

Leibniz
Universität
Hannover

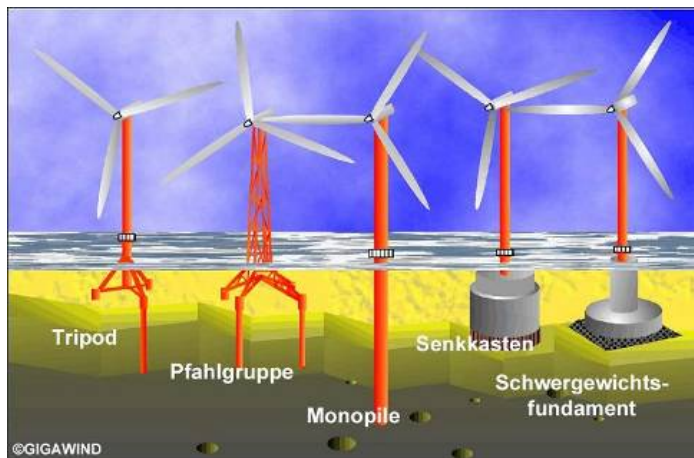
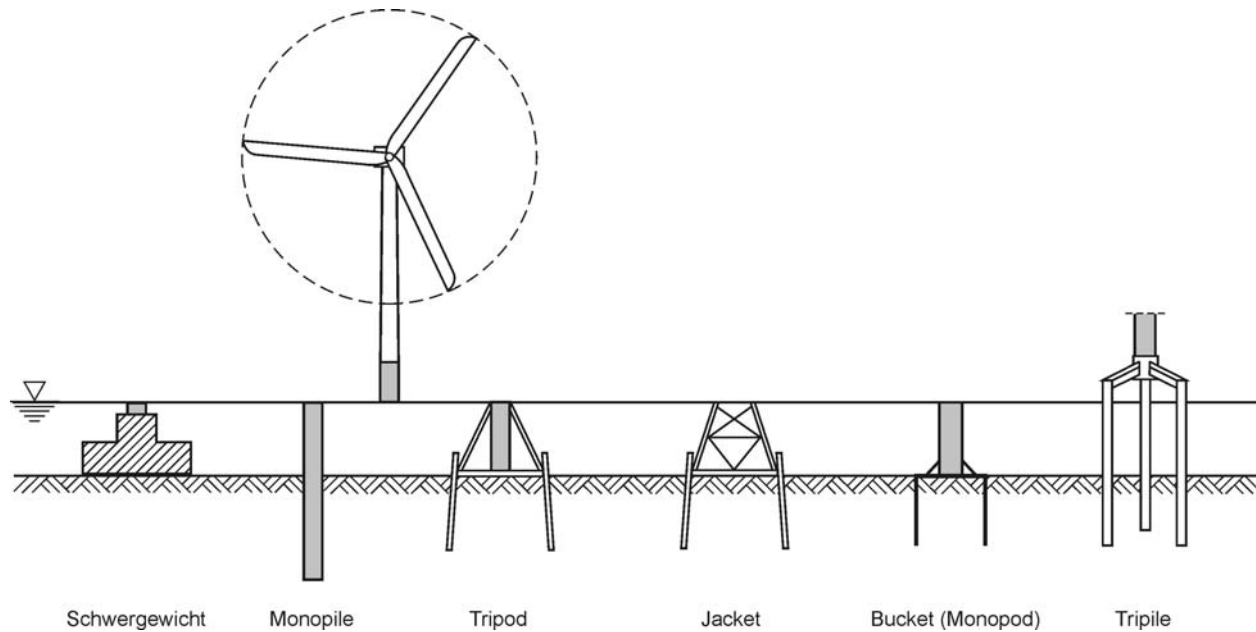


Bemessung von Gründungselementen für Offshore-Windenergieanlagen – Stand des Wissens und offene Fragen

Martin Achmus

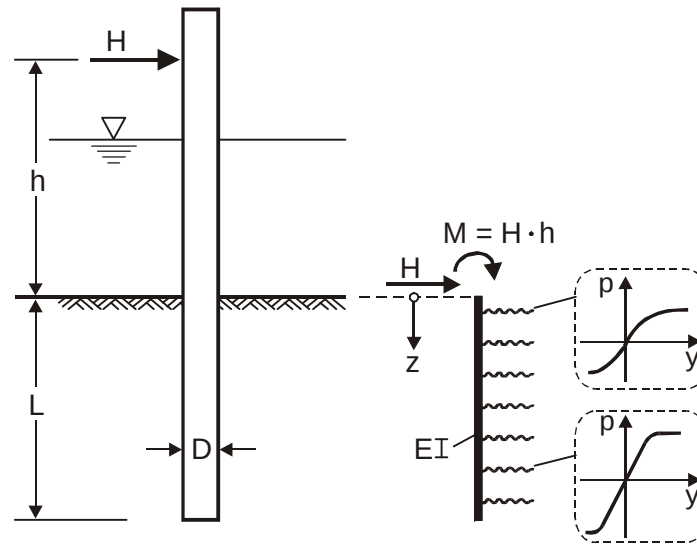


Gründungstypen



- Bisher meist Monopiles
- Jetzt in größeren Wassertiefen: Tripod / Jacket / Tripile

Laterale Beanspruchung



Stand der Technik:
p-y -Verfahren

Offene Fragen:

Gelten die p-y-Kurven auch für sehr große Pfähle ?

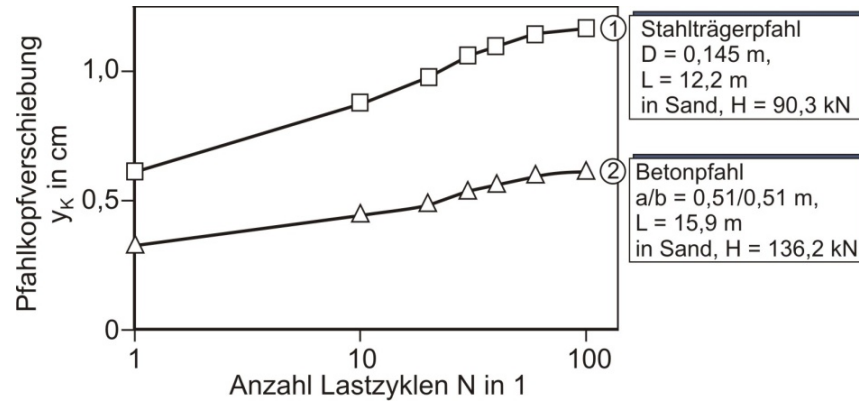
Wie wirken sich Sturmereignisse auf die Tragfähigkeit aus?

Ist mit Verflüssigungseffekten zu rechnen ?

Wie können permanente Schiefstellungen infolge zyklischer Belastung abgeschätzt werden ? Welche Einbindelänge ist für einen Monopile notwendig ?

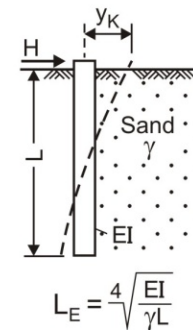
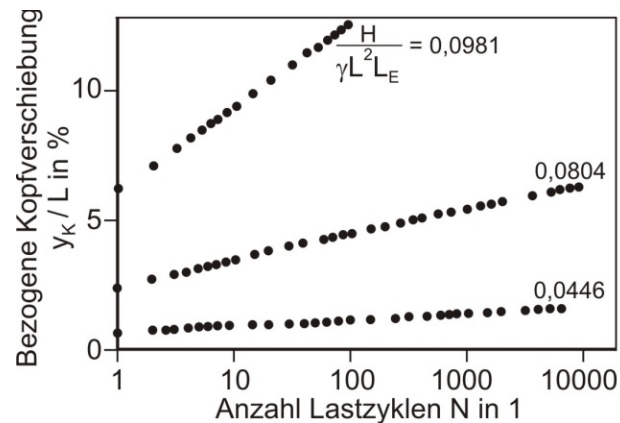
Pfähle unter zyklischer Horizontallast – Versuchsergebnisse

Alizadeh & Davisson (1970)



Hettler (1981):
Modellversuche

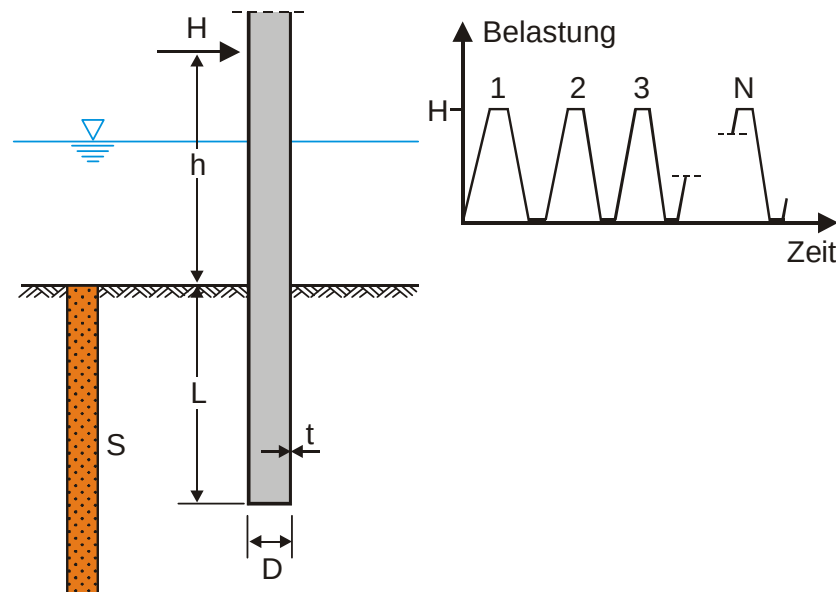
$$\frac{y_{K,N}}{y_{K,1}} = 1 + C_N \ln N$$



Verformungsakkumulation infolge zyklischer Belastung

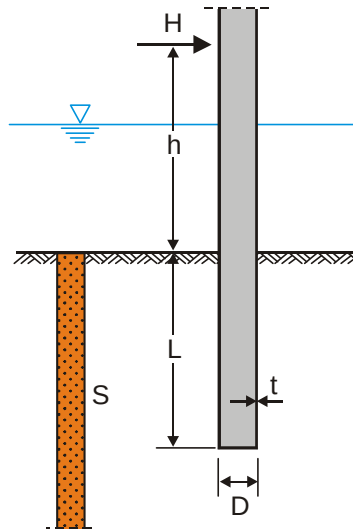
Offshore-Richtlinien (GL, DNV) fordern die Berücksichtigung zyklischer Lasteinwirkungen

BSH-Standard „Baugrunderkundung“: Aus Laborversuchen ist eine Prognose abzuleiten, inwieweit sich das Formänderungs- und Festigkeitsverhalten des Bodens abhängig von der jeweiligen Gründungsstruktur infolge zyklischer Belastung ändert.



IGBE: Verknüpfung von FE-Berechnungen mit zyklischen Triaxialversuchen (SDM-Verfahren)

Finite Elemente-Modell - Eigenschaften



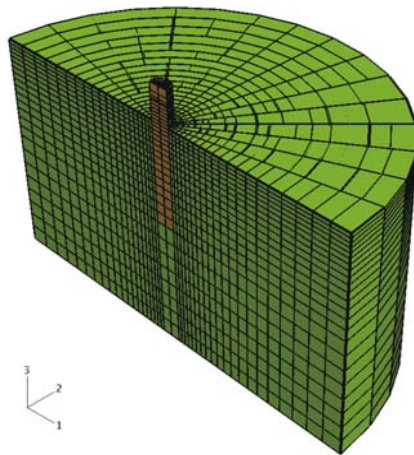
- 8-Knoten Volumenelemente
- Kontaktinteraktion zwischen Pfahl und Boden
- Pfahl: linear elastisch (E, ν_s)
- Boden: Mohr-Coulomb'sches Bruchkriterium

(ϕ', ψ, c')

Spannungsabhängige Steifigkeit:

(κ, λ, ν)

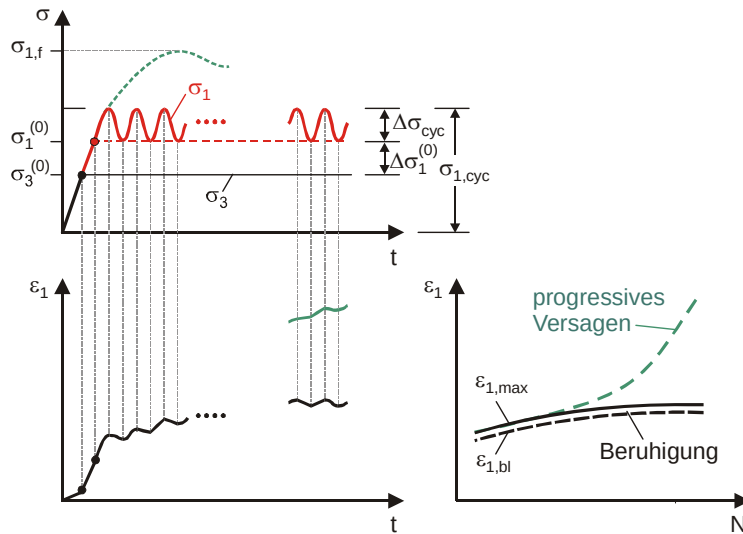
$$E_s = \kappa \sigma_{at} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{at}} \right)^\lambda$$



Berechnungsablauf:

1. Generierung des Anfangsspannungszustands
2. Ersatz von Boden- durch Pfahlelemente und Aktivierung der Kontaktbedingungen
3. Aufbringen der Vertikallast
4. Schrittweise Erhöhung von Horizontallast H und Biegemoment $M=H h$
5. Zyklische Belastung:
Anpassung der Bodensteifigkeiten
Neuberechnung

Zyklischer Triaxialversuch



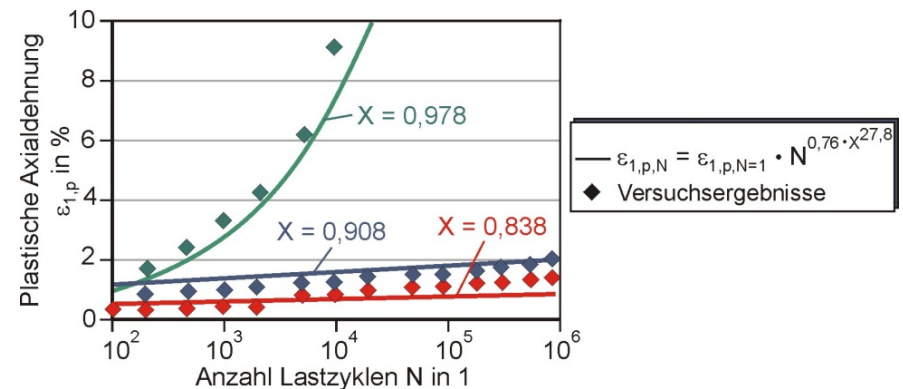
Verhalten von Boden im zyklischen Triaxialversuch (prinzipiell)

Ansatz nach Huurman:

$$\varepsilon_{1,bl,N} = \varepsilon_{1,bl,N=1} N^{b_1} X^{b_2}$$

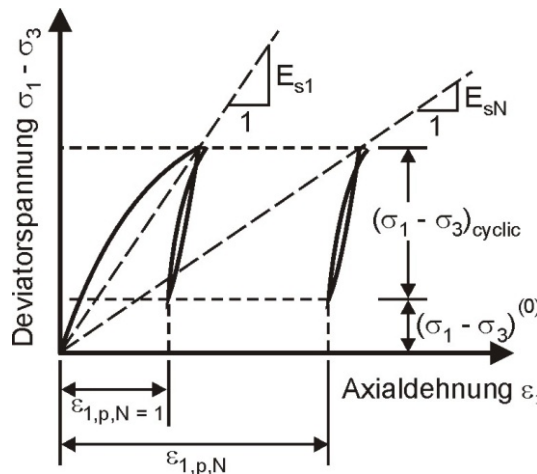
$$X = \frac{\sigma_{1,cyc}}{\sigma_{1,f}}$$

→ Zyklische Parameter b_1 , b_2



SDM – Stiffness degradation model

Ansatz: Die Zunahme der Dehnung im Triaxialversuch (beschrieben durch die Huurman-Gleichung) wird als Reduktion der Sekantensteifigkeit des Bodenelements interpretiert



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

$$X = \frac{\sigma_{1,cyclic}}{\sigma_{1,f}} \quad \text{Zyklisches Spannungsverhältnis}$$

- Das zyklische Spannungsverhältnis wird abhängig vom Spannungszustand im Element ermittelt.
- Mit der reduzierten Steifigkeit $E_{sN} = f(E_{s1}, X, N)$ erfolgt die Neuberechnung des Systems.

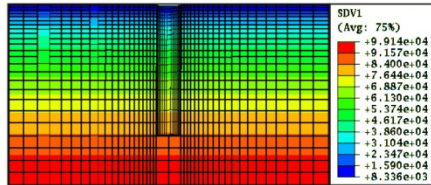
SDM-Verfahren: Ergebnisse

Monopiles, D = 7,5 m, dichter Sand, H = 15 MN, h = 20 m

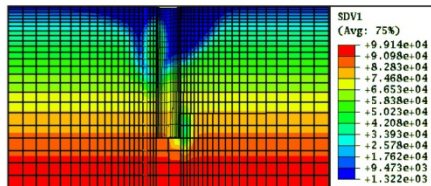
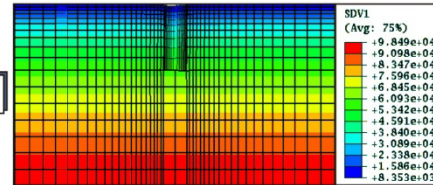
L = 40 m

Steifigkeiten

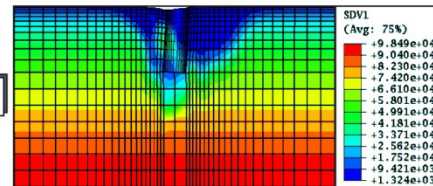
L = 20 m



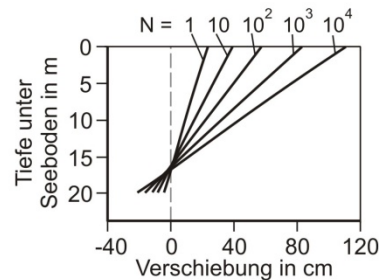
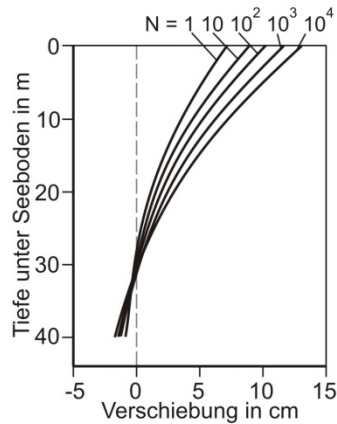
N = 1



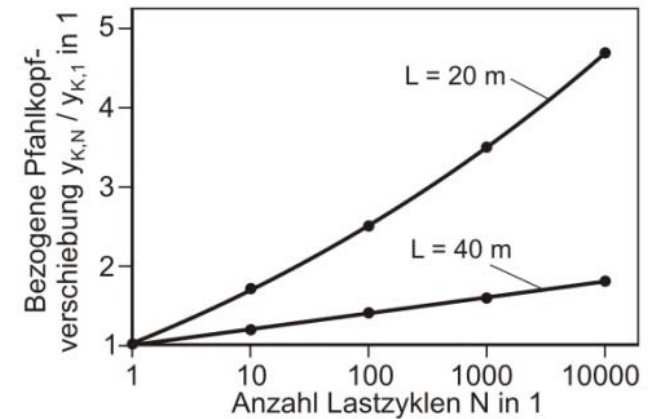
N = 10⁴



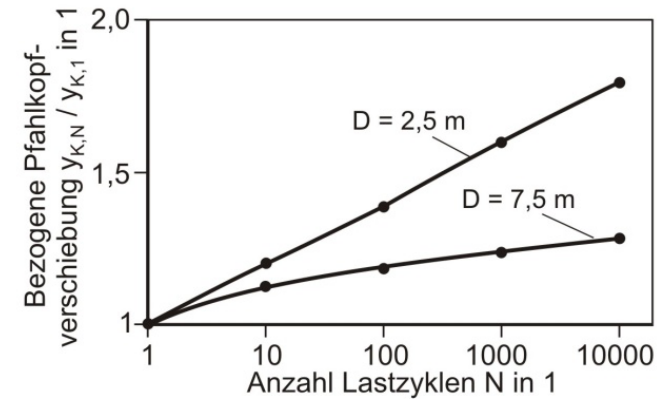
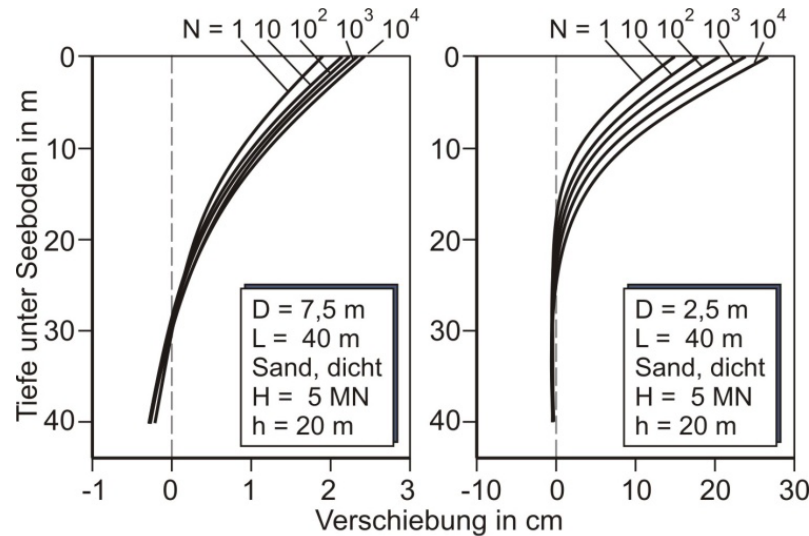
Biegelinien



Zyklisches Systemverhalten:

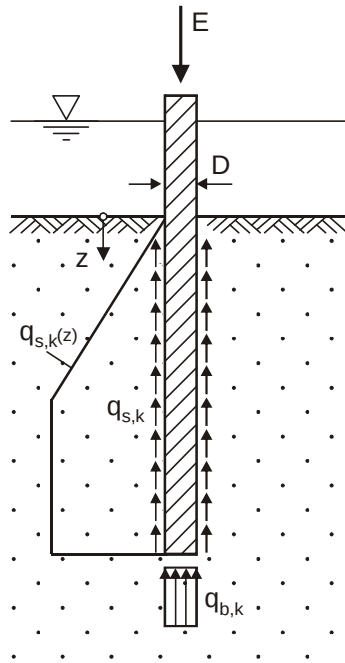


Zur Wirkung einer Einspannung im Boden



- Einspannung („vertical tangent“ oder „zero toe kick“) sichert nicht zwangsläufig günstiges Verhalten unter zyklischen Lasten.
- Für sehr große Monopiles würde diese Forderung zu unangemessen großen Pfahllängen führen.

Axiale Beanspruchung



Stand der Technik:
β-Verfahren nach API (2000)

$$q_{s,k}(z) = k \cdot \sigma'_v(z) \cdot \tan \delta = \sigma'_v(z) \cdot \beta \leq q_{s,k,max}$$

Bodenart	Mantelreibung		Spitzendruck	
	δ	q _{s,k,max}	N _q	q _{b,k,max}
	[°]	[kN/m²]	-	[MN/m²]
Locker bis mitteldicht gelagerter Sand	20	67	12	2,9
Mitteldicht gelagerter Sand	25	81,3	20	4,8
Dicht bis sehr dicht gelagerter Sand	30	95,7	40	9,6

Bemessungsparameter nach API (2000) für nichtbindige Böden

Offene Fragen:

Ist das API-Verfahren zuverlässig ? Gibt es Optimierungspotenzial ?

Wie kann die Tragfähigkeit unter Berücksichtigung zyklischer Last (wirtschaftlich) nachgewiesen werden ?

Wie kann die Zugtragfähigkeit eines Pfahls verbessert werden ?

CPT-basierte Verfahren (DIN EN ISO 19902)

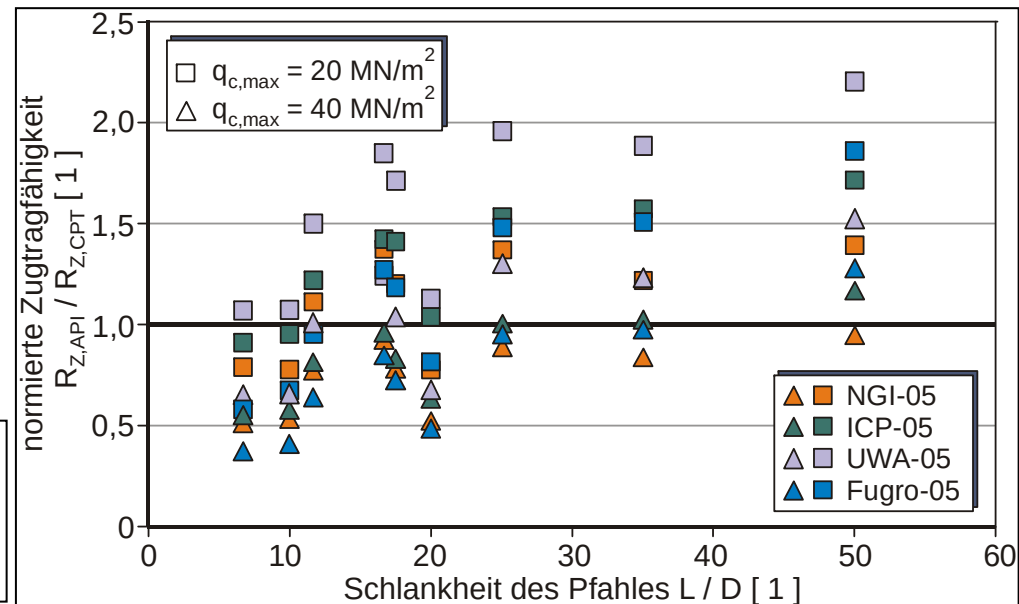
Abschätzung der Mantelreibung nach DIN EN ISO 19902

$$f(z) = \underbrace{u \cdot q_c(z)}_{\text{Maximal wirkende Radialspannung}} \left[\frac{\sigma'_{v0}(z)}{p_a} \right]^a \underbrace{A_r^b}_{\text{Grad der Pfropfenbildung}} \left[\max\left(\frac{L-z}{D}, \nu\right) \right]^{-c} \underbrace{(\tan \delta_{cv})^d}_{\text{Wandreibung Pfahl / Boden}} \left[\min\left(\frac{L-z}{D} \cdot \frac{1}{\nu}, 1\right) \right]^e$$

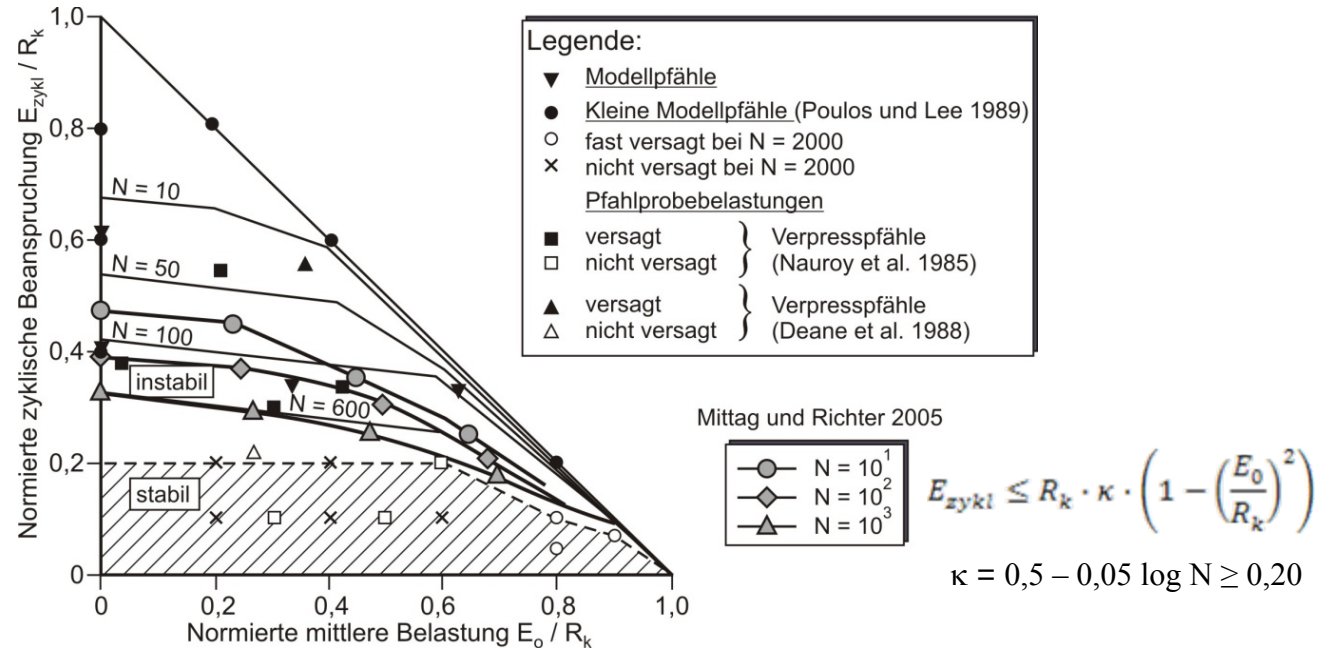
Primärspannungszustand Reibungsermüdung Interaktion zwischen Mantelreibung und Spitzendruck

$A_r = 1 - (D_i / D)^2$ effektives Flächenverhältnis
 D = Pfahldurchmesser
 D_i = innerer Pfahldurchmesser
 L = Einbindetiefe
 p_a = atmosphärischer Druck
 q_c = Drucksondierungsspitzendruck
 $q_s = f(z)$ = Mantelreibung
 σ'_{v0} = effektive Vertikalspannung
 δ_{cv} = Wandreibungswinkel
 a, b, c, d, e, u, ν = empirische Beiwerte,
 abhängig vom CPT-Basierten Verfahren

$L = 20, 35, 50 \text{ m}$
 $D = 1, 2, 3 \text{ m}$
 $t = 50 \text{ mm}$
 $\gamma' = 9,5 \text{ kN/m}^3$
 $d_{50} = 0,5 \text{ mm}$



Zyklische Axialbelastung



Bemessungsansatz: CLRL = 0.20 (Critical Level of Repeated Loading)
 → konservativ ?

F+E-Projekt Innöpfahl

„Entwicklung und Prüfung eines innovativen Pfahlsystems
für die Gründung von Offshore – Windenergieanlagen“

Antragsteller / Förderungsempfänger:

Weserwind GmbH



Unterauftragnehmer:

1. IGBE / Leibniz Universität Hannover



2. Technologiekontor Bremerhaven GmbH



Assoziierter Partner:

REpower Systems AG

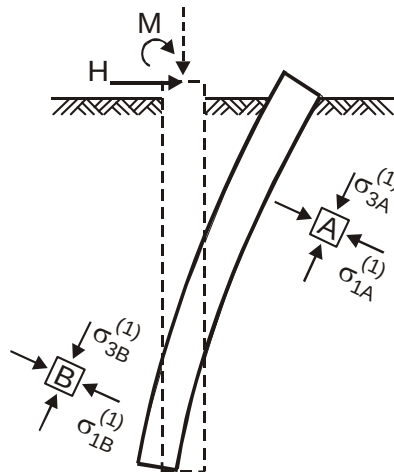
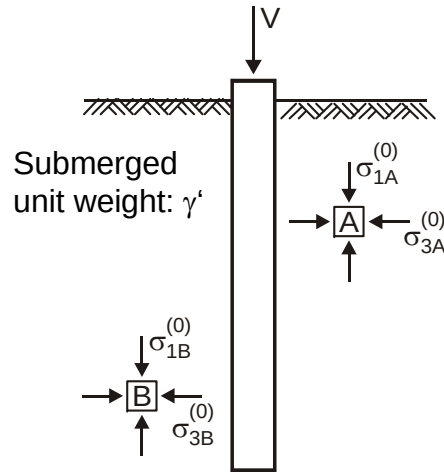


Laufzeit: 01.10.2008 bis 31.03.2011 (30 Monate)

Danke für Ihre Aufmerksamkeit !



SDM-Verfahren: Berechnung des zyklischen Spannungsverhältnisses



$$\Rightarrow X_{a,i}^{(0)}$$

$$X_a^{(0)} = \frac{\sigma_1^{(0)}}{\sigma_{1,f}^{(0)}}$$

$$\Rightarrow X_{a,i}^{(1)}$$

$$X_a^{(1)} = \frac{\sigma_1^{(1)}}{\sigma_{1,f}^{(1)}}$$

Maß für die zyklische Beanspruchung:

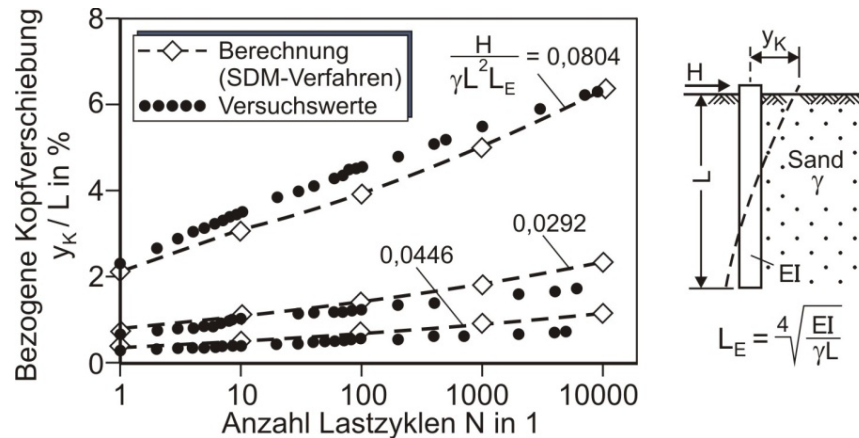
$$X = \frac{X_a^{(1)} - X_a^{(0)}}{1 - X_a^{(0)}}$$

$$E_{S,N} = N^{-b_1 X^{b_2}} E_{S,N=1}$$

Reduzierte Steifigkeit

SDM-Verfahren: Validierung

Nachrechnung der Modellversuche von Hettler:



- Validierung an verfügbaren Messergebnissen zeigt gute Übereinstimmung
- Zyklisches Verhalten ist abhängig von der Größe der Belastung
- Das Verfahren ist prinzipiell für alle Böden und geschichteten Baugrund anwendbar