

Esimerkkilaskelma

Liimapuuristikon tappivaarnaliitos murtorajatilassa

17.1.2019

Sisällysluettelo

1	LÄHTÖTIEDOT.....	- 3 -
2	KUORMAT	- 3 -
3	MATERIAALI	- 3 -
4	MITOITUS MURTORAJATILASSA.....	- 4 -
4.1	TAPPIVAARNAN KAPASITEETTI	- 4 -
4.1.1	LASKETAAN PUU-TERÄS-PUU LIITTIMEN KAPASITEETTI	- 5 -
4.1.2	LASKETAAN TERÄS-PUU-TERÄS LIITTIMEN KAPASITEETTI	- 6 -
4.2	LIITTIMIEN MÄÄRÄT	- 7 -
4.3	VEDETYN SAUVAN D_1 KESTÄVYYS.....	- 8 -
4.4	LOHKEAMISMURTO	- 8 -
4.5	TERÄSLEVYN KESTÄVYYS (DIAGONAALI D_1).....	- 9 -
4.5.1	TERÄSLEVYN VETOKESTÄVYYS (Eurokoodi 3 mukaan)	- 9 -
4.5.2	TERÄSLEVYN LEIKKAUSKESTÄVYYS	- 10 -
4.5.3	TERÄSLEVYN REUNAPURISTUS KESTÄVYYS	- 10 -

1 LÄHTÖTIEDOT

Rakennuspaikka:	Helsinki
Rakenne:	Liimapuuristikko R60 liitos
Seuraamusluokka:	CC2
Normit:	Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1 Teräsrakenteet: SFS EN 1993-1-1, SFS EN 1993-1-8 Kuormat: RIL 201-1-2017, SFS EN 1990, SFS EN 1991-1-1, SFS EN 1991-1-3 ja SFS EN 1991-1-4

2 KUORMAT

MURTORAJATILA:

Kuormitustapaus 1: omapaino 100 % + lumi 100 %

$N_{1,d} = 191,0$ kN (veto)

$N_{2,d} = 156,0$ kN (puristus)

Kyseisistä sauvavoimista murtorajatilassa on 80 % lumen aiheuttamaa ja 20 % omapainoa.

Alapaarteen tappivaarnoille kohdistuu levyn kautta sauvavoimien resultantti $F_d = 234$ kN, jonka kulma syiden nähden on $1,09^\circ$

3 MATERIAALI

Liimapuupalkki GL30h 275x405, 275x225

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

⇒ taivutuslujuuden ja vetolujuuden ominaisarvon korotuskerroin:

○ $275 \times 405 \Rightarrow k_h = 1,04$

○ $275 \times 225 \Rightarrow k_h = 1,10$

⇒ käytetään pienempää arvoa (yksinkertaistetaan laskua) eli $k_h = 1,04$

Aikaluokka: Keskipitkä

Käyttöluokka: 1

⇒ $k_{mod} = 0,8$

Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet

⇒ Liimapuu $\gamma_M = 1,25$ (liitoskestävyys $\gamma_M = 1,3$)

⇒ vetokestävyyden ominaisarvo $f_{t,0,k} = 24,0$ N/mm²

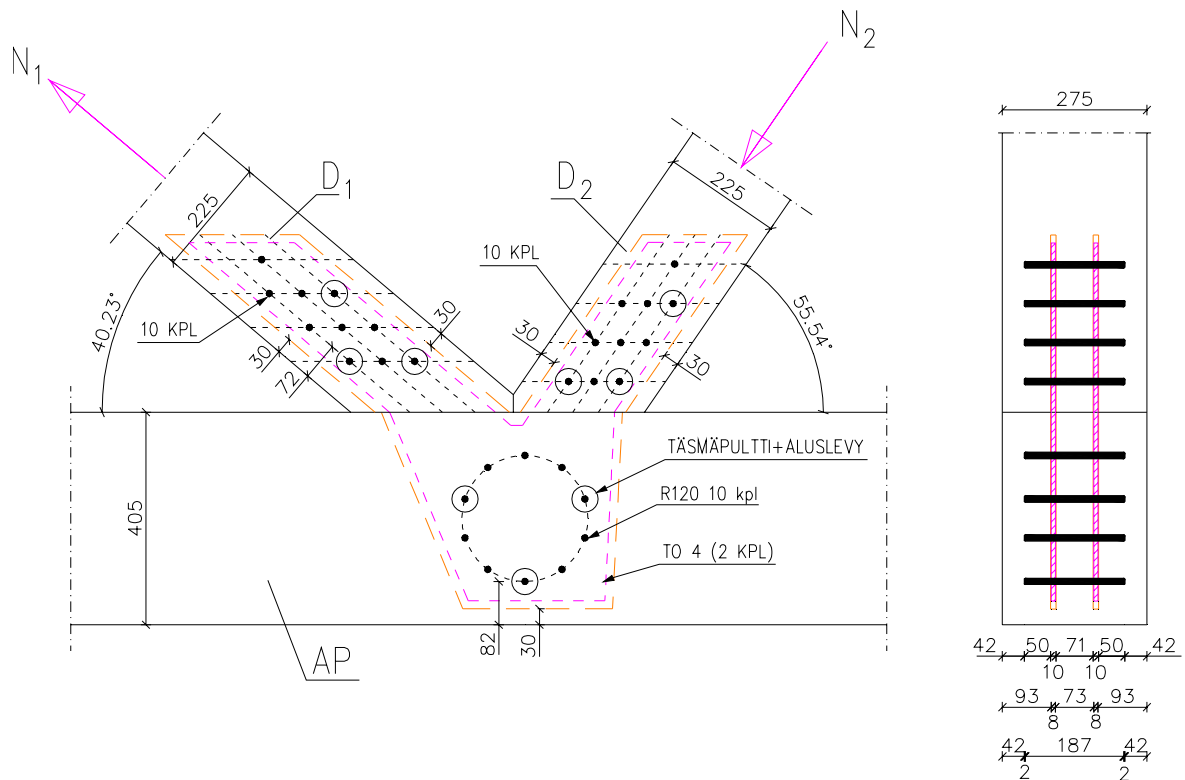
⇒ puristuskestävyyden ominaisarvo $f_{c,0,k} = 30,0$ N/mm²

⇒ vetokestävyyden mitoitusarvo $f_{t,0,d} = k_h \times k_{mod} / \gamma_M \Rightarrow 1,04 \times 0,8 / 1,25 \times 24,0$ N/mm² = 16,0 N/mm²

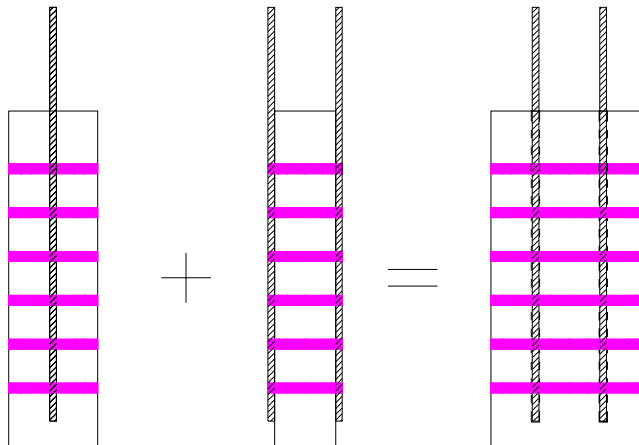
⇒ puristuskestävyyden mitoitusarvo $f_{c,0,d} = k_{mod} / \gamma_M \Rightarrow 0,8 / 1,25 \times 30,0$ N/mm² = 19,2 N/mm²

Teräslevyt, $t = 8$ mm (S355) ja tappivaarnat $d = 12$ mm (S355)

4 MITOITUS MURTORAJATILASSA



4.1 TAPPIVAARNAN KAPASITEETTI



Tappivaarnan tehollinen mitta 191 mm – viisteet ($2 \times 0,15 \times d$) ~ 187 mm

Valitaan teräslevyn ($t = 8$ mm) hahloksi 10 mm, keskipuuksi 71 mm, jolloin reuna puiksi jää
 $(187 \text{ mm} - 2 \times 10 \text{ mm} - 71 \text{ mm}) / 2 = 48 \text{ mm}$

Ehto (RIL 205 mitoitus):

reunapuut: $t_1 = t_2 = 48 \text{ mm} \geq 4 \times d = 48 \text{ mm} \Rightarrow \text{ok}$

keskipuu: $t_s = 71 \text{ mm} \geq 5 \times d = 60 \text{ mm} \Rightarrow \text{ok}$

4.1.1 LASKETAAN PUU-TERÄS-PUU LIITTIMEN KAPASITEETTI

Lasketaan aluksi kerroin k_{90} :

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \times d, \text{havupuille} \\ 1,30 + 0,015 \times d, \text{Kerto-S ja -T} \\ 0,90 + 0,015 \times d, \text{lehtipuille} \end{cases}$$

$$\Rightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times d$$

$$\Rightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times 12 = 1,53$$

Lasketaan liimapuun reunapuristuslujuus:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k$$

$$\Rightarrow f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times 12) \times 430 = 31,03 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan reunapuristuslujuus kulmassa α syyn suuntaan nähden. **Voiman ja syyn välinen kulma, $\alpha = 0^\circ$.**

$$f_{h,1,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$\Rightarrow f_{h,1,k} = \frac{31,03}{1,53 \times \sin(0^\circ)^2 + \cos(0^\circ)^2} = 31,03 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan tappivaarnan myötömomentti, M_y , kun tappivaarnan vetomurtolujuus $f_{u,k} = 510 \text{ N/mm}^2$

$$M_y = 0,3 \times f_{u,k} \times d^{2,6}$$

$$\Rightarrow M_y = 0,3 \times 510 \times 12^{2,6} = 97850 \text{ Nmm}$$

Lasketaan yhden leikkeen leikkauskestävyys:

$$f_h = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \\ f_{h,2,k} \\ f_{h,s,k} \end{cases} \Rightarrow f_h = \min \begin{cases} 31,03 \\ 31,03 \\ - \end{cases} \Rightarrow f_h = 31,03 \text{ N/mm}^2$$

$$t_u = \min \begin{cases} \frac{t_1 \times f_{h,1,k}}{f_h} \\ \frac{t_2 \times f_{h,2,k}}{f_h} \end{cases} \Rightarrow t_u = \min \begin{cases} \frac{48 \times 31,03}{31,03} \\ \frac{48 \times 31,03}{31,03} \end{cases} \Rightarrow t_u = 48 \text{ mm}$$

Lasketaan tappivaarnan yhden leikkeen kapasiteetti:

$$R_k = \min \begin{cases} f_h \times t_u \times d \\ 1,3 \times f_h \times t_u \times d \times \left(\sqrt{2 + \frac{4 \times M_y}{f_h \times d \times t^2}} - 1 \right) \\ 3 \times \sqrt{M_y \times f_h \times d} \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_k = \min \begin{cases} 31,03 \times 48 \times 12 = 17873 \\ 1,3 \times 31,03 \times 48 \times 12 \times \left(\sqrt{2 + \frac{4 \times 97850}{31,03 \times 12 \times 45^2}} - 1 \right) = 13180 \\ 3 \times \sqrt{97850 \times 31,03 \times 12} = 18108 \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_k = 13,2 \text{ kN/leike}$$

4.1.2 LASKETAAN TERÄS-PUU-TERÄS LIITTIMEN KAPASITEETTI

Lasketaan aluksi kerroin k_{90} :

$$k_{90} = \begin{cases} 1,35 + 0,015 \times d, \text{havupuille} \\ 1,30 + 0,015 \times d, \text{Kerto-S ja -T} \\ 0,90 + 0,015 \times d, \text{lehtipuille} \end{cases}$$

$$\Rightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times d$$

$$\Rightarrow k_{90} = 1,35 + 0,015 \times 12 = 1,53$$

Lasketaan liimapuun reunapuristuslujuus:

$$f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k$$

$$\Rightarrow f_{h,0,k} = 0,082 \times (1 - 0,01 \times 12) \times 430 = 31,03 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan reunapuristuslujuus kulmassa α syyn suuntaan nähden. **Voiman ja syyn välinen kulma, $\alpha = 0^\circ$.**

$$f_{h,1,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$\Rightarrow f_{h,1,k} = \frac{31,03}{1,53 \times \sin(0^\circ)^2 + \cos(0^\circ)^2} = 31,03 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan tappivaaran myötömomentti, M_y , kun tappivaaran vetomurtolujuus $f_{u,k} = 510 \text{ N/mm}^2$

$$M_y = 0,3 \times f_{u,k} \times d^{2,6}$$

$$\Rightarrow M_y = 0,3 \times 510 \times 12^{2,6} = 97850 \text{ Nmm}$$

Lasketaan yhden leikkeen leikkauskestävyys:

$$f_h = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \\ f_{h,2,k} \\ f_{h,s,k} \end{cases} \Rightarrow f_h = \min \begin{cases} - \\ - \\ 31,03 \end{cases} \Rightarrow f_h = 31,03 \text{ N/mm}^2$$

Lasketaan tappivaaran yhden leikkeen kapasiteetti:

$$R_k = \min \begin{cases} 0,5 \times f_h \times t \times d \\ 2 \times \sqrt{M_y \times f_h \times d}, \text{ kun } t_t \leq 0,5d \\ 3 \times \sqrt{M_y \times f_h \times d}, \text{ kun } t_t \geq d \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_k = \min \begin{cases} 0,5 \times 31,03 \times 71 \times 12 = 13218 \\ 2 \times \sqrt{97850 \times 31,03 \times 12} = 12072 \\ 3 \times \sqrt{97850 \times 31,03 \times 12} = 18108 \end{cases}$$

Koska teräslevyn paksuus $0,5d < t_t < d \Rightarrow$ joudutaan interpoloimaan edellisen kaavan kaksi viimeistä arvoa:

$$12072 + \frac{(18108 - 12072)}{12 - 6} \times 2 = 14084$$

$$\min(13218; 14084) = 13,2 \text{ kN/leike}$$

Yhden leikkeen kapasiteetiksi tulee $\min(13,180 ; 13,218) \Rightarrow R_k = 13,2 \text{ kN/leike}$

Lasketaan yhden liittimen kapasiteetti murtorajatilassa ($\gamma_M = 1,3$ ja $k_{mod} = 0,8$). Lisäksi pitää huomioida sekä tappivaarujen kapasiteetin alennus 0,8 (pultin kaavat).

$$R_{liitin,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} \times m \times R_k$$

$m = \text{leikkeiden määrä} / \text{tappivaarna}$

$R_k = \text{yhden leikkeen kapasiteetti}$

$$\Rightarrow R_{liitin,d} = 0,8 \times \frac{0,8}{1,3} \times 4 \times 13,2 = 26,0 \text{ kN/liitin} \quad , \text{ kun voiman ja syyn välinen kulma on } 0^\circ$$

Vastaavasti lasketaan alapaarteen voiman ja syynväliselle kulmalle $1,3^\circ \Rightarrow 26,0 \text{ kN} / \text{liitin}$

4.2 LIITTIMIEN MÄÄRÄT

Sauva D1: $191,0 \text{ kN} / 26,0 \text{ kN} = 7,3 \text{ kpl} \Rightarrow$ valitaan 10 kpl (73 %)

$$\text{Vedetty sauvanpää } N_{ef} = (3^{0,9} + 4^{0,9} + 3^{0,9}) \cdot \sqrt[4]{\frac{100 \cdot 71}{50 \cdot 12^2}} = (2,688 + 3,482 + 2,688) \times 0,9965 = 8,83 \text{ kpl} \quad (83 \%)$$

Sauva D2: $156,0 \text{ kN} / 26,0 \text{ kN} = 6,0 \text{ kpl} \Rightarrow$ valitaan 10 kpl (60 %)

Alapaarre AP: $234,7 \text{ kN} / 26,0 \text{ kN} = 9,0 \text{ kpl} \Rightarrow$ valitaan 10 kpl (90 %)

4.3 VEDETYN SAUVAN D₁ KESTÄVYYS

Tarkastellaan malliksi vedetyn sauvan kestävyys. Lasketaan tehollinen poikkileikkaus (yksinkertaistus: 3 tappivaarua päällekkäin):

$$A_{ef} = (\text{korkeus} - \text{päällekkäisten tappien määrä}) \times (\text{leveys} - \text{teräslevyt})$$

$$A_{ef} = (225 \text{ mm} - 3 \times 12 \text{ mm}) \times (275 \text{ mm} - 2 \times 10 \text{ mm}) = 48\,195 \text{ mm}^2$$

Lasketaan diagonaalin D₁ vetokestävyys:

$$\frac{N_{1,d}}{A_{ef}} \leq f_{t,0,d} \Rightarrow \frac{191000}{48195} = 4,0 \text{ N/mm}^2 \leq 16,0 \text{ N/mm}^2 \quad (25 \%)$$

4.4 LOHKEAMISMURTO

Tarkastetaan diagonaalin D₁ lohkeamismurto vedolle (valitaan liitinväliksi $a_2 = 100 \text{ mm}$ ja $a_2 = 40 \text{ mm}$ lisäksi vähennetään tappivaaran tunkeumasta hahlojen leveys eli $187 \text{ mm} - 2 \times 10 \text{ mm} = 167 \text{ mm}$):

$$\begin{aligned} F_{bt,k} &= L_{net,t} \times t_1 \times k_{bt} \times f_{t,0,k} \\ \Rightarrow F_{bt,k} &= (n_2 - 1) \times (a_2 - D) \times t_1 \times k_{bt} \times f_{t,0,k} \\ \Rightarrow F_{bt,k} &= (3 - 1) \times (40 - 12) \times 167 \times 1,5 \times 24 \\ \Rightarrow F_{bt,k} &= 336,7 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$F_{bt,d} = F_{bt,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 336,7 \times \frac{0,8}{1,3} = 207,2 \text{ kN} \geq 191,0 \text{ kN} \quad (92 \%)$$

Läpiloheamiskestävyys laskettu konservatiivisesti vähentämällä reunalamellien paksuudesta tappien upotussyvyys.

Reunalamellissa voi tapahtua upotettujen tappivaarujen vuoksi palalohkeaminen – tarkistetaan lohkeamismurtuminen, jossa keskilamellissa tapahtuu läpiloheaminen ja reunalamelleissa palalohkeaminen.

$$\text{Keskilamellin läpiloheamiskestävyys: } F_{bt,k} = 71/167 \times 336,7 = 143,1 \text{ kN}$$

$$\text{Reunalamellien tehollinen paksuus: } t_{ef} = R_k / (d f_{h,0,k}) = 13200 / (12 \times 31,03) = 35,4 \text{ mm}$$

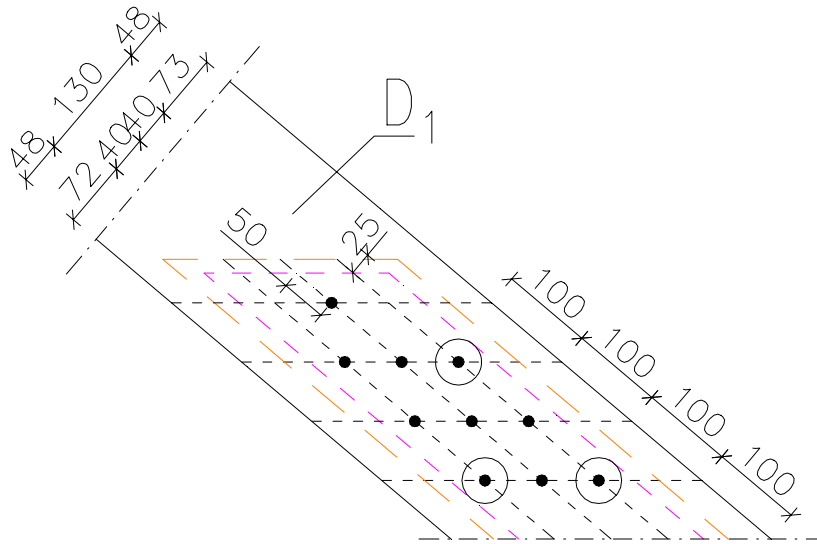
Reunalamellin palalohkeamiskestävyys:

$$F_{ps,k} = L_{net,t} (t_{ef} f_{t,0,k} + (a_3 + (n_1 - 1) a_1) f_{v,k}) = 56 \times (35,4 \times 24 + (100 + (10/3 - 1) \times 100) \times 3,5) = 112,9 \text{ kN}$$

$$\text{Vedetyn liitoksen lohkeamiskestävyys: } F_{R,k} = F_{bt,k} + 2 \times F_{ps,k} = 368,9 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow \text{Mitoituskestävyys: } F_{R,d} = 0,8/1,3 \times 368,9 \text{ kN} = 227,0 \text{ kN} \geq 191,0 \text{ kN} \quad (84 \%)$$

4.5 TERÄSLEVYN KESTÄVYYS (DIAGONAALI D₁)



4.5.1 TERÄSLEVYN VETOKESTÄVYYS (Eurokoodi 3 mukaan)

Lasketaan, että myötääkö ehjästä poikkileikkauksesta (ehjän levyn kohdalta) ennen kuin murtuu tehollisesta poikkileikkauksesta (tappivaarujen kohdalta).

- Reikien kohta tarkistetaan vetomurtolujuudella (jonka kehittyminen tietysti edellyttää paikallista myötäämistä).
- Myötölujuudella tarkistetaan ehjä poikkileikkaus => liitoksen venyminen kuminauhaksi.
- Reikien kohdalla tapahtuva paikallinen myötääminen sallitaan, koska ei vielä aiheuta haitallisen suurta venymää MRT:ssä.

Oletetaan tässä 3 kpl tappivaarvoja päällekkäin:

teräslevyn korkeus, $h = 130 \text{ mm}$

teräslevyn leveys, $b = 8 \text{ mm}$

teräslevyn (ehjän) poikkileikkaus, $A = h \times b = 1\,040 \text{ mm}^2$

teräslevyn tehollinen korkeus, $h_{\text{eff}} = h - 3 \times 8 \text{ mm} = 106 \text{ mm}$

teräslevyn tehollinen poikkileikkaus, $A_{\text{eff}} = h_{\text{eff}} \times b = 848 \text{ mm}^2$

Teräslevyn murtolujuus, $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$ ($\gamma_{M2} = 1,25$)

Teräslevyn myötölujuus, $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ($\gamma_{M0} = 1,00$)

Lasketaan ehjän poikkileikkauksen myötö:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\Rightarrow N_{pl,Rd} = \frac{1040 \times 355}{1,00} = 369,2 \text{ kN/levy}$$

Lasketaan tehollisen poikkileikkauksen murto:

$$N_{u,Rd} = 0,9 \times \frac{A_{eff} \times f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$\Rightarrow N_{u,Rd} = 0,9 \times \frac{848 \times 510}{1,25} = 311,4 \text{ kN/levy}$$

Koska $N_{pl,Rd} > N_{u,Rd}$, levyt murtuu tehollisesta poikkileikkauksesta ennen kuin myötää ehjää. Mitään ongelmaa ei ole koska sauvan vetovoima on 191,0 kN ja teräslevyjen kapasiteetti yhteensä on 622,8 kN (31 %).

4.5.2 TERÄSLEVYN LEIKKAUSKESTÄVYYS

Tarkistetaan leikkauskestävyys sisäsauvojen vaakavoimaresultantille. Teräslevyn leveys alapaarteen ylimmän liittimen kohdalla on 370 mm.

Leikkausvoima teräslevyssä: $V_d = N_1 \times \cos(40,23^\circ) + N_2 \times \cos(55,54^\circ) = 145,8 \text{ kN} + 88,3 \text{ kN} = 234,1 \text{ kN}$

Plastinen leikkauskestävyys: $V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 2 \cdot 8 \cdot 370 \cdot \frac{355}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 1213 \text{ kN (19 \%)}$

4.5.3 TERÄSLEVYN REUNAPURISTUS KESTÄVYYS

Teräslevyn reunapuristuskestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}}$$

k_1 on pienin seuraavista arvoista:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \times \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \\ 1,4 \times \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right.$$

$e_2 = 25 \text{ mm}$ (etäisyys kuormittamattomasta reunasta)

$d_0 = 12 \text{ mm}$ (reiän halkaisija)

$p_2 = 40 \text{ mm}$ (keskiöväli)

$$\Rightarrow k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \times \frac{25}{12} - 1,7 = 4,13 \\ 1,4 \times \frac{40}{12} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right.$$

$\Rightarrow k_1 = 2,5$

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ \frac{e_1}{3 \times d_0} \\ \frac{p_1}{3 \times d_0} - \frac{1}{4} \end{array} \right.$$

$$f_{ub} = 510 \text{ N/mm}^2 \text{ (liittimen murtolujuus)}$$

$$f_u = 510 \text{ N/mm}^2 \text{ (levyn murtolujuus)}$$

$$e_1 = 50 \text{ mm (etäisyys kuormitetusta päädystä)}$$

$$d_0 = 12 \text{ mm (reiän halkaisija)}$$

$$p_1 = \min 100 \text{ mm (liittimien keskinäinen etäisyys voiman suunnassa)}$$

$$\Rightarrow \alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{510}{510} = 1,0 \\ \frac{50}{3 \times 12} = 1,39 \\ \frac{100}{3 \times 12} - \frac{1}{4} = 2,53 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \alpha = 1,0$$

$$\Rightarrow F_{b,Rd} = \frac{2,5 \times 1,0 \times 510 \times 12 \times 8}{1,25} = 97,9 \text{ kN/reikä}$$

Tappivaarnan leikkeen kapasiteetti on paljon pienempi eli OK!