise aus zyklischen Pfahlprobebelastungen ermittelt werden. Die statischen Modellparameter werden unverändert aus der statischen Berechnung übernommen. Da keine zyklische Pfahlprobebelastung in diesem Beispiel vorliegt, werden die benötigten Modellparameter abgeschätzt. Als Anhaltswerte werden dazu die in Tabelle D2.1 angegebenen Werte herangezogen, die in [142] ermittelt wurden. Die Tabellen D2.3 und D2.4 enthalten die in diesem Beispiel angesetzten Modellparameter.

**Tabelle D2.3** Modellparameter bei statischer Berechnung

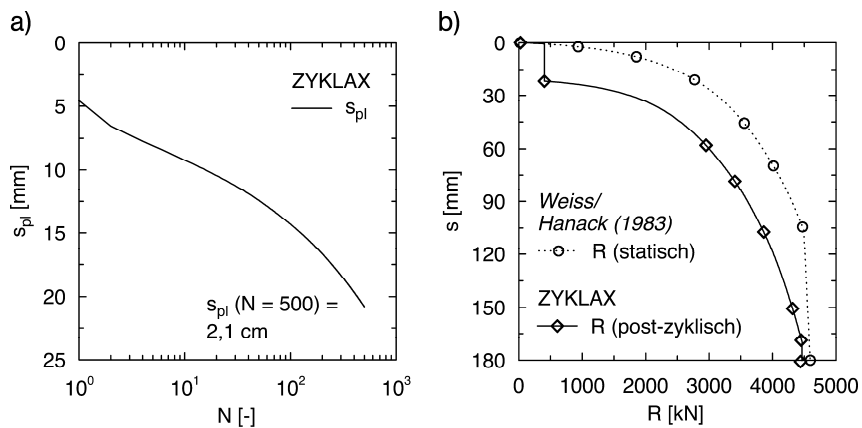
$q_{s,ult}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{b,ult}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$g_s$ [-]	$g_b$ [-]	$r_0$ [m]	$L$ [m]
62,4	7.500	120.000	0,020	0,058	0,60	8,5

**Tabelle D2.4** Modellparameter bei zyklischer Berechnung

$a$ [-]	$b$ [-]	$\kappa$ [-]	$\beta_{lim}$ [-]	$\dot{\beta}$ [-]
1,4	0,75	1,5	0,86	0,010

Die mit ZYKLAX berechnete plastische Verschiebung nach 500 Lastzyklen beträgt  $s_{pl} = 2,1$  cm (Bild D2.4a). Die Grenztragfähigkeit nach der zyklischen Belastung ergibt sich zu  $R_{ult}(N) = 4.470$  kN (Bild D2.4b). Die Abnahme der Pfahltragfähigkeit infolge der zyklischen Belastung beträgt somit  $\Delta R_{zyk} = 130$  kN.

Mit diesen Werten können die Standsicherheitsnachweise gemäß 13.7.1 und 13.7.2 geführt werden (D2.2.4.4 und D2.2.4.5).



**Bild D2.4** Mit ZYKLAX ermitteltes Pfahltragverhalten, a) plastische Verschiebung des Pfahls, b) post-zyklisches Pfahltragverhalten

### D2.2.4.3 Berechnung von Teilaufgabe b) (Zugschwelllast)

Die statische Grenztragfähigkeit wurde in einer Zugpfahlprobelastung zu  $R_{ult} = R_{t,m} = 1.800 \text{ kN}$  bestimmt, das entspricht einem Bruchwert der Mantelreibung von  $\tau_{ult} = 56,2 \text{ kN/m}^2$ . Das zyklische Pfahltragverhalten wird nun mit Hilfe der Formeln nach D2.1.4 ermittelt.

Dazu werden die statischen Modellparameter aus Tabelle D2.4 übernommen. Die Verschiebung des Pfahls infolge der statischen Belastung ( $F_G = 200 \text{ kN}$ , also  $\tau_0 = 6,2 \text{ kN/m}^2$ ) berechnet sich gemäß Gl. (D2.18) zu

$$s_s = \frac{6,2 \cdot 0,6}{120.000 \cdot 0,02} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{1,2}{0,6} \right)^{0,02} - 0,99 \cdot \left( \frac{6,2}{56,2} \right)^{0,02}}{1 - 0,99 \cdot \left( \frac{6,2}{56,2} \right)^{0,02}} \right) = 0,00036 \text{ m}$$

Zur Berechnung des ersten Lastzyklus werden zunächst der Parameter  $\delta_N$  nach Gl. (D2.25) ermittelt sowie der Parameter  $\beta_N$  nach Gl. (D2.24) angesetzt. Die benötigten zyklischen Modellparameter können aus Tabelle D2.4 übernommen werden. Anschließend wird durch Anwendung von Gl. (D2.22) die Verschiebung bei  $F_{max} = 800 \text{ kN}$ , also  $\tau_0 = 25,0 \text{ kN/m}^2$ , berechnet:

$$s_{s,w}(1) = 0,00036 + \frac{(25,0 - 6,2) \cdot 0,6}{120.000 \cdot 0,02} \times \ln \left( \frac{\left( \frac{1,2}{0,6} \right)^{0,02} - 0,99 \cdot \left( \frac{|25,0 - 6,2|}{1,5 \cdot 0,29 \cdot 1,0 \cdot 56,2} \right)^{0,02}}{1 - 0,99 \cdot \left( \frac{|25,0 - 6,2|}{1,5 \cdot 0,29 \cdot 1,0 \cdot 56,2} \right)^{0,02}} \right)$$

$$s_{s,w}(1) = 0,0034 \text{ m}$$

Dann kann durch Anwendung von Gl. (D2.21) die Verschiebung des Pfahls (Pfahlmantels) nach dem ersten Lastzyklus bei  $F_{min} = F_G = 200 \text{ kN}$  ermittelt werden:

$$s_{s,E}(1) = 0,0034 + \frac{(6,2 - 25,0) \cdot 0,6}{120.000 \cdot 0,02} \times \ln \left( \frac{\left( \frac{1,2}{0,6} \right)^{0,02} - 0,99 \cdot \left( \frac{|6,2 - 25,0|}{1,5 \cdot 1,0 \cdot 56,2} \right)^{0,02}}{1 - 0,99 \cdot \left( \frac{|6,2 - 25,0|}{1,5 \cdot 1,0 \cdot 56,2} \right)^{0,02}} \right)$$

$$s_{s,E}(1) = 0,0020 \text{ m}$$

Die Verschiebung des Pfahls nach dem ersten Lastzyklus beträgt somit 2,0 mm.

Durch wiederholte Anwendung von Gl. (D2.21) und (D2.22) in Verbindung mit Gl. (D2.23) und (D2.25) kann für jeden weiteren Lastzyklus die Verschiebung des Pfahls analog bestimmt werden. Auf diese Weise wird eine Verschiebung von etwa 5,0 mm nach 100 Lastzyklen ermittelt.

Die Abnahme der Pfahltragfähigkeit nach 100 Lastzyklen wird mit dem Parameter  $\beta_N$  gemäß Gl. (D2.23) berechnet:

$$\beta_{100} = (1 - 0,010) \cdot (0,912 - 0,860) + 0,860 = 0,91.$$

Der infolge Zyklik verminderte Bruchwert der Pfahlmantelreibung beträgt dann

$$\tau_{ult}(100) = \tau_{ult} \cdot \beta_{100} = 56,2 \cdot 0,91 = 51,1 \text{ kN/m}^2.$$

Daraus ergibt sich ein Pfahlwiderstand nach 100 Lastzyklen von  $R_{ult}(100) = 1.637,5 \text{ kN}$  und somit eine Minderung der Pfahltragfähigkeit von

$$\Delta R_{zyk} = R_{ult} - R_{ult}(100) = 1.800 - 1.637,5 = 162,5 \text{ kN}.$$

Mit Kenntnis der Minderung der Pfahltragfähigkeit und der Verschiebung des Pfahls nach 100 Lastzyklen können nachfolgend die Standsicherheitsnachweise gemäß 13.7.1 und 13.7.2 geführt werden.

#### **D2.2.4.4 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit**

Der Bemessungswert der Einwirkungen berechnet sich mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$  aus Handbuch EC 7-1 [44] gemäß Gl. (13.7) für Teilaufgabe a) (Druckschwellbelastung) zu

$$F_d = F_G \cdot \gamma_G + \lambda \cdot F'_{zyk} \cdot \gamma_Q = 400 \cdot 1,35 + 2 \cdot 600 \cdot 1,50 = 2.340,0 \text{ kN}$$

und für Teilaufgabe b) (Zugschwellbelastung) zu

$$F_t = F_G \cdot \gamma_G + \lambda \cdot F'_{zyk} \cdot \gamma_Q = 200 \cdot 1,35 + 2 \cdot 300 \cdot 1,50 = 1.170,0 \text{ kN}.$$

Der charakteristische Pfahlwiderstand  $R_{c,k}$  bzw.  $R_{t,k}$  unter statischer Belastung kann mit dem Streuungsfaktor  $\xi_2$  gemäß Handbuch EC 7-1 [44] ermittelt werden:

$$R_{c,k} = R_{ult} / \xi_2 = R_{c,m} / \xi_2 = 4.600 / 1,35 = 3.407,4 \text{ kN}$$

bzw.

$$R_{t,k} = R_{ult} / \xi_2 = R_{t,m} / \xi_2 = 1.800 / 1,35 = 1.333,3 \text{ kN}.$$

Damit kann der Bemessungswert des Pfahlwiderstands im Grenzzustand der Tragfähigkeit  $R_{c,d}$  (N) bzw.  $R_{t,d}$  (N) nach Gl. (13.9a) bzw. (13.9b) mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_t$  bzw.  $\gamma_{s,t}$  und dem hier gewählten Modellfaktor von  $\eta_{zyk} = 1,20$  berechnet werden:

$$R_{c,d} \text{ (N)} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} - \eta_{zyk} \cdot \Delta R_{zyk} = \frac{3.407,4}{1,10} - 1,20 \cdot 130 = 2.941,6 \text{ kN}$$

bzw.

$$R_{t,d} \text{ (N)} = \frac{R_{t,k}}{\gamma_{s,t}} - \eta_{zyk} \cdot \Delta R_{zyk} = \frac{1.333,3}{1,15} - 1,20 \cdot 162,5 = 964,4 \text{ kN}.$$

Mit den Bemessungswerten der Einwirkung und des Pfahlwiderstands kann nun der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß Gl. (13.11a) bzw. (13.11b) geführt werden:

$$F_{c,d} = 2.340,0 \text{ kN} < 2.941,6 \text{ kN} = R_{c,d} \text{ (N)}$$

bzw.

$$F_{t,d} = 1.170,0 \text{ kN} > 964,4 \text{ kN} = R_{t,d} \text{ (N)}.$$

Somit ist der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Belastungssituation nach Teilaufgabe a) erfüllt. Zusätzlich zum Nachweis mit dem äquivalenten Ein-Stufen-Kollektiv ist der Nachweis der Tragfähigkeit gegen die Maximallast zu führen. Der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Belastung nach Teilaufgabe b) ist hingegen nicht erfüllt. Um die Standsicherheit in diesem Fall nachzuweisen, könnte entweder die Pfahllänge oder der Pfahldurchmesser vergrößert werden.

#### D2.2.4.5 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

In D2.2.4.2 und D2.2.4.3 wurde die plastische Verschiebung des Pfahls nach 500 bzw. 100 Lastzyklen zu  $s_k = s_{pl,k} = 2,1 \text{ cm}$  bzw.  $s_{h,k} = s_{pl,k} = 0,5 \text{ cm}$  ermittelt. Die zulässige Verschiebung beträgt gemäß Aufgabenstellung jeweils zu  $s_k = 3,0 \text{ cm}$ .

Der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann nun gemäß Gl. (13.12) geführt werden:

$$\text{vorh } s_k = 2,1 \text{ cm} < 3,0 \text{ cm} = \text{zul } s_k \text{ für Teilaufgabe a)}$$

bzw.

$$\text{vorh } s_{h,k} = 0,5 \text{ cm} < 3,0 \text{ cm} = \text{zul } s_{h,k} \text{ für Teilaufgabe b)}.$$

Damit ist der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit in beiden Belastungssituationen erfüllt.



### D3 Zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle

#### D3.1 Berechnungsverfahren

##### D3.1.1 Empirisches Verfahren für die Abschätzung der Verschiebungsakkumulation

(1) Eine Abschätzung der horizontalen Pfahlkopfverschiebungen mit der Zyklenzahl infolge Schwelllast kann näherungsweise durch den logarithmischen Ansatz

$$y_{\text{zyk}} = y_{N=1} \cdot (1 + t \cdot \ln N) \quad (\text{D3.1})$$

mit

$y_{\text{zyk}}$  Pfahlkopfverschiebung nach N Lastzyklen  
 $y_{N=1}$  Pfahlkopfverschiebung nach dem ersten Lastzyklus ( $N = 1$ )  
 $t$  Parameter für Systemverhalten infolge Zyklik

oder einen Exponentialansatz

$$y_{\text{zyk}} = y_{N=1} \cdot N^m \quad (\text{D3.2})$$

mit

$m$  Parameter für das Systemverhalten infolge Zyklik

erfolgen, siehe z. B. [47], [74] und [114].

(2) Der Parameter  $t$  liegt nach Versuchsergebnissen mit Pfählen in Sand unter Schwelllast etwa im Bereich  $0,16 \leq t \leq 0,22$  [47], [1], [114]. Nach [78] hängt der Parameter von der relativen Pfahlsteifigkeit, der Pfahleinbaumethode und der Belastungsart ab. Es wurde ein Ansatz vorgeschlagen, in dem diese Einflusswerte berücksichtigt sind.

(3) Alternativ kann die Abnahme der Bettungssteifigkeit im Bettungsmodulverfahren abhängig von der Lastzyklenzahl mit einem exponentiellen Ansatz über einen Faktor  $N^{-\alpha}$  beschrieben werden, siehe z. B. [82] und [84]. Die Parameter  $t$  und  $m$  bzw.  $\alpha$  sind im Allgemeinen vom Pfahlssystem, von der Pfahlgeometrie, den Bodeneigenschaften und dem Belastungsniveau abhängig.

(4) Für den Faktor  $\alpha$  haben [84] einen Berechnungsansatz vorgeschlagen. Danach hängt er von der Pfahlherstellungsart, der Belastungsart (Schwell- oder Wechsellasten) und der Lagerungsdichte des Sandes ab, größenordnungsmäßig liegt er für Schwelllasten zwischen 0,10 und 0,25.

(5) Der Parameter  $m$  ist für kurze, annähernd starre Pfähle in Sand identisch mit dem Parameter  $\alpha$ . Für nicht starre Pfähle ist er kleiner, und zwar beträgt er theoretisch für sehr lange, flexible Pfähle  $m = 0,6\alpha$  bei reiner Horizontalbelastung und  $m = 0,4\alpha$  bei reiner Momentenbelastung des Pfahls. [82] haben aus Pfahltests mit relativ langen Pfählen unter Schwelllast  $m$ -Werte zwischen etwa 0,04 und 0,09 abgeleitet.

DGGT (Hrsg.)

## Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" - EA-Pfähle

2. wesentlich überarb. u. erw. Auflage

Januar 2012 564 Seiten, 181 Abbildungen, 98 Tabellen, Hardcover. € 89,-



Dieses Handbuch gibt einen vollständigen und umfassenden Überblick über Pfahlsysteme und ihre Anwendungen. Der Bemessung und Ausführung von Pfahlgründungen liegen der Eurocode 7 und die DIN 1054 Ausgabe 2010 sowie die europäischen Ausführungsnormen DIN EN 1536 (Bohrpfähle), DIN EN 12699 (Verdrängungspfähle) und DIN EN 14199 (Mikropfähle) zugrunde.

Die vorliegenden Empfehlungen behandeln darüber hinaus:

- § Einordnung der Pfahlsysteme
- § Einwirkungen auf Pfähle infolge Bauwerkslasten, negativer Mantelreibung und Seitendruck
- § Pfahlwiderstände aus statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen sowie umfangreiche Tabellen über die Pfahltragfähigkeit von nahezu allen Pfahlsystemen auf der Grundlage von Erfahrungswerten,
- § Pfahlgruppen,
- § Durchführung von statischen und dynamischen Probelastungen sowie Integritätsprüfungen,
- § Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen
- § Qualitätssicherung bei der Bauausführung.

Ein Anhang mit zahlreichen Berechnungsbeispielen rundet das Werk ab.

Im Genehmigungsverfahren für Offshore-Windenergieanlagen verlangt das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Nachweise gemäß dem neuen Kapitel 13 ("Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen") der EA Pfähle (2. Auflage), das den für die Gründung von Offshore-WEA wichtigen äußeren Pfahlwiderstand und die damit einzuhaltenden Nachweisformen unter zyklischen Einwirkungen behandeln.

Mit der Herausgabe der Empfehlungen EA-Pfähle unterstützt der Arbeitskreis "Pfähle" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), der in Personalunion mit dem Pfahlnormenausschuss NA 00-05-07 tätig ist, die Baupraxis bei Entwurf, Berechnung und Ausführung von Pfahlgründungen. Die Empfehlungen sind damit als Regeln der Technik in Ergänzung zu den Normen einzuordnen.

### Fax-Antwort an +49 (0) 30 47031 240 - Ernst & Sohn, Berlin

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	Einzelpreis
	978-3-433-03005-9	EA-Pfähle	€ 89,-
	2478	Probeheft der Zeitschrift Geomechanics and Tunneling	kostenlos
	2534	Probeheft der Zeitschrift geotechnik	kostenlos
	906132	Gesamtverzeichnis Verlag Ernst & Sohn	kostenlos

Liefer- und Rechnungsanschrift:  privat  geschäftlich

Firma			
Ansprechpartner		Telefon	
UST-ID Nr./VAT-ID No.		Fax	
Straße/Nr.		E-Mail	
Land	-	PLZ	Ort

**Vertrauensgarantie:** Dieser Auftrag kann innerhalb von zwei Wochen beim Verlag Ernst & Sohn, Wiley-VCH, Boschstr. 12, D-69469 Weinheim, schriftlich widerrufen werden.

Wilhelm Ernst & Sohn  
Verlag für Architektur und  
technische Wissenschaften GmbH & Co. KG  
Rotherstraße 21  
10245 Berlin  
www.ernst-und-sohn.de

\_\_\_\_\_  
Datum / Unterschrift

\*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: Jan 2012 (Probekapitel)