

# Pælefundering i DK år 2010 – en anakronisme?

ved  
Frands Haahr

# Anakronisme

Henføring af noget til urigtig tid.  
(Gyldendals fremmedordbog, 6. udg.)

# Poulos (2000)

Terzaghi (1951): "...foundation engineering has definitely passed from the scientific state into that of maturity .... one gets the impression that research has outdistanced practical application, and that the gap between theory and practice still widens".

# Poulos (2000) cont.

The gap to which Terzaghi referred is far greater now, almost fifty years later, and it would seem appropriate that a major effort be mounted for the beginning of the new millennium to assess the current state of practice in various aspects of foundation engineering, and incorporate relevant aspects of modern research and state of the art knowledge into practice.

# EN1997-1 DK NA:2008

Er håbløs forældet, i relation til tidligere tidligere danske normer (fx 1952 Normen) samt i forhold til EC7:

- 1) Beregning af overflademodstand for rammede pæle er ikke i overensstemmelse med eksisterende viden (belastningsforsøg)?
- 2) Overflademodstand for borede pæle = 30% af overflademodstanden for rammede – er det også korrekt?

# EN1997-1 DK NA:2008

3) Ingen differentiering af korrektionsfaktoren,  $\xi$ , som funktion af antal prøvede pæle,  $n$  (som fx i EC7 og i Sveriges NA)

Tabel A.11 i EN1997-1 DK NA:2008

$$R_{c,k} = R_{c,m} / \xi$$

$\xi = 1,5$  (rammeformel)

$\xi = 1,25$  (rammeformel + stødbølgemålinger)

$\xi = 1,4$  (stødbølgemålinger)

# EN1997-1 DK NA:2008

4)  $\gamma_{cu} = 1,8 \cdot K_{FI}$  ved beregning af jordtryk og stabilitet?

(I det omfang det dokumenteres, at brudmåden for den undersøgte geotekniske konstruktion er varslet med bæreevnereserve, kan der regnes med  $K_{FI} = 1.0$ )

**(største kalamitet begået af noget normudvalg siden 1893)**

# 1. Overflademodstand for rammede pæle i ler

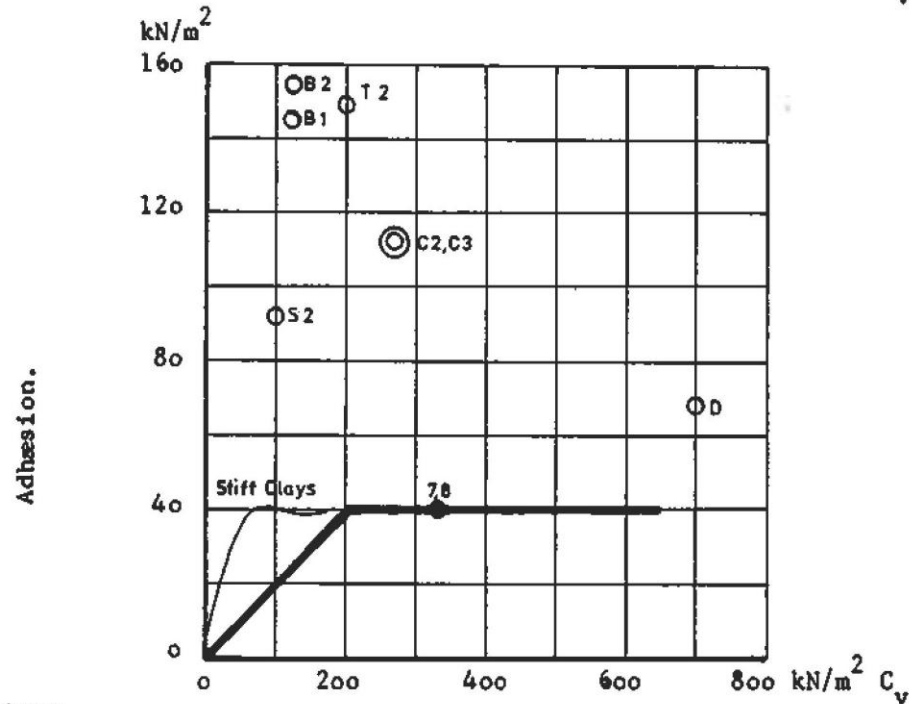
Regenerationsfaktoren  $r = 0,4$  er for konservativ (alt for robust design), for styrker i intervallet  $c_u \leq 500 \text{ kN/m}^2$ .

Der må alt andet lige kunne opstilles udtryk for  $r = f(c_u)$  gældende i DK, som anbefalet i de amerikanske beregningsmetoder.



## 2. Overflademodstand for borede pæle

Bennick, COWI  
(NGM 1975)  
'Fiskebækbroen'



Noter:

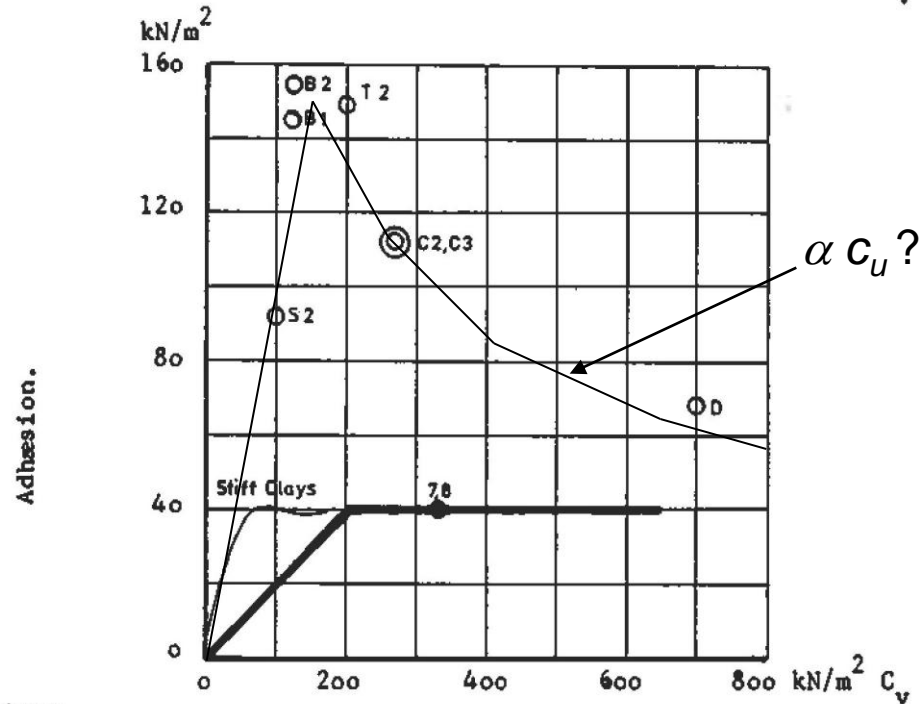
- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1-6 = Fiskebæk stempelforsøg | C = New Biology Sciences Lab. Chicago   |
| 7 = Fiskebæk adhæsionsforsøg | T = Leaside Towers Ontario              |
| 8 = Kombineret forsøg        | S = Saskatoon Campus Univ. Saskatchewan |
| D = DGI rapport K72226/3     | B = Brookfield, Nova Scotia             |
| ● = Boring med foringsrør    | Stiff Clays = Tomlinson, M. J.          |
| ○ = Boring uden foringsrør   |   |

Fig. 4

# 2. Overflademodstand for borede pæle

K. Bennick,  
COWI  
(NGM 1975)  
'Fiskebækbroen'

Re-tolkning  
2010-FrH



Noter:

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1-6 = Fiskebæk stempelforsøg | C = New Biology Sciences Lab. Chicago   |
| 7 = Fiskebæk adhæsionsforsøg | T = Leaside Towers Ontario              |
| 8 = Kombineret forsøg        | S = Saskatoon Campus Univ. Saskatchewan |
| D = DGI rapport K72226/3     | B = Brookfield, Nova Scotia             |
| ● = Boring med foringsrør    | Stiff Clays = Tomlinson, M. J.          |
| ○ = Boring uden foringsrør   |   |

Fig. 4

## 2. Overflademodstand for borede pæle

Resultater af belastningsforsøg på borede pæle for Fiskebækbroyen i 1975:

- Standarden af borede pæle udført i DK er for lav?
- Er danske entreprenører ikke dygtige nok?
- Efteruddannelse af entreprenører i USA?
- Efteruddannelse af ingeniører i USA?

## 2. Overflademodstand for borede pæle

Møde i DGF 1979-05-21 (Lymon C. Reese, Univ. of Texas, Austin, USA):

Trods væsentlige forskelle i installationsmetoden og dermed spændingstilstanden i jorden findes ikke signifikant forskellige overflademodstande på borede og rammede pæle!

## 2. Overflademodstand for borede pæle

Eftervisning af Lymon C. Reese's påstand kan evt. dokumenteres ved at samle eksisterende statiske og dynamiske belastningsforsøg udført i DK

- a) Belastningsforsøg med borede pæle på Motorring 3 ?
- b) .....

# 3. Differentierede partialkoefficienter

I 1988 blev der på mødet i DGF 8. september foreslået en differentiering af partialkoefficienter ved forskellige forsøgstyper.

Rikard Skov, Centrum Pæle

Hans Denver, DGI

Per Lagoni, Lic-Consult

### 3. Forslag til partialkoefficienter, Møde i DGF, 1988

Forsøgstype	Partialkoefficient, f
Prøvepæl	1,4
Prøvepæl + Rammeformel	1,6
Rammeformel	2,0
PDA	1,6
PDA + Rammeformel	1,8

# 3. Forslag til partialkoefficienter

De i 1988 opstillede forslag til differentierede partialkoefficienter (afhængige af prøvningsmetoden) er delvist implementeret i NA, Tabel A.11 (EN 1997-1 DK NA:2008).



### 3. Differentierede partialkoefficienter

Hvorfor ingen afhængighed af  $n$  (antal prøvede pæle)?

Tabel A.9, A.10 og A.11 i  
EN 1997-1 DK NA:2008

Ingen korrelationsfaktorer,  $\xi_i(n)$ , for pæle

$\xi_5$  = middelværdi af  $R_{c,m}$  i dynamiske belastningsforsøg

$\xi_6$  = minimumværdi af  $R_{c,m}$  i dynamiske belastningsforsøg

# 3. Differentierede partialkoefficienter?

EN1997-1:2008

EC7

Table A.11 - Correlation factors  $\xi$  to derive characteristic values from dynamic impact tests<sup>a, b, c, d, e</sup> ( $n$  - number of tested piles)

$\xi$ for $n =$	$\geq 2$	$\geq 5$	$\geq 10$	$\geq 15$	$\geq 20$
$\xi_5$	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
$\xi_6$	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

<sup>a</sup> The  $\xi$ -values in the table are valid for dynamic impact tests.

<sup>b</sup> The  $\xi$ -values may be multiplied with a model factor of 0,85 when using dynamic impact tests with signal matching.

<sup>c</sup> The  $\xi$ - values should be multiplied with a model factor of 1,10 when using a pile driving formula with measurement of the quasi-elastic pile head displacement during the impact.

<sup>d</sup> The  $\xi$ -values shall be multiplied with a model factor of 1,20 when using a pile driving formula without measurement of the quasi-elastic pile head displacement during the impact.

<sup>e</sup> If different piles exist in the foundation, groups of similar piles should be considered separately when selecting the number  $n$  of test piles.

EN1997-1 DK NA:2008  $R_{c,k} = R_{c,m} / \xi$  [ $\xi = 1,5$  (rammeformel),  
 $\xi = 1,25$  (rammeformel + PDA) og  $\xi = 1,4$  (PDA) ]

# 4. Jordtryk og stabilitet

Jordtryk i DK bestemmes efter EPC 53 af JBH med deraf tilknyttede partialkoefficienter, dvs.:

$\gamma_{cu} = 1,5$  (intet belæg for at hæve  $\gamma_{cu}$  til 1,8)

$\gamma_c = 1,5$  (nedsættelse af  $\gamma_c = 1,2$  er ikke dokumenteret ved forsøg).

$\gamma_{\tan\phi} = 1,2$

# 4. Konsekvens af $\gamma_{cu} = 1,8 \cdot K_{FI}$

**EPC74a (udrænnet med  $r = 1,0$  ??? og  $K_{FI} = 1.0$ ):**

Ca. 277% større ankerkraft, ca. 645% større moment og ca. 256% længere spuns !

**EPC74b (udrænnet med  $r = 1,0$  ??? og  $K_{FI} = 1.0$ ):**

Ca. 51% større ankerkraft, ca. 80% større moment og ca. 20% længere spuns.

**Fredericia Kaj 19 (plastisk ler, udrænnet tilstand dimensionsgivende – totalstabilitet og  $K_{FI} = 1.0$ ):**

Ca. 8% større ankerkraft, ca. 43% mere stål i spuns samt større afstand mellem den dobbelte spunsvæg og større udskiftning med sandfyld. Resultat: DS415:1998 blev benyttet ved design.

# Normudvalg

Har normudvalgene været for passive de  
seneste 30 år mht. at lytte  
til DGF's medlemmer og omverdenens  
ønsker om forbedringer af  
pæledesign?

JA

# Fremtidens pæledesign

Hvad kan normudvalget kapere af forbedringer / nytænkning, når det gælder design af pæle?

- 1) Overflademodstand for rammede pæle ?
- 2) Overflademodstand borede pæle ?
- 3) Variabel  $\alpha$ -værdi [ $\alpha = m \cdot r = f(c_u)$ ] ?

# Fremtidens pæledesign

Hvad kan normudvalget kapere af forbedringer / nytænkning, når det gælder design af pæle?

4) Differentierede partialkoefficienter ?

- Prøvningsmetode (~OK – Tabel A.11)
- Antal prøvede pæle,  $n(\xi_1, \xi_2, \xi_5, \xi_6)$

# Tværbelastede pæle

P-y kurver for beregning af tværbelastede pæle - forældet teori?

- 1) Empiri (API, DNV, Reese, Matlock, etc.)
- 2) 3D FEM (kræver korrekt jordmodel)
- 3) Fuldskalaforsøg?
- 4) Centrifugeforsøg med pæle i vandmættet sand og ler (DTU og udland)



# Monopæle

Tværbelastning af monopæl  
på Horns Rev I

(Christian LeBlanc Thilsted,  
DONG Energy, 2009-11-12)

På en instrumenteret monopæl var de målte  
horisontale udbøjninger 30-50% mindre end  
de beregnede?

Er en monopæl en pæl?

# Monopæle

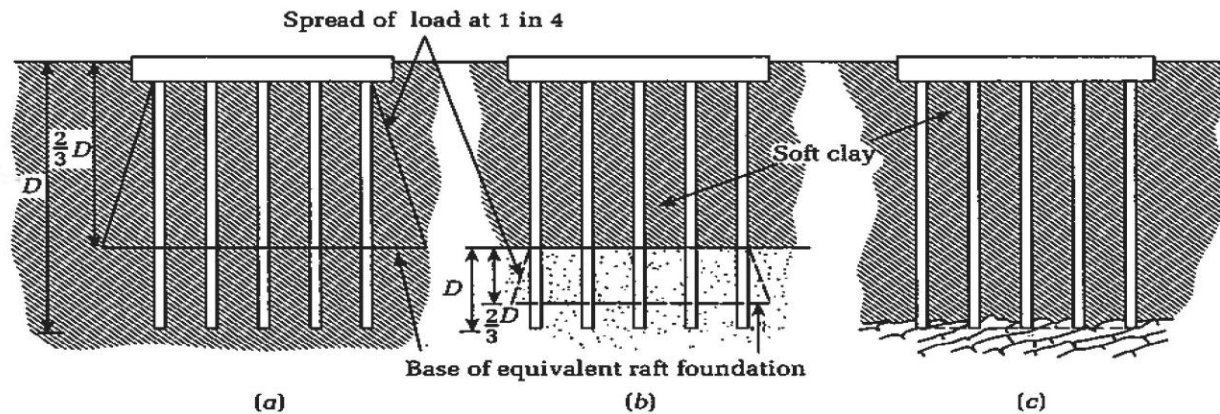
Forbedrede beregningsmetoder for sand, ler, kalk og 'weak rock'

- 1) 3D FEM (med korrekt jordmodel – svært).
- 2) Flere instrumenterede pæle (DONG, E.ON, Energinet.DK, Vattenfall, etc.).
- 3) Centrifugeforsøg med monopæle i vandmættet sand og ler (DTU og udland).

# Pælegrupper

Bæreevne eller sætninger dimensionerende for pælegrupper – hvornår blokbrud?

308 Piled foundations 1: the carrying capacity of piles/pile groups



**Figure 7.27** Load transfer to soil from pile groups. (a) Group supported mainly by skin friction. (b) Group driven through weak clay to combined skin friction and end-bearing in stratum of dense granular soil. (c) Group supported in end-bearing on hard incompressible stratum.

M.J. Tomlinson (2001)

# Pælegrupper

Gruppevirkning for lodret og vandret belastning (sætninger):

- 1) Teori (Poulos, Randolph, .....
- 2) Empiri
- 3) 2D FEM
- 4) 3D FEM

# Pælegrupper

Gruppevirkning for lodret- og tværbelastning (sætninger/deformationer):

- Sætningerne overvurderes med en faktor 2 (H.G. Poulos, 1989).
- Samme forhold for tværbelastning?
- Bedre resultater med M.F. Randolph's teori?
- Bestemmelse af E-moduler kan forbedres.

# In situ forsøg

Hvilke in situ forsøg skal anvendes for dimensionering af pæle?

- 1) Geotekniske boringer med prøveudtagning for forsøg i laboratoriet + SPT-forsøg.
- 2) CPT-forsøg (alternativ i sand).

# Laboratorieforsøg

Hvilke laboratorieforsøg (hvis nogen) skal udføres, for at opnå et optimeret design?

- 1) CAU-forsøg på ler.
- 2) (CID-forsøg på sand).
- 3) Cykliske forsøg for fastlæggelse af cyklisk degradering (ler og silt), hvis litteraturen ikke er fyldestgørende.

# Konklusion

- Nationalt Anneks EN 1997-1 DK NA:2008 skal revideres, så den afspejler nutidige partialkoefficienter
- Dimensioneringsmetoder for pæle trænger til en opdatering
- Flere instrumenterede monopæle
- Centrifugeforsøg med tværbelastede pæle
- 3D FEM-beregninger er fremtiden