

Zyklische Einwirkungen auf Pfähle

Neue Empfehlungen und Nachweiskonzepte der EA-Pfähle 2012

Prof. (em.) Dr.-Ing. **H.-G. Kempfert**, Universität Kassel;
Dr.-Ing. **S. Thomas**, Kempfert+Partner Geotechnik, Würzburg;

Kurzfassung

Zyklische Einwirkungen können das Pfahltragverhalten derart verändern, dass die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit gefährdet wird. Daher fordern zwar DIN 1054:2005-01 und DIN EN 1997-1 (Eurocode EC 7-1) in Verbindung mit DIN 1054:2010-12 bei „erheblichen“ zyklischen Einwirkungen, besondere Untersuchungen zum zyklischen Pfahltragverhalten vorzunehmen, nennen jedoch keine konkreten Untersuchungsmethoden oder Nachweisformen. Vom Unterausschuss UA AK 1.4/2.1 der Arbeitskreise „Baugrunddynamik“ (AK 1.4) und „Pfähle“ (AK 2.1) der DGGT wurden daher unter Berücksichtigung aktueller Forschungsergebnisse neue Empfehlungen und Nachweiskonzepte erarbeitet und in [1] als Kapitel 13 veröffentlicht. Die Empfehlungen sollen dazu beitragen, die Veränderungen im Pfahltragverhalten gegenüber statischen Einwirkungen abschätzen und beurteilen sowie die Standsicherheitsnachweise führen zu können.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die neuen Empfehlungen und Nachweiskonzepte für zyklisch belastete Pfähle. Dabei steht keine inhaltliche Zusammenfassung im Vordergrund, sondern eine durch wissenschaftliche Hintergrundinformationen ergänzte Erläuterung der maßgeblichen Festlegungen hinsichtlich der Einwirkungen und Widerstände von zyklisch belasteten Pfählen sowie eine Übersicht über Rechenmodelle und Nachweisformen einschließlich eines Berechnungsbeispiels.

1. Einleitung

Der Arbeitskreis AK 2.1 „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), der in Personalunion auch Normenausschuss NA005-05-07 „Pfähle“ ist, hat in den letzten Jahren die bekannte Situation mit der geringen Einflussnahme auf die Europäische Normung für die Pfahlthematik zum Anlass genommen, analog zu EAB, EAU, EBGEO usw. die maßgeblichen, besonders national geprägten Erfahrungen und Festlegungen, die verstreut in unterschiedlichen Publikationen vorlagen, als Sammelband in Form einer DGGT-Empfehlung unter dem Titel „EA-Pfähle“ zusammenzufassen. Die Empfehlungen wurden im Jahr 2007 in [2] veröffent-

licht. Seit Januar 2012 liegt nunmehr mit [1] eine 2. Auflage auf der Grundlage von DIN EN 1997-1 (Eurocode EC 7-1) und DIN 1054:2010-12 vor. In dieser 2. Auflage wurde auch ein neues Kapitel 13 unter der Überschrift „Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen“ neu aufgenommen, welches zunächst schwerpunktmäßig das Pfahltragverhalten und die Nachweisformen von Pfählen unter „erheblichen“ zyklischen Einwirkungen behandelt, die insbesondere bei Windenergieanlagen (offshore, onshore), aber z. B. auch im Verkehrswegebau oder bei Turmgründungen auftreten. In späteren Ausgaben der EA-Pfähle sollen dann auch differenziertere Regelungen für dynamische und stoßartige Einwirkungen erarbeitet werden.

Bereits die noch bauaufsichtlich gültige DIN 1054:2005-01 fordert bei zyklisch belasteten Pfählen entsprechende Nachweise, ohne dass dafür seinerzeit bei der Bearbeitung abgesicherte Nachweisformen und Verfahren vorlagen. Mit der bauaufsichtlichen Einführung der DIN EN 1997-1 (Eurocode EC 7-1) in Verbindung mit DIN 1054:2010-12 voraussichtlich bis Ende 2012 sind die Nachweisformen dahingehend weiter konkretisiert, dass bei der Bemessung von Pfählen unter erheblichen Schwell- und/oder Wechsellasten eine mögliche Verschlechterung des Pfahltragverhaltens eintreten kann und dies nachzuweisen ist. Dabei ist dann in DIN 1054:2010-12 auf die Regelungen in der EA-Pfähle verwiesen.

Auch bei den erforderlichen Nachweisen zur Gründung von Offshore-Windenergieanlagen werden von der Genehmigungsbehörde Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in [3] seit 2011 die Pfahlgründungsnachweise auf der Grundlage von DIN EN 1997-1 (Eurocode EC 7-1) und DIN 1054:2010-12 in Verbindung mit [1] gefordert.

2. Zyklische Einwirkungen

Unter zyklischen Einwirkungen auf Pfähle werden sind sich langsam wiederholende Belastungsvorgänge verstanden, infolge derer die Trägheitskräfte des Pfahl-Boden-Systems – anders als bei dynamischen und ggf. bei stoßartigen Einwirkungen – nicht berücksichtigt werden müssen.

DIN 1054:2010-12 unterscheidet zwischen „üblichen“ und „erheblichen“ zyklischen Einwirkungen. „Übliche“ zyklische Einwirkungen auf Pfähle im Sinne der DIN 1054:2010-12, A 2.4.2.1 A (8a) sind z. B. Belastungen aus Regellasten oder Baubetrieb und dürfen als veränderliche statische Einwirkungen behandelt werden. „Erhebliche“ zyklische Einwirkungen im Sinne der DIN 1054:2010-12, A 2.4.2.1 A (8b) können z. B. bei hohen Masten, Türmen, Schleusen oder

Offshore-Bauwerken auftreten. Die Auswirkungen auf das Pfahltragverhalten sind durch besondere Untersuchungen zu ermitteln, da es zu Entfestigungseffekten, Porenwasserdruck- und Verformungsakkumulation des Bodens kommen kann (Abschnitt 3). Die „erheblichen“ zyklischen Einwirkungen in axialer Richtung und quer zur Pfahlachse $F_{Q,rep,zyk}$ bzw. $H_{Q,rep,zyk}$, verkürzt als F_{zyk} bzw. H_{zyk} (zyklische Lastspanne) bezeichnet, ergänzen die repräsentativen Einwirkungen $F_{Q,rep}$ und $H_{Q,rep}$ gemäß DIN EN 1997-1 und DIN 1054:2010-12.

Im Zusammenhang mit zyklischen Einwirkungen auf axial und querbelastete Pfähle werden außerdem die folgenden Begriffe und Formelzeichen definiert, die auch anschaulich in Bild 1 dargestellt sind:

- zyklische Lastamplitude F'_{zyk} bzw. H'_{zyk} (halbe zyklische Lastspanne),
- mittlerer Lastanteil F_{mitt} bzw. H_{mitt} ,
- betragsmäßig kleinste Last F_{min} bzw. H_{min} ,
- betragsmäßig größte Last F_{max} bzw. H_{max} ,
- mittleres Lastniveau $X_{mitt} = F_{mitt} / R_{ult}$ bzw. $X_{mitt} = H_{mitt} / R_{ult}$,
- zyklisches Lastniveau $X_{zyk} = F'_{zyk} / R_{ult}$ bzw. $X_{zyk} = H'_{zyk} / R_{ult}$,
- Schwell- und Wechsellasten.

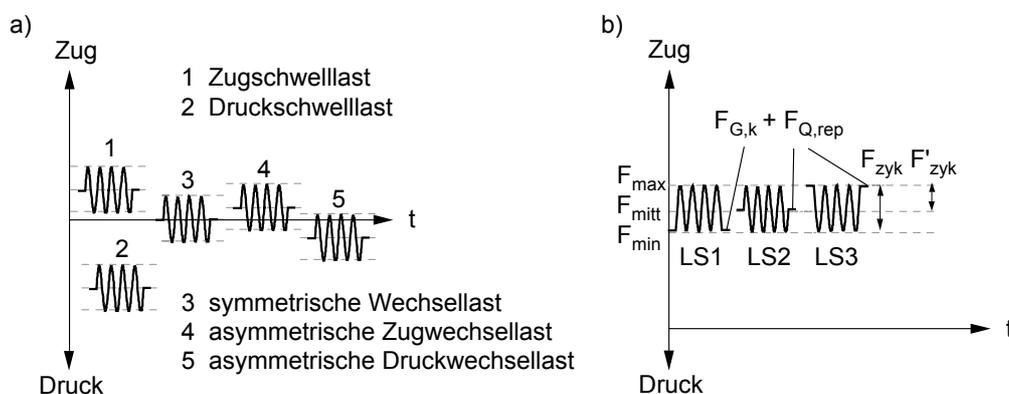


Bild 1: a) Belastungsarten von Pfählen unter zyklischen Einwirkungen, exemplarisch für eine axiale Belastung in der Lastsituation LS2 gemäß b) dargestellt,

b) Lastsituationen LS1 bis LS3, exemplarisch dargestellt anhand axialer Zugschwelllasten, die sinngemäß auch auf querbelastete Pfähle und andere Belastungsarten gemäß a) übertragen werden können

Die zur Definition des mittleren und zyklischen Lastniveaus gewählte Bezugsgröße $R_{ult} = R_g$ als Pfahlwiderstand im Grenzzustand der Tragfähigkeit bzw. dem Bruchzustand unter statischen Einwirkungen ist aufgrund der Regelungen in [4] – Verwendung unterschiedlicher

Streuungs- und Modellfaktoren sowie Teilsicherheitsbeiwerte bei der Ermittlung von R_{ult} – abhängig vom gewählten Verfahren zur Ermittlung der Bezugsgröße, d. h. es ergeben sich unterschiedliche Werte für $R_{ult,k}$, wenn statische und dynamische Pfahlprobelastungen oder Erfahrungswerte zugrunde liegen. Um eine etwa vergleichbare Bezugsgröße R_{ult} zu erhalten, ist bei der Ermittlung der Pfahlwiderstände aus Probelastungen auf Druck näherungsweise $R_{ult} = R_{(c,m)mitt}$ oder auf Zug näherungsweise $R_{ult} = R_{(t,m)mitt}$ und bei der Ermittlung der Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten $R_{ult} = R_{c,k}$ bzw. $R_{ult} = R_{t,k}$ anzusetzen. Da bei langen, biegeweichen, querbelasteten Pfählen eine Angabe von R_{ult} schwierig ist, gilt die Definition der Lastniveaus nur für axial belastete und kurze, starre, querbelastete Pfähle.

Durch den Bezug der mittleren und zyklischen Einwirkung auf den statischen Pfahlwiderstand R_{ult} ist es möglich, unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführte zyklische Pfahlprobelastungen miteinander zu vergleichen. Außerdem liefert das zyklische Lastniveau bei axial belasteten Pfählen einen ersten Anhaltspunkt, ob eine „erhebliche“ zyklische Einwirkung vorliegt: Sofern das zyklische Lastniveau kleiner als 10 % ist, müssen keine besondere Untersuchungen zum zyklischen Pfahltragverhalten durchgeführt werden und die zyklische Einwirkung darf als veränderliche Einwirkung quasi-statisch behandelt werden.

3. Tragverhalten und Widerstände

Das gegenüber statischen Einwirkungen stark veränderte Pfahltragverhalten wird hauptsächlich durch plastische Verformungen des Bodens im Pfahlnahbereich infolge von Auflockerungs- oder Verdichtungsvorgängen und durch Entfestigungseffekte des Bodens infolge Porenwasserdruckakkumulation und Spannungsänderungen verursacht.¹ Diese Vorgänge führen hauptsächlich zu zwei Phänomenen im Pfahltragverhalten:

- Akkumulation der zyklischen Verschiebung des Pfahls.
- Änderung der Pfahltragfähigkeit.

Die zyklische Axialverschiebung s_{zyk} oder Horizontalverschiebung y_{zyk} des Pfahls wird mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen entweder größer oder kleiner und führt zum progressiven Versagen bzw. zur zyklischen Beruhigung (Bild 2a). Unter ungünstigen Randbedingungen, insbesondere unter axialer Belastung bei Wechsellasten mit hohen zyklischen Lastniveaus im

¹ Erkenntnisse aus umfangreichen Untersuchungen zum Tragverhalten von axial und querbelasteten Pfählen, z. B. nach [5], [6], [7] und [8].

nichtbindigen Boden, kann es auch zur Umkehr der Verschiebungsrate kommen.² Beim derzeitigen Kenntnisstand zum zyklischen Pfahltragverhalten ist der Lastzyklus, ab dem es zur Umkehr der Verschiebungsrate kommen kann, nicht oder nur sehr ungenau zu prognostizieren. Aufgrund der Zunahme der Pfahlverschiebungen bei zunehmender Anzahl an Lastzyklen kann auch bei zyklischer Beruhigung des Pfahls die Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) gefährdet werden.

Außerdem führt die zyklische Belastung zur Änderung der Pfahltragfähigkeit. Im ungünstigen Fall vermindert sich der post-zyklische Pfahlwiderstand $R_{ult}(N)$ (Bild 2b und 2c) und es kommt zur Gefährdung der „äußeren“ Standsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS). Ursache für die Abnahme der Pfahltragfähigkeit ist insbesondere die Minderung des Bruchwertes der Pfahlmantelreibung. Unter günstigen Randbedingungen hingegen kann die post-zyklische Pfahltragfähigkeit, z. B. unter axialer Belastung im bindigen Boden bei niedrigen zyklischen Lastniveaus, sogar gesteigert sein.³

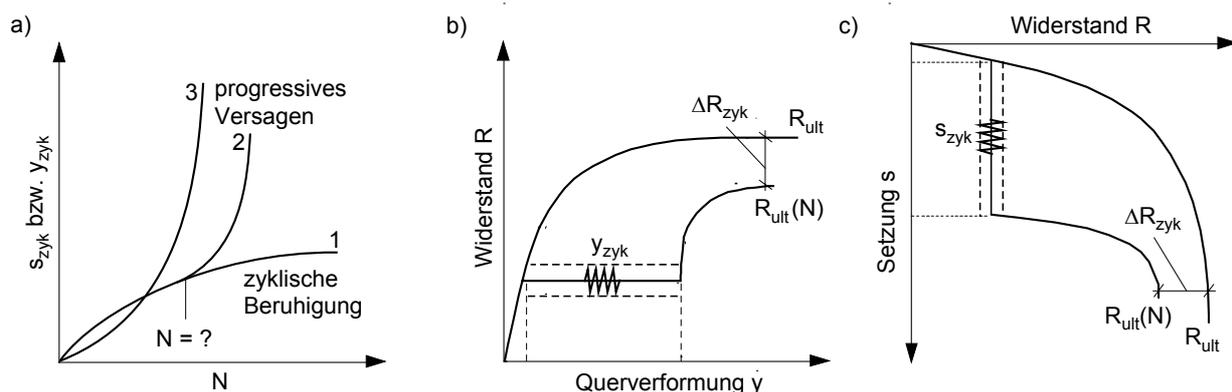


Bild 2: Auswirkung der zyklischen Belastung auf das Pfahltragverhalten:

- a) Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls,
- b) Änderung der Pfahltragfähigkeit langer, biegeweicher, quer zur Pfahlachse belasteter Pfähle,
- c) Änderung der Pfahltragfähigkeit axial belasteter Pfähle

Um die Standsicherheitsnachweise für zyklisch belastete Pfähle führen zu können (Abschnitt 5), ist es erforderlich, das charakteristische Pfahltragverhalten näherungsweise zu ermitteln. Die Vielzahl der o. g. Einflussfaktoren und Phänomene zeigen aber, dass die Pfahl-Boden-Wechselwirkung sehr komplex ist und es viel Erfahrung bei der Prognose des zykli-

² Die Modellversuche in [8] und [11] zeigen, dass sich bei Pfählen mit abnehmender Verschiebungsrate diese umkehren kann, d. h. dass bei weiterer Belastung der Pfahl progressiv versagt.

³ Ergebnisse von Modell- und Feldversuchen in [8] bzw. [9].

schen Tragverhaltens erfordert. Die zuverlässigste Methode zur Bestimmung des zyklischen Pfahltragverhaltens ist es, zyklische Pfahlprobelbelastungen auszuführen. Dadurch können sowohl die herstellungsbedingten Veränderungen im Spannungs- und Verformungszustand des Bodens als auch die komplexen Wechselwirkungen zwischen Pfahl und Boden bei der zyklischen Belastung erfasst werden. Sofern zyklische Pfahlprobelbelastungen aber nicht oder nicht ausreichend umgesetzt werden können, darf eine Abschätzung des zyklischen Pfahltragverhaltens auch auf Grundlage von Rechenmodellen erfolgen, die an Versuchen kalibriert sind.

4. Rechenmodelle

In [1] sind verschiedene Berechnungsansätze zur Prognose der zyklischen Verschiebung des Pfahls und des post-zyklischen Pfahlwiderstands von zyklisch axial und quer zur Pfahlachse belasteten Pfählen zusammengestellt (Bild 3). Zudem werden in [1] die Berechnungsgrundlagen erläutert, Literaturhinweise gegeben und die Anwendung der Verfahren anhand eines Beispiels erklärt.

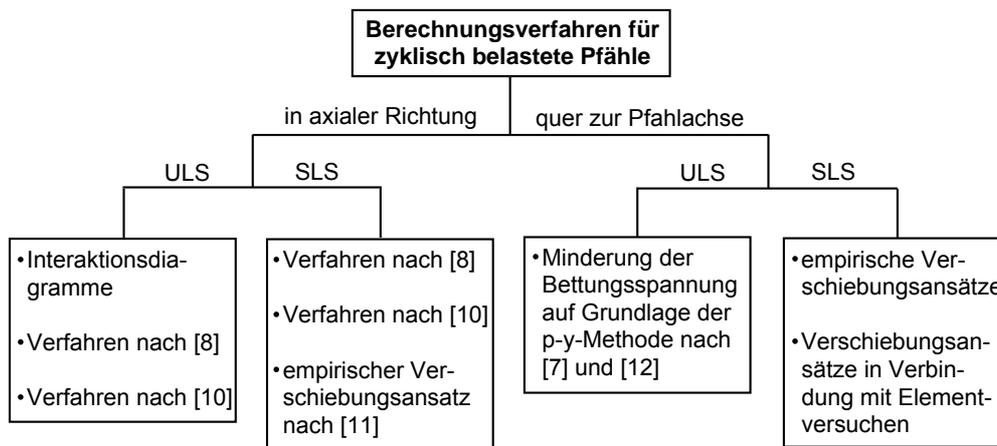


Bild 3: Übersicht über die in [1] beschriebenen Berechnungsverfahren für zyklisch axial und quer zur Pfahlachse belastete Pfähle

Bei den Verfahren ist zu beachten, dass diese bisher überwiegend innerhalb von Forschungsprojekten überprüft und dabei teilweise an Modell- und Großversuchen kalibriert wurden. Da noch keine umfangreichen projektbezogenen Erfahrungen vorliegen, stellen die Berechnungsverfahren derzeit noch keine allgemein anerkannten Regeln der Technik dar.

Zudem wird in den Verfahren davon ausgegangen, dass die in Bild 1b idealisierten Lastsituationen LS1 bis LS3 näherungsweise das gleiche Pfahltragverhalten verursachen. Außerdem ist

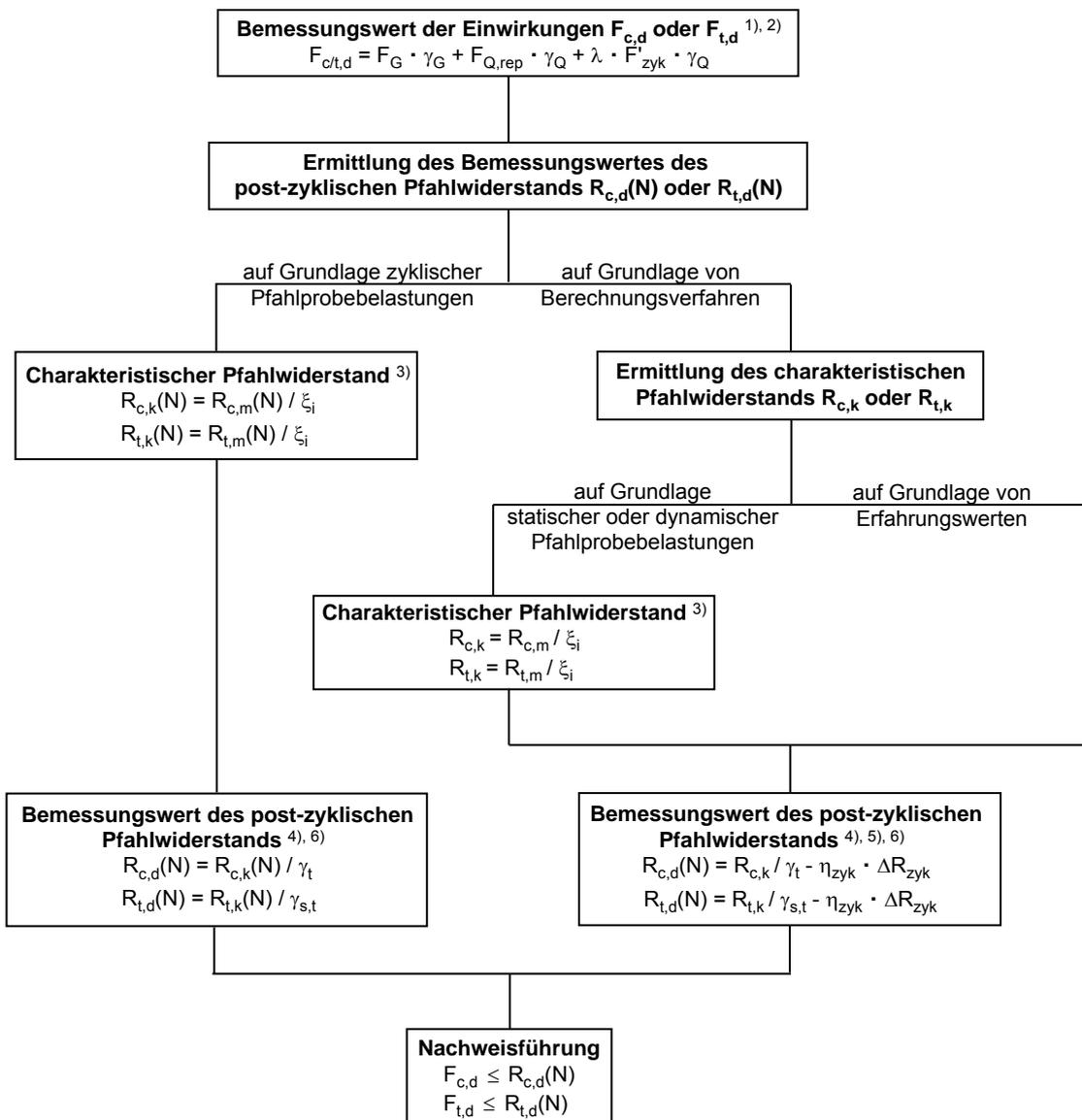
zur Anwendung der Rechenmodelle die Ermittlung eines zur tatsächlichen Einwirkung äquivalenten Ein-Stufen-Kollektivs erforderlich, da sich die in der Praxis vorkommenden zyklischen Einwirkungen üblicherweise mit unterschiedlicher Belastungsamplitude und -dauer (stochastische Einwirkung) wiederholen. Das Ein-Stufen-Kollektiv bildet dann eine stochastische Einwirkung als harmonische Einwirkung mit der mittleren Belastung $F_{\text{mitt,eq}}$ und zyklischen Lastamplitude $F'_{\text{zyk,eq}}$ und einer zugehörigen äquivalenten Lastzyklenzahl N_{eq} ab. Mögliche Vorgehensweisen zur Ermittlung äquivalenter Ein-Stufen-Kollektive werden ebenfalls in [1] vorgestellt.

5. Standsicherheitsnachweise

Beim Nachweis der „äußeren Tragfähigkeit“ zyklisch axial belasteter Pfähle im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ist wie auch unter statischer Belastung nachzuweisen, dass der Bemessungswert der Einwirkungen kleiner als der Bemessungswert des Widerstands ist. Bei der Ermittlung des Bemessungswertes des Widerstands nach der zyklischen Belastung $R_{\text{ult,d}}(N)$ ist jedoch zu berücksichtigen, ob der charakteristische post-zyklische Pfahlwiderstand $R_{\text{ult,k}}(N)$ direkt aus zyklischen Pfahlprobelastungen oder indirekt auf Grundlage von Berechnungsverfahren abgeleitet wurde (Bild 4). Dabei ist außerdem zu beachten, dass die Teilsicherheitsbeiwerte bei der Ermittlung des Bemessungswertes des Widerstands aus Erfahrungswerten und aus Pfahlprobelastungen verschieden sind.

Bei zyklisch quer zur Pfahlachse belasteten Pfählen darf beim Nachweis der „äußeren“ Tragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) nach der Bestimmung einer zyklischen Erdwiderstandsspannung und unter Ansatz von Bettungssteifigkeiten für die zyklische Belastung analog wie bei statischen Einwirkungen vorgegangen werden.

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) darf sowohl in axialer Richtung als auch bei querbelasteten Pfählen durch den Vergleich von vorhandenen und projektspezifisch festzulegenden, zulässigen Setzungen oder Hebungen bzw. horizontalen Verschiebungen und Verdrehungen geführt werden. Die vorhandenen Verschiebungen und Verdrehungen können auf Grundlage zyklischer Pfahlprobelastungen oder durch Rechenmodelle abgeschätzt werden.



- 1) Faktor λ = 0,1 oder 2, sodass F_d maximal wird
- 2) Teilsicherheitsbeiwerte γ_G und γ_Q nach [4]
- 3) Streuungsfaktoren ξ_i für statische, zyklische und dynamische Pfahlprobelastungen nach [4]
- 4) Teilsicherheitsbeiwerte γ_t und γ_{s,t} nach [4]
- 5) Abnahme Pfahltragfähigkeit ΔR_{zyk}, ermittelt mit einem Berechnungsverfahren
- 6) Modellfaktor η_{zyk} nach [1]

Bild 4: Ablaufdiagramm zur Vorgehensweise beim Nachweis der „äußeren“ Tragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) von zyklisch axial belasteten Pfählen, nach EA-Pfähle [1]

6. Berechnungsbeispiel

Nachfolgend werden anhand des Beispiels aus [8] exemplarisch für einen zyklisch axial belasteten Pfahl unter Druckschwelllasten die Standsicherheitsnachweise nach [1] in der Bemessungssituation BS-P geführt. Der betrachtete Bohrpfahl hat einen Durchmesser von 1,20 m und eine Länge von 8,50 m. Der Pfahl wird durch ein, z. B. gemäß [1] ermitteltes, äquivalentes Ein-Stufen-Kollektiv mit einer mittleren Einwirkung von $F_{\text{mitt}} = 1.150 \text{ kN}$, einer zyklischen Lastamplitude von $F'_{\text{zyk}} = 650 \text{ kN}$ und einer äquivalenten Lastzyklenzahl von $N_{\text{eq}} = 1.000$ belastet (Bild 5). Die zulässige Verschiebung des Pfahls wird zu zul. $s_k = 3,0 \text{ cm}$ festgelegt.

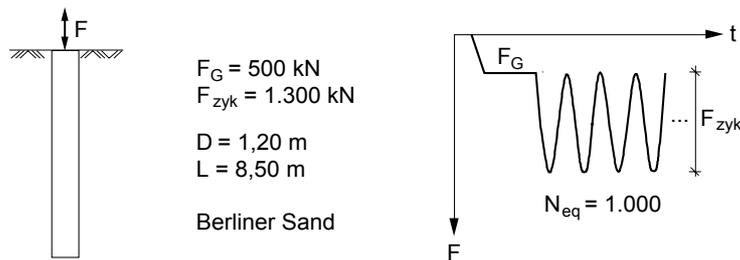


Bild 5: Randbedingungen im Berechnungsbeispiel, aus [8]

Die statische Grenztragfähigkeit des Pfahls wurde mit einer statischen Pfahlprobebelastung zu $R_{\text{ult}} = (R_{c,m})_{\text{min}} = 4.600 \text{ kN}$ ermittelt (Bild 6a). Das zyklische und post-zyklische Pfahltragverhalten wurde mit dem Berechnungsverfahren ZYKLAX nach [8] ermittelt. Demnach beträgt die post-zyklische Grenztragfähigkeit nach 1.000 Lastzyklen nur noch $R_{\text{ult}}(N) = 4.250 \text{ kN}$, womit eine Minderung der statischen Pfahltragfähigkeit um $\Delta R_{\text{zyk}} = 350 \text{ kN}$ während der zyklischen Belastung stattgefunden hat (Bild 6a). Die berechnete plastische Verschiebung des Pfahls nach 1.000 Lastzyklen beträgt $s_{\text{pl}} = 1,55 \text{ cm}$ (Bild 6b).

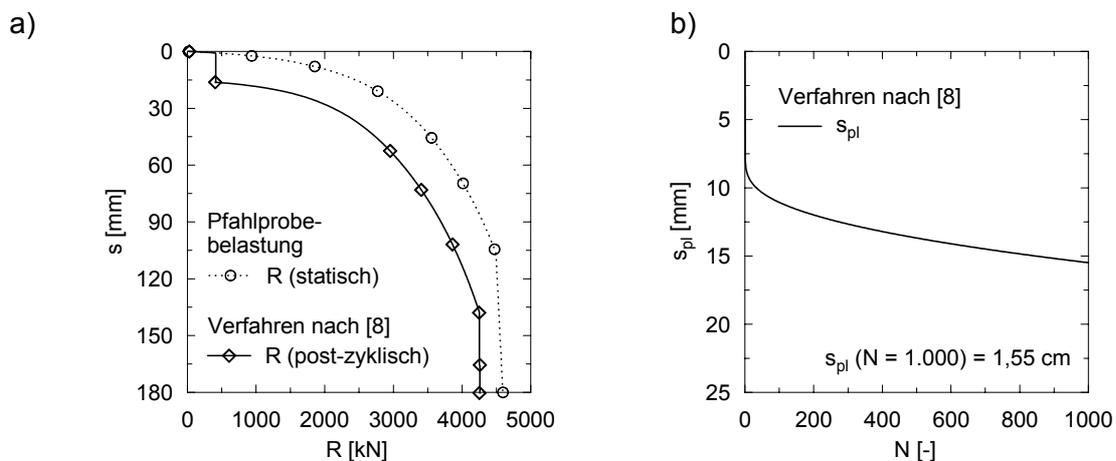


Bild 6: Mit dem Berechnungsverfahren ZYKLAX ermitteltes Pfahltragverhalten, nach [8]:

- a) statisches und post-zyklisches Pfahltragverhalten,
- b) plastische Verschiebung des Pfahls

Beim Nachweis der „äußeren“ Standsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) wird gemäß der in Bild 4 dargestellten Vorgehensweise vorgegangen: Der Bemessungswert der Einwirkungen aus der statischen Belastung und den Druckschwelllasten ergibt sich mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach [4] zu

$$F_{c,d} = F_G \cdot \gamma_G + \lambda \cdot F'_{zyk} \cdot \gamma_Q = 500 \cdot 1,35 + 2 \cdot 650 \cdot 1,50 = 2.625 \text{ kN} \quad (1)$$

Der charakteristische Pfahlwiderstand unter statischer Belastung wird aus dem Pfahlprobebelastungsergebnis mit dem Streuungsfaktor nach [4] abgeleitet zu

$$R_{c,k} = R_{c,m} / \xi_2 = 4.600 / 1,35 = 3.407 \text{ kN} \quad (2)$$

Daraus berechnet sich der Bemessungswert des post-zyklischen Pfahlwiderstands auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse, mit dem Modellfaktor nach [1] und dem Teilsicherheitsbeiwert nach [4] zu

$$R_{c,d}(N) = R_{c,k} / \gamma_t - \eta_{zyk} \cdot \Delta R_{zyk} = 3.407 / 1,10 - 1,20 \cdot 350 = 2.677 \text{ kN} \quad (3)$$

Der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) des Pfahls nach 1.000 Lastzyklen ist somit erfüllt:

$$F_{c,d} = 2.625 \text{ kN} < 2.677 \text{ kN} = R_{c,d}(N) \quad (4)$$

Der Nachweis der Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) wird mit der vorhandenen Verschiebung des Pfahls nach 1.000 Lastzyklen gemäß Bild 6b geführt:

$$\text{vorh. } s_k = 1,55 \text{ cm} < 3,00 \text{ cm} = \text{zul. } s_k \quad (5)$$

Die Standsicherheit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist somit ebenfalls nachgewiesen.

7. Literaturrehinweise

- [1] Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ EA Pfähle. Arbeitskreis Pfähle (AK2.1) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2012
- [2] Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ EA Pfähle. Arbeitskreis Pfähle (AK2.1) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 1. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2007
- [3] Anwendungshinweise für den Standard „Konstruktive Ausführung von Offshore Windenergieanlagen“ des BSH, Stand: 02.02.2011
- [4] Handbuch EC7-1: Geotechnische Bemessung, Band 1: Allgemeine Regeln. 1. Auflage, Beuth Verlag, 2011
- [5] Taşan, H. E.: Zur Dimensionierung der Monopile-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen. Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Technischen Universität Berlin, Heft 52, 2011
- [6] Hinz, P.: Beurteilung des Langzeitverhaltens zyklisch horizontal belasteter Monopile-Gründungen. Mitteilungen Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen, Heft 37, 2009
- [7] Dührkop, J.: Zum Einfluss von Aufweitungen und zyklischen Lasten auf das Verformungsverhalten lateral beanspruchter Pfähle in Sand. Veröffentlichungen des Instituts Geotechnik und Baubetrieb, Technische Universität Hamburg-Harburg, Band 20, 2009
- [8] Thomas, S.: Zum Pfahltragverhalten unter zyklisch axialer Belastung. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 25, 2011
- [9] Baumbach, J., Schwarz, P., Vogt, N.: Axial zyklisch belastete Mikropfähle in bindigen Böden. DIBt-Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ZP 52-5-11.48.1-1273/07, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2010
- [10] Kirsch, F., Richter, T.: Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen. Bautechnik, Band 88, Heft 2, S. 113-120
- [11] Schwarz, P.: Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung. Schriftenreihe Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, TU München, Heft 33, 2002
- [12] API RP 2A-WSD: Recommended Practice for Planning, Designing and Construction Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design. 21st Edition, American Petroleum Institute, Washington, 2007