

# Esimerkkilaskelma

---

Mahapalkki  
Lamellit taivutettu muotoon

01.12.2018

## Sisällysluettelo

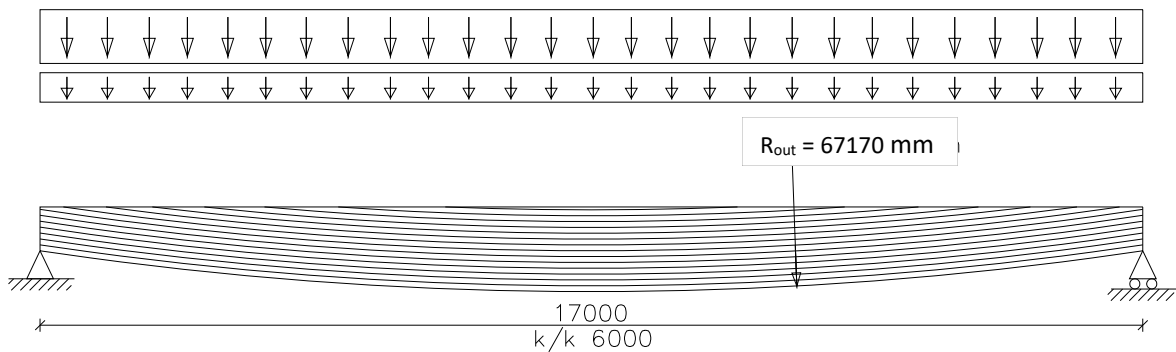
1	LÄHTÖTIEDOT .....	- 3 -
2	KUORMAT .....	- 3 -
3	MATERIAALI .....	- 4 -
4	ALUSTAVA MITOITUS .....	- 4 -
4.1	LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA.....	- 4 -
4.2	TAIVUTUSKESTÄVYYS PALKIN KESKELLÄ.....	- 4 -
5	LOPULLINEN MITOITUS.....	- 5 -
5.1	TAIVUTUSKESTÄVYYS MITOITAVASSA POIKKILEIKKAUKSESSA.....	- 6 -
5.2	TAIVUTUSKESTÄVYYS PALKIN KESKELLÄ.....	- 6 -
5.3	LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA.....	- 7 -
5.4	TUKIPAINKESTÄVYYS.....	- 8 -
5.5	TAIPUMA-ARVIO .....	- 8 -
5.6	KIEPAHDUSKESTÄVYYS .....	- 9 -
5.7	Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS (1.MUOTO) .....	- 10 -
5.8	Y-SUUNNAN STABILOIVAN TUEN VOIMA JA JOUSIJÄYKKYYS (2.MUOTO) .....	- 11 -

## 1 LÄHTÖTIEDOT

<b>Rakennuspaikka:</b>	Maarianhamina, teollisuusalue
<b>Rakenne:</b>	Symmetrinen mahapalkki (taivutettu muotoon), 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, LP-käsikirja 2015 Kuormat: RIL 201-1-2017, SFS EN 1990, SFS EN 1991-1-1, SFS EN 1991-1-3

## 2 KUORMAT

KUORMITUS TAPAUS 1:



**Kuormitustapaus 1:** Omapaino 100 % + symmetrinen lumi 100 %

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 mahapalkin omapaino. Oletetaan se tasakorkeaksi 1,3 m ja leveys 0,165 m

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

Lopullinen omanpainon kuorma palkilla

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

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

$\Rightarrow p_d = 1,15 \times 7,1 \text{ kN/m} + 1,5 \times 9,6 \text{ kN/m} = 22,6 \text{ kN/m}$

### 3 MATERIAALI

Liimapuupalkki GL30c 165x765-1305-765 (lamellit taivutettu muotoon)

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

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,  $b_{eff} = k_{cr} \times b \Rightarrow b_{eff} = 1,0 \times 165 \text{ mm} = 165 \text{ mm}$

$$\text{Leikkausvoima tuella, } V_d = \frac{p_d \times L}{2} \Rightarrow V_d = \frac{22,6 \text{ kN/m} \times 17 \text{ m}}{2} = 192,1 \text{ kN}$$

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

$$\Rightarrow h_1 \geq \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{b \times f_{v,d}} \Rightarrow h_1 \geq \frac{3}{2} \times \frac{192,1 \times 10^3 \text{ N}}{165 \text{ mm} \times 2,24 \text{ N/mm}^2} \approx 780 \text{ mm}$$

Valitaan lamellien (45 mm) kerrannainen korkeus  $\Rightarrow 780 \text{ mm} / 45 \text{ mm} = 17,3 \Rightarrow$  valitaan 17 lamellia  $\Rightarrow$  palkin tukikorkeus  $h_1 = 17 \times 45 \text{ mm} = 765 \text{ mm}$  (tarkemmassa mitoituksessa helpotuksia)

### 4.2 TAIVUTUSKESTÄVYYS PALKIN KESKELLÄ

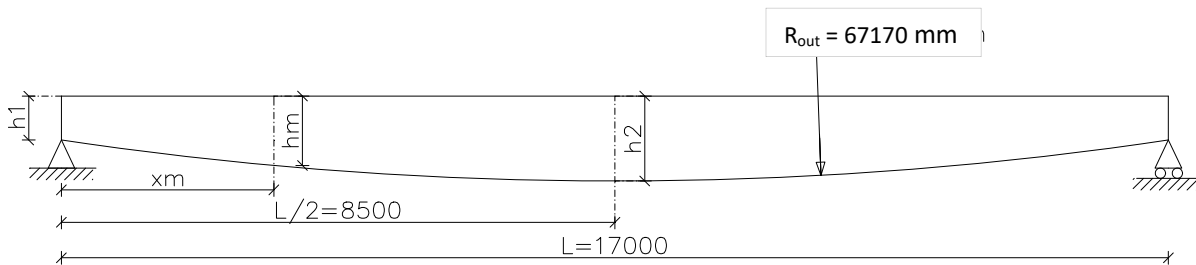
$$\text{Taivutusmomentti palkin keskellä, } M_{d,max} = \frac{p_d \times L^2}{8} \Rightarrow M_{d,max} = \frac{22,6 \text{ kN/m} \times (17 \text{ m})^2}{8} = 816,4 \text{ kNm}$$

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

$$h_2 \geq \sqrt{\frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \times b \times f_{m,d}}} \Rightarrow h_2 \geq \sqrt{\frac{816,4 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times 19,2 \text{ N/mm}^2}} \approx 1243 \text{ mm}$$

Valitaan lamellien (45 mm) kerrannainen korkeus  $\Rightarrow 1243 \text{ mm} / 45 \text{ mm} = 27,6 \Rightarrow$  valitaan 29 lamellia  $\Rightarrow$  palkin keskikorkeus  $h_2 = 29 \times 45 \text{ mm} = 1305 \text{ mm}$

## 5 LOPULLINEN MITOITUS



Harjapalkin kaavoilla laskettuna, kun kyseessä symmetrinen tasainen kuorma, voidaan laskea mitoittava kohta seuraavalla kaavalla:

$$x_m = \frac{h_1}{h_2} \times \frac{L}{2} \Rightarrow x_m = \frac{765 \text{ mm}}{1305 \text{ mm}} \times \frac{17000 \text{ mm}}{2} \Rightarrow x_m = 4983 \text{ mm}$$

Vastaavasti, jos lasketaan määrävä poikkileikkaus esimerkiksi Excel-ohjelmalla, saadaan **määrävän poikkileikkauksen kohta  $x_m = 4930 \text{ mm}$** . Siinä laskelmassa on otettu huomioon syiden kulma, joka muuttuu keskipisteen ( $0^\circ$ ) ja tuen (maksimi) välillä.

Jos mahapalkkiin piirretään harjapalkin vinopinta ja se on loivempi kuin 1:15 niin mitoittava poikkileikkaus siirtyy harjalle.

Kannattaa piirtää esimerkiksi CAD:llä palkki, jolloin saadaan mitattua kaarevuuden säde.

Lasketaan palkin korkeus mitoittavassa kohdassa ( $x = 0 \dots L/2$ ):

$$h_m = h_1 + \left( \sqrt{R_{out}^2 - \left(\frac{L}{2} - x\right)^2} - \sqrt{R_{out}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right)$$

$$\Rightarrow h_m = 765 + \left( \sqrt{67170^2 - 3517^2} - \sqrt{67170^2 - \left(\frac{17000}{2}\right)^2} \right) =$$

$$\Rightarrow h_m = 765 + (67078 - 66630) = 1213 \text{ mm}$$

## 5.1 TAIVUTUSKESTÄVYYS MITOITTAVASSA POIKKILEIKKAUKSESSA

Taivutusmomentti mitoittavan poikkileikkauksen kohdassa:

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

$$\Rightarrow M_d(x_m) = \frac{22,6 \text{ kN/m} \times 17 \text{ m} \times 4,893 \text{ m}}{2} \times \left(1 - \frac{4,893 \text{ m}}{17 \text{ m}}\right)$$

$$\Rightarrow M_d(x_m) = 669,4 \text{ kNm}$$

Taivutusjännitys mitoittavan poikkileikkauksen kohdassa:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d(x_m)}{\frac{1}{6} \times b \times h_m^2} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{669,4 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times (1213 \text{ mm})^2} = 16,54 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan mahapalkin yläpinnan ja syden välinen kaltevuus asteina:

$$\sin \alpha = \frac{L/2 - x_m}{R_{out}} \Rightarrow \sin \alpha = \frac{8500 - 4983}{67170} \Rightarrow \alpha = 3,00^\circ$$

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

kun viistetty reuna on puristettu:

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

$$\Rightarrow k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{19,2 \text{ N/mm}^2}{1,5 \times 2,24 \text{ N/mm}^2} \times \tan(3,00^\circ)\right)^2 + \left(\frac{19,2 \text{ N/mm}^2}{1,60 \text{ N/mm}^2} \times \tan(3,00^\circ)\right)^2}} = 0,957$$

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{m,d} \leq k_{m,\alpha} \times f_{m,d} \Rightarrow 16,54 \text{ N/mm}^2 \leq 0,957 \times 19,2 \text{ N/mm}^2 = 18,4 \text{ N/mm}^2 \text{ (90\%)}$

## 5.2 TAIVUTUSKESTÄVYYS PALKIN KESKELLÄ

Lasketaan taivutusmomentti palkin keskellä,

$$M_{d,\max} = \frac{p_d \times L^2}{8} \Rightarrow M_{d,\max} = \frac{22,6 \text{ kN/m} \times (17 \text{ m})^2}{8} = 816,4 \text{ kNm}$$

Lasketaan taivutusjännitys palkin keskellä:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{\frac{1}{6} \times b \times h_2^2} \Rightarrow \sigma_{m,d} = \frac{816,4 \times 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1}{6} \times 165 \text{ mm} \times (1305 \text{ mm})^2} = 17,4 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan  $k_r$  – kerroin (RIL 205-1-2017 s.87):

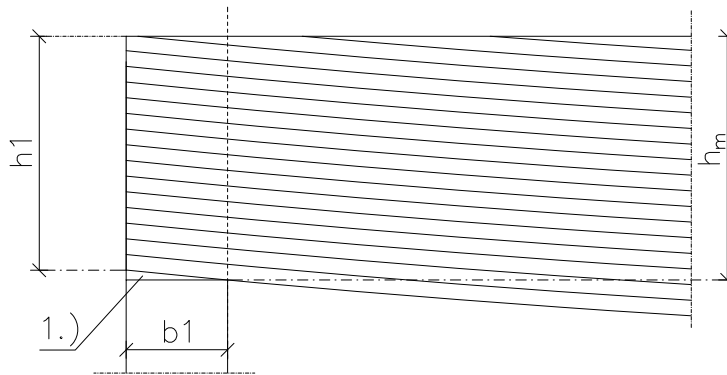
$$\text{Harjapalkilla } k_r = 1,0 \text{ ja muilla kaarevilla rakenteilla } k_r = \begin{cases} 1 & , \text{ kun } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \times \frac{r_{in}}{t}, \text{ kun } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} ; t = \text{ lamellin paksuus}$$

$$\frac{R_{out} - h_2}{t} \geq 240 \Rightarrow \frac{67170 - 1305}{45} \geq 240 \Rightarrow k_r = 1,0$$

**Mitoitusehto:**  $\sigma_{m,d} \leq k_r \times f_{m,d} \Rightarrow 17,4 \text{ N/mm}^2 \leq 1,0 \times 19,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (91 \%)}$

### 5.3 LEIKKAUSKESTÄVYYS TUELLA

MÄÄRÄÄVÄ POIKKILEIKKAUS



1.) KIILAPALA LIIMATTU TEHTAALLA

Tuella voidaan pienentää tasaisen kuorman aiheuttamaa leikkausvoimaa ja lisäksi jos palkin puupinnat (tuella) käsitellään kosteuden siirtymistä estävällä pintakäsittelyllä, jolloin voidaan hyödyntää koko palkin leveys:

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

$$\Rightarrow V_{red} = 192,1 \text{ kN} \times \left( 1 - \frac{2 \times 765 \text{ mm} + 495 \text{ mm}}{17000 \text{ mm}} \right)$$

$$\Rightarrow V_{red} = 192,1 \text{ kN} \times 0,88 = 169,0 \text{ kN}$$

Lisäksi leikkausrasitusta voidaan tarkastella kohdassa, johon lasketaan pilarin mitta  $b_1$  (= 495 mm):

$$h_m = h_1 + \left( \sqrt{R_{out}^2 - \left( \frac{L}{2} - b_1 \right)^2} - \sqrt{R_{out}^2 - \left( \frac{L}{2} \right)^2} \right)$$

$$\Rightarrow h_m = 765 + \left( \sqrt{67170^2 - 8005^2} - \sqrt{67170^2 - \left(\frac{17000}{2}\right)^2} \right) =$$

$$\Rightarrow h_m = 765 + (66691 - 66630) = 826 \text{ mm}$$

Lasketaan leikkausjännitys:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_{red}}{b \times h_m} \leq f_{v,d} \Rightarrow \tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{169 \times 10^3 \text{ N}}{165 \text{ mm} \times 826 \text{ mm}} = 1,86 \leq 2,24 \text{ N/mm}^2 \text{ (83 \%)}$$

## 5.4 TUKIPAINEKESTÄVYYS

Lasketaan palkin tukireaktio:  $R_d = \frac{p_d \times L}{2} \Rightarrow R_d = \frac{22,6 \text{ kN/m} \times 17 \text{ m}}{2} = 192,1 \text{ kN}$

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

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

, 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:**

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_d}{b \times l} \leq k_{c,\perp} \times f_{c,90,d}$$

$$\Rightarrow \sigma_{c,90,d} = \frac{192,1 \times 10^3 \text{ N}}{165 \text{ mm} \times 525 \text{ mm}} \leq 1,59 \times 1,60 \text{ N/mm}^2$$

$$\Rightarrow \sigma_{c,90,d} = 2,22 \text{ N/mm}^2 \leq 2,54 \text{ N/mm}^2 \text{ (87 \%)}$$

## 5.5 TAIPUMA-ARVIO

Lasketaan taipuma-arvio määrävän poikkileikkauksen mukaan eli käytetään korkeutena  $h_m = 1213 \text{ mm}$ .

Lasketaan jäyhyysmomentti määrävän poikkileikkauksen mukaan:

$$I_y = \frac{b \times h_m^3}{12} \Rightarrow I_y = \frac{165 \text{ mm} \times (1213 \text{ mm})^3}{12} = 24,45 \times 10^9 \text{ mm}^4$$



Hetkellinen taipuma pysyvstä kuormasta (taivutus + leikkaus):

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

$$\Rightarrow w_{inst,G} = \frac{5}{384} \times \frac{7,1 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^4}{13000 \text{ N/mm}^2 \times 24,45 \times 10^9 \text{ mm}^4} + 0,35 \times \frac{7,1 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^2}{650 \text{ N/mm}^2 \times 165 \text{ mm} \times (765 \text{ mm} + 1305 \text{ mm})}$$

$$\Rightarrow 24,29 \text{ mm} + 3,23 \text{ mm} = 27,5 \text{ mm}$$

hetkellinen taipuma hyötykuormasta (taivutus + leikkaus):

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

$$\Rightarrow w_{inst,Q} = \frac{5}{384} \times \frac{9,6 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^4}{13000 \text{ N/mm}^2 \times 24,45 \times 10^9 \text{ mm}^4} + 0,35 \times \frac{9,6 \text{ kN/m} \times (17000 \text{ mm})^2}{650 \text{ N/mm}^2 \times 165 \text{ mm} \times (765 \text{ mm} + 1305 \text{ mm})}$$

$$\Rightarrow 32,85 \text{ mm} + 4,37 \text{ mm} = 37,2 \text{ mm}$$

lopputaipuma:

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

$$\Rightarrow w_{fin} = (1 + 0,6) \times 27,5 \text{ mm} + (1 + 0,2 \times 0,6) \times 37,2 \text{ mm} - 0 \text{ mm} = 85,7 \text{ mm}$$

**Mitoitusehto:**

85,7 mm (L / 198) ≤ 85,0 mm (L / 200) (101 %) => taipuma liian suuri, muuta leikkausmuodonmuutos arvioitu konservatiivises-ti harjapalkin kaavalla eli voidaan hyväksyä laskettu L/198 kokonaistaipuma (101 %)

## 5.6 KIEPAHDUSKESTÄVYYS

Mitoitetaan kiepahdus määräävän poikkileikkauksen mukaan. Kiepahdusväli a = 2125 mm, jolloin voidaan laskea tehollinen kiepahdusväli, l<sub>ef</sub> = a + 2 × h<sub>m</sub> => l<sub>ef</sub> = 2125 mm + 2 × 1213 mm = 4551 mm (**HUOM!** Jos palkin kuormitus tulee yläpinnan orsien kautta, jotka toimivat samalla kiepahdustukina => l<sub>ef</sub> = 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:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h_m \times L_{ef}} \times E_{0,05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (165 \text{ mm})^2}{1213 \text{ mm} \times 4551 \text{ mm}} \times 10800 \text{ N/mm}^2 = 37,3 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{37,3 \text{ N/mm}^2}} = 0,90$$

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

eli tässä tapauksessa:  $k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} \Rightarrow k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times 0,90 = 0,89$

$$\text{Mitoitusehto: } \sigma_{m,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} \Rightarrow 16,3 \text{ N/mm}^2 \leq 0,89 \times 19,2 \text{ N/mm}^2 \text{ (95 \%)}$$

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

Tasainen kuorma puristetulla reunalla ja sivuttaistuettu vain palkin päistä:

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

$$L_{ef} = 0,9 \times L + 2 \times h_m \Rightarrow L_{ef} = 0,9 \times 17\,000 \text{ mm} + 2 \times 1\,213 \text{ mm} = 17\,726 \text{ mm}$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h_m \times L_{ef}} \times E_{0,05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (165 \text{ mm})^2}{1\,213 \text{ mm} \times 17\,726 \text{ mm}} \times 10\,800 \text{ N/mm}^2 = 9,57 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{9,57 \text{ N/mm}^2}} = 1,77$$

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

eli tässä tapauksessa:  $k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \Rightarrow k_{crit} = \frac{1}{1,77^2} = 0,32$

$$M_d(x_m) = 669,4 \text{ kNm}$$

$$N_d = (1 - k_{crit}) \times \frac{M_d(x_m)}{h_m} \Rightarrow N_d = (1 - 0,32) \times \frac{669,4 \text{ kNm}}{1213 \text{ mm}} = 375,8 \text{ kN}$$

$$m = 8$$

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

Jousijäykkyyksivaatimus:

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

$$\Rightarrow C_v = \left( 2 + 2 \times \cos\left(\frac{180^\circ}{8}\right) \right) \times \frac{375800 \text{ N}}{2125 \text{ mm}} = 680 \text{ N/mm}$$

Kiepahdustukeen syntyvä voima:

$$F_{d,1} = \frac{N_d}{50 \times L} \times a \Rightarrow F_{d,1} = \frac{375800 \text{ N}}{50 \times 17000 \text{ mm}} \times 2125 \text{ mm} = 940 \text{ N} = 1,0 \text{ kN}$$

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

Tasainen kuorma puristetulla reunalla ja sivuttaistuettu vain palkin päistä:

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

$$L_{ef} = 0,9 \times L + 2 \times h_m \Rightarrow L_{ef} = 0,9 \times 17000 \text{ mm} + 2 \times 1313 \text{ mm} = 17726 \text{ mm}$$

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h_m \times L_{ef}} \times E_{0,05} \Rightarrow \sigma_{m,crit} = \frac{0,70 \times (165 \text{ mm})^2}{1213 \text{ mm} \times 17726 \text{ mm}} \times 10800 \text{ N/mm}^2 = 9,57 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \Rightarrow \lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30,0 \text{ N/mm}^2}{9,57 \text{ N/mm}^2}} = 1,77$$

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

$$\text{eli tässä tapauksessa: } k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \Rightarrow k_{crit} = \frac{1}{1,77^2} = 0,32$$

$$M_d(x_m) = 669,4 \text{ kNm}$$

$$N_d = (1 - k_{crit}) \times \frac{M_d(x_m)}{h_m} \Rightarrow N_d = (1 - 0,25) \times \frac{669,4 \text{ kNm}}{1213 \text{ mm}} = 375,8 \text{ kN}$$

$$m = 8$$

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

Jousijäykkysvaatimus:

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

$$\Rightarrow C_v = \left( 2 + 2 \times \cos\left(\frac{180^\circ}{8}\right) \right) \times \frac{375800 \text{ N}}{2125 \text{ mm}} = 680 \text{ N/mm}$$

Jäyhyysmomentti Z-akselin suhteen:

$$I_{Z,mit} = \frac{h_m \times b_m^3}{12} \Rightarrow I_{Z,mit} = \frac{1213 \times 165^3}{12} = 454078969 \text{ mm}^4$$

Kiepahdusmuodon kriittinen aallonpituus:

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

$$\Rightarrow l_s = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{680}{2125 \times 10800 \times 454078969}}} = 6215 \text{ mm} \\ 2 \times 2125 = 4250 \text{ mm} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow l_s = 6215 \text{ mm}$$

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

$$F_d = \frac{N_d}{80} \Rightarrow F_d = \frac{375800 \text{ N}}{80} = 4,70 \text{ kN}$$

$$k_{S,red} = \frac{a}{l_s - a} \Rightarrow k_{S,red} = \frac{2125 \text{ mm}}{6215 \text{ mm} - 2125 \text{ mm}} = 0,52$$

Kiepahdustukeen syntyvä voima:

$$F_{d,2} = F_d \times k_{S,red} \Rightarrow F_{d,2} = 4,70 \text{ kN} \times 0,52 = 2,4 \text{ kN}$$