

Pfahltragverhalten infolge zyklisch axialer Belastung – Versuchsergebnisse und Modellbildung

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

Das Pfahltragverhalten zyklisch axial belasteter Pfähle unterscheidet sich insbesondere durch zwei Phänomene vom Tragverhalten von Pfählen, die durch ruhende oder quasi-statisch zu behandelnde Einwirkungen belastet werden. Zum einen akkumuliert sich mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen die plastische Verschiebung des Pfahls und zum anderen ändert sich die Pfahltragfähigkeit. Ursachen für das veränderte Pfahltragverhalten und die bodenmechanischen Vorgänge im Pfahlnahbereich sind bisher nur ansatzweise bekannt. Im Rahmen eines DFG-Projekts wurde daher das zyklische Pfahltragverhalten in drei verschiedenen Modellversuchsreihen systematisch untersucht. In diesem Beitrag werden anhand ausgewählter Versuchsergebnisse die Auswirkung der zyklischen Belastung auf das Pfahltragverhalten und Erkenntnisse zu bodenmechanischen Vorgängen im Pfahlnahbereich beschrieben. Weiterhin wird ein Modell zur näherungsweisen Prognose der plastischen Verschiebung eines Pfahls vorgestellt, das auf Grundlage des Lastabtragsansatzes und eines hyperbolischen Ansatzes zur Beschreibung des zyklischen Bodenverhaltens entwickelt wurde.

1. Einleitung

Bei der Bemessung von Pfählen müssen alle Kombinationen aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen berücksichtigt werden. Werden Pfähle durch **übliche** zyklische Einwirkungen im Sinne der DIN 1054:2010, A 2.4.2.1 A(8a) beansprucht, darf die zyklische Einwirkung bei der Bemessung als veränderliche Einwirkung quasi-statisch behandelt werden. Werden Pfähle jedoch durch **erhebliche** zyklische Einwirkungen im Sinne der DIN 1054:2010, A 2.4.2.1 A(8b) beansprucht, ist mit einem stark veränderten Pfahltragverhalten gegenüber statischer Belastung zu rechnen und die zyklische Einwirkung ist bei der Bemessung der Pfähle zu berücksichtigen. Erhebliche zyklische Einwirkungen können z. B. bei hohen Masten oder Offshore-Bauwerken infolge von Druckwellen in Luft bzw. Wasser auftreten. Einen ersten Anhaltspunkt, ob eine erhebliche zyklische Einwirkung auf einen Pfahl vorliegt, kann der Wert des zyklischen Lastniveaus

liefern, d. h. das Verhältnis zwischen zyklischer Lastamplitude und dem Widerstand des Pfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit vor der zyklischen Belastung, siehe EA-Pfähle (1).

Das stark veränderte Pfahltragverhalten ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass es zum einen zur Zunahme der plastischen Verschiebung des Pfahls, zum anderen zur Abnahme der Pfahltragfähigkeit kommen kann. Diese beiden Phänomene zyklisch axial belasteter Pfähle können demnach die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) gefährden.

Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojekts wurde das zyklische Pfahltragverhalten in drei verschiedenen Modellversuchsreihen systematisch untersucht. Nachfolgend werden die durchgeführten Versuchsprogramme kurz beschrieben und ausgewählte Versuchsergebnisse zum zyklischen Pfahltragverhalten sowie ein Berechnungsansatz zur Prognose der plastischen Verschiebung eines Pfahls vorgestellt.

2. Modellversuche zur Entwicklung der Pfahlmantelreibung

2.1 Versuchsbeschreibung

1g-Modellversuche haben gegenüber ng-Modellversuchen die bekannten Nachteile hinsichtlich der Einhaltung von Modellgesetzen bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf einen Prototyp, siehe z. B. Walz (2). Daher wurde eine Pfahlelement-Triaxial-Anlage entworfen und konstruiert, mit der durch Erhöhung der effektiven Spannungen im Boden die Randbedingungen für ein Pfahlelement in Tiefen bis etwa 30 m simuliert werden können.

In der in Bild 1 dargestellten Spannungszelle wird eine zylindrische Bodenprobe mit einem Durchmesser von 50 cm und einer Höhe von 100 cm in radialer Richtung von einer Gummimembran umfasst. In axialer Richtung wird die Bodenprobe von einer Kopf- und Fußplatte begrenzt. In der Mittelachse der Bodenprobe befindet sich ein mit Messtechnik instrumentiertes Pfahlelement mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Länge von etwa 100 cm. Das Pfahlelement kann am Pfahlkopf axial über eine hydraulische Presse auf Druck und Zug belastet werden, wobei das Pfahlelement seitlich nur von der Bodenprobe über Pfahlmantelreibung gehalten wird. Unter dem Pfahlfuß befindet sich ein Hohlraum, womit kein Pfahlfußwiderstand mobilisiert werden kann. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsanlage und des Versuchsprogramms enthält Thomas (3).

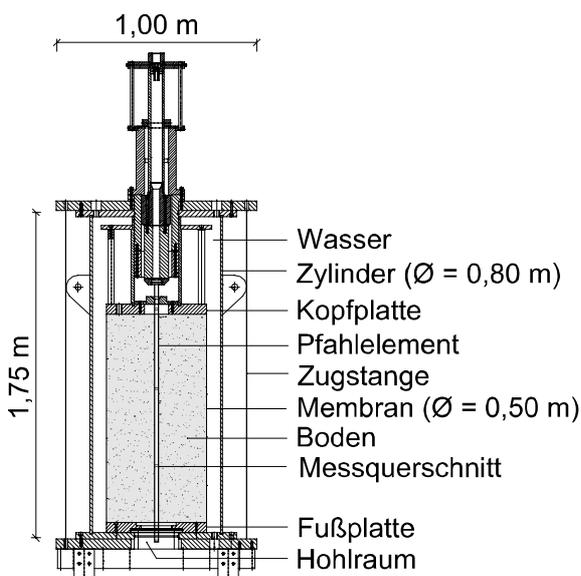


Bild 1. Skizze der Pfahlelement-Triaxial-Anlage

2.2 Versuchsergebnisse

2.2.1 Einfluss der Belastungsparameter

In den Modellversuchen wurden u. a. die zyklische Lastspanne F_{zykl} , die mittlere Last F_{mitt} und die Anzahl der Lastzyklen N variiert. Bild 2 zeigt exemplarisch die elastischen und plastischen Verschiebungen eines Pfahlelements infolge Schwelllasten. Die elastische Verschiebungsamplitude s'_{el} des Pfahlelements bleibt mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen konstant, d. h. die zyklische Steifigkeit bleibt während der zyklischen Belastung annähernd gleich. Die plastische Verschiebung s_{pl} des Pfahlelements hingegen akkumuliert sich. Eine Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahlelements wurde in allen Versuchen unter Schwelllasten beobachtet.

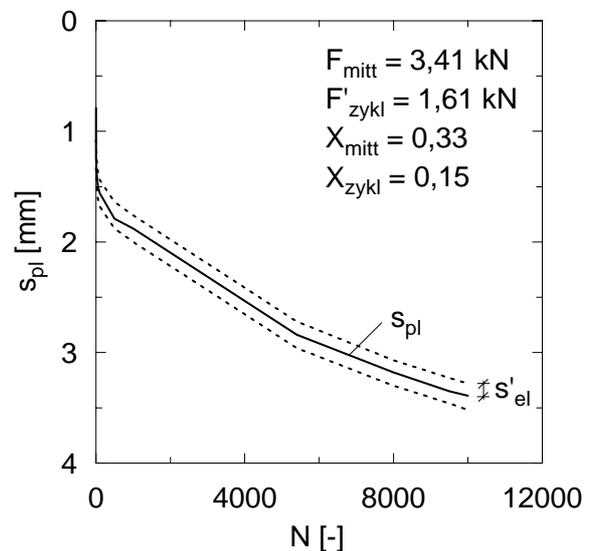


Bild 2. Typische Verschiebungskurve eines Pfahlelements in Schwelllastversuchen

In Versuchen unter Wechsellasten zeigte ein Pfahlelement hingegen ein prinzipiell anderes Verschiebungsverhalten. Bild 3 zeigt exemplarisch das Ergebnis eines Wechsellastversuchs. Während die elastische Verschiebungsamplitude des Pfahlelements bei Druckbelastung etwa über die ersten 80 Lastzyklen konstant bleibt und dann größer wird, bleibt die plastische Verschiebung etwa über die ersten 200 Lastzyklen annähernd Null und nimmt erst dann zu.

Tendenziell wurde in den Versuchen festgestellt, dass mehr Lastzyklen bis zum Versagen eines Pfahlelements möglich waren, je kleiner das zyklische Lastniveau X_{zykl} war, d. h. die zyklische Lastamplitude F'_{zykl} bezogen auf den Widerstand

des Pfahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit R_{ULS} vor der zyklischen Belastung. Bei zyklischen Lastniveaus von X_{zykl} kleiner als 0,15 führten keine Versuche zum Versagen des Pfahlelements.

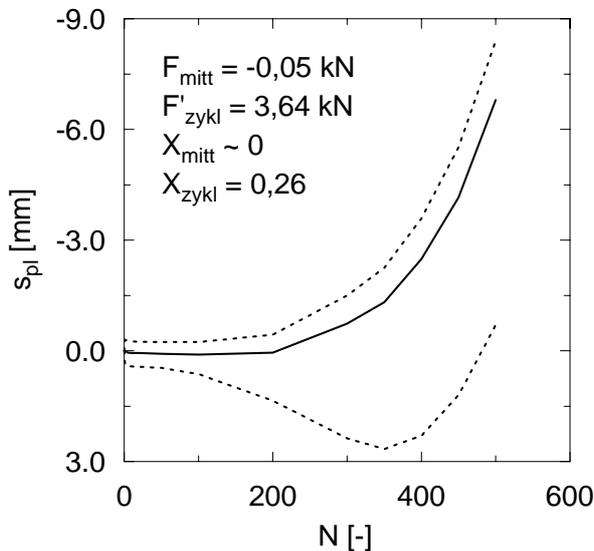


Bild 3. Typische Verschiebungskurve eines Pfahlelementes in Wechsellastversuchen

2.2.2 Einfluss der Bodenparameter

Zur Identifikation des Einflusses der Bodenart auf das zyklische Pfahltragverhalten wurden Versuche in nichtbindigen, bindigen und gemischtkörnigen Boden durchgeführt.

Dabei wurde festgestellt, dass unter statischer Einwirkung bei jeweils gleichem Spannungsniveau erwartungsgemäß die größten Pfahlmantelreibungswerte im Bruchzustand in mitteldicht gelagerten, nichtbindigem Boden mobilisiert werden konnten, in bindigem Boden die Kleinsten.

Unter zyklischer Einwirkung wurde hingegen beobachtet, dass in nichtbindigen Boden das Pfahlelement nach einer kleineren Anzahl an Lastzyklen versagte, d. h. dass das Pfahltragverhalten unter zyklischer Einwirkung in bindigem Boden im Vergleich zu nichtbindigem Boden günstiger war. Diese Tendenz zeigt auch die Literaturlauswertung in Thomas (3) und Kempfert (4).

3. Modellpfahlversuche

3.1 Versuchsbeschreibung

In einer weiteren Versuchsserie wurde schwerpunktmäßig die Wechselwirkung zwischen dem

Pfahlmantel und dem Pfahlfuß untersucht. Dazu wurden Versuche unter Schwelllasten in nichtbindigem Boden an einem Modellpfahl in einem Stahlzylinder mit einer Höhe von 2,1 m und einem Durchmesser von 1,0 m durchgeführt, siehe Bild 4. Im Unterschied zu den Modellversuchen in der Spannungszelle wurde in dieser Versuchsreihe auch ein Pfahlfußwiderstand mobilisiert. Weitere Hinweise zu den Randbedingungen der Versuche finden sich in Thomas (3).

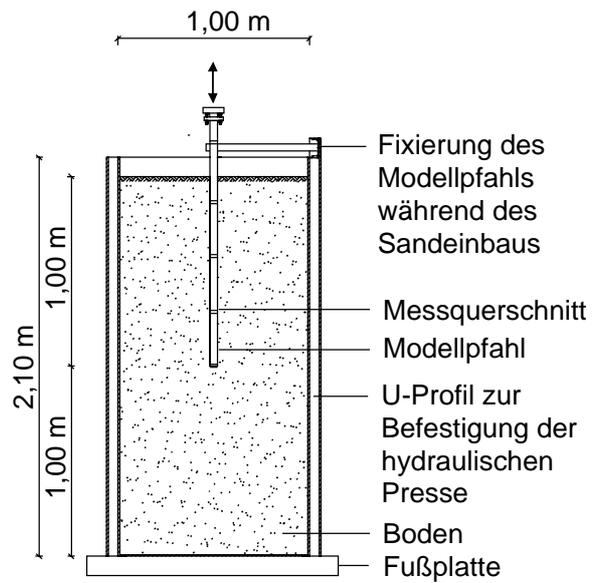


Bild 4. Skizze des Modellversuchsstands

3.2 Versuchsergebnisse

3.2.1 Verschiebungsverhalten

In allen Versuchen wurde festgestellt, dass sich die plastische Verschiebung des Pfahls mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen akkumuliert, wobei die elastische Verschiebungsamplitude des Pfahls konstant bleibt. Entweder führt die zyklische Belastung zur Beruhigung, d. h. der Verschiebungsverlauf strebt gegen eine horizontale Asymptote wie in Bild 2 oder es kommt zum zyklischen Versagen wie in Bild 3. Tendenziell zeigten sich gleiche Verschiebungsverläufe wie bei den Versuchen in der Spannungszelle.

3.2.2 Pfahlwiderstände

Bild 5 zeigt exemplarisch für einen Versuch unter Druckschwelllasten die Pfahlwiderstände während der zyklischen Belastung. Dabei nehmen der Pfahlmantelwiderstand während der zyklischen Belastung um etwa 58 % ab und der Pfahlfußwi-

derstand um das gleiche Maß zu, d. h. die zyklische Belastung führt zur Umlagerung der Pfahlkräfte vom Pfahlmantel zum Pfahlfuß. In Versuchen unter Zugschwelllasten hingegen setzt sich der Gesamtwiderstand des Pfahls nur aus dem Pfahlmantelwiderstand zusammen, der sich summarisch über die gesamte Pfahllänge betrachtet während der zyklischen Belastung nicht ändert.

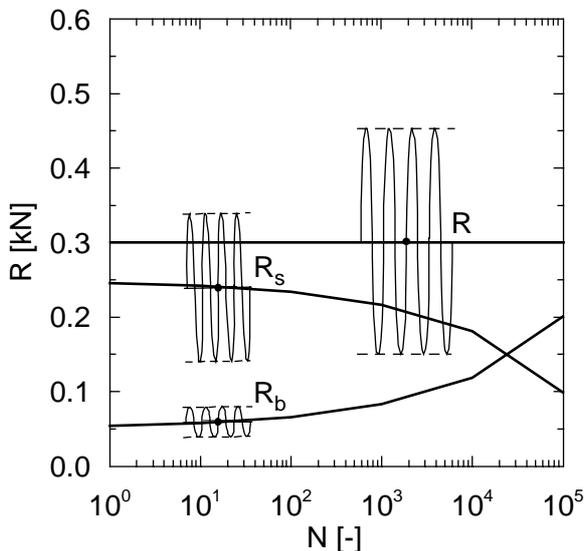


Bild 5. Entwicklung der Pfahlwiderstände in einem Versuch unter Druckschwelllasten

3.2.3 Lastabtrag

Betrachtet man hingegen die Entwicklung der Pfahlmantelreibung nicht summarisch, sondern abschnittsweise entlang des Pfahlmantels, zeigt sich im o. g. Versuch unter Zugschwelllasten, dass mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen die Pfahlmantelreibung, ausgehend vom Wert unter mittlerer Last F_{mitt} vor der zyklischen Belastung bei $N=0$, im oberen Drittel des Pfahls abnimmt und im mittleren sowie unteren Drittel des Pfahls zunimmt, siehe Bild 6. Im unteren Drittel des Pfahls wird nach 1.000 Lastzyklen lokal der Bruchwert der Pfahlmantelreibung erreicht, der vorab in einem statischen Versuch ermittelt wurde.

In Versuchen unter Druckschwelllasten lagern sich die Kräfte am Pfahlmantel ebenfalls um, jedoch kommt es hier tendenziell im oberen sowie unteren Drittel des Pfahls zur Abnahme der Pfahlmantelreibung und im mittleren Drittel zur Zunahme, die jedoch aufgrund der Interaktion mit

dem Pfahlfuß nicht so ausgeprägt wie im Zugschwellversuch ist.

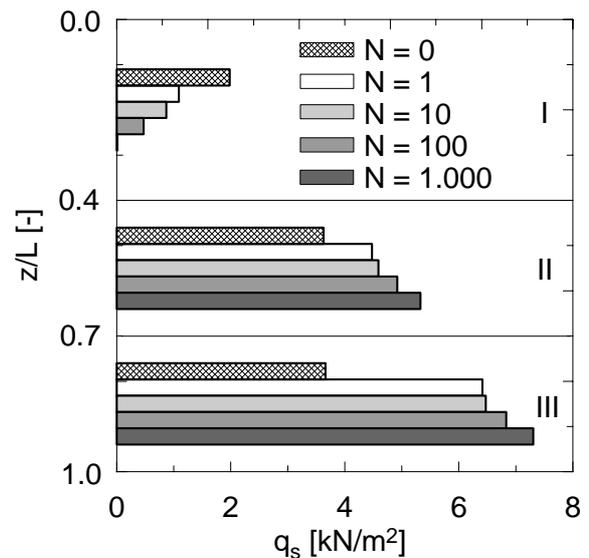


Bild 6. Lastabtrag eines Pfahls im Versuch unter Zugschwelllasten

3.2.4 Post-zyklische Tragfähigkeit

Wird ein Pfahl nach einer zyklischen Belastung post-zyklisch bis zum Bruch probebelastet, zeigt sich, dass die zyklische Belastung zur Abnahme der statischen Pfahltragfähigkeit führen kann. Demnach wird der Bruchwert der Pfahlmantelreibung bzw. die Scherfestigkeit des Bodens infolge der zyklischen Belastung vermindert.

4. Modellversuche zum Bodenverhalten

4.1 Versuchsbeschreibung

In einer dritten Modellversuchsreihe wurde die Bewegung von Bodenpartikeln im Pfahlnahbereich während der zyklischen Belastung des Pfahls beobachtet. Die Modellversuche wurden in einem Versuchskasten mit Abmessungen von 60x40x20 cm durchgeführt, siehe Bild 7. Die Vorderseite des Versuchskastens wurde durch eine 15 mm breite Plexiglasscheibe ersetzt, sodass die Bewegung des Bodens während der zyklischen Belastung der Pfahls fotografiert und anschließend mittels der Particle Image Velocimetry (PIV) sichtbar gemacht werden konnte. Weitere Hinweise zu den Randbedingungen der Versuche finden sich in Kempfert et al. (5) und Thomas (3).

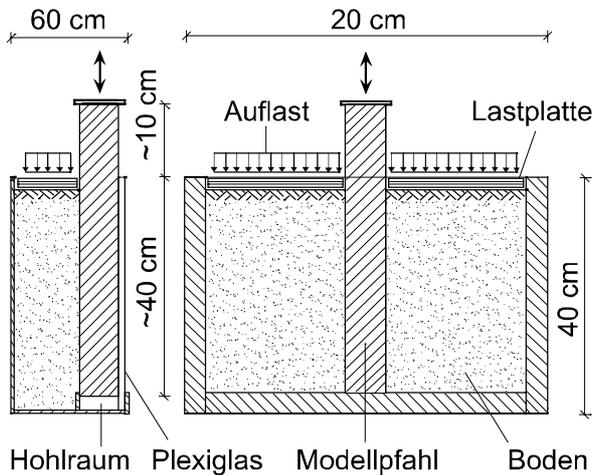


Bild 7. Skizze des Versuchkastens

4.2 Versuchsergebnisse

4.2.1 Scherfugen- und Scherbandbildung

In allen Modellversuchen wurde beobachtet, dass sich mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen sowohl die plastische Verschiebung des Pfahls, als auch die des Bodens akkumulieren. Dies führt zur Zunahme der Scherdehnungen im Pfahlnahbereich, wobei sich eine Scherfuge angrenzend an den Pfahlmantel und ein Scherband angrenzend an die Scherfuge bildet, siehe Bild 8.

Bild 9 zeigt exemplarisch die Entwicklung der Breite der Scherfuge und des Scherbands mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen. Während die Breite der Scherfuge d_{SF} mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen etwa gleich groß bleibt, nimmt die Breite des Scherbands d_{SB} zu.

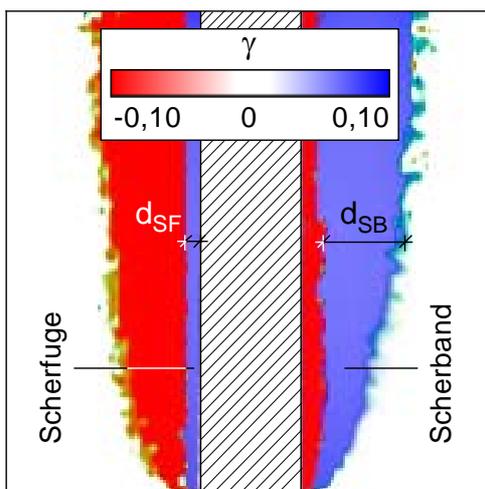


Bild 8. Beispiel für die Bildung einer Scherfuge und eines Scherbands im Pfahlnahbereich eines weggesteuerten Versuches

Die Entwicklung der Breite des Scherbands mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen und die Breite der Scherfuge sind von der Belastungsart, der Belastungsfrequenz, der Lagerungsdichte, dem Sättigungsgrad, dem Pfahldurchmesser und dem Spannungsniveau abhängig.

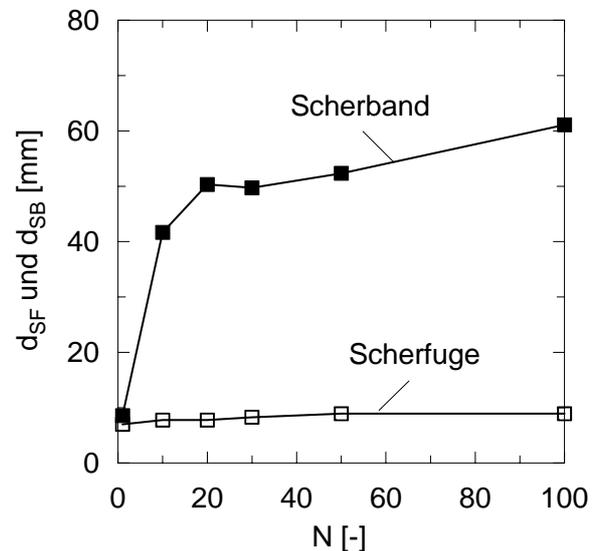


Bild 9. Beispiel für die Entwicklung der Breite von Scherfuge und Scherband mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen eines weggesteuerten Versuches

4.2.2 Segregation und Kornbruch

Bild 10 zeigt ein Foto des Bodens im oberen Bereich des Pfahls nach 1.000 Lastzyklen bei einem weggesteuerten Versuch. Demnach findet während der zyklischen Belastung des Pfahls eine Segregation der Kornfraktionen und ggf. Kornbruch in der Scherfuge statt. Dabei verbleiben die größten Kornfraktionen im oberen Drittel des Pfahls und die kleineren Kornfraktionen wandern entlang des Pfahlmantels in Richtung Pfahlfuß. Die Änderung der Kornverteilung in der Scherfuge durch Segregation oder Kornbruch führt zu einem veränderten Spannungs-Dehnungsverhalten des Bodens und somit zum veränderten Pfahltragverhalten gegenüber statischer Belastung. Kornbruch ist insbesondere unter dem Pfahlfuß möglich, jedoch auch bei niedrigen Spannungszuständen am Pfahlmantel, siehe Donohue et al. (6).

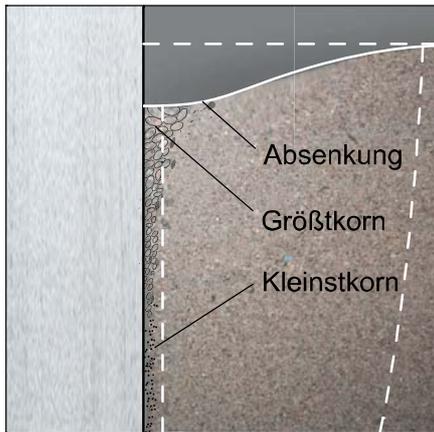


Bild 10. Beispiel für die Segregation und/oder Kornbruch der Bodenpartikel in der Scherfuge eines weggesteuerten Versuches

4.2.3 Zyklische Verdichtung

Die zyklische Belastung des Pfahls verursachte sowohl in den weggesteuerten Versuchen, als auch in den kraftgesteuerten Versuchen unter Druckschwell- und Wechsellasten eine zyklische Verdichtung des Bodens im Pfahlnahbereich. Dies belegen die mit Hilfe der PIV sichtbar gemachten Verschiebungsvektoren des Bodens im Pfahlnahbereich, die in Richtung Pfahlmantel und Pfahlfuß orientiert sind. Dabei ist die horizontale Verschiebung in Richtung Pfahl sehr viel kleiner als die Verschiebung des Bodens in Richtung Pfahlfuß. Ein weiterer Beleg für die zyklische Verdichtung des Bodens ist die Ausbildung eines Absenktrichters um den Pfahl an der Bodenoberfläche, siehe Bild 10.

Einzig in Versuchen unter Zugschwelllasten wurde hingegen beobachtet, dass sich der Boden vom Pfahl weg bewegt, d. h. unter Zugschwelllasten findet eine zyklische Auflockerung des Bodens statt.

5. TAZ-Modell

5.1.1 Allgemeines

Der Lastabtragsansatz (*load transfer approach*) wird häufig zur Berechnung von statisch axial belasteten Pfählen verwendet. Dabei wird der Pfahl elementiert und steht mit dem Boden über nicht-lineare Federn in Verbindung, siehe Bild 11. Die Federn bilden dabei die Bodenreaktion am Pfahlmantel über sogenannte Scherspan-

nungs-Verschiebungs-Kurven (*t-z-curves*) und am Pfahlfuß über Spitzendruck-Verschiebungs-Kurven (*q-z-curves*) ab.

Zur Modellierung des zyklischen Pfahltragverhaltens werden zunächst theoretische, statische *t-z*-Kurven durch modifizierte *Masing-Regeln* erweitert. Mit Hilfe eines aus Versuchsergebnissen abgeleiteten Ansatzes für die Änderung des Sekantenschermoduls und in Verbindung mit dem Ansatz von Randolph/Wroth (7) werden anschließend die Verschiebungen eines Pfahls ermittelt. Dieser Berechnungsansatz wird nachfolgend als TAZ-Modell bezeichnet.

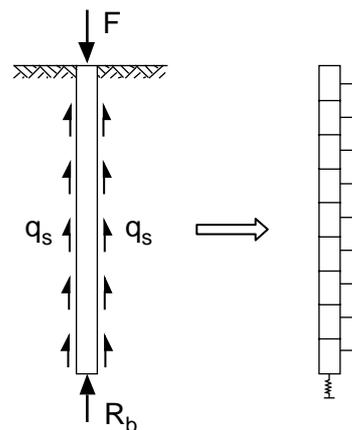


Bild 11. Modellierung des Pfahltragverhaltens mit dem Lastabtragsansatz

5.1.2 Boden-Modell

Hyperbolische Spannungs-Dehnungs-Beziehungen bilden das nicht-lineare Verhalten vieler Bodenarten unter statischer Belastung adäquat ab, siehe z. B. Duncan/Chang (8). Daher wird die Erstbelastungskurve des Bodens bis zur ersten Entlastung im TAZ-Modell nach Gleichung (1) beschrieben, die zusätzlich durch einen Ansatz von Fahey/Carter (9) erweitert wurde.

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0 \cdot \left(1 - R_f \cdot \frac{\tau}{\tau_{ult}}\right)^g} \quad (1)$$

mit

$$\tau_{ult} = R_f \cdot \tau_f \quad (2)$$

und

- γ Scherdehnung
- τ Scherspannung am Pfahlmantel
- τ_{ult} Bruchwert der Scherfestigkeit

τ_f	Scherspannung, ab der die hyperbolische Kurve asymptotisch verläuft
G_0	Anfangs-Tangentenschermodul
R_f	Parameter nach Duncan/Chang (8)
g	Parameter nach Fahey/Carter (9)

Masing (10) stellte mathematische Regeln vor, mit denen die Form der Entlastungs- und Wiederbelastungskurven eines Materials abgeschätzt werden können, von dem nur die Erstbelastungskurve bekannt ist, siehe Bild 12. Die sogenannten *Masing-Regeln* lauten:

- Der Schermodul bei jeder Entlastung entspricht dem Anfangs-Tangentenmodul der Erstbelastungskurve.
- Die Form der Entlastungs- und Wiederbelastungskurve entspricht der mit dem Faktor zwei multiplizierten Erstbelastungskurve.

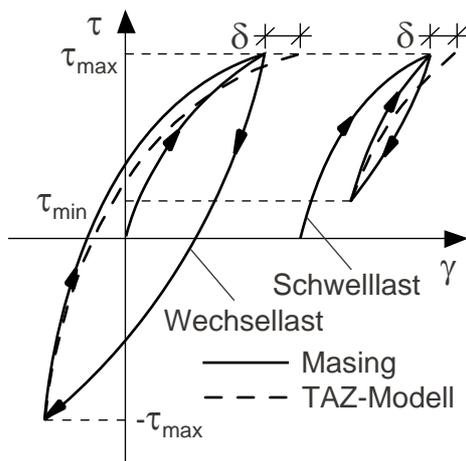


Bild 12. Spannung-Dehnungs-Beziehung des Bodens infolge Schwell- und Wechsellasten

Abweichend von den *Masing-Regeln* wird im TAZ-Modell eine Modifikation bei der Beschreibung der Wiederbelastungskurve nach Gleichung (3) und (4) vorgenommen.

Für Schwelllasten gilt:

$$\gamma - \gamma_{\min} = \frac{\tau - \tau_{\min}}{G_0 \cdot \left(1 - \frac{R_f}{\kappa \cdot \delta} \cdot \frac{|\tau - \tau_{\min}|}{\tau_f} \right)^g} \quad (3)$$

Für Wechsellasten gilt:

$$\gamma \pm \gamma_{\max} = \frac{\tau \pm \tau_{\max}}{G_0 \cdot \left(1 - \frac{R_f}{\kappa \cdot \delta} \cdot \frac{|\tau \pm \tau_{\max}|}{\tau_f} \right)^g} \quad (4)$$

mit

τ_{\max}	Scherspannung bei $F = F_{\max}$
τ_{\min}	Scherspannung bei $F = F_{\min}$
κ	Parameter für die Form der Entlastungskurve (bei Masing: $\kappa = 2$)
δ	Parameter für Änderung des Sekantenschermoduls

Die Modifikation der *Masing-Regeln* im TAZ-Modell beinhaltet die Einführung der Parameter κ und δ sowie die Möglichkeit, durch Einführung von τ_{\min} alle Formen von Schwelllasten zu beschreiben, siehe Bild 12.

5.1.3 Änderung des Sekantenschermoduls

Die Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls wird mit dem Ansatz nach Gleichung (4) modelliert, der eine Änderung des Sekantenschermoduls mit zunehmender Anzahl der Lastzyklen beschreibt. Gleichung (4) wurde aus Versuchsergebnissen abgeleitet und gilt für Versuche unter Schwelllasten.

$$\delta = 1 - \frac{1}{a \cdot N^b} \quad (5)$$

mit

N	Lastzyklus
a, b	empirische Parameter

Die Parameter a und b sind eine Funktion der zyklischen Lastspanne.

5.1.4 Kalibrierung des TAZ-Modells an den Modellversuchen

Mit Hilfe der Modellvorstellung von Randolph/Wroth (7) und den Gleichungen (1) bis (5) kann die Verschiebung eines Pfahlelements durch Integration der Scherspannungen berechnet werden. Zusätzlich wird für jeden Lastzyklus die Änderung des Sekantenschermoduls iterativ berechnet.

Bild 13 zeigt die Nachrechnung eines statischen Modellversuchs mit dem Ansatz für die Erstbelastungskurve nach Gleichung (1). Der Versuch wurde in der Spannungszelle in nichtbindigem Boden durchgeführt. Die statische t - z -Kurve (entspricht hier der q_s - s -Kurve) zeigt mit den in Bild 13 genannten Parametern eine gute Übereinstimmung zwischen Messergebnis und Berechnung mit dem TAZ-Modell.

Bild 14 zeigt die Nachrechnung eines zyklischen Modellversuchs unter Schwelllasten mit dem An-

satz für die Wiederbelastungskurve nach Gleichung (3). Der Versuch wurde wie der statische Versuch in der Spannungszelle in nichtbindigem Boden durchgeführt. Die Verschiebungskurve zeigt mit den in Bild 14 genannten Parametern eine gute Übereinstimmung zwischen Messergebnis und Berechnung mit dem TAZ-Modell.

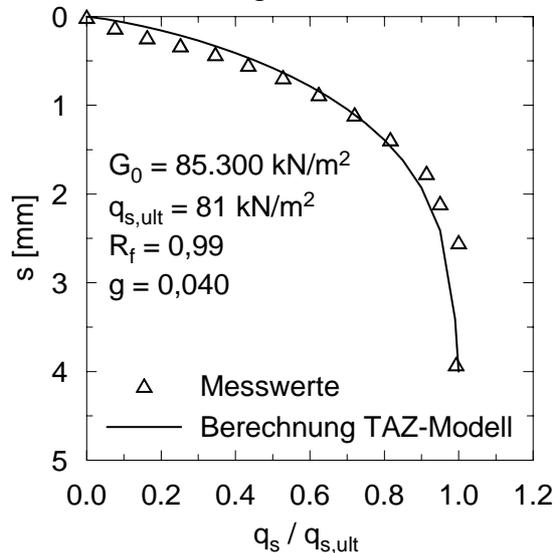


Bild 13. Nachrechnung eines statischen Druckversuchs mit dem TAZ-Modell

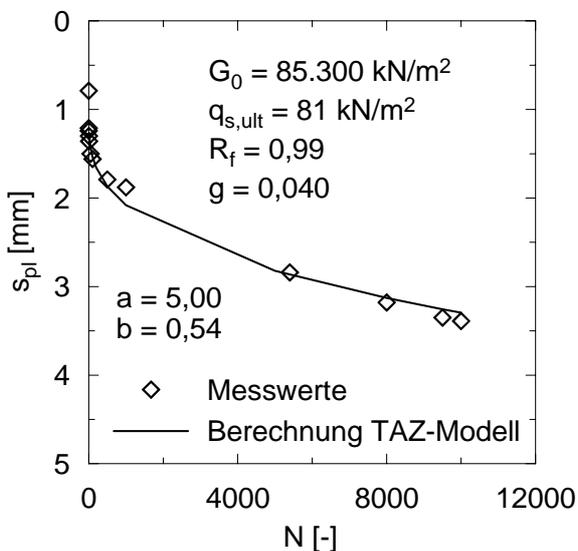


Bild 14. Nachrechnung eines zyklischen Versuchs unter Druckschwelllasten mit dem TAZ-Modell

5.1.5 Berücksichtigung weiterer zyklischer Phänomene

Im Rahmen der Bearbeitung des DFG-Projekts werden weitere zyklische Phänomene im TAZ-Modell berücksichtigt, wie z. B. die Akkumulation der plastischen Verschiebung unter Wechsel-

lasten, die Änderung der Pfahltragfähigkeit und die Ausdehnung des Scherbandes in nichtbindigen Böden. Weiterhin soll ein Ansatz für die Pfahl-Boden-Wechselwirkung am Pfahlfuß aufgestellt werden. Die Ergebnisse werden in Thomas (3) veröffentlicht und fließen in die 2. Auflage der EA-Pfähle (1) ein.

Quellennachweis

1. EA-Pfähle: *Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle"* EA-Pfähle. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1. Auflage, 2007.
2. Walz, B.: *Der 1g-Modellversuch in der Bodenmechanik – Verfahren und Anwendung*. Vorträge zum 2. Hans Lorenz Symposium, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 40, S. 13-26, 2006.
3. Thomas, S.: *Pfahltragverhalten unter zyklisch axialer Belastung*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, in Vorbereitung.
4. Kempfert, H.-G.: Abschnitt 3.2: „*Pfahlgründungen*“. In: *Grundbau-Taschenbuch*, Teil 3, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 7. Auflage, 2010.
5. Kempfert, H.-G.; Thomas, S.; Gebreselassie, B.: *Observation of Pile-Soil-Interaction during Cyclic Axial Loading using Particle Image Velocimetry*. Proceedings of the GeoShanghai 2010 International Conference, Deep foundations and geotechnical in situ testing, pp. 67-72, 2010.
6. Donohue, S.; O’Sullivan, C.; Long, M.: *Particle breakage during cyclic triaxial loading of a carbonate sand*. *Geotechnique*, Vol. 59, No. 5, pp. 477-482, 2010.
7. Randolph, M. F.; Wroth C. P.: *Analysis of deformation of vertically loaded piles*. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 104, No. 12, pp. 1465-1488, 1978.
8. Duncan, J. M.; Chang C.-Y.: *Nonlinear analysis of stress and strain in soils*. *Journal of Soil Mechanics Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, SM5, pp. 1629-1653, 1970.
9. Fahey, M.; Carter, J. P.: *A finite element study of the pressuremeter test in sand using a nonlinear elastic-plastic model*. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30(2), pp. 348-362, 1993.
10. Masing, G.: *Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing*. Proceedings of the 2nd International Congress of Applied Mechanics, pp. 332-335, 1926.