

# **Vergleich von halbempirischen direkten CPT Verfahren zur Ermittlung der Pfahltragfähigkeit mit den Erfahrungswerten der EA-Pfähle basierend auf Probelastungsergebnissen**

Jan Lüking<sup>1</sup>, Patrick Becker<sup>2</sup>

<sup>1</sup> HOCHTIEF Engineering GmbH, Consult Infrastructure, Hamburg, Deutschland

<sup>2</sup> Kempfert Geotechnik GmbH, Hamburg, Deutschland

## **1 Einleitung und Problemstellung**

Die in der EA-Pfähle genannten Erfahrungswerte zur Ermittlung der Pfahlwiderstände basieren auf einer Datenbank mit mehr als 1000 Probelastungsergebnissen.

Die Nachrechnung ausgewählter Fertigrammpfahlarten aus dieser Datenbank mit unterschiedlichen halbempirischen direkten CPT Verfahren wie zum Beispiel ICP-05, UWA-05, NGI-05 oder FUGRO-05 führt im Vergleich zu den Erfahrungswerten der EA-Pfähle teilweise zu deutlichen Unterschieden im Berechnungsergebnis.

Bei einer Öffnung der nationalen Normen und Regelwerke für internationale Berechnungsverfahren fehlen dadurch Bewertungsmöglichkeiten zur Anwendung, insbesondere zur Einschätzung des Sicherheitsniveaus dieser Berechnungsverfahren.

Dieser Beitrag analysiert die unterschiedlichen Berechnungsverfahren für offene Stahlrohrpfähle hinsichtlich ihrer bodenmechanischen Modellbildung, der Anwendbarkeit sowie die rechnerische Lastaufteilung und Spannungsverteilung im Verhältnis zu den Erfahrungswerten der EA-Pfähle. Hierbei wird besonders Wert auf die Anwendungsgrenzen der jeweiligen Verfahren bei den in der Datenbank vorhandenen Probelastungsergebnissen gelegt.

## **2 Vorstellung der Berechnungsverfahren für offene Stahlrohrpfähle**

Die Datenbank enthält Ergebnisse von 113 statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen von offenen Stahlrohrpfählen mit Durchmessern zwischen  $D = 0,318$  m bis  $D = 1,42$  m in nichtbindigen Böden des norddeutschen Raumes. Diese Datenbank wurde

nun mit den im Folgenden kurz vorgestellten Berechnungsverfahren nachgerechnet und anschließend mit den Erfahrungswerten der EA-Pfähle verglichen.

#### ICP-05

Das *Imperial College Pile* Verfahren (ICP) wurde ursprünglich für offene Stahlrohrrammpfähle im Offshore-Bereich entwickelt und ist mittlerweile für geschlossene Fertigrammpfähle aus Stahl und Stahlbeton in bindigen und nichtbindigen Bodenarten weiterentwickelt worden. Das Verfahren ist in JARDINE ET AL., 2005 dokumentiert. Die Pfahlmantelreibung basiert auf dem Coulomb'schen Bruchmechanismus, der die lokale, effektive Radialspannung  $\sigma'_{rc}$  in Abhängigkeit vom Spitzenwiderstand der Drucksonde  $q_c$  und vom effektiven Spannungszustand  $\sigma'_{v0}$  sowie die Änderung der Dilatanz während der Pfahlbelastung berücksichtigt. In JARDINE ET AL., 2005 werden zwei Kriterien in Abhängigkeit vom Pfahldurchmesser und der Lagerungsdichte bzw. Spitzenwiderstand der Drucksonde genannt, die beide für eine vollständige Pfrופןbildung erfüllt sein müssen.

In BECKER, LÜKING, 2017 wurden Anpassungsfaktoren zum ICP-05 abgeleitet, mit denen das Verfahren an das Sicherheitsniveau der EA-Pfähle für ein 10% und ein 50% Quantil kalibriert worden ist.

#### UWA-05

Das *University of Western Australia* Verfahren (UWA) ist in LEHANE ET AL., 2005A, B und C dokumentiert und basiert ebenfalls auf einer Datenbank unterschiedlicher Pfahlssysteme. Eine Pfrופןbildung wird bei offenen Stahlrohrpfählen über den Kennwert IFR (Incremental Filling Ratio) rechnerisch berücksichtigt, der messtechnisch rambbegleitend ermittelt oder rechnerisch abgeschätzt werden kann. Die Berechnung des Pfahlmantelwiderstandes erfolgt in ähnlicher Form wie beim ICP-05 Verfahren basierend auf der Radialspannung und der Dilatanz. Ergänzend wird hierbei die Auswirkungen einer Pfrופןbildung über den Kennwert IFR berücksichtigt.

### NGI-05

Das *Norwegian Geotechnical Institute* Verfahren (NGI) ist in CLAUSEN ET AL., 2005 beschrieben. Bei der Berechnung des Pfahlfußwiderstandes wird ebenfalls zwischen einem verspannten und nicht verspannten Pfropfen unterschieden. Hierbei wird bei einem verspannten Pfropfen ein Pfahlspitzendruck auf die Unterseite des Pfropfens und die Profilaufstandsfläche angesetzt. Tritt keine Verspannung ein, so wird auf den Spitzendruck der Profilaufstandsfläche noch eine innere Pfahlmantelreibung addiert, die sich in Anlehnung an die äußere Pfahlmantelreibung berechnen lässt. Maßgebend ist das Minimum aus beiden Betrachtungen.

Die äußere Pfahlmantelreibung wird über einen Spannungsansatz tiefenabhängig mit unterschiedlichen Parametern zur Berücksichtigung des Einflusses aus der Lagerungsdichte des umgebenden Bodens, Belastungsart, Materialeigenschaften des Pfahles und Pfahltyps ermittelt.

### FUGRO-05

Das FUGRO Verfahren wurde vom gleichnamigen Unternehmen entwickelt und basiert ursprünglich auf dem ICP-05 Verfahren und wurde in KOLK ET AL., 2005 modifiziert. Der Pfahlspitzendruck wird auf die volle Profilquerschnittsfläche ohne Berücksichtigung einer Pfropfenbildung angesetzt. Die Berechnung des Pfahlmantelwiderstandes erfolgt unter Berücksichtigung des lokalen Spannungszustandes. Hinweis: In DIN EN ISO 19902:2008-07 wird ein Druckfehler für die Berechnung der Pfahlmantelreibung in der Originalliteratur KOLK ET AL., 2005 korrigiert.

### EA-Pfähle

In Abhängigkeit des Spitzenwiderstandes der Drucksonde werden in der EA-Pfähle Erfahrungswerte für den äußeren Pfahlmantelwiderstand, den Pfahlspitzendruck auf die Profilaufstandsfläche und eine innere Pfahlmantelreibung bzw. einen Widerstand auf die Unterseite des Pfropfens als charakteristische Werte genannt. Über zwei Modellvorstellungen in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers werden eine vollständige Pfropfenbildung, eine teilweise Pfropfenbildung und keine Pfropfenbildung rechnerisch berücksichtigt. Das Verfahren wurde in LÜKING, BECKER, 2015 abgeleitet und ist über die jeweiligen Jahresberichte

in die EA-Pfähle und EAU eingeflossen, siehe MOORMANN, KEMPFFERT, 2014 bzw. GRABE, 2014.

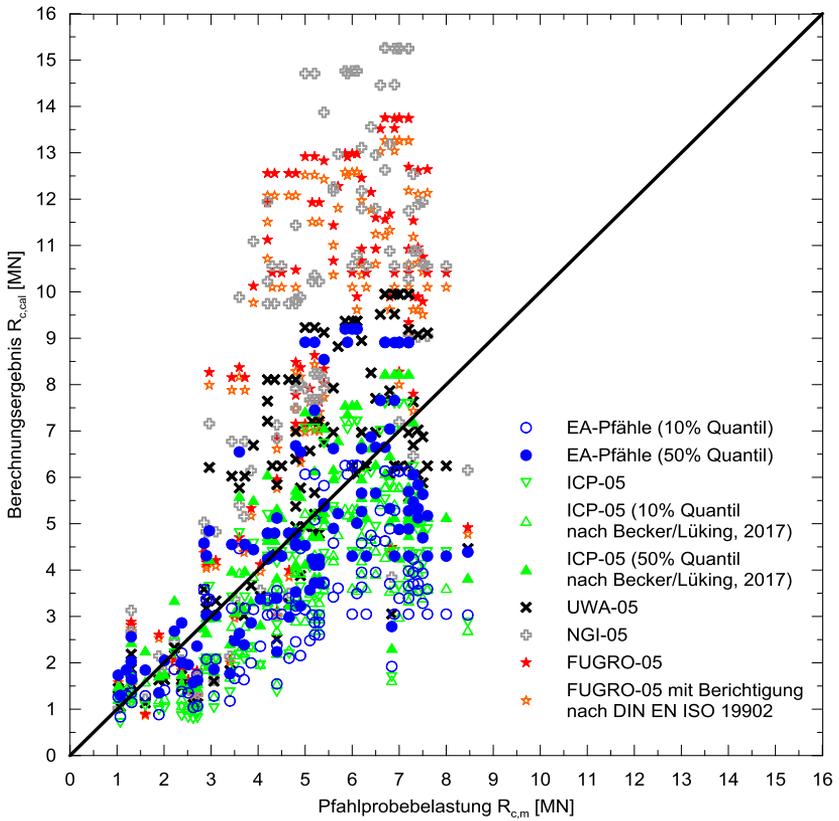
Tabelle 1 gibt einen Überblick von maßgeblichen Unterschieden der jeweiligen vorab aufgezählten Berechnungsverfahren.

**Tabelle 1: Gegenüberstellung von Anwendungsgrenzen und maßgeblichen Unterschieden der Berechnungsverfahren**

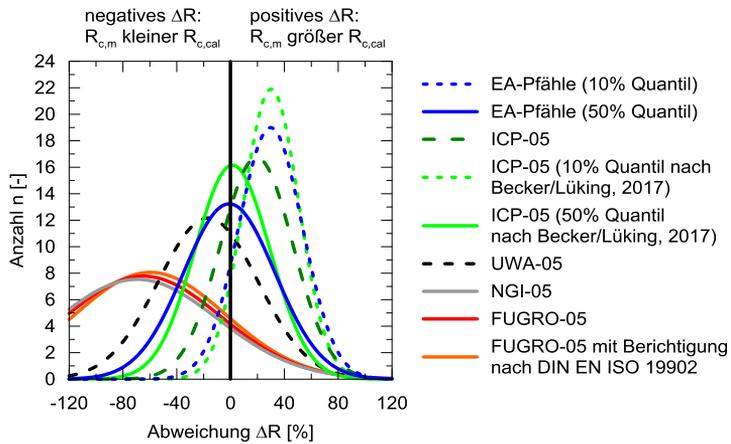
Eigenschaft	EA-Pfähle	ICP-05	UWA-05	NGI-05	FUGRO-05
Belastung	Druckbelastung	Zug- und Druckbelastung			
Ergebnis	Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit in Form einer Widerstandssetzungs-Linie, Angabe eines 10% und 50% Quantils	Grenzzustand der Tragfähigkeit			
Bodenart	Nichtbindiger Boden	Bindiger und nichtbindiger Boden	Nichtbindiger Boden	Nichtbindiger Boden	Nichtbindiger Boden
Berücksichtigung Pfropfenbildung	Feste Verspannung, teilweise Verspannung, keine Verspannung	Feste Verspannung oder keine Verspannung und Ansatz einer inneren Pfahlmantelreibung nach verschiedenen Kriterien	Berücksichtigung Verspannung über IFR Kennwert	Minimum aus fester Verspannung oder keiner Verspannung	Keine Berücksichtigung

### 3 Berechnungsergebnisse für offene Stahlrohrpfähle im Vergleich zur EA-Pfähle

Die in der Datenbank vorhandenen offenen Stahlrohrpfähle wurden zunächst mit den unter Abschnitt 2 genannten Berechnungsverfahren nachgerechnet. In Abbildung 1 sind die berechneten, charakteristischen Pfahltragfähigkeiten  $R_{c,cal}$  den Ergebnissen der Pfahlprobelastung  $R_{c,m}$  gegenübergestellt. In Ergänzung hierzu sind in Abbildung 2 die Normalverteilung und in Tabelle 2 die dazugehörigen statistischen Kenngrößen mit einem ungefähren Quantilbereich dargestellt.



**Abbildung 1: Berechnungsergebnisse  $R_{c,cal}$  der genannten Verfahren im Vergleich zu Ergebnissen der Pfahlprobelastungen  $R_{c,m}$**



**Abbildung 2: Normalverteilung der Berechnungsverfahren**

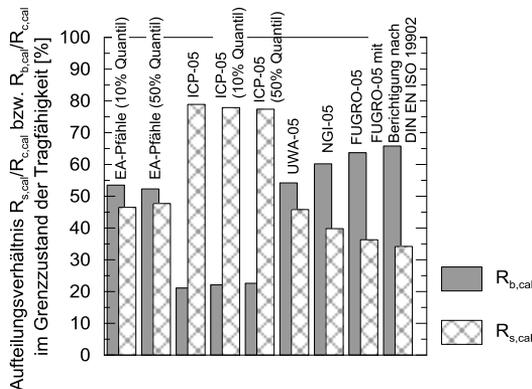
**Tabelle 2: Statistische Kenngrößen der in Abbildung 2 dargestellten Normalverteilungen**

	Mittelwert $\bar{x}$ [%]	Standardabweichung s [%]	Ungefäher Quantilbereich
EA-Pfähle (10% Quantil)	29,7	23,7	10%
EA-Pfähle (50% Quantil)	-1,0	34,1	50%
ICP-05	19,4	26,9	22%
ICP-05 (10% Quantil nach BECKER/LÜKING, 2017)	30,2	20,6	10%
ICP-05 (50% Quantil nach BECKER/LÜKING, 2017)	1,4	27,9	50%
UWA-05	-16,7	37,1	62%
NGI-05	-69,5	59,8	84%
FUGRO-05	-65,0	58,0	86%
FUGRO-05 mit Berichtigung nach DIN EN ISO 19902	-59,6	55,9	85%

Verfahren, bei denen der Messwert  $R_{c,m}$  aus der Pfahlprobebelastung kleiner als der rechnerische Pfahlwiderstand  $R_{c,cal}$  ist, weisen beim Mittelwert  $\bar{x}$  ein negatives Vorzeichen auf. Dies ist vor allem bei den Verfahren NGI-05, FUGRO-05 und UWA-05 der Fall. Die Verfahren NGI-05 und FUGRO-05 weisen zudem noch einen sehr hohen Quantilbereich von ca. 85% auf. Dies bedeutet statistisch, dass nur 15% der berechneten Pfahlwiderstände größer sind als die gemessenen Pfahlwiderstände und somit auf der sicheren Seite liegen. Das ICP-05 Verfahren liegt mit einem 22% Quantil zwischen den beiden Erfahrungswerten der EA-Pfähle von 10% und 50%. Die Standardabweichung  $s$  als Maß der Streubreite liegen für die Verfahren nach EA-Pfähle, ICP-05 und UWA-05 in einem für die Geotechnik üblichen Bereich von 20 bis 35%. Lediglich die Verfahren NGI-05 und FUGRO-05 weisen eine hohe Streubreite von ca. 60% auf.

Die Berichtigung des FUGRO-05 Verfahrens nach DIN EN ISO 19902:2008-07 ist statistisch gesehen vernachlässigbar.

In Abbildung 3 ist das Aufteilungsverhältnis des berechneten Pfahlfußwiderstandes  $R_{b,cal}$  bzw. des Pfahlmantelwiderstandes  $R_{s,cal}$  bezogen auf den Gesamtpfahlwiderstand  $R_{c,cal}$  im Grenzzustand der Tragfähigkeit aufgetragen. Der Pfahlfußwiderstand beinhaltet je nach Berechnungsverfahren den inneren Pfahlmantelwiderstand oder den Widerstand auf den Pfropfen und die Profilaufstandsfläche.

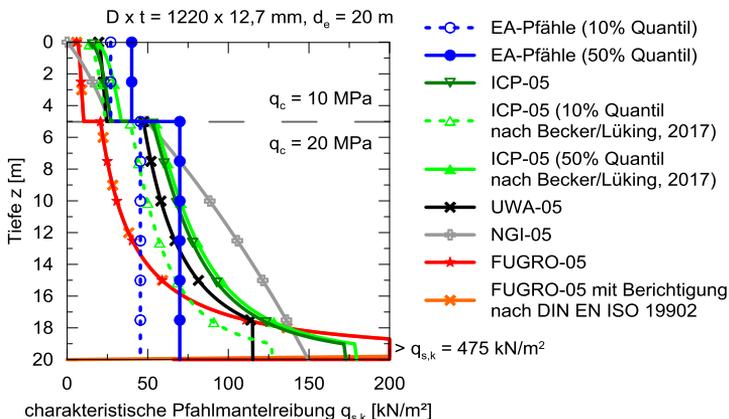


**Abbildung 3: Prozentuales Aufteilungsverhältnis des charakteristischen Pfahlfußwiderstandes  $R_{b,cal}$  bzw. des Pfahlmantelwiderstandes  $R_{s,cal}$  bezogen auf den Gesamtpfahlwiderstand  $R_{c,cal}$  im Grenzzustand der Tragfähigkeit**

Das ICP-05 Verfahren weist einen hohen Pfahlmantelwiderstandsanteil mit einem vergleichsweise geringen Pfahlfußwiderstandsanteil auf. Bei den Verfahren nach EA-Pfähle und UWA-05 liegt der Pfahlfußwiderstand bei ca. 55%, der bei den Verfahren nach NGI-05 bzw. FUGRO-05 auf 60 bis 70% des Gesamtpfahlwiderstands ansteigt.

Der erhöhte Lastabtrag über den Pfahlmantel beim ICP-05 Verfahren im Vergleich zu den anderen Verfahren liegt vornehmlich darin begründet, dass bei erstgenanntem rechnerisch keine innere Pfahlmantelreibung berücksichtigt wird, wenn die Kriterien zur Pfropfenbildung nicht erfüllt sind, welches bei der Mehrheit der Pfähle in der Datenbank der Fall ist.

In Abbildung 4 ist die Verteilung der aus den Berechnungsverfahren resultierenden äußeren charakteristischen Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  bzw. der resultierenden rechnerischen äußeren Pfahlmantelreibung  $q_{s,cal}$  für einen Beispielpfahl dargestellt. Der Beispielpfahl hat einen äußeren Durchmesser von  $D = 1220$  mm mit einer Wandstärke von 12,7 mm und bindet 20 m in einen zweigeschichteten nichtbindigen Boden ein. Schicht 1 hat eine Mächtigkeit von 5 m mit einem Spitzenwiderstand der Drucksonde von  $q_c = 10$  MPa bzw. für Schicht 2 von  $q_c = 20$  MPa ab einer Tiefe von 5 m. Alle jeweiligen verfahrensspezifischen Faktoren wurden in Abbildung 4 bereits berücksichtigt, sodass eine Integration der dargestellten äußeren Pfahlmantelreibung über den Pfahlschaft den Pfahlmantelwiderstand liefern würde.



**Abbildung 4: Verteilung der charakteristischen äußeren Pfahlmantelreibung  $q_{s,k}$  bzw. der resultierenden rechnerischen äußeren Pfahlmantelreibung  $q_{s,cal}$  für einen Beispielpfahl in einem geschichteten nichtbindigen Boden**

Die Pfahlmantelreibung nach EA-Pfähle ist über die Tiefe konstant, während bei den anderen Verfahren eine Tiefenabhängigkeit erkennbar ist. Der Verlauf der Verfahren UWA-05, ICP-05 und FUGRO-05 ist konkav, während der Verlauf des NGI-05 Verfahrens leicht konvex verläuft. Das FUGRO-05 Verfahren hat in einer Tiefe von ca.  $z = 19$  m ein Maximum von ca.  $q_{s,k} = 475 \text{ kN/m}^2$ , wodurch die bis zu dieser Tiefe vorhandene geringe Pfahlmantelreibung mehr als kompensiert wird. Dieser Peakwert ist u.a. auch für die hohen rechnerischen Pfahlwiderstände dieses Verfahrens letztendlich verantwortlich.

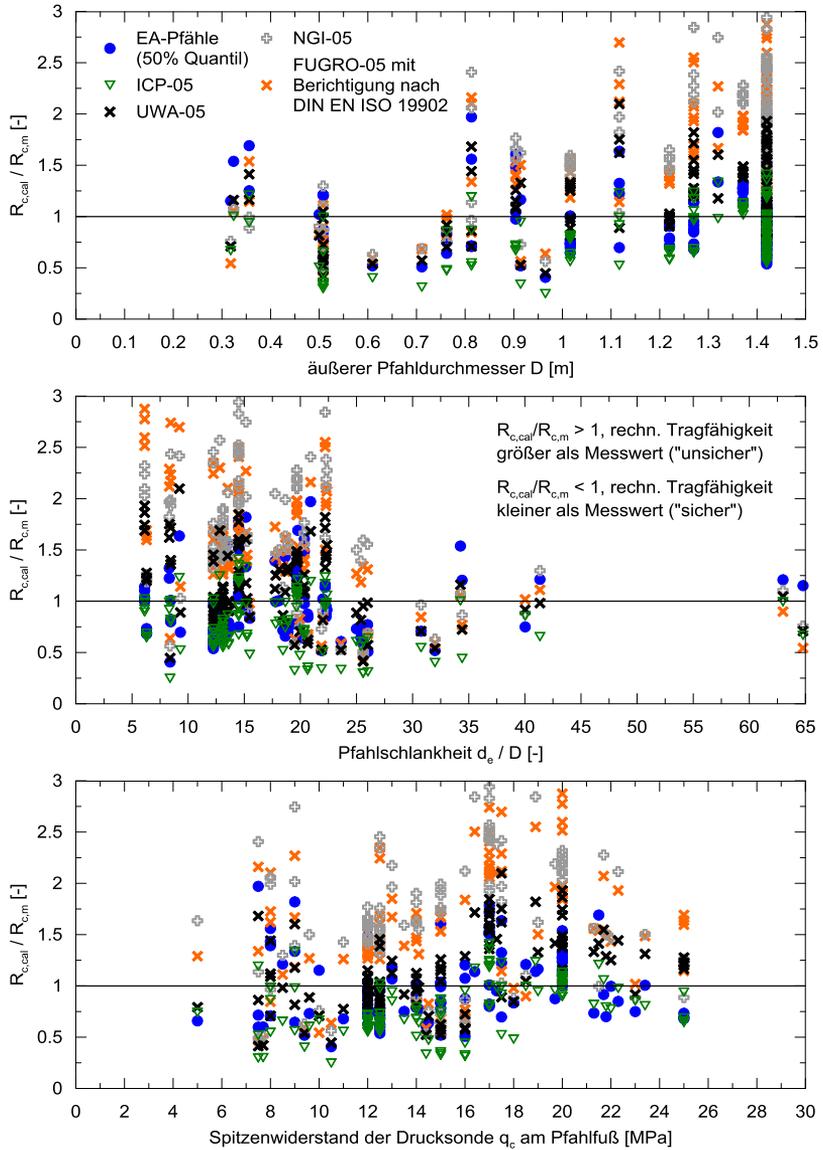
Der Unterschied zwischen FUGRO-05 und FUGRO-05 mit Berichtigung nach DIN EN ISO 19902:2008-07 liegt in einem geringfügig abgeminderten Verlauf unterhalb des vorab genannten Maximums. Oberhalb des Maximums ist der Verlauf identisch.

In Abbildung 5 ist das Aufteilungsverhältnis  $R_{c,cal}/R_{c,m}$  über den äußeren Pfahldurchmesser  $D$ , die Pfahlschlankheit  $d_e/D$  sowie den Spitzenwiderstand der Drucksonde  $q_c$  am Pfahlfuß für die untersuchte Pfahldatenbank gegenübergestellt, um so einen Eindruck der Leistungsfähigkeit der einzelnen Verfahren bei variierenden Randbedingungen zu erhalten. Ein Wert  $R_{c,cal}/R_{c,m} > 1$  bedeutet, dass die rechnerische Pfahltragfähigkeit größer ist als der entsprechende Wert aus der Pfahlprobelastung („unsicher“) und umgekehrt.

Das Berechnungsverfahren nach EA-Pfähle (50% Quantil) zeigt keine Tendenz im Aufteilungsverhältnis  $R_{c,cal}/R_{c,m}$  über den Pfahldurchmesser  $D$ , die Pfahlschlankheit  $d_e/D$  und den Spitzenwiderstand der Drucksonde  $q_c$  am Pfahlfuß. Die Ergebnisse sind gleichmäßig mit der jeweiligen Streuung verteilt.

Beim ICP-05 Verfahren nimmt das Aufteilungsverhältnis  $R_{c,cal}/R_{c,m}$  mit zunehmendem Pfahldurchmesser  $D$  und zunehmendem Spitzenwiderstand der Drucksonde  $q_c$  am Pfahlfuß dagegen leicht zu.

Das UWA-05 Verfahren zeigt eine ähnliche, wenn auch etwas deutlichere Tendenz wie das ICP-05 Verfahren. Hier nimmt das Aufteilungsverhältnis  $R_{c,cal}/R_{c,m}$  mit zunehmendem Pfahldurchmesser  $D$  und Spitzenwiderstand der Drucksonde  $q_c$  am Pfahlfuß ebenfalls zu. Eine leichte Abnahme des Aufteilungsverhältnisses ist bei zunehmender Pfahlschlankheit  $d_e/D$  erkennbar.



**Abbildung 5: Aufteilungsverhältnis  $R_{c,cal}/R_{c,m}$  über den äußeren Pfahldurchmesser D, die Pfahlschlankheit  $d_e/D$  und den Spitzenwiderstand der Drucksonde  $q_c$  am Pfahlfuß für die untersuchte Pfahldatenbank von offenen Stahlrohrpfählen**

Sehr deutlich wird rechnerisch beim NGI-05 Verfahren die Pfahltragfähigkeit ab einem Pfahldurchmesser größer 1 m überschätzt. Bei einer Pfahlschlankheit von  $d_e/D > 25$  wird dieser Effekt jedoch wieder kompensiert. Hier zeigt das Verfahren gute Übereinstimmungen zwischen Messwert und Rechenwert. Für den Spitzenwiderstand der Drucksonde ist keine Tendenz erkennbar.

Das FUGRO-05 Verfahren mit Berichtigung nach DIN EN ISO 19902:2008-07 zeigt die gleichen Tendenzen wie das NGI-05 Verfahren.

Auffallend ist, dass gerade die beiden letztgenannten Verfahren gute Übereinstimmungen zwischen Rechenwert und Messwert bei hoher Pfahlschlankheit aufweisen. Somit scheinen diese beiden Verfahren erst bei einer gewissen Pfahleinbindetiefe plausible Werte zu liefern. In Tabelle 3 sind die jeweiligen Tendenzen abschließend für die einzelnen Verfahren zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 3: Zusammenstellung der jeweiligen Tendenzen für die untersuchten Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung der Datenbank für offene Stahlrohrpfähle**

Berechnungsverfahren	Tendenzielle Veränderung des Aufteilungsverhältnisses $R_{c,cal} / R_{c,m}$ bei zunehmendem		
	Pfahldurchmesser D	Pfahlschlankheit $d_e/D$	Spitzenwiderstand der Drucksonde $q_c$ am Pfahlfuß
EA-Pfähle (50% Quantil)	→	→	→
ICP-05	↑	→	↑
UWA-05	↑	↓	↑
NGI-05	↑	↓	→
FUGRO-05 mit Ber. nach DIN EN ISO 19902	↑	↓	→
↑: zunehmend; →: keine Tendenz erkennbar; ↓: abnehmend			

#### **4 Anmerkung zur Ermittlung von Bemessungswerten der Pfahlwiderstände**

Die Ermittlung der Bemessungswerte von Pfahlwiderständen erfolgt für das Verfahren nach EA-Pfähle gem. Eurocode DIN EN 1997-1 auf der Grundlage von Erfahrungswerten. Somit wird gem. EA-Pfähle eine Einordnung in die Kategorie „Widerstände aus den Ergebnissen von Baugrundversuchen“ vorgenommen, wobei hier die Baugrundversuche als Geotechnische Untersuchung des Baugrunds für eine sichere Einordnung der Pfahlwiderstände auf der Grundlage von Erfahrungswerten vorzusehen sind. Der Teilsicherheitsfaktor für den Pfahlwiderstand ist dabei auf Grundlage von Erfahrungswerten mit  $\gamma_b = 1,40$  definiert, der einen Modellfaktor mit  $\eta_E = 1,30$  berücksichtigt, vgl. NDP Zu 7.6.2.3 (8). Sofern andere Berechnungsverfahren verwendet werden sollen, ist nach DIN EN 1997-1, dort Abschnitt 7.6.2.3 A(1), die Brauchbarkeit des Verfahrens nachzuweisen.

Die in diesem Beitrag für den Vergleich mit der EA-Pfähle untersuchten Verfahren sind gem. Eurocode DIN EN 1997-1 nicht als Regelfall zur Ermittlung von Pfahlwiderständen definiert und werden nicht zur Anwendung vorgesehen. Aufgrund der jeweils vorgenommenen Kalibrierung der CPT Verfahren an Probelastungen sind diese als halbempirisch zu bezeichnen. Hierdurch wird für diese Verfahren die normative Einordnung in die Kategorie „auf der Grundlage von Baugrundversuchen“ vorgesehen, deren Eignung hinsichtlich der Brauchbarkeit des Verfahrens grundsätzlich nachzuweisen ist.

Aus Sicht der Autoren ist mit der vergleichenden Ermittlung der Quantilbereiche für die Datenbank zugrunde liegenden Probelastungsergebnisse nach Abschnitt 3, siehe dort z.B. Abb. 2, eine Beurteilung des Sicherheitsniveaus und somit der Brauchbarkeit möglich. Für das ICP-05-Verfahren wurde hierzu in BECKER, LÜKING, 2017 für Fertigrampfpfähle aus Stahlbeton sowie für die hier untersuchten offenen Stahlrohrpfähle eine Kalibrierung des Sicherheitsniveaus unter Berücksichtigung der den Erfahrungswerten nach EA-Pfähle zugrunde liegenden Probelastungsergebnissen vorgenommen. In gleicher Weise wird auch für den Fall einer Anwendung der CPT Verfahren UWA-05, NGI-05 und FUGRO-05 eine Kalibrierung an das Sicherheitsniveau für erforderlich erachtet, um die Brauchbarkeit nachzuweisen.

#### **5 Zusammenfassung und Ausblick**

In diesem Beitrag werden die CPT Verfahren ICP-05, UWA-05, NGI-05 und FUGRO-05 mit dem Verfahren nach EA-Pfähle für offene Stahlrohrpfähle verglichen. Die Berech-

nungsgrundlagen der untersuchten CPT-Verfahren sind zur Vollständigkeit im Anhang des Beitrags zusammengefasst.

Die Grundlage der Untersuchung sind die Probelastungsergebnisse, die auch zur Ableitung der Erfahrungswerte nach EA-Pfähle verwendet worden sind. Der Vergleich der berechneten Pfahlwiderstände für offene Stahlrohrpfähle offenbart große Abweichungen. Im Fall des ICP-05 Verfahrens liegt für die untersuchten Probelastungsergebnisse etwa ein 22% Quantil vor, so dass in 22% der Fälle das Messergebnis der Probelastungen einen geringeren Pfahlwiderstand aufweist als das Berechnungsergebnis und somit auf der sicheren Seite liegt. Demgegenüber führen die CPT-Verfahren NGI-05 und FUGRO-05 zu mit einem 84% bzw. 86% Quantil zu einem deutlich auf der unsicheren Seite liegendem Berechnungsergebnis. Das UWA-05 Verfahren ergibt im vorliegenden Fall ein 62% Quantil und überschätzt somit ebenfalls die Messergebnisse.

Zur Beurteilung der Brauchbarkeit der CPT Verfahren ist eine Auswertung hinsichtlich Durchmesserabhängigkeit, Pfahlschlankheit und der Abhängigkeit vom Sondierwiderstand der Drucksonde im Bereich des Pfahlfußniveaus vorgenommen worden. Es zeigt sich das eine pauschale Bewertung der Brauchbarkeit nicht zielführend ist. So ergeben z.B. die Verfahren NGI-05 und Fugro-05 gute Übereinstimmungen zwischen Mess- und Berechnungsergebnis ab einer Pfahlschlankheit  $d_e/D > 25$ , überschätzen jedoch die Messergebnisse bei Pfahldurchmessern mit  $D > 1$  m deutlich. Bei den ICP-05 und UWA-05 Verfahren sind zunehmende Abweichungen mit ansteigendem Pfahldurchmesser und Spitzenwiderstand der Drucksonde zu beobachten. Demgegenüber zeigt sich das Berechnungsverfahren nach EA-Pfähle für die untersuchten Probelastungen keine größere Sensitivität hinsichtlich Durchmesser, Schlankheit und Spitzenwiderstand der Drucksonde.

Zusammenfassend zeigen die vorstehenden vergleichenden Untersuchungen erhebliche Unterschiede im Sicherheitsniveau und erfordern somit für eine direkte Anwendung nach den nationalen normativen Vorgaben einen Nachweis der Brauchbarkeit. Für das ICP-05 Verfahren erfolgte der Nachweis der Brauchbarkeit mit einer Kalibrierung und Ableitung von Anpassungsfaktoren für Fertigrammpfähle aus Stahlbeton und offene Stahlrohrpfähle in BECKER, LÜKING, 2017. Hier sind allerdings für das UWA-05, NGI-05 und FUGRO-05 Verfahren erheblich größere Streuungen festzustellen, die nicht auf der sicheren Seite liegen, starke geometrische Abhängigkeiten aufweisen und somit den Nachweis der Brauchbarkeit einschränken und weitere Untersuchungen erfordern.

## Literatur

**Becker, P.; Lüking, J.;** Vergleich der CPT basierten direkten Berechnungsverfahren nach EA-Pfähle und ICP-05 für Fertigrammpfähle, *Bautechnik* 94, doi:10.1002/bate.201600049, 2017

**Clausen, C.J.F.; Aas, P.M.; Karlsrud, K.;** Bearing Capacity of Driven Piles in Sand, the NGI Approach, *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Balkema, Rotterdam, p. 677-681, 2005*

**DIN EN 1997-1;** Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln; *Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2009*

**DIN EN ISO 19902;** Erdöl- und Erdgasindustrie – Gegründete Stahlplattformen (ISO 19902:2007); Englische Fassung EN ISO 19902:2007; *Deutsches Institut für Normung, Berlin, 2008*

**EA-Pfähle;** Empfehlung des Arbeitskreises „Pfähle“, 2. Auflage, *Ernst & Sohn, Berlin, 2012*

**Grabe, J.;** Technischer Jahresbericht 2014 des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), *Bautechnik* 91, Heft 12, S. 904-921, 2014

**Jardine, R.J.; Chow, F.C.; Overy, R.F.; Standing, J.R.;** ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays, *Thomas Telford, London, 2005*

**Kolk, H.J.; Baaijens, A.E.; Senders, M.;** Design Criteria for Pipe Piles in Silicia Sands, *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Balkema, Rotterdam, p. 711-716, 2005*

**Lehane, B.M.; Schneider, J.A.; Xu, X.;** CPT Based Design of Driven Piles in Sand for Offshore Structures, *The University of Western Australia, Geomechanics Group, GEO:05345, 2005A*

**Lehane, B.M.; Schneider, J.A.; Xu, X.;** A Review of Design Methods for Offshore Driven Piles in Siliceous Sand, *The University of Western Australia, Geomechanics Group, GEO:05358, 2005B*

**Lehane, B.M.; Schneider, J.A.; Xu, X.;** The UWA-05 Method for Prediction of Axial Capacity of driven Piles in Sand, *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Balkema, Rotterdam, p. 683-689, 2005C*

**Lüking, J.; Becker, P.;** Harmonisierung der Berechnungsverfahren der axialen Tragfähigkeit für offene Profile nach EA-Pfähle und EAU, *Bautechnik 92, Heft 2, S. 161-176, 2015*

**Moormann, C.; Kempfert, H.-G.;** Jahresbericht 2014 des Arbeitskreises „Pfähle“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), *Bautechnik 91, Heft 12, S. 922-932, 2014*

## **Anhang: Zusammenstellung der Berechnungsverfahren**

### **Allgemeines**

Bei den Berechnungen hat sich herausgestellt, dass in manchen Literaturstellen teilweise Inkonsistenzen in den Gleichungen vorhanden sind. Die Autoren haben daher soweit möglich die Verfasser der jeweiligen Literatur kontaktiert und eine Überprüfung erbeten. Daher sind die Gleichungen für Druckpfähle in nichtbindigen Böden im Folgenden dokumentiert, wie sie bei den Berechnungen angewendet worden sind.

Alle Berechnungen basieren auf folgender Grundgleichung (A.1).

$$R_{c,k} = R_{b,k} + R_{s,k} = q_b \cdot A_b + \int_{z=0}^{z=d_e} q_s(z) \cdot A_s dz \quad (\text{A.1})$$

Hierbei ist zu beachten, dass die Wahl des Inkrementes  $dz$  einen recht großen Einfluss auf das Berechnungsergebnis aufgrund nichtlinearer Ausdrücke im Nenner einiger Gleichungen haben kann. Daher ist das Inkrement zu 1 cm gewählt worden.

Die Berechnungsverfahren der EA-Pfähle und ICP-05 sind in LÜKING, BECKER, 2015 bzw. BECKER, LÜKING, 2017 bereits zusammengestellt und werden daher im Folgenden nicht erneut dokumentiert.

### **UWA-05**

Das Berechnungsverfahren ist in LEHANE ET AL., 2005A,B und C dokumentiert. Der Pfahlspitzendruck  $q_{b,cal}$  wird auf die Profil- und Pfropfenunterseite angesetzt.

$$q_{s,cal} = (\sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}) \cdot \tan\delta_{cv} \quad (\text{A.2})$$

$$\sigma'_{rc} = 0,03 \cdot q_c \cdot (A_{rs}^*)^{0,3} \cdot \left[ \max\left(\frac{h}{D_a}, 2\right) \right]^{-0,5} \quad (\text{A.3})$$

$$A_r^* = 1 - IFR \cdot \left(\frac{D_i^2}{D_a^2}\right) \quad (\text{A.4})$$

$$IFR = \min\left[1, \left(\frac{D_i}{1,5}\right)^{0,2}\right] \quad (\text{A.5})$$

$$\Delta\sigma'_{rd} = 4 \cdot G \cdot \frac{\Delta r}{D_a} \quad (\text{A.6})$$

$$G = q_c \cdot 185 \cdot q_{c1N}^{-0,7} \quad (\text{A.7})$$

$$q_{c1N} = \frac{(q_c/p_a)}{(\sigma'_{v0}/p_a)^{0,5}} \quad (\text{A.8})$$

$$q_{b,cal} = (0,15 + 0,45 \cdot A_r^*) \cdot q_c \quad (\text{A.9})$$

## NGI-05

Das NGI-05 Verfahren ist in CLAUSEN ET AL., 2005 beschrieben. Der Pfahlfußwiderstand wird als Minimum der gesamten geschlossenen Pfahlfußquerschnittsfläche (Pfropfenbildung) oder dem Widerstand einer inneren Pfahlmantelreibung über die Pfahleinbindelänge und dem Widerstand auf die reine Profilaufstandsfläche berechnet.

$$q_{s,cal} = \frac{z}{d_e} \cdot p_a \cdot F_{Dr} \cdot F_{sig} > 0,1 \cdot \sigma'_{v0} \quad (\text{A.10})$$

$$F_{Dr} = 2,1 \cdot (D_r - 0,1)^{1,7} \quad (\text{A.11})$$

$$F_{sig} = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a}\right)^{0,25} \quad (\text{A.12})$$

$$D_r = 0,4 \cdot \ln\left(\frac{q_c}{22 \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{0,5}}\right) \quad (\text{A.13})$$

$$R_b = \min[q_{Profil,cal} \cdot A_{Profil} + q_{is,cal} \cdot A_{is}, q_{b,cal} \cdot A_b] \quad (\text{A.14})$$

$$q_{b,cal} = \frac{0,7 \cdot q_c}{(1+3 \cdot D_r^2)} \quad (\text{A.15})$$

$$q_{Profil,cal} = q_c \quad (\text{A.16})$$

$$q_{is,cal} = 3 \cdot q_{s,cal} \quad (\text{A.17})$$

## FUGRO-05

In KOLK ET AL., 2005 sind die Gleichungen wie folgt angegeben. Der Pfahlsitzendruck  $q_{b,cal}$  wird auf die Profil- und Pfropfenunterseite bezogen.

$$q_{s,cal} = 0,08 \cdot q_c \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{h}{r^*}\right)^{-0,9} \quad \text{für } h/r^* \geq 4 \quad (\text{A.18})$$

$$q_{s,cal} = 0,08 \cdot q_c \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a}\right)^{0,05} \cdot \left(\frac{h}{r^*}\right)^{-0,9} \cdot \left(\frac{h}{4 \cdot r^*}\right) \quad \text{für } h/r^* < 4 \quad (\text{A.19})$$

$$q_{b,cal} = 8,5 \cdot p_a \cdot \left(\frac{q_c}{p_a}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{r^*}{r_a}\right)^{0,5} \quad (\text{A.20})$$

$$r^* = \sqrt{r_a^2 - r_i^2} \quad (\text{A.21})$$

In DIN EN ISO 19902:2008-07 wird die Pfahlmantelreibung nach Gleichung (A.18) und (A.19) wie folgt berichtigt.

$$q_{s,cal} = 0,043 \cdot q_c \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a}\right)^{0,05} \cdot A_r^{0,45} \cdot \left[\max\left(\frac{h}{D_a}, 2 \cdot \sqrt{A_r}\right)\right]^{-0,9} \cdot \left[\min\left(\frac{h}{D_a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{A_r}}, 1\right)\right] \quad (\text{A.22})$$

$$A_r = 1 - \left(\frac{D_i}{D_a}\right)^2 \quad (\text{A.23})$$

Mit:

$A_b$  = Pfahlfußfläche in [m<sup>2</sup>]

$A_{is}$  = innere Pfahlmantelfläche in [m<sup>2</sup>]

$A_{profil}$  = Profilaufstandsfläche des Pfahles in [m<sup>2</sup>]

$A_s$  = Pfahlmantelfläche in [m<sup>2</sup>]

$\delta_{cv}$  = Kontaktreibungswinkel zwischen Pfahlschaft und Boden, für das ICP-05 Verfahren wurde  $\delta_{cv} = 30^\circ$  nach JARDINE ET AL., 2005 und für das UWA-05 Verfahren wurde  $\delta_{cv} = 28,8^\circ$  nach LEHANE ET AL., 2005A verwendet.

$\Delta r$  = Pfahlrauheit mit leicht angerosteter Oberfläche ( $\Delta r \approx 0,02$  mm)

$D_a$  = äußerer Pfahldurchmesser,  $D_i$  = innerer Pfahldurchmesser jeweils in [m]

$d_e$  = Pfahleinbindelänge in [m]

$h$  = relativer Abstand der Berechnungsebene zum Pfahlfuß in [m]

$p_a$  = atmosphärischer Druck in [kPa] (i.d.R.  $p_a = 100$  kPa)

$q_c$  = Spitzenwiderstand der Drucksonde in [kPa]

$q_{b,k}$  = rechnerischer Pfahlspitzendruck in [kPa]

$q_{is,cal}$  = rechnerische innere Pfahlmantelreibung in [kPa]

$q_{Profil,cal}$  = rechnerischer Pfahlspitzendruck in der Profilaufstandsfläche in [kPa]

$q_{s,cal}$  = rechnerische Pfahlmantelreibung in [kPa]

$r_a$  = äußerer Pfahlradius,  $r_i$  = innerer Pfahlradius jeweils in [m]

$z$  = Tiefe in [m] positiv nach unten gerichtet

#### Autoren

---

Dr.-Ing. Jan Lüking

jan.lueking@hochtief.de

HOCHTIEF Engineering GmbH

Consult Infrastructure

Fuhlsbüttler Str. 399, 22309 Hamburg

www.hochtief-engineering.de

Tel.: 040 300321-5450

Dr.-Ing. Patrick Becker

p.becker@kup-geotechnik.de

Kempfert Geotechnik GmbH

Hasenhöhe 128, 22587 Hamburg

www.kup-geotechnik.de

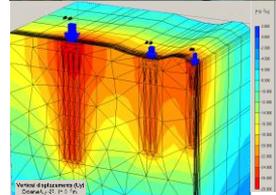
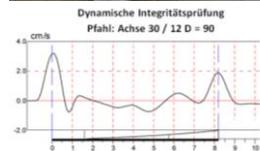
Tel.: 040 6960445-11

# Kempfert + Partner

Geotechnik



- Erkundung und Gründungsberatung
- Planung und Bemessungen von allen Pfahlgründungen
- Entwicklung und Anwendung von Berechnungsverfahren für zyklisch und dynamisch beanspruchte Pfähle
- Analytische und numerische Verformungsprognosen
- Planung, Betreuung und Auswertung von statischen und zyklischen Pfahlprobelastungen
- Überwachung von Pfahlarbeiten
- Dynamische Integritätsprüfungen
- Geotechnische Messungen von Spannungen, Kräften, Verformungen
- Sachverständigengutachten



[www.kup-geotechnik.de](http://www.kup-geotechnik.de)

## Hamburg

Hasenhöhe 128  
22607 Hamburg  
Tel.: (040) 69 60 445-0

## Würzburg

Höchberger Straße 28a  
97082 Würzburg  
Tel.: (09 31) 7 90 39-0

## Konstanz

Max-Stromeyer-Straße 116  
78467 Konstanz  
Tel.: (0 75 31) 59 45-0