

Esimerkkilaskelma

Kaareva nurkkainen 3-nivelkehä

16.01.2019

Sisällysluettelo

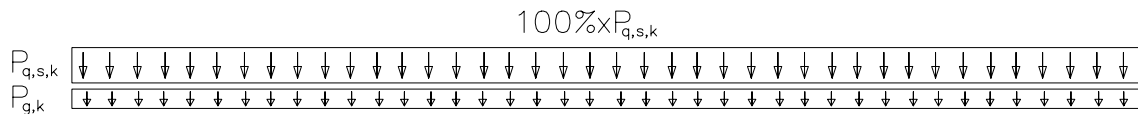
1	LÄHTÖTIEDOT.....	- 3 -
2	KUORMAT	- 3 -
3	MATERIAALI	- 4 -
4	MITOITUS	- 5 -
4.1	TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TAIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA	- 8 -
4.2	PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA.....	- 8 -
4.3	KEHÄJALKA.....	- 8 -
4.3.1	LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA.....	- 8 -
4.3.2	TUKIPAINETUELLA (HORIZONTAALIVOIMA)	- 9 -
4.3.3	PURISTUSKESTÄVYYS TUELLA (VERTIKAALI VOIMA).....	- 9 -
4.3.4	YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (TASON SUUNNASSA)	- 9 -
4.3.5	HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)	- 11 -
4.3.6	KIEPAHDUSKESTÄVYYS.....	- 11 -
4.4	KAAREVA OSA	- 13 -
4.4.1	YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (NURJAHDUS TASOSSA)	- 13 -
4.4.2	HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)	- 14 -
4.4.3	KIEPAHDUSKESTÄVYYS.....	- 15 -
4.5	KEHÄPALKKI	- 16 -
4.5.1	LEIKKAUSKESTÄVYYS HARJALLA.....	- 16 -
4.5.2	PURISTUSKESTÄVYYS HARJALLA	- 16 -
4.5.3	YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS	- 17 -
4.5.4	HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)	- 18 -
4.5.5	KIEPAHDUSKESTÄVYYS.....	- 19 -
4.6	KEHÄN SIIRTYMÄÄRVIO.....	- 21 -

1 LÄHTÖTIEDOT

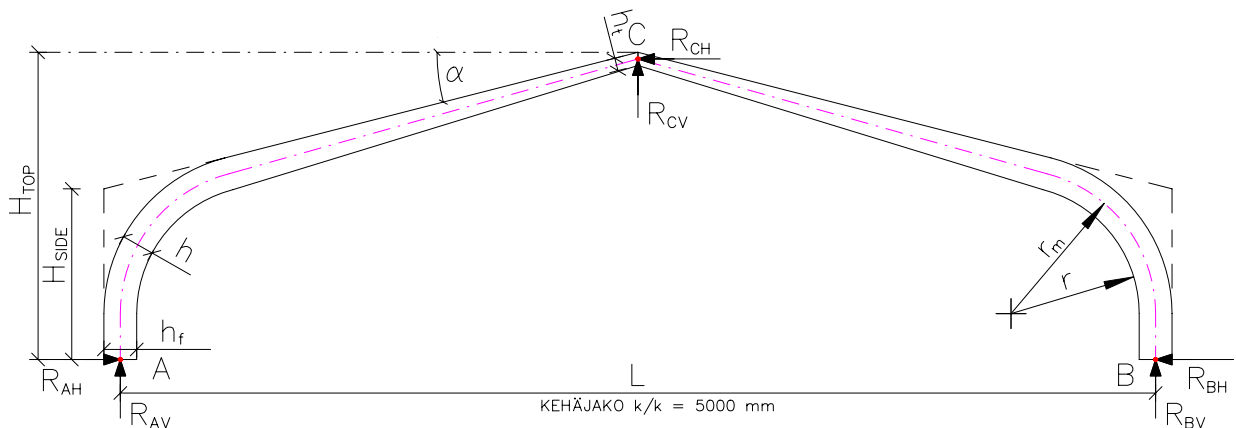
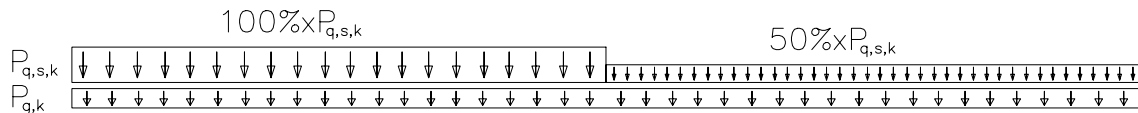
Rakennuspaikka:	Helsinki, teollisuusalue
Rakenne:	Symmetrinen 3-nivelkehä (jänneväli 24,23 m), 3-aukkoiset sekundäärit (orret, elementissä)
Seuraamusluokka:	CC3 => $K_{FI} = 1,1$ (oletus tässä laskelmassa)
Normit:	Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1, Liimapuukäsikirja 2015, RIL 153-1984 Kuormat: RIL 201-1-2017, SFS EN 1990, SFS EN 1991-1-1, SFS EN 1991-1-3

2 KUORMAT

KUORMITUS 1:



KUORMITUS 2:



Tässä esimerkklaskelmassa tarkastetaan **vain kaksi** kuormitustapausta:

- KT1: Omapaino + symmetrinen lumi
- KT2: Omapaino + epäsymmetrinen lumi

Myös muut kuormitustapaukset tulee tarkistaa, kuten tuulen aiheuttamat kuormitustapaukset.

LUMIKUORMA:

Lumikuorma maassa, $s_k = 2,75 \text{ kN/m}^2$ (ei pienennöstä tuen lähellä).

Katon muotokerroin lumelle $\mu_1 = 0,8$ ja epäsymmetriselle $0,5 \times \mu_1 = 0,4$

=> lumikuorma katolla $q_{s,k} = \mu_1 \times s_k \Rightarrow 0,8 \times 2,75 \text{ kN/m}^2 = 2,2 \text{ kN/m}^2$

Koska kehäjako 5000 mm ja kattorakenne (orret) 3-aukkoisia

=> Lumikuorma kehälle, $p_{q,s,k} = 1,1 \times k/k \times q_{s,k} \Rightarrow 1,1 \times 5 \text{ m} \times 2,2 \text{ kN/m}^2 = 12,1 \text{ kN/m}$

OMAPAINO:

Omapaino kasvaa tukea lähestyttäessä. Tässä laskelmassa yksinkertaistettu mallia siten, että omapaino pysyy vakiona koko kehän matkalla.

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 5000 mm ja kattorakenne (orret) 3-aukkoisia

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

Arvioidaan liimapuukehän omapaino eli korkeus 1,001 m ja leveys 0,190 m

$$p_{g,2,k} = 1,001 \text{ m} \times 0,190 \text{ m} \times 5 \text{ kN/m}^3 = 0,95 \text{ kN/m (palkkiosan kolmannespisteessä).}$$

Oletetaan kuorma koko kehän matkalle (Harjalla olisi vähemmän ja tuella enemmän)

Lopullinen omanpainon kuorma kehälle

$$\Rightarrow p_{g,k} = p_{g,k,1} + p_{g,k,2} \Rightarrow 4,4 \text{ kN/m} + 0,95 \text{ kN/m} = 5,4 \text{ kN/m}$$

Murtorajatilan kuorma kehälle:

$$\text{lumi: } p_{q,s,d} = K_{FI} \times 1,5 \times p_{q,s,k} = 1,1 \times 1,5 \times 12,1 \text{ kN/m} = 20,0 \text{ kN/m}$$

$$\text{omapaino: } p_{g',d} = K_{FI} \times 1,15 \times p_{g,k} = 1,1 \times 1,15 \times 5,3 \text{ kN/m} = 6,7 \text{ kN/m}$$

3 MATERIAALI

Liimapuupalkki GL30c 190x1221...594

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

kehän korkeus pääsääntöisesti yli 600 mm $\Rightarrow$ taivutuslujuuden ominaisarvon korotuskerroin $k_h = 1,0$

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

$$k \leq \min \left\{ \left(\frac{40}{t} \right)^{0,1} \right\} \Rightarrow k \leq \min \left\{ \left(\frac{40}{10} \right)^{0,1} \right\} \Rightarrow k = 1,05$$

Aikaluokka: Keskipitkä

Käyttöluokka: 2

$$\Rightarrow \text{aika- ja käyttöluokka kerroin, } k_{mod} = 0,8$$

$$\Rightarrow \text{virumaluku, } k_{def} = 0,8$$

Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet

materiaalin osavarmuusluku, $\gamma_M = 1,25$

	Ominaislujuus	Suunnittelulujuus
Taivutuslujuus:	$f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = k \times k_h \times k_{mod} \times f_{m,k} / \gamma_M = 20,2 \text{ N/mm}^2$
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:	$G_{0,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$	$G_{0,05} = 540 \text{ N/mm}^2$

4 MITOITUS

jänneväli, $L = 24\,230\text{ mm}$	lamellin paksuus, $t = 10\text{ mm}$
kattokaltevuus, $\alpha = 14^\circ$	kehän leveys, $b = 190\text{ mm}$
kehäjalan korkeus, $h_f = 1\,221\text{ mm}$	kaarevan osan korkeus, $h = 1\,221\text{ mm}$
kehäpalkin korkeus harjalla, $h_t = 594\text{ mm}$	Kaarevan osan keskilinjän säde, $r_m = 3\,000\text{ mm}$
sisäkaaren säde, $r_{in} = r = 2\,390\text{ mm}$	kehäpalkin "rautalangan" kaltevuus, $\alpha_p = 14,93^\circ (< 20^\circ)$
rakennuksen räystäskorkeus, $H_{side} = 4\,000\text{ mm}$	rakennuksen harjakorkeus, $H_{top} = 7\,021\text{ mm}$

Tarkistetaan lamellin maksimipaksuus (RIL 205-2017):

Liimapuussa lamellien paksuus on enintään 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. Minimivaatimuksen $1,4 \times$ 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 $f_{m,j,dc,k} = 1,4 \times f_{t,0,l,k} \Rightarrow f_{m,j,dc,k} = 1,4 \times 15\text{ N/mm}^2 = 21,0\text{ N/mm}^2$.

$$t \leq \frac{2390\text{ mm}}{250} \times \left(1 + \frac{21,0\text{ N/mm}^2}{150} \right) = 10,9\text{ mm}$$

Harjan keskilinjän korkeus tukitasosta:

$$f = H_{top} - \frac{\frac{h_t}{2}}{\cos \alpha_p} \Rightarrow f = 7\,021\text{ mm} - \frac{\frac{594\text{ mm}}{2}}{\cos 14,93^\circ} = 6\,714\text{ mm}$$

Tukireaktiot olivat seuraavat (murtorajatila):

Kuormitus 1: Symmetrinen lumi

tuilla (tukitasossa)

pystytukireaktiot:

$$R_{AV} = R_{BV} = \frac{(p_{g,d} + p_{q,s,d}) \times L}{2}$$

$$\Rightarrow R_{AV} = R_{BV} = \frac{(6,7 + 20,0) \times 24,23}{2} = 323,5\text{ kN}$$

vaakatukireaktiot:

$$R_{AH} = R_{BH} = \frac{R_{AV} \times \frac{L}{2} - (p_{g,d} + p_{q,s,d}) \times \frac{L^2}{8}}{f}$$

$$\Rightarrow R_{AH} = R_{BH} = \frac{323,5 \times \frac{24,23}{2} - (6,7 + 20,0) \times \frac{24,23^2}{8}}{6,714} = 291,8 \text{ kN}$$

harjalla:

pystyvoima:

$$R_{CV} = 0,0 \text{ kN}$$

vaakavoima:

$$R_{CH} = \frac{(p_{g,d} + p_{q,s,d}) \times \frac{L^2}{8}}{f}$$

$$\Rightarrow R_{CH} = \frac{(6,7 + 20,0) \times \frac{24,23^2}{8}}{6,714} = 291,8 \text{ kN}$$

Kuormitus 2: Epäsymmetrinen lumi

tuilla (tukitasossa)

pystytukireaktiot:

$$R_{AV} = \frac{(3 \times (p_{g,d} + p_{q,s,d}) + (p_{g,d} + 0,5 \times p_{q,s,d})) \times L}{8}$$

$$\Rightarrow R_{AV} = \frac{(3 \times (6,7 + 20,0) + (6,7 + 0,5 \times 20,0)) \times 24,23}{8} = 293,2 \text{ kN}$$

$$R_{BV} = \frac{((p_{g,d} + p_{q,s,d}) + 3 \times (p_{g,d} + 0,5 \times p_{q,s,d})) \times L}{8}$$

$$\Rightarrow R_{BV} = \frac{((6,7 + 20,0) + 3 \times (6,7 + 0,5 \times 20,0)) \times 24,23}{8} = 232,6 \text{ kN}$$

vaakatukireaktiot:

$$R_{AH} = R_{BH} = \frac{((p_{g,d} + p_{q,s,d}) + (p_{g,d} + 0,5 \times p_{q,s,d})) \times L^2}{16 \times f}$$

$$\Rightarrow R_{AH} = R_{BH} = \frac{((6,7 + 20,0) + (6,7 + 0,5 \times 20,0)) \times 24,23^2}{16 \times 6,714} = 237,2 \text{ kN}$$

harjalla:

pystyvoima:

$$R_{CV} = \frac{((p_{g,d} + p_{q,s,d}) - (p_{g,d} + 0,5 \times p_{q,s,d})) \times L}{8}$$

$$\Rightarrow R_{CV} = \frac{((6,7 + 20,0) - (6,7 + 0,5 \times 20,0)) \times 24,23}{8} = 30,3 \text{ kN}$$

vaakavoima:

$$R_{CH} = \frac{(p_{g,d} + p_{q,s,d}) \times \frac{L^2}{8} - R_{CV} \times \frac{L}{2}}{f}$$

$$\Rightarrow R_{CH} = \frac{(6,7 + 20,0) \times \frac{24,23^2}{8} - 30,3 \times \frac{24,23}{2}}{6,714} = 237,2 \text{ kN}$$

Kriittiset mitoituskohdat, niiden voimasuureet ja kuormitustapaus olivat seuraavat (koordinaatiston origo (0,0) vasen tuki). Laskenta suoritettu Excel-pohjalla, jossa yksi kehän puolikas on jaettu kolmeen osaan: Kehäjalka, kaareva osa ja kehäpalkki. Kehäjalka on jaettu kymmeneen osaan (Y-akseli) ja kaareva osa ja kehäpalkki on jaettu kymmeneen osaan (X-akseli).

	x:n kohdassa	voimasuure / kuormitus
Taivutus:	910 mm	$M_d = 689,7 \text{ kNm}$ / kuormitus 1
Puristus:	0 mm	$N_d = 323,5 \text{ kN}$ / kuormitus 1
Kehäjalka:		
Leikkaus tuella:	0 mm	$Q_d = 291,8 \text{ kN}$ / kuormitus 1
Normaalivoima tuella:	0 mm	$N_d = 323,5 \text{ kN}$ / kuormitus 1
Yhdistetty taivutus + puristus:	$y=1 \text{ 179 mm}$	$N_d = 323,5 \text{ kN}$ ja $M_d = 344,5 \text{ kNm}$ / kuormitus 1
Kaareva osa:		
Yhdistetty taivutus + puristus:	910 mm	$N_d = 418,3 \text{ kN}$ ja $M_d = 689,7 \text{ kNm}$ / kuormitus 1
Kehäpalkki:		
Leikkaus harjalla:	12 115 mm	$Q_d = 90,5 \text{ kN}$ / kuormitus 2
Normaalivoima harjalla:	12 115 mm	$N_d = 281,9 \text{ kN}$ / kuormitus 1
Yhdistetty taivutus + puristus:	10 147 mm	$N_d = 235,4 \text{ kN}$ ja $M_d = 132,5 \text{ kNm}$ / kuormitus 2
Maksimi puristus:	2 274 mm	$N_d = 350,1 \text{ kN}$ / kuormitus 1
Kiepahdus:		
- kehän alareuna:	910 mm	$M_d = 689,7 \text{ kNm}$ / kuormitus 1 (alareuna puristettu)
- kehän yläreuna:	10 147 mm	$M_d = 132,5 \text{ kNm}$ / kuormitus 2 (yläreuna puristettu)

4.1 TAIVUTUSKESTÄVYYS MAKSIMI TAIVUTUSMOMENTIN KOHDALLA

Maksimi taivutusmomentti löytyy kohdasta $x = 910$ mm ja momentin arvo $M_d = 689,7$ kNm (kaareva osa)

Lasketaan taivutusjännitys maksimi momentin kohdassa:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{\frac{1}{6} \times b \times h^2} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{689,7 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 190 \text{ mm} \times (1221 \text{ mm})^2} = 14,6 \text{ N/mm}^2$$

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 $t = 10$ mm ja tästä seuraa, että $r_{in} / t < 240 \Rightarrow k_r = 0,999$

Mitoitusehto: $\sigma_{m,d} \leq k_r \times f_{m,d} \Rightarrow 14,6 \text{ N/mm}^2 \leq 0,999 \times 20,2 \text{ N/mm}^2 (72 \%)$

4.2 PURISTUSKESTÄVYYS MAKSIMI PURISTUSVOIMAN KOHDALLA

Maksimi puristus löytyy kohdasta $x = 0$ mm ja puristavan voiman arvo $N_d = 323,5$ kN (kehäjalka)

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:

$$\sigma_{c,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,d} = \frac{323,5 \times 10^3 \text{ N}}{190 \times 1221} = 1,39 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto: $\sigma_{c,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 1,39 \text{ N/mm}^2 \leq 15,7 \text{ N/mm}^2 (9 \%)$

4.3 KEHÄJALKA

4.3.1 LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA

Maksimi leikkausvoima löytyy kohdasta $x = 0$ mm ja leikkausvoiman arvo $Q_d = 291,8$ kN

tehollinen leveys $b_{eff} = b = 190$ mm

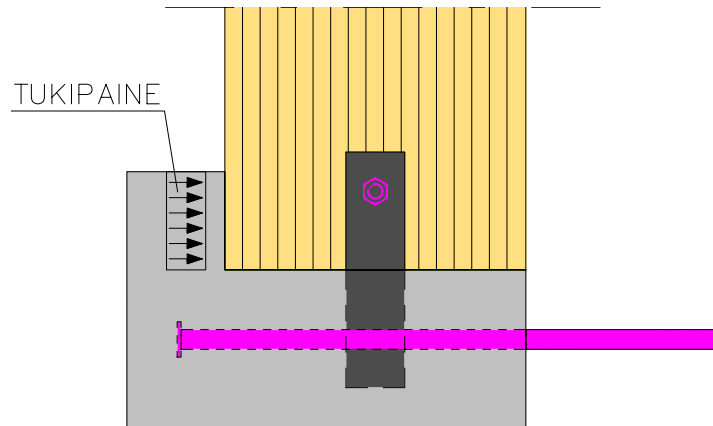
Lasketaan leikkausjännitys tuen kohdalla:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{Q_d}{A} \Rightarrow \tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{291,8 \times 10^3 \text{ N}}{190 \text{ mm} \times 1221 \text{ mm}} = 1,89 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto: $\tau_d \leq f_{v,d} \Rightarrow 1,89 \text{ N/mm}^2 \leq 2,24 \text{ N/mm}^2 (84 \%)$

4.3.2 TUKIPAINIE TUELLA (HORISONTAALIVOIMA)

Tässä laskelmassa ei ole otettu kantaa tukiliitokseen. Siinä tuli muistaa mitoittaa vaakavoiman aiheuttama tukipaine (riippuu liitoksen mallista). Vastaavasti mahdollinen nosteen aiheuttamat rasitukset liitoksessa tulee muistaa tarkistaa.



4.3.3 PURISTUSKESTÄVYYS TUELLA (VERTIKAALI VOIMA)

Tuen puristavan voiman arvo $N_d = 323,5 \text{ kN}$

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:

$$\sigma_{c,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,d} = \frac{323,5 \times 10^3 \text{ N}}{190 \times 1221} = 1,39 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto: $\sigma_{c,d} \leq f_{c,0,d} \Rightarrow 1,39 \text{ N/mm}^2 \leq 15,7 \text{ N/mm}^2 (9 \%)$

4.3.4 YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (TASON SUUNNASSA)

Jotta saadaan kehäjalan nurjahduspituus selville, joudutaan selvittämään seuraavat asiat:

Palkin pituus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, $S = 12\,538 \text{ mm} \Rightarrow 0,65 \times S = 8\,150 \text{ mm}$ (kts. RIL 205-1-2017 s.81)

$\Rightarrow$ palkin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, $h_R = 1\,096 \text{ mm}$

Pilarin korkeus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, $H = 3\,523 \text{ mm} \Rightarrow 0,65 \times H = 2\,290 \text{ mm}$ (kts. RIL 205-1-2017 s.81)

$\Rightarrow$ pilarin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, $h_S = 1\,221 \text{ mm}$

Palkin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:

$$I_R = \frac{1}{12} \times b \times h_R^3 \Rightarrow I_R = \frac{1}{12} \times 190 \times 1096^3 = 20830052681 \text{ mm}^4$$

Pilarin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:

$$I_S = \frac{1}{12} \times b \times h_S^3 \Rightarrow I_S = \frac{1}{12} \times 190 \times 1221^3 = 28821683633 \text{ mm}^4$$

Kehäpalkissa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), $N_R = 350,1 \text{ kN}$

Kehäjalassa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), $N_S = 323,5 \text{ kN}$

Kehäjalan nurjahduspituus:

$$L_c = H \times \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \times I_S \times S}{3 \times I_R \times H} + \frac{I_S \times N_R \times S^2}{I_R \times N_S \times H^2}}$$

$$\Rightarrow L_c = 3523 \times \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \times 28,82 \times 10^9 \times 12538}{3 \times 20,83 \times 10^9 \times 3523} + \frac{28,82 \times 10^9 \times 350,1 \times 12538^2}{20,83 \times 10^9 \times 323,5 \times 3523^2}}$$

$$\Rightarrow L_c = 3523 \times \sqrt{4 + 16,1800 + 18,9416}$$

$$\Rightarrow L_c = 22035 \text{ mm}$$

Lasketaan jäyhyysäde: $i_y = \frac{h_s}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_y = \frac{1221}{\sqrt{12}} = 352 \text{ mm}$

Lasketaan kaaren hoikkuus: $\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \Rightarrow \lambda_y = \frac{22035}{352} = 62,60$

Lasketaan muunnettu hoikkuus: $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{62,60}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10800}} = 0,949$

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

Lasketaan nurjahduskerroin:

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

$$\Rightarrow k_y = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (0,949 - 0,3) + 0,949^2) = 0,983$$

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

$$\Rightarrow k_{c,y} = \frac{1}{0,983 + \sqrt{0,983^2 - 0,949^2}} = 0,807 \leq 1 \Rightarrow k_{c,y} = 0,807$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{323,5 \times 10^3}{190 \times 1221} = 1,39 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{344,5 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 7,3 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow \frac{7,3}{20,2} + \frac{1,39}{0,807 \times 15,7} = 0,47 \leq 1,00 \text{ (47 \%)}$$

4.3.5 HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)

Oletetaan nurjahduspituudeksi kiepahdustukien väli eli $L_{c,y} = 1\,179\text{ mm}$.

$$\text{Lasketaan jäyhyysäde: } i_z = \frac{b}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_z = \frac{190}{\sqrt{12}} = 54,8\text{ mm}$$

$$\text{Lasketaan kaaren hoikkuus: } \lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \Rightarrow \lambda_z = \frac{1179}{54,8} = 21,50$$

$$\text{Lasketaan muunnettu hoikkuus: } \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{21,50}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10800}} = 0,326$$

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

Lasketaan nurjahduskerroin:

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \\ \Rightarrow k_z = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (0,326 - 0,3) + 0,326^2) = 0,554$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \leq 1 \\ \Rightarrow k_{c,z} = \frac{1}{0,554 + \sqrt{0,554^2 - 0,326^2}} = 0,998 \leq 1 \Rightarrow k_{c,z} = 0,998$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{323,5 \times 10^3}{190 \times 1221} = 1,39\text{ N/mm}^2$$

Lasketaan taivutusjännitys (vahvemman suunnan):

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{344,5 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 7,3\text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:

$$0,7 \times \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow 0,7 \times \frac{7,3}{20,2} + \frac{1,39}{0,998 \times 15,7} = 0,34 \leq 1,00 \text{ (34 \%)}$$

4.3.6 KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Kehäjalan puristuspinna on kehän sisäpuolella. Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kehäjalan maksimi puristus kehän sisäpinnassa. Valitaan alareunan kiepahdustukien väliksi $L_1 = 1\,179\text{ mm}$ (tuki kaarevan kohdan alkupisteessä).

Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

	y:n kohdassa	voimasuure
kehän alareuna:	1 179 mm	$M_d = 344,5\text{ kNm}$ / kuormitus 1

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

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, $L_{ef} = L_1 = 1\,179\text{ mm}$ (Jalan taivutus tulee pääosin sen päiden voimasuureista ~ keskilinjalta)

Suorakaidepoikkileikkauksen kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h \times L_{ef}} \times E_{0.05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (190\text{ mm})^2}{1221\text{ mm} \times 1179,5\text{ mm}} \times 10800\text{ N/mm}^2 = 189,5\text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0\text{ N/mm}^2}{189,5\text{ N/mm}^2}} = 0,398$$

$$\text{Lasketaan } k_{crit} = \begin{cases} 1 & , \text{ kun } \lambda_{rel,m} \leq 0.75 \\ 1.56 - 0.75 \times \lambda_{rel,m} & , \text{ kun } 0.75 < \lambda_{rel,m} \leq 1.4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} & , \text{ kun } 1.4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

eli tässä tapauksessa: $k_{crit} = 1,0$

$$\text{Lasketaan taivutusjännitys: } \sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{344,5 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 7,3\text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto: } \sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \Rightarrow 7,3\text{ N/mm}^2 \leq 1,0 \times 20,2\text{ N/mm}^2 \text{ (36 \%)}$$

Lisäksi tarkistetaan yhdistetty puristus ja kiepahdus:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1 \Rightarrow \left(\frac{7,3}{1,0 \times 20,2} \right)^2 + \frac{1,39}{0,998 \times 15,7} = 0,22 \leq 1,0$$

Muutetaan yllä oleva ehto käyttöasteeksi

$$a = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} = \frac{7,3}{1,0 \times 20,2} = 0,361$$

$$b = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{1,39}{0,998 \times 15,7} = 0,089$$

käyttöaste: $\frac{2 \times a^2}{\sqrt{b^2 + 4 \times a^2} - b} = \frac{2 \times 0,361^2}{\sqrt{0,089^2 + 4 \times 0,361^2} - 0,089} = 0,408 (41\%)$

4.4 KAAREVA OSA

4.4.1 YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS (NURJAHDUS TASOSSA)

Kaarevan osan nurjahduspituus (RIL 153-1984 Liimapuurakenteet s. 105):

$$L_c = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + f^2}$$

$$f = H_{top} - \frac{h_t}{\cos \alpha_r} \Rightarrow f = 7021 \text{ mm} - \frac{594 \text{ mm}}{\cos 14,93^\circ} = 6714 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow L_c = \sqrt{\left(\frac{24230 \text{ mm}}{2}\right)^2 + (6714 \text{ mm})^2} = 13851 \text{ mm}$$

Lasketaan jäyhyysäde: $i_y = \frac{h_H}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_y = \frac{1221}{\sqrt{12}} = 352 \text{ mm}$

Lasketaan kaaren hoikkuus: $\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \Rightarrow \lambda_y = \frac{13851}{352} = 39,35$

Lasketaan muunnettu hoikkuus: $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{39,35}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10800}} = 0,597$

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

Lasketaan nurjahduskerroin:

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

$$\Rightarrow k_y = 0,5 \times \left(1 + 0,1 \times (0,597 - 0,3) + 0,597^2\right) = 0,693$$

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

$$\Rightarrow k_{c,y} = \frac{1}{0,693 + \sqrt{0,693^2 - 0,597^2}} = 0,96 \leq 1 \Rightarrow k_{c,y} = 0,96$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{418,3 \times 10^3}{190 \times 1221} = 1,80 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{k_r \times W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{689,7 \times 10^6}{0,83 \times \frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 17,6 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow \frac{17,6}{20,2} + \frac{1,80}{0,96 \times 15,7} = 0,99 \leq 1,00 \text{ (99 \%, ennen 99 \%)}$$

4.4.2 HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)

Oletetaan nurjahduspituudeksi kiepahdustukien väli eli $L_{c,y} = 3\,170 \text{ mm}$ (kaareva osa tuettu alku ja loppupisteestä).

Lasketaan jäyhyysäde: $i_z = \frac{b}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_z = \frac{190}{\sqrt{12}} = 54,8 \text{ mm}$

Lasketaan kaaren hoikkuus: $\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \Rightarrow \lambda_z = \frac{3170}{54,8} = 57,78$

Lasketaan muunnettu hoikkuus: $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{57,78}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10800}} = 0,876$

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

Lasketaan nurjahduskerroin:

$$\begin{aligned} k_z &= 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \\ \Rightarrow k_z &= 0,5 \times (1 + 0,1 \times (0,876 - 0,3) + 0,876^2) = 0,912 \\ k_{c,z} &= \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \leq 1 \\ \Rightarrow k_{c,z} &= \frac{1}{0,912 + \sqrt{0,912^2 - 0,876^2}} = 0,858 \leq 1 \Rightarrow k_{c,z} = 0,858 \end{aligned}$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{418,3 \times 10^3}{190 \times 1221} = 1,80 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan taivutusjännitys (vahvemman suunnan):

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{k_r \times W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{689,7 \times 10^6}{0,83 \times \frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 17,6 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:

$$0,7 \times \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow 0,7 \times \frac{17,6}{20,2} + \frac{1,80}{0,858 \times 15,7} = 0,74 \leq 1,00 \text{ (74 \%)}$$

4.4.3 KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Kaarevan osan puristuspinna on kehän sisäpuolella. Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kaarevan osan maksimi puristus kehän sisäpinnassa. Valitaan alareunan kiepahdustukien väliksi $L_1 = 3\,170\text{ mm}$ (tuki kaarevan kohdan alku- ja loppupisteessä).

Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

	x:n kohdassa	voimasuure
kehän alareuna:	910 mm	$M_d = 689,7\text{ kNm}$ / kuormitus 1
Valitaan kerroin $c =$	$\begin{cases} 0,78 \text{ havupuusahatavara} \\ 0,72 \text{ liimapuu GL30cs} \\ 0,70 \text{ liimapuu GL30c ja GL30hs} \\ 0,68 \text{ liimapuu GL30h} \\ 0,67 \text{ Kerto-Q-LVL} \\ 0,58 \text{ Kerto-S- ja Kerto-T-LVL} \end{cases} \Rightarrow c = 0,70$	

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, $L_{ef} = L_1 = 3\,170\text{ mm}$ (Kaarevan osan taivutus tulee pääosin sen päiden voimasuureista ~ keskilinjalta)

Suorakaidepoikkileikkauksen kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h \times L_{ef}} \times E_{0.05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (190\text{ mm})^2}{1221\text{ mm} \times 3170\text{ mm}} \times 10800\text{ N/mm}^2 = 70,51\text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0\text{ N/mm}^2}{70,51\text{ N/mm}^2}} = 0,652$$

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

eli tässä tapauksessa: $k_{crit} = 1,0$

$$\text{Lasketaan taivutusjännitys: } \sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{689,7 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 14,6\text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto: } \sigma_{m,d} \leq k_r \times k_{crit} \times f_{m,d} \Rightarrow 14,6\text{ N/mm}^2 \leq 0,83 \times 1,0 \times 20,2\text{ N/mm}^2 \text{ (87 \%)}$$

Lisäksi tarkistetaan yhdistetty puristus ja kiepahdus:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_r \times k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1 \Rightarrow \left(\frac{14,6}{0,83 \times 1,0 \times 20,2} \right)^2 + \frac{1,80}{0,851 \times 15,7} = 0,89 \leq 1,0$$

Muutetaan yllä oleva ehto käyttöasteeksi

$$a = \frac{\sigma_{m,d}}{k_r \times k_{crit} \times f_{m,d}} = \frac{14,6}{0,83 \times 1,0 \times 20,2} = 0,867$$

$$b = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{1,80}{0,851 \times 15,7} = 0,135$$

$$\text{käyttöaste: } \frac{2 \times a^2}{\sqrt{b^2 + 4 \times a^2} - b} = \frac{2 \times 0,867^2}{\sqrt{0,135^2 + 4 \times 0,867^2} - 0,135} = 0,936 \text{ (94\%)}$$

4.5 KEHÄPALKKI

4.5.1 LEIKKAUSKESTÄVYYS HARJALLA

Kehäpalkki:

Leikkaus harjalla:	12 115 mm	$Q_d = 90,5 \text{ kN / kuormitus 2}$
Normaalivoima harjalla:	12 115 mm	$N_d = 281,9 \text{ kN / kuormitus 1}$
Yhdistetty taivutus + puristus:	10 147 mm	$N_d = 235,4 \text{ kN ja } M_d = 132,5 \text{ kNm / kuormitus 2}$

Harjan leikkausvoiman arvo $Q_d = 90,5 \text{ kN}$ (kuormitus 2)

Koska käyttöluokka 2, niin tehollinen leveys $b_{eff} = b = 190 \text{ mm}$

Lasketaan leikkausjännitys tuen kohdalla:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{Q_d}{A} \Rightarrow \tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{90,5 \times 10^3 \text{ N}}{190 \text{ mm} \times 594 \text{ mm}} = 1,20 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto: } \tau_d \leq f_{v,d} \Rightarrow 1,20 \text{ N/mm}^2 \leq 2,24 \text{ N/mm}^2 \text{ (54 \%)} \quad \boxed{}$$

4.5.2 PURISTUSKESTÄVYYS HARJALLA

Harjan normaalivoiman arvo $N_d = 282,3 \text{ kN}$

Lasketaan puristusjännitys maksimi puristuksen kohdalla:

$$\sigma_{c,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,d} = \frac{282,3 \times 10^3 \text{ N}}{190 \times 594} = 2,50 \text{ N/mm}^2$$

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

4.5.3 YHDISTETTY PURISTUS JA TAIVUTUS

Jotta saadaan kehäpalkin nurjahduspituus selville, joudutaan selvittämään seuraavat asiat:

Palkin pituus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, $S = 12\,538\text{ mm} \Rightarrow 0,65 \times S = 8\,150\text{ mm}$ (kts. RIL 205-1-2017 s.81)

$\Rightarrow$ palkin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, $h_R = 1\,096\text{ mm}$

Pilarin korkeus pilarin ja palkin leikkauskohtaan, $H = 3\,523\text{ mm} \Rightarrow 0,65 \times H = 2\,290\text{ mm}$ (kts. RIL 205-1-2017 s.81)

$\Rightarrow$ pilarin poikkileikkauksen korkeus kyseisessä pisteessä, $h_S = 1\,221\text{ mm}$

Palkin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:

$$I_R = \frac{1}{12} \times b \times h_R^3 \Rightarrow I_R = \frac{1}{12} \times 190 \times 1096^3 = 20\,830\,052\,681\text{ mm}^4$$

Pilarin jäyhyysmomentti kyseisessä kohdassa:

$$I_S = \frac{1}{12} \times b \times h_S^3 \Rightarrow I_S = \frac{1}{12} \times 190 \times 1221^3 = 28\,821\,683\,633\text{ mm}^4$$

Kehäpalkissa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), $N_R = 350,1\text{ kN}$

Kehäjalassa vaikuttava normaalivoima (kuormitus 1), $N_S = 323,9\text{ kN}$

Kehäpalkin nurjahduspituus:

$$L_c = H \times \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \times I_S \times S}{3 \times I_R \times H} + \frac{I_S \times N_R \times S^2}{I_R \times N_S \times H^2}} \times \sqrt{\frac{I_R \times N_S}{I_S \times N_R}}$$

$$\Rightarrow L_c = 3523 \times \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \times 28,82 \times 10^9 \times 12\,538}{3 \times 20,83 \times 10^9 \times 3523} + \frac{28,82 \times 10^9 \times 350,1 \times 12\,538^2}{20,83 \times 10^9 \times 323,5 \times 3523^2}} \times \sqrt{\frac{20,83 \times 10^9 \times 323,5}{28,82 \times 10^9 \times 350,1}}$$

$$\Rightarrow L_c = 3523 \times \sqrt{4 + 16,1800 + 18,9416} \times \sqrt{0,6687}$$

$$\Rightarrow L_c = 18\,019\text{ mm}$$

Palkin korkeus kohdassa $10\,147\text{ mm} \Rightarrow h = 719\text{ mm}$

Lasketaan jäyhyysäde: $i_y = \frac{h}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_y = \frac{719}{\sqrt{12}} = 208\text{ mm}$

Lasketaan kaaren hoikkuus: $\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \Rightarrow \lambda_y = \frac{18\,019}{208} = 86,63$

Lasketaan muunnettu hoikkuus: $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,y} = \frac{86,63}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10\,800}} = 1,31$

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

Lasketaan nurjahduskerroin:

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

$$\Rightarrow k_y = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (1,31 - 0,3) + 1,31^2) = 1,41$$

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

$$\Rightarrow k_{c,y} = \frac{1}{1,41 + \sqrt{1,41^2 - 1,31^2}} = 0,518 \leq 1 \Rightarrow k_{c,y} = 0,52$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{235,4 \times 10^3}{190 \times 719} = 1,72 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan taivutusjännitys:

Kehäpalkin yläpinnan kaltevuus $\alpha_1 = 3,52^\circ$

Kerroin $k_{m,\alpha}$ lasketaan seuraavasti:

kun viistetty reuna on puristettu:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{m,d}}{1,5 \times f_{v,d}} \times \tan \alpha \right)^2 + \left(\frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \times \tan^2 \alpha \right)^2}}$$

$$\Rightarrow k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{20,2 \text{ N/mm}^2}{1,5 \times 2,24 \text{ N/mm}^2} \times \tan(3,52^\circ) \right)^2 + \left(\frac{20,2 \text{ N/mm}^2}{1,60 \text{ N/mm}^2} \times \tan^2(3,52^\circ) \right)^2}} = 0,94$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{132,5 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 190 \times 719^2} = 8,1 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{m,\alpha} \times f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow \frac{8,1}{0,94 \times 20,2} + \frac{1,72}{0,52 \times 15,7} = 0,64 \leq 1,00 \text{ (64 \%)}$$

4.5.4 HEIKOMMAN SUUNNAN NURJAHDUS (NURJAHDUS TASOSTA)

Oletetaan nurjahduspituudeksi kiepahdustukien väli eli $L_{c,y} = 6\,000 \text{ mm}$. Määrävä momentti ja normaalivoima löytyvät kohdasta $x = 2\,274 \text{ mm} \Rightarrow M_d = 527,6 \text{ kNm}$ ja $N_d = 350,1 \text{ kN}$ (jossa poikkileikkaus 190×1221).

Lasketaan jäyhyysäde: $i_z = \frac{b}{\sqrt{12}} \Rightarrow i_z = \frac{190}{\sqrt{12}} = 54,8 \text{ mm}$

Lasketaan kaaren hoikkuus: $\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \Rightarrow \lambda_z = \frac{6000}{54,8} = 109,4$

Lasketaan muunnettu hoikkuus: $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \Rightarrow \lambda_{rel,z} = \frac{109,4}{\pi} \times \sqrt{\frac{24,5}{10800}} = 1,659$

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

Lasketaan nurjahduskerroin:

$$k_z = 0,5 \times \left(1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) \\ \Rightarrow k_z = 0,5 \times \left(1 + 0,1 \times (1,659 - 0,3) + 1,659^2 \right) = 1,944$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \leq 1 \\ \Rightarrow k_{c,z} = \frac{1}{1,944 + \sqrt{1,944^2 - 1,659^2}} = 0,338 \leq 1 \Rightarrow k_{c,z} = 0,338$$

Lasketaan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \Rightarrow \sigma_{c,0,d} = \frac{350,1 \times 10^3}{190 \times 1221} = 1,51 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan taivutusjännitys (vahvemman suunnan):

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{527,6 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 11,2 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan yhdistetty taivutus ja puristus:

$$0,7 \times \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow 0,7 \times \frac{11,2}{20,2} + \frac{1,51}{0,338 \times 15,7} = 0,67 \leq 1,00 \text{ (67 \%)}$$

4.5.5 KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Kehäpalkin puristuspinna vaihtuu momentin 0-kohdassa. Kaarevan osan lähellä sisäpinna on puristettu ja harjan lähellä ulkopinta on puristettu. Mitoitetaan kiepahdus siten, että etsitään kehäpalkin maksimi taivutus. Valitaan alareunan kiepahdustukien väliksi $L_1 = 6\,000$ mm. **Nurjahdustuet sijoitetaan aina puristetulle puolelle!**

Kohdat ja voimasuureet ovat seuraavat:

	x:n kohdassa	voimasuure
kehän alareuna:	2 274 mm	$M_d = 527,6$ kNm / kuormitus 1

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

Lasketaan tehollinen kiepahduspituus, $L_{ef} = L_1 - 0,5 \times h \Rightarrow 6000 \text{ mm} - 0,5 \times 1221 \text{ mm} = 5389,5 \text{ mm}$ (kuorma vedetyllä reunalla)

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h \times L_{ef}} \times E_{0.05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (190 \text{ mm})^2}{1221 \text{ mm} \times 5389,5 \text{ mm}} \times 10800 \text{ N/mm}^2 = 41,47 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{41,47 \text{ N/mm}^2}} = 0,85$$

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

eli tässä tapauksessa: $k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} \Rightarrow k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times 0,85 \Rightarrow k_{crit} = 0,92$

$$\text{Lasketaan taivutusjännitys: } \sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{527,6 \times 10^6}{\frac{1}{6} \times 190 \times 1221^2} = 11,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto: } \sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \Rightarrow 11,2 \text{ N/mm}^2 \leq 0,92 \times 20,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (60 \%)} \quad \boxed{\phantom{0,92 \times 20,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (60 \%)}}}$$

Lisäksi tarkistetaan yhdistetty puristus ja kiepahdus:

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1 \Rightarrow \left(\frac{11,2}{0,92 \times 20,2} \right)^2 + \frac{1,51}{0,338 \times 15,7} = 0,65 \leq 1,0$$

Muutetaan yllä oleva ehto käyttöasteeksi

$$a = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} = \frac{11,2}{0,92 \times 20,2} = 0,603$$

$$b = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} = \frac{1,51}{0,338 \times 15,7} = 0,285$$

käyttöaste:
$$\frac{2 \times a^2}{\sqrt{b^2 + 4 \times a^2} - b} = \frac{2 \times 0,603^2}{\sqrt{0,285^2 + 4 \times 0,603^2} - 0,285} = 0,762 \text{ (76\%)}$$

Kiepahduskestävyystarkasteluissa ei tarvitse huomioida $k_{m,\alpha}$ -kerrointa. Tämä siksi, että kriittinen taivutusjännitys on laskettu pääsuunnan ominaisuuksilla. k_{crit} olisi suurempi, jos lasketaan $\alpha = 3,5^\circ$ ominaisuuksilla.

4.6 KEHÄN SIIRTYMÄARVIO

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