

# Untersuchung der Pfropfenbildung an offenen Verdrängungspfählen

Bei offenen Verdrängungspfählen tritt während des Rammvorganges Boden in das Profil ein. Dabei wird an den inneren Pfahlmantelflächen ein innerer Pfahlmantelwiderstand mobilisiert, der zu einer Verspannung des in das Profil eingedrungenen Bodens führen kann. Dieser verspannte Boden wird als Pfropfen bezeichnet, welcher in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen in der Lage ist, einen möglichen zusätzlichen Pfahlspitzenruck abzuleiten. Der bisherige Kenntnisstand ging von einer monolithischen Betrachtungsweise des Pfropfens aus und das Pfahltragverhalten wurde mit einem geschlossenen Profil gleichgesetzt. Dabei liegen zum bodenmechanischen Verständnis und zum Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen nur sehr wenige Erkenntnisse vor.

Der experimentelle Teil des Beitrages beschreibt großmaßstäbliche Modellversuche und PIV (Particle Image Velocimetry)-Versuche, bei denen die einzelnen Widerstandsanteile (innerer Pfahlmantelwiderstand  $R_{is}$ , äußerer Pfahlmantelwiderstand  $R_s$  und Widerstand in der Profilaufstandsfläche  $R_a$ ) messtechnisch erfasst werden konnten. Durch Variation der Randbedingungen konnten die eine Pfropfenbildung maßgeblich beeinflussenden Faktoren (Pfahldurchmesser, Lagerungsdichte, Bodenart) herausgearbeitet werden.

Mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode wurde ein numerisches Modell erstellt und an Ergebnissen von Modell- und Feldversuchen validiert.

Abschließend wird ein Modell zum Lastabtrag des Pfropfens vorgestellt, welches belegt, dass ein festverspannter (monolithischer) Pfropfen i. d. R. nicht eintritt, sondern dass der Lastabtrag über eine innere Pfahlmantelreibung in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers und der Lagerungsdichte stattfindet. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein analytisches Berechnungsverfahren abgeleitet, mit dem die jeweiligen Widerstandsanteile rechnerisch erfasst werden können. Darauf aufbauend wurden im statistischen Teil neue Erfahrungswerte für die Tragfähigkeit von offenen Verdrängungspfählen abgeleitet, die die Empfehlungen der EA-Pfähle (2012) ergänzen.

**Keywords** Pfropfenbildung; Verdrängungspfahl; Pfahltragfähigkeit

## 1 Einleitung und Problemstellung

Unter offenen Verdrängungspfählen werden unterschiedliche Trägerprofile wie z. B. Stahlrohrpfähle und H-Profile, aber auch zusammengesetzte Spundwandprofile verstanden. Bei der Einbringung dieser Pfahlsysteme dringt der Boden in das unten offene Profil ein und kann sich im Fußbereich zwischen gegenüberliegenden inne-

## Investigation of the Plugging Effect of open ended piles

The plugging effect of open-ended piles and hence the change in the load bearing behavior has been investigated in this research work. The state of knowledge assumed that the plug can close up the pile base completely and for this reason it was treated monolithically. The load bearing behavior was comparable to a closed-ended pile. But the soil-mechanical processes were mostly unknown.

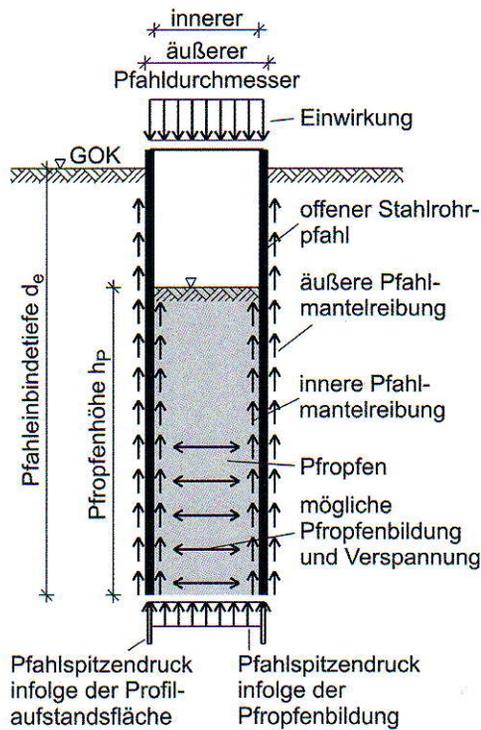
The experimental part contains model tests and PIV-(Particle Image Velocimetry) tests. The test piles were arranged with equipment for measuring each part of the pile resistance (inner and outer shaft resistance and resistance of the pile toe). Because of variation the boundary conditions the main influence factors of the plugging effect could be analysed.

Furthermore numerical calculations with the FEM were carried out, which show a good agreement between the experimental data and the calculations. The investigations show, that the load transfer in the plug occurs in an inner shaft friction. A fully plugged soil could not be identified and so the classical model representation could be disproved.

Based on this results an analytical calculation method is derived, in which each proportion of the pile resistance could be determined. Finally in the statistical part new values of experience for the pile resistance are suggested for the EA-Pfähle.

**Keywords** Plugging effect; open-ended pipe pile; Pile bearing behavior

ren Pfahlmantelflächen verspannen. Diese Verspannung wird als Pfropfenbildung bezeichnet, die nach bisherigem Kenntnisstand in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen (Pfahlgeometrie, Bodenkenngößen, Spannungszustand, etc.) in der Lage ist, einen zusätzlichen Pfahlspitzenruck zu mobilisieren. In Bild 1 ist dazu eine zweidimensionale, idealisierte Prinzipskizze dargestellt.



**Bild 1** Idealierte Prinzipskizze zur Pfropfenbildung und zum Lastabtrag eines offenen Stahlrohrpfahls  
Schematic diagram of an open-ended pile and the load transfer

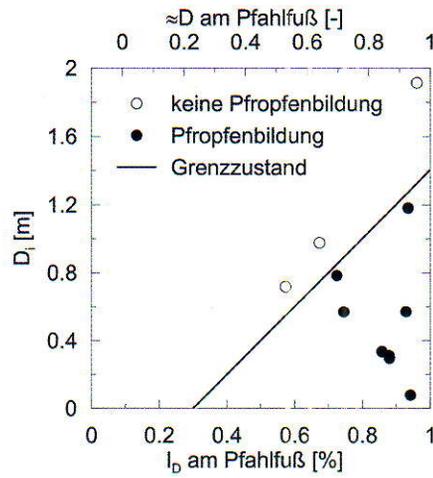
Der Anwendungsbereich von offenen Verdrängungspfählen ist vielfältig. Schwerpunktmäßig werden sie beim Hafenanbau und bei der Gründung von Offshore-Windenergieanlagen (z. B. als Monopiles oder Jacket-Gründungen) eingesetzt.

In technischen Regeln wird oftmals bis zu einem bestimmten Pfahldurchmesser von einem fest verspannten Pfropfen (Monolith) ausgegangen, wodurch der Pfahl vollständig nach unten verschlossen wird und wie ein am Fuß geschlossener Verdrängungspfahl behandelt werden kann. Diese Hypothese sowie die bodenmechanischen Vorgänge, die zu einer möglichen festen Verspannung des Pfropfens führen, sind aber weitestgehend unklar bzw. wenig abgesichert.

Im Folgenden ist die quantitative und qualitative Ermittlung der Ursachen und Einflussparameter auf eine Pfropfenbildung sowie die rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit des Pfropfens dargestellt. Der Beitrag fasst eine in den letzten Jahren entstandene Forschungsarbeit an der Universität Kassel zusammen [1].

## 2 Grundlagen zur Pfropfenbildung

In [2] wird ein Diagramm zur Überprüfung einer möglichen Pfropfenbildung in Abhängigkeit des inneren Pfahldurchmessers  $D_i$  und der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  für einen nichtbindigen Boden vorgestellt (Bild 2). Es zeigt, dass mit zunehmender Lagerungsdichte  $D$  und abnehmendem inneren Pfahldurchmesser  $D_i$  eine Pfropfenbildung begünstigt wird.



**Bild 2** Grenzzustand für eine Pfropfenbildung in Abhängigkeit des inneren Pfahldurchmessers  $D_i$  und der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  bzw. Lagerungsdichte  $D$  in Sand, nach [2]  
Plugging effect depending on the inner pile diameter  $D_i$  and the relative density  $I_D$  in non cohesive soils, after [2]

Um die Tragfähigkeit des Pfropfens beurteilen zu können, wurde in [3] der Kennwert *IFR* (Incremental Filling Ratio) nach Gl. (1) und nach [4] der Kennwert *PLR* (Plug Length Ratio) nach Gl. (2) eingeführt.

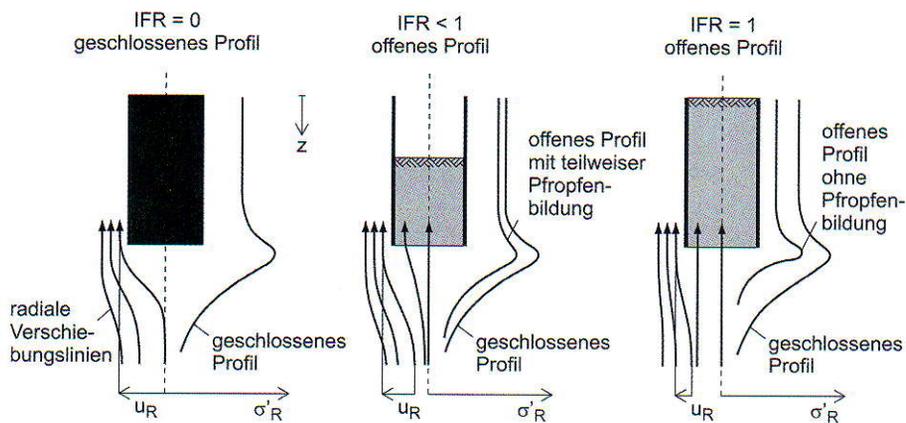
$$IFR = \Delta h_p / \Delta d_e \tag{1}$$

$$PLR = h_p / f_r \tag{2}$$

Diese beschreiben das inkrementelle bzw. absolute Verhältnis der Pfropfenhöhe  $h_p$  zur Pfahleinbindetiefe  $d_e$ , (s.a. Bild 1). Für  $IFR = 1$  hat sich die Oberkante des Pfropfens im Vergleich zur letzten Messung nicht verschoben. Das Stahlrohr ist nur weiter in den Boden eingedrungen. Es fand keine Pfropfenbildung und somit keine Verspannung statt. Wird dagegen  $IFR = 0$  ermittelt, ist der Pfropfen um den gleichen Betrag verschoben worden wie das Stahlrohr. Daraus lässt sich folgern, dass sich der Pfropfen fest im Stahlrohr verspannt hat und der unterhalb des Profils anstehende Boden seitlich komplett verdrängt worden ist.

Der *IFR* wird rammbegleitend gemessen, indem nach vorab festgelegten Pfahleintrittstiefen eine Innenlotung durchgeführt wird. Der *PLR* dagegen wird einmal nach vollständiger Rammung des Pfahles ermittelt, wodurch nur eine durchschnittliche Entwicklung des Pfropfens über den gesamten Zeitraum der Pfahleinbringung festgestellt wird. Bei geschichtetem Baugrund erweist sich dieser Kennwert daher als wenig geeignet.

Bei einem  $IFR = 0$  treten die größte Radialspannung  $\sigma'_R$  und radiale Verschiebung  $u_R$  auf. Mit zunehmendem *IFR* verringern sich  $\sigma'_R$  und  $u_R$ . Ein  $IFR = 0$  wird bei einem offenen Profil bei einer vollständigen Pfropfenbildung erreicht, welches bedeutet, dass der Widerstand des Pfropfens identisch ist mit dem Widerstand durch die Pfahlaufstandsfläche. In diesem Fall wäre der Pfropfen dann als Monolith zu betrachten. Liegt der *IFR* zwischen 0 und 1,



**Bild 3** Qualitative Übersicht der radialen Verschiebung  $u_R$  des Bodens und der radialen Spannungsverteilung  $\sigma'_R$  auf den Pfahlschaft in Abhängigkeit unterschiedlicher *IFR*-Kennwerte, nach [5]  
Distribution of the radial displacement  $u_R$  and the radial stress  $\sigma'_R$  on the pile shaft depending on different *IFR*, after [5]

wird von einer teilweisen Pfropfenbildung gesprochen. Die Übergänge von einer vollständigen zu einer teilweisen Pfropfenbildung sind fließend und nicht genau abgrenzbar. Bild 3 stellt eine qualitative Übersicht der radialen Verschiebung  $u_R$  des Bodens und die radiale Spannungsverteilung  $\sigma'_R$  auf den Pfahlschaft in Abhängigkeit des *IFR*-Kennwertes dar (s. a. [5]). Nach [6] wird als Grenzkriterium ähnlich wie in [2] ein maximaler innerer Pfahldurchmesser von  $D_i = 1,5$  m genannt. Ebenfalls ist für eine Pfropfenbildung in nichtbindigen Böden eine hohe Lagerungsdichte notwendig.

Zusammenfassend kann nach Sichtung der Literatur festgestellt werden, dass die Pfropfenbildung in offenen Verdrängungspfählen ein bekanntes Phänomen ist. Eine Quantifizierung der daraus resultierenden Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Randbedingungen ist nach derzeitigem Kenntnisstand jedoch nicht möglich. Ebenfalls ist kaum eine bodenmechanische Modellvorstellung bekannt, die die Pfropfenbildung erklären kann.

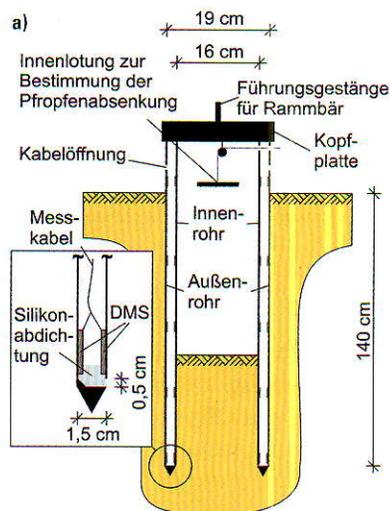
### 3 Experimentelle Untersuchungen

#### 3.1 Allgemeines

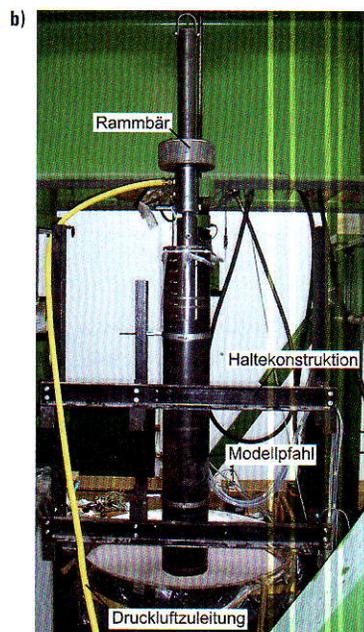
Zur experimentellen Untersuchung der Pfropfenbildung wurden Modell- und PIV-Versuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau und die Durchführung werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 kurz vorgestellt, bevor in Abschnitt 3.4 die Ergebnisse diskutiert werden. Ausführliche Informationen und Konstruktionsdetails sowie der Ablauf der experimentellen Untersuchungen sind [1] zu entnehmen.

#### 3.2 Modellversuche

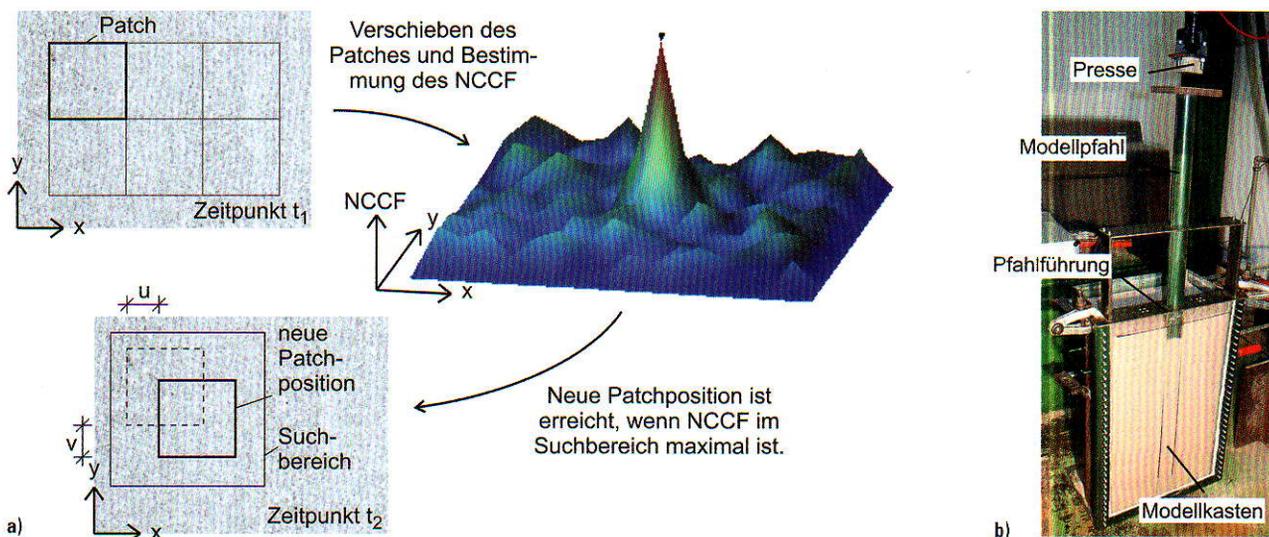
Bei den Modellversuchen wurde ein speziell hierfür konstruierter Modellpfahl in einer Sandgrube mithilfe einer Rammvorrichtung im Modellversuchskasten gerammt. Der enggestufte Sand wurde vorab mit einer definierten Lagerungsdichte eingerieselt. Die erreichte Lagerungs-



! DMS zur Messung der Dehnungen  $\epsilon$



**Bild 4** a) Prinzipskizze zum Modellpfahl; am Außenrohr sind die DMS innen appliziert, um den äußeren Pfahlmantelwiderstand  $R_s$  und den Widerstand in der Profilaufstandsfläche  $R_a$  zu ermitteln; am Innenrohr dagegen sind die DMS außen befestigt, um so den inneren Pfahlmantelwiderstand  $R_{is}$  zu erfassen; b) Ansicht der Versuchskonstruktion vor Pfahlrammung  
a) Schematic diagram for the test pile; b) perspective of the test pile before driving



**Bild 5** a) Ablauf und Prinzip einer PIV-Auswertung, nach [7]; b) Ansicht der Versuchskonstruktion für die PIV-Versuche  
 a) Principle of a PIV-Test, after [7]; b) perspective of the PIV-Test

dichte wurde mit einer hierfür konstruierten Labordrucksonde überprüft. Die Arbeitsweise dieser Labordrucksonde ähnelt der einer in-situ-Drucksonde. Nach Pfahlrammung wurden eine statische Pfahlprobebelastung durchgeführt und eine weitere Drucksondierung abgeteuft, um den Verdrängungseffekt zu überprüfen. Der Modellpfahl besteht aus zwei ineinander gestellten Rohren, die nur an der Kopfplatte miteinander verbunden sind, wodurch eine Entkopplung im Lastabtrag stattfindet. Mithilfe von Dehnungsmessstreifen (DMS) werden Dehnungen  $\epsilon$  ermittelt, die einen Rückschluss auf den inneren und äußeren Pfahlmantelwiderstand  $R_{is}$  bzw.  $R_s$  sowie den Widerstand in der Profilaufstandsfläche  $R_a$  ermöglichen. In Bild 4 sind eine Prinzipskizze sowie eine Versuchseinrichtung vor Rammung des Pfahles dargestellt.

### 3.3 Partice Image Velocimetry Versuche (PIV-Versuche)

Die PIV-Methode ist eine berührungslose Messmethode zur Erfassung von Verschiebungen. Dabei werden Fotoaufnahmen (Patches) zu unterschiedlichen Zeitpunkten  $t_i$  des Versuches mithilfe einer Softwareauswertung miteinander verglichen. Die Software erstellt dann mithilfe einer Kreuzkorrelation (Normalized Cross-Correlation Function *NCCF*) ein Feld von Verschiebungsvektoren.

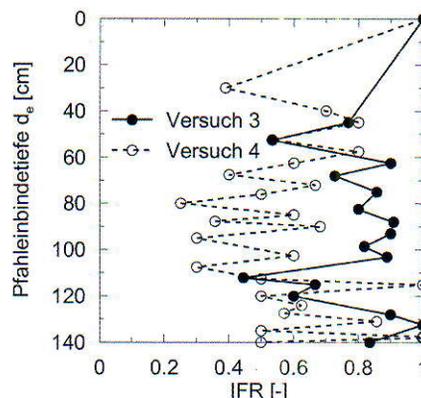
Der Modellpfahl besteht aus einem längs geschlitzten Stahlrohr mit den Abmessungen  $D_a \times t = 60 \times 2$  mm und wurde mithilfe eines Rambbären an der Plexiglasscheibe entlang auf eine Pfahleinbindtiefe von  $d_e = 50$  cm gerammt. Eine Prinzipskizze sowie eine Darstellung der Versuchseinrichtung ist Bild 5 zu entnehmen.

### 3.4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

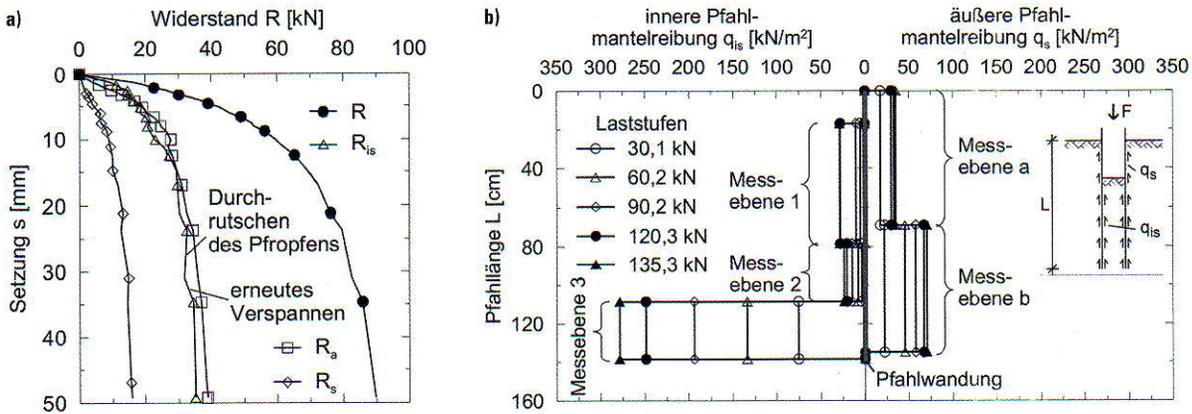
Generell bestätigen die experimentellen Ergebnisse die in der Praxis bekannten Erfahrungswerte zur Tragfähigkeit

von Pfählen. So werden bei zunehmender Lagerungsdichte und höheren Spannungszuständen auch höhere Pfahlwiderstände erreicht [1]. Die Sondierungen mit der Labordrucksonde zeigen, dass der seitliche Verdrängungseffekt eines offenen Stahlrohrpfahles bei höheren Lagerungsdichten niedriger ist als bei geringeren Lagerungsdichten. Im Pfropfen sind Spitzenwiderstände der Labordrucksonde von  $q_c \geq 80$  MN/m<sup>2</sup> gemessen worden.

Die Entwicklung des Pfropfens (Kennwert *IFR*) ist in Bild 6 für eine mittlere und sehr dichte Lagerung gezeigt. Tendenziell ist der *IFR* für höhere Lagerungsdichten größer (Versuch 3) als bei geringeren Lagerungsdichten (Versuch 4). Es fällt auf, dass sich der Pfropfen verspannen kann (kleinerer *IFR*), sich dieser im Laufe des Rammvorganges wieder lösen (größerer *IFR*) und erneut verspannen kann. Bei keinem der Modell- und PIV-Versuche ist ein *IFR* = 0 erreicht worden, welcher eine vollständige Pfropfenbildung charakterisiert hätte. Das in der Ver-



**Bild 6** Vergleich des *IFR* über die Pfahleinbindtiefe  $d_e$  während der Rammung des Modellpfahles für eine sehr dichte (Versuch 3) und mittlere Lagerungsdichte (Versuch 4)  
 Comparison of the *IFR* during pile driving for a very high (test no. 3) and a medium (test no. 4) relative density



**Bild 7** a) Widerstands-Setzungs-Linie bei einer sehr dichten Lagerung (Pfahlwiderstand  $R$ , innerer Pfahlmantelwiderstand  $R_{is}$ , Widerstand in der Profilaufstandsfläche  $R_a$ , äußerer Pfahlmantelwiderstand  $R_s$ ); b) Verteilung der inneren und äußeren Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  bzw.  $q_s$  über die Pfahlänge  $L$  für ausgewählte Laststufen  
 a) Resistance settlement curve for a very high relative density (pile resistance  $R$ , inner shaft resistance  $R_{is}$ , toe resistance  $R_a$ , outer shaft resistance  $R_s$ );  
 b) distribution of the inner and outer skin friction  $q_{is}$  and  $q_s$

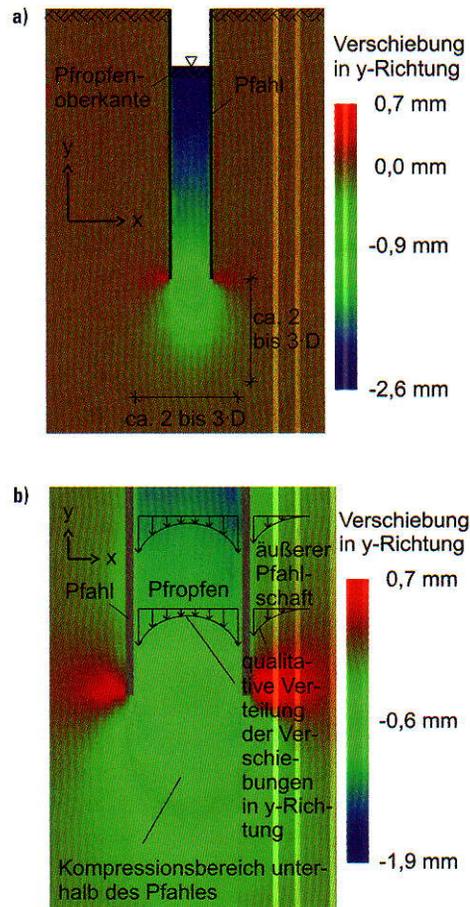
suchsreihe erreichte Minimum beträgt  $IFR = 0,2$ . Daher ist es fraglich, ob ein vollständig verspannter Pfropfen ( $IFR = 0$ ) bei den üblichen Pfahldurchmessern in-situ auftreten kann.

Aufgrund der Dehnungsmessungen ist es möglich, die einzelnen Lastanteile aus dem inneren und äußeren Pfahlmantelwiderstand  $R_{is}$  bzw.  $R_s$  sowie den Widerstand aus der Profilaufstandsfläche  $R_a$  in Form von Widerstands-Setzungs-Linien anzugeben. Bild 7a zeigt einen beispielhaften Verlauf bei einer dichten Lagerung. Auffallend ist, dass mehrere Kurven vertikal verlaufen und dann wieder einen Zuwachs im Widerstand verzeichnen. Dieses weist auf ein Durchrutschen des Pfropfens hin, der sich bei zunehmender Setzung wieder verspannen kann und in der Lage ist, einen höheren Widerstand zu mobilisieren. Darauf deuten ebenfalls schon die Messungen des  $IFR$  hin (vgl. Bild 6).

Bild 7b zeigt exemplarisch die innere und äußere Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  bzw.  $q_s$  für die jeweiligen Messabschnitte. Tendenziell nimmt die äußere Pfahlmantelreibung  $q_s$  bei zunehmender Pfahlänge (vgl. Messebene a und Messebene b) und zunehmender Belastung erwartungsgemäß zu.

Die Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  ist im Vergleich zur äußeren Pfahlmantelreibung ungleichmäßiger. In den Messebenen 1 und 2 ist die innere Pfahlmantelreibung näherungsweise gleichmäßig verteilt. In Messebene 3 ist jedoch eine deutlich höhere innere Pfahlmantelreibung erkennbar, die bei höheren Laststufen erheblich zunimmt. Diese Zunahme kann auf eine Verspannung des Bodens in Messebene 3 zurückgeführt werden.

Bild 8 zeigt beispielhafte Ergebnisse der PIV-Versuche. Darin sind die Verschiebungen des Bodens in  $y$ -Richtung für den Gesamtpfahl und im Detail für den Pfropfenbereich in skalarer Darstellung erkennbar. Innerhalb des Pfropfens stellt sich eine inhomogene vertikale Verschiebung ein. Im unteren Pfahlbereich ist diese Verschiebung kleiner als weiter oben (s. Bild 8a). Die geringeren Verschiebungen deuten darauf hin, dass sich dieser Bereich



**Bild 8** Beispielhafte Ergebnisse der PIV-Versuche  
 a) Verschiebungen des Bodens in  $y$ -Richtung bei  $d_g = 45$  cm  
 b) Details der Verschiebungen im Pfropfenbereich  
 Results of the PIV-tests  
 a) vertical soil displacement at  $d_g = 45$  cm  
 b) details of the vertical displacement in the plug

während des Rammvorgangs verdichtet. Die höheren Verschiebungen im darüber liegenden Bereich deuten auf eine geringere bis keine Verspannung hin und wirken als Auflast auf den stärker verdichteten unteren inneren Pfahlbereich. Die Modellversuche zeigen im oberen inneren Pfahlbereich eine geringe innere Pfahlmantelreibung (vgl. Bild 7b).

In Bild 8b ist die Detailansicht für die Verschiebungen im unteren inneren Pfahlbereich dargestellt. In diesem verspannten Bereich treten an der Profilinnenwandung am Pfahlfuß auf einer Höhe, welche näherungsweise zwei Pfahldurchmessern ( $2 \cdot D$ ) entspricht, etwas höhere Verschiebungen auf als in Pfahlmitte. Diese Verteilung der vertikalen Verschiebungen tritt unabhängig der Pfahleinbindetiefe und der untersuchten Randbedingungen bei allen durchgeführten PIV-Versuchen in nichtbindigen Böden auf. Das Verschiebungsmuster deutet an, dass der Lastabtrag im Pfahlinneren eher über eine innere Mantelreibung erfolgt anstelle eines zusätzlichen Spitzendrucks unterhalb des Pfropfens. Diese These kann dadurch gestützt werden, dass sich das Verschiebungsmuster am inneren Pfahlschaft dem äußeren ähnelt (s. Bild 8b) und keine gleichmäßigen für eine monolithische Betrachtungsweise sprechenden Verschiebungen festgestellt werden konnten, die auf einen durch einen vom Pfropfen verschlossenen Pfahlfuß hindeuten.

Die Bodenart hat ebenfalls einen weiteren entscheidenden Einfluss auf eine Pfropfenbildung. Die Erkenntnisse zur Pfropfenbildung im nichtbindigen Boden lassen sich jedoch nicht direkt auf einen offenen Verdrängungspfahl im bindigen Boden übertragen. In letztgenannten ist die bei nichtbindigen Böden identifizierte qualitative Verteilung der vertikalen Verschiebungen im Pfropfenbereich nicht zu erkennen. Ebenso bildet sich beim Rammvorgang unterhalb des Pfahlfußes im Vergleich zu einem nichtbindigen Boden ein deutlich kleinerer Kompressionsbereich aus. Dennoch ist die Pfropfenhöhe geringer, welches hauptsächlich auf die adhäsiven Kräfte und nicht auf einen Verspannungseffekt aufgrund einer Volumenzunahme (Dilatation) zurückzuführen ist. Es ist somit davon auszugehen, dass in Abhängigkeit der Bodenart (bindig/nichtbindig) zwei unterschiedliche bodenmechanische Mechanismen wirken, die nicht miteinander vergleichbar sind.

Das Einbringverfahren beeinflusst ebenfalls die Pfropfenbildung mit dem genannten Verspannungseffekt. Bei der Einpressung eines Pfahles war die Neigung zur Pfropfenbildung geringer als bei der Rammung. Die vertikalen Verschiebungen sind über die Pfropfenhöhe gleichmäßiger verteilt und zeigen nicht das bei der Pfahlrammung identifizierte Verschiebungsmuster an. Aufgrund des geringeren Pfahlwiderstandes beim eingepressten Pfahl wird erwartet, dass der Verspannungseffekt im Pfropfenbereich geringer ist als bei der Pfahlrammung.

Eine zu hohe Energie pro Schlag beim Einrammen des Pfahles begünstigt ein Durchrutschen des Pfropfens, wel-

ches sich ebenfalls nachteilig auf die Tragfähigkeit des Pfropfens auswirkt. Der Pfahlwiderstand ist bei geringerer Rammenergie pro Schlag größer. Durch die Verwendung einer Aufdopplung am Pfahlfuß kann die Rammenergie deutlich gesenkt werden. Jedoch verringert sich dadurch auch die Tragfähigkeit des Pfropfens, da der in das Profil eindringende Boden zwar durch die Aufdopplung komprimiert wird, jedoch nach Passieren derselben sich wieder entspannt und eine geringere innere Pfahlmantelreibung mobilisiert.

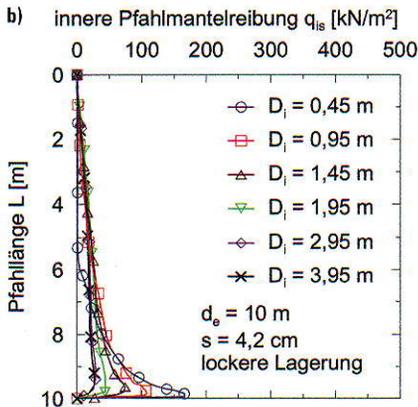
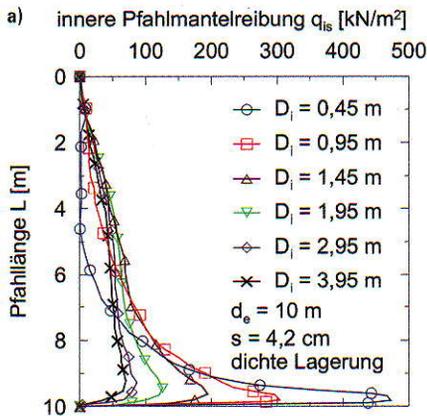
## 4 Simulation der Pfropfenbildung mit der Methode der Finiten Elemente

### 4.1 Allgemeines

Mithilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) wurden die experimentellen Untersuchungen weitergehend analysiert. Dabei wurden sowohl die Modellversuche als auch statische Pfahlprobelastungen nachgerechnet, um u. a. Informationen zu erhalten, die messtechnisch nicht erfasst werden konnten. Als FE-Programm wurde das Programmsystem PLAXIS 2D – Version 9.0 verwendet, mit dem ein zweidimensionales, rotationssymmetrisches Modell erstellt worden ist. Informationen zur Berücksichtigung des Verdrängungseffektes während des Rammvorgangs, der Nachbildung der Kontaktzone und der Validierung des FE-Modells sind [1] zu entnehmen.

### 4.2 Ergebnisse der FE-Berechnung und Ableitung einer Modellvorstellung

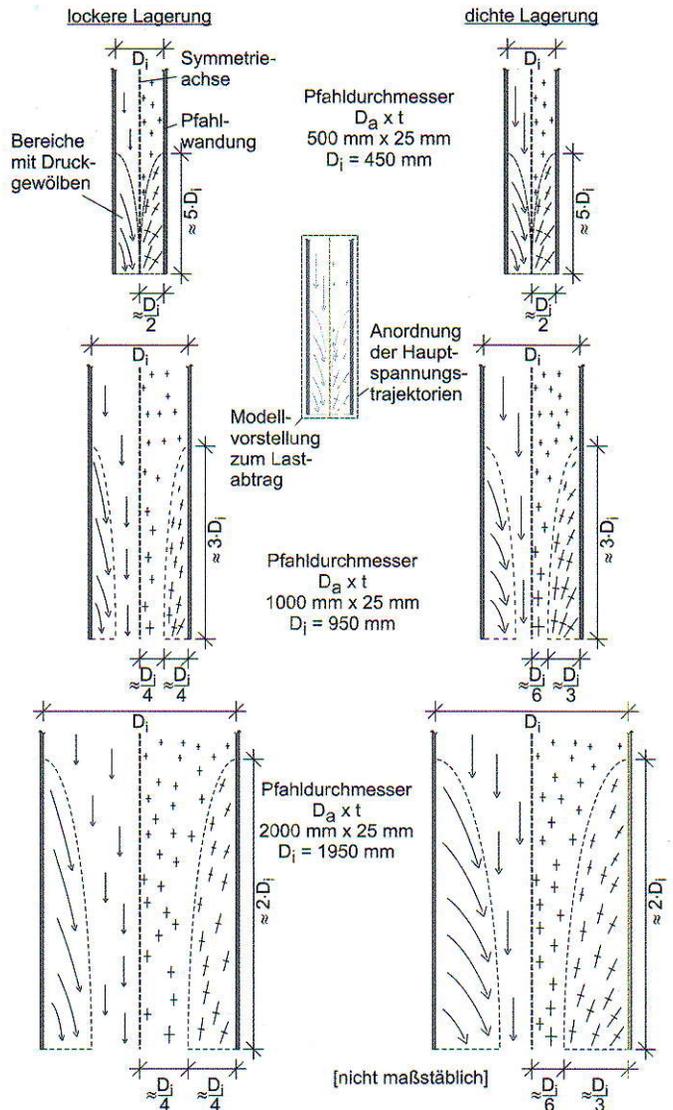
Die Ergebnisse der FEM bestätigen generell die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen. In Bild 9 ist die Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  über die Pfahllänge  $L$  für unterschiedliche innere Pfahldurchmesser  $D_i$  in dichter und lockerer Lagerung bei einer Pfahlsetzung von  $s = 4,2$  cm dargestellt. Bei einem kleinen Pfahldurchmesser ( $D_i = 0,45$  m) ist die Verteilung vergleichbar mit den Erkenntnissen aus den Modellversuchen (vgl. Abschnitt 3 und Bild 7b). Im oberen Pfahlbereich wirkt keine innere Pfahlmantelreibung. Diese wird erst näherungsweise am Pfahlfuß auf einer Höhe von ungefähr zwei Pfahldurchmessern mobilisiert. Mit zunehmendem Pfahldurchmesser verringert sich die innere Pfahlmantelreibung im unteren Pfahlbereich und wird auf den oberen Pfahlbereich umgelagert. Bei einem inneren Pfahldurchmesser von  $D_i = 3$  m und  $D_i = 4$  m ist die Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung mit der äußeren vergleichbar. Der Übergang von einer erhöhten im Pfahlfußbereich wirkenden inneren Pfahlmantelreibung zu einer gleichmäßigeren Verteilung, die mit der äußeren Pfahlmantelreibung vergleichbar ist, geschieht fließend. Vergleichsberechnungen zeigen, dass diese Erkenntnisse auch auf locker gelagerte nichtbindige Böden übertragbar sind (s. Bild 9b). Die Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  ist jedoch bei lockerer Lagerung weniger ausgeprägt als bei dichter Lagerung.



**Bild 9** Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  über die Pfahlänge  $L$  unter Variation des inneren Pfahldurchmessers  $D_i$  bei einer Pfahleinbindetiefe von  $d_e = 10$  m und einer Pfahlsetzung von  $s = 4,2$  cm  
 a) dichte Lagerung ( $q_c \approx 20$  MN/m<sup>2</sup>)  
 b) lockere Lagerung ( $q_c \approx 10$  MN/m<sup>2</sup>)  
 Distribution of the inner skin friction  $q_{is}$  under variation of the inner pile diameter  $D_i$  at a pile embedded length of  $d_e = 10$  m and pile settlement of  $s = 4,2$  cm  
 a) dense relative density ( $q_c \approx 20$  MN/m<sup>2</sup>)  
 b) loose relative density ( $q_c \approx 10$  MN/m<sup>2</sup>)

In Bild 10 sind die Ergebnisse der FEM zur Ausbildung der Hauptspannungstrajektorien im Pfropfen und ein daraus abgeleitetes Tragmodell zum Lastabtrag in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und des Pfahldurchmessers dargestellt. Die linke Spalte in Bild 10 zeigt die Ergebnisse für eine lockere Lagerung und die rechte für eine dichte Lagerung. In den jeweiligen Zeilen sind die Ergebnisse für unterschiedliche Pfahldurchmesser gezeigt. In der rechten Hälfte jedes abgebildeten Pfahles sind schematisch die Hauptspannungstrajektorien abgebildet und direkt gegenüber der Symmetrielinie der daraus abgeleitete Lastabtrag.

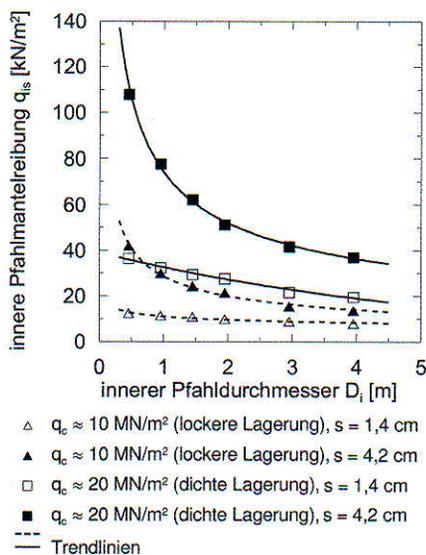
Generell ist am Pfahlfuß eine Verdrehung der Hauptspannungstrajektorien erkennbar. Diese Verdrehung ist größer, je näher die Trajektorien an der Pfahlwandung liegen. Zur Pfropfenmitte hin nimmt diese Verdrehung ab. Bei Pfahldurchmessern um  $D_a \approx 0,5$  m überlagern sich in Pfropfenmitte die Bereiche mit den verdrehten Trajektorien. Bei größeren Pfahldurchmessern sind die maximalen Hauptspannungen in der Pfropfenmitte am Pfahlfuß vertikal und die minimalen horizontal orientiert. Diese Hauptspannungen sind im Vergleich zum äußeren Pfahl-



**Bild 10** Ergebnisse der FEM zur schematischen Anordnung der Hauptspannungstrajektorien und daraus abgeleitete Modellvorstellung zum Lastabtrag in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und des Pfahldurchmessers  
 Numerical results for the appointment of the stress trajectories and for the load transfer depending on the relative density and the pile diameter

schaft jedoch erhöht. Im oberen Pfropfenbereich liegen die Hauptspannungen in vergleichbarer Orientierung vor. Die Anordnung der verdrehten Hauptspannungen lässt auf ein Druckgewölbe innerhalb des Pfropfens schließen, welches eine Analogie zum Lastabtrag am äußeren Pfahlschaft aufweist (s. [8]). Das Druckgewölbe im Pfropfen ist mit dichter Lagerung des Bodens ausgeprägter und reicht bei größeren Pfahldurchmessern weiter in den Pfropfen hinein. Bei kleineren Pfahldurchmessern kann eine gegenseitige Unterstützung der Druckgewölbe aufgrund der Überlagerung stattfinden. Daraus resultiert bei kleinen Pfahldurchmessern auch die in den Bildern 7b und 9 gezeigte hohe innere Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  am Pfahlfuß. Mit zunehmendem Pfahldurchmesser nimmt die Höhe des Druckgewölbes ebenfalls zu.

Eine direkte horizontale Verspannung ist nicht erkennbar. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Tragfähig-



**Bild 11** Einfluss des inneren Pfahldurchmessers  $D_i$  auf die innere Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  in Abhängigkeit des Spitzenwiderstandes  $q_c$  der Drucksonde und der Pfahlsetzung  $s$   
Influence of the inner pile diameter  $D_i$  on the inner skin friction  $q_{is}$  depending on the cone resistance  $q_c$  of a CPT and the pile settlement  $s$

keit des Pfropfens hauptsächlich aus einer inneren Pfahlmantelreibung besteht, die auf einer Anordnung von Druckgewölben basiert. Aufgrund dieses abgeleiteten Tragmodells kann nicht mehr von einem festverspannten, geschlossenen Pfropfen gesprochen werden. Diese Hypothese wird durch die experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 3 gestützt (s. a. [1]).

Um den Einfluss des inneren Pfahldurchmessers  $D_i$  auf die innere Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  abschätzen zu können, wurden in Bild 11 die Ergebnisse der FE-Berechnungen in Abhängigkeit des Spitzenwiderstandes  $q_c$  der Drucksonde und der Pfahlsetzung  $s$  dargestellt. Generell ist mit zunehmendem Pfahldurchmesser  $D_i$  auch eine Verringerung der inneren Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  erkennbar. Bei dichter Lagerung des Bodens ist diese Abnahme tendenziell größer als bei lockerer Lagerung. Ebenfalls ist ein Einfluss der Pfahlsetzung  $s$  ersichtlich. Mit zunehmender Pfahlsetzung vergrößert sich die innere Pfahlmantelreibung. Bei dicht gelagerten Böden ist diese Zunahme größer als bei locker gelagerten Böden.

Die Ursache für die deutliche Erhöhung der inneren Pfahlmantelreibung bei kleinen Pfahldurchmessern und dichter Lagerung wird hauptsächlich in einer gegenseitigen Stützung der in Bild 10 abgeleiteten Druckgewölben gesehen. Dadurch resultiert dann die in Bild 9 dargestellte und in den Modellversuchen (s. Bild 7b) festgestellte hohe innere Pfahlmantelreibung  $q_{is}$  am Pfahlfuß.

## 5 Ableitung eines analytischen Berechnungsverfahrens

Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen und den Berechnungen nach der FEM konnte ein analyti-

ches Verfahren abgeleitet werden, bei dem die einzelnen Widerstandsanteile eines offenen Verdrängungspfähles in einem iterativen Prozess ermittelt werden. Als Grundlage dienen die analytischen Verfahren nach [9] und [10]. Gl. (3) zeigt die Grundgleichung des Verfahrens. Eine ausführliche Vorstellung der einzelnen Parameter und deren Bestimmung ist [1] zu entnehmen.

$$[a] \cdot \{dc\} = \{b\} = \begin{bmatrix} [f_s] & \{0\} & \{0\} & \{-1\} \\ \{0\} & [f_{is}] & \{0\} & \{-1\} \\ \{0\} & \{0\} & [f_a] & \{-1\} \\ \{1\} & \{1\} & \{1\} & \{0\} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{R_s^1\} \\ \{R_{is}^1\} \\ \{R_a^1\} \\ \{s^1\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ \{0\} \\ \{1\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

mit

- $f_s$  Einflussbeiwert für  $R_s$
- $f_{is}$  Einflussbeiwert für  $R_{is}$
- $f_a$  Einflussbeiwert für  $R_a$
- $R_s$  äußerer Pfahlmantelwiderstand
- $R_{is}$  innerer Pfahlmantelwiderstand
- $R_a$  Widerstand in der Profilaufstandsfläche
- $s$  Pfahlsetzung

Bild 12 zeigt eine beispielhafte Berechnung der Widerstands-Setzungs-Linie einer statischen Pfahlprobelastung eines Feldversuches von [11] mit dem FE-Modell (Abschnitt 4) und dem analytischen Verfahren.

Generell sind zwischen den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen, dem analytischen Berechnungsverfahren und der FEM gute Übereinstimmungen erkennbar. Weitere Vergleichsberechnungen sind in [1] dokumentiert.

## 6 Statistische Untersuchung von Pfahlprobelastungen

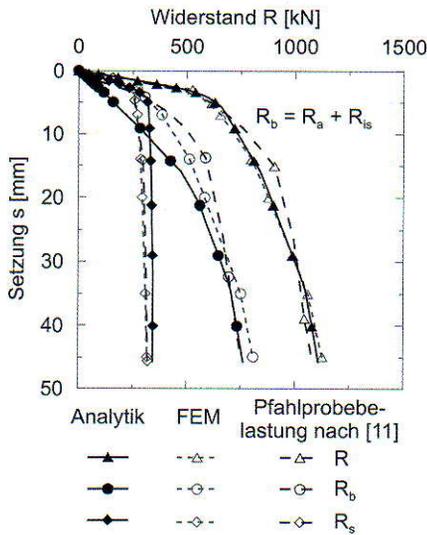
### 6.1 Allgemeines

Für eine ingenieurpraktische Umsetzung der Erkenntnisse wurden zwei statistische Untersuchungen durchgeführt, die weitgehend abgesicherte Erfahrungswerte zur Tragfähigkeit von offenen Verdrängungspfählen liefern.

### 6.2 Statistische Untersuchung 1

In der statistischen Untersuchung 1 wurden neue Anpassungsfaktoren  $\eta_b$  und  $\eta_s$  hergeleitet, die an die Spannen der Erfahrungswerte der *EA-Pfähle* [12] für Fertigrammpfähle gekoppelt sind (s. Gl. (4)).

Als Datengrundlage wurde eine Datenbank mit 28 statischen und 59 dynamischen Pfahlprobelastungen verwendet. Die Daten wurden für Pfahldurchmesser  $D_a > 1,6$  m durch Berechnungen nach dem analytischen Verfahren aus Abschnitt 5 ergänzt.



**Bild 12** Vergleich der Ergebnisse der analytischen Berechnung mit den Ergebnissen der FEM und der statischen Pfahlprobebelastung aus dem Feldversuch nach [11]  
Comparison of the analytical and numerical calculations with the results of a static pile test after [11]

Die Auswertung ergab eine exponentielle Abhängigkeit zum äußeren Pfahldurchmesser  $D_a$  nach Gl. (5) bzw. (6) bei  $0,3 \text{ m} \leq D_a \leq 1,6 \text{ m}$ . Durch Vergleichsberechnungen mit dem analytischen Verfahren aus Abschnitt 5 konnte eine Extrapolation zur Bestimmung der Anpassungsfaktoren für einen äußeren Pfahldurchmesserbereich von  $1,6 \text{ m} < D_a \leq 3 \text{ m}$  durchgeführt werden (s. Gln. (7) und (8)). Die zugehörigen Histogramme sind in [1] dokumentiert.

$$R_k = \eta_b \cdot q_{b,k} \cdot A_b + \eta_s \cdot q_{s,k} \cdot A_s \quad (4)$$

$$\eta_b = 0,95 \cdot e^{-1,2 \cdot D_a} \quad \text{für } 0,3 \text{ m} \leq D_a \leq 1,6 \text{ m} \quad (5)$$

$$\eta_s = 1,1 \cdot e^{-0,63 \cdot D_a} \quad \text{für } 0,3 \text{ m} \leq D_a \leq 1,6 \text{ m} \quad (6)$$

$$\eta_b = -0,01 \cdot D_a + 0,15 \quad \text{für } 1,6 \text{ m} \leq D_a \leq 3,0 \text{ m} \quad (7)$$

(Extrapolation)

$$\eta_s = 0,4 \quad \text{für } 1,6 \text{ m} \leq D_a \leq 3,0 \text{ m} \quad (8)$$

(Extrapolation)

mit

- $R_k$  charakteristischer Pfahlwiderstand
- $\eta_b$  Anpassungsfaktor für den Pfahlfuß
- $q_{b,k}$  charakteristischer Pfahlspitzendruck nach [12]
- $A_b$  Pfahlfußfläche
- $\eta_s$  Anpassungsfaktor für den Pfahlmantel
- $q_{s,k}$  charakteristische Pfahlmantelreibung nach [12]
- $A_s$  äußere Pfahlmantelfläche
- $D_a$  äußerer Pfahldurchmesser

### 6.3 Statistische Untersuchung 2

In der statistischen Untersuchung 2 wurden neue Spannen der Erfahrungswerte für das 10 %- und 50 %-Quantil

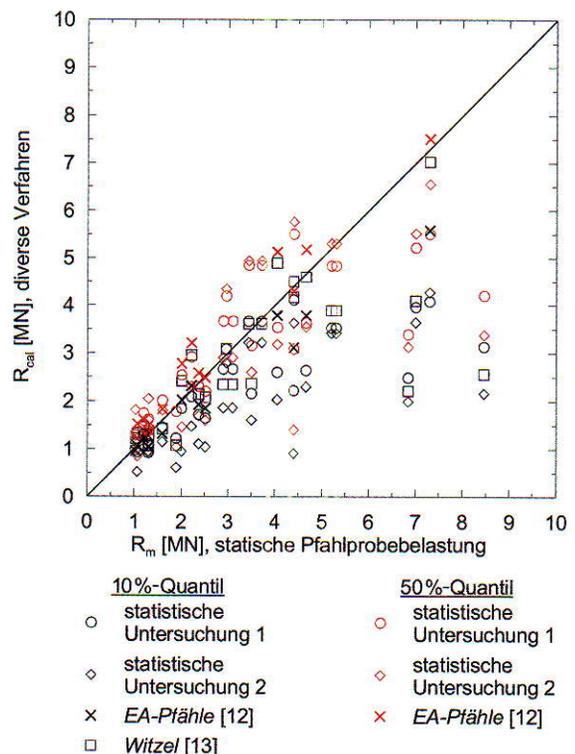
bezogen auf die einzelnen Widerstandsanteile  $R_{is}$ ,  $R_s$  und  $R_a$  nach Gl. (9) abgeleitet. Als Datengrundlage wurden die 28 statischen Pfahlprobebelastungen der Datenbank verwendet.

$$R_k = R_{is,k} + R_{a,k} + R_{s,k} = q_{is,k} \cdot A_{is} + q_{a,k} \cdot A_a + q_{s,k} \cdot A_s \quad (9)$$

- $q_{is,k}$  charakteristische innere Pfahlmantelreibung nach Tabelle 1
- $q_{a,k}$  charakteristischer Pfahlspitzendruck in der Profilaufstandsfläche nach Tabelle 3
- $q_{s,k}$  charakteristische äußere Pfahlmantelreibung nach Tabelle 2
- $A_{is}$  Nennwert der inneren Pfahlmantelfläche
- $A_a$  Nennwert der Profilaufstandsfläche
- $A_s$  Nennwert der äußeren Pfahlmantelfläche

### 6.4 Vergleichsberechnungen

Zur Vergleichbarkeit der statistischen Untersuchungen untereinander und auch mit anderen Verfahren wurden die in der Datenbank vorhandenen statischen Pfahlprobebelastungen mit den statistischen Untersuchungen 1 und 2 und zusätzlich mit den Verfahren nach *EA-Pfähle* [12] und [13] für den Grenzzustand der Tragfähigkeit nachgerechnet. Bild 13 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs für das



**Bild 13** Berechnungsergebnisse des 10 %- und 50 %-Quantils für den Pfahlwiderstand  $R_{cal}$  der statistischen Untersuchungen 1 und 2 sowie der Verfahren nach *WITZEL* [13] und *EA-Pfähle* [12] im Vergleich zu Ergebnissen  $R_m$  aus statischen Pfahlprobebelastungen  
Calculation results for the pile resistance  $R_{cal}$  (10 % and 50 % quantile) of the statistical investigation 1 and 2 and for the calculations after *WITZEL* [13] and *EA-Pfähle* [12] in comparison to results  $R_m$  of static pile tests

**Tab. 1:** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische innere Pfahlmantelreibung  $q_{is,k}$  in nichtbindigen Böden  
Values of experience for the characteristic inner shaft friction  $q_{is,k}$  in non cohesive soils

Setzung	innere Pfahlmantelreibung $q_{is,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	≥ 25
$s = 0,035 \cdot D_{eq}$	$\frac{15}{\kappa} \div \frac{35}{\kappa}$	$\frac{35}{\kappa} \div \frac{55}{\kappa}$	$\frac{50}{\kappa} \div \frac{67,5}{\kappa}$
$s_g = 0,1 \cdot D_{eq}$	$\frac{30}{\kappa} \div \frac{50}{\kappa}$	$\frac{60}{\kappa} \div \frac{80}{\kappa}$	$\frac{90}{\kappa} \div \frac{100}{\kappa}$

mit:  $\kappa = 2 \cdot PLR$ . Der PLR ist nach Pfahlrammung zu messen oder abzuschätzen.

**Tab. 2:** Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische äußere Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  in nichtbindigen Böden  
Values of experience for the characteristic outer shaft friction  $q_{s,k}$  in non cohesive soils

Setzung	äußere Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	≥ 25
$s_g \cdot$	15 ÷ 25	30 ÷ 50	50 ÷ 70
$s_g = 0,1 \cdot D_{eq}$	20 ÷ 30	35 ÷ 60	55 ÷ 75

**Tab. 3:** Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzenwiderstand in der Profilaufstandsfläche  $q_{a,k}$  in nichtbindigen Böden  
Values of experience for the characteristic pile toe pressure  $q_{a,k}$  in non cohesive soils

Setzung	Pfahlspitzenwiderstand in der Profilaufstandsfläche $q_{a,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einem mittleren Spitzenwiderstand $q_c$ der Drucksonde [MN/m <sup>2</sup> ]		
	7,5	15	≥ 25
$s = 0,035 \cdot D_{eq}$	650 ÷ 1.200	1.300 ÷ 1.750	1.750 ÷ 2.800
$s_g = 0,1 \cdot D_{eq}$	1.100 ÷ 2.000	2.000 ÷ 3.000	2.800 ÷ 4.800

10 %- und 50 %-Quantil. Die Vergleichsberechnungen zeigen im Allgemeinen, dass die Anforderungen für das 10 %-Quantil und das 50 %-Quantil erfüllt werden. Wenige Ergebnisse werden rechnerisch von den beiden statistischen Untersuchungen unterschätzt. Sie liegen damit auf der sicheren Seite. Eine weiterführende ausführliche Parameterstudie zu den einzelnen Verfahren ist in [1] dargestellt.

## 7 Zusammenfassung

Der vorliegende Aufsatz untersucht die Pfpfenbildung bei offenen Verdrängungspfählen und die daraus resul-

tierende Veränderung in der Tragfähigkeit in vorwiegend nichtbindigen Böden. Zielsetzung war die Ermittlung der Ursachen einer Pfpfenbildung bzw. von Verspannungseffekten und Erkennung der einzelnen Einflussfaktoren. Ergänzend wurden praxisrelevante Untersuchungen durchgeführt, um den Pfahlwiderstand eines offenen Verdrängungspfahles rechnerisch ermitteln zu können.

Der bisherige Kenntnisstand ging davon aus, dass ein Pfpfen sich verspannt und den offenen Verdrängungspfahl von unten näherungsweise monolithisch verschließen kann. Daraus wurde angenommen, dass dieser Pfpfen in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen in der Lage sei, einen zusätzlichen Pfahlspitzenwiderstand abzuleiten. Die bodenmechanischen Vorgänge und die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Pfpfenbildung waren dabei aber weitestgehend unbekannt.

Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurden Modellversuche und PIV (Particle Image Velocimetry)-Versuche durchgeführt, um die Einflussfaktoren auf die Pfpfenbildung herauszuarbeiten und das Tragverhalten transparent zu machen.

Ergänzende an den Modell- und Feldversuchen kalibrierte FE-Berechnungen zeigen, dass aufgrund der Relativverschiebung zwischen dem Pfpfen und der inneren Pfahlmantelfläche eine innere Pfahlmantelreibung mobilisiert wird. Dadurch kann in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen eine Verspannung des Pfpfens eintreten, aus der eine erhöhte innere Pfahlmantelreibung resultiert. Bei kleineren Pfahldurchmessern ( $D_a \approx 0,5$  m) findet der Lastabtrag auf den untersten Pfahldurchmessern statt. Mit zunehmendem Pfahldurchmesser lagert sich die innere Pfahlmantelreibung auf die höher gelegenen inneren Pfahlmantelflächen um. Die Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung gleicht sich somit der äußeren an.

Der Lastabtrag im Pfpfen findet über Druckgewölbe statt, die sich in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers und der Lagerungsdichte einstellen. Bei kleineren Pfahldurchmessern überlagern sich diese Druckgewölbe und es tritt eine Verspannung ein, aus der die hohe innere Pfahlmantelreibung am Pfahlfuß resultiert.

Eine vollständige Verspannung des Pfpfens konnte nicht festgestellt werden, weshalb die klassische Modellvorstellung eines offenen Verdrängungspfahles, der durch einen Pfpfen verschlossen wird und daraus einen zusätzlichen Pfahlspitzenwiderstand erfährt, widerlegt werden konnte.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden in Ergänzung zur *EA-Pfähle (2012)* neue Anpassungsfaktoren  $\eta_b$  und  $\eta_s$  (statistische Untersuchung 1), die an die bisherigen Spannen der Erfahrungswerte gekoppelt sind, als auch neue Spannen der Erfahrungswerte (statistische Untersuchung 2) jeweils für das 10 %- und 50 %-Quantil in Abhängigkeit der Pfpfenbildung für jeden Widerstandsanteil vorgeschlagen.

## Literatur

- [1] LÜKING, J.: *Tragverhalten von offenen Verdrängungspfählen unter Berücksichtigung der Pfropfenbildung in nichtbindigen Böden*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 23, 2010.
- [2] JARDINE, R. J.; CHOW, F. C.; OVERY, R. F.; STANDING, J. R.: *ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays*. London: Thomas Telford 2005.
- [3] BRUCY, F.; MEUNIER, J.; NAUROY, J.-F.: *Behavior of Pile Plug in Sandy Soils during and after Driving*. Proceedings of the 23rd Offshore Technology Conference, OTC 6514, Vol. 1, (1991), pp. 145–154.
- [4] PAIK, K.-H.; LEE, S.-R.: *Behavior of Soil Plugs in Open-Ended Model Piles Driven into Sands*. Marine Georesources and Geotechnology, Vol. 11, (1993), pp. 353–373.
- [5] WHITE, D. J.; SCHNEIDER, J. A.; LEHANE, B. M.: *The Influence of Effective Area Ratio on Shaft Friction of Displacement Piles in Sand*. Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Rotterdam: Balkema 2005, pp. 741–747.
- [6] LEHANE, B. M.; SCHNEIDER, J. A.; XU, X.: *CPT Based Design of Driven Piles in Sand for Offshore Structures*. Report GEO: 05341. Geomechanics Group, Department of Civil Engineering, The University of Western Australia, Perth 2005.
- [7] WHITE, D. J.; TAKE, W. A.; BOLTON, M. D.: *Soil Deformation Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV) and Photogrammetry*. Géotechnique 53 (2003), No. 7, pp. 619–631.
- [8] KEMPFERT, H.-G.: *Pfahlgründungen; Abschnitt 3.2*. In: *Grundbau-Taschenbuch*, 7. Aufl., Teil 3. Berlin: Ernst & Sohn 2009, S. 73–277.
- [9] RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P.: *Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles*. Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 104 (1978), No. GT12, pp. 1465–1488.
- [10] RUDOLF, M.: *Beanspruchung und Verformung von Gründungskonstruktionen auf Pfahlrosten und Pfahlgruppen unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 17, 2005.
- [11] PAIK, K.-H.; SALGADO, R.; LEE, J.; KIM, B.: *Behavior of Open- and Closed-Ended Piles Driven into Sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, (2003), Iss. 4, pp. 296–306.
- [12] *Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“*. 2. Aufl. Hrsg.: Arbeitskreis „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. Berlin: Ernst & Sohn 2012.
- [13] WITZEL, M.: *Zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von vorgefertigten Verdrängungspfählen in bindigen und nichtbindigen Böden*. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 15, 2004.

### Autoren

Dr.-Ing. Jan Lükling  
HOCHTIEF Solutions AG, Fuhrsbüttler Str. 399, 22309 Hamburg  
Jan.Lueking@hochtief.de  
ehemals: Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik

Prof. Dr.-Ing. (em.) Hans-Georg Kempfert  
Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik  
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel  
geotech@uni-kassel.de

## FIRMEN UND VERBÄNDE

### Ingenieurkammer Baden-Württemberg dementiert Studie des Deutschen Instituts für Wirtschaftsförderung (DIW)

„Es ist nicht nachvollziehbar, wie das DIW zu der Erkenntnis gekommen ist, dass derzeit kein Ingenieurmangel bestünde und auch in Zukunft nicht bestehen würde. Aus Sicht der Ingenieure ist dies falsch“, erklärte RAINER WULLE, Präsident der Ingenieurkammer Baden-Württemberg. „Im Februar waren laut VDI- und IW-Studie 105.700 freie Ingenieurarbeitsplätze in Deutschland nicht besetzt. Noch nie waren so viele Stellen offen. Als Präsident der Ingenieurkammer Baden-Württemberg und als Inhaber mehrerer Büros weiß ich, dass der Ingenieurmangel groß ist, insbesondere in unserem Bundesland. Seit drei Jahren fehlt in Baden-Württemberg in allen Bereichen des Ingenieurberufs Nachwuchs. Dies wird allein schon dadurch deutlich, dass unsere Mitgliedsbüros große Probleme haben, freie Stellen durch geeignete Ingenieure zu besetzen. Das hören wir als Kammer täglich.“

Die Anfangsgehälter der Jung-Ingenieure, die in den letzten drei Jahren um über 1 000 Euro angestiegen sind, belegen diesen Mangel. Im Baubereich klagen die Mitgliedsfirmen der Ingenieurkammer darüber, dass seit drei Jahren keinerlei Initiativbewerbungen von Absolventinnen und Absolventen mehr in den Ingenieurbüros eintreffen.

Die Ingenieurkammer Baden-Württemberg ist im ständigen Dialog mit der Politik, um weitere Studienplätze und auch neue Ingenieurstudiengänge einzurichten, beispielsweise an der Dualen Hochschule Mosbach. Außerdem ist es ihr ein großes Anliegen, die nach wie vor hohe Abbrecherquote von etwa 35 Prozent in den Ingenieurfächern zu bekämpfen. Dafür habe sie ein Patenprogramm bei den Bau-Studiengängen ins Leben gerufen, das sie in diesem Jahr an allen Universitäten und Hochschulen im Land

etablieren wollen, so WULLE. Das Programm bietet studienrelevante Arbeitsplätze in Ingenieurbüros bei gleichzeitiger Begleitung der Studierenden durch Mentoren (= Paten) aus der Praxis.

„Um unseren wirtschaftlichen Erfolg und den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg zu sichern, brauchen wir dringend Ingenieurinnen und Ingenieure. Die DIW-Studie gibt ein fatales Signal ab gegenüber Jugendlichen, die den Ingenieurberuf ergreifen möchten. Doch gerade diese müssen wir ermuntern, denn allein schon durch den demografischen Wandel und die schon heute absehbare Pensionierungswelle in den Ingenieurberufen brauchen wir deutlich mehr Nachwuchs“, so der Präsident.