

Mikropfähle sind sehr schlanke Bauteile, die mit heute zur Verfügung stehenden hochfesten Stählen hinsichtlich der inneren Tragfähigkeit und, wenn sie in tragfähige Böden einbinden und dort verpresst werden, auch hinsichtlich der Lastabtragung im Baugrund geeignet sind, sehr hohe Lasten abzutragen. Wenn sie jedoch breiige und weiche Schichten durchfahren, besteht die Gefahr des Knickens, was die Tragfähigkeit begrenzen kann.

Die nationale bzw. europäische Normierung fordert Knicknachweise bei schlanken Pfählen, die in sehr weichen Böden hergestellt sind, die mit einer undrained Scherfestigkeit von  $c_u < 15 \text{ kN/m}^2$  bzw.  $c_u < 10 \text{ kN/m}^2$  charakterisiert sind. Bei größeren Scherfestigkeiten wird in der Regel kein Knicknachweis gefordert. Es gibt jedoch Beispiele, dass dieses Vorgehen nicht auf der sicheren Seite liegt und Knicken vor dem Erreichen der Grenztragfähigkeit des Pfahlmaterials maßgebend wird. Recherchierte Publikationen, in welchen Rechenmodelle zur Lösung des Stabilitätsproblems oder Pfahlprobelbelastungen dokumentiert sind, geben eindeutige Hinweise, dass die Möglichkeit eines Pfahlversagens infolge Knickens durch die normentechnischen Regelungen unterschätzt wird. Um über einfache rechnerische Untersuchungen hinaus das Knickverhalten von schlanken Pfählen in breiigen und weichen Böden zu überprüfen, wurden im Rahmen des mit diesem Forschungsbericht abgeschlossenen Forschungsauftrags geeignete Versuche durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde ein kleiner Versuchstand konstruiert, in welchem 80 cm lange Pfähle belastet werden können, die seitlich von breiigen und weichen Böden gestützt werden. Dabei wurden zwei verschiedene Pfahlquerschnitte und mehrere Böden mit verschiedener Konsistenz verwendet. Knicken bestimmte regelmäßig den Grenzzustand des Systems, auch bei Böden mit undrained Scherfestigkeiten über  $15 \text{ kN/m}^2$ . Bei den Versuchen wurde neben der aufgetragenen Last auch das seitliche Ausweichen der vom Boden gestützten kleinen Pfähle messtechnisch erfasst.

Mit den gewonnenen Erfahrungen aus den kleinmaßstäblichen Versuchsreihen wurde anschließend ein Versuchstand aufgebaut, in dem es möglich war, 4 m lange Einzelpfähle, welche am Fuß und Kopf gelenkig gelagert sind, einer Probelbelastung zu unterziehen. Dazu wurden zwei zylindrische Behälter geschaffen, Probepfähle zentrisch darin eingestellt und anschließend der Raum zwischen Pfahl und Behälterwand mit einem ausgeprägt plastischen Ton aufgefüllt. Um den Einbau des Bodens zu ermöglichen und Homogenität hinsichtlich der undrained Scherfestigkeit sicherzustellen, wurde der Ton in flüssiger Konsistenz aufbereitet und eingebaut. Die angestrebte undrained Scherfestigkeit, bei welcher die Probelbelastung stattfinden sollte, wurde durch gezielte Konsolidation mit Hilfe von Eigengewicht, Auflasten und Elektroosmose erreicht. Da die Traglasten von ungestützten Verbundpfählen, deren Querschnitt aus einem zentrischen Stahltragglied  $\varnothing 28 \text{ mm}$  und einem Zementsteinkörper  $\varnothing 100 \text{ mm}$  bestand, aufgrund der unsicheren Zugfestigkeit des Zementsteins stark streuten, wurden auch Versuche an Aluminiumprofilen  $40 \times 100 \text{ mm}$ , welche eine ähnliche Biegesteifigkeit wie die Verbundpfähle aufweisen, durchgeführt. Insgesamt wurden 4 Pfähle mit Bodenstützung bis zum Pfahlversagen belastet und messtechnisch ausführlich dokumentiert. Dabei lag die undrained Scherfestigkeit zwischen etwa  $8$  und  $25 \text{ kN/m}^2$ . Die Versuchspfähle reagierten zunächst sehr steif und es traten kaum seitliche Verschiebungen auf. Das in allen Fällen erreichte Pfahlversagen kündigte sich nicht an. Vielmehr trat es spontan auf, lange bevor die vollplastischen Normalkräfte der Querschnitte erreicht waren. Nach dem Erreichen der Knicklast vergrößerten sich die seitlichen Auslenkungen der Pfahlachse deutlich. Auch für stark reduzierte Belastungskräfte konnte keine Gleichgewichtslage mehr gefunden werden. Nachdem die Pfähle

ausgebaut worden waren, konnte festgestellt werden, dass die Aluminiumprofile keine bleibende Verformung erlitten hatten. Bei allen Versuchen knickten die Pfähle mit Knickfiguren, deren Halbwellen deutlich kürzer waren als die Pfahlänge.

Die Berechnung der Traglasten stabilitätsgefährdeter eingebetteter Pfähle erfolgt nach den bisher vorliegenden einschlägigen Veröffentlichungen auf der Grundlage von Annahmen und Näherungen, die im Bericht kritisch bewertet und mit den Ergebnissen der Probelastung verglichen werden. Entweder werden sowohl der seitlich stützende Boden als auch das Pfahlmaterial als linear elastisch (Lösung von ENGESSER (1885)) bzw. der Boden als ideal plastisch (WENZ (1972)) angenommen oder es werden ausgehend von einer seitlichen Pfahlvorverformung Biegeverformungen infolge zunehmender Normalkraft und Bodenstützung errechnet, bis das Pfahlmaterial infolge der geweckten Schnittgrößen seine Festigkeitsgrenze erreicht (z.B. Lösungen von MEEK (1999), WIMMER und ETTINGER (2004)). Alle diese Modelle können die vorliegende Problematik nicht wirklich zutreffend beschreiben.

Daher wurden im Rahmen der Forschungsarbeit eigene Rechenverfahren erarbeitet, mit denen alle wesentlichen Effekte, welche in den Versuchen auftraten, zu erfassen sind. Dabei kommen numerische Verfahren zum Einsatz. Die seitliche Bodenstützung des Pfahls wird darin mit einer bilinearen Mobilisierungsfunktion beschrieben, bei welcher eine maximale Bodenreaktion, die das Umfließen des Bodens um den Pfahl charakterisiert, erfasst wird. In den Berechnungen können auch Vorverformungen des Pfahls und die Festigkeitseigenschaften des Pfahlmaterials berücksichtigt werden. Es werden Last-Verschiebungskurven errechnet, die Gleichgewichtszustände des nichtlinear gebetteten Pfahls wiedergeben. Sie sind durch zwei Äste gekennzeichnet. Bis zum Erreichen der maximalen Bodenreaktion steigen die möglichen Normalkräfte im Pfahl an. Überschreitet die seitliche Verschiebung des Pfahles den Weg zur vollen Mobilisierung des Bodenwiderstandes, so verringern sich die für ein Gleichgewicht erforderlichen Normalkräfte mit zunehmenden seitlichen Verschiebungen. Das Gleichgewicht wird instabil und der Knickpunkt zwischen den zwei Ästen markiert ein Stabilitätsversagen. Zusätzlich wird geprüft, ob bereits vor dem Erreichen dieses Punktes die Materialfestigkeit des Pfahles durch Biegung und Normalkraft ausgeschöpft wird. Da die genannten Gleichgewichtszustände und die Beanspruchung des Pfahlmaterials von der Halbwelle der Knickfigur abhängig sind, muss diese zusätzlich einer Variation unterworfen werden.