



1 1  
1 0 2  
1 0 0 4

Leibniz  
Universität  
Hannover

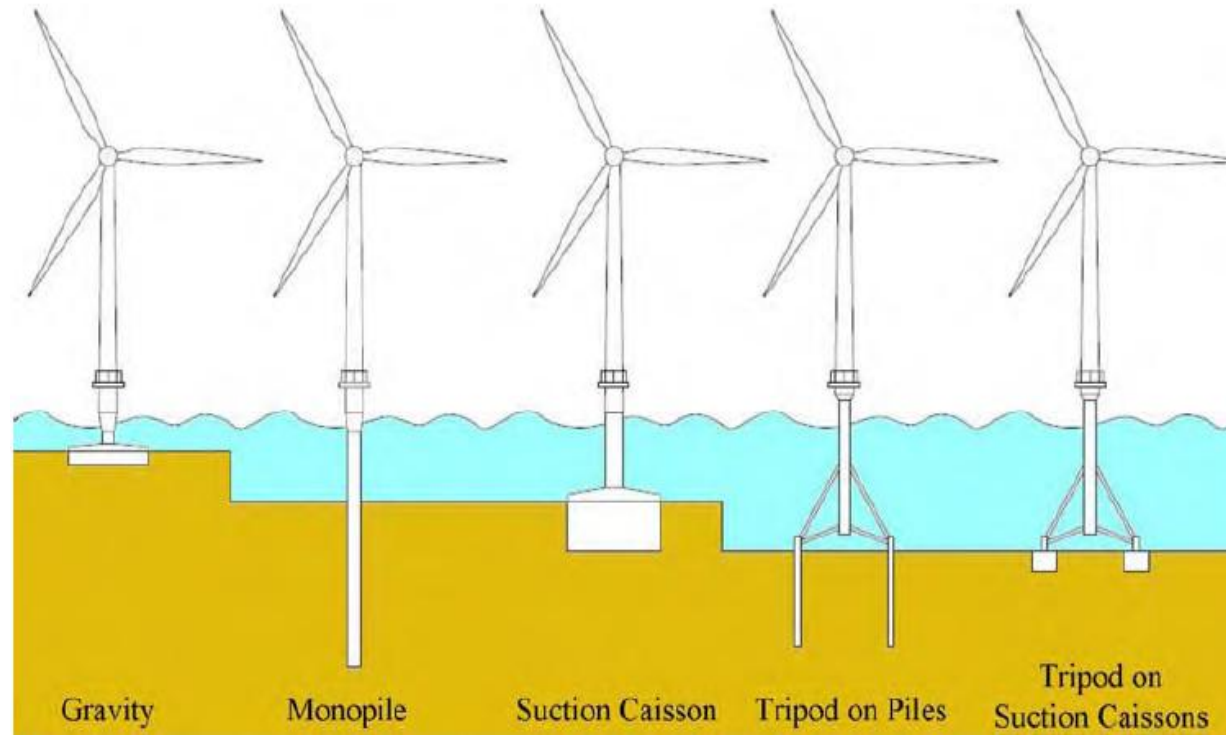
# Zur Mindesteinbindelänge von horizontal belasteten Offshorepfählen

Martin Achmus

**I Gt H**

**Institut für Geotechnik**  
Leibniz Universität Hannover

# Gründungsmöglichkeiten für Offshore-WEA

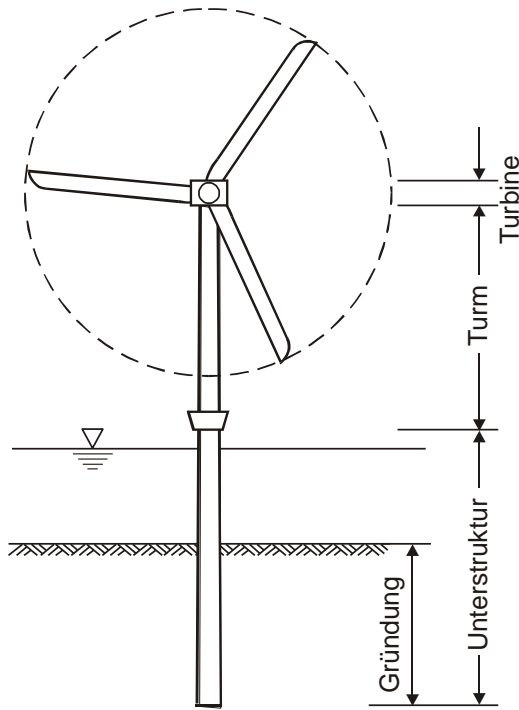


## Offshore-WEA in Nord- und Ostsee

Project / Country	Turbines	Distance to coast	Water depth	Monopile diameter	Operation since
Thornton Bank (B)	6 x 5 MW	30 km	27 m	Gravity	2008
Kemi Ajos (FIN)	8 x 3 MW	<1 km	3 – 8 m	Steel cyl.	2007/08
Princess Amalia (NL)	60 x 2 MW	23 km	19–24 m	4.0 m	2008
Inner Dowsing (UK)	27 x 3.6 MW	5.2 km	10 m	4.7 m	2008
Lynn (UK)	30 x 3.6 MW	5.2 km	10 m	4.7 m	2008
Burbo Bank (UK)	25 x 3.6 MW	7 km	2–8 m	5.0 m	2007
Beatrice (UK)	2 x 5 MW	25 km	45 m	Jacket	2007
Lillgrund (SWE)	48 x 2.3 MW	103 km	4 – 10 m	Gravity	2007
Barrow (UK)	30 x 3 MW	7.5 km	15–20 m	4.75 m	2006
Egmond aan Zee (NL)	36 x 3 MW	10 km	18–20 m	4.6 m	2006
Kentish Flats (UK)	30 x 3 MW	8–10 km	5 m	4.3 m	2005
Scroby Sands (UK)	30 x 2 MW	2.5 km	4–8 m	4.2 m	2004
Ronland (DK)	4 x 2 MW, 4 x 2.3 MW	-	3 m	Grouted Monopile	2004
Samso (DK)	10 x 2.3 MW	3.5 km	20 m	4.2 m	2003
North Hoyle (UK)	30 x 2 MW	6 km	12 m	4.0 m	2003
Nysted (DK)	72 x 2.3 MW	6 km	5 – 9.5 m	Gravity	2003
Arklow Bank (IRL)	7 x 3.6 MW	10 km	2–5 m	5.1 m	2003
Fredrikshavn (DK)	2 x 3 MW, 2 x 2.3 MW	0.8 km	4 m	Bucket	2002
Horns Rev (DK)	80 x 2 MW	14–20 km	6–12 m	4.0 m	2002
Yttre Stengrund (SWE)	5 x 2 MW	5 km	6 – 10 m	Drilled Monopile	2001
Middelgrunden (SWE)	20 x 2 MW	3 km	5 – 10 m	Gravity	2001
Utgrunden (SWE)	7 x 1.5 MW	8 km	7–10 m	3.0 m	2000
Blyth (UK)	2 x 2 MW	0.8 km	6 – 11 m	Drilled Monopile	1998
Bockstigen-Valor (SWE)	5 x 0.5 MW	3 km	6 m	Drilled Monopile	1996
Irene Vorrink (NL)	28 x 0.6 MW	0.02 km	2 m	3.52 m	1996
Tuno Knob (DK)	10 x 0.5 MW	6 km	0.8 – 4 m	Concrete Caisson	1995
Lely (NL)	4 x 0.5 MW	0.75 km	5–10 m	3.2–3.7 m	1994
Vindeby (DK)	11 x 0.45 MW	2.5 km	3 – 5 m	Concrete Caisson	1991

Quelle: [www.offshore-wind.de](http://www.offshore-wind.de) und andere Internetquellen

# Monopilegründung

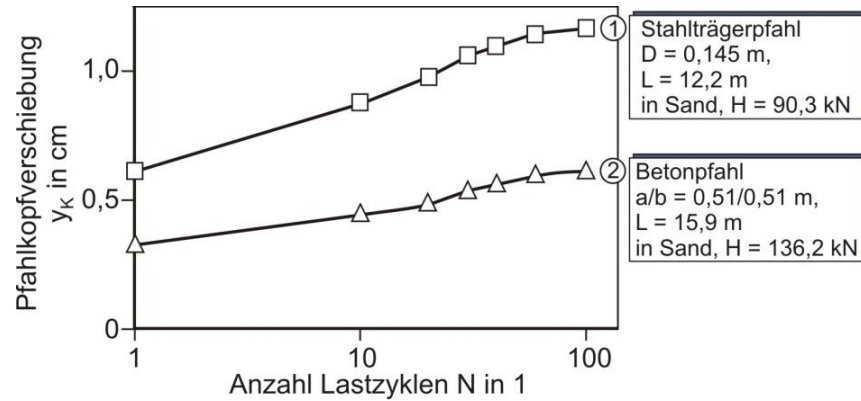


## Wie lang muss ein Monopile sein ?

- Kriterien:
- \* Ausreichende Steifigkeit unter dynamischen/ zyklischen Lasten
  - \* Begrenzte Verdrehung / Verschiebung unter Extremlast
  - \* Begrenzte permanente Schiefstellung (max.  $0,5^\circ$ )

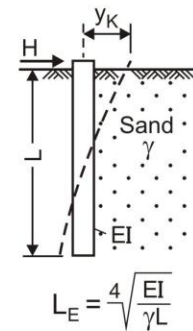
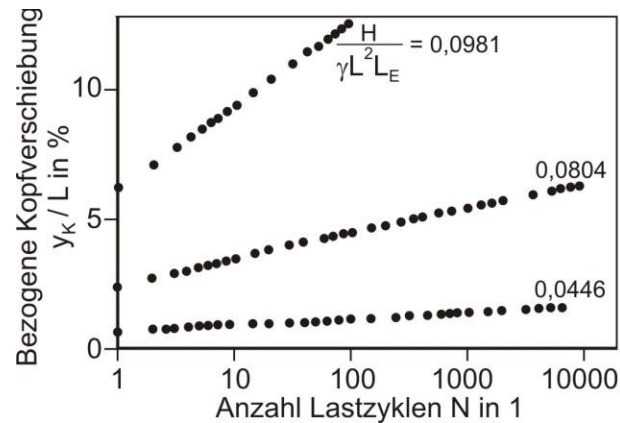
# Pfähle unter zyklischer Horizontallast – Versuchsergebnisse

Alizadeh & Davisson (1970)



Hettler (1981):  
 Modellversuche

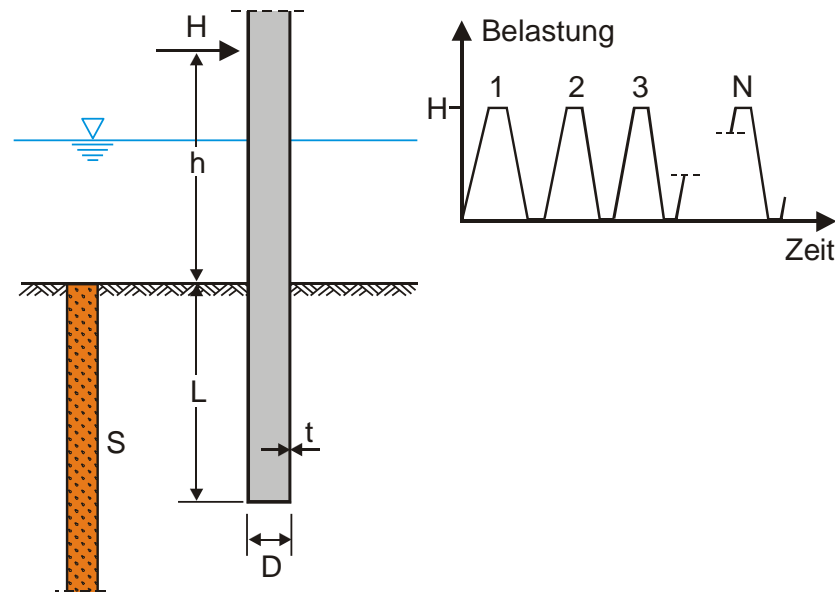
$$\frac{y_{K,N}}{y_{K,1}} = 1 + C_N \ln N$$



# Zyklische 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.



# Zyklische Belastung von Pfählen: EAP Kap. 13 (Entwurf)

## Inhaltsverzeichnis

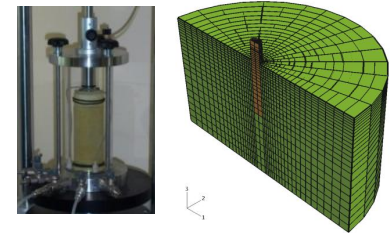
<b>13</b>	<b>Tragverhalten und Nachweise für Pfähle unter zyklischen, dynamischen und stoßartigen Einwirkungen (Entwurf)</b>	<b>5</b>
13.1	Allgemeines	5
13.2	Zyklische, dynamische und stoßartige Einwirkungen	6
13.2.1	Einwirkungs- und Belastungsformen	6
13.2.2	Einwirkungen bei zyklischer Belastung	7
13.2.3	Einwirkungen bei dynamischer Belastung	11
13.2.4	Einwirkungen bei stoßartiger Belastung	12
13.3	Ergänzende geotechnische Untersuchungen	14
13.4	Tragverhalten und Widerstände bei zyklischer Belastung	17
13.4.1	Allgemeines	17
13.4.2	Axiale Belastung	17
13.4.3	Querbelastung	20
13.5	Tragverhalten und Widerstände bei dynamischer Belastung	22
13.6	Tragverhalten und Widerstände bei stoßartiger Belastung	23
13.6.1	Allgemeines	23

## Instrumentarium:

- Empirische Ansätze
- Numerische Berechnungsverfahren
- Ersatzkriterien: Betrachtung der Pfahlbiegeline

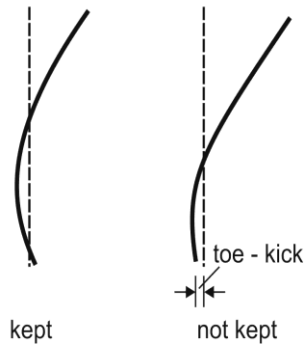
$$y_{zyk} = y_{N=1} \cdot (1 + t \cdot \ln N)$$

$$y_{zyk} = y_{N=1} \cdot N^m$$

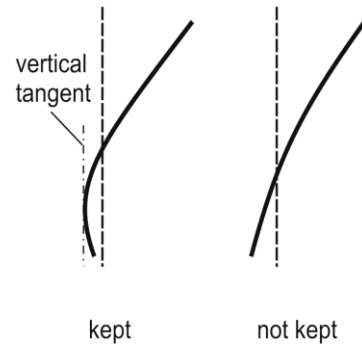


# Mindesteinbindelänge zyklisch belasteter Pfähle

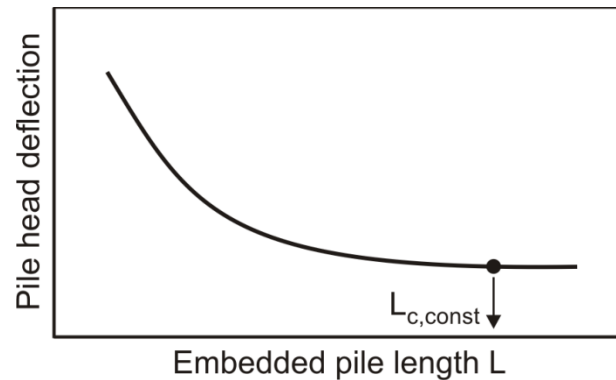
( a ) Zero - toe - kick criterion



( b ) Vertical tangent criterion



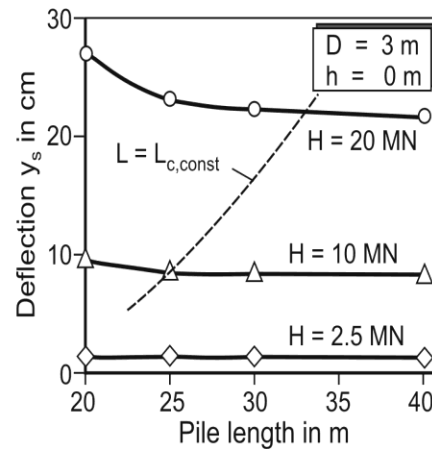
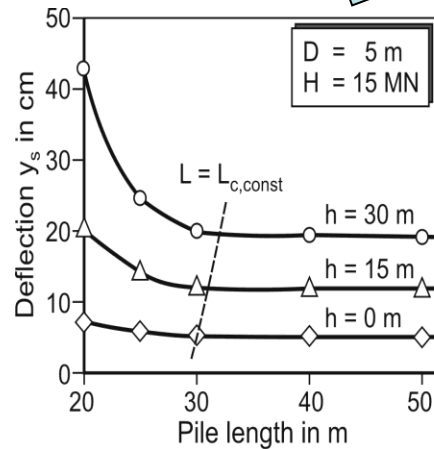
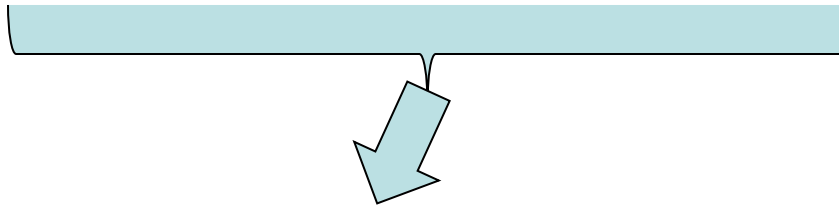
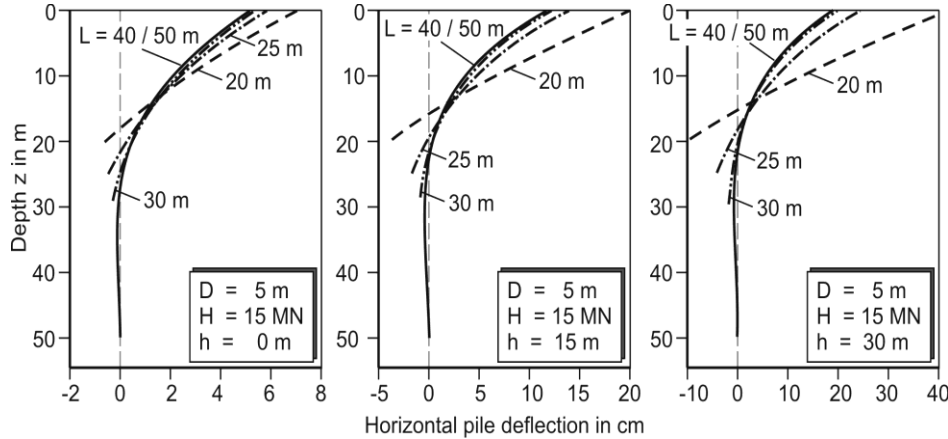
- Übliche Kriterien: „vertical tangent“ oder „zero toe kick“ unter Bemessungslast.
- Für sehr große Monopiles würde diese Forderung zu unangemessen großen Pfahllängen führen.
- Alternativ:  $L_{c, const}$  ?



**Sind diese Kriterien sinnvoll für die Sicherstellung zyklischer Stabilität ?**



# Tragverhalten unter statischer Last

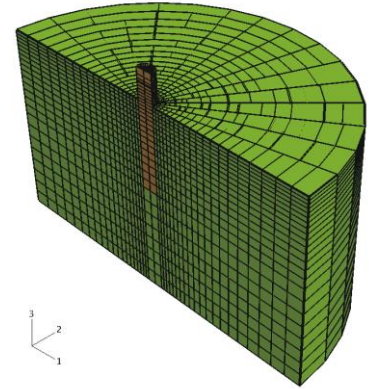
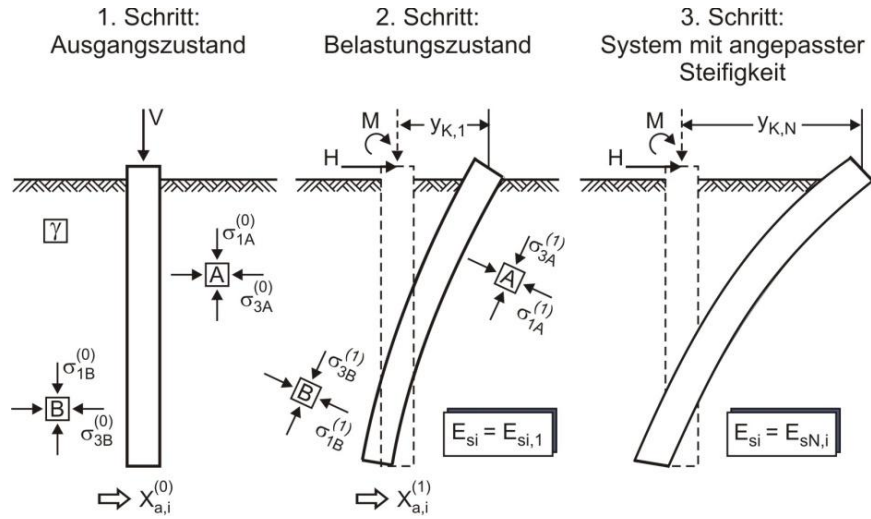


- Zero toe kick führt zu sehr großen erforderlichen Pfahlängen
- Vertical tangent führt zu kleineren erforderlichen Pfahlängen, wenn ein zusätzliches Moment berücksichtigt wird ( $L_{c,vt} = \text{ca. } 37\text{m}$  bei  $h=0$ , ca.  $33\text{m}$  bei  $h=30\text{m}$ )

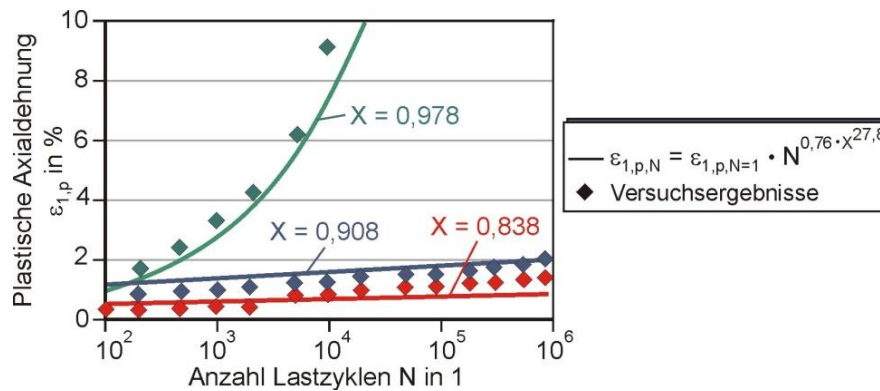
- Konstante Verschiebung führt zu „vernünftigen“ Ergebnissen

# Tragverhalten unter zyklischer Last – SDM-Verfahren

FE-Simulation:

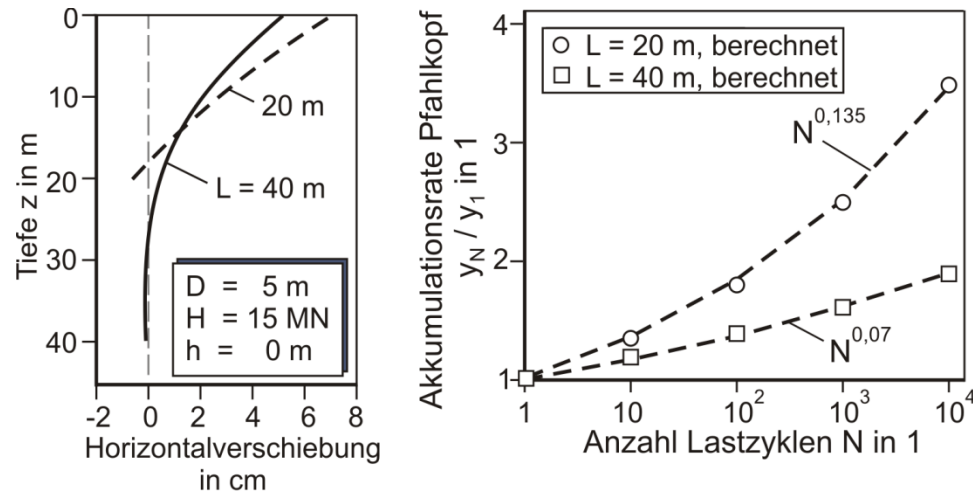


Zyklische Triaxialversuche:



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

# SDM-Verfahren – Validierung



$$y_N = y_1 f_N(N)$$

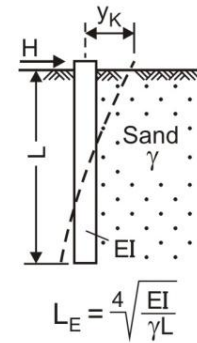
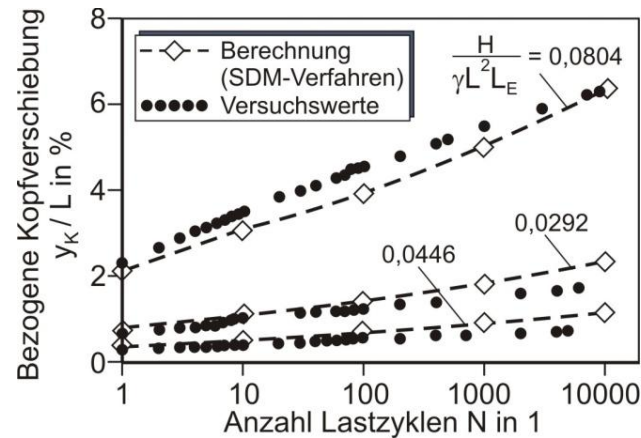
$$f_N(N) = N^m$$

Long & Vanneste (1994): kurze, starre Pfähle:  $m = 0,10$  bis  $0,25$

Little & Briaud (1988): flexible Pfähle:  $m = 0,04$  bis  $0,09$

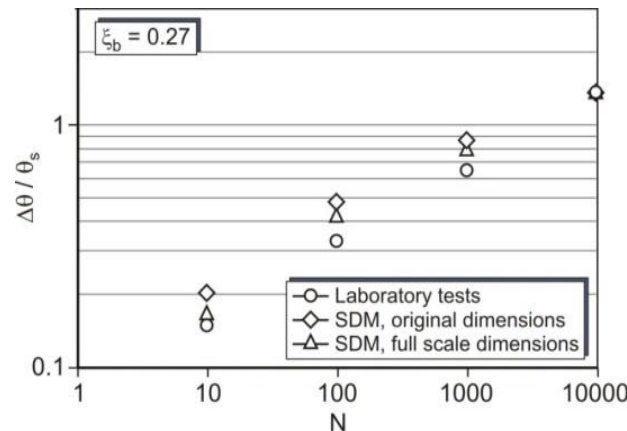
# SDM-Verfahren – Validierung

Nachrechnung der Modellversuche von Hettler (1981):



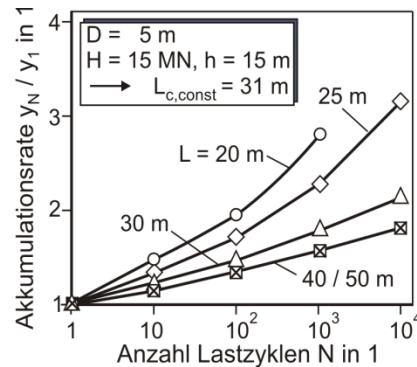
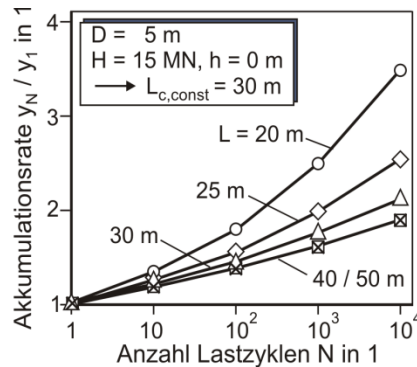
$$f_N(N) = 1 + t \ln(N)$$

Nachrechnung der Modellversuche von LeBlanc et al. (2010):



$$\Delta\theta = \theta_1 R_b R_z N^{0,31}$$

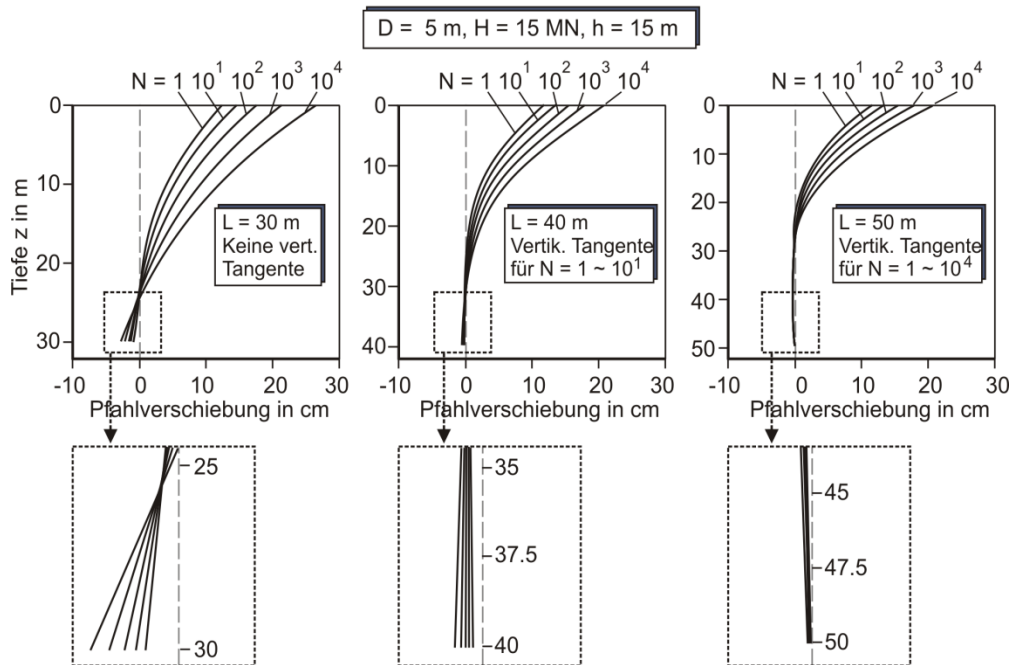
# Mindesteinbindelänge zyklisch belasteter Pfähle



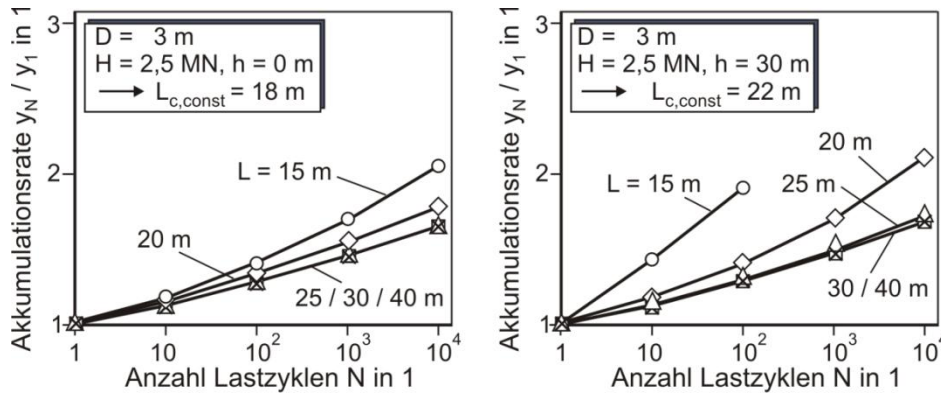
**Verhalten unter zyklischer Last:**

Einhaltung von  $L_{c, \text{const}}$  sichert günstiges Verhalten

Kürzere Pfähle zeigen ungünstigeres, aber nicht zwingend ungenügendes Tragverhalten



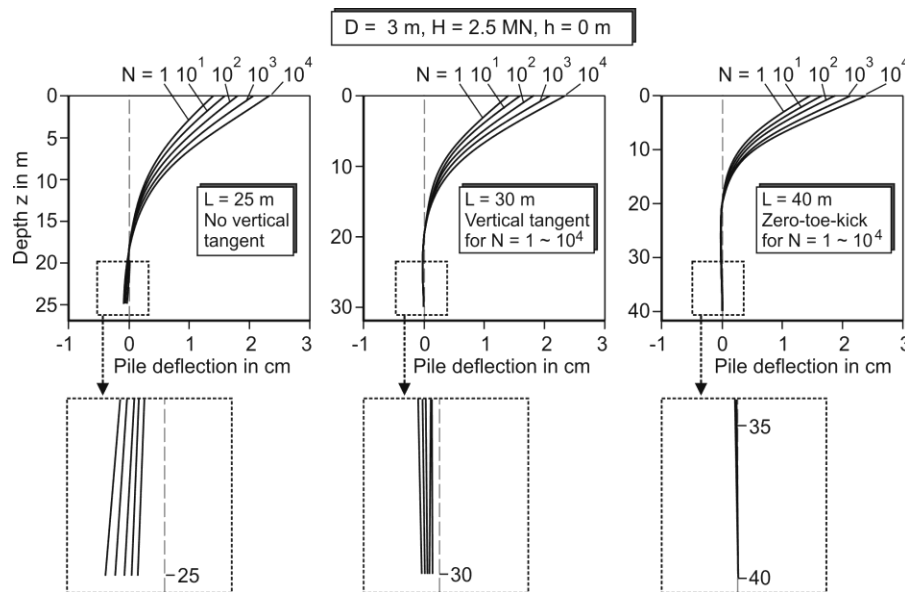
# Mindesteinbindelänge zyklisch belasteter Pfähle



$L_{c,const}$  scheint zumindest für Vorbemessungszwecke ein geeignetes Kriterium zu sein

Untersuchungen für andere Baugrundaufbauten stehen noch aus

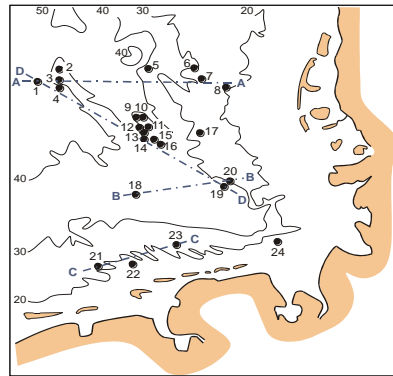
Sammlung von Erfahrungen ist zwingend erforderlich



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

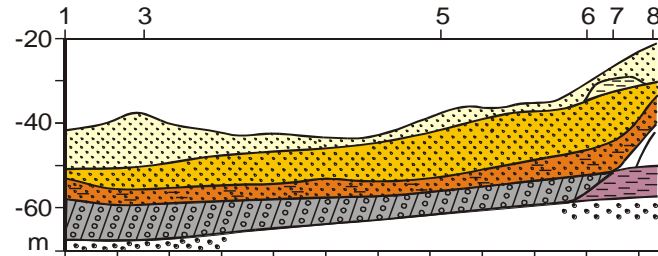


# Baugrundbedingungen in der deutschen Nordsee

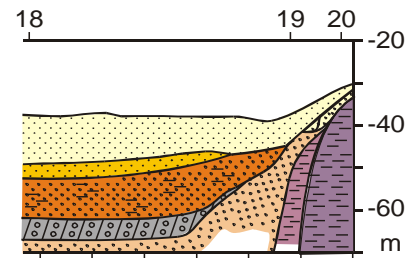


- Holozän, sandig
- Holozän, tonig
- Torf
- Sande (Weichsel)
- Eem (Sande, tonige Sande)
- Geschiebelehm
- Holstein
- Lauenburger Ton
- Sande (glazifluviatile)
- Tertiärton

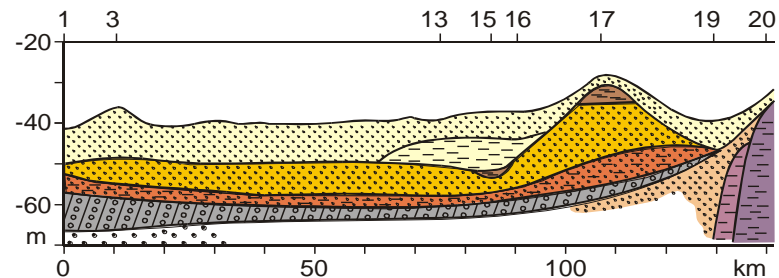
Schnitt A - A



Schnitt B - B



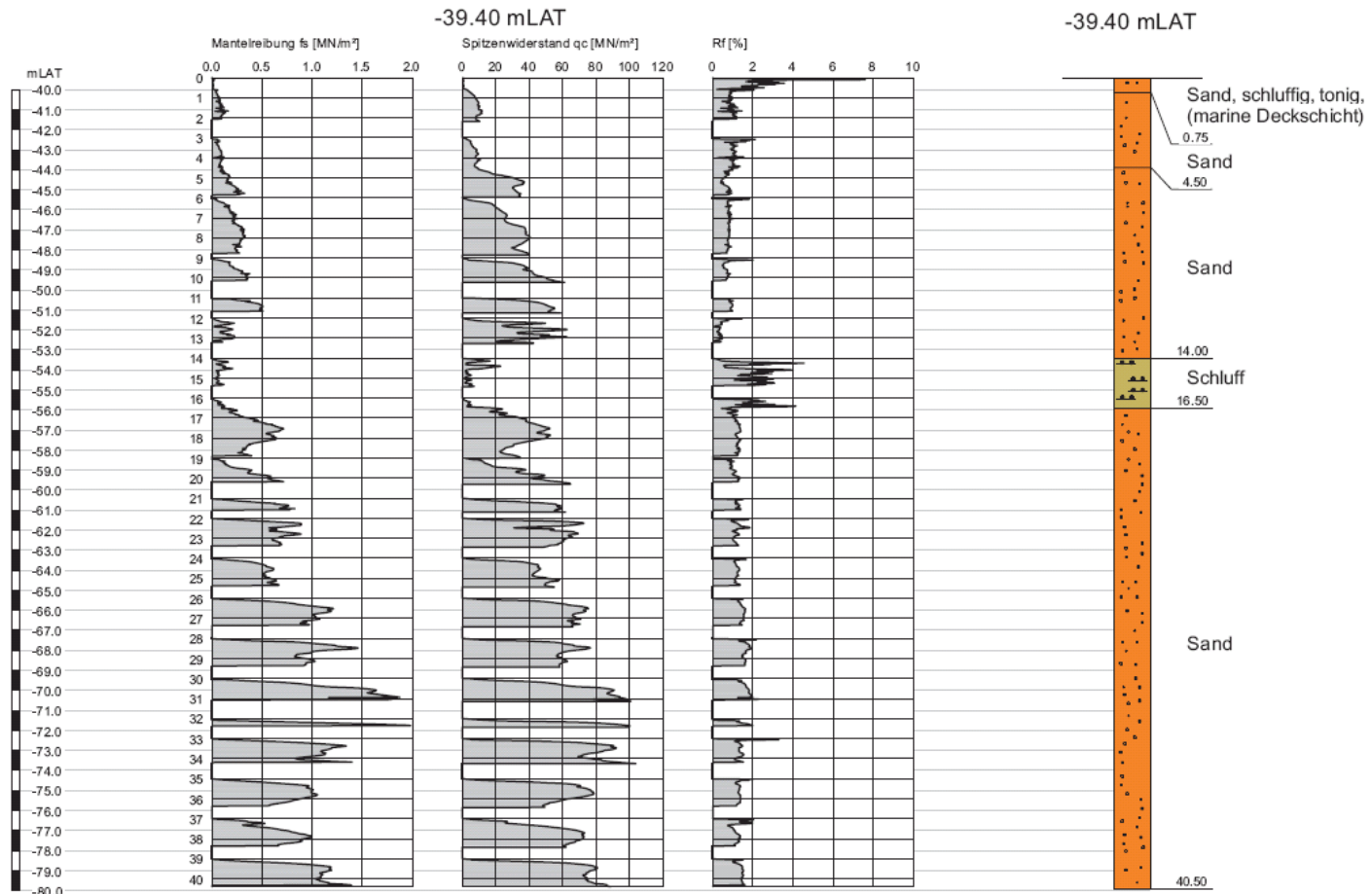
Schnitt D - D



nach Sindowski (1970)



# Baugrundbedingungen in der deutschen Nordsee



# SDM-Verfahren - Ergebnisse

