

**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

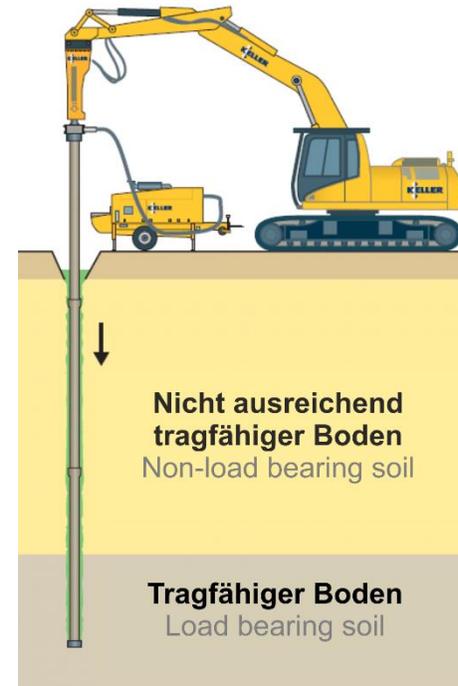
Die Pfähle werden als vollverdrängendes Rammpfahlsystem segmentweise hergestellt. Die Länge eines Rohrschusses beträgt rd. 5 m.

## 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)



(TRM 2019)



# Pfahlsystem

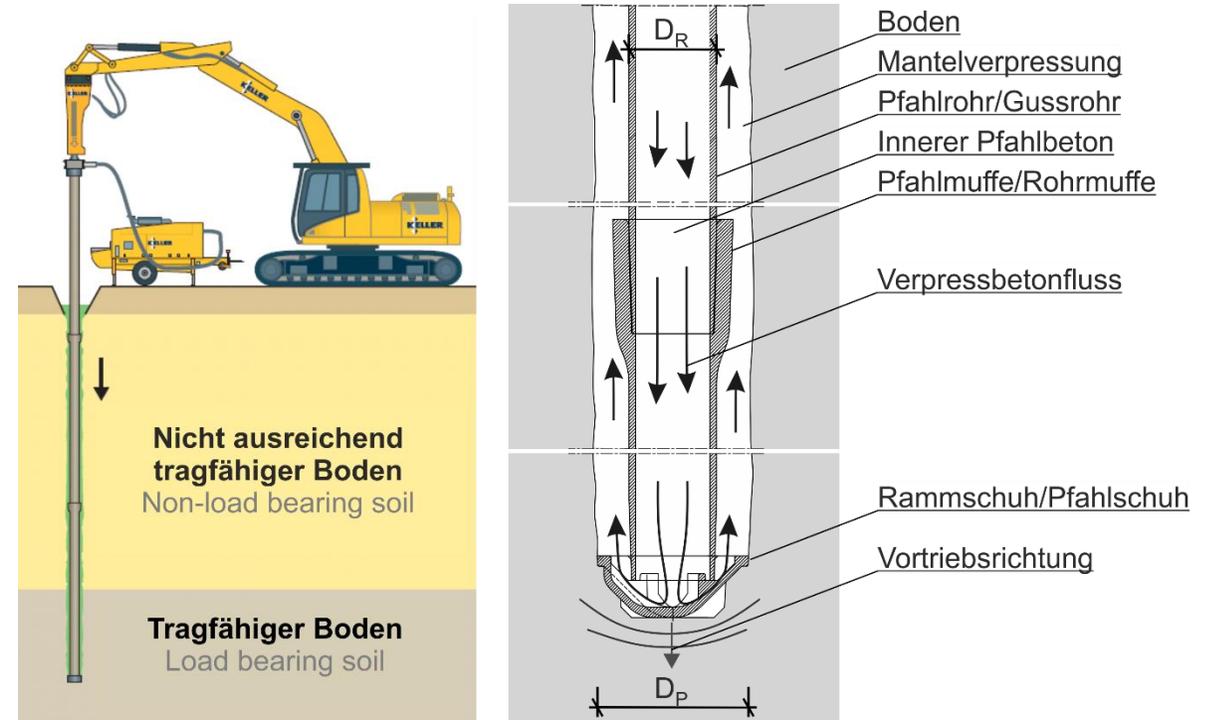
Die Pfähle werden als vollverdrängendes Rammpfahlsystem segmentweise hergestellt. Die Länge eines Rohrschusses beträgt rd. 5 m.

## 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 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. ( $R_{i,max} = \text{rd. } 2000 \text{ kN}$ )
- Bemessung der äußeren Tragfähigkeit i.d.R auf Grundlage von Pfahlprobelastungen.
- Weitere Bezeichnungen: Gusseisenpfahl, Duktillpfahl, HLV-Pfahl.

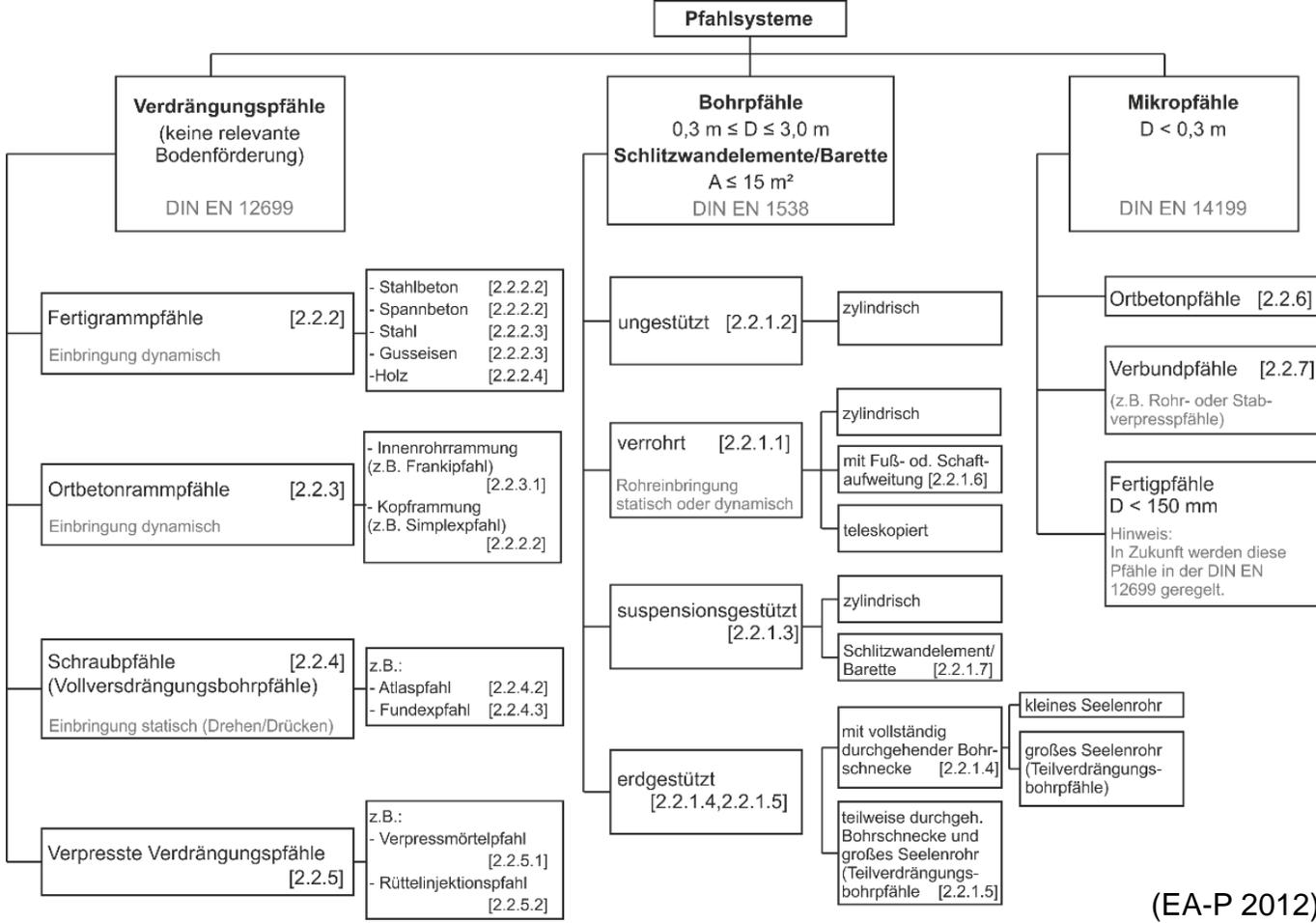
### Aktuell gültige allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen in Deutschland

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](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

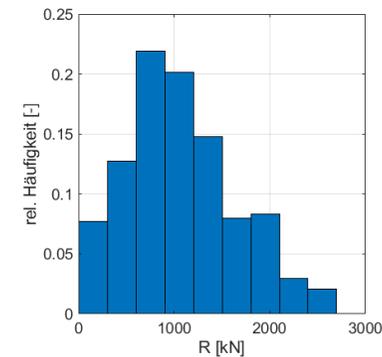
Parameter	Einheit	Wert
Probelastungsverfahren	statisch – konventionell	[%] 47
	statisch - bidirektional	[%] 5
	dynamisch	[%] 47
	ohne Angabe <sup>1</sup>	[%] 1
Statisch – konventionelle PPB	Lastrichtung: Druck	[%] 83
	Lastrichtung: Zug	[%] 17
Grenzzustand der Tragfähigkeit	GZT erreicht	[%] 28
	GZT nicht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

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

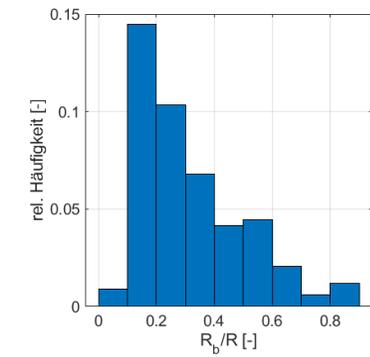
## Baugrundsondierungsverfahren

Verfahren	Anzahl	davon:		
		dynamische PPB	statische PPB	RP <sup>1</sup>
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
<b>Datensätze (Summe):</b>	<b>391</b>	<b>169</b>	<b>218</b>	<b>4</b>

<sup>1</sup>Reaktionspfähle, 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 <sup>1</sup>	davon:
		Mantelwiderstand bekannt <sup>2</sup>
CPT	44	20
DPH	73	28
SPT	43	10
Summen	160	58

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

<sup>2</sup> 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.

Pfahlmantelwiderstand

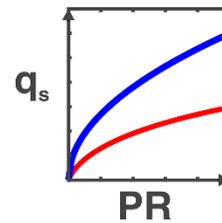
Pfahlfußwiderstand

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

(Regressionsmodell zur Beschreibung des Pfahlwiderstands)

### Korrelation: Tragfähigkeit vs. Eindringwiderstand

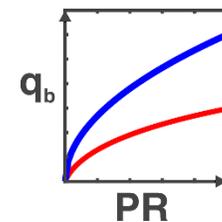
#### Pfahlmantelreibung vs. Eindringwiderstand (PR)



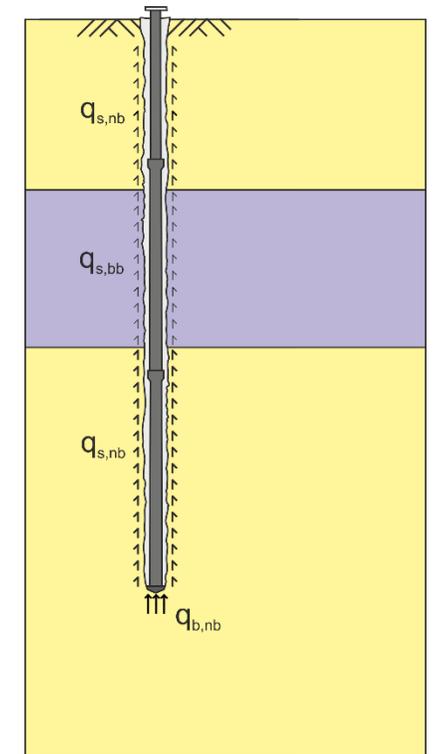
$$q_{s,i}(PR_i) = \sqrt{PR_i} \cdot a_{nb} \quad (\text{nicht bindig})$$

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

#### 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

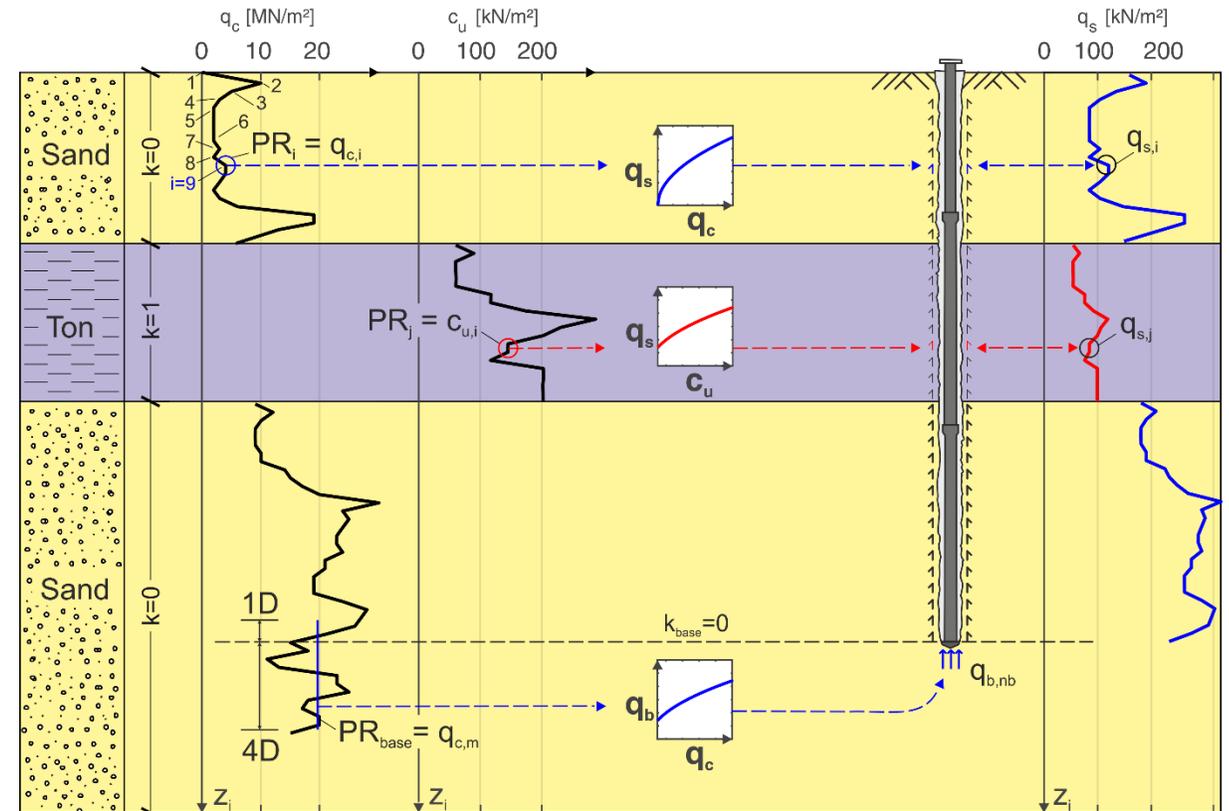
## Regressionsanalyse – Regressionsmodell

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

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

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

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



# 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

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

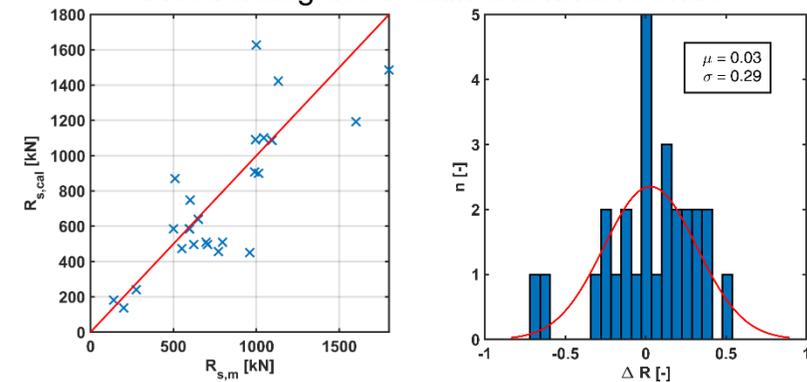
### 3) Validierung des Modells

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

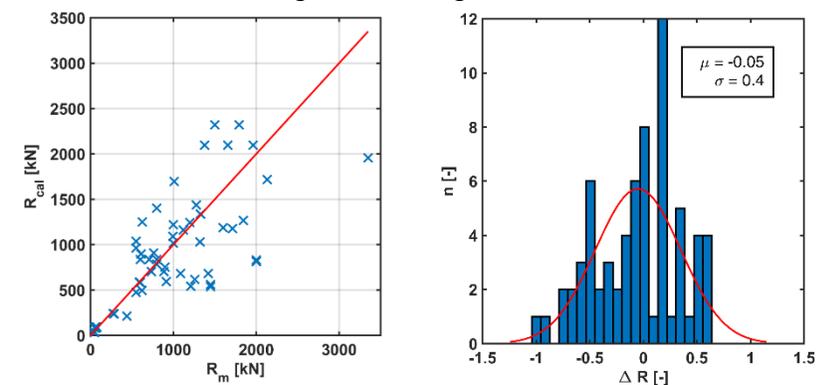
$$R_{c,cal} = X_b \mathbf{b} + X_s \mathbf{a}$$

## Beispiel „DPH“

Auswertung des Pfahlmantelwiderstands



Auswertung des Pfahlgesamtwiderstands



# Auswertung

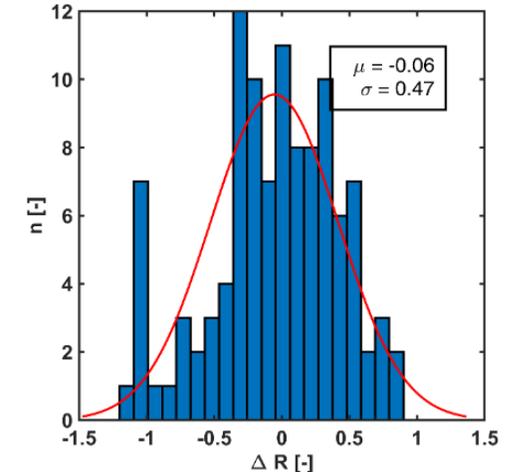
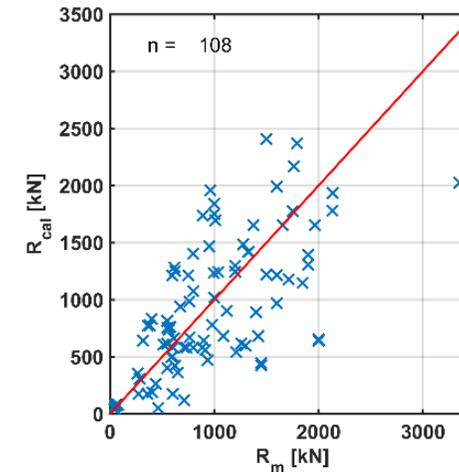
## Validierung des Modells

Datensatz	Anz. <sup>2</sup>	Koeffizienten					Prognosegütemaße		
		Mantelreibung		Spitzenwiderstand			$\mu$	$\sigma$	RMSE
		$a_{nb}$	$a_{bb}$	$b_{nb}$	$b_{bb}$				
DPHx <sup>1</sup> /CPTx/SPTx <sup>1</sup>	statisch, extrap. <sup>3</sup>	108	7	60	154	1425	-0.06	0.47	437

<sup>1</sup>Sondierungsprofile wurden nach  $q_c$  (nicht-bindig) und  $c_u$  (bindig) transformiert.

<sup>2</sup>Ohne redundante Pfähle, ohne Ausreißer.

<sup>3</sup>Pfähle bei denen der GZT nicht erreicht wurde, wurden, falls möglich, extrapoliert.



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

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

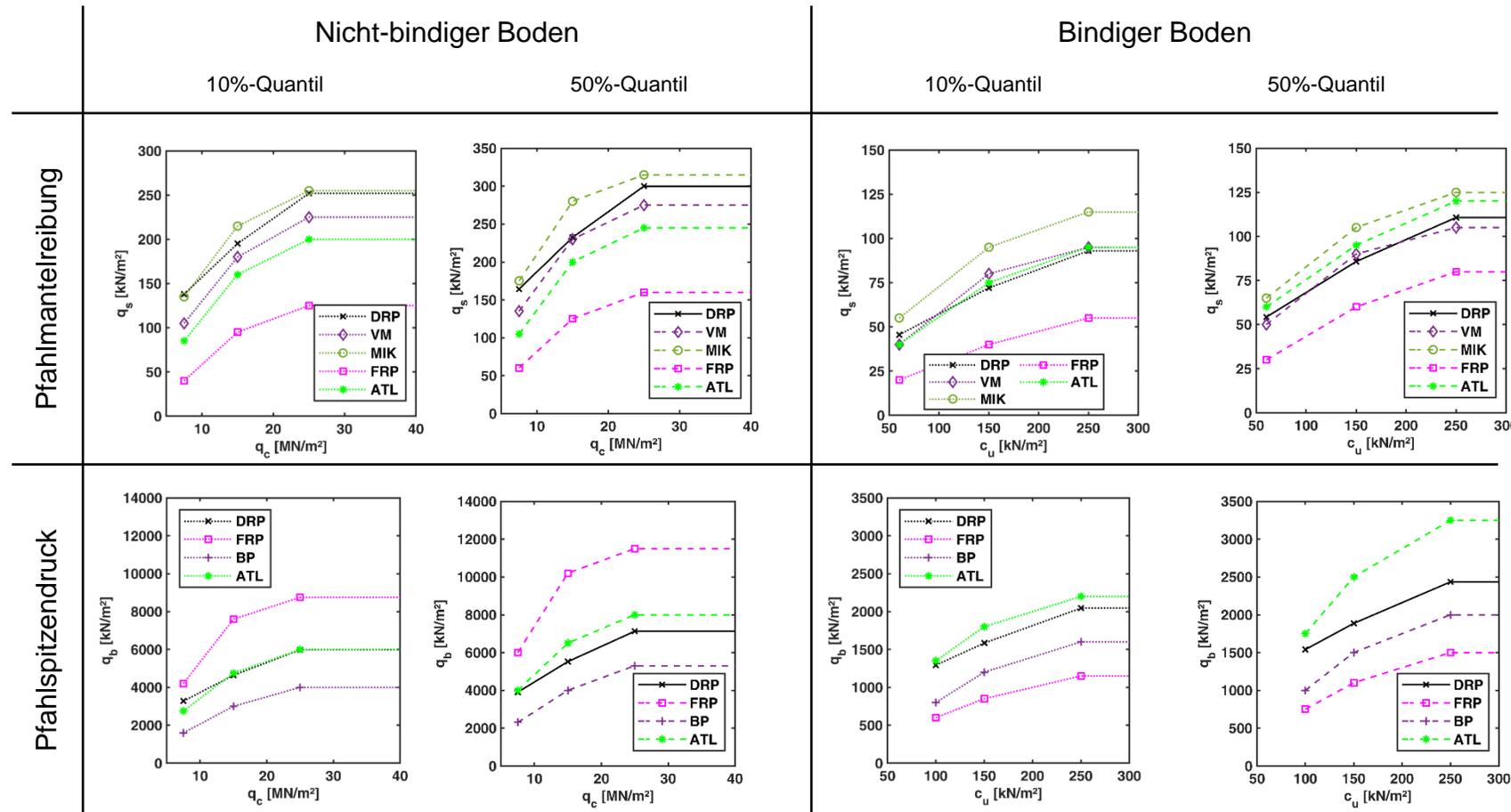
$$q_{s,j}(PR_j) = \sqrt{PR_j} \cdot a_{bb}$$

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

### 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

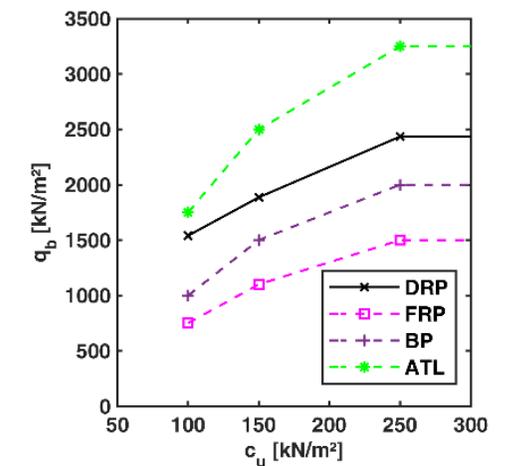
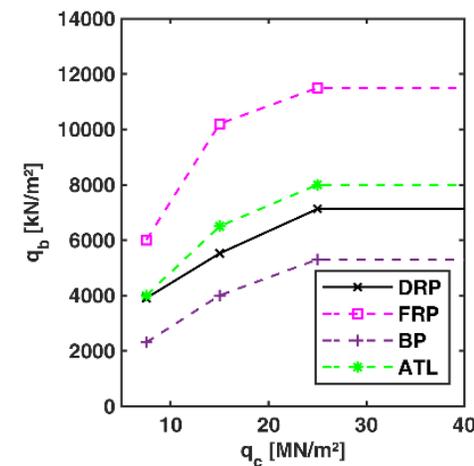
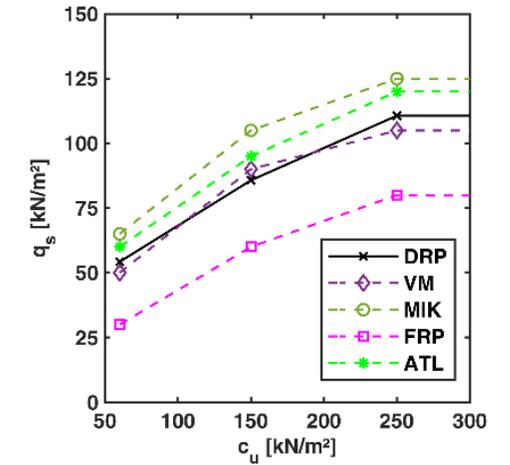
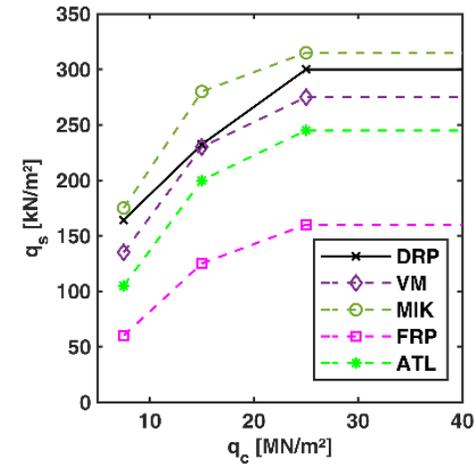
## Erfahrungswerte

- 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
$\epsilon$	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](https://trm.at/fileadmin/user_upload/Pfahl_neuesCD_web.pdf), zuletzt geprüft: 12.02.2021.