

Möjligheter med samverkanskonstruktioner

Stålbyggnadsdagen 2016

2016-10-26

Jan Stenmark



Samverkanskonstruktioner

Ofrivillig samverkan

Uppstår utan avsikt eller till följd av sekundära effekter

Samverkan i bruksgränstillstånd

Konstruktionen måste klara sig utan samverkan i brottgränstillstånd

Fullständig samverkan

Samverkan mellan stål och betong i alla gränstillstånd

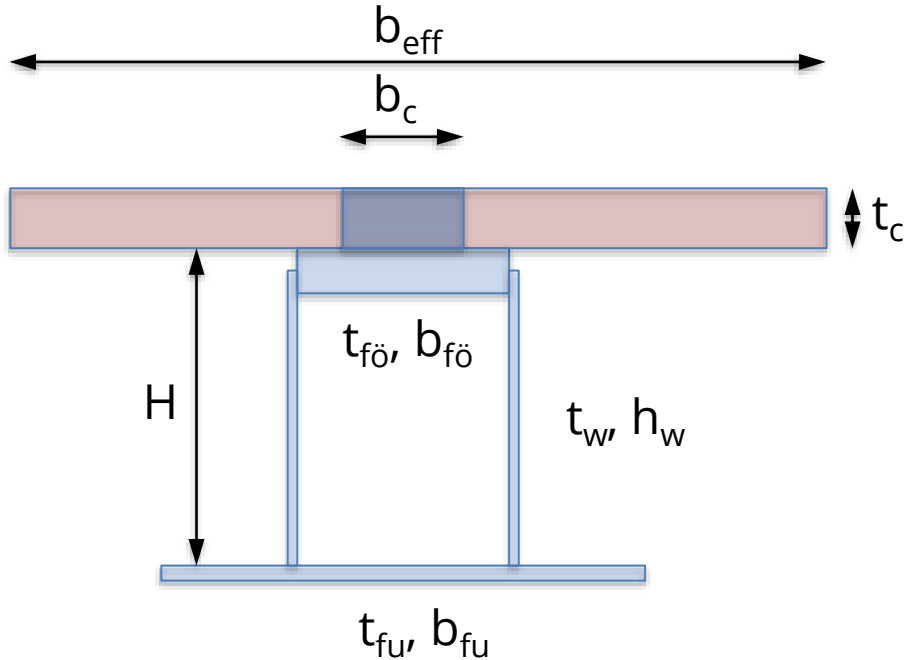
Konstruktionstyper

- Balkar med samverkande pågjutning utan skjuvförbindare
- Betongfyllda stålrör utan armering

Bakgrund

- Eurokod 4 (SS-EN 1994-1-1) Allmänna regler
- Eurokod 4 (SS-EN 1994-1-2) Brandteknisk dimensionering

Hattbalkar med samverkan



- Modulkvoten styr den effektiva bredden är kvoten mellan elasticitetsmodul för stål och betong $b_c = b_{eff}/n$
- Den medverkande flänsbredden beror på spännvidd och upplagsförhållanden

Modulkvoten

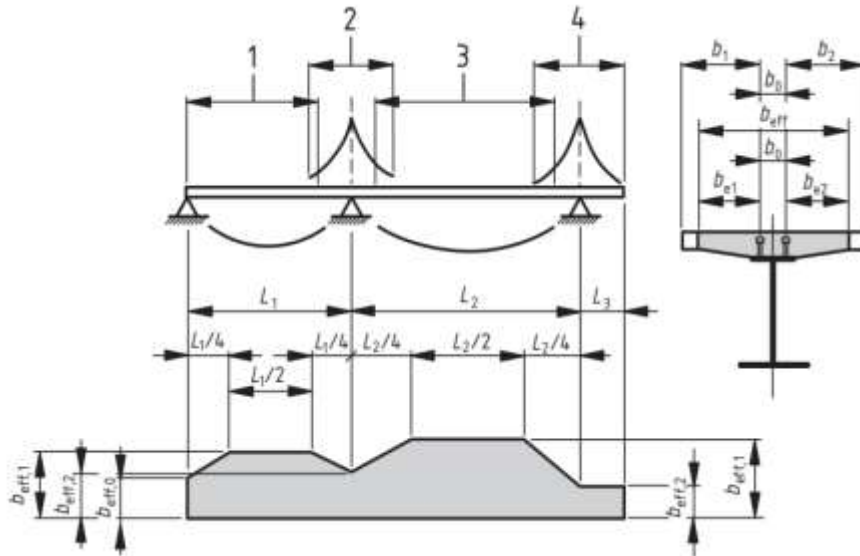
Modulkvoten kan formuleras på olika sätt, se EK4 5.4.2.2:

Generellt
$$n = n_0 \left(1 + \frac{M_G}{M_{Ed}} \varphi(t, t_0) \right) \quad n_0 = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

Förenklat
$$n = n_0 (1 + \psi_L \varphi(t, t_0)) \quad \text{Krypfaktorn } \psi_L = 0.55-1.5$$

Mycket förenklat
$$n = 2n_0$$

Medverkande bredd



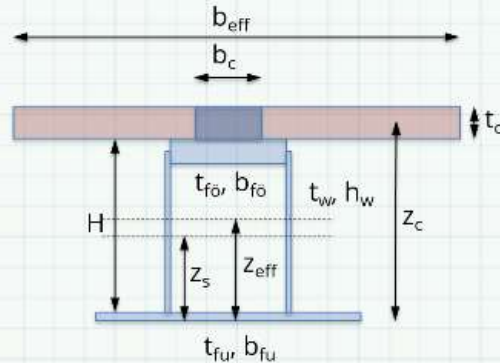
- 1 $L_e = 0,85L_1$ för $b_{eff,1}$
- 2 $L_e = 0,25(L_1 + L_2)$ för $b_{eff,2}$
- 3 $L_e = 0,70L_2$ för $b_{eff,1}$
- 4 $L_e = 2L_3$ för $b_{eff,2}$

- Generellt gäller att
- $b_{eff} = b_0 + 2L_e/8$ vid tryckzon på båda sidor om balken
- L_e är avståndet mellan momentnollpunkterna
- Den medverkande bredden får vid elastisk analys antas vara konstant i varje spann, se 5.4.1.2 (4)
- b_0 är flänsens skjuvarea

Exempel

Tvårsnittsdata för hattbalk

Indata



Systemets tvärsnittsdata

Balkhöjd $H := 250 \cdot \text{mm}$

Stålsort S355 $f_y := 355 \cdot \text{MPa}$

Överfläns $b_{fo} := 200 \cdot \text{mm}$ $t_{fo} := 20 \cdot \text{mm}$

Liv $t_w := 6 \cdot \text{mm}$ $h_w := H - 7 \cdot \text{mm}$

Underfläns $b_{fu} := 440 \cdot \text{mm}$ $t_{fu} := 12 \cdot \text{mm}$

Elastisk spänningsfördelning

$$A_s := b_{fo} \cdot t_{fo} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_{fu} \cdot t_{fu} = 12196 \text{ mm}^2 \quad g := A_s \cdot 7850 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 95.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$z_s := \frac{b_{fo} \cdot t_{fo} \cdot \left(H + t_{fu} + \frac{t_{fo}}{2} \right) + 2 \cdot t_w \cdot h_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + t_{fu} \right) + b_{fu} \cdot \frac{t_{fu}^2}{2}}{2A_s} = 123.7 \text{ mm}$$

$$I_s := b_{fo} \cdot t_{fo} \cdot \left(H + t_{fu} - \frac{t_{fo}}{2} - z_s \right)^2 + b_{fu} \cdot t_{fu} \cdot \left(z_s - \frac{t_{fu}}{2} \right)^2 + 2 \cdot t_w \cdot h_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + t_{fu} - z_s \right)^2$$

$$I_s = (1.39 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Exempel

Böjmotståndet räknas till den mest töjda fibern och den likställs med mittenplanen av respektive fläns, se 6.2.1 (9)

$$e_{\bar{o}} := H + t_{fu} - \frac{t_{f\bar{o}}}{2} - z_s = 128.3 \text{ mm}$$

$$e_u := z_s - \frac{t_{fu}}{2} = 117.7 \text{ mm}$$

$$e_{\min} := \max(e_{\bar{o}}, e_u) = 128.3 \text{ mm}$$

$$W_{el} := \frac{I_s}{e_{\min}} = 1085750 \text{ mm}^3$$

$$\text{Momentkapacitet } M_{el} := f_y \cdot W_{el} = 385.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Plastisk spänningsfördelning

$$z_{pl} := \frac{b_{f\bar{o}} \cdot t_{f\bar{o}} - b_{fu} \cdot t_{fu}}{4 \cdot t_w} + t_{fu} + \frac{h_w}{2} = 80.2 \text{ mm}$$

$$W_{pl1} := b_{f\bar{o}} \cdot t_{f\bar{o}} \cdot \left(H + t_{fu} - \frac{t_{f\bar{o}}}{2} - z_{pl} \right) + b_{fu} \cdot t_{fu} \cdot \left(z_{pl} - \frac{t_{fu}}{2} \right)$$

$$W_{pl2} := 2 \cdot t_w \cdot \frac{(h_w - z_{pl} + t_{fu})^2}{2} + 2 \cdot t_w \cdot \frac{(z_{pl} - t_{fu})^2}{2} \quad W_{pl} := W_{pl1} + W_{pl2} = 1290214 \text{ mm}^3$$

$$\eta := \frac{W_{pl}}{W_{el}} = 1.19$$

Momentkapacitet

$$M_{pl} := W_{pl} \cdot f_y = 458 \text{ kN} \cdot \text{m}$$



Exempel

Exempel med fritt upplagd balk

$$E_s := 210 \text{ GPa} \quad E_{cm} := 30 \text{ GPa} \quad \text{Modulkvot} \quad n := 2 \cdot \frac{E_s}{E_{cm}} = 14 \quad \text{Se 5.4.2.2 (11)}$$

$$L_e := 7.2 \text{ m} \quad q_k := 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \psi_1 := 0.7 \quad g := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad c := 6 \text{ m}$$

$$q_d := (\psi_1 \cdot q_k + g) \cdot c = 15.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$b_c := 2 \cdot \frac{L_e}{8} + b_{fb} = 2000 \text{ mm} \quad b_{\text{eff}} := \frac{b_c}{n} = 142.9 \text{ mm}$$

$$t_c := 40 \text{ mm}$$

$$z_c := H + t_{fu} + \frac{t_c}{2} = 282 \text{ mm}$$

$$z_{\text{eff}} := \frac{b_{\text{eff}} \cdot t_c \cdot z_c + A_s \cdot z_s}{b_{\text{eff}} \cdot t_c + A_s} = 174.2 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff}} := I_s + b_{\text{eff}} \cdot t_c \cdot (z_c - z_{\text{eff}})^2 + A_s \cdot (z_{\text{eff}} - z_s)^2 = (2.4 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Styvheten ökar med $\frac{I_{\text{eff}}}{I_s} = 1.7$

Exempel

Statiskt moment $S_c := b_{\text{eff}} \cdot t_c \cdot (z_c - z_{\text{eff}}) = 615865.1 \text{ mm}^3$

Tvärkraften är bara påförd egentvingd och nyttig last efter avjämning har gjorts

$$V_{Ed} := q_d \cdot \frac{L_e}{2} = 56.2 \text{ kN}$$

$$\tau_{\text{max}} := \frac{S_c \cdot V_{Ed}}{I_{\text{eff}} \cdot b_{\text{fo}}} = 0.73 \text{ MPa}$$

Sammanfattning

weber.floor 140 Nova

• Farkörprovning med klassificering av välförhållandeffekt och motståndsföråga med valda stålplåt
 • Farkörprovning med krav på maximal avböjning av sekundära armeringar för golvkonstruktion.
 Dimension för en A-axelns produkt inte överstiga 12000.

Måttinformation

Produkten är utvald vid räkning med verktyg. Viktar inställt enligt egen lista för vägg eller källa. För beräkning av restprodukter och avfall samt innehållsdeklaration, se bygghandboken.

Produktspecifikation

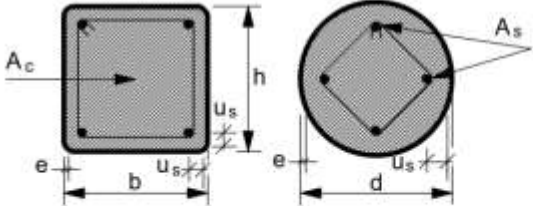
Produkttyp/Markering		
Måttförhållning	1,00 m × 3,33 kg/m²	Räkgångtal enligt EN 12607
	18 mm × 17,8 kg/m²	
Mått		
Stålgångdjup	3-4 stöms	
Stålgångbredd	3-9 stöms	
Stålgånghöjd	1,00 m (3,33 m)	
Stålgånglängd	60 mm (20 mm tillbehör)	90 tillbehör ska vara utvald för 30 m² och beställas för 30 mm avstånd med fiber tillbehörsgång eller Weiberg.
Användningsområde		
För utomhusbruk	Nej	
För inomhusbruk	Ja	
Kvalitet	22%	4,2 liter per 20 kg sak
Tryckhållfasthet	330	EN 12618
Tryckhållfasthet	330	EN 12618
28 dagar	Stömsmärka 10 MPa	EN 12618-2
Stålgånghållfasthet	95	EN 12618
28 dagar	Stömsmärka 5 MPa	EN 12618-2
Bränning		
28 dagar	0,32 mm/min	EN 12618-2
Lösligt		
Stålgång	420-730 mm	enligt standard (enligt EN 12618)
Stålgång	420-730 mm	Enligt EN 12618-2 (enligt EN 12618)
		enligt standard för tillämpning
Stålgånghållfasthet	1,10 MPa	
Densitet	Ca 1,800 kg/m³	Förklar och berakt materialbeholdning med tillbehör EN 12618
Brandklass enligt EN 12618-2	A2S1	EN 12618-2
Brandklass enligt EN 12618-2	A2S1	EN 12618-2
pre-utvald material	A2S1	
Fiber	Ja	
Stålgånghållfasthet		
Stålgånghållfasthet med valda stöms, BRC	400C 200 (enligt EN 12618-2)	EN 12618-2
Stålgång		
Stålgånghållfasthet	99	enligt EN 12618-2 (enligt EN 12618-2)

- Det är rimligt att anta att avjämningsmassan tål skjuvspänningen
- Styvheten ökar betydligt (ca 70%) vilket påverkar både deformationer och egenfrekvens
- Stålbalken kan överhöjas för egentygnd
- Samverkanstvärsnittet behöver bara dimensioneras för nyttig last och den egentygnd som påförs efter gjutning

Betongfyllda stålrör

- Rören kan vara armerade eller oarmerade
- För att klara bärförmåga vid brand krävs i allmänhet armering och tvärmått större än 200 mm enligt den förenklade metoden
- Det finns förenklad och generell metod för samverkanspelare i EK4
- Lastinföring kräver eftertanke

Bärförmåga vid brand

 <p>stältvärsnitt: $(b / e) \geq 25$ eller $(d / e) \geq 25$</p>		Brandteknisk klass				
		R30	R60	R90	R120	R180
1	Minsta tvärsnittsdimension för lastnivå $\eta_{fi,t} \leq 0,28$					
1.1	Minsta dimensionen h och b eller minsta diameter d [mm]	160	200	220	260	400
1.2	Minsta armeringsinnehåll $A_S / (A_C + A_S)$ i (%)	0	1,5	3,0	6,0	6,0
1.3	Minsta centrumavstånd för armering u_S [mm]	–	30	40	50	60
2	Minsta tvärsnittsdimension för lastnivå $\eta_{fi,t} \leq 0,47$					
2.1	Minsta dimensionen h och b eller minsta diameter d [mm]	260	260	400	450	500
2.2	Minsta armeringsinnehåll $A_S / (A_C + A_S)$ i (%)	0	3,0	6,0	6,0	6,0
2.3	Minsta centrumavstånd för armering u_S [mm]	–	30	40	50	60
3	Minsta tvärsnittsdimension för lastnivå $\eta_{fi,t} \leq 0,66$					
3.1	Minsta dimensionen h och b eller minsta diameter d [mm]	260	450	550	–	–
3.2	Minsta armeringsinnehåll $A_S / (A_C + A_S)$ i (%)	3,0	6,0	6,0	–	–
3.3	Minsta centrumavstånd för armering u_S [mm]	25	30	40	–	–

Kapitel 4.2 i EK 4 del 2 ger tabellerade värden för ett flertal konstruktionstyper

Generella förutsättningar enligt EK4

- Stål S235 till S460
- Betong C20/25 till C50/60
- Stålets bidrag till den sammanlagda bärförmågan bör vara 0.2-0.9
- Bärförmåga, lokal buckling, lastinföring och skjuvning mellan stål och betong måste beaktas

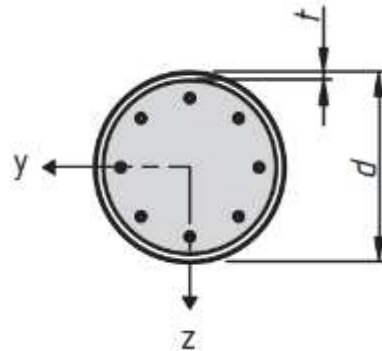
Förenklad dimensioneringsmetod enligt EK4

- Slankhet $\lambda < 2.0$
- Mindre än 6% armeringsarea i förhållande till stålarean
- Största täckskikt för helt ingjutna profiler begränsas till $0.3h$ respektive $0.4b$, se figur 6.17a
- Kvot bredd/höjd mellan 0.2 och 5

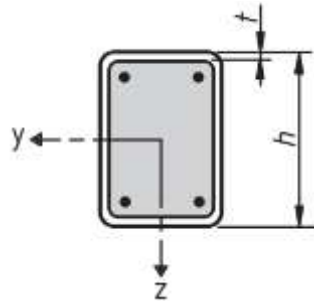
Lokal buckling

Stålrörets slankhet begränsas till:

$$(d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$$



$$(h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

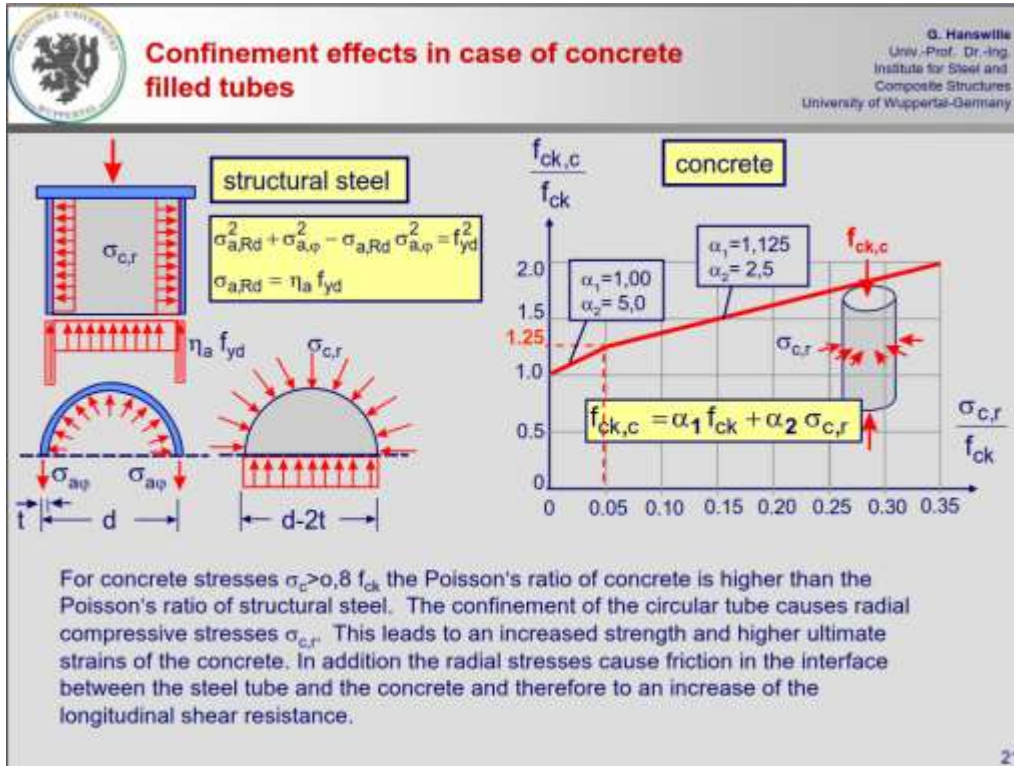


Slankhetsgränserna motsvarar $d/t=60$ för runda rör och är så pass generösa att det är svårt att hitta rör som inte fungerar!!

Alla runda kall- och varmformade rör i Tibnors katalog fungerar

Alla kvadratiska KKR och VKR uppfyller kravet

Inverkan av 3-axligt spänningstillstånd



Effekten av inneslutning ger upphov till radiella spänningar som både ger högre tryckhållfasthet och skapar friktion mellan stålröret och betongen

Plastisk bärförmåga

(6) För betongfyllda runda rör får ökningen av betongens hållfasthet tillgodoräknas på grund av inneslutning förutsatt att den relativa slankheten $\bar{\lambda}$ enligt 6.7.3.3 inte överstiger 0,5 och $e/d < 0,1$ där e är lastexcentriciteten M_{Ed} / N_{Ed} och d är pelarens ytterdiameter. Den plastiska bärförmågan för tryck får då beräknas med följande uttryck:

$$N_{pl,Rd} = \eta_a A_s f_{yd} + A_c f_{cd} \left(1 + \eta_c \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}} \right) + A_s f_{sd} \quad (6.33)$$

För pelare med $e = 0$ ges värdena $\eta_a = \eta_{a0}$ och $\eta_c = \eta_{c0}$ av följande uttryck:

$$\eta_{a0} = 0,25 (3 + 2 \bar{\lambda}) \quad (\text{men } \leq 1,0)$$

$$\eta_{c0} = 4,9 - 18,5 \bar{\lambda} + 17 \bar{\lambda}^2 \quad (\text{men } \geq 0)$$

För tryckt och böjd pelare med $0 < e/d \leq 0,1$

$$\eta_a = \eta_{a0} + (1 - \eta_{a0}) (10 e/d)$$

$$\eta_c = \eta_{c0} (1 - 10 e/d)$$

För $e/d > 0,1$, $\eta_a = 1,0$ och $\eta_c = 0$.

Inverkan av 3-axligt spänningstillstånd i den förenklade metoden tas genom faktorerna η_a och η_c

Faktorerna är empiriska och det blir ingen inverkan av inneslutning om excentriciteten är för stor.

Axiell och tangentiell spänning i röret har alltid olika tecken varför η_a är mindre än noll.

Styvhet och slankhet

(3) För beräkning av den relativa slankheten $\bar{\lambda}$ och den elastiska kritiska tryckkraften N_{cr} bör det karakteristiska värdet för samverkanspelarens effektiva böjstyvhets ($EI)_{eff}$ beräknas med:

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + K_c E_{cm} I_c \quad (6.40)$$

där:

K_c är en korrektionsfaktor som bör tas som 0,6.

(4) Inverkan av långtidseffekter på den effektiva elastiska böjstyvheten bör beaktas. Betongens elasticitetsmodul E_{cm} bör reduceras till värdet $E_{c,eff}$ enligt följande uttryck

$$E_{c,eff} = E_{cm} \frac{1}{1 + (N_{G,Ed} / N_{Ed}) \varphi_t} \quad (6.41)$$

(2) Den relativa slankheten $\bar{\lambda}$ för betraktat böjningsplan ges av:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$$

Vid beräkning av styvhet reduceras betongstyvheten till 0.6 och betongens E modul räknas om med effektivt krytval för att ta hänsyn till långtidseffekter

Slankheten är som alltid förhållandet mellan plastisk och kritisk bärförmåga

Dimensionerande bärförmåga

(2) Som en förenkling för tryckbelastade bärverksdelar bör normalkraftens dimensioneringsvärde N_{Ed} uppfylla

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.44)$$

där:

$N_{pl,Rd}$ är plastisk bärförmåga för samverkansvärsnittet enligt 6.7.3.2(1), men med f_{yd} bestämd med partialkoefficienten γ_{M1} enligt EN 1993-1-1; 6.1(1)

Tabell 6.5 – Knäckningskurvor och intialkrokighet för samverkanspelare

Tvärsnitt	Gränser	Knäcknings-axel	Knäcknings-kurva	Initial-krokighet
Betongfyllt rör 	$\rho_s \leq 3\%$	alla	a	$L/300$
	$3\% < \rho_s \leq 6\%$	alla	b	$L/200$

För beräkning av bärförmåga används reduktionsfaktorer och knäckkurvor enligt ståleurokoden

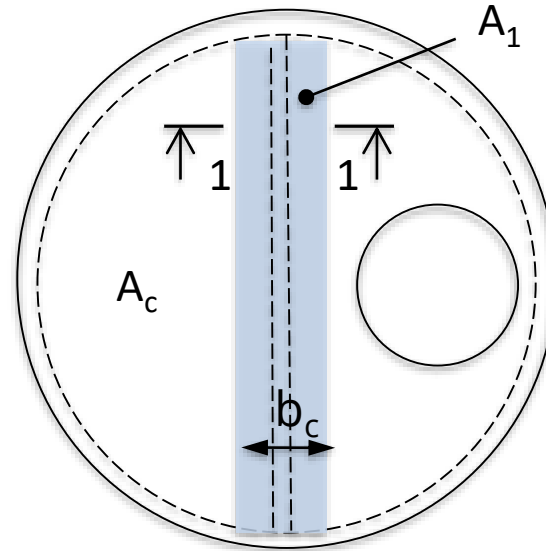
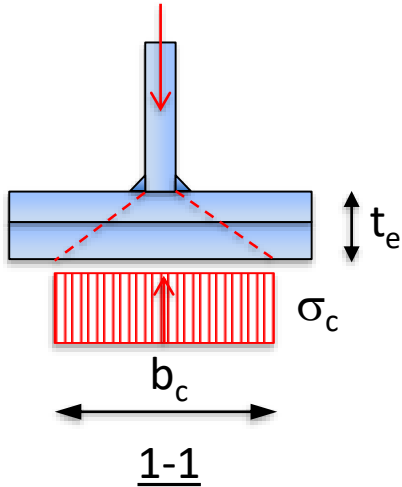
Runda rör utan längsgående armering hänförs till knäckkurva a

Lastinföring

Tryckspänningen i betongen där lasten förs in begränsas till:

$$\sigma_{c,Rd} = f_{cd} \left(1 + \eta_{cl} \frac{t f_y}{a f_{ck}} \right) \sqrt{\frac{A_c}{A_1}} \leq \frac{A_c f_{cd}}{A_1} \leq f_{yd}$$

I en toppplåt på en rund samverkanspelare blir den area som belastas:



Exempel

Beräkning av centriskt belastad samverkanspelare av betongfyllt stålrör utan transversella laster enligt EN 1994-1-1

Exempel

Laster

Axialkraft $N_d := 1.56 \cdot \text{MN}$ Längd $L_e := 2.2 \cdot \text{m}$

Permanent lastandel $N_{dG} := 0.77 \cdot \text{MN}$

Geometri och material

Stålrör $d := 219.1 \cdot \text{mm}$ $t := 8 \cdot \text{mm}$ $f_y := 355 \cdot \text{MPa}$ $E_s := 210 \cdot \text{GPa}$

Betong C50 $f_{ck} := 50 \cdot \text{MPa}$ $f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 33.3 \text{ MPa}$ $E_{cm} := 35 \cdot \text{GPa}$

Kryptal $\varphi := 2$

Exempel

Kontroll av lokal buckling

Gränsvärde för godstjocklek $\varepsilon := \frac{235 \cdot \text{MPa}}{f_y} = 0.7$ $t_{\min} := \frac{d}{90 \cdot \varepsilon^2} = 5.6 \text{ mm}$

Vald profil kan användas

Tvärsnittsdata

$$A_a := \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - (d - 2 \cdot t)^2) = 5306 \text{ mm}^2$$

$$I_a := \frac{\pi}{64} \cdot (d^4 - (d - 2 \cdot t)^4) = 0.00003 \text{ m}^4$$

$$A_c := \frac{\pi}{4} \cdot (d - 2 \cdot t)^2 = 32397 \text{ mm}^2$$

$$I_c := \frac{\pi}{64} \cdot (d - 2 \cdot t)^4 = 0.000084 \text{ m}^4$$

Effektiv E-modul $E_{\text{eff}} := E_{\text{cm}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{N_{dG}}{N_d} \cdot \varphi} = 17.6 \text{ GPa}$

Effektiv böjstyvhet $EI_{\text{eff}} := E_s \cdot I_a + 0.6 \cdot E_{\text{eff}} \cdot I_c = 7.1 \text{ MN} \cdot \text{m}^2$

Kritisk knäcklast $N_{\text{cr}} := \frac{\pi^2 \cdot EI_{\text{eff}}}{L_c^2} = 14.5 \text{ MN}$

$N_{\text{pIRk}} := A_a \cdot f_y + 1.0 \cdot A_c \cdot f_{ck} = 3.5 \text{ MN}$

Slankhet $\lambda := \sqrt{\frac{N_{\text{pIRk}}}{N_{\text{cr}}}} = 0.492$

Exempel

För att få tillgodoräkna sig effekten av betongens inneslutning krävs att slankheten är mindre än 0.5 och att $e/d < 0.1$.

$$\eta_a := 0.25 \cdot (3 + 2 \cdot \lambda) = 0.996$$

$$\eta_c := 4.9 - 18.5 \cdot \lambda + 17 \cdot \lambda^2 = -8.7 \cdot 10^{-2} \quad \eta_c := 0$$

$$N_{pIRd} := \eta_a \cdot A_a \cdot f_y + A_c \cdot f_{cd} \cdot \left(1 + \eta_c \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}} \right) = 2.96 \text{ MN}$$

Knäckning enligt kurva a $\phi := 0.5 \cdot (1 + 0.21 \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 0.7$

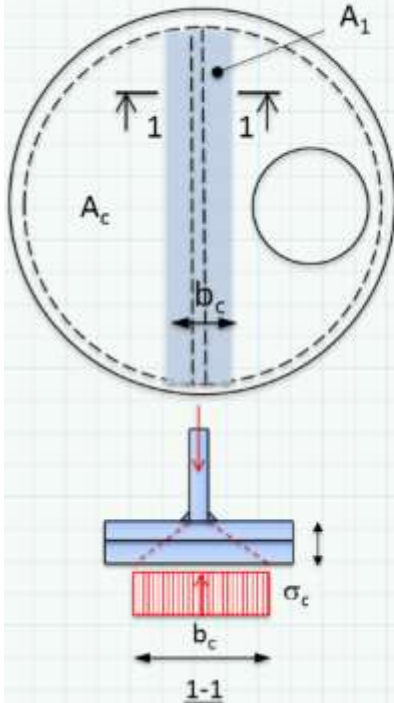
$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.93$$

$$N_{bRd} := \chi \cdot N_{pIRd} = 2.74 \text{ MN}$$

Som jämförelse tål samma rör utan betongfyllning 1.7 MN så samverkan ökar bärförmågan med drygt 60%.

Exempel

Lastinföring



Lasten förs in genom en topplåt som är 20 mm tjock och på topplåten ligger en balk med 10 mm tjock underfläns och liv som är 10 mm tjockt.

Topplåten förses med ett gjuthål som är ca 60 mm i diameter.

$$t_e := 30 \text{ mm} \quad t_s := 10 \text{ mm}$$

$$b_c := t_s + 5 \cdot t_e = 160 \text{ mm}$$

$$\text{Gjuthål} \quad d_0 := 60 \text{ mm}$$

Exempel

Belastad area (ungefär) $A_1 := 0.8 \cdot b_c \cdot (d - 2 \cdot t) = 25996.8 \text{ mm}^2$

Om hela kraften förs in i betongen erhålls $\sigma_c := \frac{N_{bRd}}{A_1} = 105.4 \text{ MPa}$

$A_c := \frac{\pi}{4} \cdot (d - 2 \cdot t)^2 = 32397 \text{ mm}^2$ $\eta_{cL} := 4.9$

$\sigma_{cRd} := f_{cd} \cdot \left(1 + \eta_{cL} \cdot \frac{t}{d} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}} \right) \cdot \sqrt{\frac{A_c}{A_1}} = 84.5 \text{ MPa}$ +

Vi räknar bort den kraft som förs in i röret direkt

$F_s := 2 \cdot b_c \cdot t \cdot f_y = 908.8 \text{ kN}$

Nu blir spänningen $\sigma_c := \frac{N_{bRd} - F_s}{A_1} = 70.4 \text{ MPa}$