



# Tragverhalten von Offshore-Gründungsstrukturen - Erkenntnisse und Herausforderungen -

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

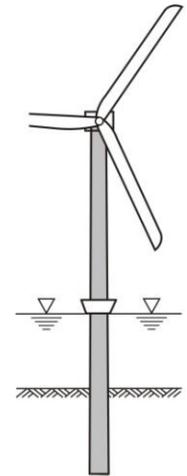


# Gliederung

## Tragverhalten von Monopiles

I Tragverhalten unter monotonen Lasten  
→ neue p-y-Methode

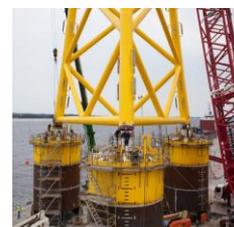
II Verformungsakkumulation unter  
zyklischer Belastung



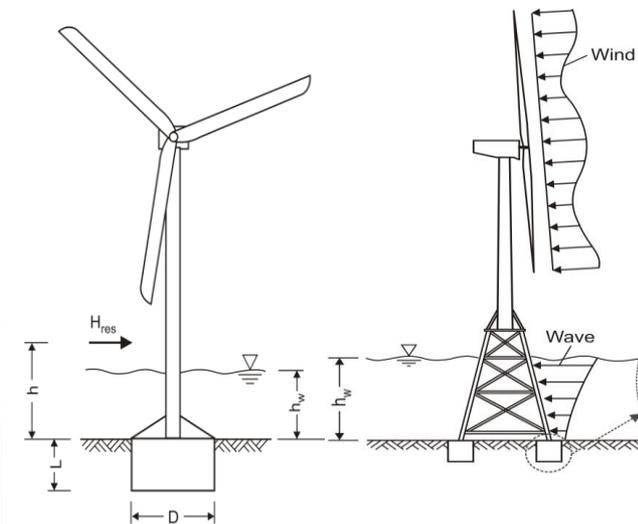
## Tragverhalten von Buckets

III Verhalten von Monopodbuckets  
unter Horizontalbelastung

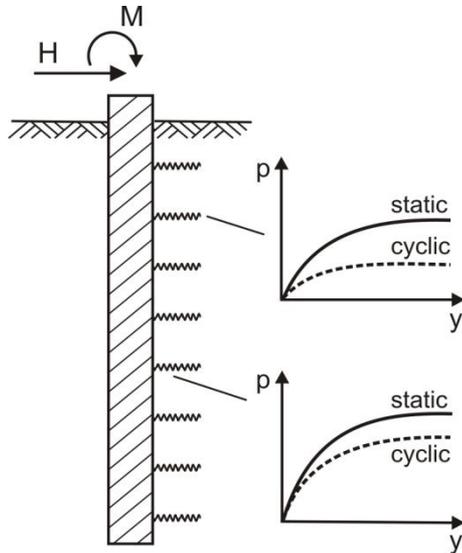
IV Verhalten von Multipod-Buckets  
unter Zugbelastung



Source: DONG Energy



## Berechnungsverfahren für Monopiles: p-y-Methode



- Bettungsmodulverfahren mit nichtlinearen Federkennlinien
- Für Sand entwickelt von Reese&Cox (1974) sowie Murchison & O'Neill (1984)
- Einfach anwendbar, für Pfähle großer Durchmesser aber nicht zutreffend:
  - \* die Verformungen unter Gebrauchslasten werden unterschätzt
  - \* die Eigenfrequenz wird unterschätzt, d.h. die Verformungen unter kleinen Lasten werden überschätzt

Bsp.: p-y-Kurve für Sand (nach API):

$$p = A p_u \tanh\left(\frac{kz}{A p_u} y\right)$$

$$p_{us} = (c_1 z + c_2 D) \gamma' z \quad p_u = \min(p_{us}, p_{ud})$$

$$p_{ud} = c_3 D \gamma' z$$

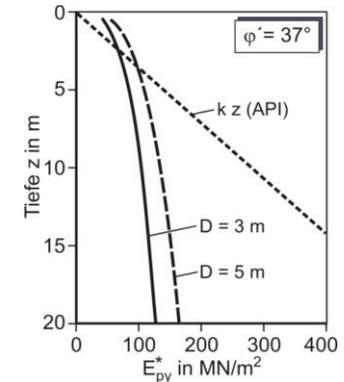
$$A = 3,0 - 0,8z/D \geq 0,9 \quad (\text{static}) \quad A = 0,9 \quad (\text{cyclic})$$

### Ansatz Soerensen et al. (2012): Anfangssteifigkeit reduzieren

$$p = A_{p_u} \tanh\left(\frac{E_{py}^*}{A_{p_u}} y\right)$$

$$E_{py}^* = a \left(\frac{z}{1\text{ m}}\right)^{0,3} \left(\frac{D}{1\text{ m}}\right)^{0,5} \left(\frac{E_s}{1\text{ MN/m}^2}\right)^{0,8}$$

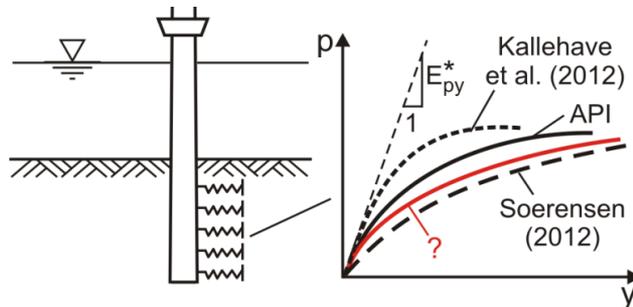
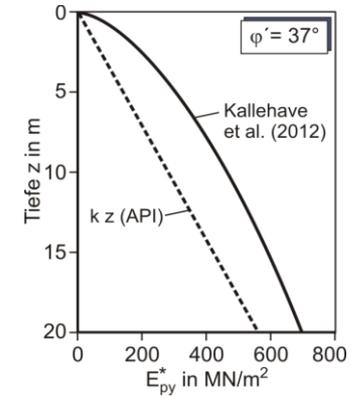
$$a = 1000 \frac{kN}{m^2} \text{ für } \varphi' = 37^\circ$$



### Ansatz Kallehave et al. (2014): Anfangssteifigkeit erhöhen

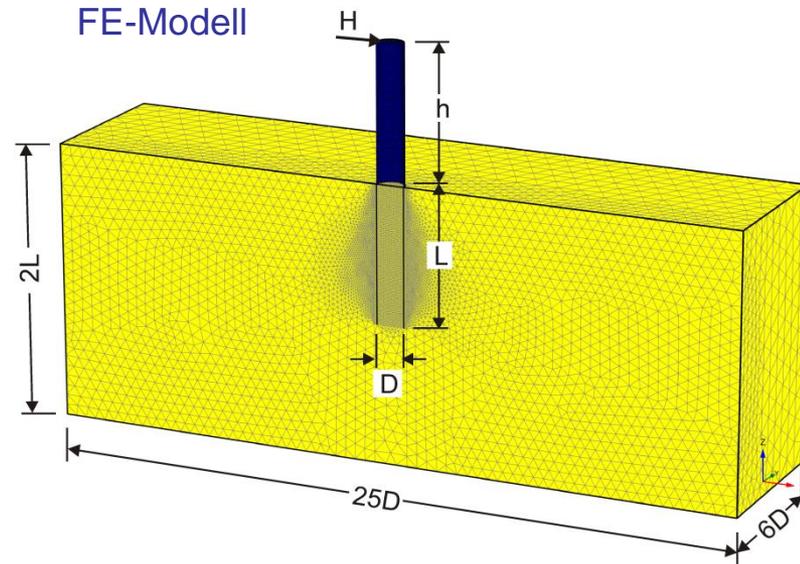
$$E_{py}^* = k z_0 \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0,6} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{0,5}$$

$$z_0 = 2,5\text{ m}, D_0 = 0,61\text{ m}$$

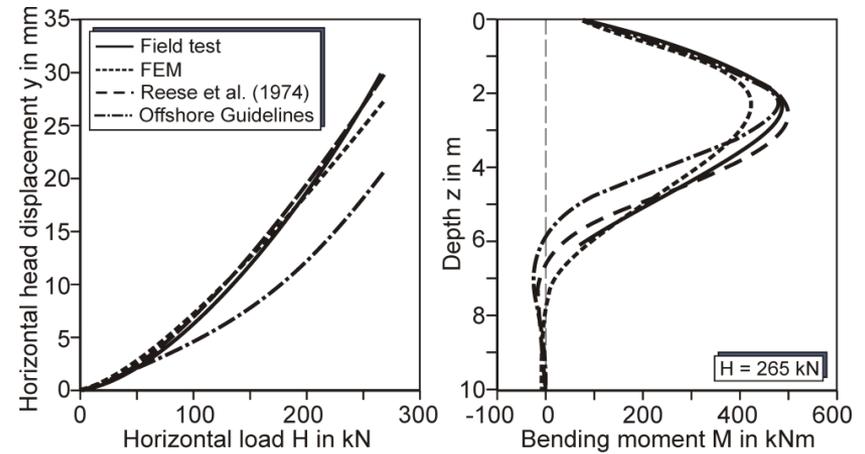


Neuer p-y-Ansatz erforderlich !

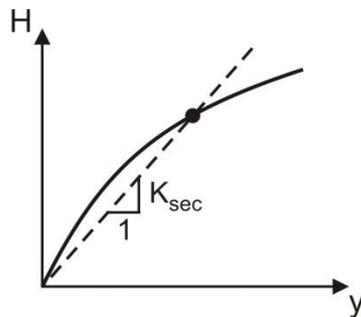
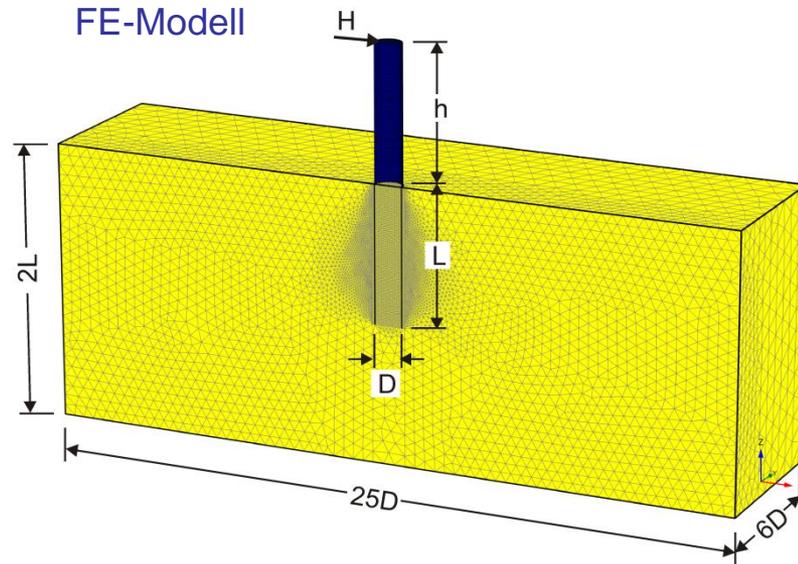
## Numerisches Modell



## Validierung (Nachrechnung Mustang Island Tests)



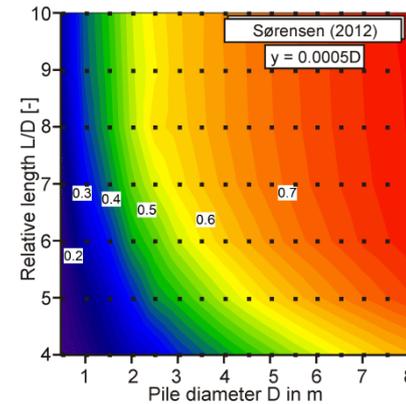
## Numerisches Modell



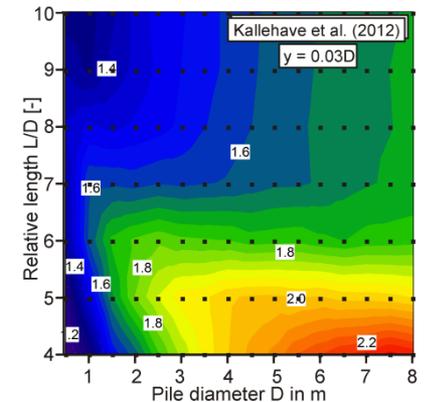
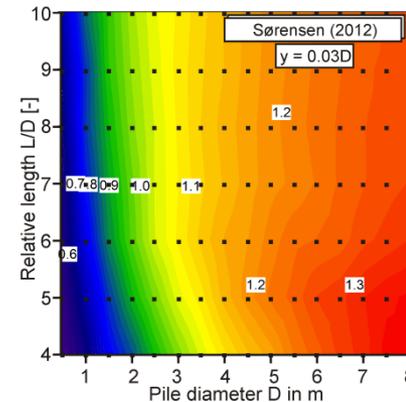
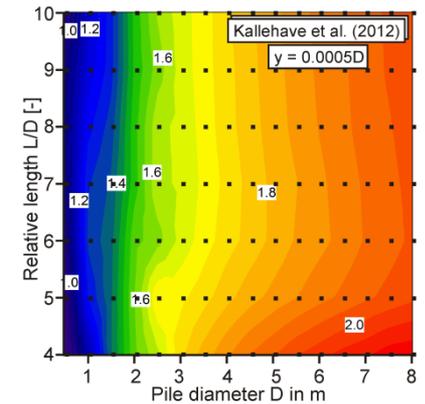
Sekantensteifigkeit  $K_{sec} = H/y = f(y)$

## Vergleich Sekantensteifigkeit H/y Ansatz/FEM

Sørensen-Ansatz



Kallehave-Ansatz

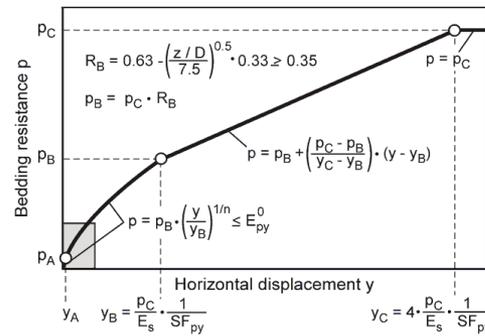


→ Neuer p-y-Ansatz erforderlich!

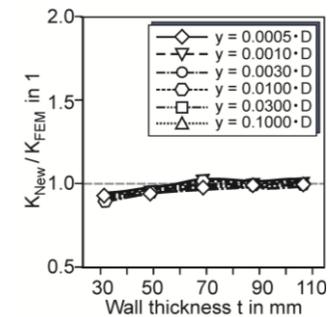
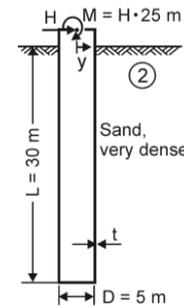
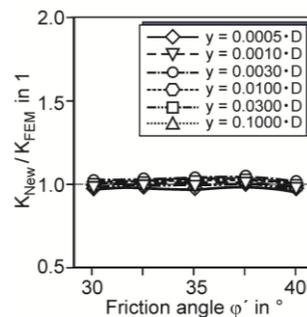
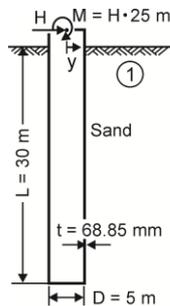
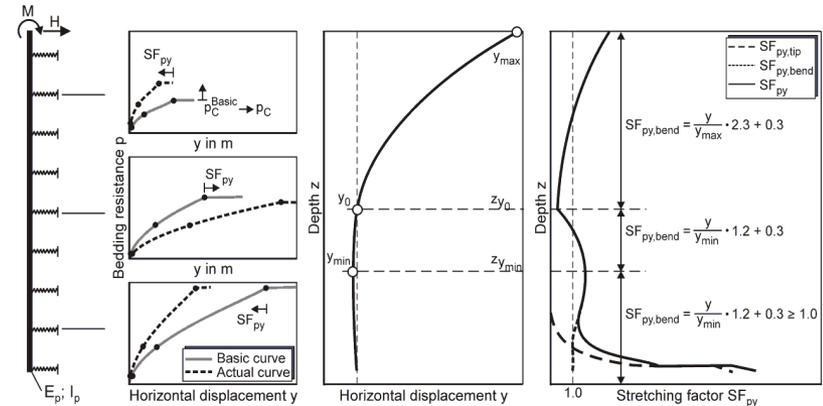
## Neue p-y-Methode für Pfähle in Sand

Eingabeparameter:  
 $\gamma^t, \varphi^t, E_s, E_{s0}$

Basiskurve:



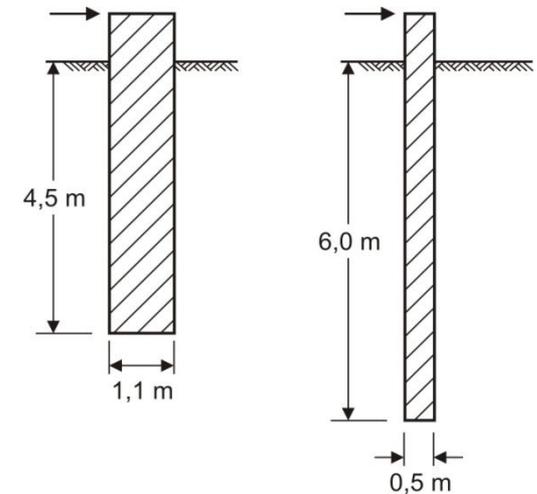
Iterative Anpassung an Biegelinie:



Thieken, K., Achmus, M. and Lemke, K. (2015):  
“A new static p-y approach for piles with arbitrary dimensions in sand”, geotechnik 38.

## Herausforderung: Validierung

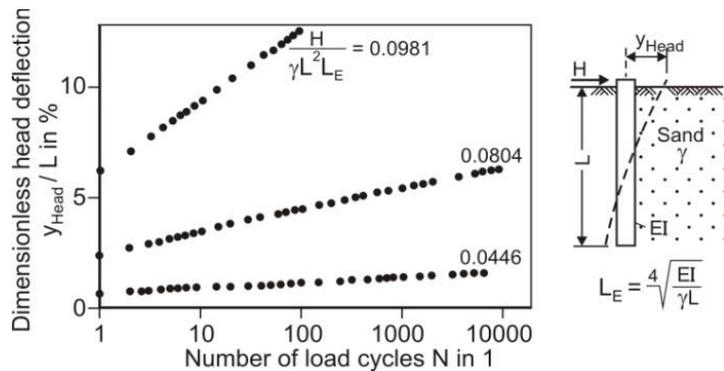
Möglichst großmaßstäbliche Versuche! → TTH



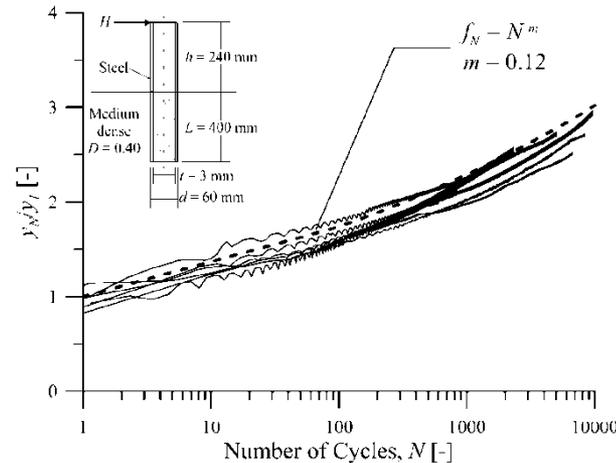
Monotone und zyklische Belastung!

## Verhalten von Pfählen unter zyklischer Horizontallast

Ergebnisse von Hettler (1981)



Ergebnisse von Peralta & Achmus (2010)



Verformungsakkumulation:  $y_N = y_1 f_N(N)$

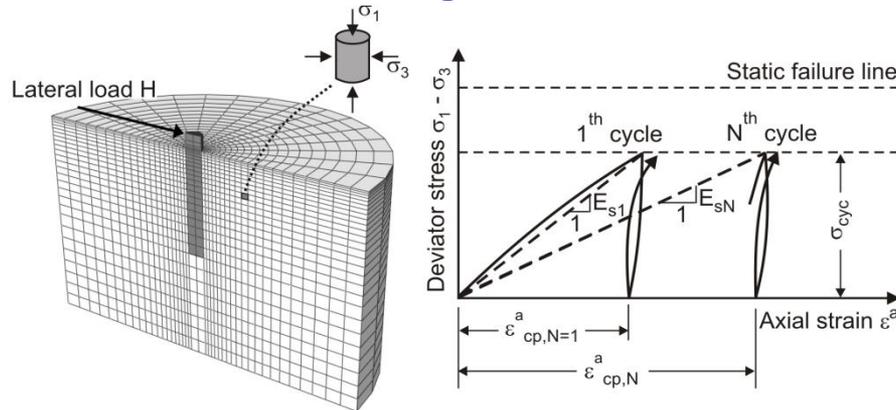
$$f_N = N^m$$

$$f_N = 1 + t \times \ln N$$

Wovon hängen  $m$  /  $t$  in welcher Weise ab?

## SDM - Stiffness Degradation Method

Idee: Akkumulation von Dehnungen im Elementversuch werden als Steifigkeitsreduktion interpretiert



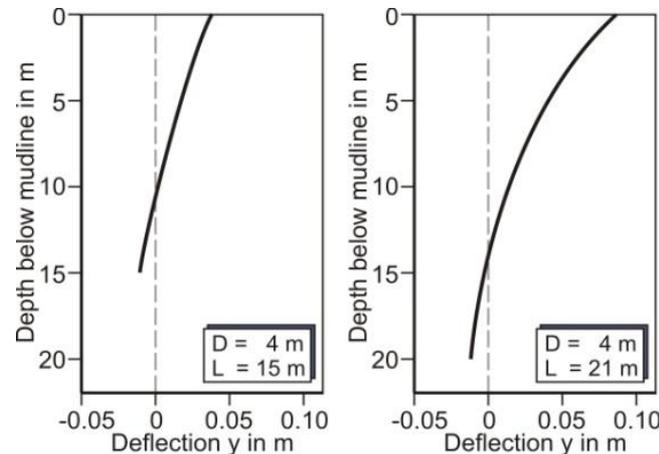
$$\frac{E_{sN}}{E_{s1}} \cong \frac{\varepsilon_{cp,N=1}^a}{\varepsilon_{cp,N}^a}$$

$$\frac{E_{sN}}{E_{s1}} = \frac{\varepsilon_{cp,N=1}^a}{\varepsilon_{cp,N}^a} = N^{-b_1(X)^{b_2}}$$

$$X = \frac{\sigma_{1,cyc}}{\sigma_{1,sf}}$$

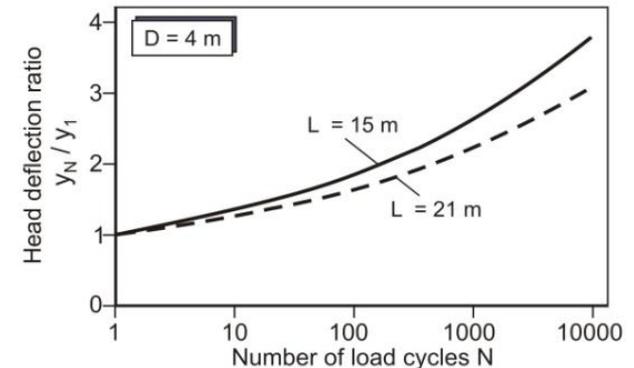
### Ergebnisse:

#### Statische Biegelinien:



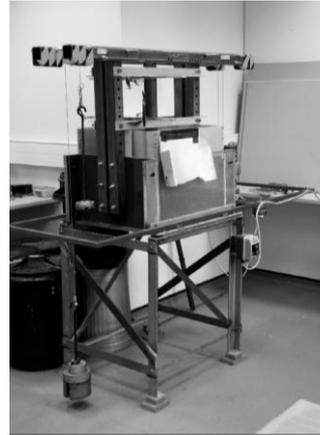
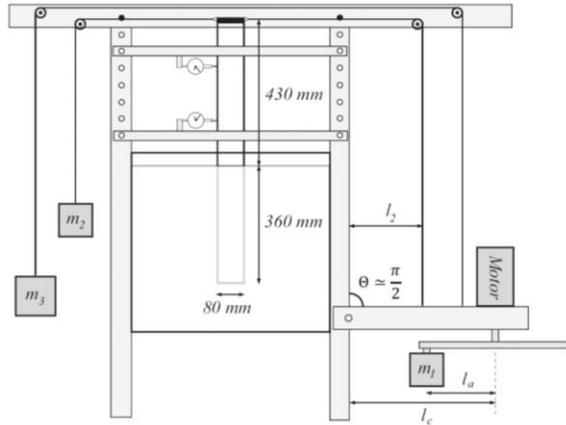
Monopile D=4m  
L=15/21m  
Lasten:  
Hebelarm 37.9m  
H = 40% H<sub>ult</sub>

#### Zyklisches Tragverhalten:

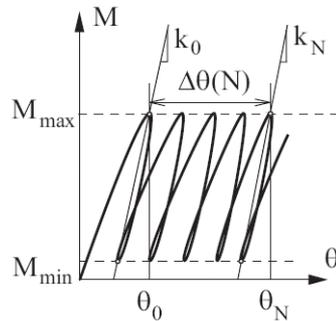
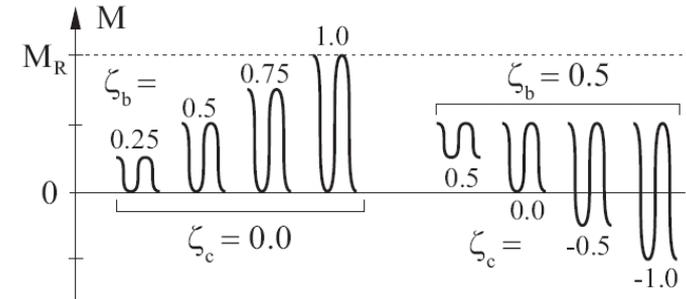


$$f_N = N^m \quad \text{mit } m=0,145 \text{ (L=15m)} \\ \text{und } m=0,123 \text{ (L=21m)}$$

## Allgemeine Lasten (Schwell- und Wechsellast) – Ergebnisse von LeBlanc (2010)



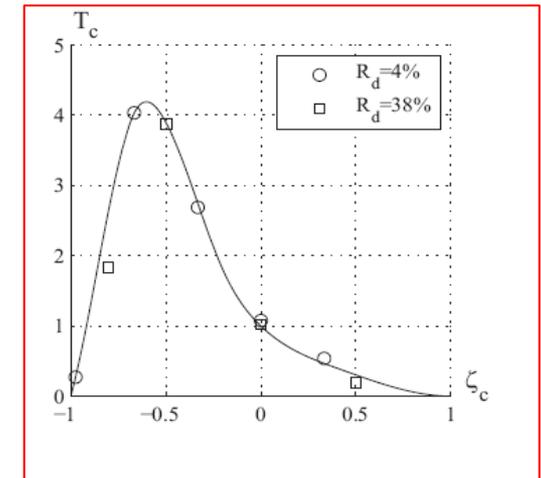
$$\zeta_b = \frac{M_{max}}{M_R} \quad \zeta_c = \frac{M_{min}}{M_{max}}$$



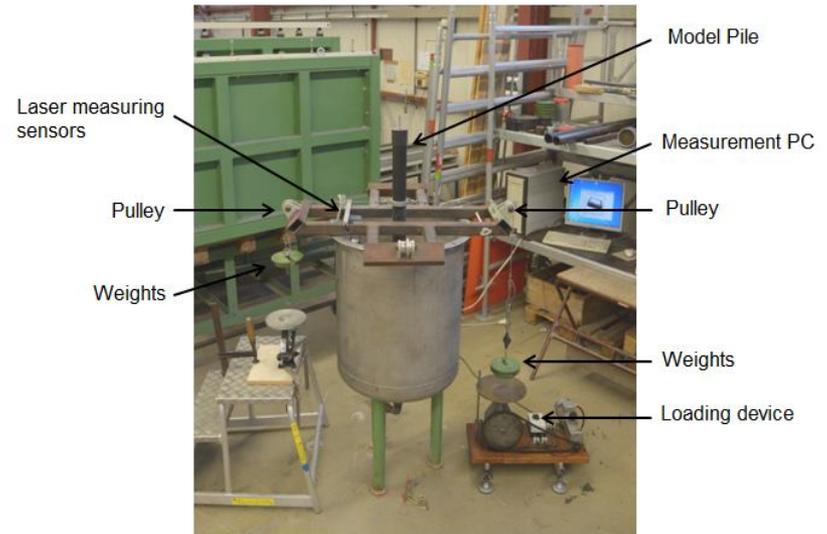
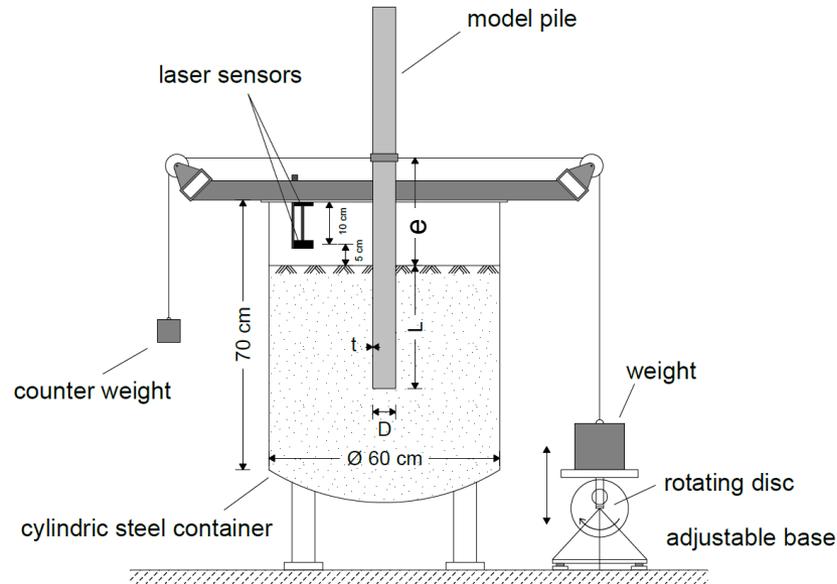
$$\Delta\theta_N = \theta_0 T_b T_c N^\alpha$$

$\theta_0$ ,  $T_b$  und  $\alpha$  aus SDM-Berechnung

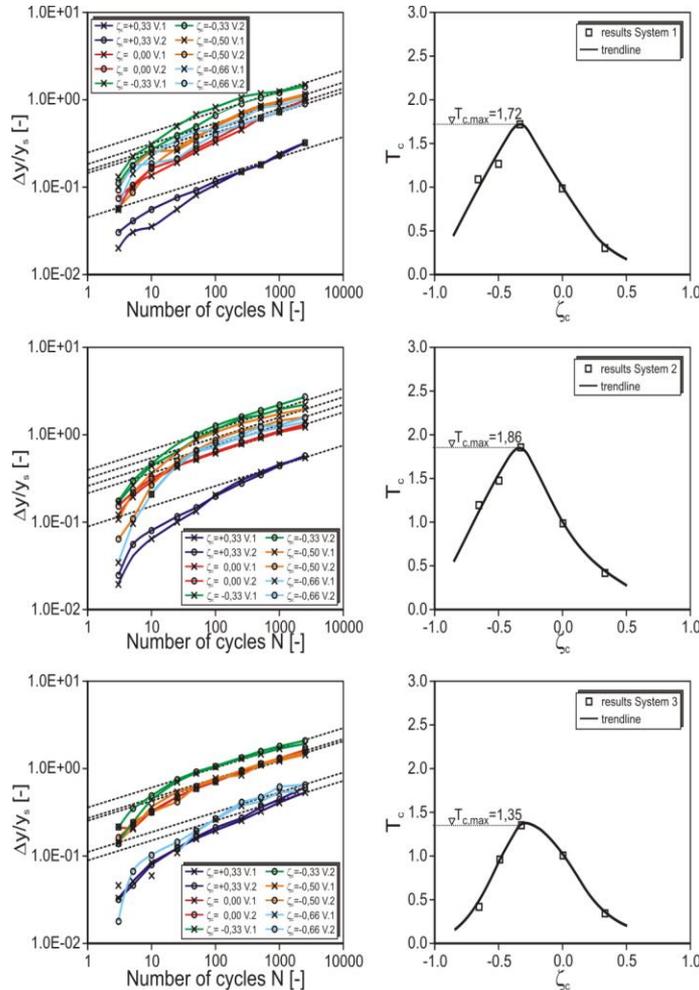
Mit bekannter  $T_c$ -Funktion kann für beliebige Lastspektren die bleibende Schiefstellung berechnet werden



## Modellversuche am IGtH mit Schwell- und Wechsellasten



- 4 Systeme (3x starr, 1x biegeweich)
- Für jedes System monotone und zyklische Versuche
- Zyklische Versuche:  $N = 2500$  mit  $\zeta_b = H_{\max}/H_{\text{ult}} = 0,3$  und variablen  $\zeta_c$
- Variation des Hebelarms  $e$



## Ergebnisse für starre Pfähle:

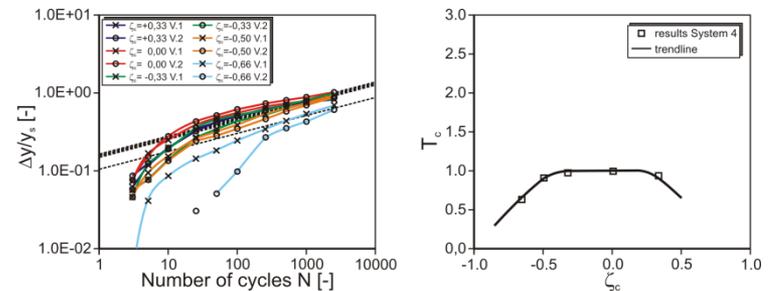
System 1: mitteldichter Sand,  $e/L = 0,71$

System 2: dichter Sand,  $e/L = 0,71$

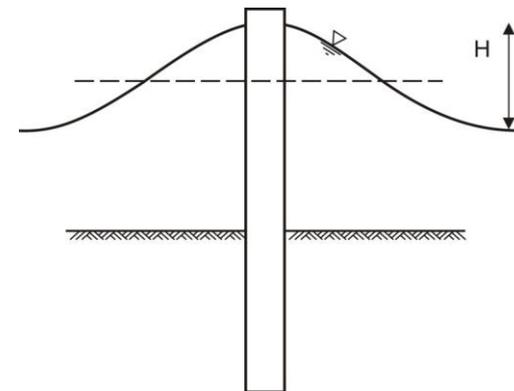
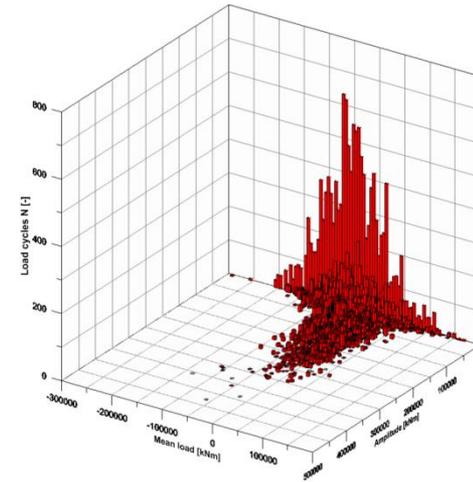
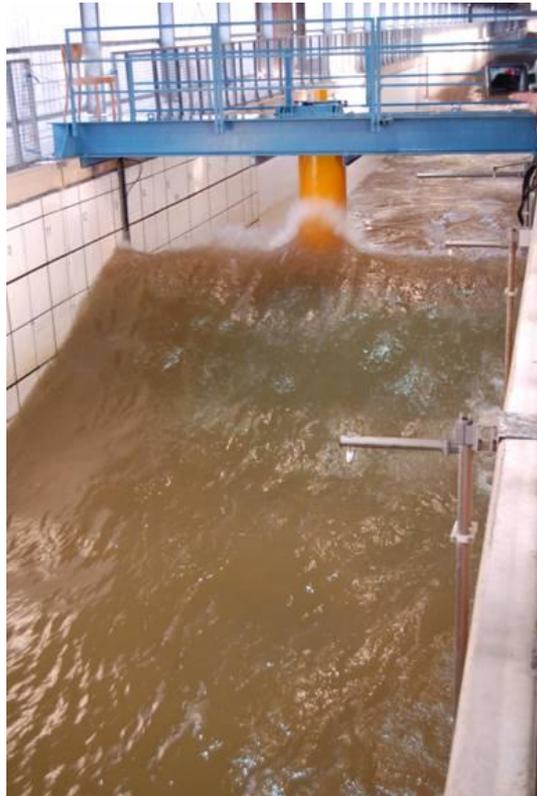
System 3: mitteldichter Sand,  $e/L = 0,36$

→ Ähnliche Form der  $T_c$ -Funktionen  
→  $T_{c,max}$  offenbar abhängig von  $e/L$   
(LeBlanc:  $e/L = 1,2$ )

## Ergebnisse für biegeweichen Pfahl:

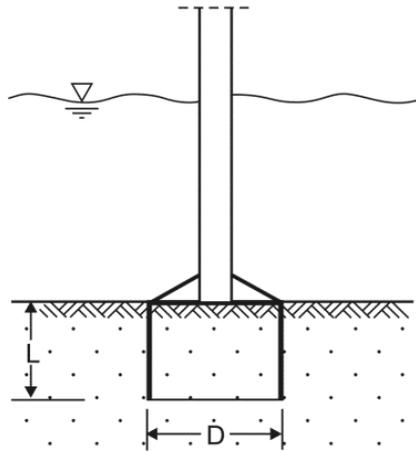


## Möglicher Versuchsaufbau im GWK mit Tieftteil

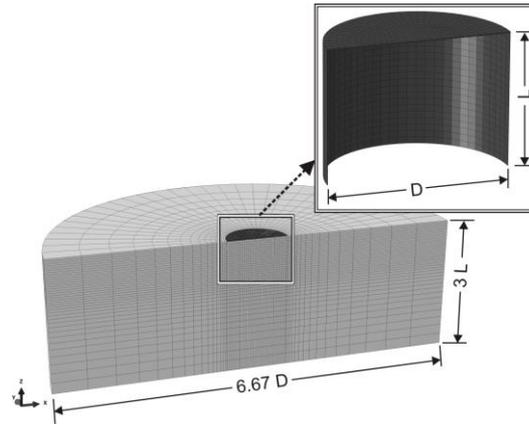


## Monopod-Bucket

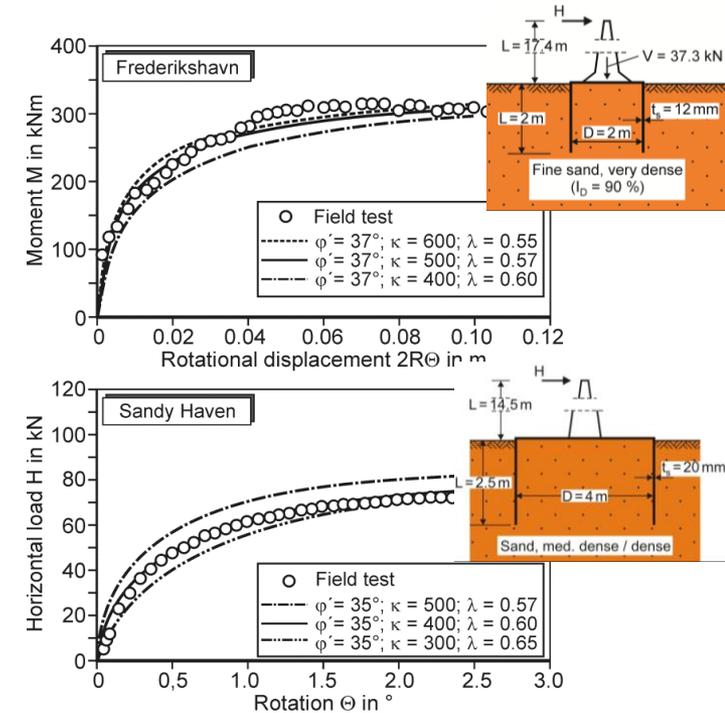
System



FE-Modell



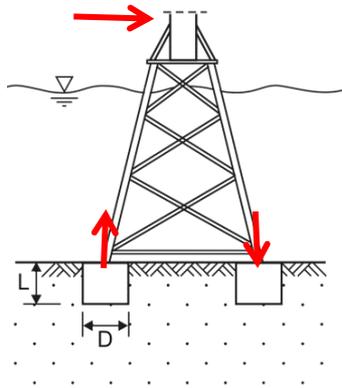
Modellvalidierung (statische Last)



Herausforderung: Verhalten unter transienten Lasten

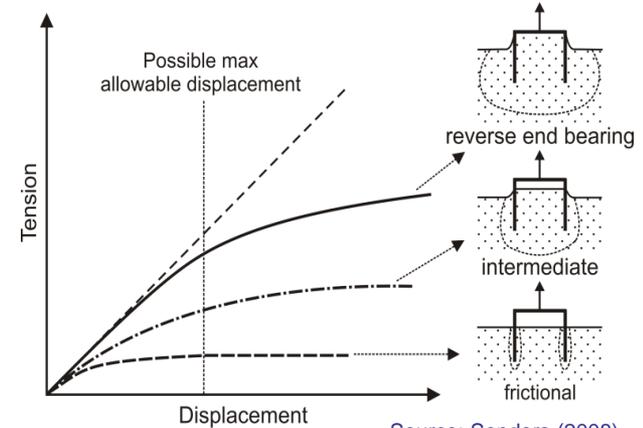
- Entstehung von Über- und Unterdrücken („Boot“-Effekt)  
→ Experimente !

## Multipod-Buckets unter transienter Zuglast



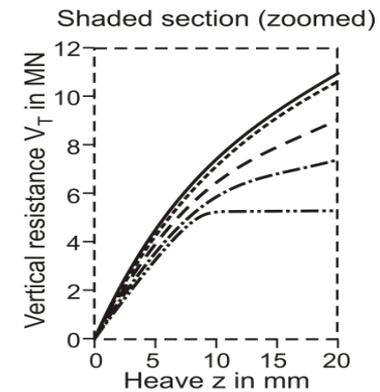
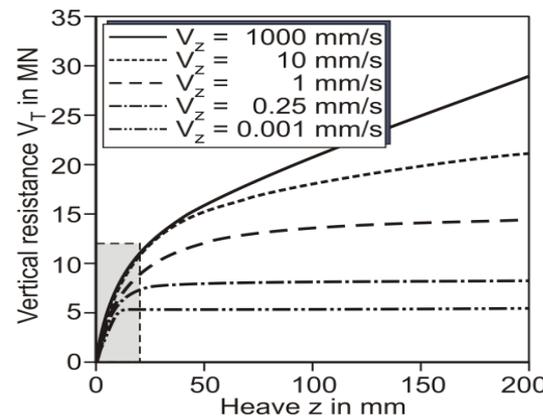
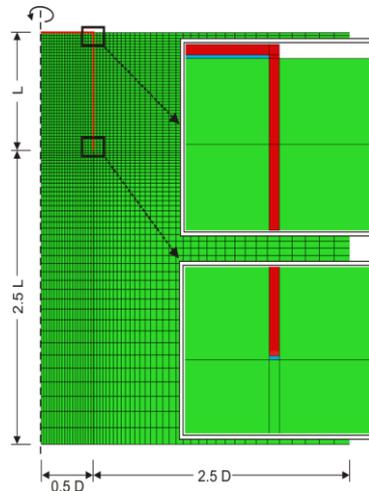
Langsame Belastung:  
Nur Mantelreibung

Schnelle Belastung:  
Unterdruck



Source: Senders (2008)

### Numerische Modellierung:

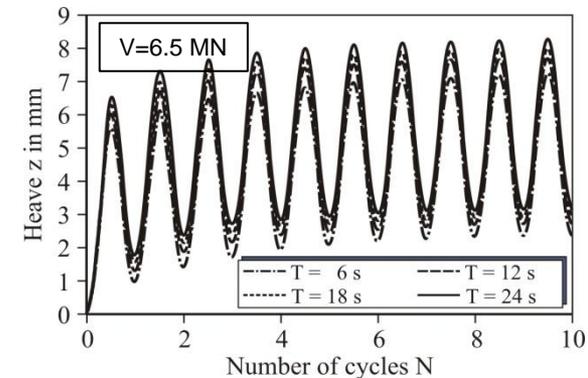
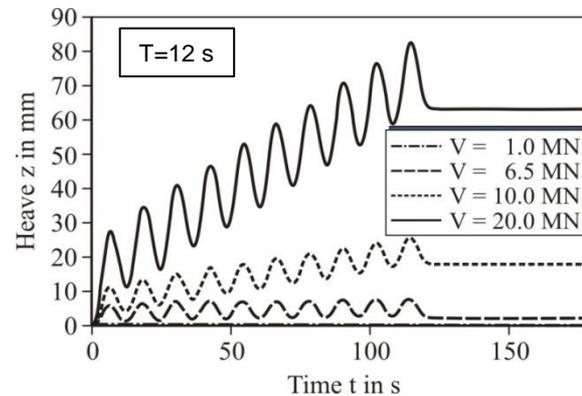


## Verhalten unter zyklischen Zuglasten

**Hypothese** (gestützt durch Berechnungen mit „einfachem“ numerischen Modell):

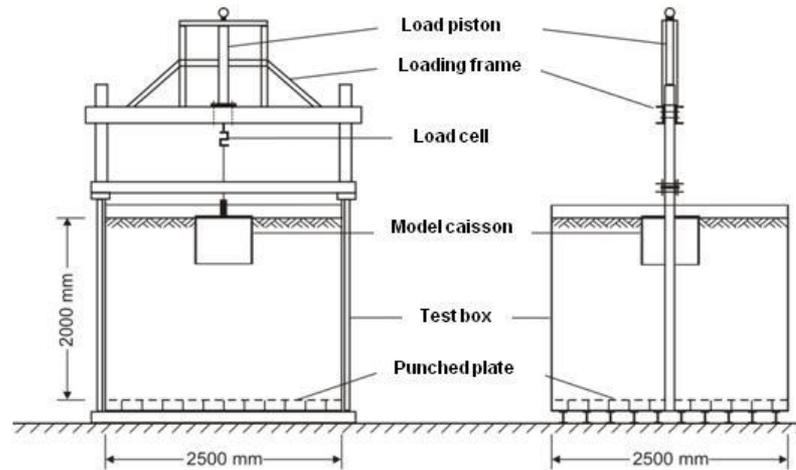
Bei wiederholter Überschreitung der quasi-statischen Grenzlast ergibt sich eine Hebungsakkumulation

Bsp.:  $D=10\text{m}$   
 $L/D = 1$   
Sand  
 $V_{\text{stat}} = 6,5 \text{ MN}$



Hebungsrates abhängig von Bucketgeometrie, Baugrund und Belastungsfrequenz?

## Verhalten unter zyklischen Zuglasten



### Testprogramm:

*Planned number of model tests with constant heave rate*

| Dimensions L/D [mm]          | 500 / 500 | 250 / 250 | 125 / 125 | 250 / 500 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Drained conditions           | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Partially drained conditions | 5         | 5         | 5         | 5         |

*Mean value and amplitude of loading for model tests with cyclic tensile loading*

| L/D = 500/500 mm                     |        | Amplitude [ $F_{cyc}/R_{drained}$ ] |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mean load [ $F_{mean}/F_{drained}$ ] |        | 0.750                               | 1.000 | 1.250 | 1.500 | 1.750 | 2.000 |
| Loading frequency                    | 1.0 Hz | 0.375                               | 0.500 | 0.625 | 0.750 | 0.875 | 1.000 |
|                                      | 0.5 Hz | 0.375                               | 0.500 | 0.625 | 0.750 | 0.875 | 1.000 |
|                                      | 1.0 Hz | 0.188                               | 0.250 | 0.313 | 0.375 | 0.438 | 0.500 |

**Danke für Ihre Aufmerksamkeit**

