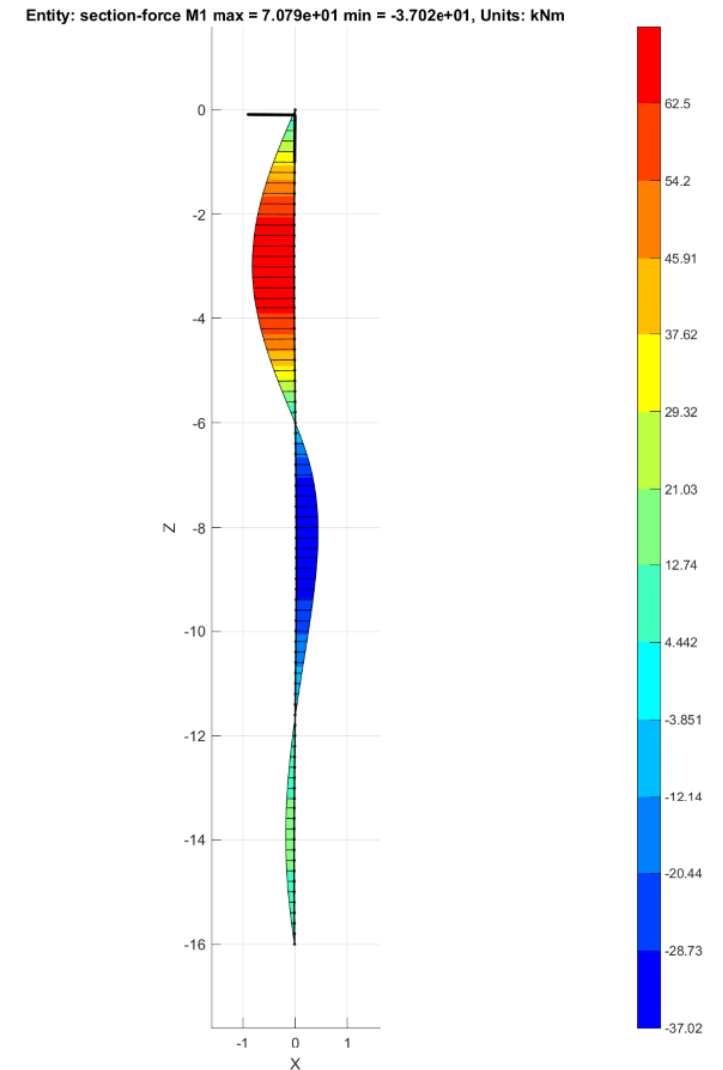


# 20-05 Fri knäckning av pålar

- Arbetsgruppen består av:
  - Victor Karlovskis – Soiltech
  - Anna Björklund – Skanska
  - Jimmie Bonifácio Andersson – Peab
  - Christoffer Svedholm – ELU har hjälpt till med specifika FEM-analyser.
- Referensgrupp:
  - Gunnar Holmberg – Skanska
  - Peter Alheid – Hercules
  - Simon Håkansson – ELU
  - Pålkommssionens styrelse
- Status: På god väg och pågår i något stympad form



# Vad har vi gjort så här långt?

- Sammanställt det som redan finns framtaget i
  - Pålkommisionens rapporter (PKR 84, 90, 96, 98, 104 och 108)
  - Pålkommisjonenens kurser kring påldimensionering
  - Handboken bygg – Geoteknik
- Identifierat fall där pålar normalt kan behöva betraktas som fria
  - Lösa jordlager som bottensediment, dy, torv eller i vissa fall lättfyllnadsmaterial
    - Rekommendationer finns till viss del framarbetade inom rapporten
- Stort fokus på att förtydliga hur viktigt det är att randvillkor uppfylls
  - Ett försök att belysa hur mycket knäcklängd och liknande slår på dessa beräkningar
- Baserat på detta har vi sedan gjort några jämförande beräkningar och tagit fram rekommendationer för projektering av fria pålar
- Djupdykt i detaljer
- Fokus på stålplålar (främst stålrör), men betongplålar berörs delvis i rapporten

# Föreslagna dimensioneringsmetoder

- 1: Totalsäkerhetsmetoden enligt handboken bygg (enbart för grova överslag)
- 2: Analytiska beräkningar
  - A) Beräkning enligt Eurokod med hantering av andra ordningens effekter genom val av knäckkurva
  - B) Beräkning enligt klassisk byggnadsmekanik med förstoring av andra ordningens effekter
    - Egenspänningar och initialkrokigheter enligt PKR 84/96
- 3: FEM-Analyser
  - A) Fullständig FEM-analys med beaktande av egenspänningar osv.
  - B) "Enklare" analys med ramprogram eller liknande

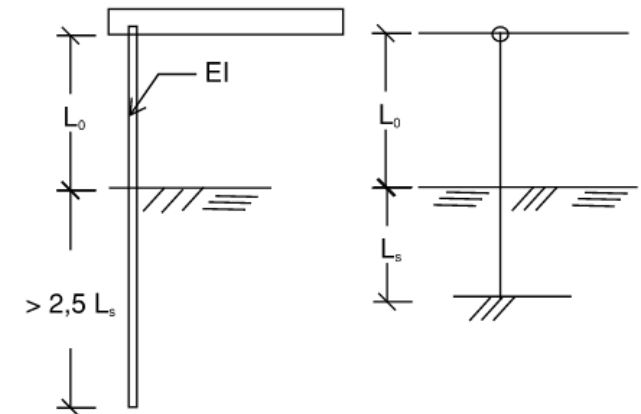
# 1: Totalsäkerhetsmetoden

- Detta är en enkel metod som enbart bör användas i tidiga skeden som överslag, alternativt vid anbudsdimensionering
- Djupet till fast inspänning beräknas enligt Handboken bygg – Geoteknik och knäcklängden väljs baserat på inspänningsförhållanden
- Baserat på knäcklängd och Eulerknäckfall beräknas den kritiska knäcklasten  $P_k$  ( $N_{cr}$ )
- Dimensionerande bärförmåga kan sedan uppskattas med hjälp av en totalsäkerhetsfaktor på 2,7.

$$N_{Rd.överslag} = \frac{P_k}{2,7}$$

$$L_s = 1,4 \cdot \sqrt[4]{\frac{EI}{kd}}$$

$$L_s = 1,8 \cdot \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}}$$



## 2A: Dimensionering enligt Eurokod

- Inspänningsdjup och knäcklängd beräknas med ekvationer enligt Handboken bygg – Geoteknik och lämpligt Eulerknäckfall
- Bärförmågan kan sedan beräknas enligt ekv. 6.47, SS-EN 1993-1-1 (6.3.1.1 Bärförmåga vid instabilitet)

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{Tvärsnittsklass 1,2 och 3})$$

- Reduktionsfaktorn för knäckning ( $\chi$ ) beräknas enligt enl. 6.3.1.2, SS-EN 1993-1-1

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} \quad \text{dock } \chi \leq 1, \quad \Phi = 0,5[1 + \alpha \cdot (\lambda - 0,2) + \lambda^2] \quad \lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

- Vid tillskottsmoment från extern last kompliceras allt en aning. Kontroll utförs enligt ekvation 6.62, avsnitt 6.3.3, SS-EN 1993-1-1

$k_{zz}$  måste beräknas med fler formler

$$\frac{N_{Ed}}{\chi(z) \cdot N_{Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{tillskott.z}}{M_{z,Rk}} \leq 1,0 \quad z \text{ avser vek riktnin}$$

- Fördelar: Följer gällande regelverk till punkt och pricka givet att man utför dimensionering rätt
- Nackdel: Svårt att välja knäckkurva med hänsyn till svensk praxis

## 2A: Dimensionering enligt Eurokod – viktiga saker att notera

- Eurokoden utför dimensionering för tvärsnittsklass 1 och 2 fullt plastiskt
  - Inte så vanligt för pålar – fria pålar är dock mer pelare än påle, givet att inspänningen har skattats korrekt
- Det krävs att en knäckkurva väljs,  $a_0-d$ 
  - Finns svårigheter att översätta antalet skarvar och krav på rakhet till en knäckkurva
  - Kallformat/Varmvalsat påverkar till stor del, men även rakheten
- Eurokoden tar hänsyn till egenspanningar i stålet, E-modulen för stål skall således **INTE** reduceras med 10 % till 189 GPa, utan 210 GPa ska användas
- Om stålröret är betongfyllt används anvisningarna i PKR108
- Med en påle som inte utsätts för externa krafter beräknas knäcklasten direkt utan att ett tillhörande moment erhålls via vald knäckkurva. Denna imperfektion är inkluderad i beräkningen enligt Eurokod.
  - Detta synsätt (att reducera bärförmågan) skiljer sig mot hur vi traditionellt har beräknat pålar, där vi jämför ett förstorat moment och normalkraft med den "oreducerade" bärförmågan för tvärsnittet

# 2A: Dimensionering enligt Eurokod – Val av knäckkurva

- Stor förvirring i Eurokoden kring val av knäckkurva
- 1993-5 (Stålpålar och spont):  
*” ANM. Knäckningskurva d tar hänsyn till imperfektioner från påslagning på upp till 0,5 % vilket anses vara praxis.”*
- 1993-1-1:

b) relativ initialkrokighet för böjknäckning av bärverksdelar  
 $e_0 / L$   
 där  
 $L$  är bärverkets längd  
 ANM. Värden för  $e_0 / L$  kan anges i den nationella bilagan. Rekommenderade värden ges i Tabell.

Tabell 5.1 – Dimensioneringsvärden för initialkrokighet  $e_0 / L$

Knäckningskurva enligt tabell 6.1	elastisk analys	plastisk analys
	$e_0 / L$	$e_0 / L$
$a_0$	1 / 350	1 / 300
a	1 / 300	1 / 250
b	1 / 250	1 / 200
c	1 / 200	1 / 150
d	1 / 150	1 / 100

(5.6) Tabell 6.2 – Val av knäckningskurva för ett tvärsnitt

Tvärsnitt	Gränsvärden	Knäckning kring	Knäckningskurva	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
	$h/b > 1.2$	y-y	a	$a_0$
		z-z	b	$a_0$
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y	b	c
		z-z	c	c
$h/b \leq 1.2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	c
	z-z	c	c	
$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d	d	
	z-z	d	d	
	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	b	c
	z-z	c	c	
$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y	c	c	
	z-z	d	d	
	varmformat eller avspänningsglödgat	båda	a	$a_0$
	kallformat	båda	c	c

	varmformat eller avspänningsglödgat	båda	a	$a_0$
	kallformat	båda	c	c

- 1994-1-1:

Tabell 6.5 – Knäckningskurvor och initialkrokighet för samverkanspelare

Tvärsnitt	Gränser	Knäcknings-axel	Knäcknings-kurva	Initial-krokighet
		y-y	b	$L/200$
		z-z	c	$L/150$
		y-y	b	$L/200$
		z-z	c	$L/150$
	$\rho_s \leq 3\%$	alla	a	$L/300$
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$	alla	b	$L/200$

Betongfyllt rör	$\rho_s \leq 3\%$	alla	a	$L/300$
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$	alla	b	$L/200$

## 2A: Dimensionering enligt Eurokod – Vad har vi kommit fram till?

- Preliminära resultat! Men det är här vi står nu:
- Vid  $L_k/300$  som initialkrokighet stämmer knäckkurva c väldigt bra med beräknade bärförmågor från andra metoder
- Vid  $L_k/200$  som initialkrokighet blir, i brist på bättre, valet knäckkurva d.
- Vid rakare påle behöver en särskilt utredning utföras om man vill välja en rakare knäckkurva än c
  - Viktigt att hänsyn tas till om pålen är betongfylld eller ej samt till hur pålen är tillverkad (varmvalsad eller spiralsvetsad) samt vilken stålqualité som används.

## 2B: Dimensionering enligt klassisk byggnadsmekanik

- Beräkna djup till fast inspänning och knäcklängd
- Ansätt vilken intialkrokighet pålen dimensioneras för
  - Detta medför att initialutböjningen (pilhöjden) kan beräknas enligt:

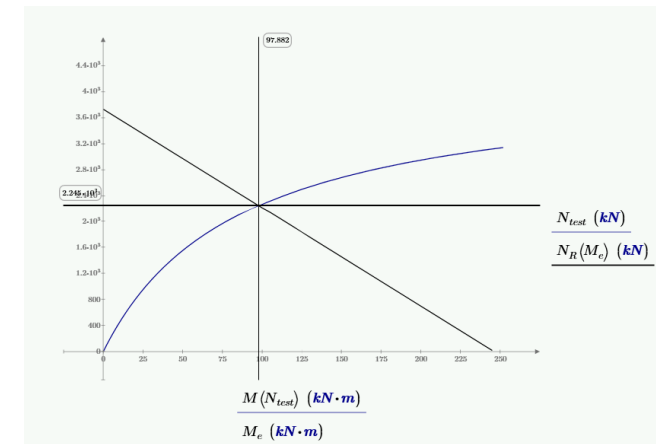
$$y_0 = \frac{L_k}{200} + 0,0013 \cdot L_k$$

OBS! Utan hänsyn till tillskottsmoment påverkan på utböjningen. Ska inkluderas om det finns ett sådant

- Förhållandet mellan moment och normalkraft kan sedan beskrivas enligt:

$$M(N) = N \cdot y_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}}$$

OBS! Utan hänsyn till tillskottsmoment. Ska inkluderas om det finns ett sådant



- Vid svepning för olika N erhålls en lasteffektkurva som liknar den enligt PKR84/96. Denna kan sedan jämföras med påelementets bärförmåga enligt PKR84/96 (rät linje mellan N<sub>rd</sub> och M<sub>rd</sub>)

## 2B: Dimensionering enligt klassisk byggnadsmekanik - viktiga saker att notera

- Vid beräkning av kritisk knäcklast enligt Euler ska stålets E-modul reduceras med 10 % då denna metod inte tar hänsyn till egenspanningarnas inverkan för knäckning
- För att god överensstämmelse ska erhållas mellan denna metod och beräkning enligt Eurokod måste plastisk momentbärförmåga användas för tvärsnittet
  - Strider delvis mot svensk praxis från Pålkommisionen
  - Eurokoden är väldigt tydlig med att det är plastisk bärförmåga som ska användas för TK1 och 2.
- Arbete återstår och referensgruppen måste säga sitt

## 2: FEM-beräkning

- FEM-beräkning används med fördel vid:
  - varierande böjstyvhet längs pålen (avrostning, isskydd, betongfyllning)
  - betydande horisontallaster och tillhörande moment
  - fria pålar med lång fri längd
  - konstruktioner i SK3
  - situationer där påltoppens randvillkor är osäker
- FEM-analysen används för att:
  - kontrollera effektiv knäcklängd och jämföra med analytiska beräkningar
  - studera momentfördelning längs pålen
  - verifiera att jordfjädrar inte överlastas (plasticering av jord)
  - analysera känslighet för:
    - randvillkor i påltopp, eftergivlighet i konstruktionen
    - variationer i jordparametrar
    - fri längd (t.ex. mudderdjup)
    - varierande laster

## 2A: FEM-beräkning med fullständig FEM

- FEM-beräkning med fullständig modell där systemet påle – jord modelleras med finita element:
  - Jordens sidostöd kan varieras längst pålen
  - Skarvarnas egenskaper medtagas
  - Verkliga egenspänningar i pålmaterialet medtagas
  - Plasticering i pålmaterialet tillåtas
  - Aktuell initialkrokighet i pålen medtagas

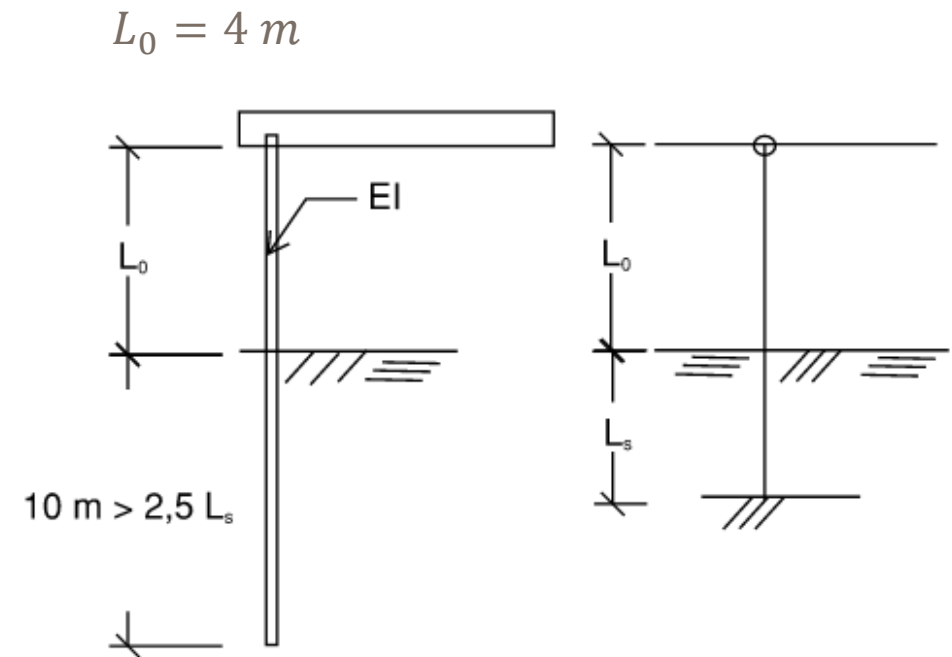
## 2B: FEM-beräkning med ram-program

I ram-programmet modelleras pålen som en balk uppdelad i ett antal element med följande huvudantaganden:

- Geometri
  - Pålens längd modelleras, inklusive fri del och tillräcklig längd i jord (normalt  $\geq 2,5 \cdot L_s$ ).
  - Rekommenderad maximal elementlängd är cirka 0,5 m.
  - Initialkrokighet kan antas vara en kontinuerlig initialkrokighet, t.ex. sinusformad
- Material och tvärsnitt
  - Bøjstyvhet  $EI$  är den samma över pålens längd. Skarvarnas egenskaper bortses ifrån.
  - Med ramanalys där man inte kan begränsa spänningar rekommenderas elastisk.
  - Avrostning och betongfyllning ska beaktas i tvärsnittsegenskaperna.
- Jordmodell
  - Jordens sidomotstånd modelleras med horisontella fjädrar. Fjäderstyvhet bestäms av jordart och skjuvhållfasthet,  $k_{d,fjäder} = k_d \cdot \Delta x$
  - Möjlighet finns att begränsa maximalt mobiliserbart sidotryck för att beakta jordens plasticering.
- Randvillkor
  - Påltopp kan modelleras som fast, ledad, styrd eller med fjädrar.
  - Inspänning i jord representeras genom fjädrar och elementlängden i jord.

# Jämförelse av resultat vid beräkning av samma påle

- Förutsättningar:
  - 220x12,5 mm, S460
  - Pålen är 4 m fri och står sedan i 10 m lera
  - Andelen permanentlast är noll (enbart korttidslast)
  - Pålen är inte betongfylld
  - Pålen är oskarvad eller har rakhetsmått till en rakhet om  $L_k/300$
- Samma påle har sedan analyserats med en fri längd på 6 m och med 100 % permanentlast som känslighetsanalys



Inspänningsdjup enligt Bygg-handboken:

$$L_s = 1,4 \cdot \left( \frac{EI}{k_d} \right)^{1/4}$$

$$k_d = 200 \text{ cud [kN/m/m]}$$

vid korttid

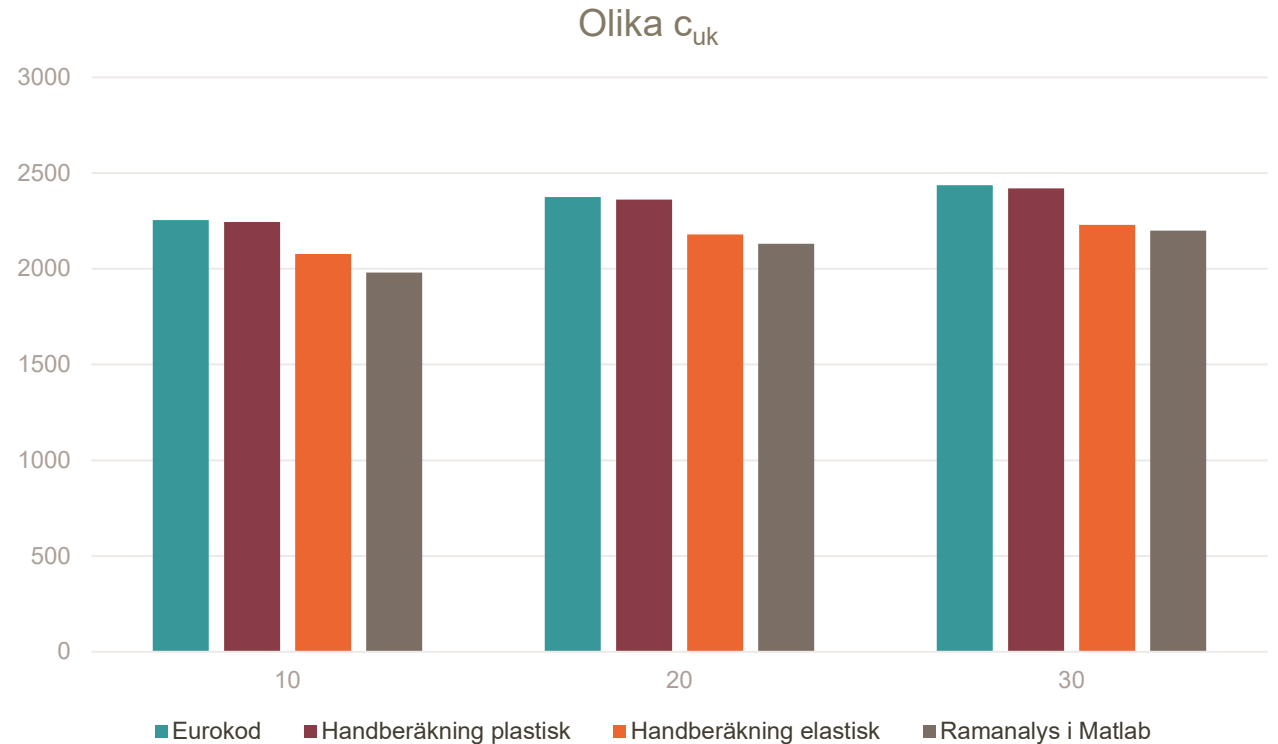
$$k_d = 50 \text{ cud [kN/m/m]}$$

vid långtid

# Resultat olika skjuvhållfasthet (korttid)

Skjuvhållfasthet 10/20/30 kPa (karakteristiskt).

- Beräkning enligt Eurokod och Handberäkning plastisk har båda utförts plastiskt
- Ramanalys i Matlab och Handberäkning elastisk har utförts elastiskt
- Eurokod och Handberäkning plastisk ger i princip samma resultat, det skiljer enbart några kN

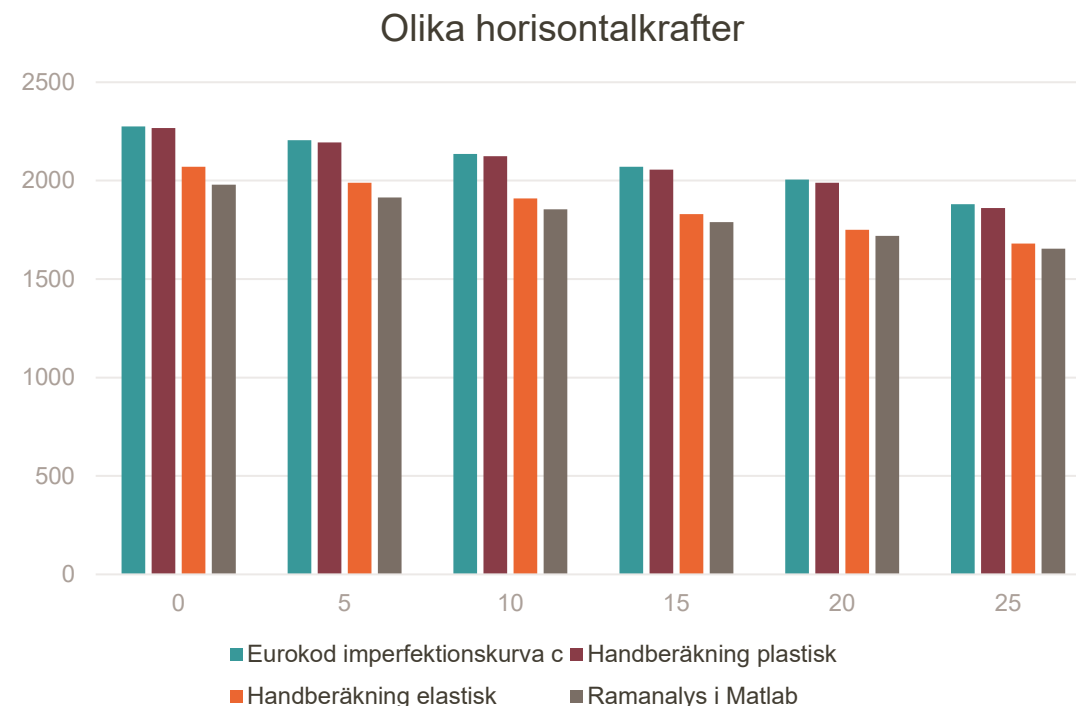


# Resultat olika horisontallaster (korttid)

Beräkning med horisontallast har enbart utförts med 10 kPa som skjuvhållfasthet

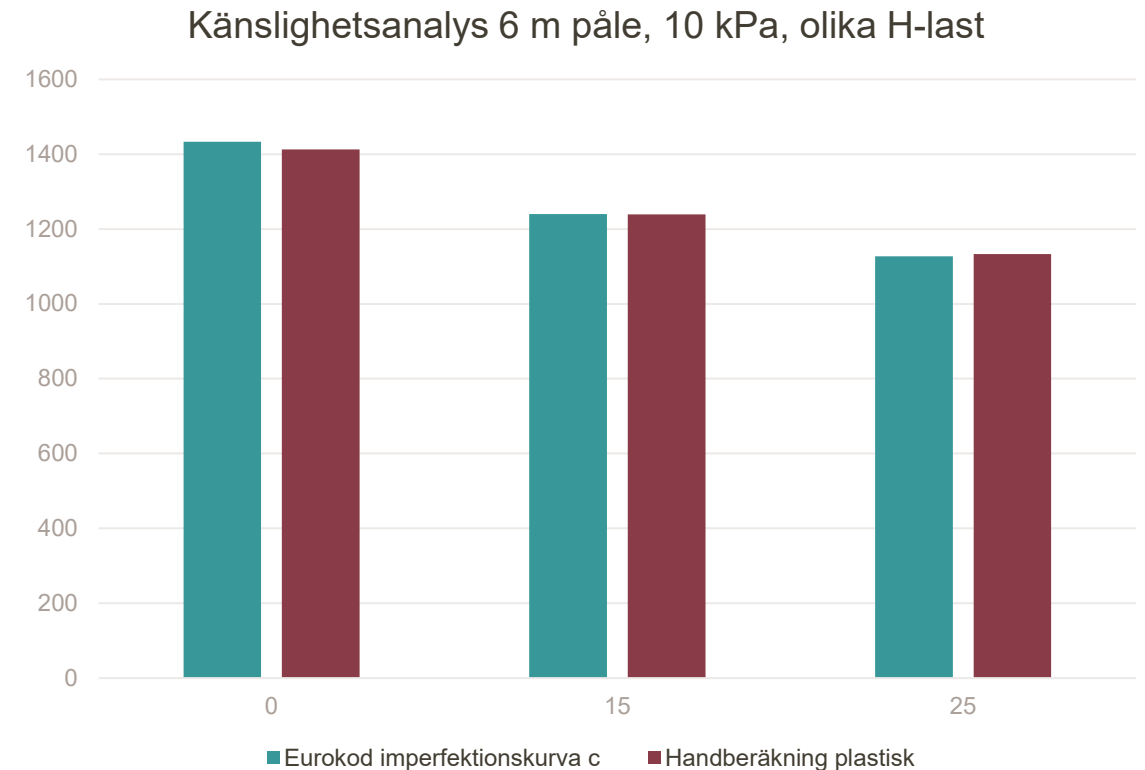
Horisontlasten angriper 2 m under PAP, 0-25 kN i steg om 5 kN

- Samma beteende med horisontallast, de plastiska beräkningarna får en högre bärförmåga
- Vid höga horisontallaster trycks djupet till fast inspänning ner i FEM-modellen. Detta fångas inte riktigt i handberäkningen
  - Man behöver tänka till kring handberäkningen vid höga H-laster!
- En kontrollberäkning har utförts med elastiska parametrar på handberäkningarna (25 kN i H-last). För eurokod erhöles 1810 kN och vid beräkning enligt klassisk byggnadsmek. erhöles 1666 kN
  - Detta kan jämföras med FEM-beräkningen som ger 1655 kN
  - Eurokoden ser för detta fall ut att vara avsevärt mindre känslig för horisontallast, utredning pågår.



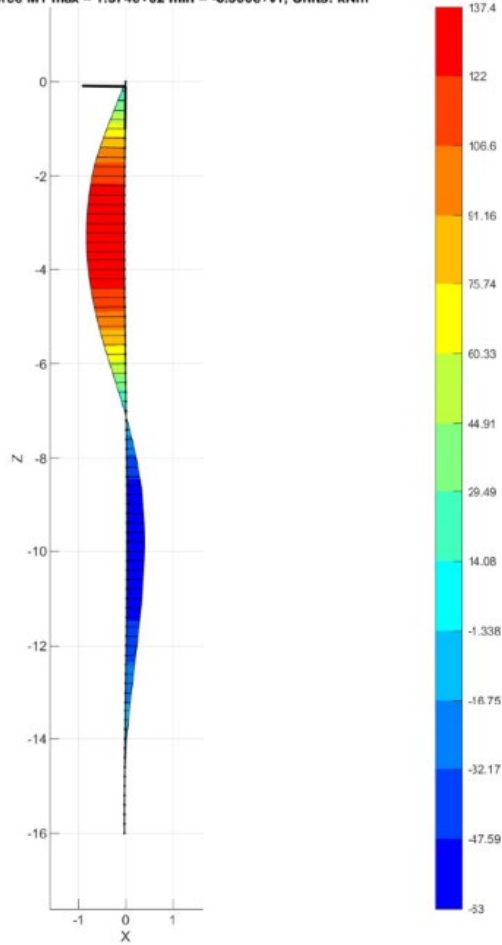
# Resultat 6 m fri påle och 100 % långtidslast enligt Eurokod

- Beräkning enligt Eurokod och Handberäkning plastisk har båda utförts plastiskt
- Handberäkning ligger fortfarande nära varandra i resultat
  - Eurokoden, som brukar vara högst, ligger dock lägre vid 25 kN i H-last
- Notera skillnaden mot 4 m, 100 % korttid. Tappet av bärförmåga är stort.

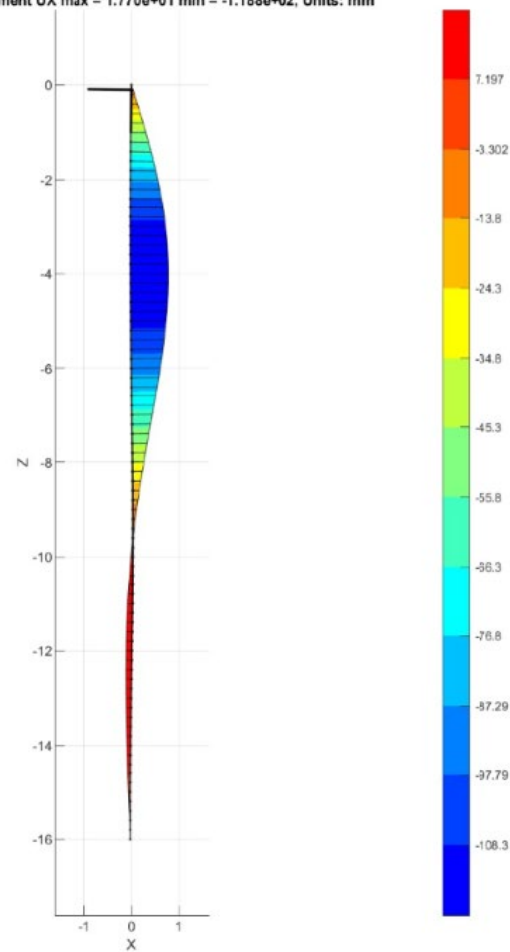


# Resultat 6 m fri påle och 100 % långtidslast med Ram-analys $H = 15 \text{ kN}$ , $N_d = 1030 \text{ kN}$

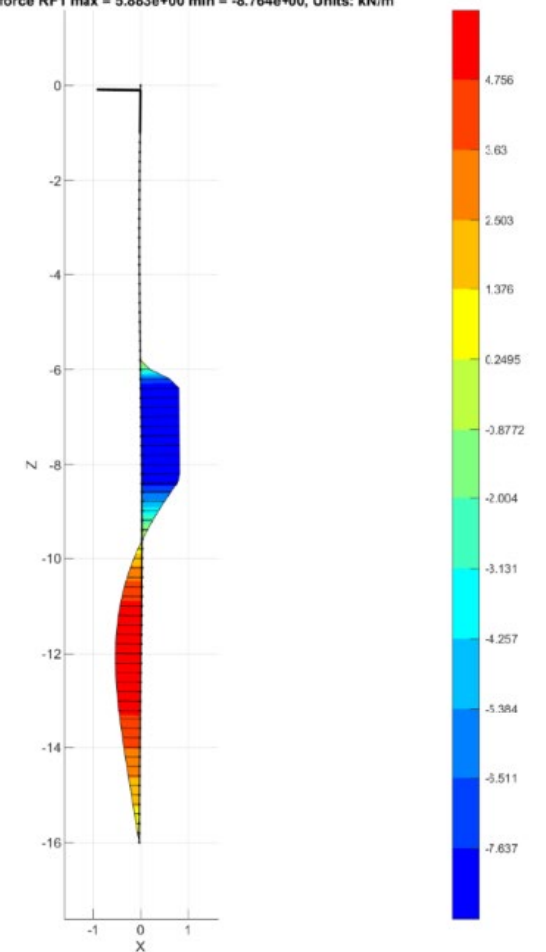
Entity: section-force M1 max = 1.374e+02 min = -6.300e+01, Units: kNm



Entity: displacement UX max = 1.770e+01 min = -1.188e+02, Units: mm

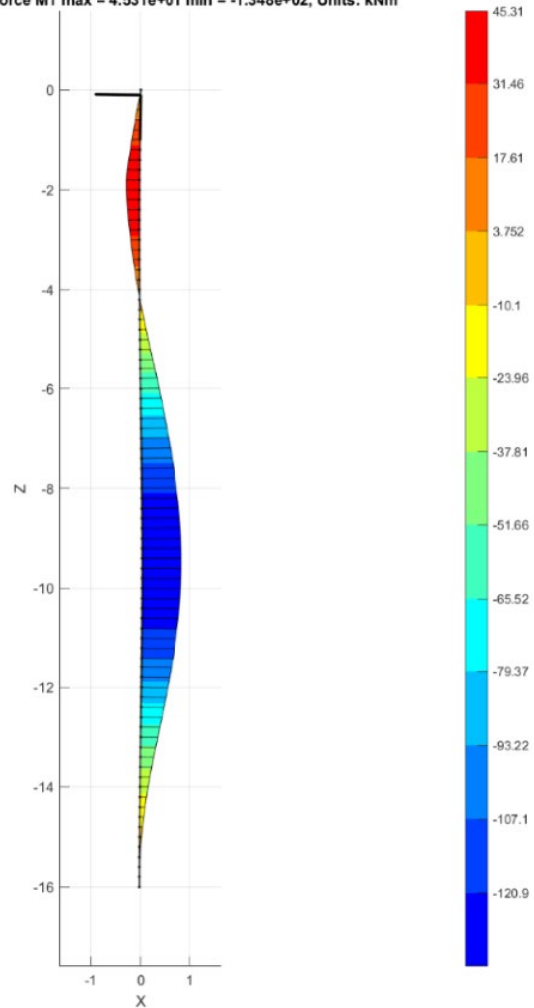


Entity: reaction-force RF1 max = 5.883e+00 min = -8.764e+00, Units: kN/m

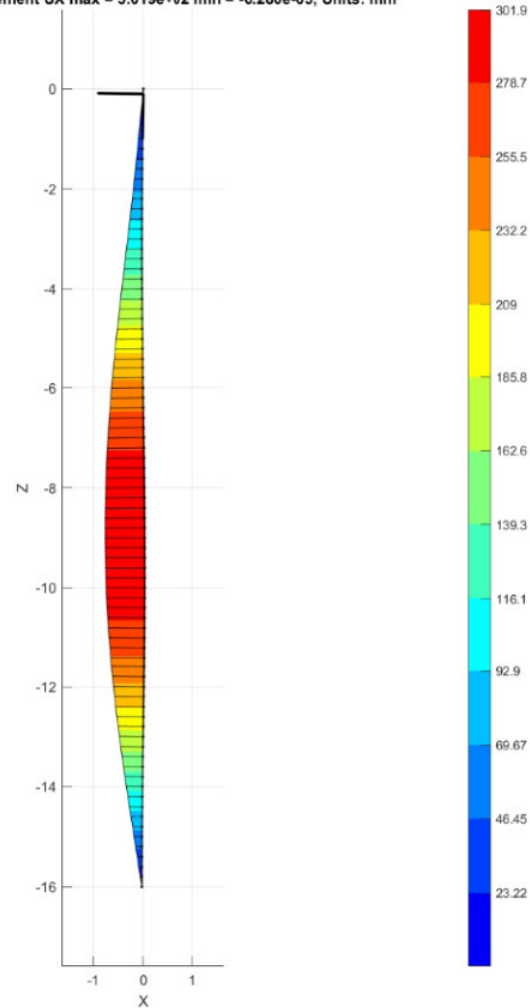


# Resultat 6 m fri påle och 100 % långtidslast med Ram-analys $H = 25 \text{ kN}$ , $N_d = 1030 \text{ kN}$

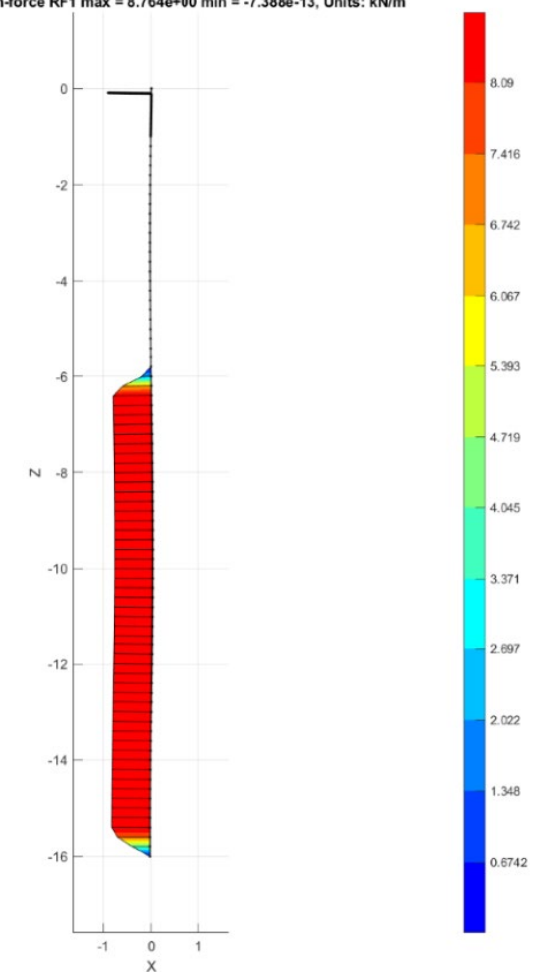
Entity: section-force M1 max =  $4.531\text{e}+01$  min =  $-1.348\text{e}+02$ , Units: kNm



Entity: displacement UX max =  $3.019\text{e}+02$  min =  $-6.280\text{e}-05$ , Units: mm



Entity: reaction-force RF1 max =  $8.764\text{e}+00$  min =  $-7.388\text{e}-13$ , Units: kN/m



# Lite OBS:

- Horisontallaster kan påverka randvillkor

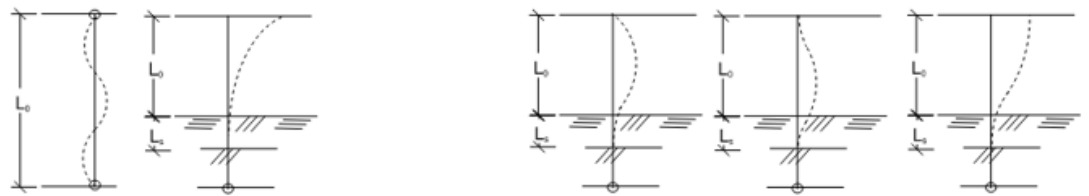
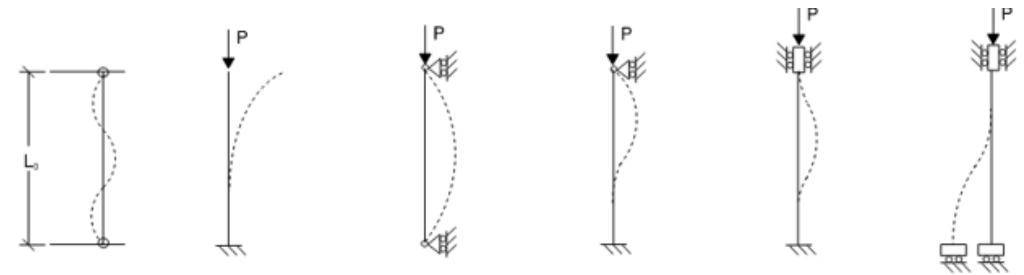
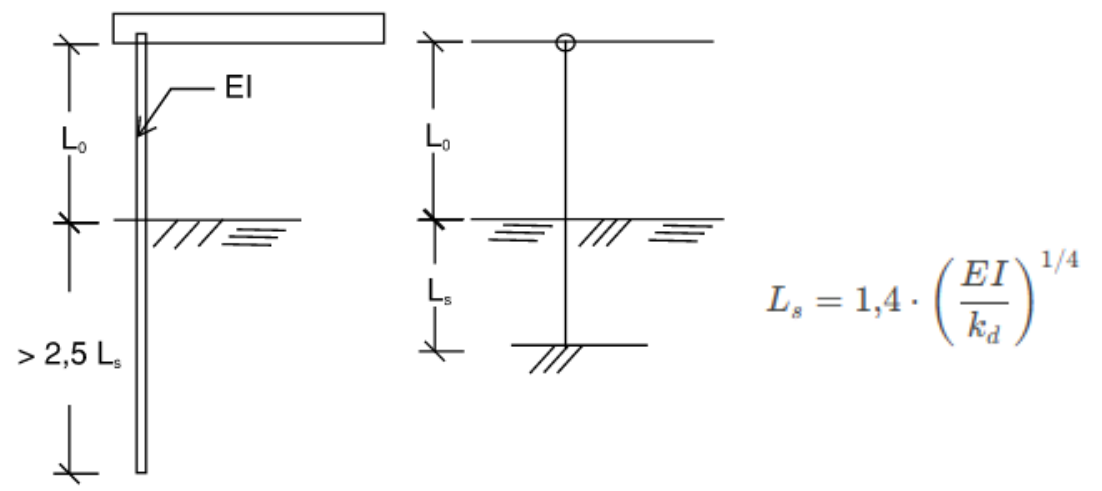
➔ Randvillkor påverkar knäcklängd

$$l_k = \beta L = \beta(L_0 + L_s)$$

- Plasticering i jord kan påverka inspänningsdjup

➔ Har vi då rätt randvillkor?

➔ Är pålen tillräckligt djup slagen för våra antaganden?



Teoretiska värde	$\beta = 2$	$\beta = 0,7$	$\beta = 0,5$	$\beta = 1,0$
Praktiska värden	$\beta = 2,4$ (bör undvikas)	$\beta = 0,8$	$\beta = 0,6$	$\beta = 1,2$ (bör undvikas)

# Vad återstår?

- Sammanställa de sista resultaten i rapporten
- ”Städa” lite i texten
  - Projektgruppen behöver enas om vissa formuleringar och koncept
    - Hantering av styvheter när den är positiv och negativ för olika delar av beräkningen
    - Kan vi finna en tumregel för när en påle kan anses styrd i toppen?
    - Hantering av plastiskt vs elastiskt
- Referensgruppen ska, förhoppningsvis, kunna läsa rapporten relativt snart och komma med synpunkter
- PMet kan släppas och senare inarbetas i pålhandboken