

Edgard-Frankignoul-Förderpreis 2011

Dissertation

Tragverhalten von offenen Verdrängungspfählen unter Berücksichtigung der Pfropfenbildung in nichtbindigen Böden

eingereicht von

Dipl.-Ing. Jan Lüking

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Kassel
Institut für Geotechnik und Geohydraulik
Fachgebiet Geotechnik
Mönchebergstr. 7

34125 Kassel

Kassel, 28.09.2010

1 Einleitung und Ablauf der Forschungsarbeit

Die Tragfähigkeit eines mit einer Fußplatte verschlossenen Verdrängungspfahls resultiert aus dem Pfahlspitzendruck in der Profilaufstandsfläche und der Pfahlmantelreibung am äußeren Pfahlschaft. Bei unten offenen Verdrängungspfählen (offene Rohrprofile, zusammengesetzte Trägerprofile etc.) dringt während des Einbringvorgangs der Boden in das Profil ein. An den inneren Pfahlmantelflächen wird 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 Pfahlspitzendruck abzuleiten. Dadurch ist eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit eines offenen Verdrängungspfahles möglich. Das Anwendungsgebiet dieses Pfahltyps liegt häufig im Hafen- und offshore-Bereich.

Die Pfropfenbildung ist bis zum jetzigen Zeitpunkt kaum erforscht. So liegen zum bodenmechanischen Verständnis und zum Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen nur sehr wenige Erkenntnisse vor.

Zur Erforschung der Pfropfenbildung wurden in dieser Arbeit experimentelle, numerische, analytische und statistische Untersuchungen vorgenommen.

Im experimentellen Teil wurden großmaßstäbliche Modellversuche, Feldversuche und PIV (Particle Image Velocimetry) Versuche durchgeführt. Für die Modellversuche wurde ein eigens dafür konstruierter Modellpfehl (innerer Pfahldurchmesser $D_i = 0,15$ cm, Pfahllänge $L = 1,5$ m) entwickelt, der es ermöglichte die drei Widerstandsanteile eines offenen Verdrängungspfahls (innerer Pfahlmantelwiderstand, äußerer Pfahlmantelwiderstand und Widerstand in der Profilaufstandsfläche) messtechnisch separat zu erfassen. Somit konnten die einzelnen Einflussgrößen (Lagerungsdichte D , Sättigungsgrad S_R , unterschiedliche Spannungsniveaus als Auflast auf die Geländeoberfläche etc.) auf die einzelnen Widerstandsanteile in mehreren Versuchsreihen experimentell quantifiziert werden. Durch die Feldversuche konnte der Übertrag der in den Modellversuchen gewonnenen Erkenntnisse auf in-situ Randbedingungen analysiert werden. Mit den PIV-Versuchen wurde der Mechanismus der Pfropfenbildung visualisiert.

Mit Hilfe der Finiten-Elemente Methode wurde ein numerisches Modell erstellt, welches erfolgreich an den Ergebnissen der Modell- und Feldversuche validiert werden konnte. Mit dem FE-Modell wurde der Einfluss weiterer Parameter (Variation der Bodenkenngrößen, Einfluss des Pfahldurchmessers etc.) weitergehend untersucht.

Aufbauend auf den neu 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 (2007)* ergänzen.

2 Erkenntnisfortschritt zur Pfropfenbildung

Für die Methoden und das Vorgehen zur Erforschung der Pfropfenbildung wird auf die Langfassung dieser Arbeit verwiesen. Im Folgenden sind stichpunktartig die wichtigsten neu gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst.

- Die Lagerungsdichte hat erwartungsgemäß einen großen Einfluss auf die Pfropfenbildung. Die Pfropfenhöhe nimmt mit zunehmender Lagerungsdichte zu. Generell wirkt sich eine hohe Lagerungsdichte aufgrund der Dilatation (Volumenzunahme) positiv auf die Tragfähigkeit eines Pfropfens aus.
- Bei den Modell- und Feldversuchen sind bei Drucksondierungen durch den Pfropfen Spitzenwiderstände von $q_c \geq 60 \text{ MN/m}^2$ erreicht worden. Zum Teil wurde im Pfropfen die vom Boden dichteste mögliche Lagerung angenommen.
- Der Pfropfen kann bei Belastung durchrutschen, sich bei zunehmender Pfahlsetzung wieder verspannen und so einen höheren Pfahlwiderstand mobilisieren, siehe beispielhaft in Bild A.1 an der sprunghaften Zunahme des inneren Pfahlmantelwiderstandes R_{is} . Dieser Effekt kann mehrmals in Folge auftreten. Ebenso kann sich bei einer statischen Pfahlprobebelastung die Verspannung des Pfropfens erhöhen, woraus ein etwas höherer innerer Pfahlmantelwiderstand resultiert. Tendenziell ist diese Erhöhung aber relativ gering.
- Ein zunehmender Sättigungsgrad verringert die Neigung zur Pfropfenbildung, da sich während der Rammung im Pfropfen kurzzeitig Porenwasserüberdrücke bilden, die die aufnehmbaren Schubspannungen reduzieren. Aufgrund der ebenfalls unterhalb des Pfahlfußes im Kompressionsbereich entstehenden Porenwasserüberdrücke reduziert sich dort ebenfalls die aufnehmbare Schubspannung, wodurch das Verdrängen des Bodens begünstigt wird. Dadurch können geringere Pfropfenhöhen entstehen. In summa ist der Pfahlwiderstand (und insbesondere der innere Pfahlmantelwiderstand R_{is}) jedoch aufgrund der geringeren effektiven Spannungen und des geringeren Steifemoduls geringer als in nichtgesättigten Böden, vgl. Bild A.1a mit A.1b.

- Die vertikalen Verschiebungen im Pfropfen nehmen bei nichtbindigen Böden auf den untersten zwei Pfahldurchmessern von der Pfropfenmitte zur Pfahlinnenwandung hin zu. Oberhalb dieser zwei Pfahldurchmesser sind die vertikalen Verschiebungen gleichmäßiger verteilt. Unterhalb des Pfahlfußes bildet sich der von den geschlossenen Profilen bekannte Kompressionsbereich aus, siehe Bild A.2.
- Bei den experimentellen Untersuchungen konnte kein festsitzender Pfropfen festgestellt werden. Daher ist anzunehmen, dass eine vollständig festsitzende Verschließung eines offenen Verdrängungspfahles durch einen Pfropfen nicht auftritt. Die Untersuchungen zeigen, dass anstelle eines zusätzlichen Pfahlspitzendrucks aufgrund des Pfropfens die Lastabtragung eher auf eine innere Pfahlmantelreibung zurückzuführen ist.
- Die Bodenart hat einen entscheidenden Einfluss auf eine Pfropfenbildung. Die Erkenntnisse zur Pfropfenbildung im nichtbindigen Boden lassen sich daher nicht direkt auf einen offenen Verdrängungspfahl im bindigen Boden übertragen. 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. Bei der Einpressung eines Pfahls 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 (insbesondere auf den untersten zwei Pfahldurchmessern), siehe Bild A.2.
- Die Lasteinleitung vom Pfropfen in den Pfahl findet bei kleineren Pfahldurchmessern hauptsächlich auf den untersten zwei Pfahldurchmessern statt, siehe Bild A.3. Im darüber liegenden Bereich ist nur eine geringe innere Pfahlmantelreibung wirksam. Mit zunehmendem Pfahldurchmesser nähert sich die innere Pfahlmantelreibung in der Verteilung der äußeren Pfahlmantelreibung an. Der Übergang erfolgt fließend bei einem inneren Pfahldurchmesser zwischen $D_i = 2 \text{ m} \div 3 \text{ m}$. Die innere Pfahlmantelreibung q_{is} nimmt mit zunehmendem Pfahldurchmesser D_i und abnehmender Lagerungsdichte ab. Beispielhafte Ergebnisse aus FE-Berechnungen sind dazu in Bild A.4 und A.5 dargestellt.
- Am inneren Pfahlschaft bilden sich in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und des inneren Pfahldurchmessers D_i Druckgewölbe zum Lastabtrag aus. Bei kleineren Pfahldurchmessern können sich die Druckgewölbe gegenüberliegender Pfahlinnenflächen gegenseitig stützen, woraus die hohe innere Pfahlmantelreibung (und ein Verspannungseffekt) auf den untersten Pfahldurchmessern resultiert, siehe Bild A.6.

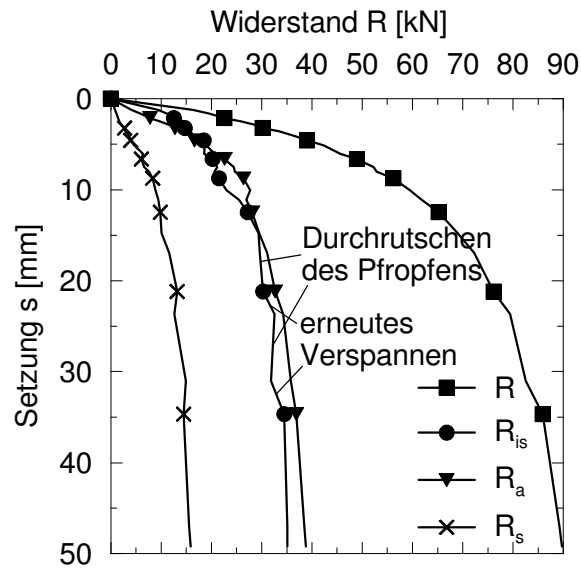
- Ein vollständige Verspannung des Pfropfens konnte nicht identifiziert werden, weshalb die klassische Modellvorstellung eines offenen Verdrängungspfahles, der durch einen Pfropfen fest verschlossen wird, widerlegt werden konnte. Der Lastabtrag eines Pfropfens findet über eine innere Pfahlmantelreibung statt und nicht über einen zusätzlichen Pfahlspitzendruck in der Aufstandsfläche des Pfropfens.
- Mit Hilfe des neu abgeleiteten analytischen Verfahrens, in dem die Erkenntnisse des experimentellen und numerischen Teils dieser Arbeit eingeflossen sind, wurden die in der Datenbank des Fachgebietes Geotechnik vorhandenen statischen Pfahlprobelastungen an offenen Verdrängungspfählen nachgerechnet, um so die jeweiligen Widerstandsanteile bestimmen zu können. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden für die *EA-Pfähle* (2007) neue Spannen der Erfahrungswerte jeweils für das 10 % und 50 % Quantil abgeleitet. Die Werte sind statistisch bis zu einem Pfahldurchmesser von $D \leq 1,2$ m weitgehend abgesichert, siehe Tabelle A.1 bis A.3 und Bild A.7. Eine Übertragung dieser Kenngrößen auf größere Pfahldurchmesser und somit auch zur Verwendung bei offsho-Gründungen ist jedoch für Vergleichsberechnungen denkbar.
- Eine textliche Empfehlung für die Neuauflage der *EA-Pfähle*, in der die wichtigsten bodenmechanischen Erkenntnisse zur Pfropfenbildung und der rechnerischen Ermittlung der Tragfähigkeit von offenen Verdrängungspfählen zusammengefasst werden, runden diese Arbeit ab.

Die eingereichte Arbeit entstand in den Jahren 2006 bis 2010 im Rahmen meiner Promotion während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel. Die Promotion wird voraussichtlich mit der Disputation im November 2010 abgeschlossen werden. Die Dissertation wird anschließend wie folgt veröffentlicht:

Lüking, J. (2010): Tragverhalten von offenen Verdrängungspfählen unter Berücksichtigung der Pfropfenbildung in nichtbindigen Böden; Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 23

A.1 Ausgewählte Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen

a) Lagerungsdichte $D = 0,9$
Sättigungsgrad $S_R = 0 \%$



b) Lagerungsdichte $D = 0,9$
Sättigungsgrad $S_R = 100 \%$

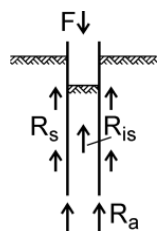
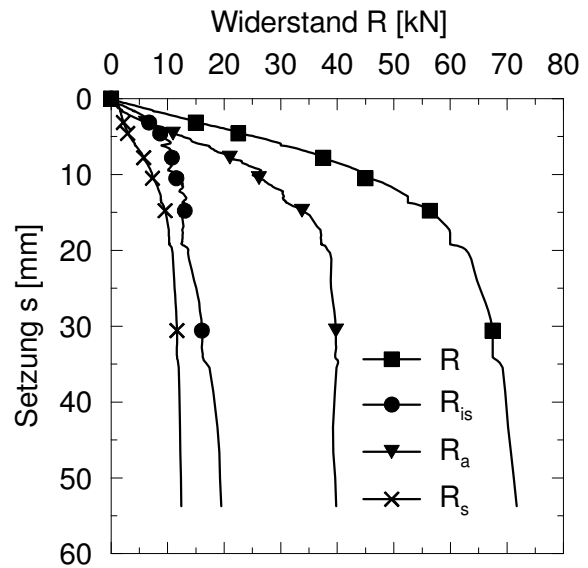


Bild A.1:

Beispielhafte Darstellung der Widerstands-Setzungs-Linien für zwei Modellversuche aufgeteilt nach den gemessenen Widerstandsanteilen R_{is} (innerer Pfahlmantelwiderstand), R_s (äußerer Pfahlmantelwiderstand), R_a (Widerstand in der Profilaufstandsfläche) und R (Pfahlwiderstand)

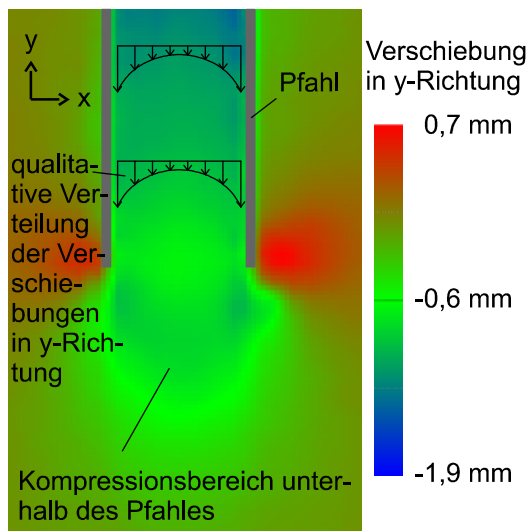


Bild A.2:

Beispielhafte qualitative Verteilung der vertikalen Verschiebungen in den PIV-Versuchen und Identifikation eines Kompressionsbereichs unterhalb der Pfehlfußebene

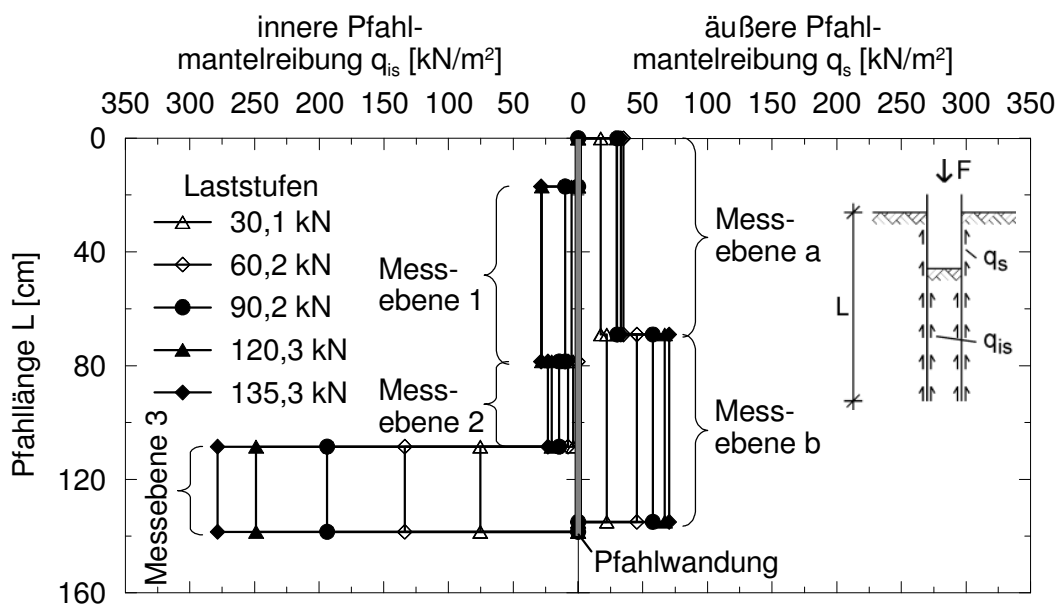


Bild A.3: Beispielhafte Verteilung der inneren und äußeren Pfeilmantelreibung q_{is} bzw. q_s über die Pfehlänge L (Lagerungsdichte $D = 0,9$; Sättigungsgrad $S_R = 0 \%$)

A.2 Ausgewählte Ergebnisse aus den numerischen Untersuchungen

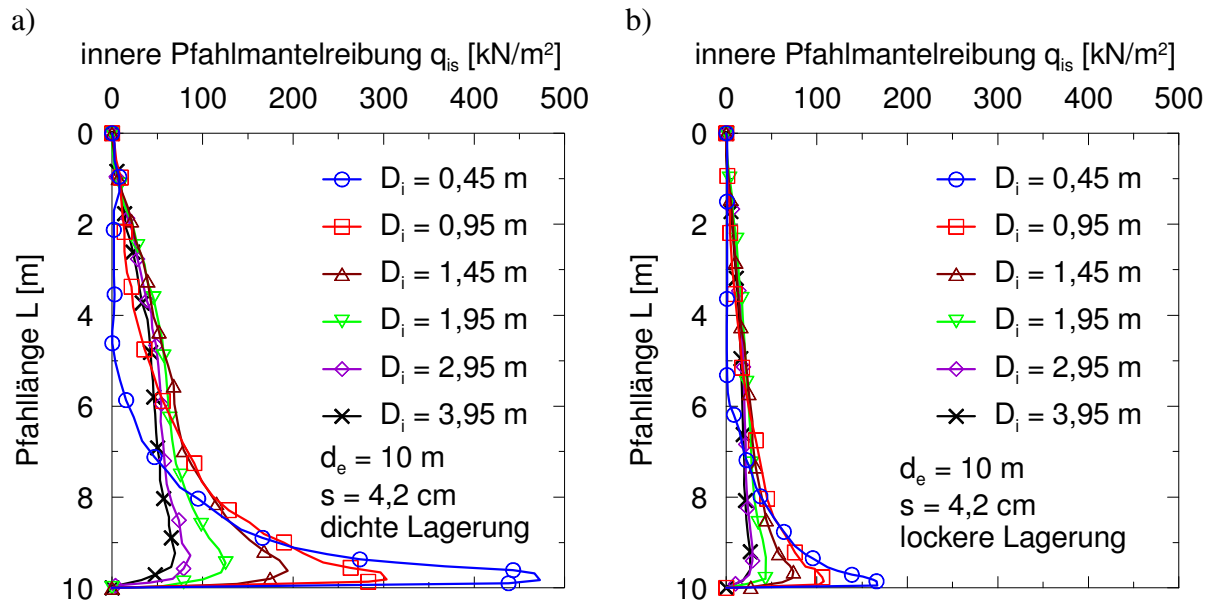


Bild A.4: Verteilung der inneren Pfahlmantelreibung q_{is} über die Pfahlänge L unter Variation des inneren Pfahldurchmessers D_i bei einer Pfahleinbindetiefe von $d_e = 10$ m und einer Pfahlsetzung von $s = 4,2$ cm; a) Dichte Lagerung ($q_c \approx 20$ MN/m²); b) Lockere Lagerung ($q_c \approx 10$ MN/m²)

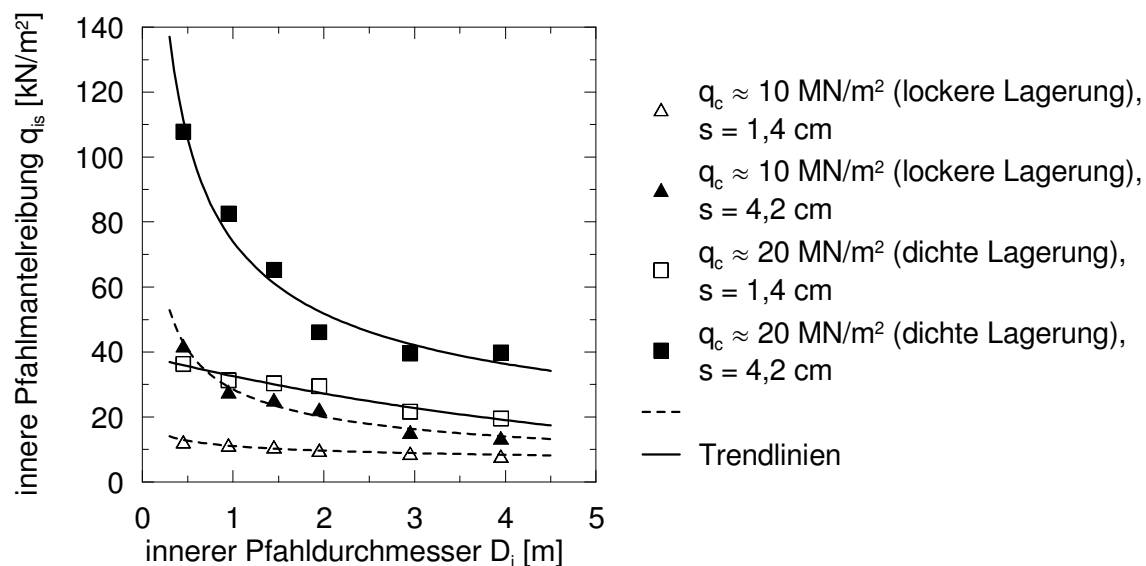


Bild A.5: Einfluss des inneren Pfahldurchmessers D_i auf die innere Pfahlmantelreibung q_{is} in Abhängigkeit des Spitzenwiderstandes q_c der Drucksonde und der Pfahlsetzung s

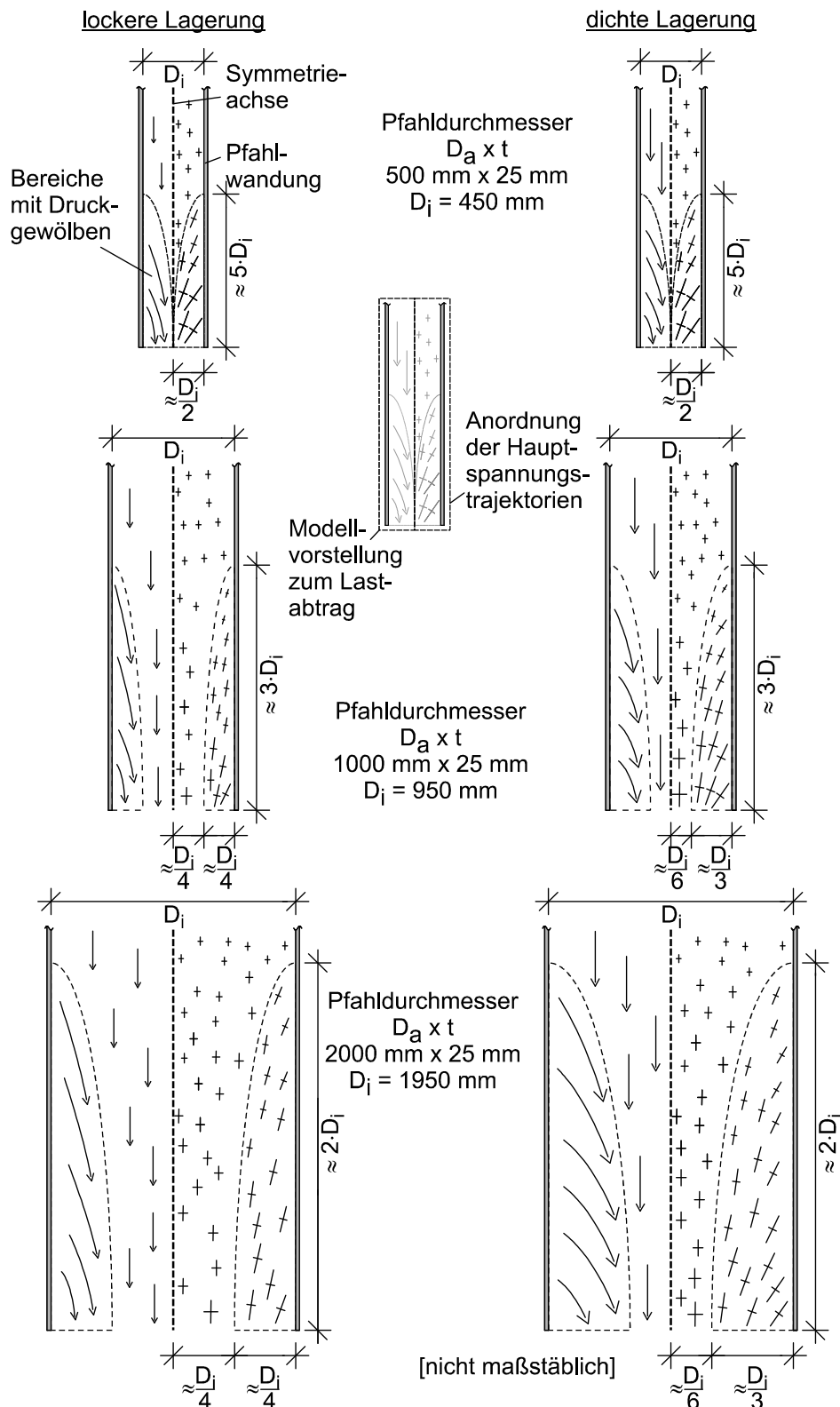


Bild A.6: Ergebnisse der FEM zur schematischen Anordnung der Hauptspannungstrajektorien (jeweils rechte Darstellung) und daraus abgeleitete Modellvorstellung zum Lastabtrag (jeweils linke Darstellung) in Abhängigkeit der Lagerungsdichte und des Pfahldurchmessers

A.3 Ableitung der Spannen von Erfahrungswerten

Tabelle A.1: Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische innere Pfahlmantelreibung $q_{is,k}$ in nichtbindigen Böden

Setzung	innere Pfahlmantelreibung $q_{is,k}$ [kN/m ²]		
	bei einem mittleren Spitzenwiderstand q_c der Drucksonde [MN/m ²]		
	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: $\kappa = 2 \cdot PLR$; $PLR = h_p/d_e$; h_p = Pfropfenhöhe; d_e = Pfahleinbindetiefe

Tabelle A.2: Spannen der Erfahrungswerte für die charakteristische äußere Pfahlmantelreibung $q_{s,k}$ in nichtbindigen Böden

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

Tabelle A.3: Spannen der Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzenruck in der Profilaufstandsfläche $q_{a,k}$ in nichtbindigen Böden

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

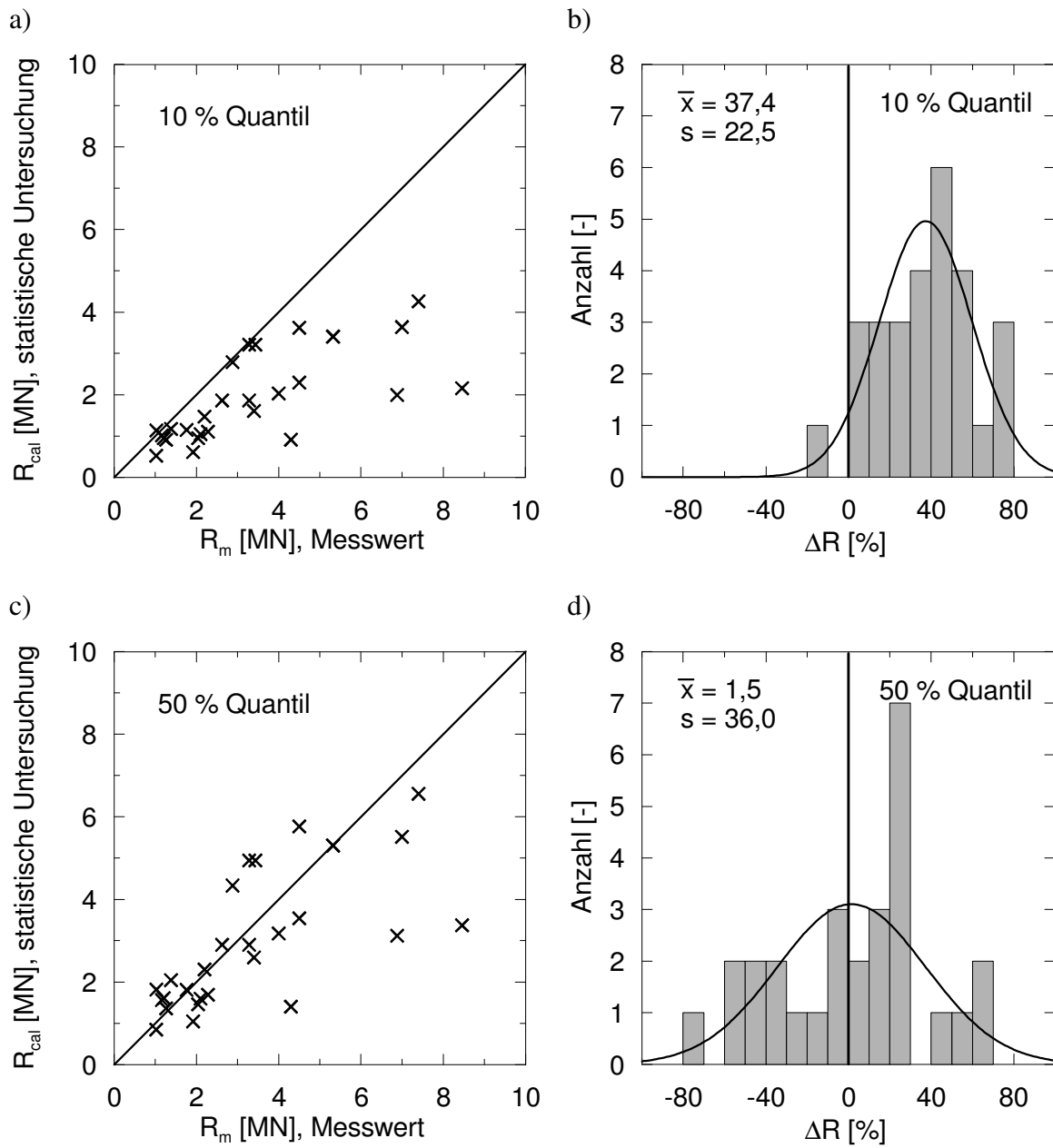


Bild A.7: Streudiagramm (a und c) und Histogramm (b und d) für den Pfahlwiderstand R in nichtbindigen Böden im Grenzzustand der Tragfähigkeit; a) und b) 10 % Quantil; c) und d) 50 % Quantil