

**Ermittlung von empirischen Erfahrungswerten für Pfahlwiderstände
in Abhängigkeit der Baugrundsondierung aus einer neuen
Datenbank für Duktil-Rammpfähle**

Spezialsitzung „Forum für junge Geotechnik-Ingenieure“ am 14.04.2021

Johannes Berndt, M.Sc.

Inhalt

- **Pfahlssystem**
- **Datenbank**
- **Auswertung**
- **Einordnung**
- **Zusammenfassung**

Pfahlsystem

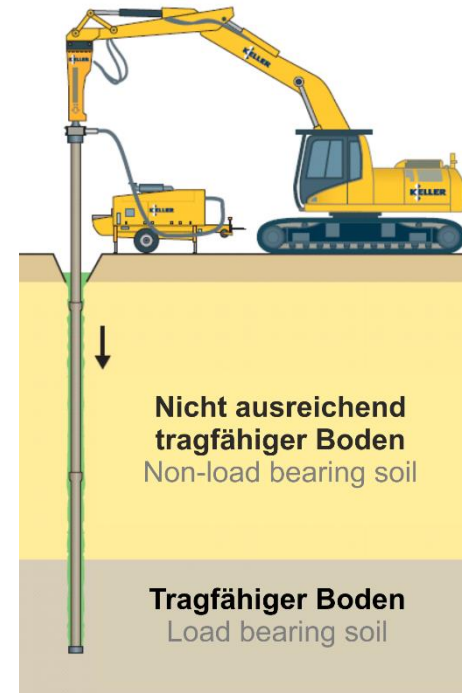
Die Pfähle werden als vollverdrängendes Ramppfahlsystem segmentweise hergestellt. Die Länge eines Rohrschusses beträgt rd. 5 m.

Unverpresster Pfahl

- $D_R = D_{\text{schuh}} = D_P$ (von 98 mm bis 170 mm)
- i.W. als "Spitzendruckpfahl"

Mantelverpresster Pfahl

- $D_R < D_{\text{schuh}} = D_P$ (von 180 mm bis 370 mm)
- "Spitzendruck- und Mantelreibungspfahl"
- Während der Pfahlrammung wird der Pfahlmantel kontinuierlich durch das Pfahlrohr, vom Pfahlfuß zum Pfahlkopf hin verpresst.



(Keller 2015)



(TRM 2019)



Pfahlsystem

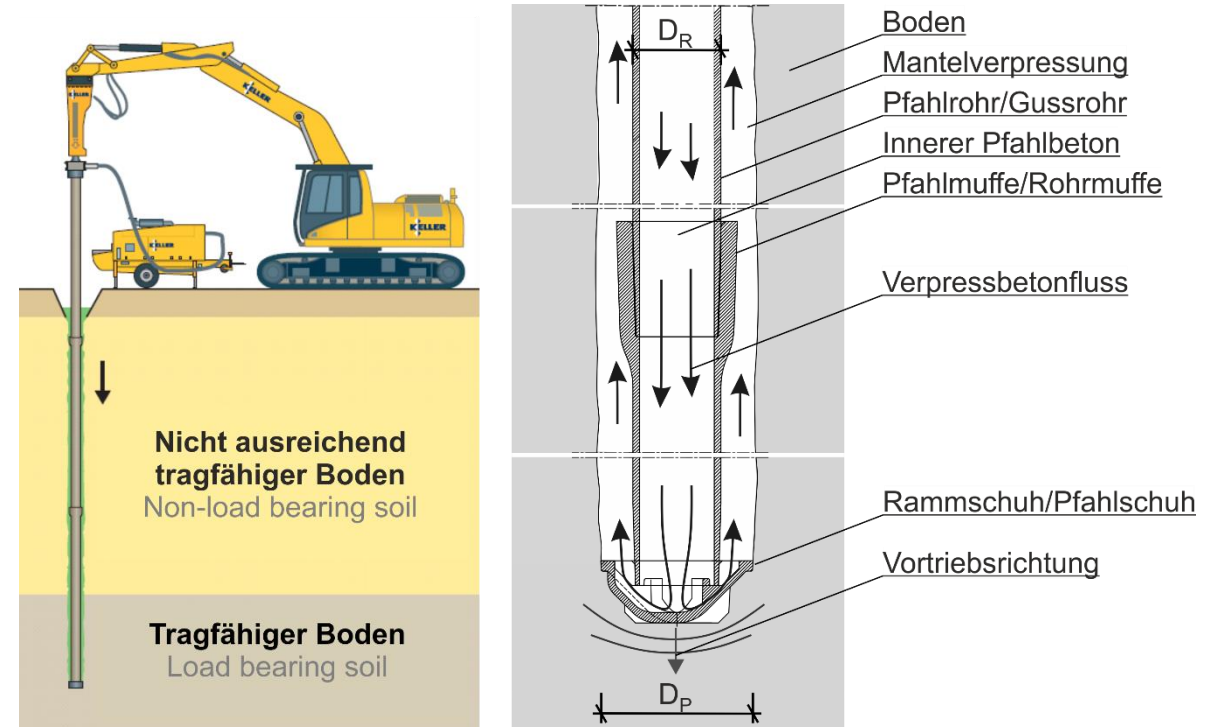
Die Pfähle werden als vollverdrängendes Rammpfahlsystem segmentweise hergestellt. Die Länge eines Rohrschusses beträgt rd. 5 m.

Unverpresster Pfahl

- $D_R = D_{\text{schuh}} = D_P$ (von 98 mm bis 170 mm)
- i.W. als "Spitzendruckpfahl"

Mantelverpresster Pfahl

- $D_R < D_{\text{schuh}} = D_P$ (von 180 mm bis 370 mm)
- "Spitzendruck- und Mantelreibungspfahl"
- Während der Pfahlrammung wird der Pfahlmantel kontinuierlich durch das Pfahlrohr, vom Pfahlfuß zum Pfahlkopf hin verpresst.



(Keller 2015)

Pfahlsystem

- In DE allg. bauaufsichtlich zugelassen.
- Im Ausland teilweise normativ geregelt (z.B. ÖNorm).
- Bzgl. der Herstellung von Duktil-Rammpfählen wird in den abZ außerdem auf die für Verdrängungspfahlsysteme relevanten DIN EN 12699 und DIN SPEC 18538 verwiesen.
- Bemessung der inneren Tragfähigkeit gemäß abZ. ($R_{i,max} = \text{rd. } 2000 \text{ kN}$)
- Bemessung der äußeren Tragfähigkeit i.d.R auf Grundlage von Pfahlprobelastungen.
- Weitere Bezeichnungen: Gusseisenpfahl, Duktilpfahl, HLV-Pfahl.

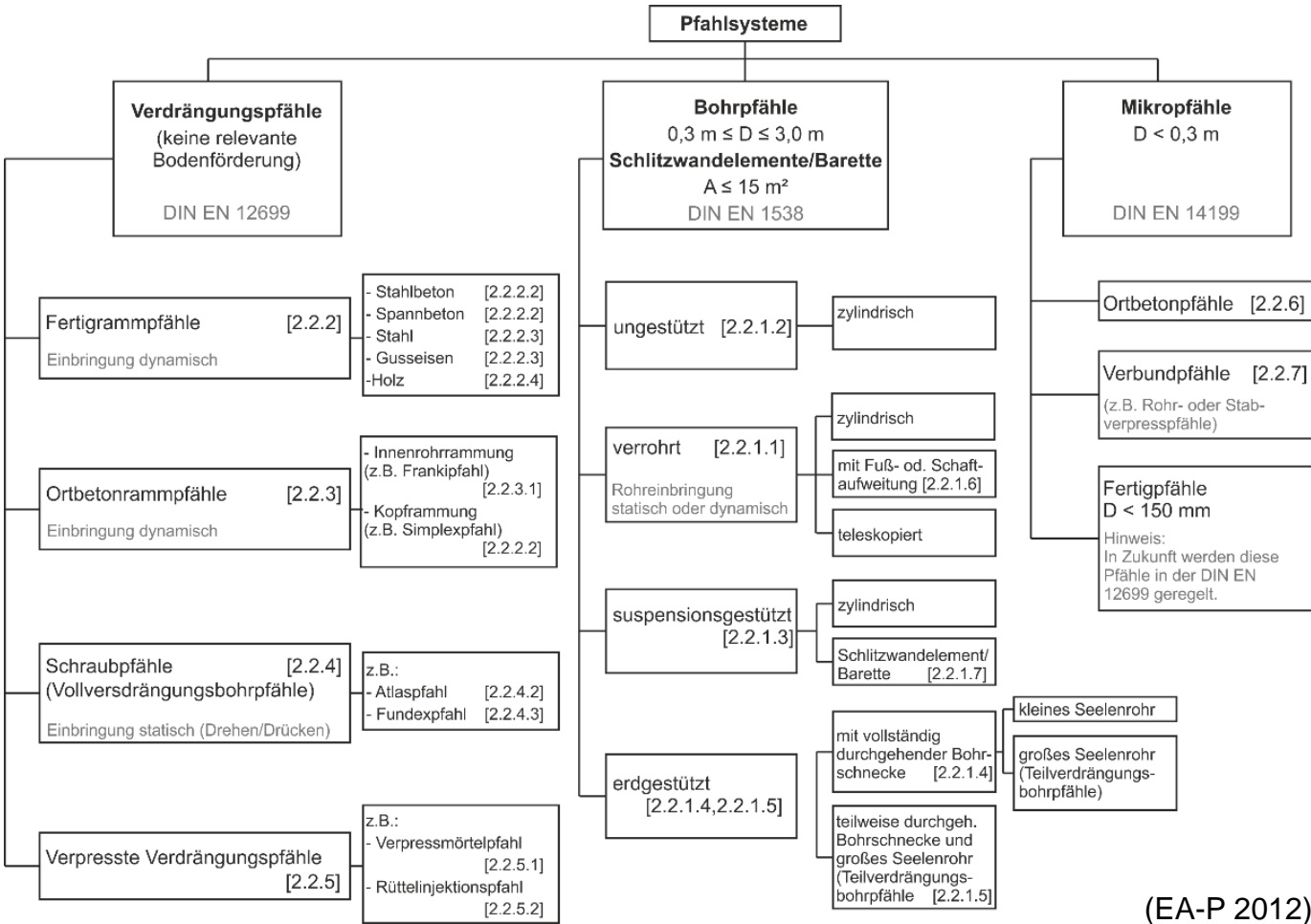
Aktuell gültige allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen in Deutschland

Nr.	Bezeichnung	Anwendungsbereich
Z-34.25-200	Rammpfähle aus duktilem Gusseisenrohren mit innerer Mörtelverfüllung (C20/25) „BAUER DUKTILPFAHL“ (Bauer Spezialtiefbau GmbH)	Pfähle ohne Mantelverpressung (ø118 mm, ø170 mm)
Z-34.25-203	HLV-Pfahl System Stump (Stump-Franki Spezialtiefbau GmbH)	Pfähle ohne Mantelverpressung (ø118 mm, ø170 mm) Pfähle mit Mantelverpressung (ø200 mm, ø250 mm)
Z-34.25-230	TRM DUKTILRAMMPFAHL (TRM Tiroler Rohre GmbH)	Pfähle ohne Mantelverpressung (ø98 mm, ø118 mm, ø170 mm) Pfähle mit Mantelverpressung (ø180 mm, ø220 mm, ø270 mm, ø320 mm, ø370 mm)
Z-34.25-248	vR DUKTUS duktiler Rammpfahl (vR production (DUKTUS) gmbh)	Pfähle ohne Mantelverpressung (ø118 mm, ø170 mm) Pfähle mit Mantelverpressung (ø220 mm, ø270 mm)

Abgerufen unter: https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT_n/vSVA_34.htm; zuletzt geprüft: 15.02.2021

Pfahlsystem

- In DE allg. bauaufsichtlich zugelassen.
- Im Ausland teilweise normativ geregelt (z.B. ÖNorm).
- Bzgl. der Herstellung von Duktill-Rammpfählen wird in den abZ außerdem auf die für Verdrängungspfahlsysteme relevanten DIN EN 12699 und DIN SPEC 18538 verwiesen.
- Bemessung der inneren Tragfähigkeit gemäß abZ. ($R_{i,max} = rd. 2000 \text{ kN}$)
- Bemessung der äußeren Tragfähigkeit i.d.R auf Grundlage von Pfahlprobelbelastungen.
- Weitere Bezeichnungen: Gusseisenpfahl, Duktillpfahl, HLV-Pfahl.



(EA-P 2012)

Datenbank

Zusammenstellung der Informationen von 338 Pfahlprobelbelastungen (391 Datensätze) aus 121 Projekten.

Herstelldaten

- Pfahlgeometrie (z.B. Pfahllänge L_p , Pfahldurchmesser D_p , unverpresst/mantelverpresst).
- Rammprozess (z.B. Digitalisierung Rammzeit-Profil, Typ Schlaghammer).

Baugrundinformationen

- Verfahren der direkten/indirekten Baugrunderkundung.
- Digitalisierung der Sondierungsprofile (391 Datensätze).
- Schichtgrenzen und Zuordnung der Böden nach bindig / nichtbindig, nach Kapitel 3.3 EA-Pfähle.

Pfahlprobelbelastung

- Verfahren der Pfahlprobelbelastung (statisch, statisch-bidirektional, dynamisch).
- Mobilisierungsgrad des Pfahlwiderstands (GZT erreicht / nicht-erreicht).
- Maximale Last bzw. Grenzlast.
- Ggf. getrennte Erfassung von Pfahlmantelwiderstand und Pfahlfußwiderstand
- Bei statischen Pfahlprobelbelastungen: Lastrichtung (Druck/Zug).
- Digitalisierung der Kraft-Verschiebungslinien.

Datenbank

Herstelldaten

Parameter	Einheit	Wert
Geometrische Daten	Mittlere Pfahllänge	[m] 14.36
	Median der Pfahllänge	[m] 12.50
	Summierte Pfahllänge	[m] 4825
	Mittlerer Pfahldurchmesser	[mm] 225.58
	Median des Pfahldurchmessers	[mm] 220.00
Mantelverpressung	Anteil mantelverpresster Pfähle	[%] 69
	Anteil unverpresster Pfähle	[%] 31
Pfahlrammung	Anzahl vorhandener Rammprofile	[-] 156.00

Pfahlprobelastung

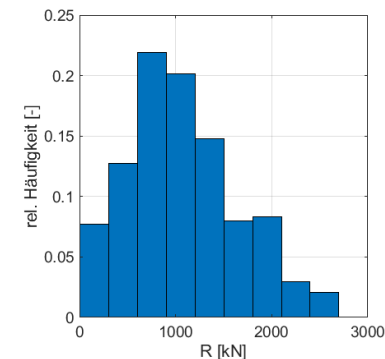
Parameter	Einheit	Wert
Probelastungsverfahren	statisch – konventionell	[%] 47
	statisch - bidirektional	[%] 5
	dynamisch	[%] 47
	ohne Angabe ¹	[%] 1
Statisch – konventionelle PPB	Lastrichtung: Druck	[%] 83
	Lastrichtung: Zug	[%] 17
Grenzzustand der Tragfähigkeit	GZT erreicht	[%] 28
	GZT nicht erreicht oder k.A.	[%] 72

Stand: 19.02.2021, Prozentangaben bezogen auf die Gesamtzahl der Pfahlprobelastungen $n_{PPB}=338$.

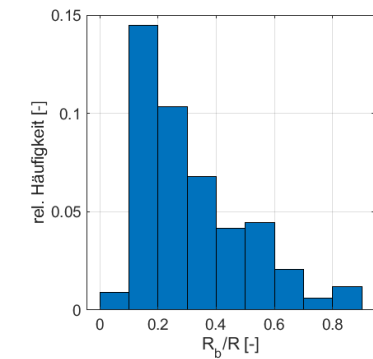
Baugrundsondierungsverfahren

Verfahren	Anzahl	davon:		
		dynamische PPB	statische PPB	RP ¹
CPT	58	12	46	0
DPH	134	53	77	4
SPT	113	40	73	0
DPSH-A	44	43	1	0
Verschiedene bzw. ohne Zuordnung	42	21	21	0
Datensätze (Summe):	391	169	218	4

¹Reaktionspfähle, für die keine Probelastung vorliegt.



a) Gesamtwiderstand (n=338)



b) Anteil Fuß- / Gesamtwiderstand (n=152)

Auswertung

Teilmengen zur Auswertung der Datenbank

- mantelverpresste Duktill-Rammpfähle
- statische Pfahlprobelastungen
- zunächst separate Auswertung der verschiedenen Sondierungsverfahren

Datenmengen unter Berücksichtigung der Verfahren der Baugrundsondierung und der Pfahlprobelastung für mantelverpresste Pfähle

Verfahren	Pfahlprobelastung	
	statische PPB ¹	davon:
		Mantelwiderstand bekannt ²
CPT	44	20
DPH	73	28
SPT	43	10
Summen	160	58

Stand: 19.02.2021. ¹ Im Wesentlichen mantelverpresste Pfähle. Z.T. auch unverpresste, Probepfähle, wenn durch Ausschaltung der Pfahlmantelreibung nur der Fußwiderstand gemessen wurde.

² Statische Zug-Probelastungen, statische Druckprobelastungen bzw. statische bidirektionale Probelastungen mit separater Erfassung des Mantelwiderstands.

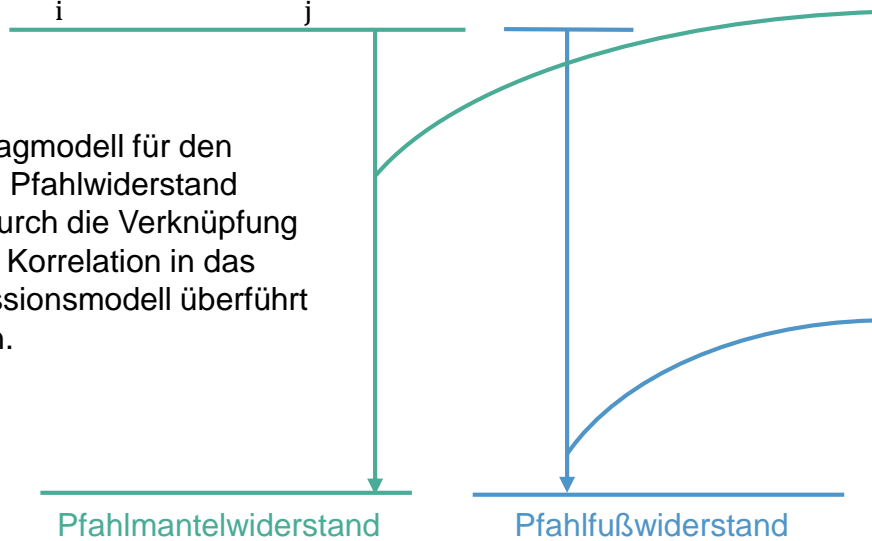
Auswertung

Regressionsanalyse – Axialer Pfahlwiderstand

$$R_{c,cal} = R_{s,cal} + R_{b,cal}$$

$$= \sum_i q_{s,i} \cdot A_{s,i} + \sum_j q_{s,j} \cdot A_{s,j} + q_b \cdot A_b$$

Das Tragmodell für den axialen Pfahlwiderstand kann durch die Verknüpfung mit der Korrelation in das Regressionsmodell überführt werden.

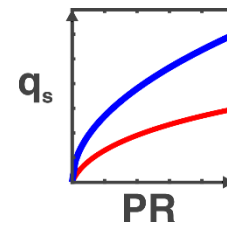


$$R_{c,cal} = a_{nb} \cdot x_{s,nb} + a_{bb} \cdot x_{s,bb} + b_{nb} \cdot x_{b,nb} + b_{bb} \cdot x_{b,bb}$$

(Regressionsmodell zur Beschreibung des Pfahlwiderstands)

Korrelation: Tragfähigkeit vs. Eindringwiderstand

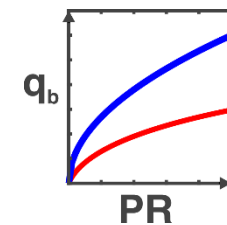
Pfahlmantelreibung vs. Eindringwiderstand (PR)



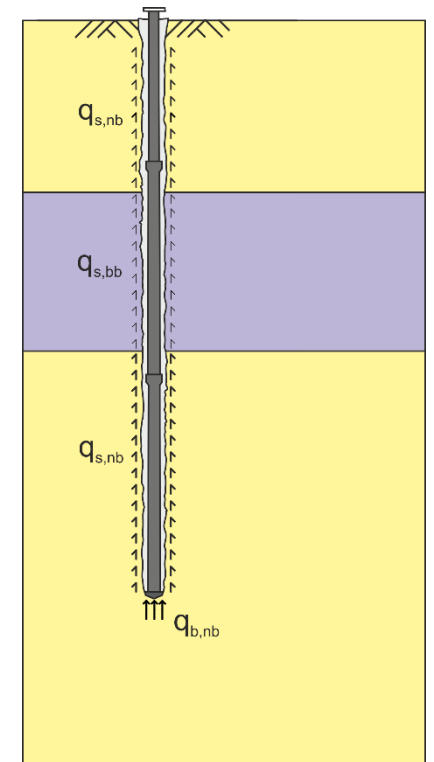
$$q_{s,i}(PR_i) = \sqrt{PR_i} \cdot a_{nb} \quad (\text{nicht bindig})$$

$$q_{s,j}(PR_j) = \sqrt{PR_j} \cdot a_{bb} \quad (\text{bindig})$$

Pfahlspitzendruck vs. Eindringwiderstand (PR)



$$q_b = \begin{cases} q_{b,nb}(PR_i) = \sqrt{PR_{base}} \cdot b_{nb} \\ q_{b,bb}(PR_j) = \sqrt{PR_{base}} \cdot b_{bb} \end{cases}$$



Auswertung

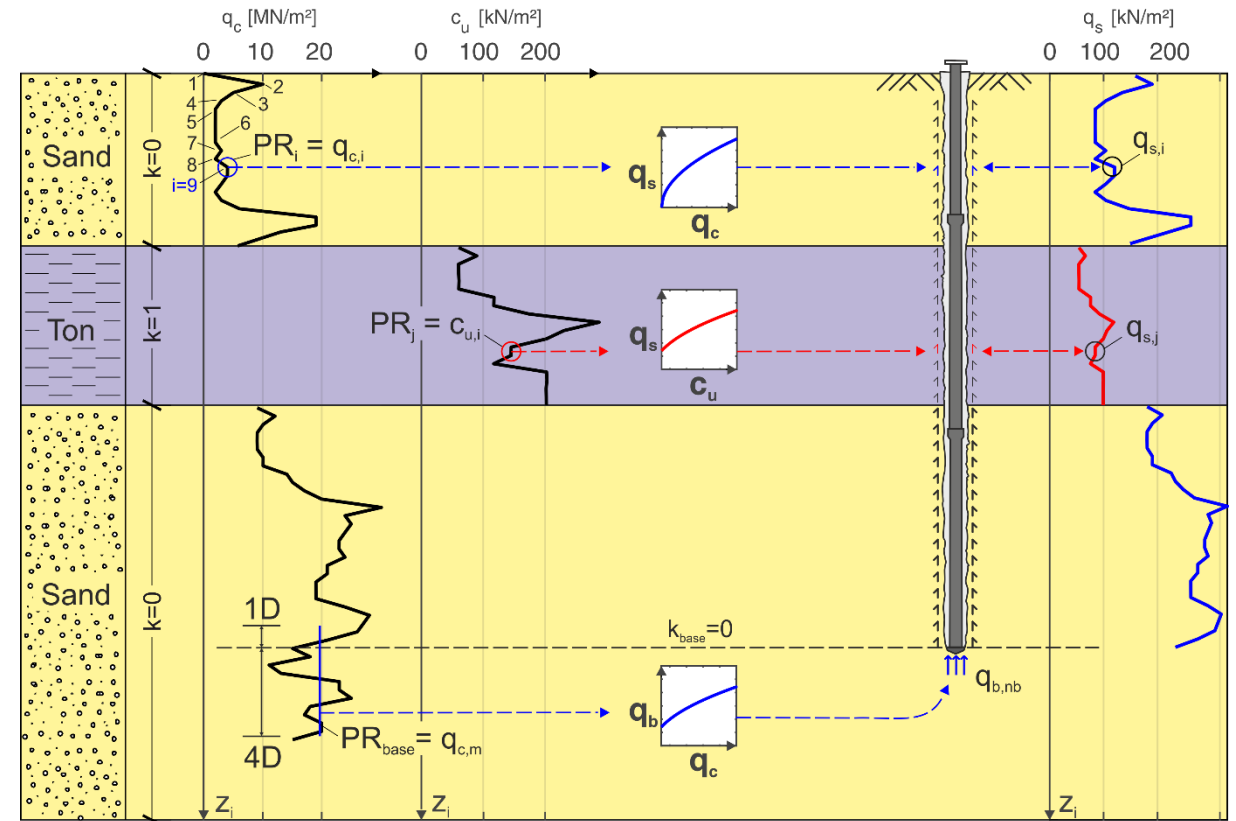
Regressionsanalyse – Regressionsmodell

$$R_{c,cal} = R_{s,cal} + R_{b,cal}$$

$$\begin{aligned} R_{s,cal} &= \sum_i q_{s,i} \cdot A_{s,i} + \sum_j q_{s,j} \cdot A_{s,j} \\ &= \sum_i \sqrt{PR_i} \cdot a_{nb} \cdot A_{s,i} + \sum_j \sqrt{PR_j} \cdot a_{bb} \cdot A_{s,j} \\ &= a_{nb} \cdot \sum_i \sqrt{PR_i} \cdot A_{s,i} + a_{bb} \cdot \sum_j \sqrt{PR_j} \cdot A_{s,j} \\ &= a_{nb} \cdot x_{s,nb} + a_{bb} \cdot x_{s,bb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{b,cal} &= \left((1 - k_{base}) \cdot q_{b,nb} + k_{base} \cdot q_{b,bb} \right) \cdot A_b \\ &= \left((1 - k_{base}) \cdot \sqrt{PR_{base}} \cdot b_{nb} + k_{base} \cdot \sqrt{PR_{base}} \cdot b_{bb} \right) \cdot A_b \\ &= b_{nb} \cdot x_{b,nb} + b_{bb} \cdot x_{b,bb} \end{aligned}$$

$$R_{c,cal} = a_{nb} \cdot x_{s,nb} + a_{bb} \cdot x_{s,bb} + b_{nb} \cdot x_{b,nb} + b_{bb} \cdot x_{b,bb}$$



Auswertung

Regressionsanalyse – Datenbankebene

$$R_{c,cal} = a_{nb} \cdot x_{s,nb} + a_{bb} \cdot x_{s,bb} + b_{nb} \cdot x_{b,nb} + b_{bb} \cdot x_{b,bb}$$

$$\mathbf{R}_{c,cal} = \begin{bmatrix} R_{c,cal,1} \\ R_{c,cal,2} \\ \vdots \\ R_{c,cal,p} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_s = \begin{bmatrix} x_{s,nb,1} & x_{s,bb,1} \\ x_{s,nb,2} & x_{s,bb,2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{s,nb,p} & x_{s,bb,p} \end{bmatrix}, \mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_{nb} \\ a_{bb} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_b = \begin{bmatrix} x_{b,nb,1} & x_{b,bb,1} \\ x_{b,nb,2} & x_{b,bb,2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{b,nb,p} & x_{b,bb,p} \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_{nb} \\ b_{bb} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{c,cal} = \mathbf{X}_b \mathbf{b} + \mathbf{X}_s \mathbf{a} \longrightarrow \mathbf{R}_{c,m} = \mathbf{R}_{c,cal} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

Kriterien

- 1) Mit den Koeffizienten soll näherungsweise das 50%-Quantil der gemessenen Pfahlwiderstände beschrieben werden.

$$|\mu(\Delta\mathbf{R})| \leq 0.05$$

$$\Delta\mathbf{R} = (\mathbf{R}_{c,m} - \mathbf{R}_{c,cal}) / \mathbf{R}_{c,m}$$

$\Delta\mathbf{R}$ Vektor der relativen Abweichung zwischen Modell und Wirklichkeit
 $\mu(\Delta\mathbf{R})$ Mittelwert des Vektors der relativen Abweichung

- 2) Die Quadratsumme der Abweichungen (SSE) der gemessenen und berechneten Pfahlwiderstände soll minimal sein.

$$\text{SSE} = \sum_{p=1}^n (R_{c,m,p} - R_{c,cal,p})^2, \quad \text{SSE} \rightarrow \min$$

$R_{c,m,p}$ gemessener Pfahlwiderstand
 $R_{c,cal,p}$ berechneter Pfahlwiderstand
 n Anzahl der Beobachtungen

Auswertung

Ablauf der Auswertung

Schritte

1) Auswertung des Pfahlmantelwiderstands

→ Bestimmung der Koeffizienten a_{nb} und a_{bb}

$$R_{s,cal} = X_s \mathbf{a}$$

2) Auswertung des Pfahlgesamtwiderstands

→ Anwendung der Koeffizienten a_{nb} und a_{bb} zur Ermittlung des Mantelwiderstands.

→ Bestimmung der Koeffizienten b_{nb} und b_{bb} zur Ermittlung des jeweiligen Fußwiderstands

$$R_{c,cal} = X_b \mathbf{b} + X_s \mathbf{a}$$

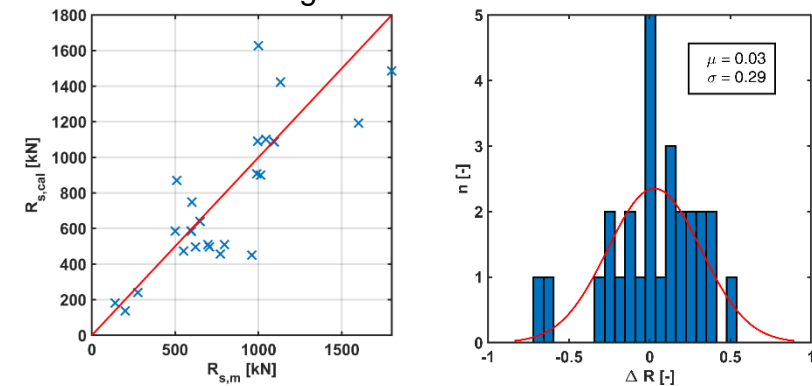
3) Validierung des Modells

→ Anwendung der ermittelten Koeffizienten auf eine Datenmenge aus CPT, DPH und SPT.

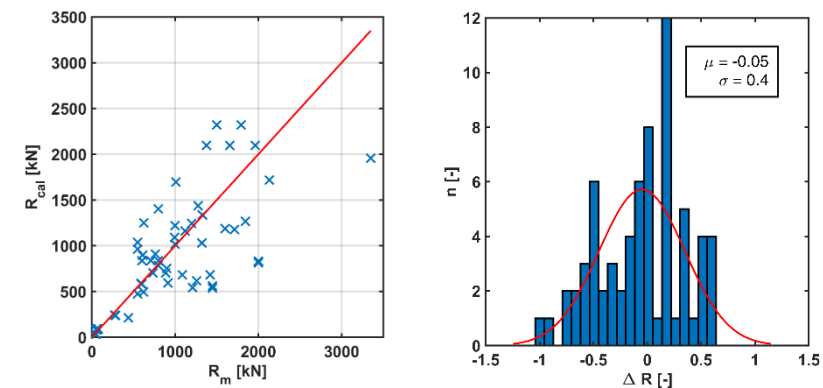
$$R_{c,cal} = X_b \mathbf{b} + X_s \mathbf{a}$$

Beispiel „DPH“

Auswertung des Pfahlmantelwiderstands



Auswertung des Pfahlgesamtwiderstands



Auswertung

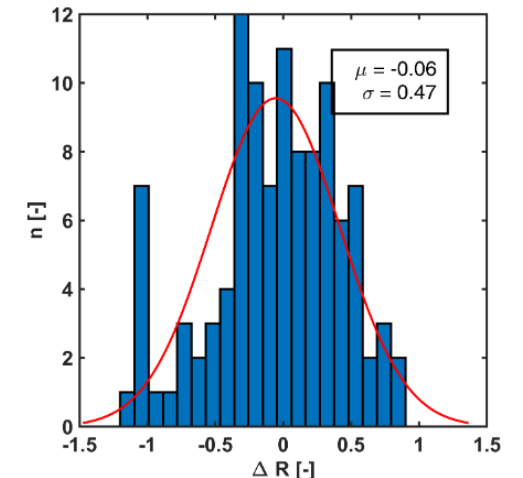
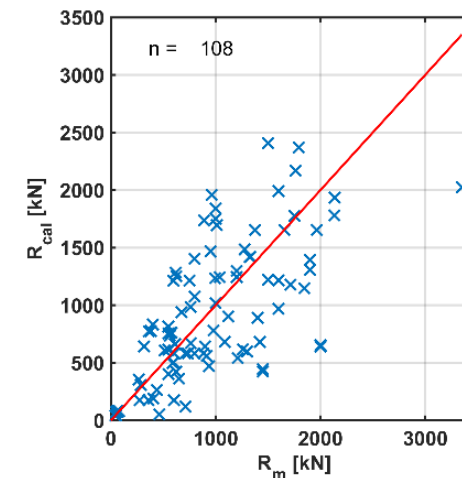
Validierung des Modells

Datensatz	Anz. ²	Koeffizienten					Prognosegütemaße		
		Mantelreibung		Spitzenwiderstand			μ	σ	RMSE
		a_{nb}	a_{bb}	b_{nb}	b_{bb}				
DPHx ¹ /CPTx/SPTx ¹	statisch, extrap. ³	108	7	60	154	1425	-0.06	0.47	437

¹Sondierungsprofile wurden nach q_c (nicht-bindig) und c_u (bindig) transformiert.

²Ohne redundante Pfähle, ohne Ausreißer.

³Pfähle bei denen der GZT nicht erreicht wurde, wurden, falls möglich, extrapoliert.



$$\mathbf{R}_{c,cal} = \mathbf{X}_b \mathbf{b} + \mathbf{X}_s \mathbf{a}$$

$$q_{s,i}(PR_i) = \sqrt{PR_i} \cdot a_{nb} \quad q_b = \begin{cases} q_{b,nb}(PR_i) = \sqrt{PR_{base}} \cdot b_{nb} \\ q_{b,bb}(PR_j) = \sqrt{PR_{base}} \cdot b_{bb} \end{cases}$$

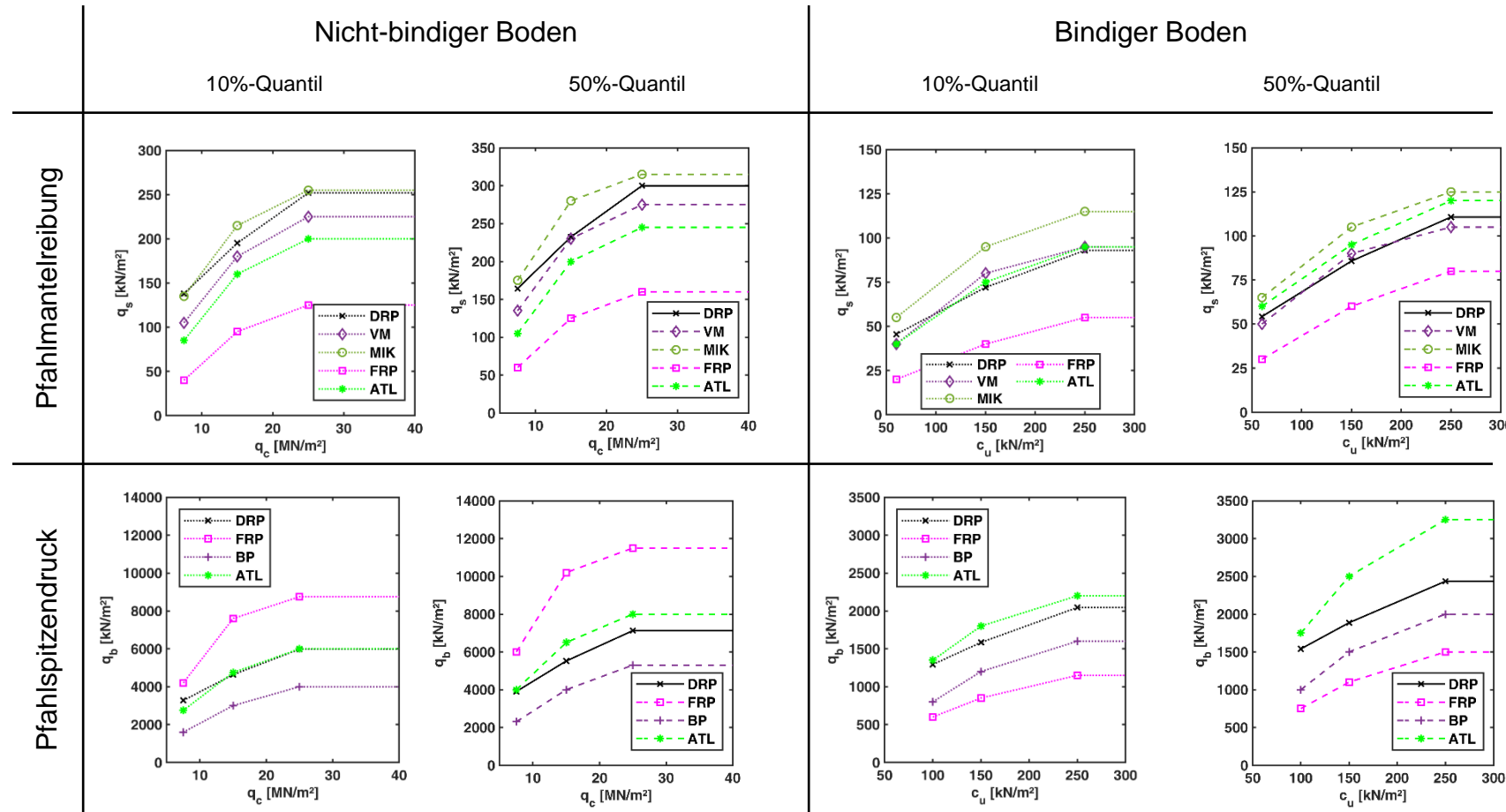
$$q_{s,j}(PR_j) = \sqrt{PR_j} \cdot a_{bb}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{(n-m)}} \text{ mit } n - \text{Anzahl der Beobachtungen, } m - \text{Anzahl der Koeffizienten}$$

Zwischenfazit

- Hohe Anzahl (n=108) an PPB berücksichtigt.
- Regressionskoeffizienten sind geeignet, um 50%-Quantil einer Datenmenge aus CPT, DPH & SPT abzubilden.
- Streuungsmaß der Ergebnisse (RMSE) nur geringfügig höher i.V. zur Auswertung der Pfahlgesamtwiderstände

Einordnung | Vergleich zu Erfahrungswerten der EA-Pfähle



Pfahltyp		Anzahl
Duktill-Rammpfahl	DRP	108*
Verpressmörtelpfahl	VM	22**
Mikropfahl	MIK	9**
Fertigrammpfahl aus Stahlbeton	FRP	121**
Atlaspfahl	ATL	124**
Bohrpfahl	BP	k.a.

* ausschließlich stat. PPB.
 ** aus Kempfert et al. (2007), die Anzahl kann sich auf stat. & dyn. PPB beziehen.

Zusammenfassung

Datenbank

- Informationen aus 338 Pfahlprobelbelastungen an unverpressten und mantelverpressten Duktill-Rammpfählen aus 121 Projekten wurden in 391 Datensätzen zusammengestellt.

Auswertung

- Datensätze mit mantelverpressten statischen Pfahlprobelbelastungen wurden getrennt nach Sondierungsverfahren ausgewertet.
- Regression der Korrelationskoeffizienten für Mantelreibung und Spitzendruck auf Grundlage der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate.
- Ablauf der Auswertung
 - 1) Auswertung des Pfahlmantelwiderstands
 - 2) Auswertung des Pfahlgesamtwidestands
 - 3) Validierung der Korrelation

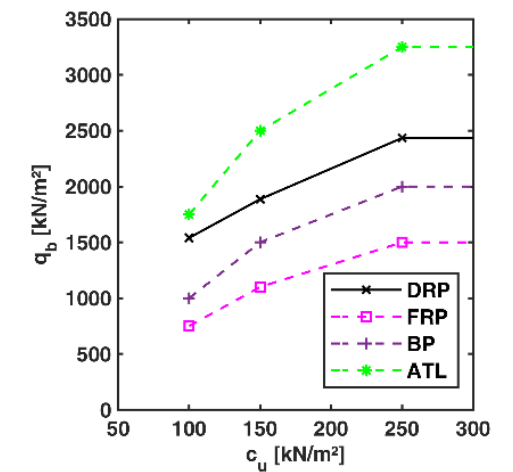
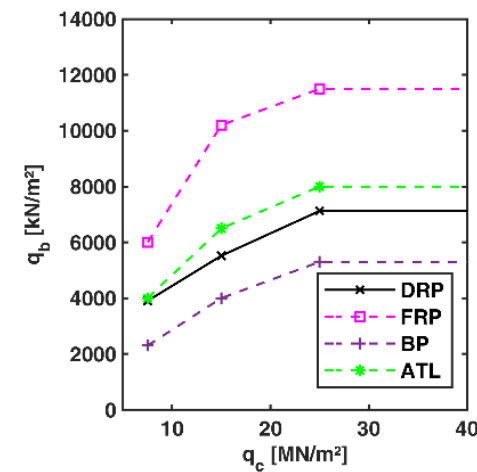
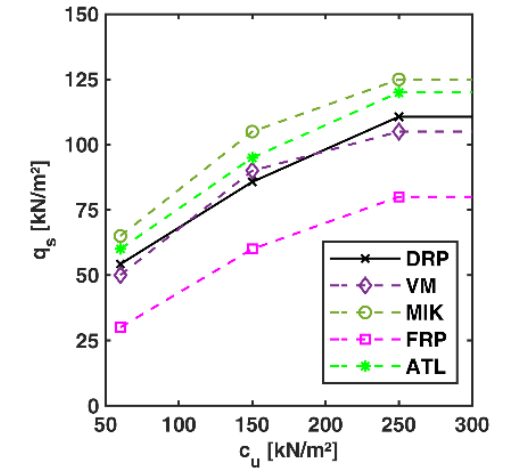
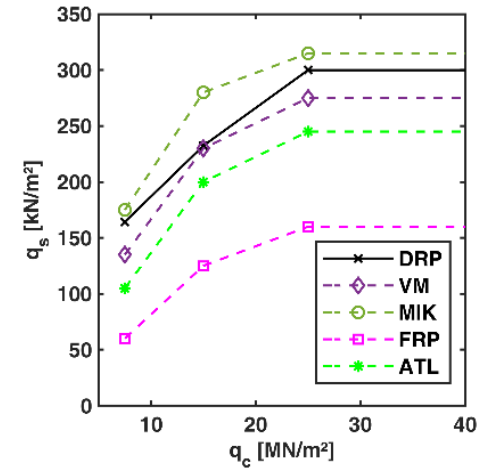
Erfahrungswerte

- Stichprobenumfang (n=108) zur Validierung der Erfahrungswerte ausreichend.
- Ermittelte Korrelation zwischen Spitzendruck der Drucksonde bzw. undrännierter Scherfestigkeit und Pfahlmantelreibung im Bereich der Erfahrungswerte für VM-Pfähle und Mikropfähle.
- Ermittelte Korrelation zwischen Spitzendruck der Drucksonde bzw. undrännierter Scherfestigkeit und Pfahlspitzendruck für nicht-bindige Böden deutlich unter den Erfahrungswerten für Fertigrammpfähle, für bindige Böden zwischen den Erfahrungswerten für Atlaspfähle und Bohrpfähle.

Ausblick

- Auswertung unverpresster Pfähle.
- Untersuchungen zum Pfahleindringwiderstand (Rammzeit).
- Untersuchungen zum Last-Verschiebungsverhalten.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.



Kontakt:

Universität Kassel
 Fachgebiet Geotechnik
 Johannes Berndt, M.Sc. (j.berndt@uni-kassel.de)

Symbole & Referenzen

Symbole

R_c	Druckpfahlwiderstand im GZT
R_t	Zugpfahlwiderstand (Herausziehewiderstand) im GZT
R_s	Pfahlmantelwiderstand
R_b	Pfahlfußwiderstand
q_b	Pfahlspitzenenddruck
A_b	Pfahlfußfläche
$q_{s,i}$	Pfahlmantelreibung in dem nicht-bindigen Schichtinkrement i
$q_{s,j}$	Pfahlmantelreibung in dem bindigen Schichtinkrement j
$A_{s,i}$	Pfahlmantelfläche in dem nicht-bindigen Schichtinkrement i
$A_{s,j}$	Pfahlmantelfläche in dem bindigen Schichtinkrement j
PR_i	Mittlerer Sondierungswiderstand des Schichtinkrements i in nicht-bindigem Boden
PR_j	Mittlerer Sondierungswiderstand des Schichtinkrements j in bindigem Boden
PR_{base}	Mittlerer Sondierungswiderstand im Pfahlfußbereich
a_{nb}	Koeffizient der Pfahlmantelreibung in nicht-bindigem Boden
a_{bb}	Koeffizient der Pfahlmantelreibung in bindigem Boden
b_{nb}	Koeffizient des Pfahlspitzenenddrucks in nicht-bindigem Boden
b_{bb}	Koeffizient des Pfahlspitzenenddrucks in bindigem Boden
k_{base}	Dichotome Dummy-Variable zur Berücksichtigung der Bodenart am Pfahlfuß
$R_{c,cal}$	Vektor der rechnerischen Pfahlwiderstände mit Index p
X_b	Prädiktormatrix für den Pfahlfußwiderstand
b	Koeffizientenvektor für den Pfahlfußwiderstand
X_s	Prädiktormatrix für den Pfahlmantelwiderstand
a	Koeffizientenvektor für den Pfahlmantelwiderstand
$R_{c,m}$	Vektor der gemessenen Pfahlwiderstände
ϵ	Vektor der Residuen

Veröffentlichungen

Kempfert, H.-G., Becker, P. (2007)
 Grundlagen und Ergebnisse der Ableitung von axialen Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten für die EA-Pfähle. Bautechnik 84, 441–449, <https://doi.org/10.1002/bate.200710038>

Empfehlungen, Normen, Richtlinien

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) (2012)
 Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ – EA-P, 2. Auflage.

DIN EN 12699:2015-07
 Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verdrängungspfähle.

DIN SPEC 18538:2012-02
 Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 12699:2001-05, Ausführung spezieller geotechnischer Arbeiten (Spezialtiefbau) – Verdrängungspfähle.

ÖNORM B 2567:2018-08-15
 Pfähle aus duktilem Gusseisen – Anforderungen an die Bauteile, deren Bemessung und Einbau.

Produktinformationen

Keller Holding
 Duktile Rammfähle / Ductile driven piles, Brochure. 72-02D-E, Keller Holding, Offenbach, 2015.

Tiroler Rohre GmbH
 Pfahlsysteme / ductile iron solutions. Tiroler Rohre GmbH, Hall in Tirol, Österreich, 2019. Erreichbar unter: https://trm.at/fileadmin/user_upload/Pfahl_neuesCD_web.pdf, zuletzt geprüft: 12.02.2021.