

# Zum axialen Pfahltragverhalten unter zyklisch-dynamischer Belastung

## Axial Pile Bearing Capacity under Cyclic Loading

Prof. Dr.-Ing. **H.-G. Kempfert**, Dipl.-Ing. **S. Thomas**,  
Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel

### Kurzfassung

Zyklisch-dynamisch beanspruchte Pfähle infolge Schwell- oder Wechsellasten weisen in der Regel im Vergleich zu statisch belasteten Pfählen eine deutlich geringere Tragfähigkeit auf. Dies wird auch in der neuen DIN 1054:2005-01 deutlich hervorgehoben, wobei das Pfahltragverhalten unter zyklisch-dynamischen Einwirkungen zum jetzigen Zeitpunkt nur ansatzweise durch entsprechende wissenschaftliche und praktische Untersuchungen bekannt ist.

Im Beitrag wird ein ausgewählter Kenntnisstand auf Grundlage von Literaturlauswertungen sowie Ergebnissen an zwei Pfahlprobebelastungsstandorten zusammenfassend dargestellt. Die zyklischen Pfahlprobebelastungen wurden als Schwell- und als Wechselbelastung an Großbohrpfählen durchgeführt.

Erste vorhandene Berechnungsansätze zur Berücksichtigung zyklisch-dynamischer Lasten auf das axiale Tragverhalten werden vergleichend behandelt. Ferner wird ein Ausblick auf an der Universität Kassel angelaufene Forschungen zur Thematik gegeben.

### Abstract

The behaviour of piles subjected to cyclic loading is different compared to the behaviour of piles subjected to static loading. Normally piles under cyclic loading show explicitly lower bearing capacity. This situation has also been highlighted in the new the German code of standards DIN 1054:2005-01. At present, the pile performance under to cyclic loads has barely been investigated by practical and scientific approaches.

This paper summarizes the state of knowledge based on a literature study and results of two pile load tests. The cyclic pile load tests are conducted on large-diameter bored piles in the form of repeated and alternating loading.

The available design approaches which consider cyclic loading in axial bearing behaviour of piles are also presented. Finally, an overview of current research activities at the University of Kassel on this topic are presented.

## 1. Einleitung

Viele Gründungskonstruktionen von Ingenieurbauwerken werden neben durch rein statisch wirkende Lasten zusätzlich auch durch zeitlich veränderliche Lasten beansprucht. Eine derartige zyklisch-dynamische Belastung kann durch Wellen, wie z.B. bei Offshore- und Küstenbauwerken oder durch Wind, wie z.B. bei Windkraftanlagen und Starkstrommasten hervorgerufen werden. Weitere typische Beispiele für zyklisch-dynamisch belastete Bauwerke sind Dockanlagen, Silos, Maschinenfundamente und Bahnstrecken, siehe Bild 1.

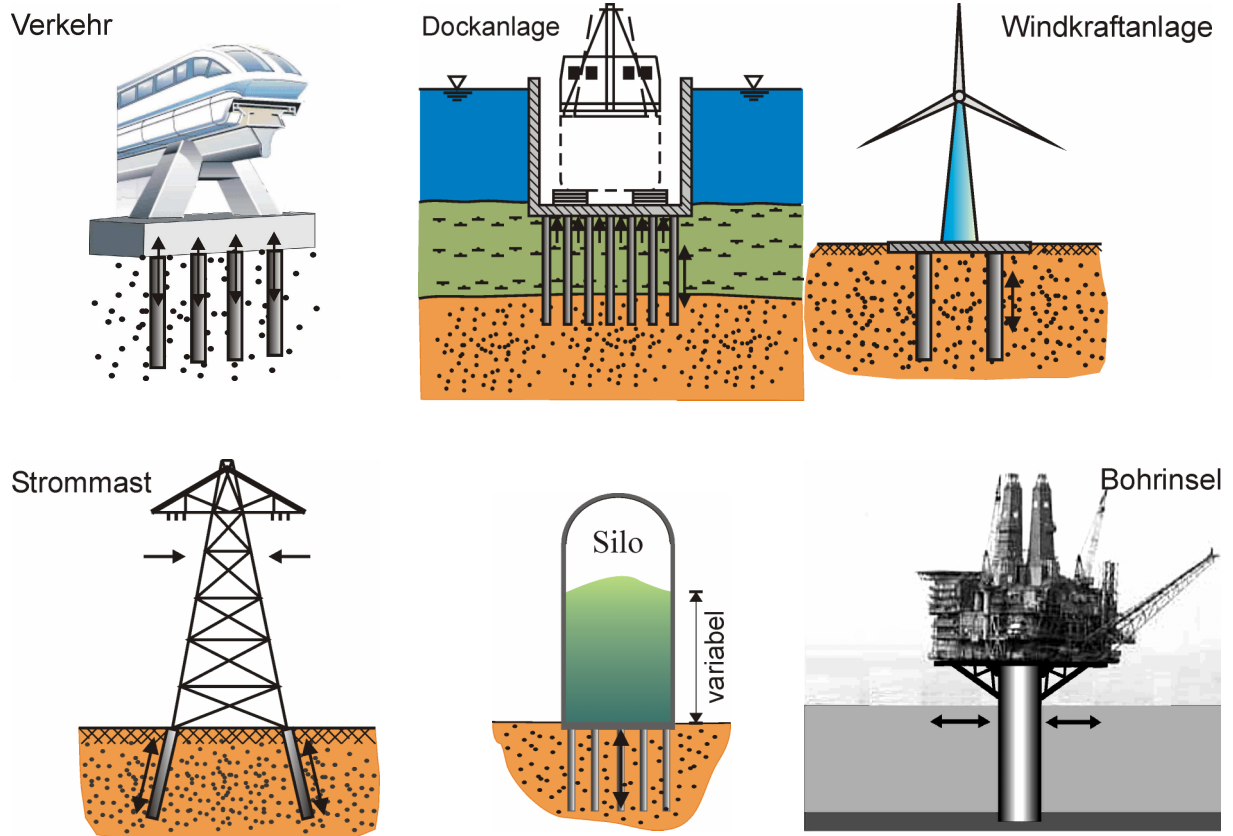


Bild 1: Typische zyklische Pfahlbelastungen bei Ingenieurbauwerken

Die Bodendynamik unterscheidet zyklische, sich langsam wiederholende Belastungen mit elastischen und plastischen Verformungsanteilen, wobei Trägheitskräfte vernachlässigt werden können, und dynamische Belastungen mit vorwiegend elastischen Bodenverhalten bei Berücksichtigung von Trägheitskräften. Eine näherungsweise Einteilung in die Belastungsarten zyklisch, zyklisch-dynamisch und dynamisch wurde bezogen auf geotechnische Bauwerke in [1] anhand des Frequenzbereichs bezogen auf die Baugrundbeanspruchung vorgenommen, siehe Tabelle 1. Dabei sind die Frequenzbereichsgrenzen aber durchaus überlap-

pend und in Tabelle 1 nur als Orientierung anzusehen. Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der drei Beanspruchungsarten.

Tabelle 1: Frequenzabhängige Belastungsarten und näherungsweise begriffliche Einordnung für geotechnische Bauwerke, nach [1]

	zyklisch	zyklisch-dynamisch	dynamisch
Frequenzbereich	$0 < f \leq 1$ Hz	$1 < f \leq 10$ Hz	$f > 10$ Hz
Betrachtungszeitraum	lang	lang	kurz
Trägheitskräfte	nein	ja	ja
Materialverhalten	elastisch/plastisch	elastisch/plastisch	elastisch

Das Tragverhalten von Pfählen unter zyklischer Belastung ist von verschiedenen Faktoren abhängig, die bisher zum Teil nur ansatzweise erforscht sind. Hier wären in erster Linie die unterschiedlichen Belastungsarten Schwell- und Wechselbelastung zu nennen. Aber auch die zyklische Lastspanne, die Lastwechselzahl und die Belastungsfrequenz haben einen wesentlichen Einfluss auf das Pfahltragverhalten. Des Weiteren ist die Bodenart zu berücksichtigen, wobei neben der generellen Unterscheidung in bindige oder nicht bindige Böden auch ein unterschiedliches Pfahltragverhalten bei erdfeuchten oder wassergesättigten (Pfähle liegen häufig unter dem Grundwasserspiegel) Böden vorliegt.

In DIN 1054:2005-01 wird im Abschnitt 8.4.6 „Pfahlwiderstände bei zyklischen und dynamischen Einwirkungen“ stärker als früher auf die zyklische Belastung eingegangen. Basierend auf den sehr umfangreichen Versuchen in [2] sind im informativen Anhang D.2 der Norm Anhaltswerte für charakteristische Lastspannen für verpresste Mikropfähle unter axialer Schwell- und Wechselbelastung für den Grenzzustand GZ 2 angegeben. Diese Werte gelten jedoch zunächst nur für verpresste Mikropfähle in mindestens mitteldicht gelagerten Böden oberhalb des Grundwassers.

## 2. Zum Verhalten von Pfählen unter zyklischer Belastung an Pfahlversuchen

Geht man vom allgemeinen Verhalten der Böden unter zyklischer Last aus, so können z.B. nach [3] die Kategorien *schrittweises Versagen*, *Beruhigung* und *shakedown* unterschieden werden. In [4] wird das Verhalten des Bodens unter Zyklik so beschrieben, dass ein *rein elastisches Verhalten* vorliegt, wenn sich der Spannungspfad nur im elastischen Bereich befindet und keine irreversiblen Deformationen erzeugt werden. Außerdem wird dort die Bezeichnung *alternierende Plastizität* eingeführt, bei der der Spannungspfad nach einer gewis-

sen Anzahl von Lastwechseln nur noch alternierend plastisches Verhalten unter Ausbildung einer Hysteresiskurve zeigt, während die kumulativen Gesamtverformungen gegen Null tendieren.

In der Literatur über zyklisch axial belastete Pfähle finden sich Modell-, Element- und Feldversuche sowie numerische Untersuchungen. In [5] und [2] sind jeweils ausführliche Literaturrecherchen enthalten. Betrachtet man die in der Literatur vorhandenen Laboruntersuchungen, wird deutlich, dass sich die mehrheitliche Anzahl von Untersuchungen zum zyklischen Tragverhalten von axial belasteten Pfählen mit einer rein phänomenologischen Beschreibung des Widerstand-Setzungsverhaltens beschäftigt. Nur wenige Untersuchungen versuchen eine Eingliederung in übergreifende stoffliche Konzepte. Schwerpunkt der folgenden Ausführungen sollen Erfahrungen aus zyklischen Belastungsversuchen an großmaßstäblichen Pfählen im Feld sein.

In [6] sind die Ergebnisse von Probelastungen an 200 Schraubenpfählen unter zyklischer Belastung mit stufenweiser erhöhter Lastamplitude in weichen bis steifen Tönen sowie in erdfeuchten und vollständig wassergesättigten Sanden von lockerer bis mitteldichter Lagerungsdichte beschrieben. Die untersuchten Schraubenpfähle hatten Durchmesser von 0,25 m bis 1,0 m und Pfahllängen bis zu 7,0 m. Die statischen Druck- und Zugversuche wurden ebenso wie die zyklischen Versuche mit Schwell- und Wechselbelastung ausgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden.

- Unter zyklischer Belastung wurde bei allen Versuchen eine Tragfähigkeitsreduzierung gegenüber der statischen Belastung festgestellt, wobei das Tragverhalten bei auf Druck beanspruchten Pfählen erwartungsgemäß günstiger als bei Zugbeanspruchung ausfiel.
- Aus den Versuchen wurden Empfehlungen für Abminderungsfaktoren für eine Berücksichtigung der zyklischen Belastung in Abhängigkeit von der Boden- und Belastungsart zwischen 0,3 bis 0,8 gegenüber dem statischen Tragverhalten abgeleitet, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: Abminderungsfaktoren zum zyklischen Pfahltragverhalten gegenüber statischen Belastungen nach [6]

Bodenart		Belastungsart		
		stufenförmige Laststeigerung	Schwelllast	Wechselast
Ton	fest, sehr steif, steif	0,8	0,7	0,7
	weich-steif	0,8	0,7	0,6
	weich	0,8	0,6	0,4
	sehr weich	0,8	0,5	0,3
Sand	teilweise gesättigt	0,8	0,7	0,7
	gesättigt und trocken	0,8	0,5	0,3

Mit [7 bis 9] liegen Untersuchungen an ca. 5 m langen Stahlrammpfählen mit Durchmessern von 15,3 cm vor. Die statische und zyklische Belastung erfolgte mit Zyklenzahlen zwischen 100 und 1000 in überkonsolidierten Tonen, die Zyklendauer betrug bei den Versuchen sechs Sekunden. Bild 2 zeigt das aus den Versuchsergebnissen abgeleitete *Interaction Diagramm*, in dem auf der Ordinate die zyklische Lastamplitude und auf der Abzisse der statische Anteil der Belastung jeweils auf die statische Grenzlast bezogen aufgetragen ist. Die Versuchsergebnisse der Schwell- und der Wechselastversuche konnten somit als Punkte eingetragen werden. Anschließend wurden diejenigen Punkte, die zum über Verformungskriterien definierten Versagen führten, bereichsweise verbunden.

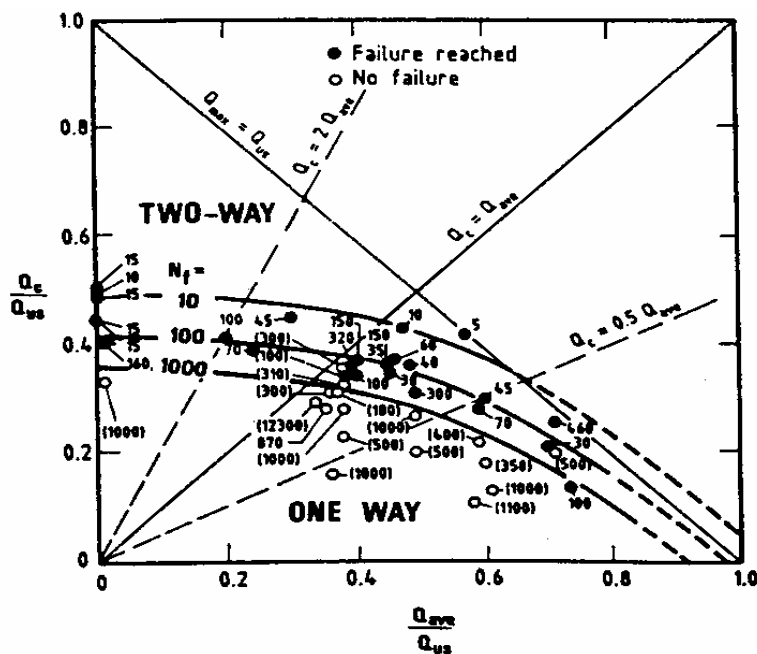


Bild 2: Interaction Diagram des NGI zum Pfahltragverhalten unter zyklischer Belastung, aus [2]

In [10] wird von einer statischen und zyklischen Pfahlprobelastung an Bohrpfählen in wenig tragfähigen Sand-Schluff-Gemischen und in Beckenton für ein Tunnelbauwerk berichtet. Die Bohrpfähle hatten einen Durchmesser von 0,9 m und waren im Mittel 17 m lang. Die statischen und zyklischen Belastungsphasen sind dem Belastungsprogramm in Bild 3, die zugehörige Widerstandsetzungs- bzw. Hebungslinie dem Bild 4 zu entnehmen.

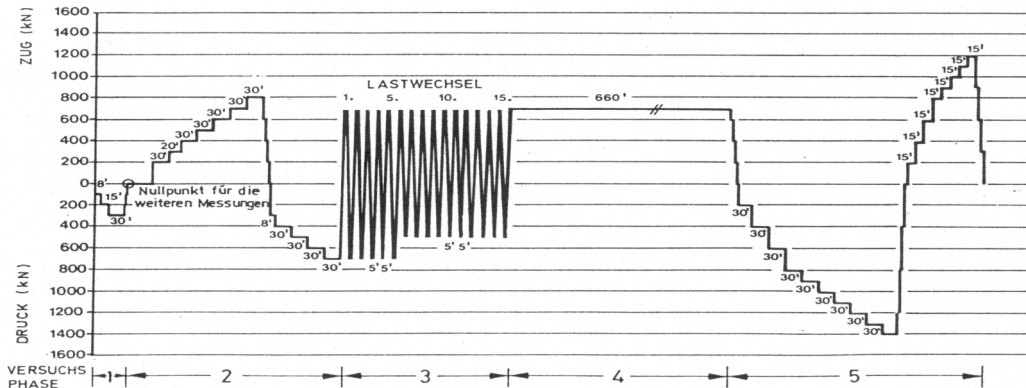


Bild 3: Belastungsprogramm des Probepfahls, aus [10]

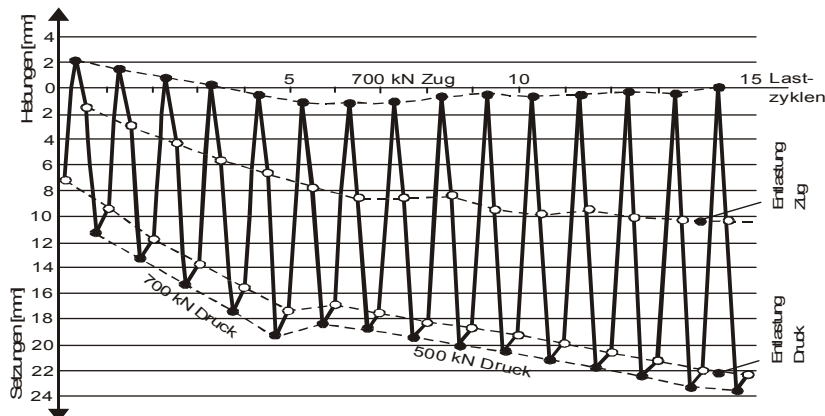


Bild 4: Widerstandshebungs- und setzungslinien des Probepfahls in Phase 3 (Wechselbelastung), aus [10]

Wie das Belastungsprogramm der Phase 3 zeigt, stellt die aufgebrachte Wechsellast eine sehr hohe zyklische Belastung in Bezug auf statische Last dar. Beobachtet wurde eine starke Abhängigkeit der Pfahlmantelreibung von der Größe der zyklischen Lastamplitude und der Zyklenzahl. Aus dem Vergleich der Grenzmantelreibungswerte bei statischer Belastung und zyklischer Wechselbelastung ergaben sich nach der Wechselbelastung nur noch 40-60% der Grenzmantelreibung für die statische Erstbelastung bei gleicher Setzungsgröße.

In [11] sind statische und zyklische Pfahlprobelastungen beschrieben, die an Bohrpfählen mit 1,20 m Durchmesser in Sand-Schluffen-Gemischen und Opalinuston für den Bau eines Tunnels auf der Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt ausgeführt wurden. An zwei Probepfah-

len wurden rein statische Druckversuche ausgeführt, an zwei weiteren Pfählen wurde nach einer zyklischen Belastung ebenfalls eine statische Belastung bis in den Grenzzustand ausgeführt. Als Ergebnis der Pfahlprobelastung zeigte sich, dass die vor der statischen Belastung aufgebrachte zyklische Belastung offensichtlich nur einen geringen Einfluss auf die Grenztragfähigkeit des Pfahls hat. Näherungsweise wurde die gleiche Grenzlast festgestellt wie bei einer rein statischen Belastung. Die wurde im Wesentlichen darauf zurückgeführt, dass die zyklische im Verhältnis zur statischen Lastamplitude gering war.

Die Ergebnisse der in [10] und [11] beschriebenen Probelastungen machen das unterschiedliche Pfahltragverhalten und die vorhandenen Kenntnisdefizite unter zyklischen Einwirkungen deutlich.

### 3. Berechnungsansätze

#### 3.1. Allgemeines

Bezogen auf den bisherigen Kenntnisstand sind nachfolgend erste nationale Berechnungs- und Näherungsansätze dargestellt, die jeweils durch ein vergleichendes Beispiel erläutert sind. Diese können bis auf weiteres für die in DIN 1054:2005-01 geforderten Untersuchungen mit herangezogen werden.

Die in den in Abschnitt 3.2 und 3.3 auftretenden Beanspruchungen und Widerstände sind in der Tabelle 3 zusammengefasst. Unter der zyklischen Lastspanne  $z_{ykl. E}$  ist die doppelte Beanspruchungsamplitude  $z_{ykl. \hat{E}}$  zu verstehen, siehe Bild 5. Die mittlere statische Beanspruchung  $stat. E$  ist der statische Anteil an der Gesamtbeanspruchung.

Tabelle 3: In den nachfolgenden Beispielen verwendete Formelzeichen und deren Bedeutung

Formelzeichen	Benennung
$z_{ykl. \hat{E}}$	zyklische Beanspruchungsamplitude
$z_{ykl. E}$	zyklische Lastspanne; $z_{ykl. E} = 2 \cdot z_{ykl. \hat{E}}$
$stat. E$	(mittlere) statische Beanspruchung
$z_{ykl. R}$	reduzierter Pfahlwiderstand infolge zyklischer Beanspruchung
$R$	Pfahlwiderstand unter statischer Last

#### 3.2. Verfahren nach [12]

Auf Grundlage von [7 bis 9], [13] und [14], jedoch abweichend von [2] sowie der Angabe der DIN 1054:2005-01, sind in [12] Bemessungsvorschläge für die Nachweise im Grenzzustand

GZ 1B und GZ 2 unter Berücksichtigung der zyklischen Beanspruchung angegeben. Die Gesamtbeanspruchung  $E$  wird in eine (mittlere) statische Beanspruchung  $\text{stat. } E$  und eine zyklische Beanspruchungsamplitude  $\text{zykl. } \hat{E}$  zerlegt:

$$E = \text{stat. } E + \text{zykl. } \hat{E} \quad (1)$$

Als Berechnungsansatz wird

$$\text{zykl. } \hat{E} / R \leq \kappa (1 - (\text{stat. } E / R)^2) \quad (2)$$

gewählt, wobei in Gleichung (2) die Beanspruchungen und Widerstände in Abhängigkeit vom zu führenden Nachweis im Grenzzustand GZ 1B oder GZ 2 einzusetzen sind. Der Faktor  $\kappa$  ist nach Tabelle 4 in Anlehnung an DIN 1054:2005-01 bzw. [12] anzusetzen. Die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nach dem vorliegenden Verfahren sind nachfolgend an einem Beispiel erläutert.

#### Rechenbeispiel zum Verfahren nach [12]:

Gegeben ist ein durch maximal  $N = 10.000$  Schwelllastzyklen auf Zug beanspruchter Mikropfahl. Die mittlere statische charakteristische Zugbeanspruchung beträgt  $\text{stat. } E_{z,k} = 400 \text{ kN}$ , die charakteristische zyklische Lastspanne  $\text{zykl. } E_{z,k} = 400 \text{ kN}$ . Es liegt somit eine charakteristische zyklische Belastungsamplitude von  $\text{zykl. } \hat{E}_{z,k} = 200 \text{ kN}$  vor, siehe Bild 5. Der charakteristische Pfahlwiderstand im Grenzzustand GZ 2 ist  $R_{2z,k} = 900 \text{ kN}$ , der charakteristische Pfahlwiderstand im Grenzzustand 1B möge hier näherungsweise  $R_{1z,k} = 2 \cdot R_{2z,k} = 1800 \text{ kN}$  sein. Es sind die Nachweise im Grenzzustand GZ 1B und GZ 2 nach DIN 1054:2005-01 zu führen.

Tabelle 4: Faktor  $\kappa$  in Abhängigkeit der Anzahl der Lastwechsel, aus [12]

Lastwechsel N	$\kappa$ [-]
1	0,50
10	0,45
100	0,40
1.000	0,35
10.000	0,30
100.000	0,25
1.000.000	0,20

Es wird zunächst gemäß DIN 1054:2005-01 überprüft, ob die zyklische Beanspruchungsamplitude größer als 20 % charakteristischen Pfahlwiderstands unter statischer Last ist:

$$\text{zykl. } E_{2z,k} = \underline{200 \text{ kN}} > 180 \text{ kN} = 0,2 \cdot 900 = 0,2 \cdot R_{2z,k}, \text{ d.h.} \quad (3)$$



die zyklische Beanspruchung muss berücksichtigt werden. Daher wird für den Nachweis im Grenzzustand GZ 2 die Gleichung (2) nach zykl.  $\hat{E}$  umgeformt:

$$\text{zykl. } \hat{E}_{2z,k} \leq \kappa \cdot R_{2z,k} (1 - (\text{stat. } E_{2z,k} / R_{2z,k})^2) = \text{zykl. } R_{2z,k}. \quad (4)$$

Setzt man die Werte aus der Aufgabenstellung in Gleichung (4) ein, ergibt sich der reduzierte zyklische Pfahlzugwiderstand für den Nachweis im Grenzzustand GZ 2 zu

$$\text{zykl. } R_{2z,k} = 0,3 \cdot 900 (1 - (400 / 900)^2) = 217 \text{ kN}. \quad (5)$$

Es ist

$$\text{zykl. } \hat{E}_{2z,k} = \underline{200 \text{ kN}} < 217 \text{ kN} = \text{zykl. } R_{2z,k} \text{ und} \quad (6)$$

somit der Nachweis im Grenzzustand GZ 2 erfüllt.

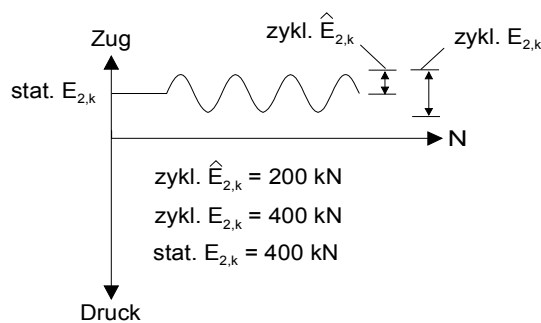


Bild 5: Definition der verschiedenen Beanspruchungsarten und Zahlenwerte aus dem Berechnungsbeispiel

Für den Nachweis im GZ 1B wird Gleichung (2) nach stat. E umgeformt:

$$\text{stat. } E_{1z,d} \leq R_{1,d} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\text{zykl. } \hat{E}_{1z,d}}{R_{1,d} \cdot \kappa} \right)^2} = \text{zykl. } R_{1z,d}. \quad (7)$$

Der Bemessungswert der zyklischen Beanspruchungsamplitude ergibt sich mit den Teilsicherheitsbeiwerten aus DIN 1054:2005-01 zu

$$\text{zykl. } \hat{E}_{1z,d} = \gamma_Q \cdot \text{zykl. } \hat{E}_{1z,k} = 1,5 \cdot 200 = 300 \text{ kN}, \quad (8)$$

der Bemessungswert des Pfahlzugwiderstands unter statischer Beanspruchung ergibt sich zu

$$R_{1z,d} = R_{1z,k} / \gamma_P = 1800 / 1,4 = 1286 \text{ kN}. \quad (9)$$

Wird die Beanspruchung und der Widerstand aus Gleichung (8) und (9) in Gleichung (7) eingesetzt, ergibt sich der Bemessungswert des reduzierten Pfahlzugwiderstands infolge zyklischer Beanspruchung für den Nachweis im Grenzzustand GZ 1B zu

$$\text{zykl. } R_{1z,d} = 1286 \cdot \sqrt{1 - \frac{300}{1286 \cdot 0,3}} = 606 \text{ kN.} \quad (10)$$

Dem nach Gleichung (10) ermittelten reduzierten Pfahlzugwiderstand wird der Bemessungswert der mittleren statischen Beanspruchung

$$\text{stat. } E_{1z,d} = \gamma_G \cdot \text{stat. } E_{1z,k} = 1,35 \cdot 400 = 540 \text{ kN} \quad (11)$$

gemäß Gleichung (7) gegenübergestellt:

$$\text{stat. } E_{1z,d} = \underline{540 \text{ kN} < 606 \text{ kN}} = \text{zykl. } R_{1z,d}. \quad (12)$$

Der Nachweis im Grenzzustand GZ 1B ist ebenfalls erfüllt. Im Vergleich mit dem Globalsicherheitskonzept läge eine Sicherheit von

$$\eta = R_{1z,k} / (\text{stat. } E_{2z,k} + \text{zykl. } \hat{E}_{2z,k}) = 1800 / (400 + 200) = 3,0 \quad (13)$$

vor.

### 3.3. Verfahren nach [15]

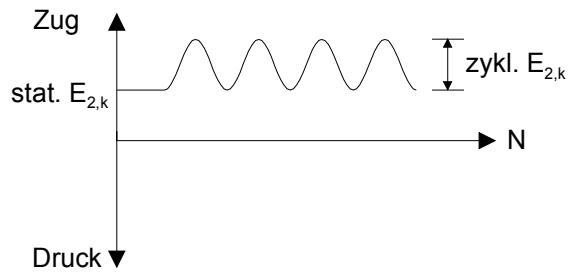
Auf Grundlage und in Erweiterung der Angaben in DIN 1054:2005-01, Anhang D.2 und Erfahrungen mit zyklischer Belastung ist in [15] ein Näherungsvorschlag abgeleitet, der nachfolgend dargestellt ist. Das Nomogramm in Bild 8 wurde in Anlehnung an Erkenntnisse aus [2] und bezogen auf DIN 1054-2005-01 in Abhängigkeit von der zu erwartenden Zyklenzahl  $N$  und dem Ausnutzungsgrad  $\mu_z$  der zyklischen und statischen Pfahlbelastung bezogen auf den charakteristischen Zugpfahlwiderstand im Grenzzustand GZ 2  $R_{2z,k}$  in [15] entwickelt.

Der „zyklische“ Ausnutzungsgrad wird zu

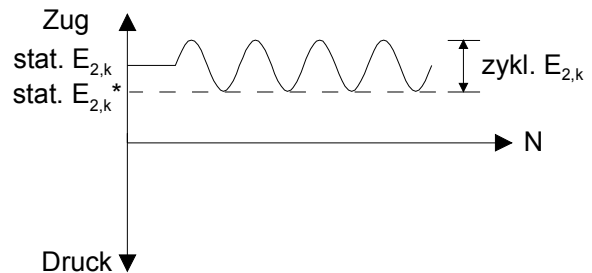
$$\mu_z = (\text{stat. } E_{2z,k} + \text{zykl. } E_{2z,k}) / R_{2z,k} \quad (14)$$

definiert. Zur Benutzung des Nomogramms (Bild 8) sind die in Bild 6 dargestellten Anwendungsfälle zu unterscheiden. Bei einer Zug- oder Druckschwellbelastung wird von einer statischen Belastung ausgegangen, die den unteren oder oberen Wendepunkt der zyklischen Beanspruchung beschreibt. Liegt die statische Beanspruchung höher oder niedriger, so ist eine statische Ersatzbeanspruchung  $\text{stat. } E_{2z,k}^*$  am unteren bzw. oberen Wendepunkt anzusetzen. Bei einer Wechselbeanspruchung wird der statische Anteil  $\text{stat. } E_{2z,k}$  nicht berücksichtigt, es wird  $\text{stat. } E_{2z,k}^*$  zu Null gesetzt.

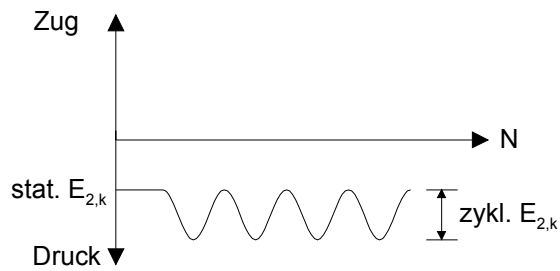
a1) Zugschwellbeanspruchung



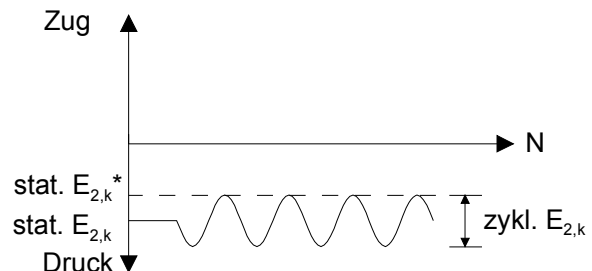
a2) stat. Ersatzbeanspruchung



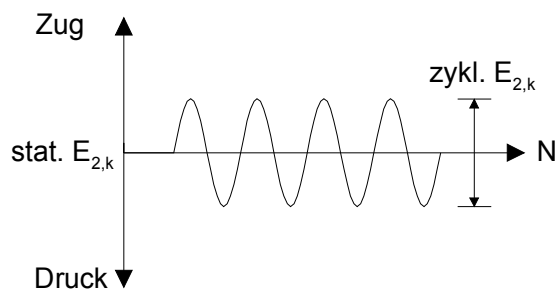
b1) Druckschwellbeanspruchung



b2) stat. Ersatzbeanspruchung



c1) Wechselbeanspruchung



c2) stat. Ersatzbeanspruchung

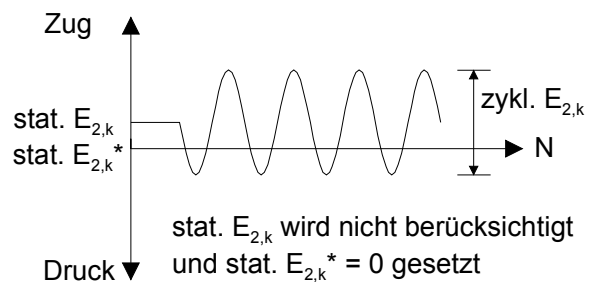


Bild 6: Verschiedene zyklisch axiale Beanspruchungsformen auf einen Pfahl (linke Spalte) und näherungsweise statische Ersatzbeanspruchung (rechte Spalte) zur Anwendung des Nomogramms nach Gleichung (14)

**Rechenbeispiel zum Verfahren nach [15]:**

Es werden nachfolgend die gleichen Eingangswerte wie aus dem Beispiel in Abschnitt 3.2 übernommen. Die statische Beanspruchung wurde dort als mittlere statische Beanspruchung vorgegeben. Zur Nachweisführung nach dem Nomogrammverfahren muss daher gemäß Bild 6a am Wendepunkt eine statische Ersatzbeanspruchung  $stat. E_{2z,k}^* = 200 \text{ kN}$  angenommen werden. Die Zugschwellbeanspruchung (Lastspanne) beträgt gemäß Beispiel aus Abschnitt 3.2  $zykl. E_{2z,k} = 400 \text{ kN}$ .

In Bild 7a sind die Beanspruchungen nach dem Beispiel aus Abschnitt 3.2 noch einmal dargestellt, Bild 7b zeigt die zur Anwendung des Nomogramms (Bild 8) erforderliche Ersatzbeanspruchung  $\text{stat. } E_{2z,k}^*$ .

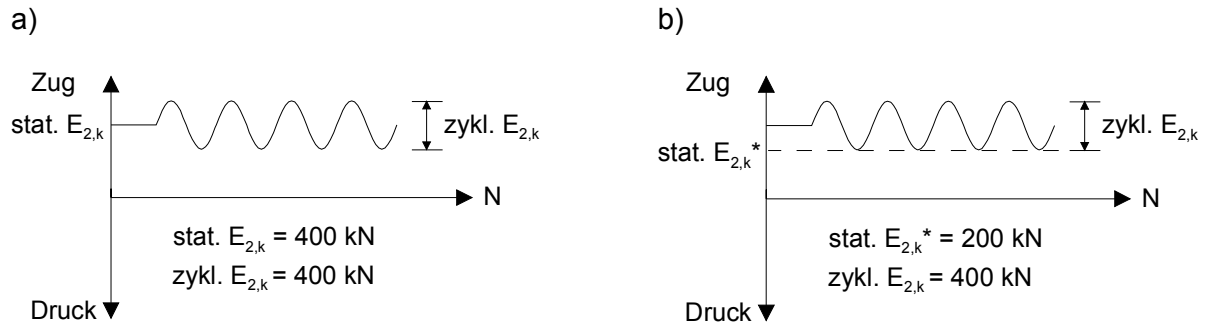


Bild 7: a) Beanspruchungen aus dem Beispiel in Abschnitt 3.2  
 b) statische Ersatzbeanspruchung zur Anwendung des Nomogramms in Bild 8

Die charakteristischen Anteile von zyklischer und statischer Ersatzbeanspruchung betragen

$$\text{zyklisch: } \text{zykl. } E_{2z,k} / (\text{zykl. } E_{2z,k} + \text{stat. } E_{2z,k}^*) = 400 / (400 + 200) = 0,666 \quad (15)$$

$$\text{statisch: } \text{stat. } E_{2z,k}^* / (\text{zykl. } E_{2z,k} + \text{stat. } E_{2z,k}^*) = 200 / (400 + 200) = 0,333 \quad (16)$$

Aus Bild 8 liest man für  $N=10.000$  Lastwechsel einen zyklischen Ausnutzungsgrad von  $\mu_Z = 0,8$  ab. Somit beträgt der reduzierte axiale Pfahlzugwiderstand im Grenzzustand GZ 2 infolge der vorgegebenen zyklischen und statischen Beanspruchung

$$\text{zykl. } R_{2z,k} = \mu_Z \cdot R_{2z,k} = 0,8 \cdot 900 = 720 \text{ kN.} \quad (17)$$

Der Pfahl könnte damit eine zyklische Lastspanne von

$$\text{zykl. } E_{2z,k} = 0,666 \cdot 720 = 480 \text{ kN} \quad (18)$$

und eine statische Ersatzbeanspruchung von

$$\text{stat. } E_{2z,k} = 0,333 \cdot 720 = 240 \text{ kN} \quad (19)$$

aufnehmen. Im Vergleich mit dem Globalsicherheitskonzept läge dann eine Sicherheit von

$$\eta = R_{1z,k} / (\text{stat. } E_{2z,k} + \text{zykl. } E_{2z,k}) = 1800 / (240 + 480) = 2,5 \text{ vor.} \quad (20)$$

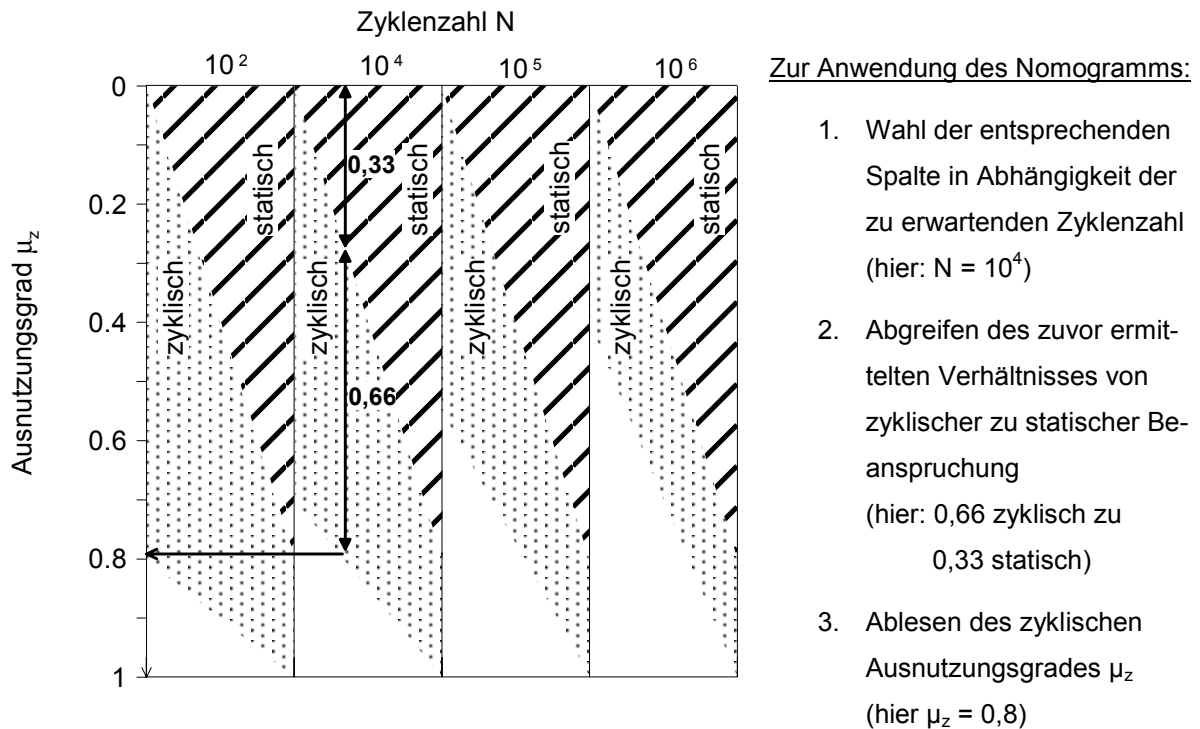


Bild 8: Bemessungsnomogramm und Erläuterung dessen Anwendung anhand des Beispiels aus Abschnitt 3.3

#### 4. Laufende Untersuchungen zum Pfahltragverhalten unter Zyklik an der Universität Kassel

Um die Ursachen für den Tragfähigkeitsverlust von Pfählen unter zyklischer Belastung bodenmechanisch begründen und quantifizieren zu können, wird derzeit in einem von der DFG geförderten Forschungsvorhaben der Schwerpunkt auf das veränderte Tragverhalten der Mantelreibung in Verbindung mit den bodenmechanischen Änderungen im Pfahlnahbereich gelegt. Aufgrund des in der Regel sehr hohen statischen Spannungsanteils im Pfahlfußbereich ist der Pfahlfußwiderstand gegenüber zyklischen Einwirkungen nicht so empfindlich zu erwarten.

Die Forschungsziele lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Systematische Untersuchung der Einflüsse einer axial zyklischen Belastung auf das Pfahltragverhalten.
- Identifikation der Auswirkungen unterschiedlicher Belastungsarten im Hinblick auf die Frequenz und die Amplitude im niederfrequenten Bereich unter Vernachlässigung von Trägheitskräften.

- Quantitative Unterscheidung der Einflüsse einer Schwellbelastung von einer Wechselbelastung auf das zyklische Pfahltragverhalten.
- Identifikation der Auswirkung unterschiedlicher Bodeneigenschaften auf das zyklische Pfahltragverhalten.
- Quantifizierung der einzelnen Anteile der Mantelreibung und des Spitzenwiderstand am zyklischen Gesamttragverhalten.
- Identifikation des Zusammenhangs zwischen der zyklischen Belastungsänderung und der zyklischen elastischen Verformung in Abhängigkeit der Lastwechselzahl und der Belastungsart.
- Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen der Reduktion der Normalspannung und der Erhöhung des Verbundreibungswinkels infolge der Bodenverdichtung.
- Ableitung einer Modellvorstellung zum Pfahltragverhalten unter zyklischer Belastung.
- Implementierung der Modellvorstellung in ein vorhandenes analytisches Berechnungsprogramm zur Untersuchung des zyklischen Pfahltragverhaltens.

Dabei sollen die Forschungsziele zunächst durch experimentelle Untersuchung an Element- und Modellversuchen mit entsprechenden Parametervariationen verfolgt werden. In einer zweiten Phase sind theoretische Untersuchungen mit der Ableitung von Berechnungsansätzen vorgesehen.

## **5. Literaturangaben**

- [1] Gotschol, A.: Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung. Universität Kassel, Diss. 2002
- [2] Schwarz, P.: Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung. Technische Universität München, Diss. 2002
- [3] Goldscheider, M. / Gudehus, G.: Einige Bodenmechanische Probleme bei Küsten- und Offshore Bauwerken. Vortrag Baugrundtagung 1976, S. 507-522
- [4] Swane, I.C. / Poulos, H.G.: A theoretical study of cyclic loading. JSMF, ASCE Vol. 95, 1980

- [5] Malkus, J.: Untersuchung des Bodenverhaltens im Kontaktbereich von zyklisch axial belasteten Pfählen und Ankern. Universität Essen, Diss. 2000
- [6] Trofimenkov, J.G. / Mariupolskii, L.G.: Screw piles used for mast and tower foundations. Proc. 6. ICSMFE, Vol. 2, 1965, pp. 328-332
- [7] Karlsrud, K. / Haugen, T.: Behaviour of Piles in Clay under Cyclic Axial Loading – Results of Field Model Tests. NGI-Publ. Nr. 166, 1986
- [8] Karlsrud, K. / Nadim, F. / Haugen, T.: Piles in Clay under Cyclic Axial Loading – Field Tests and Computational Modelling. NGI-Publ. Nr. 169, 1987
- [9] Karlsrud, K. / Kalsnes, B. / Nowacki, F.: Response of Piles in Soft Clay and Silt Deposits to Static and Cyclic Axial Loading Based on Recent Instrumented Pile Load Tests. NGI-Publ. Nr. 188, 1992
- [10] Kempfert, H.-G. / Lauffer, J.: Pfahlprobelastung in weniger tragfähigen Böden unter statischer und wechselnder Belastung. Geotechnik 14 (1991), S. 105-112
- [11] Raithel, M. / Kempfert, H.-G. / Quick, H.: Statische und zyklische Pfahlprobelastungsergebnisse als Grundlage für Fahrwerksgründungen. 4. Österreichische Geotechniktagung, 2003, S. 395-414
- [12] Mittag, J. / Richter, T.: Beitrag zur Bemessung von vertikal zyklisch belasteten Pfählen. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel. Heft 18, 2005, S. 337-354
- [13] Poulos, H.G.: Cyclic Stability Diagram For Axially Loaded Piles. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 877-895
- [14] Poulos, H.G.: Cyclic Axial Loading Analysis of Piles in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 6, 1989, pp. 836-852
- [15] Kempfert, H.-G.: Ein vorläufiges Näherungsverfahren zur Berücksichtigung des Tragverhaltens von zyklisch axial beanspruchten Pfählen (Manuskript noch unveröffentlicht)