

Axial zyklisch belastete Mikropfähle in bindigen Böden

Peter Schwarz (Projektleiter), Jennifer Baumbach

Der technische und wirtschaftliche Erfolg von Mikropfählen unter statischer Belastung zeigt sich in den klassischen grundbautechnischen Anwendungsbereichen wie z.B. bei Nachgründungen und Unterfangungen und ist mittlerweile seit Jahrzehnten dokumentiert. Die Sicherheit dieser Pfahlgründungen unter zyklischer Belastung ist insbesondere bei Auftriebssicherungen, hohen Strukturen wie Masten und Windkraftanlagen, aber auch bei Lärmschutzwänden von bauaufsichtlicher Relevanz, wobei der Wissensstand auf diesem Gebiet deutlich geringer ist. Bisher durchgeführte Forschungen zum Thema axial zyklisch belastete Mikropfähle in Sanden haben gezeigt, dass die Tragfähigkeit unter zyklischer Beanspruchung wesentlich geringer ist als bei statischer Beanspruchung. Für nichtbindige Böden wurden daher Abminderungsfaktoren in die DIN 1054:2005 aufgenommen. Für bindige Böden liegen bisher keine systematischen Untersuchungen im größeren Umfang vor. Ziel der Forschung war, auch für bindige Böden den Einfluss einer zyklischen Belastung auf das Trag- und Verformungsverhalten von Mikropfählen zu ermitteln.

Hierzu wurden statische und zyklische sowie postzyklische statische Pfahlversuche an Mikropfählen als Feldversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt. Bei dem Boden im Versuchsfeld handelt es sich um einen leicht bis mittelplastischen Ton (TL bzw. TM nach DIN 18196) überwiegend steifer Konsistenz. Die Mikropfähle für dieses Forschungsvorhaben werden nach DIN EN 14199:2005 ("Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Pfähle mit kleinem Durchmesser (Mikropfähle)", Vorgängerdokument DIN 4128 ("Verpresspfähle mit kleinem Durchmesser")) als gebohrte Mikropfähle bezeichnet. Insgesamt wurden 8 Mikropfähle mit einem Durchmesser von 152 mm und einer Kraffteintragungslänge von 4,0 m hergestellt. Als Tragglied wurde ein GEWI-Stahl mit einem Durchmesser von 50 mm verwendet. Die Pfähle befinden sich oberhalb des Grundwassers. Alle Pfähle wurden an den Traggliedern an jeweils 5 Messquerschnitten mit Dehnmessstreifen bestückt. Diese ermöglichen während der Versuche eine Erfassung der Verteilung der Mantelreibung über die Pfahltiefe. Zusätzlich wurden bei jedem Versuch die Pfahlkopfhörungen mit Hilfe induktiver Wegaufnehmer gemessen.

An 3 Pfählen wurde eine statische Pfahlprobelastung auf Zug durchgeführt. Der ermittelte Pfahlwiderstand im Bruchzustand lag jeweils bei ca. 80 kN. Als Versagenskriterium wurde eine Pfahlhebung von 1,5 cm (entspricht 10 % des Pfahldurchmessers) oder ein Kriechmaß größer als 1,0 mm gewählt. Der nach beiden Kriterien geringste ermittelte Pfahlwiderstand war dabei maßgebend.

Anschließend wurden die restlichen 5 Pfähle zyklisch belastet. Die Belastung lag dabei im Zugschwellbereich, die Belastungsfrequenz bei einem Zyklus pro Minute. Die Lastwechselzahlen lagen zwischen 2.947 und 83.975 Zyklen. Variiert wurden das mittlere Belastungsniveau (F_{mittel}) sowie die zyklische Lastamplitude ($F'_{\text{zykl.}}$). In Abbildung 1 sind die Bezeichnungen erläutert.

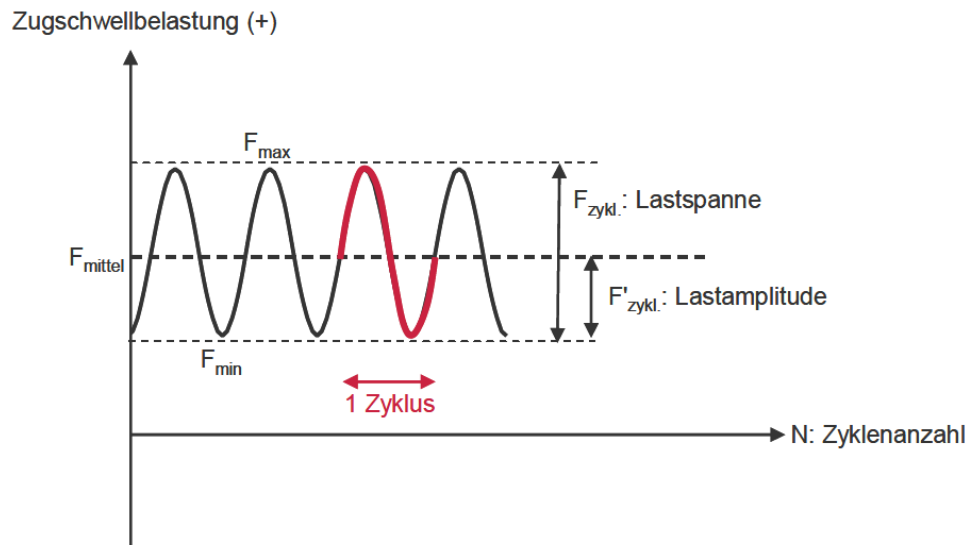


Abbildung 1: Definitionen Kräfte

In Tabelle 1 sind die Lasten für die durchgeführten zyklischen Pfahlversuche dargestellt. Die Maximalen Lasten wurden bei den Versuchen G und D bewusst größer als der statische Pfahlwiderstand von 80 kN gewählt, um zu untersuchen, inwieweit sich eine kurzzeitige Überschreitung des Pfahlwiderstands im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf das Trag- und Verformungsverhalten auswirkt.

Versuchsdaten Pfahl	Lastbild				Zyklusanzahl
	F_{mittel} [kN]	F_{max} [kN]	F_{min} [kN]	$F_{\text{zykl.}}$ [kN]	N [-]
A (Belastung 1)	20	35	5	30	55687
A (Belastung 2)	50	65	35	30	28316
H	50	75	25	50	83975
G	50	95	5	90	2947
D	50	85	15	70	57115
C	40	75	5	70	53953

Tabelle 1: Durchgeführte zyklische Pfahlversuche

Die Versuchsauswertung zeigt, dass die zyklische Zugschwellbelastung mit zunehmender Zyklusanzahl zu zunehmenden plastischen Pfahlhebungen (s_{mittel} bzw. $s_{\text{min/max}}$) führt. Die Verformungsspannen ($s_{\text{zykl.}}$) bzw. Verformungsamplituden ($s'_{\text{zykl.}}$) blieben hingegen über die gesamte Versuchsdauer annähernd konstant. Zur Definition der Verformungen siehe Abbildung 2.

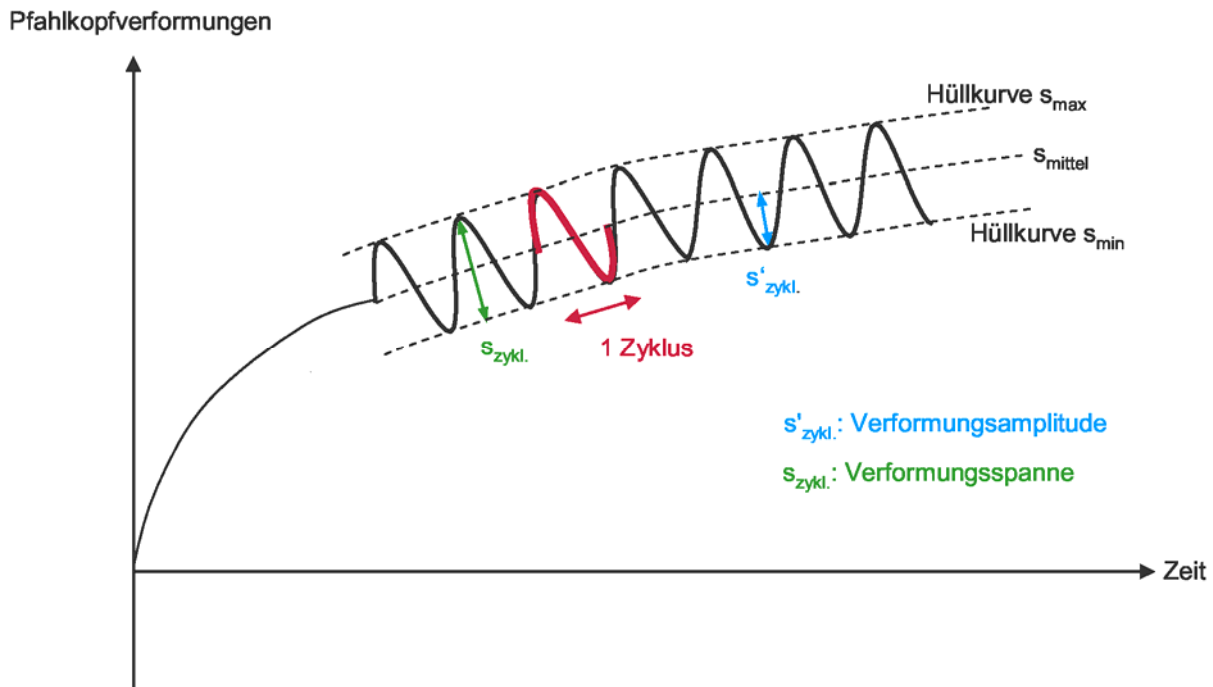


Abbildung 2: Definitionen Verformungen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Größe der Verformungsspanne im Wesentlichen von der Größe der aufgetragenen Lastspanne abhängig ist und fast unabhängig vom mittleren Belastungsniveau ist. Für eine betrachtete zyklische Lastspanne wäre es in der Praxis demnach ausreichend, einen zyklischen Pfahlversuch bei beliebigem mittlerem Lastniveau durchzuführen, um die aus der Zyklik resultierenden Verformungen abschätzen zu können.

Bei Steigerung der Lastspanne jedoch, nehmen die Verformungsspannen überproportional zu, so dass eine Übertragung eines zyklischen Pfahlversuchs auf andere Lastspannen nicht möglich ist.

Da die Verformungsraten, also die Zunahme der plastischen Pfahlhebungen pro Zyklus, mit zunehmender Zyklanzahl abnahmen, wurde das Versagen bei den zyklischen Pfahlversuchen über eine absolute Pfahlhebung von mehr als 1,5 cm (entspricht 10 % des Pfahldurchmessers) definiert. Zyklanzahlen bis zu 100.000 Lastwechseln und mehr sind nach den Ergebnissen der Versuche bis zu einer Lastamplitude von 30 % des Pfahlwiderstands im Grenzzustand der Tragfähigkeit (entspricht $F'_{zykl.} = 24$ kN) bei Zugschwellbelastung möglich, ohne dass die plastischen Verformungen 10 % des Pfahldurchmessers überschreiten. Untersucht wurde dabei der Bereich bis zu einer mittleren Belastung von 60 % des Pfahlwiderstands im Grenzzustand der Tragfähigkeit ($F_{mittel} = 50$ kN).

Eine verminderte Tragfähigkeit bei postzyklisch durchgeführten statischen Pfahlprobelastungen konnte nicht festgestellt werden. Im Vergleich mit den an Referenzpfählen ermittelten statischen Tragfähigkeiten lagen die postzyklisch ermittelten Pfahlwiderstände um bis zu 20 % höher. Bei Laststufen unterhalb des Pfahlwiderstands wiesen die postzyklisch belasteten Pfähle deutlich geringere Kriechmaße auf als die ausschließlich statisch belasteten Pfähle.

Für den in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Boden sind somit auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse keine zusätzlichen Abminderungsfaktoren bei zyklischer Belastung im Zugschwellbereich notwendig, solange die nach DIN 1054:2010 zu führenden Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit eingehalten sind:

1. Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

$$E_d = F_{mittel} \cdot \gamma_G + F'_{zykl.} \cdot \gamma_Q \leq R_d = \frac{R_{1k}}{\gamma_{s,t} \cdot \eta_M}$$

mit

R_d : Bemessungswert des Pfahlwiderstands

R_k : charakteristischer Wert des Pfahlwiderstands

$\gamma_{s,t}$: Teilsicherheitsbeiwert für Pfahlprobelastungen auf Zug = 1,15

η_M : Modellfaktor für Mikropfähle = 1,00 (Annahme eines vertikalen Pfahls)

E_d : Bemessungswert der Beanspruchungen

F_{mittel} : charakteristischer Wert der mittleren Belastung

$F'_{zykl.}$: charakteristischer Wert der zyklischen Lastamplitude

γ_G : Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen

γ_Q : Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen

2. Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

$$E_k = F_{mittel} + F'_{zykl.} \leq R_d = R_{2k}$$

(Gemäß DIN 1054:2010 ist $R_{2,k}$ aus der Last-Verformungskurve eines Pfahls über eine zulässige Pfahlverschiebung festzulegen. In der für Mikropfähle bis 2005 gültigen DIN 4128 wurde $R_{2,k}$ zu 50 % von $R_{1,k}$ festgelegt.)

Ergänzend durchgeführte zyklische Einfachscherversuche im Labor mit natürlichen Bodenproben aus dem Versuchsfeld zur Modellierung des Bodens im Pfahlmantelbereich zeigen ein qualitativ ähnliches Verhalten. Auch hier kommt es unter Schwellbeanspruchung zu akkumulierenden plastischen Verformungen, die Verformungsraten nehmen auch hier mit zunehmender Zyklanzahl ab. Um anhand von Einfachscherversuchen im Labor quantitativ auf das Pfahlverformungsverhalten in bindigen Böden schließen zu können, sind jedoch noch weitere Untersuchungen nötig.

Ein Vergleich der beschriebenen Versuchsergebnisse mit anderen Forschungen zeigt deutlich, dass die Eigenschaften des bindigen Bodens (Plastizität, Konsistenz, Sättigungsgrads) und die Belastungsart (Schwell- oder Wechsellast) einen entscheidenden Einfluss darauf haben, ob eine zyklische Belastung im Vergleich zu einer rein statischen Belastung bei Mikropfählen zu einer verminderten Tragfähigkeit oder einem ungünstigeren Verformungsverhalten führt. Hier ist eine genauere Differenzierung als bisher notwendig. In zukünftigen Forschungen sollten deshalb weitere systematische Untersuchungen an bindigen Böden evtl. in Modellversuchen unter Variation der oben genannten Faktoren durchgeführt werden.