

## **Beitrag zum Tragverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden**

Kurzfassung für Bewerbung um Edgard-Frankignoul-Förderpreis 2013  
Dipl.-Ing. Jennifer Baumbach, PSP Consulting Engineers GmbH, München

### **1 Begriffsdefinitionen**

Mikropfähle sind auf Grund ihres Einsatzes als Rückverankerungselemente oder Gründungselemente unter Windenergieanlagen häufig veränderlichen Einwirkungen durch z.B. Grundwasserschwankungen, Wind oder Wellenschlag ausgesetzt. Diese variieren u.a. hinsichtlich ihrer Belastungsart (Schwell- oder Wechselbelastung), ihrer Lastamplitude und ihrer Frequenz.

Seit den 1970er Jahren wurden die Auswirkungen veränderlicher Einwirkungen auf das Verschiebungsverhalten und die Tragfähigkeit von Pfählen in einer Reihe von Forschungsarbeiten untersucht (u.a. Chan / Hanna, 1980; Kraft et al., 1981; Gruber et al., 1985, Schwarz, 2002). Die veränderlichen Einwirkungen wurden dabei in der Regel durch Aufbringung einer sinusförmigen zyklischen Belastung simuliert. Dabei war die Belastungsrichtung stets axial zum Pfahl, was auch der in der Regel vorhandenen Beanspruchung von Mikropfählen entspricht. Die überwiegende Anzahl der zyklischen Versuche im Maßstab 1:1 oder im Modellmaßstab wurde in Sand durchgeführt. Die Datenbasis zu Versuchen mit Mikropfählen in bindigen Böden ist hingegen deutlich geringer. Am Norwegian Geotechnical Institute in Oslo wurden Versuchsreihen mit axialer zyklischer Belastung an Mikropfählen im Maßstab 1:1 in einem breiig-weichen und einem halbfesten Ton durchgeführt (Karlsruud / Haugen, 1986; Karlsruud et al., 1992). Von Lehane et al. (2003) wurden zwei einzelne Mikropfähle in einem breiig-weichen Ton zyklisch belastet. Neben diesen großmaßstäblichen Versuchen existiert noch eine Reihe von kleinmaßstäblichen Modellversuchen (u.a. Poulos, 1981; Narasimha / Prasad, 1992; Prasad / Narasimha, 1994; McManus et al., 1994).

### **2 Zielsetzung der durchgeführten Belastungsversuche an Mikropfählen**

Bei den bisher in der Literatur vorliegenden Forschungsarbeiten zum Tragverhalten von Mikropfählen unter axial zyklischer Belastung in bindigen Böden liegt die erreichte Zyklenzahl meist deutlich unter 10.000 Zyklen, so dass Aussagen über die Langzeittragfähigkeit nur begrenzt möglich sind. Darüber hinaus wurde in einigen Fällen der charakteristische Pfahlwiderstand unter einer statischen Einwirkung gar nicht oder erst nach einer zyklischen Belastung bestimmt, so dass Aussagen über eine Reduzierung der Tragfähigkeit unter zyklischer Belastung nicht möglich sind. Teilweise wurden die Pfähle vor der zyklischen Belastung bereits statisch bis zum charakteristischen Pfahlwiderstand belastet, so dass die Verschiebungen unter zyklischer Belastung nicht mehr als repräsentativ angesehen werden können.

Ziel zweier am Zentrum Geotechnik der TU München durchgeführter Forschungsvorhaben war es, den Kenntnisstand zum Trag- und Verschiebungsverhalten von Mikropfählen in bindigen Böden zu erweitern und den Einfluss von Wechsel- und Schwellbelastungen auf die Pfahlverschiebungen und die Pfahltragfähigkeit auch für große Zyklenzahlen (> 50.000) systematisch zu untersuchen, um dadurch eine Datenbasis für die Beschreibung des Verschiebungsverhaltens und die Entwicklung von Bemessungsmodellen in der Praxis zu schaffen. Hierzu wurden statische

Pfahlprobelastungen sowie zyklische Zugschwell- und Wechsellastversuche an im Bohrverfahren hergestellten Mikropfählen mit einem Durchmesser von 0,15 m und einer Länge von 4,2 m in einem mittelplastischen Ton steifer Konsistenz durchgeführt.

Der charakteristische Herauszieh Widerstand unter statischer Belastung wurde an nicht vorbelasteten Pfählen zu  $R_{t,k} = 80$  kN ermittelt.

### 3 Versuchsdurchführung und Messtechnik

Alle statischen und zyklischen Pfahlversuche wurden als kraftgesteuerte Versuche durchgeführt. Die Lastaufbringung erfolgte hydraulisch mit einem speziell für zyklische Langzeitversuche abgedichteten Hohlkolbenzylinder. Das Anfahren der einzelnen Laststufen erfolgte bei den statischen Pfahlprobelastungen manuell, während einer Laststufe wurde die Last über einen rechnergestützten Regelkreis konstant gehalten. Bei den zyklischen Pfahlversuchen erfolgte die gesamte Versuchssteuerung rechnergestützt.

Die Pfahlkopfverschiebungen wurden während der Versuche über zwei induktive Wegaufnehmer knapp über Geländeoberfläche erfasst. Zur Erfassung der Verteilung des Längskraftverlaufs über die Pfahltiefe wurden an den Traggliedern auf einer Länge von 3,0 m im Abstand von 0,75 m jeweils 5 Messstellen mit Dehnmessstreifen (DMS) bestückt. Die Datenerfassung für die beiden induktiven Wegaufnehmer, das Kraftsignal sowie die fünf mit DMS bestückten Messstellen erfolgte rechnergestützt. Die Messfrequenz betrug 2 Hz.

### 4 Zyklische Pfahlversuche

Bei allen zyklischen Pfahlversuchen wurden das mittlere Lastniveau  $F_{\text{mittel}}$  und die zyklische Lastamplitude  $F'_{\text{zykl}}$  während eines Versuchs konstant gehalten (siehe Begriffsdefinitionen in Anhang 1). Als Versagenskriterium wurden eine mittlere Pfahlverschiebung bzw. eine Verschiebungsspanne von mehr als 10 % des Pfahldurchmessers (= 15 mm) definiert. Die Belastungsfrequenz lag bei allen Versuchen bei einem Zyklus pro Minute (= 0,017 Hz). Eine Übersicht über alle durchgeführten zyklischen Pfahlversuche mit Angabe der Belastung sowie der maximalen Zyklenzahl findet sich in Anhang 2.

#### 4.1 Verschiebungsamplituden bzw. Verschiebungsspannen

Bei allen Zugschwellversuchen bleiben die Verschiebungsamplituden während eines Versuchs jeweils annähernd konstant. Die Größe der Verschiebungsamplitude liegt dabei bei allen Versuchen deutlich unter 1 mm. Die Größe der Verschiebungsamplitude wird ausschließlich von der Größe der zyklischen Lastamplitude beeinflusst. Der Zusammenhang zwischen Lastamplitude und Verschiebungsamplitude kann mit Hilfe einer Potenzfunktion beschrieben werden (siehe Abbildung 1).

Bei den Wechsellastversuchen nehmen die Verschiebungsamplituden mit zunehmender Zyklenzahl zu. Die Zunahme geschieht umso rascher, je größer die zyklische Lastamplitude ist. Bei den Wechsellastversuchen ist im Gegensatz zu den Zugschwellversuchen auch ein Einfluss des mittleren Lastniveaus zu erkennen.

Bei den Wechsellastversuchen wird somit nach einer bestimmten Anzahl an Lastzyklen das Versagenskriterium einer zulässigen Verschiebungsspanne von 15 mm überschritten, während dieses Versagenskriterium bei den Zugschwellversuchen nicht maßgebend wird.

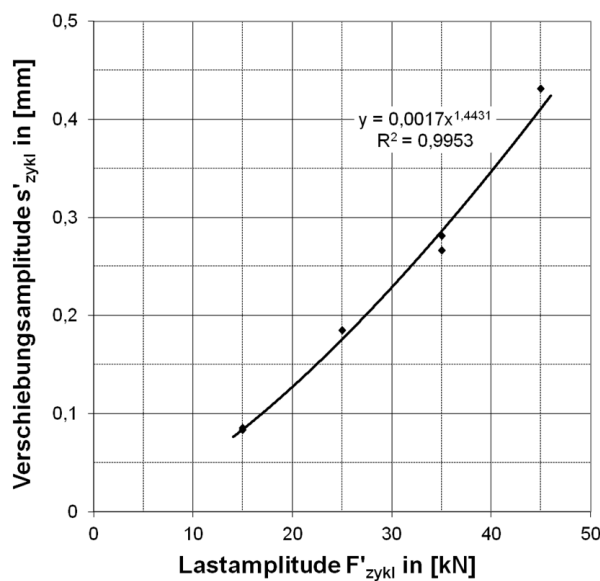


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Lastamplitude und Verschiebungsamplitude bei Zugschwellversuchen

#### 4.2 Mittlere Pfahlverschiebungen

Bei allen zyklischen Pfahlversuchen nehmen die mittleren Pfahlverschiebungen unabhängig von der Belastungsart mit zunehmender Zyklenzahl stetig zu. Das Versagenskriterium einer zulässigen mittleren Verschiebung von 15 mm wird somit für alle Lastkombinationen nach einer bestimmten Zyklenzahl erreicht. Es ist festzustellen:

- Eine Steigerung der Lastamplitude führt zu einer rascheren Zunahme der mittleren Pfahlverschiebungen.
- Bei gleicher maximaler Last führt ein höheres mittleres Lastniveau zu einer langsameren Zunahme der mittleren Pfahlverschiebungen.
- Bei zyklischen Lastamplituden von mehr als 30 % des statischen Pfahlwiderstandes führt ein höheres Lastniveau (entspricht einer Verschiebung von einer Wechsellast in Richtung Schwelllast) zu einer langsameren Zunahme der mittleren Pfahlverschiebungen.

In Abbildung 2 sind die durchgeführten zyklischen Versuche mit der Angabe möglicher Zyklenzahlen bis zum Erreichen der als Versagen definierten mittleren Verschiebung von 15 mm zusammenfassend dargestellt. Das mittlere Lastniveau und die zyklische Lastamplitude wurden dabei jeweils auf den charakteristischen Herauszieh Widerstand unter statischer Belastung  $R_{t,k}$  bezogen.

Hierbei zeigt sich, dass unabhängig von der Belastungsart bei zyklischen Lastamplituden von bis zu 30 % des statischen Pfahlwiderstandes und einem mittleren Lastniveau von bis zu 60 % des statischen Pfahlwiderstandes Zyklenzahlen bis zu einer Million möglich sind, ohne dass ein Versagen auf Grund unzulässig großer mittlerer Pfahlverschiebungen zu erwarten ist. Bei höheren zyklischen Lastamplituden nehmen die möglichen Zyklenzahlen insbesondere bei den Wechsellastversuchen stark ab. Bei den Zugschwellversuchen nehmen die möglichen Zyklenzahlen signifikant ab, sobald die maximale Belastung über dem statischen Pfahlwiderstand liegt (Werte oberhalb der Diagonale von links oben nach rechts unten in Abbildung 2).

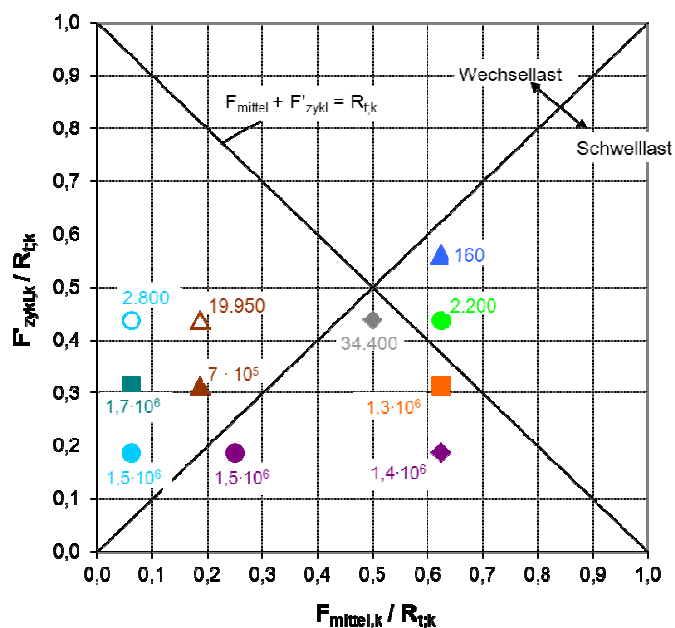


Abbildung 2: Durchgeführte Versuche mit Angabe möglicher Zyklenzahlen bis zum Erreichen einer mittleren Pfahlverschiebung von 15 mm (im Versuch ermittelt oder extrapoliert)

### 4.3 Post-zyklische statische Tragfähigkeit

Im Anschluss an die zyklischen Versuche wurden die Pfähle nochmals statisch belastet. Bei den im Anschluss an Zugschwellversuche durchgeführten statischen Probelastungen auf Zug wurde bei allen Pfählen eine Tragfähigkeitssteigerung zwischen 8 % und 30 % gegenüber der Tragfähigkeit nicht vorbelasteter Pfähle festgestellt. Die vorausgegangene zyklische Belastung wirkte sich unabhängig von der Größe der aufgetretenen Pfahlverschiebungen günstig auf das statische Pfahltragverhalten aus.

Bei den im Anschluss an Wechsellastversuche durchgeführten statischen Probelastungen waren hingegen signifikante Tragfähigkeitsverluste gegenüber der Tragfähigkeit nicht zyklisch vorbelasteter Pfähle zu erkennen. Wurden die Pfähle bei der post-zyklischen statischen Probelastung in Richtung der Verschiebung während der zyklischen Versuche belastet, lagen die Tragfähigkeitsverluste bei ca. 20 %. Wurden sie hingegen entgegen der Verschiebungsrichtung während des zyklischen Versuchs belastet, lagen die Verluste bei bis zu 80 %.

## 5 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Nach DIN EN 1997-1: 2009 in Kombination mit DIN 1054:2010 ist im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Mikropfähle unter statischer Zugbelastung der Nachweis zu führen, dass der Bemessungswert des charakteristischen Herausziehwiderstandes

$$R_d = \frac{R_{t,k}}{\gamma_{s,t} \cdot \eta} \text{ mit } \gamma_{s,t} = 1,15 \text{ und Modellfaktor } \eta_M = 1,25$$

kleiner ist als der Bemessungswert der Einwirkungen  $F_d$ . Im Folgenden wird vereinfachend davon ausgegangen, dass auf der Einwirkungsseite veränderliche Lasten nur aus einer zyklischen Belastung resultieren und die angenommene zyklische Belastung der maximal zu erwartenden zyklischen Einwirkung auf den Pfahl entspricht. Zur Ermittlung des Bemessungswertes der Einwirkungen wird davon ausgegangen, dass die ständige Einwirkung  $F_G$  der mittleren zyklischen Belastung  $F_{\text{mittel}}$  entspricht und die zyklische Lastamplitude  $F'_{\text{zykl}}$  der veränderlichen Einwirkung  $F_Q$ .

Der Bemessungswert der Einwirkungen ergibt sich somit zu  $d = \text{mittel} \cdot \gamma_G + \text{zykl} \cdot \gamma_Q$ .

In Anhang 3 ist der Bereich möglicher Lastkombinationen rot hinterlegt, für die der Bemessungswert der Einwirkungen kleiner ist als der Bemessungswert des Pfahlwiderstandes. Die gestrichelte Linie bei  $F'_{\text{zykl}} / R_{t;k} = 0,1$  markiert die untere Grenze, unterhalb der nach EA-Pfähle (2012) nicht mit einer Verschlechterung des Tragverhaltens auf Grund zyklischer Einwirkungen zu rechnen ist. Bei allen Versuchen, die innerhalb des roten Bereichs liegen, liegen die möglichen Zyklenzahlen bei mehr als  $N = 10^6$  (siehe 4.2), bis die Verschiebungen das Versagenskriterium einer mittleren Pfahlverschiebung oder einer Verschiebungsspanne von mehr als 10 % des Pfahldurchmessers (=15 mm) überschreiten.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen im Anschluss an eine Zugschwellbelastung, bei denen eine Tragfähigkeitssteigerung (siehe 4.3) infolge der zyklischen Belastung festgestellt wurde, ist für das untersuchte Pfahl-Boden-System unter Zugschwellbelastung im Grenzzustand der Tragfähigkeit keine weitere Abminderung des charakteristischen Pfahlwiderstands gegenüber der Abminderung unter statischer Belastung erforderlich.

Bei Wechsellastversuchen mit zyklischen Lastamplituden bis zu 30 % des charakteristischen Herausziehwidestands sind ebenfalls Zyklenzahlen bis zu ca.  $N = 10^6$  möglich, ohne dass ein Pfahlversagen auftritt. Bei höheren Amplituden ist auf Grund der Versuchsergebnisse davon auszugehen, dass ein Versagen bei deutlich unter  $N = 10^6$  zu erwarten ist.

Zusätzlich wurde bei den durchgeführten post-zyklischen statischen Pfahlprobelastungen im Anschluss an eine Wechselbelastung ein signifikanter Tragfähigkeitsverlust festgestellt (siehe 4.3). Auf Grund der vorliegenden Ergebnisse sollte bei Wechsellasten tendenziell von einer zusätzlichen Reduktion der Pfahltragfähigkeit gegenüber rein statischer Belastung von mindestens 20 % ausgegangen werden.

## 6 Abschätzung der Pfahlverschiebungen

In der Arbeit wurden die veränderlichen und zyklischen Einwirkungen auf einen Pfahl als sinusförmige Belastung mit gleichbleibender Lastamplitude modelliert. Für diese Annahme konnte gezeigt werden, in welchen Grenzen verschiedene empirische und analytische Berechnungsansätze (Kriechanalogie, Potenzansatz nach Schwarz (2002) und Programm ZYKLAX nach Thomas (2001)) zur Ermittlung der Pfahlverschiebungen geeignet sind, und es konnten für die durchgeführten Versuche teilweise Angaben zu Größen benötigter Eingangsparameter gemacht werden. Diese Eingangsparameter sind jedoch sowohl boden- als auch lastabhängig, so dass hier in jedem Fall weitere Untersuchungen notwendig sind.