

Anhangsverzeichnis

D	Berechnungsverfahren und -beispiele für zyklisch belastete Pfähle	3
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

D Berechnungsverfahren und -beispiele für zyklisch belastete Pfähle

D.1 Anwendungshinweise

(1) Bei der Anwendung der nachfolgend angegebenen Verfahren zur Ermittlung des Pfahltragverhaltens unter zyklischer Belastung ist zu beachten, dass die Verfahren zunächst nur innerhalb von Forschungsprojekten überprüft und dabei an Modell- und Großversuchen kalibriert sind und noch keine umfangreichen projektbezogenen Erfahrungen vorliegen. Sie stellen damit noch keine allgemein anerkannten Regeln der Technik dar, was durch den Anwender bei entsprechenden Ausführungsprojekten zu beachten ist. Andere für den Anwendungsfall geeignete Berechnungsansätze können angewendet werden. Die Anwendbarkeit der Verfahren ist durch einen geotechnischen Sachverständigen zu bestätigen.

Anmerkung: Die Verfahren werden hier informativ angegeben.

D.2 Zyklisch axial belastete Pfähle

D.2.1 Berechnungsverfahren

D.2.1.1 Nachweis der Pfahltragfähigkeit auf der Grundlage von Interaktionsdiagrammen

(1) Der Nachweis der Tragfähigkeit kann nach [Richter/Kirsch/Mittag 2010] näherungsweise mit Hilfe von so genannten Interaktionsdiagrammen (siehe z. B. Bild D2.1 und 2.2) erfolgen. Dabei wird zunächst ein charakteristischer Ausnutzungsgrad des Systems berechnet, der anschließend mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten und einem Modellfaktor in einen Bemessungswert umgewandelt wird.

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

$$\mu_k = R_{ult,eq} / R_{ult,k} \quad (D2.1)$$

mit

$$R_{ult,k} = R_{c,k} \text{ bzw. } R_{t,k}$$

$R_{ult,eq}$ äquivalenter Pfahlwiderstand, der unter der charakteristischen Einwirkung nach N Lastzyklen zum Versagen führt

Aus dem charakteristischen Ausnutzungsgrad wird der Bemessungswert des Ausnutzungsgrades nach Gleichung D2.2 ermittelt. Ist diese Gleichung erfüllt, so ist die Tragfähigkeit nachgewiesen.

$$\mu_d = \mu_k \cdot \gamma_Q \cdot \gamma_P \cdot \eta_{zyk} \leq 1 \quad (D2.2)$$

mit

γ_Q Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkung

γ_P Teilsicherheitsbeiwert nach DIN 1054:2010-12, Tab. A2.3

η_{zyk} Modellfaktor 1,0 für Bild D2.2 bzw. $\geq 1,0$ abhängig von den verwendeten Interaktionsdiagrammen

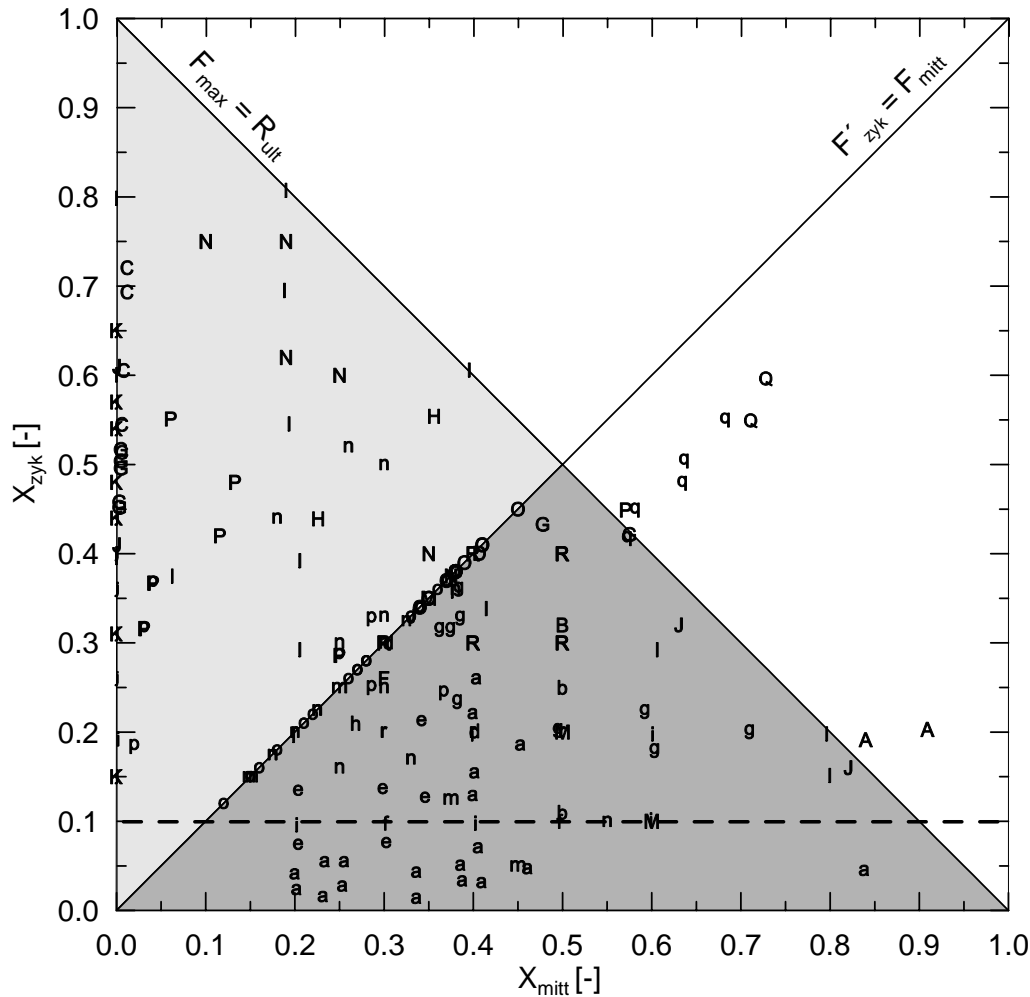
(3) Interaktionsdiagramme, die auf Grundlage von Modell- und Feldversuchen sowie zyklischen Pfahlprobelastungen erstellt wurden, finden sich in verschiedenen Literaturquellen, siehe z. B. [Mittag/Richter 2005], [Kempfert/Thomas 2006]. In [Kempfert 2009] wurde auf Grundlage einer sehr großen Datenbasis ein Interaktionsdiagramm für nichtbindige Böden abgeleitet, siehe Bild D2.2. Für die darin enthaltenen Grenzkurven gilt folgender funktionaler Zusammenhang:

$$X_{zyk} \leq \kappa \cdot \left(1 - (X_{mitt} + 0,65 - \kappa)^4\right) \quad (\text{D2.3})$$

mit

κ nach Tabelle D2.1

(4) Für bindige Böden dürfen die κ -Werte nach Tabelle D2.1 mit einem Faktor von 1,3 erhöht werden.



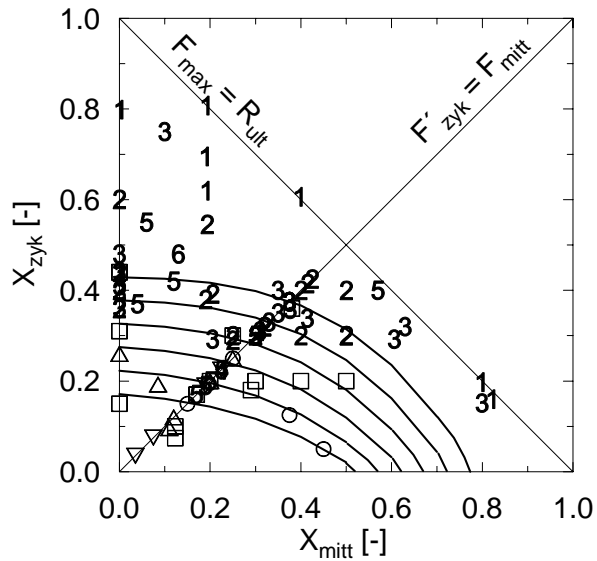
Versagen

kein Versagen

- A** Stevens (1978), N_f keine Angabe
- B** Boulon et al. (1980), $N_f = 1.000$
- C** Poulos (1981), $N_f = 3 - 180$
- D** McAnoy et al. (1982), $N_f = 564$
- F** Nauroy et al. (1985), $N_f = 135$
- G** Karlsrud et al. (1986/1987), $N_f = 5 - 500$
- H** Deane et al. (1988), N_f keine Angabe
- I** Poulos/Lee (1989), $N_f = 1 - 600$
- J** Lee/Poulos (1990), $N_f = 2 - 220$
- K** Turner/Kulhawy (1990), $N_f = 50 - 216$
- M** Prasad/Rao (1994), $N_f = 90 - 185$
- N** Al-Douri/Poulos (1995), $N_f = 8 - 365$
- O** Schwarz (2002) - Modell, $N_f = 2 - 85.000$
- P** Schwarz (2002), $N_f = 3 - 148.180$
- R** Le Kouby et al. (2004), $N_f = 50$
- Q** Lehane et al. (2003), $N_f = 38 - 111$

- a** Stevens (1978), N keine Angabe
- b** Boulon et al. (1980), $N = 5.000 - 6.000$
- d** McAnoy et al. (1982), $N > 1.000$
- e** Puech (1982), N keine Angabe
- f** Nauroy et al. (1985), $N = 1.000$
- g** Karlsrud et al. (1986/1987), $N = 180 - 12.300$
- h** Deane et al. (1988), N keine Angabe
- i** Poulos/Lee (1989), $N = 2.000$
- j** Turner/Kulhawy (1990), $N = 50 - 216$
- l** Kempfert/Lauffer (1991), $N = 5 - 15$
- m** Prasad/Rao (1994), $N = 90 - 185$
- n** Al-Douri/Poulos (1995), $N = 50 - 375$
- o** Schwarz (2002) - Modell, $N = 738 - 16.832$
- p** Schwarz (2002), $N = 12.017 - 208.160$
- q** Lehane et al. (2003), $N = 19 - 246$
- r** Le Kouby et al. (2004), $N = 50$

Bild D2.1 Zusammenfassende Auswertung von Modell- und Feldversuchen aus der Literatur, aus [Kempfert 2009]



versagt nach N_f Lastzyklen

- 1 $1 < N_f \leq 10$
- 2 $10 < N_f \leq 100$
- 3 $100 < N_f \leq 1.000$
- 4 $1.000 < N_f \leq 10.000$
- 5 $10.000 < N_f \leq 100.000$

nicht versagt nach N Lastzyklen

- $10 \leq N < 100$
- $100 \leq N < 1.000$
- △ $1.000 \leq N < 10.000$
- ▽ $100.000 \leq N < 1.000.000$

Bild D2.2 Interaktionsdiagramm aus Pfahlversuchen in nichtbindigen Böden, aus [Kempfert 2009]

Tabelle D2.1 Werte für κ in Abhängigkeit der Bodenart und Lastzyklen, aus [Kempfert 2009]

Lastzyklen N	κ [-]
10^1	0,43
10^2	0,38
10^3	0,33
10^4	0,28
10^5	0,23
10^6	0,18

D.2.1.2 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit einem empirischen Verschiebungsansatz

(1) Das charakteristische zyklische Pfahlsetzungs- bzw. hebungsverhalten kann näherungsweise durch Gleichung D2.4 beschrieben werden, siehe z. B. [Schwarz 2002]. Die Verschiebung und Verschiebungsrate nach dem ersten Lastzyklus sowie der Neigungsbeiwert sollten durch eine zyklische Pfahlprobelastung mit einigen wenigen Lastzyklen ermittelt werden. Der weitere Verlauf der zyklischen Verschiebung kann dann nach Gleichung D2.4 abgeschätzt werden.

(2) Der Neigungsbeiwert in Gleichung (D2.4) ergibt sich abhängig von Bodenart, Art der Belastung und Pfahlart. Solche Werte sind z. B. bei [Kempfert et al. 2007] 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 zwischen 0,15 und 0,40 kann in erster Näherung für Pfähle in nichtbindigen Böden unter Schwelllast ein Wert von $\lambda=0,7$ bis 0,9 verwendet werden. Vorzugweise sollte der Neigungsbeiwert projektbezogen durch eine Pfahlprobelastung mit Ent- und Wiederbelastung bestimmt werden.

$$s_{zyk,k} = s^1 + \frac{\dot{s}_{pl}^1}{1-\lambda} \cdot (N^{1-\lambda} - 1) \quad \text{für } \lambda \neq 1 \quad (\text{D2.4})$$

mit

s^1 Verschiebung nach dem ersten Lastzyklus

\dot{s}_{pl}^1 Plastische Verschiebungsrate nach dem ersten Lastzyklus

λ Neigungsbeiwert

(3) Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit kann nach 13.7.2 näherungsweise nach Gleichung (13.12) und (13.13) in Verbindung mit Gleichung D2.4 geführt werden.

Tabelle D2.2 entfallen

D.2.1.3 Näherungsverfahren zur Berechnung des charakteristischen Pfahltragverhaltens

D.2.1.3.1 Allgemeines

- (1) Das hier vorgestellte Rechenverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit und zur Ermittlung der Verformungen axial zyklisch beanspruchter Pfähle ist detailliert in [Kirsch/Richter 2011] beschrieben. Vergleiche des Verfahrens mit in-situ Versuchsergebnissen enthält [Richter et al. 2010].
- (2) Das Verfahren liefert auf der Grundlage eines einfachen Ingenieurmodells den Wert der Tragfähigkeitsminderung ΔR_k und die axialen Verschiebungen 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 mit einer gleichbleibenden Schwell- oder Wechsellast mit einer statischen Mittellast im Zug- oder Druckbereich über N_{eq} Zyklen belastet wird.
- (6) Zur Berechnung der Gesamtverschiebungen werden Verzerrungen γ am Pfahlmantel infolge der mittleren Belastung F_{mitt} und der zyklischen Lastamplitude F'_{zyk} addiert.
- (7) Die Pfahlverschiebungen werden aus den Gesamtverzerrungen γ_{ges} unter Ansatz der Reichweitenabschätzung nach [Cooke 1974] berechnet.
- (8) Die Aufteilung des Pfahlwiderstandes infolge der zyklischen Beanspruchung auf Pfahlmantel und Pfahlfuß erfolgt iterativ über die Bedingung gleicher getrennt ermittelter Verschiebungen von Pfahlmantel und Pfahlfuß.
- (9) Die Aufteilung des Pfahlmantelwiderstandes infolge der zyklischen Beanspruchung bei geschichtetem Baugrund erfolgt iterativ über die Bedingung gleicher getrennt ermittelter Verschiebungen am Pfahlmantel.

D.2.1.3.2 Tragfähigkeit

- (1) Die Minderung der charakteristischen Grenzmantelreibung am Pfahlmantel infolge der zyklischen Verdichtung kann durch folgende Gleichung ermittelt werden:

$$\Delta \tau_k(N) = 2 \cdot G_w \cdot \tan \delta \cdot \Delta D^* \cdot \left[\gamma_{zyk} \cdot \left(\frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \gamma_{grenz} \left[\left(\frac{\gamma_{zyk}}{\gamma_{grenz}} \right)^2 - 1 \right] \right] \quad (D2.5)$$

mit

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

und

(D2.6)

$$\Delta D^* = \Delta D \cdot \lg N = 0,5 \cdot I_D^{-2,32} \cdot \lg N$$

(D2.7)

Darin sind:

N	Zyklenanzahl,
G_W	Schubmodul bei Wiederbelastung,
δ	aktivierter Wandreibungswinkel
I_D	Initiale Lagerungsdichte,
γ_{zyk}	zyklische Schubverzerrung,
τ_{zyk}	zyklische Schubspannung,
G_{zyk}	Schubmodul für zyklische Belastung, abhängig von γ_{zyk} (vgl. DGGT AK 1.4, 2002)
γ_{grenz}	Grenzscherungsverzerrung,
α	Dilatationsparameter.

(2) Der nach der zyklischen Beanspruchung verbleibende charakteristische Pfahlwiderstand $R_{c,k}(N)$ errechnet sich dann aus dem statischen Pfahlmantelwiderstand $R_{s,k}$ abzüglich der Minderung der Grenzschubspannung $\Delta\tau(N)$ multipliziert mit der Pfahlmantelfläche A_m zuzüglich des Pfahlspitzenwiderstandes $R_{b,k}$.

$$R_{c,k}(N) = R_{s,k} - \Delta\tau(N) \cdot A_m + R_{b,k} \quad (D2.8)$$

(3) Für den Nachweis der Tragfähigkeit nach Gleichung (13.8) bzw. (13.9) ist der Modellfaktor nach derzeitigem Kenntnisstand zu $\eta_{R,d} = 1,2$ zu wählen.

D.2.1.3.3 Gebrauchstauglichkeit

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

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

mit

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

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

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

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

mit der mittleren Schubspannung τ_{mitt} , der zyklischen Schubspannungsamplitude τ_{zyk} und der Grenzscherubspannung $\tau_{\text{ult,k}}$ (entspricht $q_{s,k}$).

(2) Die Schubverzerrung aus zyklischem Kriechen errechnet sich unter Verwendung der Masing-Hypothese zu:

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

wobei

$${}_2\Delta\gamma_1 = \gamma_r \left[\frac{\kappa_1}{1 - \kappa_1/c} - \frac{\kappa_1}{1 + \kappa_1/c} \right] \quad (\text{D2.15})$$

mit $\gamma_r = \tau_{\text{ult,k}}/G_{\text{max}}$, der Beruhigungskonstante ζ , der Zyklenanzahl N , dem Beanspruchungsniveau κ_i und der Krümmung der Hystereseschleife c .

(3) Damit ergeben sich die Verformungen aus Zyklik zu:

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

wobei

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

mit dem Pfahlradius r_0 , der Einbindelänge L und der Querdehnzahl des Bodens ν .

(4) Schließlich lassen sich die Gesamtverformungen s_k berechnen:

$$s_k = s_{\text{stat}} + s_{\text{zyk,k}} \dots \dots \dots (\text{D2.17})$$

mit der statischen Verformung s_{stat} unter der Gesamtlast $F_{G,k} + F_{Q,\text{rep}} + F'_{\text{zyk}}$.

D.2.2 Berechnungsbeispiele

D.2.2.1 Nachweis der Pfahltragfähigkeit auf der Grundlage von Interaktionsdiagrammen

Als Beispiel dient ein zyklisch 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 $R_{t,k} = 2.500$ kN angenommen werden. Der Pfahl wird mit einer zyklischen Zugschwelllast beaufschlagt. Diese beträgt $F_{\text{mitt}} = 700$ kN (mittlere Einwirkung) und $F'_{\text{zyk}} = 700$ kN (zyklische Lastamplitude). Der Pfahl wird mit einer Zyklenanzahl von $N = 200$ belastet.

Zunächst ist zu prüfen, inwieweit die vorliegende zyklische Belastung eine gesonderte Untersuchung erforderlich macht. Es gilt:

$$F'_{\text{zyk}} = 700 \text{ kN} = 0,28 \cdot R_{t,k} > 0,1 \cdot R_{t,k}$$

Somit ist eine Untersuchung hinsichtlich der Auswirkung zyklischer Einwirkungen auf die Pfahltragfähigkeit durchzuführen.

Im vorliegenden Beispiel erfolgt der Nachweis unter Zugrundelegung von Interaktionsdiagrammen gemäß [Kempfert/Thomas 2006] und [Mittag/Richter 2005]. Erstere sind in Abschnitt D2.1 beschrieben.

Die Nachweisführung folgt einem Vorschlag von [Richter et al. 2010] und ergibt sich wie folgt:

$$\mu_d = \mu_k \cdot \gamma_Q \cdot \gamma_P \cdot \eta_{R,d} \leq 1$$

Hierin bedeuten

μ_d = Ausnutzungsgrad

γ_P = Teilsicherheitsbeiwert für Pfahlwiderstand

γ_Q = Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkungen

η_{zyk} = Modell-Faktor für das Verfahren

μ_k = Charakteristischer Ausnutzungsgrad $R_{t,k}(N) / R_{t,k}$

Der Widerstand $R_{t,k}(N)$ lässt sich direkt aus den Interaktionsdiagrammen ermitteln, indem das Wertepaar F'_{zyk} und F_{mitt} eingetragen und mit dem Ursprung verbunden wird. Es wird dann durch Verlängerung dieser Strecke die Kurve mit der zugehörigen Zyklenzahl N gesucht, der zugehörige Verhältniswert z. B. $F'_{\text{zyk}}/R_{t,k}$ abgegriffen und hieraus dann $R_{t,k}(N)$ berechnet.

Gleichwertig kann eine analytische Bestimmung von μ_k über die kurvenapproximierenden Gleichungen erfolgen. Nach [Kempfert/Thomas 2006] lautet diese:

$$F' = \mu_k \cdot \kappa_k \cdot R_{c/t,k} \left(1 - \left(\frac{F_{\text{mitt}}}{\mu_k \cdot R_{c/t,k}} + 0,65 - \kappa \right)^4 \right)$$

bzw. nach [Mittag/Richter 2005]

$$F' = \mu_k \cdot \kappa_k \cdot R_{C/t,k} \left(1 - \left(\frac{F_{\text{mitt}}}{\mu_k \cdot R_{C/t,k}} \right)^2 \right)$$

Im Ergebnis ergibt sich der charakteristische Ausnutzungsgrad für $N = 200$ Lastzyklen gemäß nachfolgender Tabelle.

Tabelle D2.3

Kurvenapproximation nach	Minderungsfaktor κ	Charakteristischer Ausnutzungsgrad μ_k
Kempfert/Thomas	0,365	0,88
Mittag/Richter	0,385	0,82

Im Ergebnis ist festzustellen, dass nach beiden Verfahren ein charakteristischer Ausnutzungsgrad kleiner als 1 festgestellt wird. Ein Versagen tritt nicht ein. Abhängig von den in Gleichung D2.2 erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerten sowie dem anzusetzenden Modellfaktor ist jedoch der Beanspruchungszustand für diesen Pfahl nicht zulässig. Abhilfe ist zu schaffen, indem die Pfahltragfähigkeit durch Verlängerung des Pfahles oder Vergrößerung des Durchmessers erhöht wird.

D.2.2.2 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit einem empirischen Verschiebungsansatz

Es wird ein zyklisch belasteter Stahlbetonrammpfahl (\varnothing 0,66 m) mit einer Länge von 15,0 m betrachtet. Aufgrund von Pfahlprobebelastungen kann die statische Grenztragfähigkeit des in den nichtbindigen Baugrund einbindenden Pfahls mit $R_{t,k} = 2.000$ kN angenommen werden. Der Pfahl wird mit einer zyklischen Zugschwelllast beaufschlagt. Diese beträgt $F_{\text{mitt}} = 500$ kN (mittlere Einwirkung) und $F'_{\text{zyk}} = 300$ kN (zyklische Lastamplitude). Der Pfahl wird mit einer Zyklenanzahl von $N = 1.000$ belastet.

Die Verschiebung nach dem ersten Lastzyklus und die Verschiebungsrate sowie der Neigungsbeiwert lassen sich aus einer zyklischen Pfahlprobebelastung mit wenigen Lastzyklen ermitteln. Mit diesen Werten kann die zyklische Verschiebung des Pfahls nach N Lastzyklen gemäß Gleichung (D2.4) approximiert werden. Der Nachweis erfolgt dann nach Gleichung (13.12).

Alternativ können die Verschiebung und die Verschiebungsrate aus der Erst-, Ent- und Wiederbelastungshysterese aus einer statischen Pfahlprobebelastung abgeschätzt werden. Dazu ist bei der Probebelastung der Pfahl bei $F=F_{\text{max}}$ zu entlasten und bei $F=F_{\text{min}}$ wieder zu belasten.

Bild D2.3 zeigt exemplarisch den qualitativen Verlauf einer Widerstands-Hebungs-Linie mit fiktiven Werten für dieses Beispiel. Der Anhaltswert für den Neigungsbeiwert wird nach D2.1.2 (2) zu 0,8 gewählt. Mit den Werten aus Bild D.2.3 wird die zyklische Pfahlhebung nach 1.000 Lastzyklen mit Gleichung (D2.4) wie folgt abgeschätzt:

$$s_{\text{zyk},k} = 0,50 + \frac{0,30}{1-0,80} \cdot (1000^{1-0,80} - 1) = 4,97 \text{ cm}$$

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

$$\text{vorh } s_{h,k} = s_G + s_{Q,rep} + s_{\text{zyk},k} = 0,20 + 4,97 = 5,17 \text{ cm}$$

Dieser Wert kann einer zulässigen Hebung gemäß Gleichung (13.12) gegenüber gestellt werden.

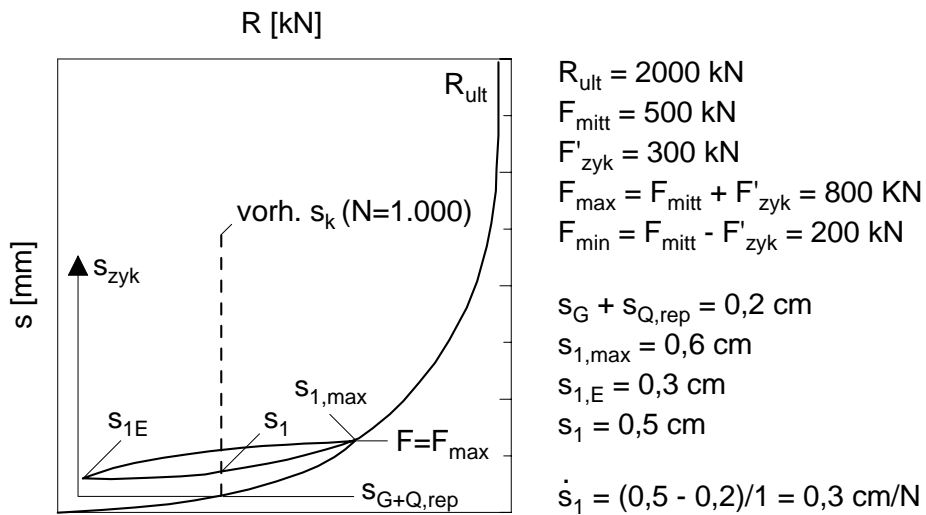


Bild D.2.3 Allgemeine Vorgehensweise der Parameterermittlung aus einer Widerstands-Hebungs-Linie mit einem Entlastungszyklus aus einer statischen Pfahlprobebelastung und vorgegebene Werte für das Berechnungsbeispiel

D.2.2.3 Beispiel für den Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit mit dem Verfahren nach D.2.1.3

Nachfolgend wird der Pfahl aus Beispiel D.2.2.1 im Hinblick auf seine Tragfähigkeit und seine Verformungen unter zyklischer Belastung mit dem analytischen Ansatz nach [Kirsch/Richter 2011] untersucht.

D.2.2.3.1 Tragfähigkeit

Nachfolgende Tabelle enthält die Eingangswerte der Berechnung.

Tabelle D2.4

Pfahltraglänge	$L=20$	[m]
Pfahlradius	$r_0=0,4$	[m]
Axialer Pfahlwiderstand am Mantel	$R_{s,k}=4.500$	[kN]
Axialer Pfahlwiderstand am Fuß	$R_{b,k}=0$	[kN]
Effektiver Reibungswinkel des Bodens	$\varphi'=29$	[°]
Bezogene Lagerungsdichte des Bodens	$I_D=0,75$	[-]
Porenzahl des Bodens	$e=0,45$	[-]
Verhältnis zwischen Wiederbelastungssteifigkeit und maximaler Steifigkeit des Bodens	$\frac{G_{wieder}}{G_{max}} = 0,2$	[-]
Verhältnis zwischen Steifigkeit zugehörig γ_{zyk} und maximalem Schubmodul des Bodens	$\frac{G_{zyk}}{G_{max}} = 0,4$	[-]
Querdehnzahl des Bodens	$\nu=0,35$	[-]
Grenzscherungsverzerrung, bei der keine Volumenveränderung mehr eintritt (z.B. aus ResCol-Versuch)	$\gamma_{grenz}=2*10^{-4}$	[-]
Zyklischer Dilatationsparameter (aus Laborversuchen, z. B. Simple-Shear-Versuch)	$\alpha=0,5$	[-]
Konstante zur Beschreibung der Krümmung der Hysterese der Erstbelastung (aus Versuchen oder $c_1=1,0$ gem. [Duncan/Chang 1970])	$c_1=1,0$	[-]

Konstante zur Beschreibung der Krümmung der Hysterese in den nachfolgenden Lastzyklen (aus Versuchen oder $c_2=2,0$ gem. [Vrettos 2008])	$c_2=2,0$	[-]
Referenzverzerrung (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 Pfahlbelastung	$F_{\text{mitt}}=600$	[kN]
Axiale zyklische Lastamplitude	$F'_{\text{zyk}}=1.200$	[kN]
Zyklenanzahl	$N=1.000$	[-]

Die Berechnung der Tragfähigkeitsminderung am Pfahlmantel 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 repräsentativen Normalspannungszustands am Pfahlmantel:

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

Bestimmung des maximalen Schubmoduls G_{max}

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

Berechnung der zyklischen Schubverzerrung 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 zyklischen Minderung der Grenzmantelreibung

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \tan \varphi \cdot \frac{(F_{\text{mitt}} + F'_{\text{zyk}})}{(R_{s,k} - \Delta\tau_k(N) \cdot \pi \cdot D \cdot L)} \\ &= \tan 29^\circ \cdot \frac{(600 + 1.200)}{4.500 - 6,8 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 20} = 0,24 \\ \Delta\tau_k(N) &= 2 \cdot G_w \cdot \tan \delta \cdot \Delta D^* \cdot \left[\gamma_{\text{zyk}} \cdot \left(\frac{\gamma_{\text{zyk}}}{\gamma_{\text{grenz}}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \gamma_{\text{grenz}} \cdot \left[\left(\frac{\gamma_{\text{zyk}}}{\gamma_{\text{grenz}}} \right)^2 - 1 \right] \right] = \\ &= \left[2 \cdot (0,2 \cdot 175.494) \cdot 0,24 \cdot 2,92 \cdot \left[3,4 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{3,4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} - 1 \right) - \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \left[\left(\frac{3,4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} \right)^2 - 1 \right] \right] \right] = 6,8 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

mit

$$\Delta D^* = \Delta D \cdot \lg N = 0,5 \cdot I_D^{-2,32} \cdot \lg N = 0,5 \cdot 0,75^{-2,32} \cdot \lg 1.000 = 2,92$$

Der charakteristische Ausnutzungsgrad ergibt sich zu

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

Der Bemessungswert des Pfahlwiderstandes ergibt sich nach (13.9)

$$\begin{aligned} R_{s,d}(N) &= R_{s,d} - \gamma_Q \cdot \eta_{R,d} \cdot \Delta R_k \\ &= R_{s,k} / \gamma_t - \gamma_Q \cdot \eta_{R,d} \cdot \Delta\tau_k(N) \cdot \pi \cdot D \cdot L \\ &= 4.500 / 1,4 - 1,4 \cdot 1,2 \cdot 6,8 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 20 = 2.640 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\gamma_t = 1,4, \gamma_Q = 1,4, \eta_{R,d} = 1,2$$

Der Bemessungswert der Einwirkung errechnet sich zu

$$F_d = F_{\text{mitt}} \cdot \gamma_Q + F'_{\text{zyk}} \cdot \gamma_Q = 600 \cdot 1,4 + 1.200 \cdot 1,4 = 2.520$$

und damit der Ausnutzungsgrad:

$$\mu_d = \frac{F_d}{R_{s,d}(N)} = \frac{2.520}{2.640} = 0,95$$

Mithin ist die Belastung zulässig.

D.2.2.3.2 Gebrauchstauglichkeit

Zunächst erfolgt die Berechnung der Verschiebungen am Pfahlmantel. Diese setzen sich aus Anteilen infolge zyklischer Verdichtung und zyklischem Kriechen zusammen. Die Berechnung der Schubverzerrungen infolge zyklischer Verdichtung erfolgt, indem zunächst die verminderte Grenztragfähigkeit bestimmt wird:

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

mit

τ_{ult} = charakt. Bruchschubspannung am Pfahlmantel (entspricht $q_{s,k}$)

Die Ermittlung der Beanspruchungsniveaus κ_1 und κ_2 vor bzw. nach der zyklischen Beanspruchung errechnet sich aus:

$$\kappa_1 = \frac{(\tau_{zyk} + \tau_{mitt})}{\tau_{ult}} = \frac{(23,9 + 12,9)}{89,5} = 0,4$$

$$\kappa_2 = \frac{(\tau_{zyk} + \tau_{mitt})}{\tau_{s,k}(N)} = \frac{(23,9 + 12,9)}{82,7} = 0,433$$

mit

τ_{mitt} = mittlere Schubbeanspruchung,
 τ_{zyk} = zyklische Schubbeanspruchung

Berechnung der Schubverzerrung 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 Schubverzerrungen 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

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

Zyklisches Kriechen in den nachfolgenden Zyklen:

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

Zur Berechnung der Gesamtverformungen werden ergänzend die Schubverzerrungen unter der statischen Gesamtlast benötigt:

$$\gamma_{\text{stat}} = \frac{(\tau_{\text{mitt}} + \tau_{\text{zyk}})}{G_{\text{stat}}} = \frac{(23,9 + 12,9)}{21.057} = 1,7 \cdot 10^{-3}$$

mit

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

mit

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

ergeben sich die Gesamtverschiebungen aus der Summation der einzelnen Verformungsanteile:

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

$$s_{\text{ges}} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 7,5 \text{ mm}$$

D.3 Zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle

D.3.1 Berechnungsverfahren

D.3.1.1 Empirisches Verfahren für die Abschätzung der Verschiebungsakkumulation

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

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

mit

y_{zyk}	Pfahlkopfverschiebung nach N Lastzyklen
$y_{N=1}$	Pfahlkopfverschiebung unter statischer Last (N=1)
t	Parameter für Systemverhalten infolge Zyklik

oder einen Exponentialansatz

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

mit

m	Parameter für das Systemverhalten infolge Zyklik
-----	--

erfolgen, siehe z. B. [Hettler 1981], [LeBlanc 2009] und [Peralta/Achmus 2010]. Alternativ kann die Abnahme der Bettungssteifigkeit im Bettungsmodulverfahren abhängig von der Lastzyklenzahl mit einem exponentiellen Ansatz über einen Faktor N^α beschrieben werden, siehe z. B. [Little/Briaud 1988] und [Long/Vanneste 1994]. Die Parameter t und m bzw. α sind im Allgemeinen vom Pfahlssystem, von der Pfahlgeometrie, den Bodeneigenschaften und dem Belastungsniveau abhängig.

(2) Der Parameter t liegt nach Versuchsergebnissen mit Pfählen in Sand unter Schwelllast etwa im Bereich $0,16 \leq t \leq 0,22$ ([Hettler 1981], [Alizadeh/Davisson 1970], [Peralta/Achmus 2010]). Nach [Lin/Liao 1999] hängt der Parameter von der relativen Pfahlsteifigkeit, der Pfahleinbaumethode und der Belastungsart ab. Sie haben einen Ansatz vorgeschlagen, in dem diese Einflusswerte berücksichtigt sind.

(3) Für den Faktor α haben [Long/Vanneste 1994] einen Berechnungsansatz vorgeschlagen. Danach hängt er von der Pfahlherstellungsart, der Lastart (Schwell- oder Wechsellast) und der Lagerungsdichte des Sandes ab, größenordnungsmäßig liegt er für Schwelllast zwischen 0,10 und 0,25.

(4) Der Parameter m ist für kurze, annähernd starre Pfähle in Sand identisch mit dem Parameter α . Für nicht starre Pfähle ist er kleiner, und zwar beträgt er theoretisch für sehr lange, flexible Pfähle $m = 0,6 \alpha$ bei reiner Horizontalkraftbelastung und $m = 0,4 \alpha$ bei reiner Momentenbelastung des Pfahls. [Little/Briaud 1988] haben aus Pfahltests mit relativ langen Pfählen unter Schwelllast m -Werte zwischen rd. 0,04 und 0,09 abgeleitet.

D.3.1.2 Prognose der Verschiebungsakkumulation unter Verwendung von Elementversuchen

(1) Zur Prognose der Verformungsakkumulation unter Verwendung von Elementversuchen können z. B. die Berechnungsverfahren nach [Hinz 2009], [Lesny/Hinz 2009] und [Taşan 2011] verwendet werden. Die Verfahren nach [Hinz 2009] und [Lesny/Hinz 2009] basieren auf dem Strain-Wedge-Modell nach [Norris 1986], [Ashour/Norris 1998] und auf finite Elemente Berechnungen. Das Berechnungsverfahren nach [Taşan 2011] beschreibt die Verschiebungsakkumulation durch eine Modifikation des Strain-Wedge-Modells. Exemplarisch wird in den folgenden Absätzen das Verfahren nach [Taşan 2011] näher erläutert.

(2) Das in [Taşan 2011] vorgeschlagene Berechnungsverfahren zur Prognose der Verschiebungsakkumulation von zyklisch quer belasteten Pfählen unter Verwendung von statischen und zyklischen Elementversuchen ist eine Modifizierung und Erweiterung des Strain-Wedge-Modells (SWM) nach [Norris 1986].

(3) Die Herleitung der Beziehung zwischen der Bettungsspannung und der Pfahlverschiebung erfolgt hierbei aus dem 3D-Spannungs-Dehnungsverhalten des Bodens.

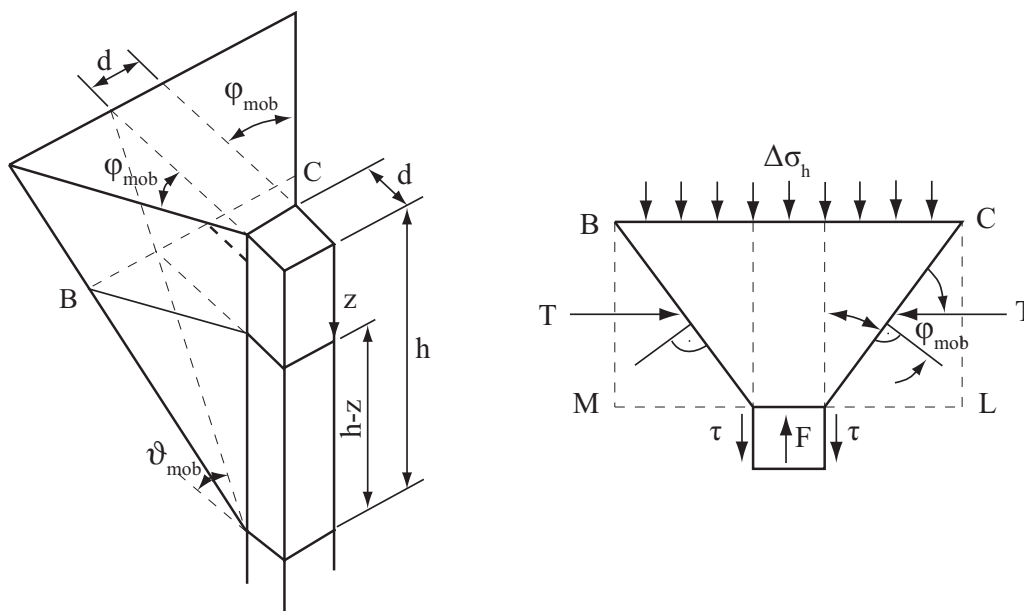


Bild D3.1: Mobilisierter Erddruckkeil im Strain-Wedge-Modell nach [Norris 1986]

(4) Eine wesentliche Modellannahme ist die aus der Querbelastung des Pfahls resultierende Mobilisierung eines passiven Erddruckkeils mit einer konstanten Dehnung ϵ über die Keilhöhe h (Bild D.3.1). Mit steigender Belastung ändert sich der Ausnutzungsgrad der Bodenfestigkeit und daraus folgend ändern sich die Abmessungen des passiven Erddruckkeils.

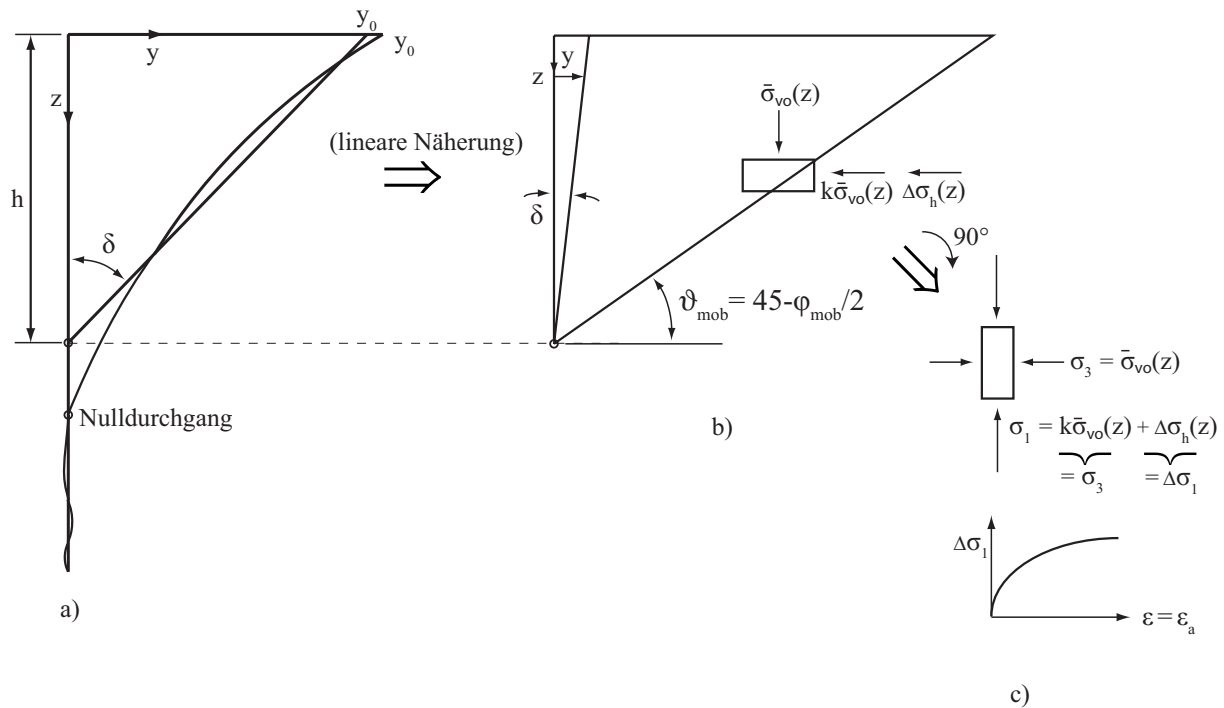


Bild D3.2: Übertragung der Spannungen und Dehnungen im Erddruckkeil des Strain-Wedge-Modells auf die Verhältnisse am bodenmechanischen Element im Triaxialversuch
a) Verformung des quer belasteten Pfahls, b) Passiver Erddruck vor dem Pfahl,
c) Bodenmechanisches Element im Triaxialversuch

(5) Im Rahmen der Modellbildung werden die aufgrund der Querbelastung des Pfahls im passiven Erddruckkeil entstehenden Spannungen und Dehnungen auf die Spannungs-Dehnungsverhältnisse am bodenmechanischen Element im Triaxialversuch bezogen (Bild D.3.2). Dabei wird angenommen, dass aufgrund der Pfahlherstellung die vertikalen Ausgangsspannungen $\bar{\sigma}_{v0}(z)$ gleich den horizontalen Spannungen $\sigma_h(z)$ sind (Erddruckbeiwert $k=1,0$, Bild D.3.2). Somit wird von einem isotropen Ausgangsspannungszustand $\bar{\sigma}_{v0}(z)$ des Bodens ausgegangen.

(6) Zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Böden wird der Ansatz von [Duncan/Chang, 1970] verwendet, mit dessen Hilfe das nichtlineare Verhalten von Böden mit Berücksichtigung von Be- und Entlastungsvorgängen charakterisiert werden kann.

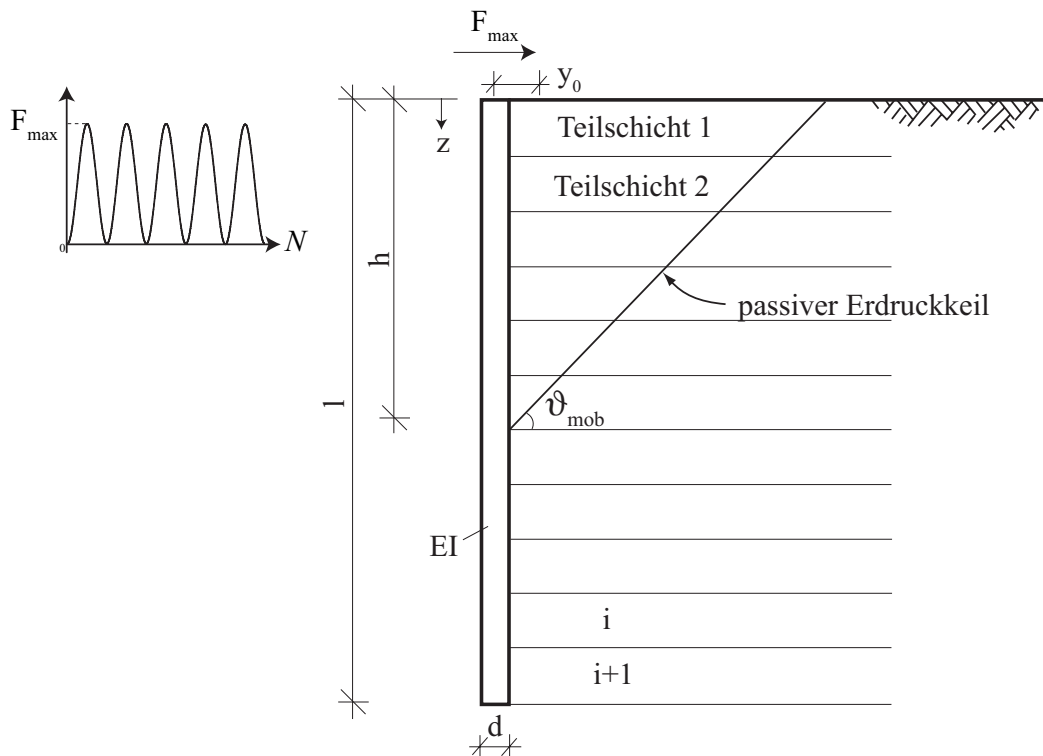


Bild D3.3: Unterteilung des Bodens vor dem Pfahl in Teilschichten

(7) Der Boden vor dem Pfahl wird in Teilschichten unterteilt (Bild D3.3). Für eine Schwelllast mit einer maximalen Einwirkung F_{\max} (s. Abschnitt 13.2) werden die zugehörigen Pfahlverschiebungen und die Erddruckkeildehnung durch die Lösung des Problems eines elastisch gebetteten Balkens berechnet. Dabei wird die Federkennlinie der jeweiligen Teilschicht im Erddruckkeil mit Hilfe des aktuellen Spannungs-Dehnungszustands des Bodens in der jeweiligen Teilschicht ermittelt.

(8) Im weiteren Verlauf werden der Pfahl und der Boden entlastet und die plastischen Bodendehnungen der Teilschichten $(\epsilon_{pl,N=1})_i$ im Erddruckkeil nach dem ersten Lastzyklus mit Hilfe des Ansatzes nach [Duncan/Chang 1970] ermittelt. Im nächsten Schritt werden die plastischen Dehnungen der Teilschichten nach einer Zyklenanzahl von $N-1$ mit einem Ansatz der Form

$$(\epsilon_{pl,N-1})_i = (\epsilon_{pl,N=1})_i \times (N-1)^a \quad (D3.3)$$

berechnet. Der Exponent a wird dabei aus zyklischen Triaxialversuchen ermittelt. Im Weiteren werden der Pfahl und der Boden wieder belastet und unter Berücksichtigung der plastischen Dehnungen $(\epsilon_{pl,N-1})_i$ die für den Belastungszyklus N zugehörigen Pfahlverschiebungen und –schnittkräfte errechnet.

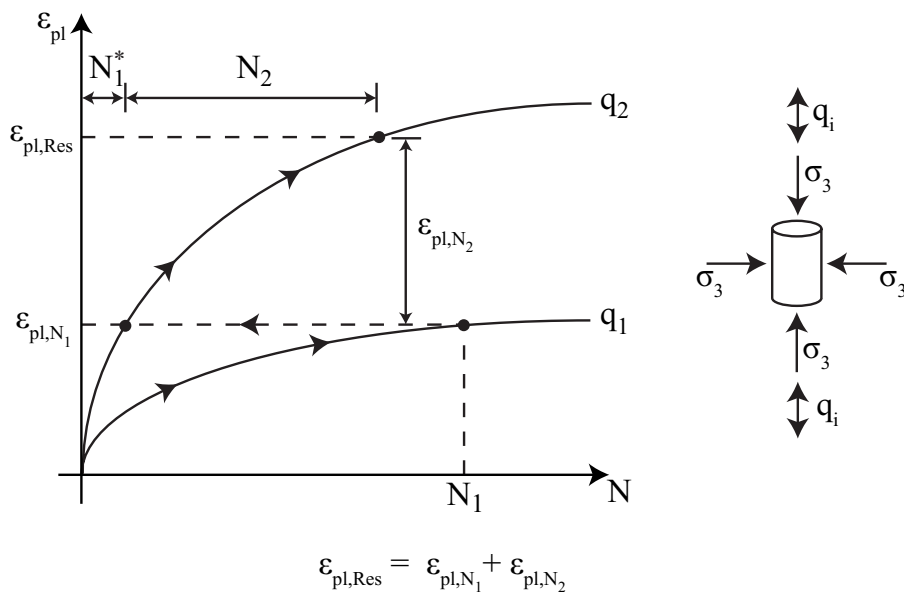


Bild D3.4: Ermittlung der resultierenden plastischen Dehnungen am Bodenelement bei zyklischen Belastungen mit variierenden Amplituden q_i

(8) Zur Berechnung der plastischen Bodendehnungen der Teilschichten im Erddruckkeil infolge der zyklischen Belastungen mit veränderlichen Deviatorspannungen q_i kann die im Bild D3.4 dargestellte Methode verwendet werden.

(9) Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens befindet sich in [Taşan 2011].

D.3.2 Berechnungsbeispiele

D.3.2.1 Beispiel für die Abschätzung der Verschiebungsakkumulation

Es wird ein gerammter Stahlrohrpfahl ($D = 2\text{ m}$, $L = 30\text{ m}$) in mitteldichtem Sandboden betrachtet (s. Bild D3.4). Die Berechnung nach dem Bettungsmodulverfahren unter Ansatz eines linear mit der Tiefe zunehmenden Bettungsmoduls $k_s(z) = n_h \cdot z/D$ mit $n_h = 6\text{ MN/m}^3$ ergibt die in Bild D3.4 dargestellte Biegelinie mit einer Pfahlkopfverschiebung von $1,31\text{ cm}$ unter statischer Last ($H = 800\text{ kN}$).

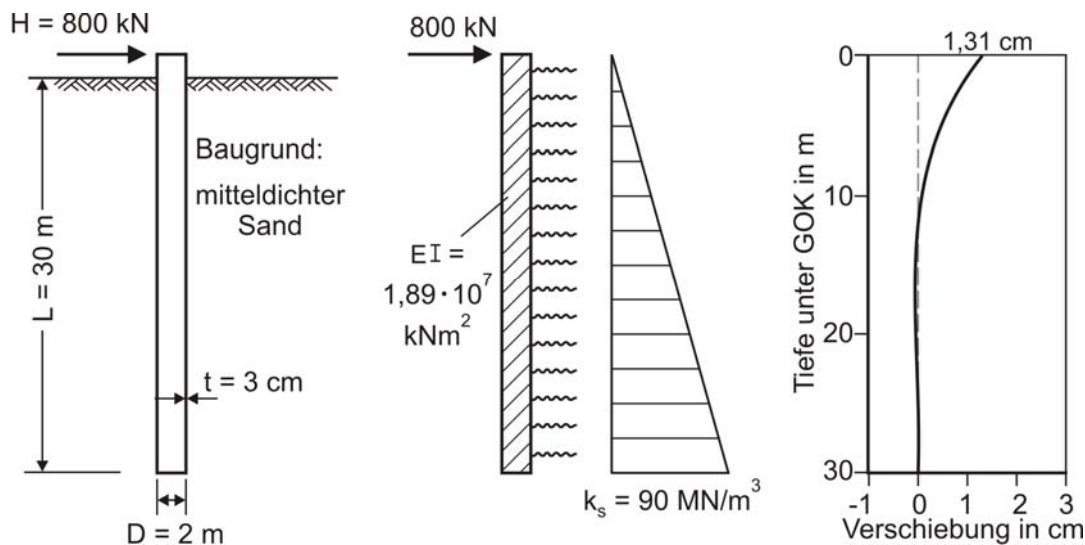


Bild D3.4: Stahlrohrpfahl in Sand; System (links) und mit dem Bettungsmodulverfahren berechnete Biegelinie unter statischer Last (rechts)

Es seien $N = 1.000$ Schwelllastzyklen zu berücksichtigen.

Mit einer groben Abschätzung des Parameters t in Gleichung (D3.1) zu $t = 0,20$ ergibt sich

$$y_{zyk} = 1,31 \cdot (1 + 0,20 \cdot \ln 1000) = 3,12\text{ cm}$$

Nach [Long/Vanneste 1994] kann der Parameter α (s. D.3.1.1) für einen Rammpfahl unter Schwelllast in mitteldichtem Sand mit $\alpha = 0,17$ abgeschätzt werden. Die Bettungssteifigkeit im Bettungsmodulverfahren ist entsprechend mit dem Faktor $1000^{-0,17} = 0,31$ zu reduzieren. Eine Neuberechnung mit $n_h = 0,31 \cdot 6 = 1,86\text{ MN/m}^3$ ergibt das in Bild D3.5 dargestellte Ergebnis für die Biegelinie mit einer Pfahlkopfverschiebung von $2,64\text{ cm}$.

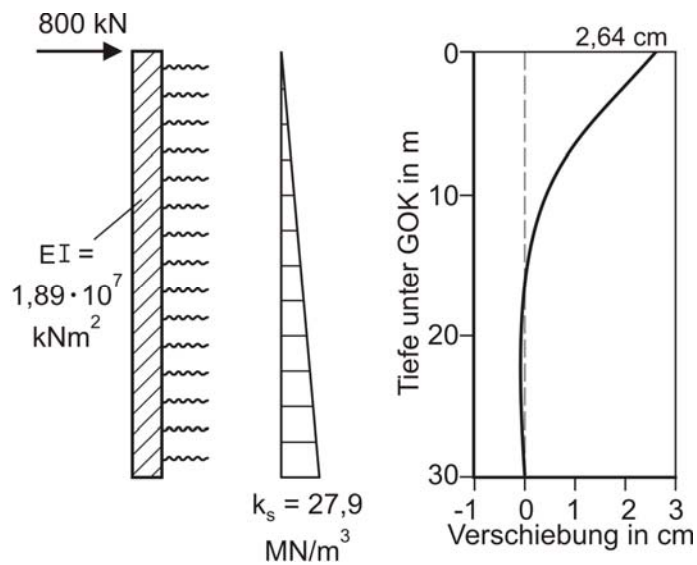


Bild D3.5: Biegelinie nach dem Bettungsmodulverfahren mit abgeminderter Bettungssteifigkeit

Da es sich bei dem betrachteten Fall um einen langen, flexiblen Pfahl handelt (ersichtlich aus der Biegelinie), kann auch der Parameter m in Gleichung (D3.2) zu $m=0,6\alpha = 0,6 \cdot 0,17 = 0,102$ (reine Horizontalkraftbelastung) ermittelt werden. Mit Gleichung (D3.2) kann dann die Pfahlkopfverschiebung nach 1000 Lastzyklen direkt zu

$$y_{zyk} = 1,31 \cdot 1000^{0,102} = 2,65 \text{ cm}$$

berechnet werden.

D.3.2.2 Prognose der Verformungsakkumulation unter Verwendung von Elementversuchen

Ein Stahlrohrpfahl mit einer Einbindelänge von $l = 25,0$ m und einem Durchmesser von $d = 1,5$ m sowie einer Blechdicke von $t = 0,025$ m wird durch eine zyklische Querbelastung mit einer maximalen Einwirkung $F_{\max} = 500$ kN am Pfahlkopf belastet. Der Pfahl wurde in einen dichten wassergesättigten Sand eingerammt.

In der Tabelle D.3.1 sind die zur Beschreibung des Sandes mit einer Lagerungsdichte von $D = 0,73$ eingesetzten Berechnungsparameter zusammengestellt.

Tabelle D.3.1 Parameter zur Beschreibung der Bodeneigenschaften für einen dichten Sand mit einer Lagerungsdichte von $D = 0,73$

φ in $^\circ$	K_a	K_{ur}	R_f	n	a	v	k in MN/m^3
40,4	1398,5	1950,7	0,90	0,875	0,31	0,3	44,4

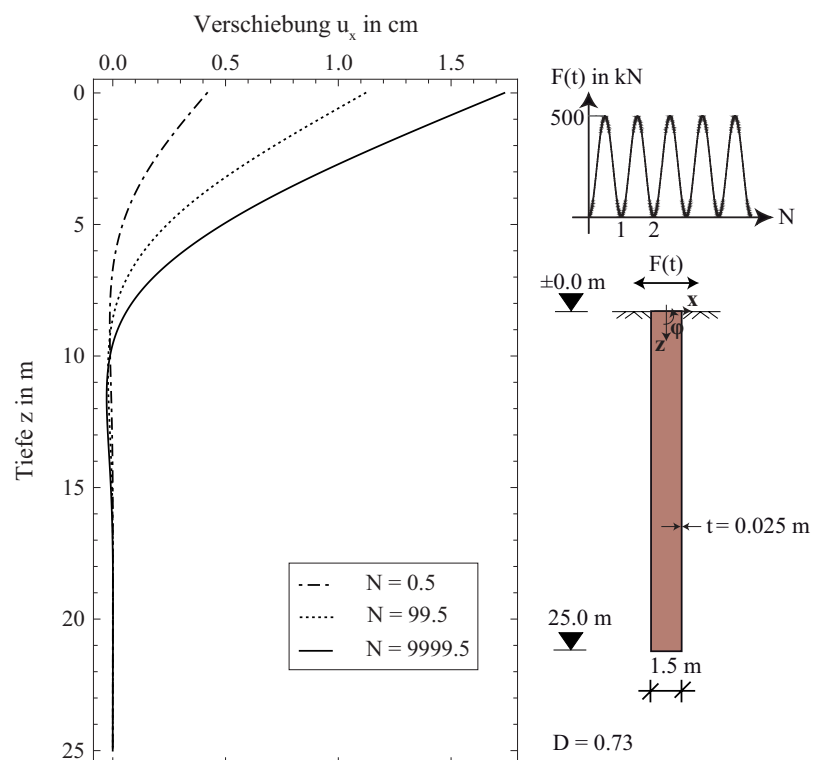


Bild D3.6: Verlauf der Pfahlbiegeline über die Einbindelänge bei unterschiedlicher Belastungszyklenanzahl N

Der Verlauf der Pfahlbiegeline über die Einbindelänge bei unterschiedlichen Belastungszyklenanzahl ist in Bild D3.6 dargestellt.

Die Pfahlkopfverschiebung bei einer Zyklenanzahl $N = 0,5$ beträgt $0,42$ cm. Sie nimmt mit steigender Zyklenanzahl zu und erreicht bei einer Zyklenanzahl von $N = 9999,5$ Lastzyklen einen Wert von $1,74$ cm.

D.4 Verfahren zur Ermittlung eines äquivalenten Ein-Stufen-Lastkollektivs

D.4.1 Berechnungsverfahren

D.4.1.1 Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch axial belastete Pfähle

(1) Für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und im Grenzzustand der Tragfähigkeit von axial zyklisch belasteten Pfählen erfordern die meisten zur Verfügung stehenden Rechenverfahren die Definition eines äquivalenten Ein-Stufen-Kollektivs.

(2) Das äquivalente Ein-Stufen-Kollektiv ist dabei als die zyklische Einwirkung von N_{eq} Zyklen mit dem Mittelwert F_{mitt} und der zyklischen Lastamplitude $F'_{zyk,eq}$ definiert, die im Hinblick auf die zyklische Beanspruchung die gleichen Auswirkungen hat wie der tatsächliche in der Regel stochastische Belastungsverlauf.

(3) Das Prinzip zur Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenanzahl für ein Bezugskollektiv für axial belastete Pfähle ist analog dem Vorgehen für zyklisch horizontal belastete Pfähle (vgl. D.4.1.2). Das Beispiel in D. 4.2.1 verdeutlicht das Vorgehen.

D.4.1.2 Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle

(1) Vorhandene Berechnungsansätze erlauben die Abschätzung der Verschiebungsakkumulation infolge einer vorgegebenen Zykluszahl einer gleichbleibenden Belastung (D.3.1.1). Ist die Größe der auftretenden Belastungen variabel, muss deshalb eine zyklische Ersatzbelastung mit einer zugehörigen äquivalenten Lastzyklenzahl definiert werden.

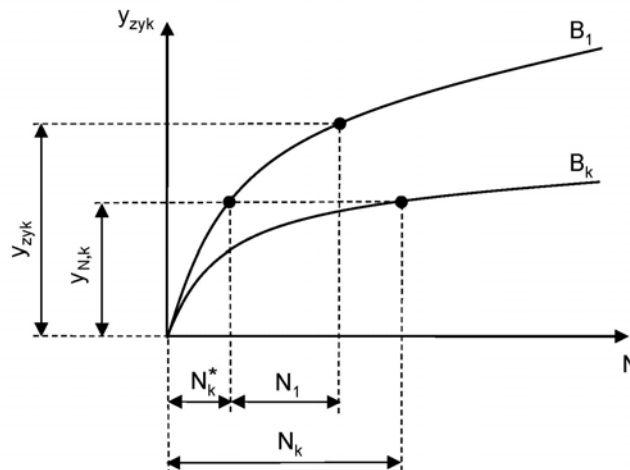


Bild D.4.1: Ermittlung der resultierenden Pfahlverschiebungen bei unterschiedlichen zyklischen Horizontalbelastungen bzw. Biegemomenten B_k am Pfahlkopf

(2) [Lin/Liao 1999] schlagen für die Berechnung der Pfahlverschiebungen unter zyklischen Lasten wechselnder Größe das von [Stewart 1986] beschriebene Dehnungssuperpositionsverfahren vor (Bild D.4.1). Für die Gesamtkopfverschiebung eines Pfahls unter n unterschiedlichen Belastungen B_k (Horizontalkraft und Biegemoment am Pfahlkopf) mit jeweils N_k Zyklen ergibt sich danach folgende Gleichung:

$$y_{zyk} = y_{1,1} \left[1 + t \ln \left(N_1 + \sum_{k=2}^n N_k^* \right) \right] \quad (D4.1)$$

mit

$y_{1,1}$ (statische) Pfahlkopfverschiebung infolge einmaliger ($N = 1$) Belastung B_1

N_1 Anzahl Zyklen der Belastung B_1

N_k^* äquivalente Zyklenzahl aus den Belastungen B_2 bis B_n

t Parameter für Systemverhalten infolge Zyklis (Anhang D3.1.1).

Die Belastung B_1 mit der Lastzyklenzahl N_1 stellt die äquivalente Lastgröße $B_{zyk,eq}$ dar. Die äquivalente Zyklenzahl ergibt sich aus

$$N_{eq} = N_1 + \sum_{k=2}^n N_k^* \quad (D4.2)$$

mit

$$N_k^* = e^{\frac{1}{t} \left(\frac{y_{1,k}}{y_{1,1}} (1 + t \ln N_k) - 1 \right)}$$

$y_{1,k}$ statische Pfahlkopfverschiebung infolge Belastung B_k

N_k Anzahl Zyklen der Belastung B_k

Es erfolgt also eine Wichtung der jeweiligen Belastung über die Größe der zugehörigen statischen Pfahlverschiebung.

(3) Das Verfahren geht für gleichbleibende zyklische Belastung von der Gültigkeit einer linearen Abhängigkeit der Verformungszunahme vom natürlichen Logarithmus der Lastzyklenzahl aus (s. Anhang D3.1.1):

$$y_{N,k} = y_{1,k} [1 + t \ln N_k] \quad (D4.3)$$

(4) Das Verfahren gilt zunächst auch nur für in gleicher Richtung wirkende Schwelllasten. Zusätzlich auftretende entgegengerichtet wirkende Lasten reduzieren die akkumulierte Pfahlverformung. Nach einem Vorschlag von [LeBlanc 2009] kann dies näherungsweise durch eine entsprechende Reduktion der Lastzyklenzahlen der in Akkumulationsrichtung auftretenden Lasten berücksichtigt werden.

D.4.2 Berechnungsbeispiele

D.4.2.1 Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch axial belastete Pfähle

Im vorhergehenden Abschnitt D.4.1 wird für die Ermittlung einer äquivalenten Belastung für horizontal zyklisch belastete Pfähle das Verfahren von [Lin/Liao1999] zur Anwendung vorgeschlagen. Auch für die zyklisch axial belasteten Pfähle kann dieses Verfahren Anwendung finden. Im Hinblick jedoch auf das im Abschnitt D.2.1.3 beschriebene Bemessungsverfahren erfolgt die Ermittlung in abgewandelter Weise.

Zugrunde gelegt wird der Pfahl aus dem Beispiel D.2.2.3. Der Pfahl weist eine Länge von 19 m, einen Durchmesser von 46 cm und einen axialen Pfahlwiderstand am Mantel von 2.500 kN auf. Der Spitzendruck wird hier nicht betrachtet. Es werden die folgenden Lastkollektive untersucht.

Tabelle D4.1

Lastkollektiv	zyklische Einwirkung in kN	mittlere statische Einwirkung in kN	Zyklenzahl	Mantelreibungsminderung in kN/m ²
1	700	700	200	9,31
2	500	900	100	2,5
3	700	100	10.000	9,24
4	400	400	1.000.000	0,37

Bei Anwendung des Formelapparates gemäß Abschnitt D 2.1.3 sollte auf der sicheren Seite liegend als Bezugskollektiv dasjenige mit der größten charakteristischen Mantelreibungsminderung $\Delta\tau_k$ (N) gewählt werden. Mithin ist das Kollektiv 1 als Bezugskollektiv maßgebend und es werden nun unter Verwendung dieses Bezugskollektivs die Schubspannungsminderungen mit den anderen Kollektiven dadurch simuliert, dass die Zyklenanzahl angepasst wird. Dies ergibt:

Tabelle D4.2

Kollektiv	äquivalente Zyklenanzahl
1	200
2 (1)	5
3 (1)	200
4 (1)	1,25
Summe	406

Damit wird das äquivalente Ein-Stufen-Kollektiv gebildet durch $F'_{zyk} = 700$ kN, $F_{mitt} = 700$ kN und $N_{eq} = 406$. Die Berechnung mit dem Formelapparat nach D2.1.3 ergibt das Folgende:

Tabelle D4.3

Ergebnis	Kollektiv 1	äquivalentes Ein-Stufen-Kollektiv
Zyklenanzahl	200	406
Ausnutzungsgrad	0,62	0,635
Schubspannungsminderung $\Delta\tau_k(N)$	9,31	10,75

D.4.2.2 Verfahren für die Ermittlung einer äquivalenten Lastzyklenzahl für zyklisch quer zur Pfahlachse belastete Pfähle

Es wird ein Gründungspfahl einer Offshore-Windenergieanlage unter reiner Schwellbelastung betrachtet (Monopile $D=5\text{m}$, $L=20\text{m}$, s. Bild D4.2).

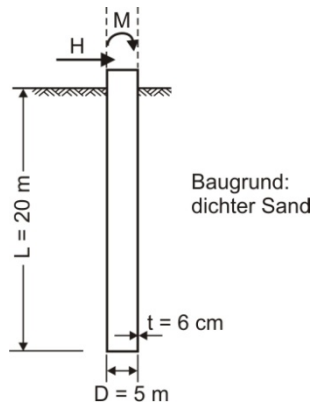


Bild D4.2: Monopile in dichtem Sand; System und Abmessungen

Anhand einer Analyse der auftretenden Belastungen aus Wind und Wellen wurden 7 Belastungsklassen gemäß Tabelle D4.4 ermittelt. Jede Belastungsklasse besteht aus einer Belastungskombination B_i (Horizontalkraft H und Kopfmoment M) mit der zugehörigen Anzahl von Lastzyklen N_i .

Tabelle D4.4 Belastungsklasseneinteilung, Lastzyklenzahlen und statische Pfahlkopfverschiebungen

Klasse	Belastungskombination		Anzahl Zyklen	Statische Pfahlkopfverschiebung $y_{l,i}$
	H in MN	M in MNm		
1	2,14	118,75	$N_1 = 5$	$y_{l,1} = 3,7\text{ cm}$
2	1,91	106,25	$N_2 = 40$	$y_{l,2} = 3,3\text{ cm}$
3	1,69	93,75	$N_3 = 250$	$y_{l,3} = 2,8\text{ cm}$
4	1,46	81,25	$N_4 = 1800$	$y_{l,4} = 2,3\text{ cm}$
5	1,24	68,75	$N_5 = 12000$	$y_{l,5} = 1,9\text{ cm}$
6	1,01	56,25	$N_6 = 80000$	$y_{l,6} = 1,5\text{ cm}$
7	0,79	43,75	$N_7 = 550000$	$y_{l,7} = 1,1\text{ cm}$

Aus einer Analyse des (statischen) Tragverhaltens des Pfahls unter den einzelnen Belastungskombinationen ergeben sich die ebenfalls in Tabelle D4.4 angegebenen statischen Pfahlkopfverschiebungen $y_{l,i}$.

Als äquivalente Lastgröße wird die größte Belastung (Belastungsklasse 1) gewählt. Der Parameter t wird mit $t = 0,20$ abgeschätzt. Die Auswertung der o.g. Gleichungen ergibt die in Tab. D4.4 zusammengestellten Lastzyklenzahlen N_k^* . Die äquivalente Lastzyklenzahl ist $N_{eq} = 73,3$. Die veränderlichen Belastungen können somit durch eine konstante Belastung ($H = 2,14$ MN, $M = 118,75$ MNm) mit 73,3 Zyklen ersetzt werden. Die resultierende Pfahlkopfverschiebung y_{Ges} beträgt für das Beispiel $y_{Ges} = 6,88$ cm.

Tabelle D4.5 Äquivalente Lastzyklenzahlen

Klasse	Belastungskombination		Anzahl Zyklen	Äquivalente Lastzyklenzahl
	H in MN	M in MNm		
1	2,14	118,75	$N_1 = 5$ (Bemessungslast)	5,00
2	1,91	106,25	$N_2 = 40$	15,63
3	1,69	93,75	$N_3 = 250$	19,34
4	1,46	81,25	$N_4 = 1800$	15,92
5	1,24	68,75	$N_5 = 12000$	10,92
6	1,01	56,25	$N_6 = 80000$	4,97
7	0,79	43,75	$N_7 = 550000$	1,52
Äquivalente Lastzyklenzahl $N_{eq} = 73,30$				

Alternativ könnte auch jede andere Belastungskombination als äquivalente Lastgröße gewählt werden. Wählt man die Belastungsklasse 2, so ergibt die Berechnung eine zugehörige äquivalente Lastzyklenzahl von $N_{eq} = 183,5$. Mit dieser äquivalenten Last ergibt sich dann selbstverständlich die gleiche resultierende Verschiebung y_{Ges} von rd. 6,9 cm.

Tabelle D4.6 Äquivalente Lastzyklenzahlen

Klasse	Belastungskombination		Anzahl Zyklen	Äquivalente Lastzyklenzahl
	H in MN	M in MNm		
1	2,14	118,75	$N_1 = 5$ (Bemessungslast)	5,00
2	1,91	106,25	$N_2 = 40$	9,11
3	1,69	93,75	$N_3 = 250$	5,73
4	1,46	81,25	$N_4 = 1800$	2,40
5	1,24	68,75	$N_5 = 12000$	0,96
6	1,01	56,25	$N_6 = 80000$	0,25
7	0,79	43,75	$N_7 = 550000$	0,05
Äquivalente Lastzyklenzahl $N_{eq} = 23,50$				

Alternativ könnte auch jede andere Belastungskombination als äquivalente Lastgröße gewählt werden. Wählt man die Belastungsklasse 2, so ergibt die Berechnung eine zugehörige äquivalente Lastzyklenzahl von $N_{eq} = 97,2$. Mit dieser äquivalenten Last ergibt sich dann selbstverständlich die gleiche resultierende Verschiebung y_{Ges} von rd. 4,9 cm.