

# Esimerkkilaskelma

---

Harjapalkki

01.12.2018

## Sisällysluettelo

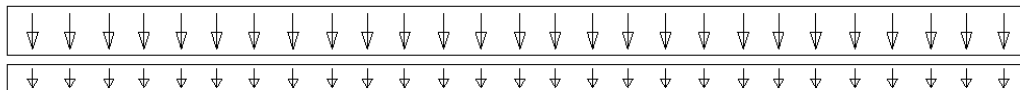
1	LÄHTÖTIEDOT .....	- 3 -
2	KUORMAT .....	- 3 -
3	MATERIAALI .....	- 4 -
4	ALUSTAVA MITOITUS .....	- 4 -
4.1	LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA.....	- 4 -
4.2	TAIVUTUSKESTÄVYYS PALKIN KESKELLÄ.....	- 4 -
5	LOPULLINEN MITOITUS.....	- 5 -
5.1	TAIVUTUSKESTÄVYYS MITOITTAVASSA POIKKILEIKKAUKSESSA.....	- 5 -
5.2	TAIVUTUSKESTÄVYYS HARJALLA.....	- 6 -
5.3	POIKITTAINEN VETOKESTÄVYYS HARJALLA .....	- 7 -
5.4	YHDISTETTY POIKITTAINEN VETO- JA LEIKKAUSKESTÄVYYS HARJALLA.....	- 9 -
5.5	LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA.....	- 10 -
5.6	TUKIPAINKESTÄVYYS.....	- 10 -
5.7	TAIPUMA-ARVIO .....	- 11 -
5.8	KIEPAHDUSKESTÄVYYS .....	- 12 -
5.9	Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS (1.MUOTO) .....	- 13 -
5.10	Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS (2.MUOTO) .....	- 14 -

## 1 LÄHTÖTIEDOT

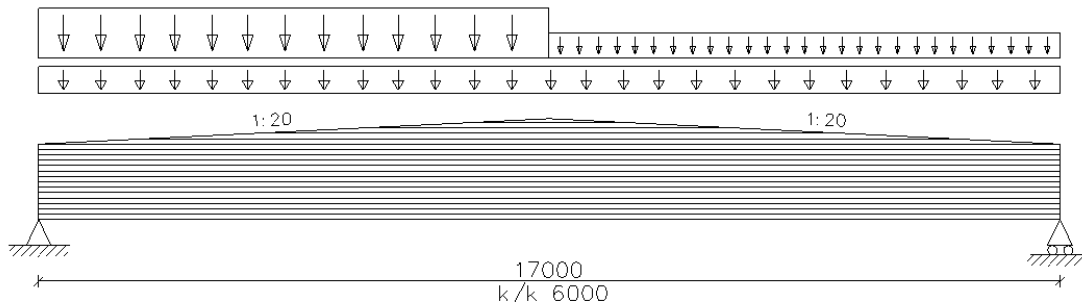
<b>Rakennuspaikka:</b>	Maarianhamina, teollisuusalue
<b>Rakenne:</b>	Symmetrinen harjapalkki, kaltevuus 1:20, 1-aukkoiset sekundäärit (orret) k/k 2125 mm
<b>Seuraamusluokka:</b>	CC2
<b>Normit:</b>	Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1, SFS EN 1995-1-2, LP-käsikirja 2015 Kuormat: RIL 201-1-2011, SFS EN 1990, SFS EN 1991-1-1, SFS EN 1991-1-3

## 2 KUORMAT

KUORMITUSTAPAUS 1:



KUORMITUSTAPAUS 2:



<b>Kuormitustapaus 1:</b>	Omapaino 100% + symmetrinen lumi 100%
<b>Kuormitustapaus 2:</b>	Omapaino 100% + epäsymmetrinen lumi 100% / 50%

Lasketaan tässä esimerkissä **kuormitustapaus 1**.

### LUMIKUORMA:

Lumikuorma maassa,  $s_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Katon muotokerroin  $\mu = 0,8 \Rightarrow$  lumikuorma katolla  $q_{s,k} = \mu \times s_k \Rightarrow 0,8 \times 2,0 \text{ kN/m}^2 = 1,6 \text{ kN/m}^2$

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

$\Rightarrow$  Lumikuorma palkille,  $p_{q,s,k} = k/k \times q_{s,k} \Rightarrow 6 \text{ m} \times 1,6 \text{ kN/m}^2 = 9,6 \text{ kN/m}$

### OMAPAINO:

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

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

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

Arvioidaan harjapalkin omapaino. Oletetaan se tasakorkeaksi 1,8 m ja leveys 0,165 m (varmalla puolella)

$p_{g,k,2} = 1,8 \text{ m} \times 0,165 \text{ m} \times 5 \text{ kN/m}^3 = 1,5 \text{ kN/m}$  (TARKISTA LOPUKSI, ETTÄ RIITTÄÄKÖ KUORMA-ARVIO!)

Lopullinen omapainon kuorma palkilla

$\Rightarrow p_{g,k} = p_{g,k,1} + p_{g,k,2} \Rightarrow 6,0 \text{ kN/m} + 1,5 \text{ kN/m} = 7,5 \text{ kN/m}$

**Murtorajatilan kuormapalkille,  $p_d = 1,15 \times p_{g,k} + 1,5 \times p_{q,k}$**

**$\Rightarrow p_d = 1,15 \times 7,5 \text{ kN/m} + 1,5 \times 9,6 \text{ kN/m} = 23,0 \text{ kN/m}$**

### 3 MATERIAALI

Liimapuupalkki GL30c 165x1170-1595-1170 (lamelli paksuus t = 45 mm)

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

palkin korkeus yli 600 mm

⇒ taivutuslujuuden ominaisarvon korotuskerroin  $k_h = 1,0$

**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:	$f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = k_h \times k_{mod} \times f_{m,k} / \gamma_M = 19,2 \text{ N/mm}^2$
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°):	$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,90,d} = k_{mod} \times f_{t,90,k} / \gamma_M = 0,32 \text{ N/mm}^2$
Kimmoduuli:	$E_{0,mean} = 13\,000 \text{ N/mm}^2$	$E_{0,05} = 10\,800 \text{ N/mm}^2$
Liukumoduuli:	$G_{0,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$	$G_{0,05} = 540 \text{ N/mm}^2$

## 4 ALUSTAVA MITOITUS

### 4.1 LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA

Koska käyttöluokka 1, niin palkin tehollinen leveys,  $b_{eff} = k_{cr} \times b \Rightarrow b_{eff} = 1,0 \times 165 \text{ mm} = 165 \text{ mm}$

$$\text{Leikkausvoima tuella, } V_d = \frac{p_d \times L}{2} \Rightarrow V_d = \frac{23,0 \text{ kN/m} \times 17 \text{ m}}{2} = 195,5 \text{ kN}$$

$$\text{Lasketaan palkin korkeus tuella, } \tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{b_{eff} \times h_1} \leq f_{v,d}$$

$$\Rightarrow h_1 \geq \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{b_{eff} \times f_{v,d}} \Rightarrow h_1 \geq \frac{3}{2} \times \frac{195,5 \times 10^3 \text{ N}}{165 \text{ mm} \times 2,24 \text{ N/mm}^2} \approx 793 \text{ mm}$$

Valitaan lamellien (45 mm) kerrannainen korkeus  $\Rightarrow 793 \text{ mm} / 45 \text{ mm} = 17,6 \Rightarrow 18 \text{ lamellia} \Rightarrow$  palkin tukikorkeus  $h_1 = 18 \times 45 \text{ mm} = 810 \text{ mm}$

### 4.2 TAIVUTUSKESTÄVYYS PALKIN KESKELLÄ

$$\text{Taivutusmomentti palkin keskellä, } M_{d,max} = \frac{p_d \times L^2}{8} \Rightarrow M_{d,max} = \frac{23,0 \text{ kN/m} \times (17 \text{ m})^2}{8} = 830,9 \text{ kNm}$$

Lasketaan palkin korkeus palkin keskellä,  $\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \times b \times h_2^2} \leq f_{m,d}$

$$h_2 \geq \sqrt{\frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \times b \times f_{m,d}}} \Rightarrow h_2 \geq \sqrt{\frac{830,9 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times 19,2 \text{ N/mm}^2}} \approx 1254 \text{ mm}$$

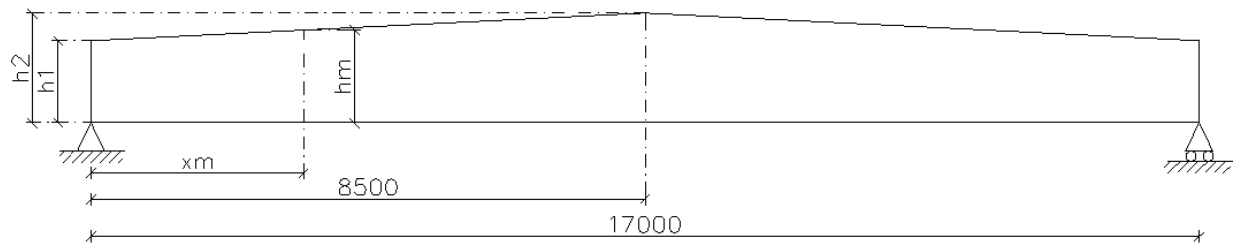
Tarkistetaan, että harjapalkin yläpinnan kaltevuus (1:20) täyttyy:

$$h_2 - h_1 = x \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{x}{17000 \text{ mm}} \Rightarrow x = \frac{8500 \text{ mm}}{2} = 425 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow h_2 - h_1 = 425 \text{ mm} \Rightarrow h_2 = h_1 + 425 \text{ mm} = 793 \text{ mm} + 425 \text{ mm} = 1218 \text{ mm}$$

Momentin (1254 mm) vaatimus on suurempi kuin kaltevuuden (1218 mm) => valitaan harjapalkin keskikorkeudeksi  $h_2 = 1595$  mm (yleensä taipuma tulee määräävämmäksi kuin taivutuskestävyys).

## 5 LOPULLINEN MITOITUS



Kun kyseessä symmetrinen tasainen kuorma, niin voidaan laskea mitoittava kohta seuraavalla kaavalla:

$$x_m = \frac{h_1}{h_2} \times \frac{L}{2} \Rightarrow x_m = \frac{1170 \text{ mm}}{1595 \text{ mm}} \times \frac{17000 \text{ mm}}{2} \Rightarrow x_m = 6235 \text{ mm}$$

Lasketaan palkin korkeus mitoittavassa kohdassa:

$$\frac{1}{20} = \frac{h_m - h_1}{x_m} \Rightarrow h_m = h_1 + \frac{x_m}{20} \Rightarrow h_m = 1170 \text{ mm} + \frac{6235 \text{ mm}}{20} \Rightarrow h_m \approx 1482 \text{ mm}$$

### 5.1 TAIVUTUSKESTÄVYYS MITOITTAVASSA POIKKILEIKKAUKSESSA

Taivutusmomentti mitoittavan poikkileikkauksen kohdassa:

$$M_d(x_m) = \frac{p_d \times L \times x_m}{2} \times \left(1 - \frac{x_m}{L}\right)$$

$$\Rightarrow M_d(x_m) = \frac{23,0 \text{ kN/m} \times 17 \text{ m} \times 6,235 \text{ m}}{2} \times \left(1 - \frac{6,235 \text{ m}}{17 \text{ m}}\right)$$

$$\Rightarrow M_d(x_m) = 771,9 \text{ kNm}$$

Taivutusjännitys mitoittavan poikkileikkauksen kohdassa:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d(x_m)}{\frac{1}{6} \times b \times h_m^2} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{771,9 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times (1482 \text{ mm})^2} = 12,8 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan harjapalkin yläpinnan kaltevuus asteina:  $\tan \alpha = \frac{1}{20} \Rightarrow \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1}{20}\right) \approx 2,86^\circ$

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

kun viistetty reuna on puristettu:

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

$$\Rightarrow k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{19,2 \text{ N/mm}^2}{1,5 \times 2,24 \text{ N/mm}^2} \times \tan(2,86^\circ)\right)^2 + \left(\frac{19,2 \text{ N/mm}^2}{1,60 \text{ N/mm}^2} \times \tan(2,86^\circ)\right)^2}} = 0,961$$

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{m,d} \leq k_{m,\alpha} \times f_{m,d} \Rightarrow 12,8 \text{ N/mm}^2 \leq 0,961 \times 19,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (69 \%)}$

## 5.2 TAIVUTUSKESTÄVYYS HARJALLA

Lasketaan taivutusmomentti palkin keskellä,

$$M_{d,\max} = \frac{p_d \times L^2}{8} \Rightarrow M_{d,\max} = \frac{23,0 \text{ kN/m} \times (17 \text{ m})^2}{8} = 830,9 \text{ kNm}$$

Lasketaan  $k_1$ -kerroin:

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

$r = r_{in} + 0,5 \times h_2$ ;  $r_{in}$  = 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 mitoitus tapauksessa harjapalkin  $k_1 = 1 + 1,4 \times \tan 2,86^\circ + 5,4 \times \tan^2 2,86^\circ = 1,083$

Lasketaan taivutusjännitys harjan kohdassa:

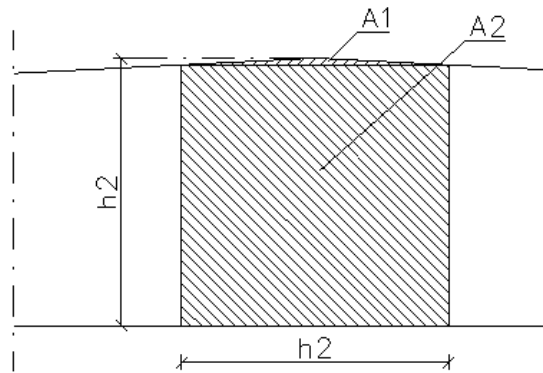
$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \times b \times h_2^2} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{830,9 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times (1595 \text{ mm})^2} = 11,9 \text{ N/mm}^2$$

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

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

Mitoitusehto:  $\sigma_{m,d} \times k_l \leq k_r \times f_{m,d} \Rightarrow 1,08 \times 11,9 \text{ N/mm}^2 \leq 1,0 \times 19,2 \text{ N/mm}^2$  (67 %)

### 5.3 POIKITTAINEN VETOKESTÄVYYS HARJALLA



Lasketaan taivutusmomentti palkin keskellä,

$$M_{d,max} = \frac{p_d \times L^2}{8} \Rightarrow M_{d,max} = \frac{23,0 \text{ kN/m} \times (17 \text{ m})^2}{8} = 830,9 \text{ kNm}$$

Lasketaan harja-alueen pinta-ala,  $A = A_1 + A_2$

$A_1$  -osan korkeus:

$$\frac{1}{20} = \frac{h_x}{\frac{h_2}{2}} \Rightarrow h_x = \frac{h_2}{2 \times 20} \Rightarrow h_x = \frac{1595 \text{ mm}}{2 \times 20} = 39,9 \text{ mm}$$

$A_1$  -osan pinta-ala:

$$A_1 = \frac{h_2}{2} \times h_x \Rightarrow \frac{1,595 \text{ m}}{2} \times 0,0399 \text{ m} = 0,0318 \text{ m}^2$$

$A_2$  -osan pinta-ala:

$$A_2 = (h_2 - h_x) \times h_2 \Rightarrow A_2 = (1,595 \text{ m} - 0,0399 \text{ m}) \times 1,595 \text{ m} = 2,480 \text{ m}^2$$

Lasketaan harja-alueen tilavuus:

$$V_h = (A_1 + A_2) \times b \Rightarrow V = (0,0318 \text{ m}^2 + 2,480 \text{ m}^2) \times 0,165 \text{ m} = 0,41 \text{ m}^3$$

Lasketaan koko palkin tilavuus:

$$V_b = \left( L \times h_1 + \frac{L \times (h_2 - h_1)}{2} \right) \times b$$

$$\Rightarrow V_b = \left( 17 \text{ m} \times 1,170 \text{ m} + \frac{17 \text{ m} \times (1,595 \text{ m} - 1,170 \text{ m})}{2} \right) \times 0,165 \text{ m} = 3,88 \text{ m}^3$$

Lasketaan mitoittava tilavuus:

$$V = \min \begin{cases} V_h = 0,41 \\ \frac{2}{3} \times V_b = 2,59 \end{cases} \Rightarrow V = 0,41 \text{ m}^3$$

Lasketaan  $k_p$  -kerroin:

$$k_p = \begin{cases} 0,2 \times \tan \alpha & ; \text{harjapalkki} \\ 0,25 \times \left( \frac{h_2}{r} \right) & ; \text{kaarevapalkki} \\ k_5 + k_6 \left( \frac{h_2}{r} \right) + k_7 \times \left( \frac{h_2}{r} \right)^2 & ; \text{kaareva harjapalkki} \end{cases}$$

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

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

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

$$\text{eli harjapalkilla } k_p = 0,2 \times \tan \alpha \Rightarrow k_p = 0,2 \times \tan 2,86^\circ = 0,010$$

Lasketaan poikittainen vetojännitys:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \times \frac{M_{d,\max}}{\frac{1}{6} \times b \times h_2^2}$$

$$\Rightarrow \sigma_{t,90,d} = 0,010 \times \frac{830,7 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times (1595 \text{ mm})^2} = 0,12 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan tilavuuskerroin (liimapuu ja Kerto-S),

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

$$\Rightarrow k_{vol} = \left( \frac{0,01 \text{ m}^3}{0,41 \text{ m}^3} \right)^{0,2} = 0,476$$

Lasketaan jännitys jakauma kerroin,

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

$$\text{eli harjapalkilla } k_{dis} = 1,4$$



**Mitoitusehto:**  $\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \times k_{vol} \times f_{t,90,d} \Rightarrow 0,12 \text{ N/mm}^2 \leq 1,4 \times 0,476 \times 0,32 \text{ N/mm}^2 = 0,22 \text{ N/mm}^2 \text{ (56 \%)}$

Jos harja-alueen puun pinnat käsitellään kosteuden siirtymistä estävällä pintakäsittelyllä, niin poikittaisen vetojännityksen kaava voidaan korvata seuraavalla: (kun katon sekundäärit tukeutuvat harjapalkin päälle ja harjan kohdalla on orsi/orsia)

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \times \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \times b \times h_2^2} - 0,6 \times \frac{p_d}{b}; p_d = \text{palkin tasainen kuorma ja } b = \text{palkin leveys}$$

$$\Rightarrow \sigma_{t,90,d} = 0,010 \times \frac{830,9 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times (1595 \text{ mm})^2} - 0,6 \times \frac{23,0 \text{ kN/m}}{165 \text{ mm}} = 0,04 \text{ N/mm}^2$$

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \times k_{vol} \times f_{t,90,d} \Rightarrow 0,04 \text{ N/mm}^2 \leq 1,4 \times 0,476 \times 0,32 \text{ N/mm}^2 \text{ (19 \%)}$

## 5.4 YHDISTETTY POIKITTAINEN VETO- JA LEIKKAUSKESTÄVYYS HARJALLA

Kyseistä mitoitusta ei tarvitse tarkistaa symmetrisellä tasaisella kuormalla, koska momentin maksimissa eli harjalla leikkausvoima on nolla. Kyseisessä tapauksessa vastaukseksi tulee sama kuin edellisessä kohdassa.

Tarkistetaan kuormitustapaus 2, jolloin momentin maksimi ei sijaitse harjan kohdalla => harjalla leikkausta. Voimasuureet on laskettu FEM-ohjelmalla. Harjan kohdan taivutusmomentti  $M_d = 698 \text{ kNm}$  ja leikkausvoima  $V_d = 15,3 \text{ kN}$ .

Lasketaan leikkausjännitys harjan kohdalla, poikkileikkauksen keskellä:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{b_{eff} \times h_2} \Rightarrow \tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{15300 \text{ N}}{165 \text{ mm} \times 1595 \text{ mm}} = 0,087 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan poikittainen vetojännitys harjan kohdalla:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \times \frac{M_d}{\frac{1}{6} \times b \times h_2^2} \Rightarrow \sigma_{t,90,d} = 0,010 \times \frac{698 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times (1595 \text{ mm})^2} = 0,10 \text{ N/mm}^2$$

**Mitoitusehto:**

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \times k_{vol} \times f_{t,90,d}} \leq 1,0$$

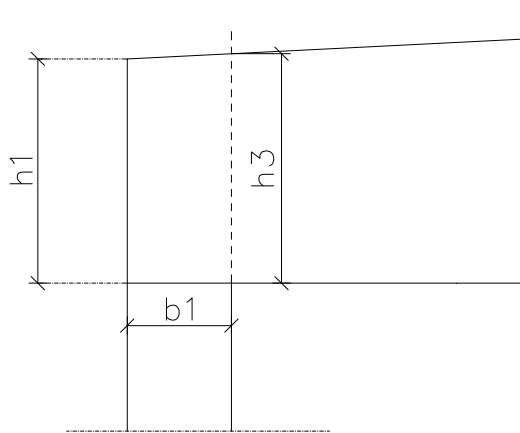
$$\Rightarrow \frac{0,087 \text{ N/mm}^2}{2,24 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,10 \text{ N/mm}^2}{1,4 \times 0,476 \times 0,32 \text{ N/mm}^2} \leq 1,0$$

$$\Rightarrow 0,508 \leq 1,0 \text{ (51 \%)}$$

Harja-alueen puun pinnat käsittely voidaan huomioida myös tässä laskussa tarvittaessa, jolloin poikittaisen vedon jännitys laskee.

## 5.5 LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA

MÄÄRÄÄVÄ POIKKILEIKKAUS



Tuella voidaan pienentää tasaisen kuorman aiheuttamaa leikkausvoimaa:

$$V_{red} = V_d \times \left(1 - \frac{2 \times h_1 + b_1}{L}\right); b_1 = \text{pilarin mitta}$$

$$\Rightarrow V_{red} = 195,5 \text{ kN} \times \left(1 - \frac{2 \times 1170 \text{ mm} + 495 \text{ mm}}{17000 \text{ mm}}\right)$$

$$\Rightarrow V_{red} = 195,5 \text{ kN} \times 0,833 = 162,9 \text{ kN}$$

Lisäksi leikkausrasitusta voidaan tarkastella kohdassa, johon lasketaan pilarin mitta  $b_1$  (= 495 mm) ja palkin tukikorkeus  $h_1$ .

Lasketaan määräävä korkeus:

$$\frac{1}{20} = \frac{x}{b_1}; x = h_3 - h_1 \Rightarrow x = \frac{b_1}{20} \Rightarrow x = \frac{495 \text{ mm}}{20} = 24,75 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow h_3 = h_1 + x \Rightarrow h_3 = 1170 \text{ mm} + 24,75 \text{ mm} = 1194,75 \text{ mm}$$

Lasketaan leikkausjännitys:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_{red}}{b \times h_3} \leq f_{v,d}$$

$$\Rightarrow \tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{162,9 \times 10^3 \text{ N}}{165 \text{ mm} \times 1194,75 \text{ mm}} = 1,24 \leq 2,24 \text{ N/mm}^2 \text{ (55\%)}$$

## 5.6 TUKIPAINEKESTÄVYYS

Lasketaan palkin tukireaktio:  $R_d = \frac{p_d \times L}{2} \Rightarrow R_d = \frac{23,0 \text{ kN/m} \times 17 \text{ m}}{2} = 195,5 \text{ kN}$

Lasketaan tehollinen tukipituus ilman tukipinnan levityksiä:  $l_{c,90,ef} = 495 \text{ mm} + 30 \text{ mm} = 525 \text{ mm}$

$$\text{kerroin } k_{c,90} = \begin{cases} 1,25 (1,5) \text{ havupuinen sahatavara ja CLT:n lapepinta} \\ 1,5 (1,75) \text{ havupuinen liimapuu} \\ 1,4 (1,6) \text{ Kerto-LVL lapepinta} \end{cases}$$

, muissa tapauksissa käytetään arvoa 1,0

Tässä tapauksessa käytetään arvoa  $k_{c,90} = 1,5$  (liimapuu). Ei voida käyttää 1,75, koska tukipituus > 400 mm.

Lasketaan tukipainekerroin:

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \times k_{c,90} \Rightarrow k_{c,\perp} = \frac{525 \text{ mm}}{495 \text{ mm}} \times 1,5 \Rightarrow k_{c,\perp} = 1,59$$

**Mitoitusehto:**

$$\begin{aligned} \sigma_{c,90,d} &= \frac{R_d}{b \times l} \leq k_{c,\perp} \times f_{c,90,d} \\ \Rightarrow \sigma_{c,90,d} &= \frac{195,5 \times 10^3 \text{ N}}{165 \text{ mm} \times 495 \text{ mm}} \leq 1,59 \times 1,60 \text{ N/mm}^2 \\ \Rightarrow \sigma_{c,90,d} &= 2,39 \text{ N/mm}^2 \leq 2,544 \text{ N/mm}^2 (94 \%) \end{aligned}$$

## 5.7 TAIPUMA-ARVIO

Lasketaan taipuma-arvio Liimapuu käsikirjan 2015 mukaan, jossa palkin korkeutena käytetään:

$$h_e = h_1 + 0,33 \times L \times \tan \alpha \Rightarrow h_e = 1170 \text{ mm} + 0,33 \times 17\,000 \text{ mm} \times \tan 2,86^\circ = 1450 \text{ mm}$$

Lasketaan jäyhyyshmomentti määrävän poikkileikkauksen mukaan:

$$I_y = \frac{b \times h_e^3}{12} \Rightarrow I_y = \frac{165 \text{ mm} \times (1450 \text{ mm})^3}{12} = 41,92 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

Hetkellinen taipuma pysyvistä kuormasta (taivutus + leikkaus):

$$\begin{aligned} w_{inst,G} &= \frac{5}{384} \times \frac{p_{g,k} \times L^4}{E_{0,mean} \times I_y} + 0,35 \times \frac{p_{g,k} \times L^2}{G_{0,mean} \times b \times (h_1 + h_2)} \\ \Rightarrow w_{inst,G} &= \frac{5}{384} \times \frac{7,5 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^4}{13000 \text{ N/mm}^2 \times 41,92 \times 10^9 \text{ mm}^4} + 0,35 \times \frac{7,5 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^2}{650 \text{ N/mm}^2 \times 165 \text{ mm} \times (1170 \text{ mm} + 1595 \text{ mm})} \\ \Rightarrow &14,97 \text{ mm} + 2,56 \text{ mm} = 17,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

hetkellinen taipuma hyötykuormasta (taivutus + leikkaus):

$$w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \times \frac{p_{q,s,k} \times L^4}{E_{0,mean} \times I_y} + 0,35 \times \frac{p_{q,s,k} \times L^2}{G_{0,mean} \times b \times (h_1 + h_2)}$$

$$\Rightarrow w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \times \frac{9,6 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^4}{13000 \text{ N/mm}^2 \times 41,92 \times 10^9 \text{ mm}^4} + 0,35 \times \frac{9,6 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^2}{650 \text{ N/mm}^2 \times 165 \text{ mm} \times (1170 \text{ mm} + 1595 \text{ mm})}$$

$$\Rightarrow 19,16 \text{ mm} + 3,27 \text{ mm} = 22,4 \text{ mm}$$

lopputaipuma:

$$w_{net,fin} = (1 + k_{def}) \times w_{inst,G} + (1 + 0,2 \times k_{def}) \times w_{inst,Q}$$

$$\Rightarrow w_{net,fin} = (1 + 0,6) \times 17,5 \text{ mm} + (1 + 0,2 \times 0,6) \times 22,4 \text{ mm} = 53,1 \text{ mm}$$

**Mitoitusehto:**

$$53,1 \text{ mm (L / 320)} \leq 56,7 \text{ mm (L / 300)} \text{ (94 \%)}$$

Harjapalkkiin voidaan tehdä esikorotus, joka on esim. omanpainon taipuman verran tai vaihtoehtoisesti L/300...L/400 (ei ole normissa määrätty). Jos tehdään esikorotus, niin kokonaistaipuma saa olla enintään L / 200. Esikorotuksella vähennetty loppu-  
taipuma saa olla kuitenkin enintään L / 300.

## 5.8 KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Mitoitetaan kiepahdus määräävän poikkileikkauksen mukaan. Valitaan kiepahdusväliksi a = 2125 mm, jolloin voidaan laskea tehollinen kiepahdusväli,  $l_{ef} = a + 2 \times h_m \Rightarrow l_{ef} = 2125 \text{ mm} + 2 \times 1482 \text{ mm} = 5089 \text{ mm}$  (**HUOM!** Jos palkin kuormitus tulee yläpinnan orsien kautta, jotka toimivat samalla kiepahdustukina  $\Rightarrow l_{ef} = a$ ).

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

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h_m \times L_{ef}} \times E_{0,05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (165 \text{ mm})^2}{1482 \text{ mm} \times 5089 \text{ mm}} \times 10800 \text{ N/mm}^2 = 27,29 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{27,29 \text{ N/mm}^2}} = 1,05$$

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

eli tässä tapauksessa:  $k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} \Rightarrow k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times 1,05 = 0,77$

**Mitoitusehto:**

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \Rightarrow 12,8 \text{ N/mm}^2 \leq 0,77 \times 19,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (86\%)}$$

**LOPUKSI TARKISTETAAN PALKIN OMAPAINO ELI ALUSSA ARVATTIIN 1800 mm:ä TASAKORKEAKSI JA LOPULLINEN KORKEUS KESKELLÄ ON 1595 mm ELI MITOITUS OK!**

## 5.9 Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS (1.MUOTO)

Tasainen kuorma puristetulla reunalla ja sivuttaistuettu vain palkin päistä:

$$L = 17\,000 \text{ mm}$$

$$L_{ef} = 0,9 \times L + 2 \times h_m \Rightarrow L_{ef} = 0,9 \times 17\,000 \text{ mm} + 2 \times 1482 \text{ mm} = 18\,264 \text{ mm}$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h_m \times L_{ef}} \times E_{0,05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (165 \text{ mm})^2}{1482 \text{ mm} \times 18\,264 \text{ mm}} \times 10\,800 \text{ N/mm}^2 = 7,60 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{7,60 \text{ N/mm}^2}} = 1,99$$

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

eli tässä tapauksessa:  $k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \Rightarrow k_{crit} = \frac{1}{1,99^2} = 0,25$

$$M_d(x_m) = 771,9 \text{ kNm}$$

$$N_d = (1 - k_{crit}) \times \frac{M_d(x_m)}{h_m} \Rightarrow N_d = (1 - 0,25) \times \frac{771,9 \text{ kNm}}{1482 \text{ mm}} = 388,8 \text{ kN}$$

$$m = 8$$

$$a = 2125 \text{ mm}$$

Jousijäykkyyksivaatimus:

$$C_v = \left( 2 + 2 \times \cos\left(\frac{180^\circ}{m}\right) \right) \times \frac{N_d}{a}$$

$$\Rightarrow C_v = \left( 2 + 2 \times \cos\left(\frac{180^\circ}{8}\right) \right) \times \frac{388830 N}{2125 mm} = 704 N/mm$$

Kiepahdustukeen syntyvä voima:

$$F_{d,1} = \frac{N_d}{50 \times L} \times a \Rightarrow F_{d,1} = \frac{388830 N}{50 \times 17000 mm} \times 2125 mm = 972 N = 1,0 kN$$

## 5.10 Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS (2.MUOTO)

Tasainen kuorma puristetulla reunalla ja sivuttaistuettu vain palkin päistä:

$$L = 17\,000 \text{ mm}$$

$$L_{ef} = 0,9 \times L + 2 \times h_m \Rightarrow L_{ef} = 0,9 \times 17000 \text{ mm} + 2 \times 1482 \text{ mm} = 18264 \text{ mm}$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h_m \times L_{ef}} \times E_{0,05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (165 \text{ mm})^2}{1482 \text{ mm} \times 18264 \text{ mm}} \times 10800 \text{ N/mm}^2 = 7,60 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{7,60 \text{ N/mm}^2}} = 1,99$$

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

$$\text{eli tässä tapauksessa: } k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \Rightarrow k_{crit} = \frac{1}{1,99^2} = 0,25$$

$$M_d(x_m) = 771,9 \text{ kNm}$$

$$N_d = (1 - k_{crit}) \times \frac{M_d(x_m)}{h_m} \Rightarrow N_d = (1 - 0,25) \times \frac{771,9 \text{ kNm}}{1482 \text{ mm}} = 388,8 \text{ kN}$$

$$m = 8$$

$$a = 2125 \text{ mm}$$

Jousijäykkyyksivaatimus:

$$C_v = \left( 2 + 2 \times \cos\left(\frac{180^\circ}{m}\right) \right) \times \frac{N_d}{a}$$

$$\Rightarrow C_v = \left( 2 + 2 \times \cos\left(\frac{180^\circ}{8}\right) \right) \times \frac{388830 N}{2125 mm} = 704 N/mm$$

Jäyhyysmomentti Z-akselin suhteen:

$$I_{Z,mit} = \frac{h_m \times b_m^3}{12} \Rightarrow I_{Z,mit} = \frac{1482 \times 165^3}{12} = 554\,777\,438 mm^4$$

Kiepahdusmuodon kriittinen aallonpituus:

$$l_s = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C}{a \times E_{0.05} \times I_{Z,mit}}}}} \\ 2 \times a \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow l_s = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{704}{2125 \times 10800 \times 554\,777\,438}}} = 6478 mm \\ 2 \times 2125 = 4250 mm \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow l_s = 6478 mm$$

Ehto:  $l_s > \frac{L}{2}$ , Koska  $l_s < L/2 \Rightarrow$  kiepahduksen toinen muoto (s-muoto) on mahdollinen

$$F_d = \frac{N_d}{80} \Rightarrow F_d = \frac{388830 N}{80} = 4,86 kN$$

$$k_{S,red} = \frac{a}{l_s - a} \Rightarrow k_{S,red} = \frac{2125 mm}{6478 mm - 2125 mm} = 0,49$$

Kiepahdustukeen syntyvä voima:

$$F_{d,2} = F_d \times k_{S,red} \Rightarrow F_{d,2} = 4,86 kN \times 0,49 = 2,4 kN$$