

Esimerkkilaskelma

3-nivelkaari (ympyrä)

16.01.2019

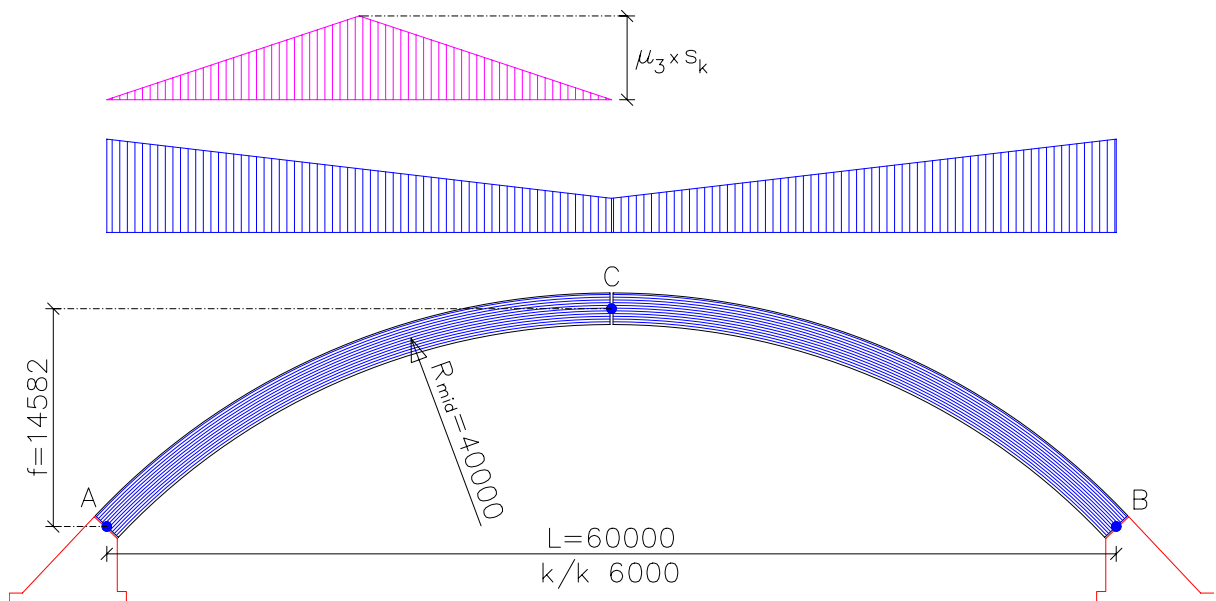
Sisällysluettelo

1	LÄHTÖTIEDOT.....	- 3 -
2	KUORMAT	- 3 -
3	MATERIAALI	- 4 -
4	MITOITUS	- 5 -
4.1	TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TAIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA	- 5 -
4.2	PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA.....	- 6 -
4.3	PURISTUSKESTÄVYYS HEIKOMPAAN POIKKILEIKKAUKSEN SUUNTAAN	- 7 -
4.4	LEIKKAUSKESTÄVYYS MAKSIMI LEIKKAUSVOIMAN KOHDALLA.....	- 7 -
4.5	YHDISTETTY TAIVUTUS- JA PURISTUSKESTÄVYYS.....	- 8 -
4.6	POIKITTAINEN VETO	- 9 -
4.7	KIEPAHDUSKESTÄVYYS	- 11 -
4.7.1	YLÄREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus puristetulla reunalla)	- 11 -
4.7.2	YLÄREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS.....	- 12 -
4.7.3	ALAREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus vedetyllä reunalla).....	- 13 -
4.7.4	ALAREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS.....	- 14 -
4.8	KAAREN SIIRTYMÄÄRVIO	- 14 -

1 LÄHTÖTIEDOT

Rakennuspaikka:	Helsinki, teollisuusalue
Rakenne:	Symmetrinen 3-nivelkaari, ympyrän muotoinen, 1-aukkoiset sekundäärit (orret, elementissä)
Seuraamusluokka:	CC3 => $K_{FI} = 1,1$
Normit:	Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1, DIN 1995-1-1/NA:2013, EN 14080 Kuormat: RIL 201-1-2017, SFS EN 1990, SFS EN 1991-1-1, SFS EN 1991-1-3

2 KUORMAT



Lasketaan tässä esimerkissä **kuormitustapaus**: Omapaino 100 % + epäsymmetrinen lumi 100 %

LUMIKUORMA:

Lumikuorma maassa, $s_k = 2,75 \text{ kN/m}^2$ (ei pienennöstä tuen lähellä, koska kaaren kulma tuella $48,59^\circ < 60^\circ$).

Katon muotokerroin epäsymmetriselle lumelle $\mu_3 = \min(0,2 + 10 \times f / L ; 2,0) \Rightarrow 2,0$

$\Rightarrow$ lumikuorma katolla $q_{s,k} = \mu_3 \times s_k \Rightarrow 2,0 \times 2,75 \text{ kN/m}^2 = 5,5 \text{ kN/m}^2$

Koska palkkijako 6000 mm ja kattorakenne (orret) 1-aukkoisia

$\Rightarrow$ Lumikuorma palkille, $p_{q,s,k} = k/k \times q_{s,k} \Rightarrow 6 \text{ m} \times 5,5 \text{ kN/m}^2 = 33,0 \text{ kN/m}$

OMAPAINO:

Omapaino kasvaa tukea lähestyttäessä. Tässä laskelmassa yksinkertaistettu mallia siten, että omapaino muuttuu suoraviivaisesti.

Vesikaton omapaino, $g_{k,1} = 0,5 \text{ kN/m}^2$, lisäksi huomioidaan ripustuskuormat $g_{k,2} = 0,3 \text{ kN/m}^2$

koska palkkijako 6000 mm ja kattorakenne (orret) 1-aukkoisia

$\Rightarrow p_{g,k,1} = k/k \times (g_{k,1} + g_{k,2}) \Rightarrow 6 \text{ m} \times (0,5 \text{ kN/m}^2 + 0,3 \text{ kN/m}^2) = 4,8 \text{ kN/m}$ (kaaren lakipisteessä)

Arvioidaan liimapuukaaren omapaino eli korkeus 2,08 m ja leveys 0,240 m

$p_{g,k,2} = 2,08 \text{ m} \times 0,240 \text{ m} \times 5 \text{ kN/m}^3 = 2,5 \text{ kN/m}$ (kaaren lakipisteessä)

Lopullinen omanpainon kuorma palkilla

$\Rightarrow p_{g,k} = p_{g,k,1} + p_{g,k,2} \Rightarrow 4,8 \text{ kN/m} + 2,5 \text{ kN/m} = 7,3 \text{ kN/m}$ (tuella $7,3 \text{ kN/m} / \cos 48,59^\circ = 11,0 \text{ kN/m}$)

Murtorajatilan kuormapalkille:

lumi: $p_{q,s,d} = K_{FI} \times 1,5 \times p_{q,s,k} = 1,1 \times 1,5 \times 33,0 \text{ kN/m} = 54,5 \text{ kN/m}$

omapaino: $p_{g,d} = K_{FI} \times 1,15 \times p_{g,k} = 1,1 \times 1,15 \times 7,3 \text{ kN/m} = 9,2 \text{ kN/m}$ (tuella 14,0 kN/m)

3 MATERIAALI

Liimapuupalkki GL30c 240x2080 (lamellin paksuus $t = 33 \text{ mm}$)

$$k_h = \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \leq 1,1$$

palkin korkeus yli 600 mm

⇒ taivutuslujuuden ominaisarvon korotuskerroin $k_h = 1,0$

Jos lamellin paksuus alle 40 mm, liimapuun taivutuslujuutta saadaan korottaa kertoimella k :

$$k \leq \min \left\{ \left(\frac{40}{t} \right)^{0,1} \Rightarrow k \leq \min \left\{ \left(\frac{40}{33} \right)^{0,1} \Rightarrow k = 1,02 \right. \right.$$

Aikaluokka: Keskipitkä

Käyttöluokka: 1

⇒ aika- ja käyttöluokka kerroin, $k_{mod} = 0,8$

⇒ virumaluku, $k_{def} = 0,6$

Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet

materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_M = 1,25$

	Ominaislujuus	Suunnittelulujuus
Taivutuslujuus:	$f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = k \times k_h \times k_{mod} \times f_{m,k} / \gamma_M = 19,6 \text{ N/mm}^2$
Leikkauslujuus:	$f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = k_{mod} \times f_{v,k} / \gamma_M = 2,24 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus (90°):	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = k_{mod} \times f_{c,90,k} / \gamma_M = 1,60 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus (0°):	$f_{c,0,k} = 24,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = k_{mod} \times f_{c,0,k} / \gamma_M = 15,7 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus (90°):	$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,90,d} = k_{mod} \times f_{t,90,k} / \gamma_M = 0,32 \text{ N/mm}^2$
Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} = 13\,000 \text{ N/mm}^2$	$E_{0,05} = 10\,800 \text{ N/mm}^2$
Liukumoduuli:	$G_{0,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$	$G_{0,05} = 540 \text{ N/mm}^2$

Liimapuussa lamellien paksuus on enintään 45 mm (6...45 mm). Käyttöluokan 3 liimapuussa lamellipaksuus saa olla enintään 35 mm. Kaarevassa liimapuussa lamellipaksuutta t rajoitetaan lisäksi kaarevuussäteestä r ja lamellin sormijatkoksille ilmoitetusta taivutuslujuudesta $f_{m,j,dc,k}$ riippuen seuraavasti:

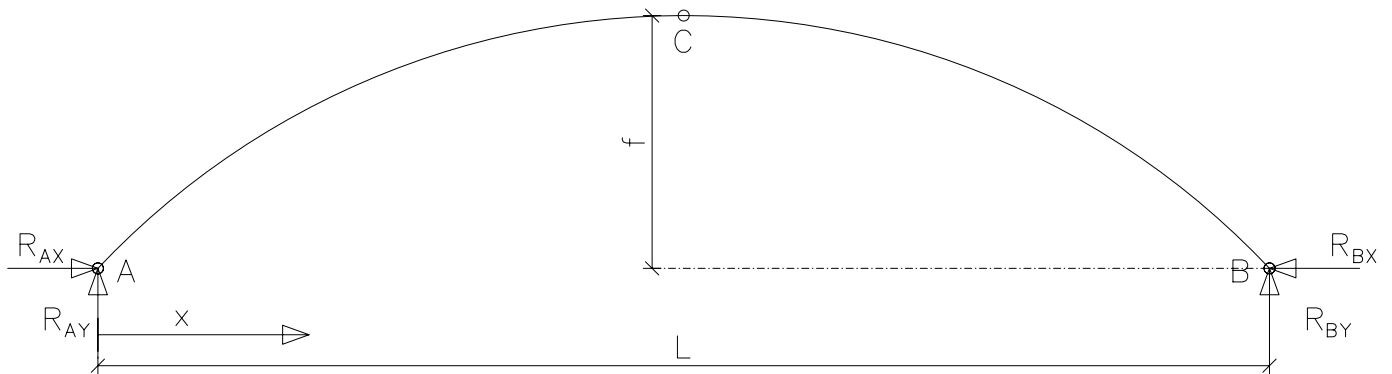
$$t \leq \frac{r}{250} \times \left(1 + \frac{f_{m,j,dc,k}}{150} \right)$$

Sormijatkoksen taivutuslujuus määritetään valmistuslinjakohtaisessa sormijatkoksen alkutestauksessa. Minimivaatimuksena on $1,4 \times$ lamellin vetolujuus. Lamellin vetolujuutta voi siis käyttää varmalla puolella olevana ”yleisarvona”. Liimapuulamellien vetolujuudet ja eri liimapuun lujuusluokissa käytettävät lamellit on esitetty EN 14080 standardissa.

GL30c: Ulkolamellit T22 ja sisälamellit T15. Valitaan T15 (heikoimman vaihtoehdon mukaan) $\Rightarrow f_{m,j,k} = 27 \text{ N/mm}^2$ ja $f_{t,0,l,k} = 15 \text{ N/mm}^2$. Lasketaan $f_{m,j,dc,k} = 1,4 \times f_{t,0,l,k} \Rightarrow f_{m,j,dc,k} = 1,4 \times 15 \text{ N/mm}^2 = 21,0 \text{ N/mm}^2$. $r = r_{in} = R_{mid} - 2080/2 = 38\,960 \text{ mm}$

$$t \leq \frac{38\,960 \text{ mm}}{250} \times \left(1 + \frac{21,0 \text{ N/mm}^2}{150}\right) = 177,7 \text{ mm} \Rightarrow t = 33 \text{ mm} \leq 45 \text{ mm OK!}$$

4 MITOITUS



Laskenta suoritettu Excel-pohjalla, jossa kaari jaettu $L/100$ -osiin. Tässä tapauksessa tarkasteluväli on 300 mm (vaakamitta). Tarkasteltava kohta x kasvaa A-tueltä B-tuella päin.

Tukireaktiot olivat seuraavat (murtorajatila):

vasen tuki: $R_{A,X} = 811,3 \text{ kN}$ ja $R_{A,Y} = 960,3 \text{ kN}$
oikea tuki: $R_{B,X} = 811,3 \text{ kN}$ ja $R_{B,Y} = 551,9 \text{ kN}$

Kriittiset mitoituskohdat ja niiden voimasuureet olivat seuraavat:

	x:n kohdassa	voimasuure
Leikkaus:	60 000 mm	$Q_d = 243,3 \text{ kN}$
Taivutus:	15 900 mm	$M_d = 2275,2 \text{ kNm}$
Puristus:	0 mm	$N_d = 1256,9 \text{ kN}$
Yhdistetty taivutus + puristus:	15 600 mm	$N_d = 872,6 \text{ kN}$ ja $M_d = 2274,4 \text{ kNm}$
Sytä vastaan kohtisuora veto:	47 100 mm	$M_d = 1857,2 \text{ kNm}$
Kiepahdus (+ yhdistetty puristus ja kiepahdus):		
- kaaren alareuna:	47 100 mm	$M_d = 1857,2 \text{ kNm}$ ja $N_d = 898,1 \text{ kN}$ (alareuna puristettu)
- kaaren yläreuna:	15 900 mm	$M_d = 2275,2 \text{ kNm}$ ja $N_d = 865,9 \text{ kN}$ (yläreuna puristettu)

4.1 TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TAIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA

Maksimi taivutusmomentti löytyy kohdasta $x = 15\,900 \text{ mm}$ ja momentin arvo $M_d = 2275,2 \text{ kNm}$

Lasketaan k_t -kerroin:

$$k_l = \begin{cases} 1 + 1,4 \times \tan \alpha + 5,4 \times \tan^2 \alpha; \text{harjapalkilla} \\ 1 + 0,35 \times \left(\frac{h_2}{r}\right) + 0,6 \times \left(\frac{h_2}{r}\right)^2; \text{kaarevalla palkilla} \\ k_1 + k_2 \times \left(\frac{h_2}{r}\right) + k_3 \times \left(\frac{h_2}{r}\right)^2 + k_4 \times \left(\frac{h_2}{r}\right)^3; \text{kaarevalla harjapalkilla} \end{cases}$$

$r = r_{in} + 0,5 \times h_2$; r_{in} = kaarevuussäde (sisä)

$$k_1 = 1 + 1,4 \times \tan \alpha + 5,4 \times \tan^2 \alpha$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \times \tan \alpha$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \times \tan \alpha - 7,8 \times \tan^2 \alpha$$

$$k_4 = 6 \times \tan^2 \alpha$$

Tässä mitoitustapauksessa:

$$\begin{aligned} k_l &= 1 + 0,35 \times \left(\frac{h}{r}\right) + 0,6 \times \left(\frac{h}{r}\right)^2 \\ \Rightarrow k_l &= 1 + 0,35 \times \left(\frac{2080}{40000}\right) + 0,6 \times \left(\frac{2080}{40000}\right)^2 \\ \Rightarrow k_l &= 1 + 0,0182 + 0,0016 = 1,020 \end{aligned}$$

Lasketaan taivutusjännitys maksimi momentin kohdassa:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \times b \times h_2^2} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{2275,2 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 240 \text{ mm} \times (2080 \text{ mm})^2} = 13,1 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan k_r -kerroin (RIL 205-1-2017 s.88):

$$\text{kaarevilla rakenteilla } k_r = \begin{cases} 1, & \text{, kun } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \times \frac{r_{in}}{t}, & \text{, kun } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases}; t = \text{lamellin paksuus}$$

Käytetään lamellin paksuutena $t = 33 \text{ mm}$ ja tästä seuraa, että $r_{in} / t > 240 \Rightarrow k_r = 1,0$

Mitoitusehto: $\sigma_{m,d} \times k_l \leq k_r \times f_{m,d} \Rightarrow 1,020 \times 13,1 \text{ N/mm}^2 \leq 1,0 \times 19,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (68\%)}$

4.2 PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA

Maksimi puristus löytyy kohdasta $x = 0 \text{ mm}$ ja puristavan voiman arvo $N_d = 1256,9 \text{ kN}$

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:

$$\sigma_{c,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,d} = \frac{1256,9 \times 10^3 \text{ N}}{240 \times 2080} = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto: $\sigma_{c,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 2,5 \text{ N/mm}^2 \leq 15,7 \text{ N/mm}^2 \text{ (16\%)}$

4.3 PURISTUSKESTÄVYYS HEIKOMPAAN POIKKILEIKKAUKSEN SUUNTAAN

Valitaan puristusvoimaksi maksimi eli $N_d = 1256,9 \text{ kN}$ ja nurjahduspituudeksi yläpinnan kiepahdustukien väli eli $L_1 = 2\,400 \text{ mm}$, koska lyhyempi tukiväli kuin alapinnan $L_2 = 6\,000 \text{ mm}$.

Kaaren nurjahduspituus heikommassa suunnassa (kiepahdustukien väli): $L_{c,y} = L_1 \Rightarrow L_{c,y} = 2\,400 \text{ mm}$

$$\text{Lasketaan jäyhyysäde: } i_z = \frac{B}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_z = \frac{240}{\sqrt{12}} = 69,28 \text{ mm}$$

$$\text{Lasketaan kaaren hoikkuus: } \lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \Rightarrow \lambda_y = \frac{2\,400}{69,28} = 34,64$$

$$\text{Lasketaan muunnettu hoikkuus: } \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{34,64}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10\,800}} = 0,525$$

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: $\beta_c = 0,1$ (liimapuu)

Lasketaan nurjahduskerroin:

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \\ \Rightarrow k_z = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (0,525 - 0,3) + 0,525^2) = 0,649$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \leq 1 \\ \Rightarrow k_{c,z} = \frac{1}{0,649 + \sqrt{0,649^2 - 0,525^2}} = 0,97 \leq 1$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{1256,9 \times 10^3}{240 \times 2080} = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto: } \sigma_{c,d} \leq k_{c,z} \times f_{c,0,d} \Rightarrow 2,5 \text{ N/mm}^2 \leq 0,97 \times 15,7 \text{ N/mm}^2 \text{ (16 \%)}$$

4.4 LEIKKAUSKESTÄVYYS MAKSIMI LEIKKAUSVOIMAN KOHDALLA

Maksimi leikkausvoima löytyy kohdasta $x = 60\,000 \text{ mm}$ ja leikkausvoiman arvo $Q_d = 243,3 \text{ kN}$

Koska käyttöluokka 1 niin on huomioitava tehollinen leveys: $b_{eff} = 1,0 \times b \Rightarrow b_{eff} = 1,0 \times 240 = 240 \text{ mm}$

Lasketaan leikkausjännitys maksimi leikkauksen kohdalla:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{Q_d}{A} \Rightarrow \tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{243,3 \times 10^3 \text{ N}}{240 \times 2080} = 0,49 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto: } \tau_d \leq f_{v,d} \Rightarrow 0,49 \text{ N/mm}^2 \leq 2,24 \text{ N/mm}^2 \text{ (22 \%)}$$

4.5 YHDISTETTY TAIVUTUS- JA PURISTUSKESTÄVYYS

Maksimi mitoittava kohta löytyy kohdasta $x = 15\,600\text{ mm}$ ja puristus $N_d = 872,6\text{ kN}$ ja taivutus $M_d = 2274,4\text{ kNm}$

Lasketaan kaaren keskuskulma:

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{L}{r} \Rightarrow \sin \frac{\beta}{2} = \frac{60\,000}{40\,000} \Rightarrow \beta = 2 \times 48,59^\circ = 97,2^\circ$$

Puolikkaan kaaren pituus (tuelta lakipisteeseen kaaren keskilinjaa pitkin):

$$L_{kaari} = \frac{\beta}{360^\circ} \times 2 \times \pi \times r \Rightarrow L_{kaari} = \frac{97,2^\circ}{360^\circ} \times 2 \times \pi \times 40\,000 = 33\,922\text{ mm}$$

Tarkistetaan ehto: $0,15 \leq f / L \leq 0,5 \Rightarrow 0,15 \leq 14\,582\text{ mm} / 60\,000\text{ mm} = 0,24 \leq 0,5$

=> Voidaan käyttää alla olevaa nurjahduspituuden kaavaa.

Kaaren nurjahduspituus: $L_{c,z} = 1,25 \times L_{kaari} \Rightarrow L_{c,z} = 1,25 \times 33\,922\text{ mm} = 42\,403\text{ mm}$

Lasketaan jäyhyysäde: $i_y = \frac{H}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_y = \frac{2080}{\sqrt{12}} = 600,44\text{ mm}$

Lasketaan kaaren hoikkuus: $\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \Rightarrow \lambda_y = \frac{42\,403}{600,44} = 70,62$

Lasketaan muunnettu hoikkuus: $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{70,62}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10\,800}} = 1,071$

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: $\beta_c = 0,1$ (liimapuu)

Lasketaan nurjahduskerroin:

$$k_y = 0,5 \times \left(1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) \\ \Rightarrow k_y = 0,5 \times \left(1 + 0,1 \times (1,071 - 0,3) + 1,071^2 \right) = 1,112$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \leq 1 \\ \Rightarrow k_{c,y} = \frac{1}{1,112 + \sqrt{1,112^2 - 1,071^2}} = 0,71 \leq 1$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{872,6 \times 10^3}{240 \times 2080} = 1,75\text{ N/mm}^2$$

Lasketaan taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,d} = k_l \times \frac{M_d}{k_r \times W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = 1,020 \times \frac{2274,4 \times 10^6}{1,000 \times \frac{1}{6} \times 240 \times 2080^2} = 13,4 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow \frac{13,4}{19,6} + \frac{1,75}{0,71 \times 15,7} = 0,84 \leq 1,00 \text{ (84\%)}$$

4.6 POIKITTAINEN VETO

Lasketaan puolikkaan kaaren tilavuus:

$$V_b = b \times h \times L_{\text{kaar}} \Rightarrow V_b = 0,24 \text{ m} \times 2,080 \text{ m} \times 33,922 \text{ m} = 16,93 \text{ m}^3$$

Lasketaan mitoitustilavuus:

$$V = 2 / 3 \times V_b \Rightarrow 2 / 3 \times 16,93 \text{ m}^3 = 11,29 \text{ m}^3$$

Lasketaan k_p -kerroin:

$$k_p = \begin{cases} 0,2 \times \tan \alpha & ; \text{harjapalkki} \\ 0,25 \times \left(\frac{h}{r} \right) & ; \text{kaarevapalkki} \\ k_5 + k_6 \times \left(\frac{h}{r} \right) + k_7 \times \left(\frac{h}{r} \right)^2 & ; \text{kaareva harjapalkki} \end{cases}$$

$$k_5 = 0,2 \times \tan \alpha$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \times \tan \alpha + 2,6 \times \tan^2 \alpha$$

$$k_7 = 2,1 \times \tan \alpha - 4 \times \tan^2 \alpha$$

$$\Rightarrow k_p = 0,25 \times \left(\frac{h}{r} \right) \Rightarrow k_p = 0,25 \times \left(\frac{2080}{40000} \right) = 0,013$$

Lasketaan poikittainen vetojännitys:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \times \frac{M_d}{\frac{1}{6} \times b \times h^2} \Rightarrow \sigma_{t,90,d} = 0,013 \times \frac{1857,2 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 240 \text{ mm} \times (2080 \text{ mm})^2} = 0,14 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan tilavuuskerroin (liimapuu ja Kerto-S),

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0,2} ; V_0 = 0,01 \text{ m}^3 \text{ (vertailutilavuus)}$$

$$\Rightarrow k_{vol} = \left(\frac{0,01 \text{ m}^3}{11,29 \text{ m}^3} \right)^{0,2} = 0,245$$

Lasketaan jännitysjakauma kerroin,

$$k_{dis} = \begin{cases} 1,4 & ; \text{harjapalkit ja kaarevat palkit} \\ 1,7 & ; \text{kaarevat harjapalkit l. bumerangipalkit} \end{cases}$$

eli kaarella $k_{dis} = 1,4$

Mitoitusehto: $\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \times k_{vol} \times f_{t,90,d} \Rightarrow 0,14 \text{ N/mm}^2 \leq 1,4 \times 0,245 \times 0,32 \text{ N/mm}^2 (128 \%)$

Kyseisiä kaaren alueita voidaan vahvistaa esimerkiksi porattavilla ruuvitangoilla (SFS Intec WB-T-20x2047), jotka porataan tehtaalla kaaren yläpuolelta.

Lasketaan ruuvitangon tehollinen pituus: $L_{ef} = \frac{2080 \text{ mm}}{2} - 33 \text{ mm} = 1007 \text{ mm}$

Koska tehollinen pituus suurempi kuin 808 mm, voidaan käyttää ruuvitangon maksimikapasiteettia $R_{ax,d,max} = 113,10 \text{ kN}$

Load-bearing capacities of the WB threaded rod

For $\rho_k = 380 \text{ kg/m}^3$ and $k_{mod} = 0.9$

Other gross densities or modification factors: $R'_{ax,d} = R_{ax,d} \cdot k_F \cdot k_M$

	WB-T-16	WB-T-20
l_{ef}	$R_{ax,d}$	$R_{ax,d}$
100 mm	11.2 kN	14.0 kN
200 mm	22.4 kN	28.0 kN
300 mm	33.6 kN	42.0 kN
400 mm	44.8 kN	56.0 kN
500 mm	56.0 kN	70.0 kN
600 mm	67.2 kN	84.0 kN
700 mm	beyond $l_{ef} = 644 \text{ mm}$: $R_{ax,d,max} = 72.38 \text{ kN}$	98.0 kN
800 mm		112.0 kN
		beyond $l_{ef} = 808 \text{ mm}$: $R_{ax,d,max} = 113.10 \text{ kN}$

Amendment factor k_M for different modification factors

k_{mod}	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
k_M	0,667	0,778	0,889	1,000	1,222

Amendment factor k_F for different gross densities

GL	24c	24h 28c	28h 32c	32h 36c	36h
ρ_k in kg/m^3	350	380	410	430	450
k_F	0.848	1.000	1.164	1.280	1.402

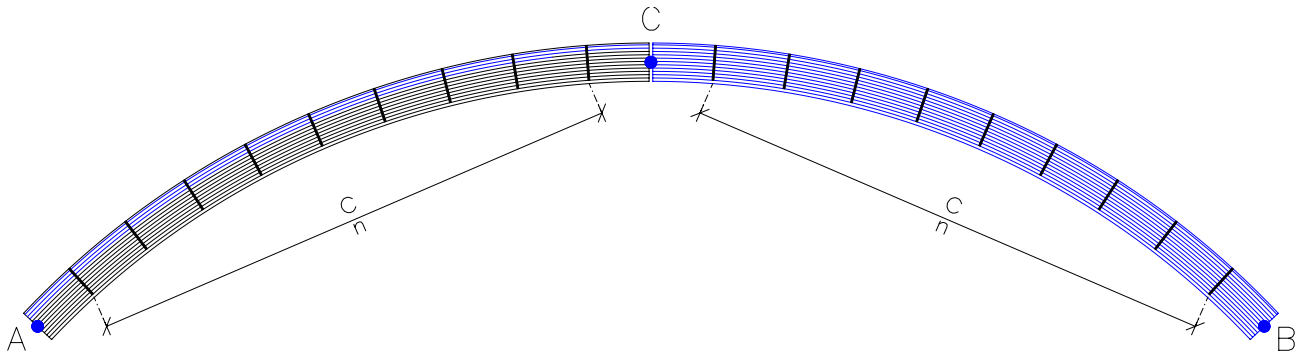
Lisäksi on huomioitava puun tiheys (interpoloidaan $\Rightarrow k_F = 1,055$) ja aika- ja kosteusluokkakerroin ($0,9 \Rightarrow 0,8$ eli $k_M = 0,889$):

$$R'_{ax,d} = R_{ax,d} \times k_F \times k_M \Rightarrow R'_{ax,d} = 113,1 \text{ kN} \times 1,055 \times 0,889 = 106,1 \text{ kN}$$

Lasketaan ruuvientankojen määrä (DIN 1995-1-1/NA:2013-08 mukaan):

$$c = r_{in} \times \sin \beta \Rightarrow c = (40000 - 2080 / 2) \times \sin 48,59^\circ = 29220 \text{ mm}$$

$$n = \frac{\sigma_{t,90,d} \times b \times c}{R'_{ax,d}} \Rightarrow n = \frac{0,14 \text{ N/mm}^2 \times 240 \text{ mm} \times 29220 \text{ mm}}{106076 \text{ N}} = 9,26 \Rightarrow 10 \text{ kpl}$$



4.7 KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kaaren maksimi puristus kaaren alapinnassa ja vastaavasti maksimipuristus yläreunassa. Valitaan yläreunan kiepahdustukien väliksi $L_1 = 2400$ mm ja alareunan kiepahdustukien väliksi $L_2 = 6000$ mm. Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

	x:n kohdassa	voimasuure
kaaren alareuna:	47 100 mm	$M_d = 1857,2$ kNm ja $N_d = 898,1$ kN (alareuna puristettu)
kaaren yläreuna:	15 900 mm	$M_d = 2275,2$ kNm ja $N_d = 865,9$ kN (yläreuna puristettu)

$$\text{Valitaan kerroin } c = \begin{cases} 0,78 \text{ havupuusahatavara} \\ 0,72 \text{ liimapuu GL30cs} \\ 0,70 \text{ liimapuu GL30c ja GL30hs} \\ 0,68 \text{ liimapuu GL30h} \\ 0,67 \text{ Kerto-Q-LVL} \\ 0,58 \text{ Kerto-S- ja Kerto-T-LVL} \end{cases} \Rightarrow c = 0,70$$

4.7.1 YLÄREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus puristetulla reunalla)

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, $L_{ef} = L_1 + 2 \times h \Rightarrow 2400 \text{ mm} + 2 \times 2080 \text{ mm} = 6560 \text{ mm}$

(Jos kuorma tulee kiepahdustukien kohdalta niin $L_{ef} = L_1$)

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h \times L_{ef}} \times E_{0.05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (240 \text{ mm})^2}{2080 \text{ mm} \times 6560 \text{ mm}} \times 10800 \text{ N/mm}^2 = 31,91 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{31,91 \text{ N/mm}^2}} = 0,970$$

$$\text{Lasketaan } k_{crit} = \begin{cases} 1 & , \text{ kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & , \text{ kun } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & , \text{ kun } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

eli tässä tapauksessa: $k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} \Rightarrow k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times 0,970 = 0,833$

$$\text{Lasketaan taivutusjännitys: } \sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{2275,2 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 240 \times 2080^2} = 13,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto: } \sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \Rightarrow 13,1 \text{ N/mm}^2 \leq 0,833 \times 19,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (80 \%)} \quad \boxed{\phantom{0,833 \times 19,6 \text{ N/mm}^2 \text{ (80 \%)}}}$$

4.7.2 YLÄREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS

Kaaren nurjahduspituus heikommassa suunnassa (kiepahdustukien väli): $L_{c,y} = L_1 \Rightarrow L_{c,y} = 2\,400 \text{ mm}$

$$\text{Lasketaan jäyhyysäde: } i_z = \frac{B}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_z = \frac{240}{\sqrt{12}} = 69,28 \text{ mm}$$

$$\text{Lasketaan kaaren hoikkuus: } \lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \Rightarrow \lambda_y = \frac{2\,400}{69,28} = 34,64$$

$$\text{Lasketaan muunnettu hoikkuus: } \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{34,64}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10\,800}} = 0,525$$

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: $\beta_c = 0,1$ (liimapuu)

Lasketaan nurjahduskerroin:

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \\ \Rightarrow k_z = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (0,525 - 0,3) + 0,525^2) = 0,649$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \leq 1 \\ \Rightarrow k_{c,z} = \frac{1}{0,649 + \sqrt{0,649^2 - 0,525^2}} = 0,97 \leq 1$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{865,9 \times 10^3}{240 \times 2080} = 1,73 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty kiepahdus ja puristus:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1.00 \Rightarrow \left(\frac{13,1}{0,833 \times 19,6} \right)^2 + \frac{1,73}{0,97 \times 15,7} = 0,76 \leq 1,00$$

Muutetaan yllä oleva ehto käyttöasteeksi

$$a = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} = \frac{13,1}{0,833 \times 19,6} = 0,802$$

$$b = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{1,73}{0,97 \times 15,7} = 0,114$$

käyttöaste:
$$\frac{2 \times a^2}{\sqrt{b^2 + 4 \times a^2} - b} = \frac{2 \times 0,802^2}{\sqrt{0,114^2 + 4 \times 0,802^2} - 0,114} = 0,861 (86 \%)$$

4.7.3 ALAREUNAN KIEPAHDUS (kuormitus vedetyllä reunalla)

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, $L_{ef} = L_1 - 0,5 \times h \Rightarrow 6000 \text{ mm} - 0,5 \times 2080 \text{ mm} = 4960 \text{ mm}$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h \times L_{ef}} \times E_{0.05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (240 \text{ mm})^2}{2080 \text{ mm} \times 4960 \text{ mm}} \times 10800 \text{ N/mm}^2 = 42,21 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{42,21 \text{ N/mm}^2}} = 0,843$$

$$\text{Lasketaan } k_{crit} = \begin{cases} 1 & , \text{ kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} & , \text{ kun } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & , \text{ kun } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

eli tässä tapauksessa: $k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} \Rightarrow k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times 0,843 = 0,928$

Lasketaan taivutusjännitys:
$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{1857,2 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 240 \times 2080^2} = 10,7 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto:
$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \Rightarrow 10,7 \text{ N/mm}^2 \leq 0,928 \times 19,6 \text{ N/mm}^2 (59 \%)$$

4.7.4 ALAREUNAN YHDISTETTY PURISTUS JA KIEPAHDUS

Kaaren nurjahduspituus heikommassa suunnassa (kiepahdustukien väli): $L_{c,y} = L_1 \Rightarrow L_{c,y} = 2\,400\text{ mm}$

$$\text{Lasketaan jäyhyysäde: } i_z = \frac{B}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_z = \frac{240}{\sqrt{12}} = 69,28\text{ mm}$$

$$\text{Lasketaan kaaren hoikkuus: } \lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \Rightarrow \lambda_y = \frac{2\,400}{69,28} = 34,64$$

$$\text{Lasketaan muunnettu hoikkuus: } \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{34,64}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10\,800}} = 0,525$$

Alkukäyryydestä johtuva kerroin: $\beta_c = 0,1$ (liimapuu)

Lasketaan nurjahduskerroin:

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \\ \Rightarrow k_z = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (0,525 - 0,3) + 0,525^2) = 0,649$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \leq 1 \\ \Rightarrow k_{c,z} = \frac{1}{0,649 + \sqrt{0,649^2 - 0,525^2}} = 0,97 \leq 1$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{898,1 \times 10^3}{240 \times 2080} = 1,80\text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty kiepahdus ja puristus:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow \left(\frac{10,7}{0,928 \times 19,6} \right)^2 + \frac{1,80}{0,97 \times 15,7} = 0,46 \leq 1,00$$

Muutetaan yllä oleva ehto käyttöasteeksi

$$a = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} = \frac{13,1}{0,833 \times 19,6} = 0,802$$

$$b = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{1,73}{0,97 \times 15,7} = 0,114$$

$$\text{käyttöaste: } \frac{2 \times a^2}{\sqrt{b^2 + 4 \times a^2 - b}} = \frac{2 \times 0,802^2}{\sqrt{0,114^2 + 4 \times 0,802^2 - 0,114}} = 0,861 (86\%)$$

4.8 KAAREN SIIRTYMÄARVIO

Kaaren siirtymäarvio kannattaa laskea statiikka ohjelman, jolloin tulee tarkemmat ja luotettavammat tulokset kuin käsin laskettuna.