

Sebastian Thomas
Hans-Georg Kempfert

Experimentelle Erkenntnisse zum zyklisch axialen Pfahltragverhalten

Zyklisch axiale Einwirkungen auf Pfähle können bekanntermaßen zur Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls und zur Änderung der post-zyklischen Tragfähigkeit führen. Zu den Ursachen dieser Phänomene bestehen aber noch erhebliche Kenntnisdefizite. Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes sind neue Erkenntnisse zum zyklischen und post-zyklischen Pfahltragverhalten erzielt worden. Dieser Beitrag berichtet von der Methodik und den wesentlichen Ergebnissen dieser Untersuchungen: In insgesamt 77 Probelastungen an Modellpfählen konnten durch die Variation der Belastungsparameter und der Bodenkenngrößen verschiedene Einflussfaktoren für die Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls und die Minderung der Tragfähigkeit identifiziert werden. Auf Grundlage von Spannungsmessungen im Pfahlnahbereich und der Beobachtung von bodenmechanischen Vorgängen mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) konnten Hypothesen zum zyklischen und post-zyklischen Tragverhalten abgeleitet werden. Schließlich wird ein neuartiges Interaktionsdiagramm vorgestellt, mit dem das zu erwartende Verschiebungsverhalten des Pfahls qualitativ abgeschätzt werden kann.

Keywords: Pfähle, zyklisch axiale Einwirkungen, Spannungsänderung, Porenwasserüberdruckakkumulation, Verschiebungsakkumulation, Minderung der Tragfähigkeit

It is known that cyclic axial loads may lead to the accumulation of plastic pile displacement and to the change in post-cyclic pile capacity, but the causative mechanisms of cyclic pile behaviour are not completely understood. Thus, within the framework of a project supported by the German Research Foundation (DFG), the cyclic and post-cyclic pile behaviour was systematically investigated using three experimental concepts. This paper reports about the investigation techniques and the significant findings of test results: In 77 model tests loading parameters and soil properties were modified. In this way it was possible to identify key influence factors for the accumulation of plastic pile displacement and for the degradation in post-cyclic pile capacity. Based on stress measurements and observation of soil mechanical mechanisms using Particle Image Velocimetry (PIV) different hypothesis for cyclic and post-cyclic pile behaviour could be derived. Finally, in order to forecast the plastic pile displacements from a qualitative viewpoint, a novel interaction diagram is presented.

Keywords: piles, cyclic axial loads, stress changes, excess pore pressure accumulation, displacement accumulation, reduction in pile capacity

1 Einführung

Zyklisch axiale Einwirkungen auf Pfahlgründungen sind beispielsweise bei Jacket-Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen infolge von Wind, Wellen und Strömung zu erwarten. Aber auch Gründungspfähle von integralen Brückenbauwerken oder unter Schleusentrögen können durch tages- oder jahreszeitliche Temperaturschwankungen bzw. Wasserspiegeländerungen zyklisch axial belastet werden. Die bisherige Erfahrung zeigt, dass zyklisch axiale Einwirkungen das Pfahltragverhalten sowohl in bindigen als auch besonders in nichtbindigen Böden stark verändern können. Aus diesem Grund sind die

Auswirkungen der zyklischen Belastung auf das Pfahltragverhalten in den erforderlichen Standsicherheitsnachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) zu berücksichtigen, siehe z. B. [1], [2], [3].

Wie Veröffentlichungen zur Thematik belegen, ist die Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls, d. h. die mit den Lastzyklen zunehmende Verschiebung des Pfahls bei konstantem mittleren und zyklischen Lastniveau, ein häufig bei Pfahlprobelastungen und in Modellversuchen beobachtetes Phänomen während der zyklischen Belastung, siehe z. B. [4], [5] und [6].¹ Darüber hinaus können zyklische Einwirkungen auch das post-zyklische Pfahltragverhalten verändern, wobei in Veröffentlichungen überwiegend von der Minderung der Tragfähigkeit berichtet wird, z. B. in [7] und [8], jedoch ist in Pfahlprobelastungen auch die Zunahme der Tragfähigkeit festgestellt worden, z. B. [9] und [10].

Über die Einflussfaktoren für diese Phänomene ist derzeit nur wenig bekannt. Bisher publizierte Labor- und Feldversuche haben aber zumindest gezeigt, dass Schwelllasten meist zu einer größeren plastischen Verschiebung während der zyklischen Belastung führen und Pfähle oftmals nur geringe Änderungen in der post-zyklischen Tragfähigkeit aufweisen. Wechsellasten hingegen verursachen meist eine größere Abnahme der Tragfähigkeit, wobei die plastische Verschiebung während der zyklischen Belastung aufgrund der gleichen oder annähernd gleichen Druck- und Zugbelastung des Pfahls jedoch geringer bleibt. Wie die Versuche in [4] und [6] aber auch gezeigt haben, können Wechsellasten in bindigem bzw. nicht-bindigem Boden nach nur geringer plastischer Verschiebung während der ersten Lastzyklen bei weiterer Belastung unerwartet zur progressiven Verschiebungszunahme des Pfahls führen.

Auch über die bodenmechanischen Vorgänge bei der Pfahl-Boden-Wechselwirkung bestehen noch erhebliche Kenntnisdefizite. In Folge dessen liegen derzeit zur Prognose des Tragverhaltens zyklisch axial belasteter Pfähle keine abgesicherten Berechnungsmodelle vor, die zum Nachweis der Standsicherheit in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) nach [1] erforderlich sind. Um den Kenntnisstand zum zyklisch axialen Pfahltragverhalten zu erweitern, sind im Rahmen eines DFG-Forschungsprojekts am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel systematische Untersuchungen mit drei grundlegend unterschiedlichen Versuchsprogrammen durchgeführt worden. Nachfolgend werden hauptsächlich die experimentellen Untersuchungen aus [11] zusammengefasst, wobei die Untersuchungsmethodik und die wesentlichen Erkenntnisse anhand ausgewählter Versuchsergebnisse vorgestellt werden. Darüber hinaus sind aber auch zwischenzeitlich im Rahmen eines Offshore-Projektes gewonnene Erkenntnisse in den Beitrag eingeflossen, so dass ein neuartiges Interaktionsdiagramm für die praktische Beurteilung erstellt werden konnte.

2 Methodik der Untersuchungen

2.1 Versuchsstände

Das statische, zyklische und post-zyklische Pfahltrag- sowie Bodenverhalten wurde mit umfangreichen Versuchsprogrammen in folgenden drei Versuchsständen untersucht:

Versuchsprogramm (I)

Modellversuche in einer Spannungszelle (Bild 1, links), die in Anlehnung an eine Triaxialzelle konstruiert wurde. Eine zylindrische Bodenprobe mit einem Durchmesser von 0,5 m und einer Höhe von ca. 1,0 m war seitlich von einer Latexmembran sowie oben und unten von einer Belastungs- bzw. Fußplatte umschlossen. In der Mittelachse der Spannungszelle befand sich der Pfahl (*Pfahlelement*). Unter dem Pfahlfuß war ein Hohlraum, so dass nur Mantelreibung, aber kein Spitzendruck mobilisiert werden konnte, da das veränderte Tragverhalten bekanntermaßen im Wesentlichen auf eine Reduktion des Pfahlman-

¹ Eine Definition von Begriffen im Zusammenhang mit Pfählen unter zyklischen Einwirkungen findet sich in [3].

telwiderstands zurückgeführt werden kann. Über eine Drucksteuerung des Zellwassers ließen sich in der Bodenprobe verschiedene Spannungszustände erzeugen. Die Versuche in Versuchsstand (I) sollten Einflussfaktoren auf das zyklische Pfahltragverhalten sowie die Spannungs- und Porenwasserdruckentwicklung im Pfahlnahbereich identifizieren.

Versuchsprogramm (II)

1g-Modellversuche in einem Stahlzylinder mit einem Durchmesser von 1,0 m und einer Höhe von 2,1 m (Bild 1, mittig). Bei diesen Versuchen befand sich unter dem Pfahlfuß im Gegensatz zu den Versuchen in der Spannungszelle kein Hohlraum, so dass sowohl Mantelreibung als auch Spitzendruck mobilisiert werden konnten. Zielstellung der Versuche in Versuchsstand (II) war insbesondere die Untersuchung des Pfahltragverhaltens unter statischer Zug- und Druckbelastung sowie unter zyklischen Zug- und Druckschwelllasten.

Versuchsprogramm (III)

1g-Modellversuche in einem Versuchskasten von 60 cm Breite, 20 cm Tiefe und 40 cm Höhe (Bild 1, rechts). Eine Plexiglasscheibe ersetzte die Vorderseite des Versuchskastens, so dass die Bewegung der Sandkörner beobachtet werden konnte. Nach jeweils 10 Lastzyklen wurde die Belastung unterbrochen und ein Foto aufgenommen. Die Lageänderung der Sandkörner wurde anschließend mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) ausgewertet. Mit den Versuchen in Versuchsstand (III) sollten die Bewegung der Bodenpartikel und die Entwicklung von Dehnungsfeldern im Pfahlnahbereich identifiziert werden.

2.2 Modellpfähle

Bei den Versuchen in Versuchsstand (I) und (II) wurde ein Modellpfahl mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Pfahlänge von 1,0 bzw. 1,4 m verwendet. Der Pfahl setzte sich aus mehreren Stahlhülsen zusammen und hatte drei bzw. fünf Messquerschnitte, so dass der Kraftdurchgang und die Verteilung der Mantelreibung abgeleitet werden konnten. Die Oberfläche des Pfahls war mit Modellsand (Abschnitt 2.3) besandet, um eine größere Rauigkeit gegenüber der glatten Stahloberfläche zu erzeugen.

Bei den foto-optischen Versuchen in Versuchsstand (III) wurde als Modellpfahl ein quadratisches Hohlprofil mit 5 cm Kantenlänge verwendet, das sich aus 2 mm dicken Stahlblechen zusammensetzte. Dieser Pfahl hatte eine Länge von 50 cm und band etwa 40 cm in den Modellboden ein.

2.3 Versuchsböden

Bei den Versuchen wurden ein gewaschener und feuergetrockneter Industrie-Spezialsand aus einem Kieswerk in Bobenheim-Roxheim (Rheinland-Pfalz), ein Geschiebemergel aus einer Hamburger Baugrube und ein Ton aus einem Tagebau bei Zimmersrode (Hessen) verwendet. Einen Überblick über die versuchstechnisch bestimmten bodenmechanischen Kenngrößen und die Körnungsbänder geben Tab. 1 bzw. Bild 2.

2.4 Versuchseinbau

Zum Einbau des Modellbodens wurde der Pfahl zunächst am Kopf fixiert. Anschließend wurde der Modellboden abhängig von der Bodenart um den Pfahl herum eingebaut, da eine spätere Pfahleinbringung zu einem veränderten Ausgangsspannungszustand im Pfahlnahbereich geführt hätte, der bei der Bohrpfahlherstellung in situ nicht zu erwarten ist. Der nichtbindige Boden wurde mit der Sandregenmethode eingebaut. Der gemischtkörnige Boden wurde zunächst zu haselnussgroßen Stücken aufbereitet und dann in Lagen von ca. 10 cm mit einem Proctorhammer verdichtet. Bei Versuchen im bindigen Boden wurde dieser zunächst zu etwa 10 cm langen Röllchen mit einem Durchmesser von 5 mm in einer hydraulischen Auspressvorrichtung homogenisiert und anschließend wie der gemischtkörnige Boden in Lagen von ca. 10 cm mit einem Proctorhammer verdichtet. Diese Einbaumethoden ermöglichten reproduzierbare Ver-

suchsergebnisse.

2.5 Versuchsprogramme

In den drei Versuchsständen wurden insgesamt 14 statische, 51 zyklische und 12 post-zyklische Versuche durchgeführt. In Parameterstudien wurden dabei die Belastungsart (Druckschwelllast/Zugschwelllast/symmetrische Wechsellast/Druckwechsellast/Zugwechsellast), das mittlere Lastniveau (0 bis 0,66), das zyklische Lastniveau (0 bis 0,38), die Belastungsfrequenz (0,2/1,0/2,0 Hz), die Bodenart (nichtbindig, gemischtkörnig, bindig), das Spannungsniveau (50/100/200 kN/m²), der Sättigungsgrad (0/100 %) und die Lagerungsdichte (0,4/0,6/0,8) variiert.

Die jeweils zunächst durchgeführten statischen Modellversuche ermöglichten einen Vergleich mit den zyklischen und post-zyklischen Ergebnissen. Außerdem konnte der Pfahlwiderstand im Bruchzustand als Bezugsgröße für die Ermittlung des mittleren und zyklischen Lastniveaus abgeleitet werden. Die Belastung erfolgte in Anlehnung an [3] in mehreren Laststufen bis zum Versagen des Pfahls. Die nächste Laststufe wurde immer erst dann aufgebracht, wenn der Verschiebungszuwachs des Pfahls auf etwa 0,01 mm/min abgesunken war. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug bei allen statischen und post-zyklischen Versuchen 0,5 kN/min.

Bei den zyklischen Versuchen erfolgte die Belastung des Pfahls durch ein Ein-Stufen-Kollektiv in Form einer harmonischen, sinusförmigen Belastung. Im Anschluss an zyklische Versuche, die während der zyklischen Belastung nicht versagt hatten, wurde in Versuchsprogramm (I) eine statische Probebelastung zur Identifikation des post-zyklischen Pfahltragverhaltens durchgeführt.

2.6 Modellgesetze

Bei den Versuchen in Versuchsstand (I) konnte ein beliebiges Spannungsniveau im Boden durch Steuerung des Zelldrucks erzeugt werden. Dadurch wurden Modellfehler vermieden, die sich bei 1g-Modellversuchen aufgrund der Spannungsabhängigkeit des Bodens nicht ausschließen ließen. Die Ergebnisse der Versuche in der Spannungszelle lassen sich somit weitgehend auf einen Pfahl in situ übertragen. Bei den 1g-Modellversuchen in Versuchsstand (II) und (III) hingegen ist eine zahlenmäßige Übertragung der Versuchsergebnisse auf einen Pfahl in situ nicht möglich, da die Randbedingungen im Modellversuch und beim Prototypen aufgrund des niedrigen Spannungszustands nicht mechanisch äquivalent sein können. Zielstellung bei den 1g-Modellversuchen war daher vielmehr die phänomenologische Untersuchung des geotechnischen Systems. In Verbindung mit den Ergebnissen der Versuche in der Spannungszelle sollten dann die Ursachen für die beobachteten bodenmechanischen Vorgänge im Pfahlbereich erklärt werden. Die Anwendung von Modellgesetzen war folglich auch nicht erforderlich.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Bodenmechanische Vorgänge im Pfahlbereich

In Versuchsstand (III) erfolgten insgesamt 16 kraft- und weggesteuerte Versuche. Nachfolgend werden die Erkenntnisse aus den fünf kraftgesteuerten Versuchen beschrieben, die bei mitteldichter Lagerung in trockenem Sand unter Druck- und Zugschwelllasten sowie symmetrischen und asymmetrischen Druck- und Zugwechsellasten durchgeführt wurden (Tab. 2).

Bereits visuell konnte durch die Plexiglasscheibe beobachtet werden, dass die Belastung des Pfahls aufgrund der Wechselwirkung zwischen Pfahlmantel und Boden die Sandkörner in Bewegung brachte. Während eines Lastzyklus hoben und setzten sich die Bodenpartikel im Pfahlbereich abhängig von der Verschiebungsrichtung des Pfahls. Am Ende eines Lastzyklus veränderte sich dadurch die Lage der Sandkörner. Diese Lageänderung ließ sich in Form von Verschiebungsvektoren mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) ermitteln (Bild 3a). Aus der Richtung und Größe der Verschiebungsvektoren

wurde die Scherdehnung abgeleitet und in Form von Isoflächen dargestellt. Dadurch konnte erkannt werden, dass sich angrenzend an den Pfahlmantel eine schmale *Scherfuge* und ein deutlich breiteres *Scherband* bildete (Bild 3b). Der radiale Abstand vom Pfahlmantel, an dem die Scherdehnung am größten ist, bildet den Übergang zwischen Scherfuge und Scherband und ist durch den Vorzeichenwechsel der Scherdehnung gekennzeichnet.

Bei allen Druckschwelllast- und Wechsellastversuchen wurde die Scherfuge in den ersten Lastzyklen zunächst breiter und blieb dann bei Breiten von etwa 6 bis 11 mm (ca. 12 bis 22 d_{50}) bis zum Versagen des Pfahls konstant (Bild 4a). Das Scherband dagegen wurde kontinuierlich breiter und betrug beim Versagen des Pfahls das ca. 70- bis 140-fache des mittleren Korndurchmessers (Bild 4b). Nur unter Zugschwelllasten konnte die Scherfuge nicht eindeutig identifiziert werden.

Als ein maßgeblicher Einflussfaktor für das Bodenverhalten im Pfahlnahbereich wurde die Belastungsart des Pfahls identifiziert. In der Scherfuge und im Scherband wurde sowohl eine Verdichtung als auch eine Auflockerung des Bodens festgestellt. In den Versuchen unter Druckschwelllasten konnte aus der Größe und Richtung der Verschiebungsvektoren abgeleitet werden, dass der Boden mit zunehmender Anzahl an Lastzyklen in der Scherfuge auflockerte und sich gleichzeitig im Scherband verdichtete. Während eines Lastzyklus konnte das Bodenverhalten in der Scherfuge zwar nicht direkt untersucht werden, da die Fotos jeweils nach den Lastzyklen aufgenommen wurden. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass der Boden in der Scherfuge mit Beginn eines Lastzyklus auflockerte und sich dann bei Belastungsminderung wieder verdichtete, siehe auch [12], wobei nach einem Lastzyklus die „dilatante Phase“, in der der Boden auflockert, gegenüber der „kontraktanten Phase“, in der sich der Boden verdichtet, stärker ausgeprägt war. In den Versuchen unter Wechsellasten hingegen war vermutlich die „kontraktante Phase“ innerhalb eines Lastzyklus ausgeprägter, denn mit Hilfe der PIV wurde eine Verdichtung des Bodens in der Scherfuge mit zunehmender Anzahl an Lastzyklen festgestellt.

3.2 Spannungsänderung im Pfahlnahbereich

Die Spannungsänderung im Pfahlnahbereich während der zyklischen Belastung wurde im Versuchstand (I) mittels radial, tangential und vertikal zum Pfahlmantel angeordneter Erddrucksensoren (EDS) in 10 Versuchen im trockenen Sand gemessen. Die Sensoren wurden jeweils im Abstand von ca. 5 cm vom Pfahlmantel etwa in der Mitte der Bodenprobe angeordnet.

Die qualitative Bewertung der gemessenen Spannungsänderung im Pfahlnahbereich ist in Abhängigkeit von der Belastungsart in Tab. 3 angegeben. Demnach wurden bei den Versuchen unter Druckschwelllasten ein Anstieg der effektiven Radial- und Tangentialspannungen sowie eine Abnahme der effektiven Vertikalspannungen gemessen. Die Zunahme der Radialspannungen war dabei jedoch deutlich größer als der Zuwachs der Tangentialspannungen. In den Versuchen unter Wechsellasten, die zum Versagen führten, wurde hingegen nach nur geringen Spannungsänderungen in den ersten Lastzyklen bei weiterer zyklischer Belastung eine Abnahme der effektiven Radial- und Vertikalspannungen sowie eine deutliche Zunahme der effektiven Tangentialspannungen gemessen, wie auch exemplarisch anhand eines ausgewählten Wechsellastversuchs in Bild 5 zu erkennen ist. Die Abnahme der Radialspannungen war dabei deutlich größer als die Minderung der Vertikalspannungen. Im Vergleich zu einem ebenfalls durchgeführten statischen Druckversuch wurden die Radialspannungen durch die zyklische Belastung tendenziell stärker beeinflusst.

Die Spannungsänderung in radialer, tangentialer und vertikaler Richtung resultiert insbesondere aus der mit der zyklischen Scherung des Bodens einhergehenden Porenzahländerung durch Verdichtungs- und Auflockerungsprozesse. Diese werden durch die Bewegung der Sandkörner im Pfahlnahbereich verursacht. Die unter verschiedenen Belastungsarten beobachtete Bewegung der Sandkörner ist schematisch in Bild 6 dargestellt. Unter Druck- und Zugschwelllasten erfolgte eine Bewegung der Sandkörner in Rich-

tung der radial zum Pfahlmantel angeordneten Erddruckmessdosen, womit eine Erhöhung der Radialspannungen verbunden war. Die in den Versuchen unter symmetrischen Wechsellasten festgestellte Bewegung der Sandkörner in Richtung Pfahlmantel führt hingegen zu einer Abnahme der Radialspannungen. Gleichzeitig bilden die stark erhöhten Tangentialspannungen einen Druckring aus, der den Einfluss der Radialspannungen auf den Pfahlmantel reduziert. Durch die Abnahme der Radialspannungen wird der Bruchwert der Mantelreibung mit zunehmender Anzahl an Lastzyklen vermindert und der Boden plastifiziert (Bild 7).

3.3 Einflussfaktoren

Im Versuchsstand (I) wurden 27 zyklische Versuche durchgeführt, wobei u. a. das Lastniveau, die Belastungsart, Bodenart, Belastungsfrequenz und der Sättigungsgrad variiert wurden. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse zu diesen Einflussfaktoren zusammengefasst.

Lastniveau und Belastungsart

Bild 8 zeigt den Einfluss des mittleren und zyklischen Lastniveaus auf das Verschiebungsverhalten des Pfahls im mitteldicht gelagerten Sand. Bei den Versuchen unter Druckschwelllasten wirkten sich sowohl ein größeres mittleres Lastniveau (beim Vergleich zweier Versuche mit gleichem zyklischem Lastniveau) als auch ein größeres zyklisches Lastniveau (bei gleichem mittlerem Lastniveau) ungünstig auf das Verschiebungsverhalten aus (Bild 8a). Bei Versuchen unter Wechsellasten versagten die Pfähle bei größerem zyklischem Lastniveau (bei gleichem mittlerem Lastniveau) ebenfalls nach weniger Lastzyklen, jedoch wirkte sich ein größeres mittleres Lastniveau, zumindest bei Druckwechsellasten, günstig auf das Verschiebungsverhalten aus (Bild 8b).

Der Verschiebungsverlauf des Pfahls unter symmetrischer Wechsellast (blaue Kurve in Bild 8b) ist besonders zu beachten. Bis etwa zum 200. Lastzyklus blieb die plastische Verschiebung des Pfahls in diesem Versuch annähernd Null und die Verschiebungsrate, d. h. der Zuwachs an plastischer Verschiebung pro Lastzyklus, nahm ab. Zwischen dem 200. und 300. Lastzyklus kehrte sich die Verschiebungsrate um, und der Pfahl setzte sich zunächst um wenige Zehntel Millimeter. Ab etwa dem 400. Lastzyklus begann sich der Pfahl zu heben, um schließlich nach ca. 800 Lastzyklen durch Herausziehen zu versagen. Eine Umkehr der Verschiebungsrate und damit die Möglichkeit eines progressiven Versagens des Pfahls wird häufig unter symmetrischen Wechsellasten oder auch bei großen mittleren und zyklischen Lastniveaus unter Schwelllasten beobachtet, siehe z. B. [4], [6] bzw. [13].

Hinsichtlich der elastischen Verschiebung, d. h. der zyklischen Verschiebungsspanne, wurde festgestellt, dass diese umso größer war, je größer das zyklische Lastniveau war. Gleichzeitig ist ein deutlicher Unterschied zwischen Druckschwelllasten und Wechsellasten festzustellen. Aus Bild 9 kann die elastische Verschiebung im 1. und 500. Lastzyklus exemplarisch für einen Versuch unter Druckschwell- und symmetrischer Wechsellast abgeleitet werden, die bei annähernd gleichem zyklischem Lastniveau in trockenem Sand durchgeführt wurden. Unter Schwelllasten blieb die elastische Verschiebung und damit auch die zyklische Steifigkeit annähernd konstant (Bild 9a, schwarze Kurven). Unter Wechsellasten dagegen nahm die elastische Verschiebung zu und die zyklische Steifigkeit ab, wie die typischen „Schmetterlingschleifen“ zeigen (Bild 9b, schwarze Kurven) und gleichzeitig auch auf das progressive Versagen des Pfahls hindeuten.

Bei gesonderter Betrachtung der mobilisierten Mantelreibung (q_{sI} , q_{sII} und q_{sIII} nach Bild 1) entlang des Pfahls zeigte sich sowohl unter Druckschwelllasten als auch unter Wechsellasten, dass die mobilisierte Mantelreibung mit steigender Anzahl an Lastzyklen im oberen und unteren Drittel des Pfahls abnahm (Bild 9, farbige Kurven). Im mittleren Drittel nahm die mobilisierte Mantelreibung entsprechend zu, so dass die aufgebrachte Kraft summarisch stets der mobilisierten Mantelreibung entsprach (Bild 9, schwarze Kurven).

Bodenart

Die Untersuchungen zum Einfluss der Bodenart zeigten, dass das Verschiebungsverhalten des Pfahls unter Druckschwelllasten im trockenen Sand erheblich ungünstiger war als im Geschiebemergel und Ton (Bild 10a). Bei den Versuchen unter Wechsellasten (Bild 10b) zeigte sich die gleiche Tendenz. Der Versuch im Sand versagte bereits nach etwa 600 Lastzyklen, die Versuche im Geschiebemergel und Ton wurden nach etwa 100.000 bzw. 20.000 Lastzyklen bei nur geringer plastischer Verschiebung beendet.

Belastungsfrequenz

Bei Versuchen in trockenem Sand, bei denen die Belastungsfrequenz zwischen 0,2 und 2,0 Hz variiert wurde, zeigte sich, dass das Verschiebungsverhalten des Pfahls näherungsweise unabhängig von der Frequenz war.

Sättigungsgrad

Der Sättigungsgrad wurde in nichtbindigem Boden variiert. Unter Druckschwelllasten wirkt sich die Sättigung ungünstig auf das Verschiebungsverhalten aus (Bild 11). Ursache ist die Akkumulation des Porenwasserüberdrucks, die im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert wird.

3.4 Porenwasserdruckakkumulation

Die Porenwasserdruckentwicklung im Pfahlnahbereich wurde im Versuchsstand (I) in gesättigtem Sand unter undrännierten Randbedingungen in einem Druckschwell- und einem Wechsellastversuch untersucht. Der Porenwasserdruck wurde dabei etwa in der Mitte der Bodenprobe im Abstand von ca. 1 cm zum Pfahlmantel gemessen.

Die Porenwasserdruckmessungen zeigten, dass sich während der zyklischen Belastung progressiv ein Porenwasserüberdruck aufbaut. Im Versuch unter Druckschwelllasten erhöhte sich der Porenwasserdruck bis zum Versagen des Pfahls durch Herausziehen nur geringfügig um etwa 1 kN/m^2 . Unter Wechsellasten hingegen betrug der Porenwasserüberdruck beim Versagen etwa 30 kN/m^2 . Die Porenwasserdruckakkumulation war somit deutlich größer als im Versuch unter Druckschwelllasten, obwohl der Wechsellastversuch mit einem niedrigeren zyklischen Lastniveau durchgeführt wurde (Bild 12).

Eine Ursache für die Entstehung von Porenwasserüberdruck ist die Verdichtung des Bodens im Pfahlnahbereich (Abschnitt 3.1). Aufgrund der undrännierten Randbedingungen konnten sich die Porenwasserüberdrücke nach einem Lastzyklus nicht wieder vollständig abbauen, so dass sich mit zunehmender Anzahl an Lastzyklen der Porenwasserüberdruck akkumulierte. Die dadurch größer werdenden neutralen Spannungen führten zur Abnahme der effektiven Hauptspannungen, da sich die totalen Spannungen während der zyklischen Belastung nicht änderten. Die abnehmenden effektiven Hauptspannungen führten wiederum zu einem abnehmenden Schubmodul des Bodens, da dieser bekanntermaßen maßgeblich von der mittleren effektiven Hauptspannung abhängig ist.

Somit kann die Porenwasserüberdruckakkumulation einerseits zu einem ungünstigeren Verschiebungsverhalten des Pfahls führen (Bild 11), andererseits aber auch eine kleinere post-zyklische Pfahltragfähigkeit (Abschnitt 3.5) verursachen und bei Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) bemessungsrelevant werden. Eine wesentliche Erkenntnis aus den Versuchsergebnissen ist somit, dass die Auswirkung einer möglichen Porenwasserdruckakkumulation bei der Bemessung von zyklisch axial belasteten Pfählen untersucht werden sollte, vgl. auch [14].

3.5 Post-zyklisches Tragverhalten

Der Einfluss der zyklischen Belastung auf das post-zyklische Tragverhalten lässt sich durch eine statische Pfahlprobebelastung ermitteln, die nach einem zyklischen Versuch am gleichen Pfahl durchgeführt wird. Der so ermittelte Druck- oder Zugwiderstand des Pfahls im Bruchzustand nach N Lastzyklen kann

dann mit dem statischen Pfahlwiderstand verglichen werden, die der Pfahl ohne eine zyklische Belastung gehabt hätte.

Bei den Versuchen bestätigte sich die auch von anderen Autoren festgestellte Tendenz, dass unter Druck- und Zugschwelllasten eine geringe Abnahme, aber auch eine geringe Zunahme der Pfahltragfähigkeit auftreten kann, während Wechsellasten immer zu einer deutlichen Reduktion der Tragfähigkeit führen, siehe Tab. 4.

Der Bruchwert des Pfahlspitzendrucks $q_{b,ult}(N)$ wird infolge der zyklischen Belastung nicht maßgeblich ungünstig verändert, so dass die Änderung der Pfahltragfähigkeit im Wesentlichen aus der Änderung der Pfahlmantelreibung resultiert, siehe auch [3].

4 Neuartiges Interaktionsdiagramm

Zur Prognose des Verschiebungsverhaltens zyklisch axial belasteter Pfähle (Bild 13) wurde ein neuartiges Interaktionsdiagramm entwickelt (Bild 14). Das Interaktionsdiagramm ermöglicht auf einfache Weise eine qualitative Beurteilung des zyklischen Pfahlverhaltens zwischen 100 und 10.000 Lastzyklen in nichtbindigen Böden. Bei der Entwicklung des Diagramms wurde das Verschiebungsverhalten von zahlreichen Modell- und Feldversuchen sowie Pfahlprobelastungen berücksichtigt. Die Anwendung des Diagramms bei bindigen Böden ist sehr konservativ, da in diesem Fall ein erheblich günstigeres Verschiebungsverhalten zu erwarten ist (Abschnitt 3.3). Dies gilt insbesondere für Wechsellasten, da in nichtbindigen Böden auch bei vergleichsweise niedrigen Lastniveaus ein Verhalten nach Kategorie III b möglich ist.

In Bild 13 sind mögliche Hebungverläufe eines Pfahls dargestellt, wie sie unter Zugschwelllasten, symmetrischen Wechsellasten und asymmetrischen Zugwechsellasten zu erwarten sind. Im Fall von Druckschwelllasten und asymmetrischen Druckwechsellasten ist analog zum Hebungsverlauf von Pfahlsetzungen auszugehen, d. h. die Kurven können an der Abszisse gespiegelt werden. Eine Ausnahme bildet der häufig unter symmetrischen Wechsellasten in Sand beobachtete Verschiebungserlauf nach Kurve III b, siehe auch Bild 8b, der nach Erreichen von N_{krit} stets zum Versagen auf Zug führt.

Der Verlauf der zyklischen Verschiebung eines Pfahls, die im Gegensatz zur plastischen Verschiebung nur die bleibende Verschiebung infolge zyklischer Belastung beschreibt, wurde bei linearer Darstellung der Lastzyklen auf der Abszisse wie folgt kategorisiert:

- Kategorie I (Kurve I in Bild 13):
Kombination aus mittlerem und zyklischem Lastniveau, die keine nennenswerte plastische Verschiebung des Pfahls verursacht.
- Kategorie II (Kurve II in Bild 13):
Kombination aus mittlerem und zyklischem Lastniveau, bei der es zwar zur Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls kommt, der Verschiebungsverlauf aber das Verhalten einer zyklischen Beruhigung aufweist.
- Kategorie III (Kurve III in Bild 13):
Kombination aus mittlerem und zyklischem Lastniveau, die zunächst das Verhalten einer zyklischen Beruhigung bewirkt, ab einem kritischen Lastzyklus N_{krit} aber die Umkehr der Verschiebungsrate verursacht, sodass der Pfahl schließlich progressiv versagt.
- Kategorie IV (Kurve IV in Bild 13):
Kombination aus mittlerem und zyklischem Lastniveau, die vom ersten Lastzyklus an zum progressiven Versagen des Pfahls führt.

Im Rahmen einer Pfahlbemessung sind bei den erforderlichen Standsicherheitsnachweisen zyklische Einwirkungen zu berücksichtigen, siehe [1] bis [3]. Nur im Fall eines zyklischen Lastniveaus von

$X_{zyk} < 0,10$ dürfen die Auswirkungen gemäß [3] als gering eingestuft und näherungsweise vernachlässigt werden. In diesem Fall ist ein Pfahlverhalten nach Kurve I in Bild 13 zu erwarten. Kombinationen von mittlerem und zyklischem Lastniveau nach Kategorie II führen zwar zur zyklischen Beruhigung des Pfahls, jedoch sind die zulässigen Verschiebungen beim Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) einzuhalten, so dass in der Regel das Verschiebungsverhalten des Pfahls mit Berechnungsmodellen zu prognostizieren ist. Lastniveaus nach Kategorie III und IV sollten möglichst vermieden werden, z. B. durch Änderung der Pfahlgeometrie, da die bisherigen, auf logarithmischen Ansätzen oder Potenzansätzen basierenden Berechnungsmodelle eine Umkehr der Verschiebungsrate und damit das Verhalten nach Kategorie III nicht erfassen können.

5 Schlussbemerkungen

Mit den experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass zyklisch axiale Einwirkungen auf Pfähle

- die Bildung einer Scherfuge und eines Scherbandes,
- Spannungsänderungen im Pfahlnahbereich infolge von Verdichtungs- und Auflockerungsvorgängen sowie ggf. infolge der Porenwasserdruckakkumulation und
- eine Umlagerung der mobilisierten Pfahlmantelreibung entlang des Pfahlmantels

bewirken. Weiterhin konnten maßgebliche Einflussfaktoren für diese Vorgänge identifiziert sowie Hypothesen über die Ursachen der Akkumulation der plastischen Verschiebung des Pfahls während der zyklischen Belastung und über die Änderung der post-zyklischen Pfahltragfähigkeit aufgestellt werden.

Mit dem vorgestellten Interaktionsdiagramm kann mit Hilfe des äquivalenten Ein-Stufen-Kollektivs auf einfache Weise die qualitative Beurteilung des zu erwartenden zyklischen Verschiebungsverhaltens für die praktische Anwendung vorgenommen werden.

Für die Bemessung eines Pfahls ist in der Regel zusätzlich die quantitative Prognose des Pfahltragverhaltens erforderlich. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wurde daher das Berechnungsmodell ZYKLAX entwickelt, mit dem das zyklische Verschiebungsverhalten aller Kategorien nach Bild 13 sowie auch das post-zyklische Pfahltragverhalten näherungsweise prognostiziert werden können. Dadurch wird die Nachweisführung sowohl im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) als auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) nach [3] ermöglicht. ZYKLAX ist ausführlich in [3] und [11] beschrieben, wurde zwischenzeitlich an weiteren Pfahlprobelastungen in situ validiert [15] und kam auch im Rahmen der Pfahlbemessung für einen Offshore-Windpark zum Einsatz.

Literatur

- [1] DIN EN 1997-1:2009-09: *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln*. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2009.
- [2] DIN 1054:2010-12: *Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2010.
- [3] EMPFEHLUNGEN DES ARBEITSKREISES „PFÄHLE“ EA PFÄHLE. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2012.
- [4] KARLSRUD, K., NADIM, F., HAUGEN, T.: *Piles in clay under cyclic axial loading – Field tests and computational modeling*. Proceedings of the 3rd International Conference of Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, pp. 165-190, 1986.
- [5] JARDINE, R. J., STANDING, J. R.: *Pile load testing performed for HSE cyclic loading study at Dunkirk, France*. Offshore Technology Report OTO 2000 007, Health and Safety Executive,

London, 2000.

- [6] SCHWARZ, P.: *Beitrag zum Tragverhalten von Verpresspfählen mit kleinem Durchmesser unter axialer zyklischer Belastung*. Technischen Universität München, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, Dissertation, Heft 33, 2002.
- [7] MCMANUS, K. J., KULHAWY, F. H.: *Cyclic axial loading of drilled shafts in cohesive soil*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 120 (1994), No. 9, pp. 1481-1497.
- [8] LEHANE, B. M., JARDINE, R. J., MCCABE, B. A.: *Pile group tension cyclic loading: Field test program*. Kinegar N. Ireland, Imperial College Consultants (ICON), Research Report No. 101, 2003.
- [9] TURNER, J. P., KULHAWY, F. H.: *Drained uplift capacity of drilled shafts under repeated axial loading*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 116 (1990), No. 3, pp. 470-491.
- [10] BAUMBACH, J., SCHWARZ, P.: *Axial zyklisch belastete Mikropfähle in bindigen Böden*. Schlussbericht, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München, 2010.
- [11] THOMAS, S.: *Zum Pfahltragverhalten unter zyklisch axialer Belastung*. Schriftenreihe Geotechnik der Universität Kassel, Dissertation, Heft 24, 2011.
- [12] DEJONG, J. T., WHITE, D. J., RANDOLPH, M. F.: *Microscale observation and modeling of soil-structure interface behaviour using Particle Image Velocimetry*. Soils and Foundations, Vol. 46 (2006), No. 1, pp. 15-28.
- [13] CHAN, S. F., HANNA, T. H.: *Repeated loading on single piles in sand*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 106 (1980), No. 2, pp. 171-188.
- [14] CUÉLLAR, P., BAEBLER, M., GEORGI, S., RÜCKER, W.: *Porenwasserdruckaufbau und Bodenentfestigung um Pfahlgründungen von Offshore-Windenergieanlagen*. Bautechnik 89 (2012), Heft 9, S. 585-593.
- [15] THOMAS, S., KEMPfERT, H.-G.: *ZYKLAX – Ein praxistaugliches Berechnungsmodell für zyklisch axial belastete Pfähle?* Tagungsband zum 19. Darmstädter Geotechnik Kolloquium, Heft 91, S. 77-89, 2012.

alle Autoren

Dr.-Ing. Sebastian Thomas
(vormals: Universität Kassel)
Kempfert + Partner Geotechnik
Goerdelerstr. 4
97084 Würzburg
E-Mail: s.thomas@kup-geotechnik.de

Prof. (em.) Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert
(vormals: Universität Kassel)
Potosistraße 27
22587 Hamburg
E-Mail: kempfert@kup-geotechnik.de

Tabelle 1 bis 4**Tab. 1** Übersicht über versuchstechnisch bestimmte Bodenkenngrößen der verwendeten Bodenarten**Table 1** Overview about properties of soil types used

Kenngröße	Formelzeichen und Einheit	Kennwert		
		Sand	Geschiebemergel	Ton
Bezeichnung nach DIN 18196	-	SE	ST*	TA
Mittlerer Korndurchmesser	d_{50} [mm]	0,400	0,030	0,005
Reibungswinkel	φ' [°]	39	20	17
Kohäsion	c' [kN/m ²]	0	7	23
Plastizitätszahl	I_p [-]	-	30	32
Konsistenzzahl	I_c [-]	-	1,15	1,34

Tab. 2 Überblick über die Randbedingungen der kraftgesteuerten Versuche**Table 2** Overview about boundary conditions of the load controlled model tests

Versuch	Belastungsart	X_{mitt} [-]	X_{zykl} [-]
PIV02	Zugschwelllast	0,38	0,38
PIV03	Druckschwelllast	< 0,38*)	< 0,38*)
PIV04	symmetrische Wechsellast	0	0,38
PIV05	asymm. Druckwechsellast	0,19	0,38
PIV06	asymm. Zugwechsellast	0,19	0,38

*) Das mittlere und zyklische Lastniveau war bei diesem Versuch kleiner, da kein statischer Druckversuch zur Bestimmung von R_c durchgeführt wurde und rechnerisch $R_c = R_t$ angesetzt wurde.

Tab. 3 Änderung der effektiven Spannungen im Boden mit zunehmender Anzahl an Lastzyklen und im statischen Druckversuch**Table 3** Change in the effective stresses with increasing number of load cycles and under monotonic compression load

Belastungsart	Radialspannung	Vertikalspannung	Tangentialspannung
Druckschwelllasten	++	-	+
Wechsellasten	--	+	++
Druckversuch (statisch)	+	++	-

*) Starke Zunahme (++), Zunahme (+), Abnahme (-) oder starke Abnahme (--) der Spannungen im Pfahlnahbereich.

Tab. 4 Änderung der statischen Tragfähigkeit nach Versuchen unter Schwell- und Wechsellasten

Table 4 Change in the ultimate bearing capacity after one-way and two-way tests

Versuch	Belastungsart	X_{mitt} [-]	X_{zykl} [-]	σ_3 [kN/m ²]	$R_{\text{ult}}^*)$ [kN]	$\Delta R_{\text{ult}}^{**})$ [kN]	δ [%]
PET12	Druckschwelllasten	0,27	0,18	100	21,1	3,5	+ 16
PET17	Druckschwelllasten	0,30	0,13	50	10,4	1,3	+ 13
PET28	Druckschwelllasten	0,30	0,20	100	11,5	-1,0	- 9
PET19	Zugschwelllasten	0,28	0,13	50	9,5	~ 0	~ 0
PET21	Wechsellasten	0	0,15	50	12,5 ^{***)}	-4,7	- 38

*) R_{ult} : statischer Pfahlwiderstand (Messwert), **) $\Delta R_{\text{ult}} = R_{\text{ult}} - R_{\text{ult}}(N)$, ***) Bei diesem Versuch: $D = 0,8$, sonst $D = 0,6$

Bild 1 bis 14

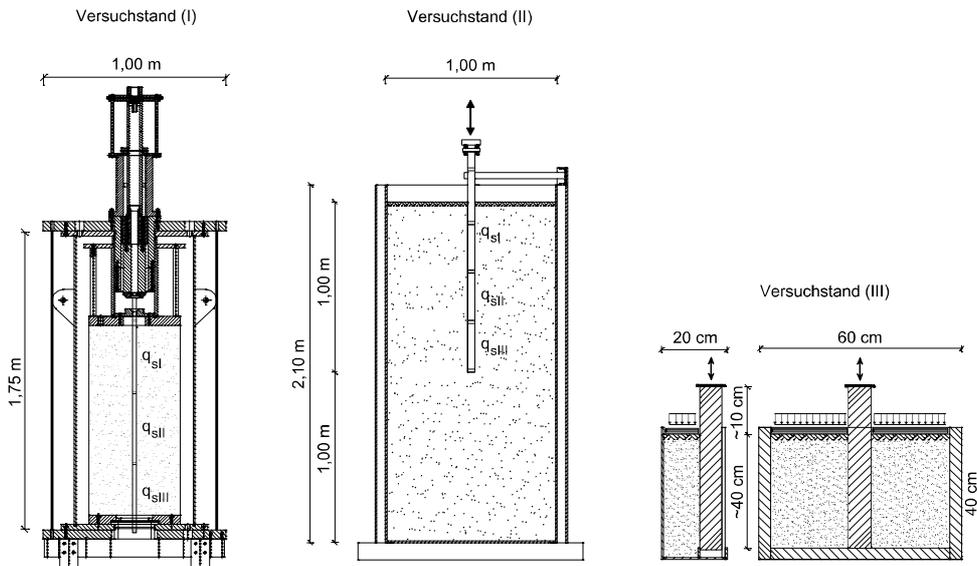


Bild 1 Schematische Darstellung der Versuchsstände

Fig. 1 Schematic drawing of test set-ups

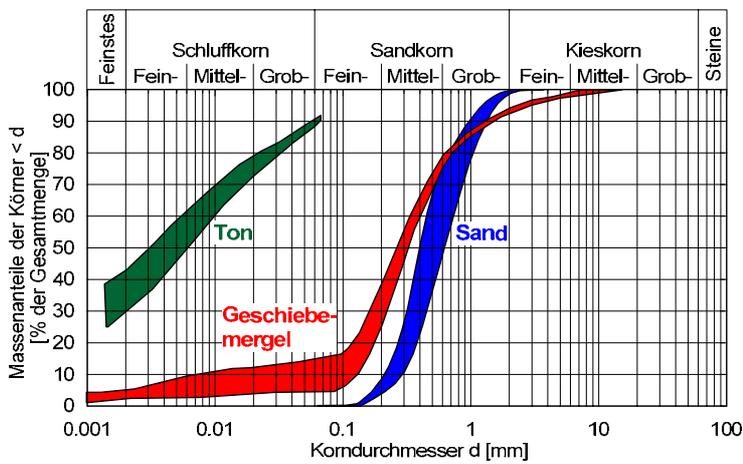


Bild 2 Körnungsbänder der verwendeten Bodenarten

Fig. 2 Envelopes of grading curves of soil types used

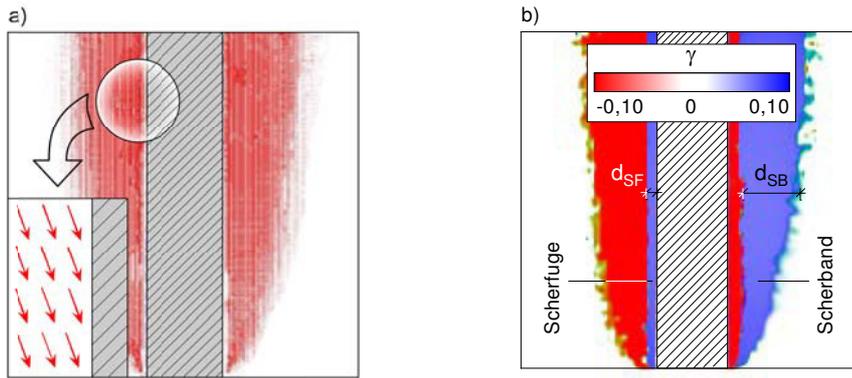


Bild 3 Mit Hilfe der Particle Image Velocimetry ermittelte Verschiebungsvektoren (a) und abgeleitete Scherdehnung (b)
Fig. 3 Displacement vectors (a) and shear strains derived (b) using Particle Image Velocimetry

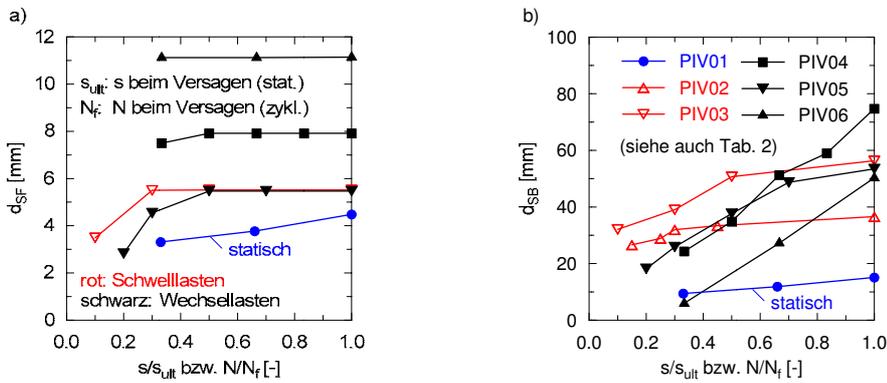


Bild 4 Breite der Scherrfuge (a) und des Scherberands (b) bei verschiedenen Belastungsarten, Anmerkung: Legenden gelten für beide Diagramme
Fig. 4 Thickness of shear zone (a) and shear band (b) under different load modes, Note: Legends are for both diagrams

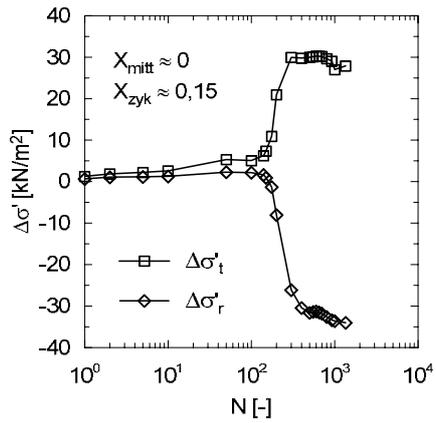


Bild 5 Änderung der effektiven Radial- und Tangentialspannungen infolge symmetrischer Wechsellast

Fig. 5 Change in effective radial and tangential stresses due to symmetrical two-way loading

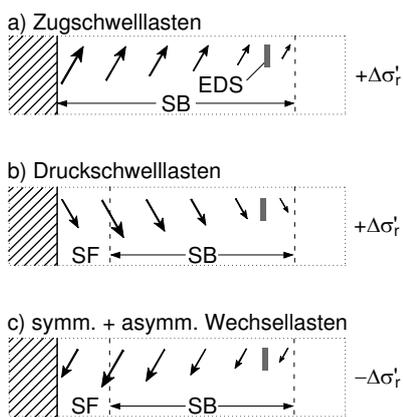


Bild 6 Zusammenhang zwischen der Bewegungsrichtung der Sandkörner und der gemessenen Änderung der effektiven Radialspannungen in Abhängigkeit von der Belastungsart

Fig. 6 Causal link between direction of movement of sand grains and change in effective radial stresses measured dependent on load mode

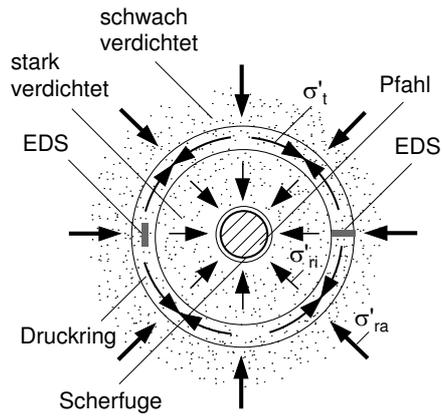


Bild 7 Modellvorstellung zur Spannungsänderung unter Wechsellasten

Fig. 7 Model concept about stress change due to two-way loading

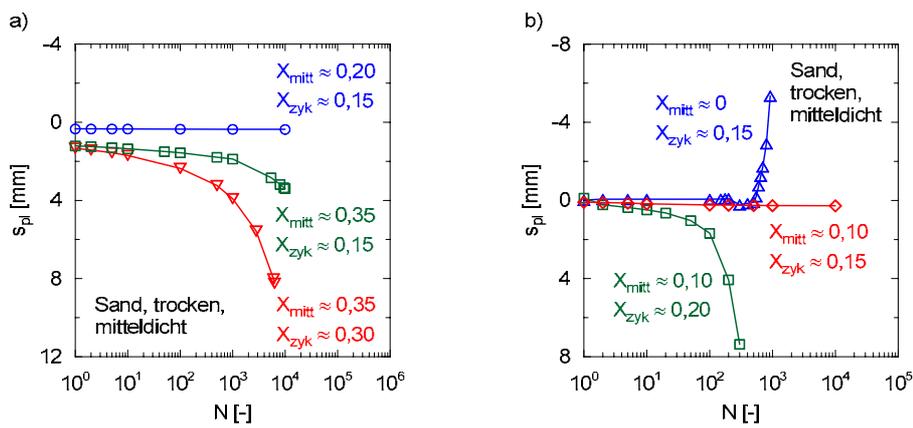


Bild 8 Plastische Verschiebung des Pfahls in Abhängigkeit des mittleren und zyklischen Lastniveaus unter Druckschwelllasten (a) und Wechsellasten (b) im mitteldicht gelagerten Sand

Fig. 8 Plastic pile displacement dependent on average and cyclic load level at one-way (a) and two-way loading (b) in medium dense sand

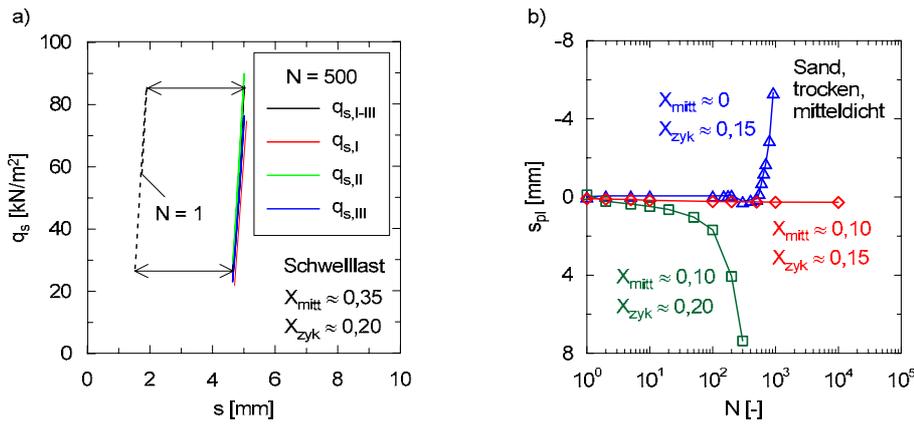


Bild 9 Entwicklung der Mantelreibung im Versuch unter Druckschwelllast (a) und symmetrischer Wechsellast (b), Anmerkung: Legende in (a) gilt für beide Diagramme

Fig. 9 Development of skin friction in one-way compression (a) and symmetrical two-way (b) model tests, Note: Legend in (a) is for both diagrams

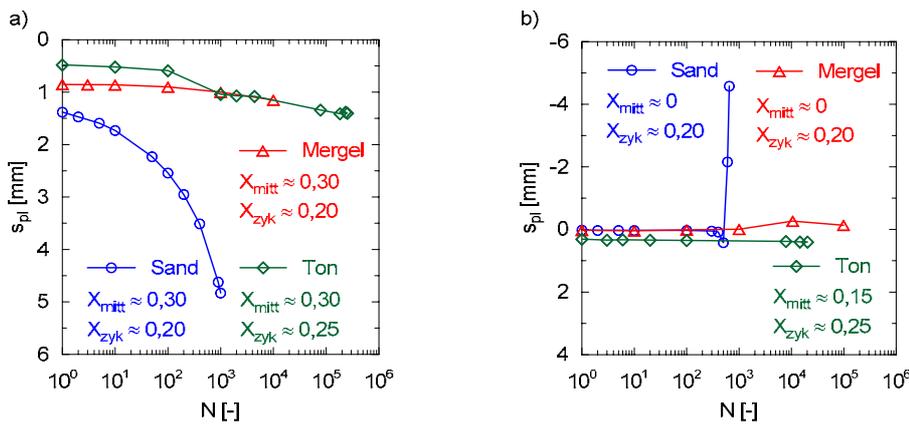


Bild 10 Plastische Verschiebung des Pfahls in Abhängigkeit des mittleren und zyklischen Lastniveaus unter Druckschwelllasten (a) und Wechsellasten (b) in verschiedenen Bodenarten

Fig. 10 Plastic pile displacement dependent on average and cyclic load level at one-way compression loading (a) and two-way loading (b) in different soil types

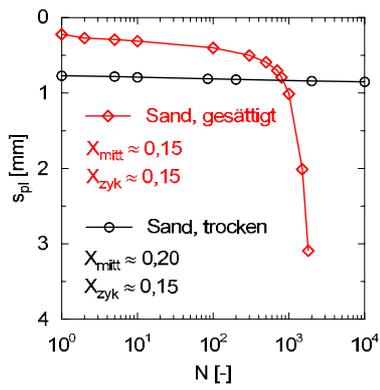


Bild 11 Einfluss des Sättigungsgrads auf das Verschiebungsverhalten unter Druckschwelllasten

Fig. 11 Influence of saturation level on plastic pile displacements due to one-way compression loading

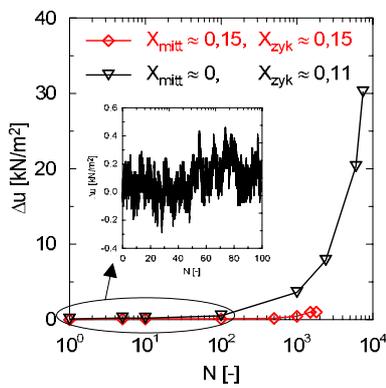


Bild 12 Akkumulation von Porenwasserüberdruck infolge Druckschwell- (rote Kurve) und symmetrischer Wechsellast (schwarze Kurve)

Fig. 12 Excess pore pressure accumulation due to one-way compression (red curve) and symmetrical two-way loading (black curve)

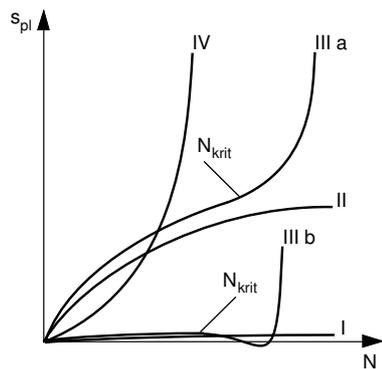


Bild 13 Verschiebungsverhalten des Pfahls nach Kategorie I bis IV gemäß Bild 14

Fig. 13 Plastic pile displacement per category I to IV according to Fig. 14

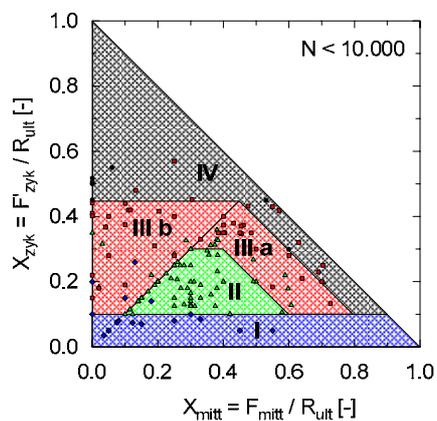


Bild 14 Interaktionsdiagramm zur Kategorisierung des Verschiebungsverhaltens gemäß Bild 13 in Abhängigkeit von der Kombination aus mittlerem und zyklischem Lastniveau

Fig. 14 Interaction diagram for classification of plastic pile displacement according to Fig.13 depending on the combination of average and cyclic load level