

Esimerkkilaskelma

NR-ristikon yläpaarten tuenta jäykisteristikolla

3.1.2019

Sisällysluettelo

1	LÄHTÖTIEDOT	- 3 -
2	MATERIAALI	- 3 -
3	RAKENTEEN TIEDOT	- 3 -
4	RAKENTEEN KUORMAT	- 4 -
5	S-NURJAHDUS	- 6 -
6	NURJAHDUS YHTEEN SUUNTAAN	- 8 -
7	RUOTEIDEN KIINNITYS (nurjahdus yhteen suuntaan).....	- 9 -
8	KUORMIEN ALASTUONTI	- 12 -

1 LÄHTÖTIEDOT

Rakennuspaikka:	Helsinki
Rakenne:	NR-ristikkoyläpohja
Seuraamusluokka:	CC2
Normit:	Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1, RIL 248-2013 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 MATERIAALI

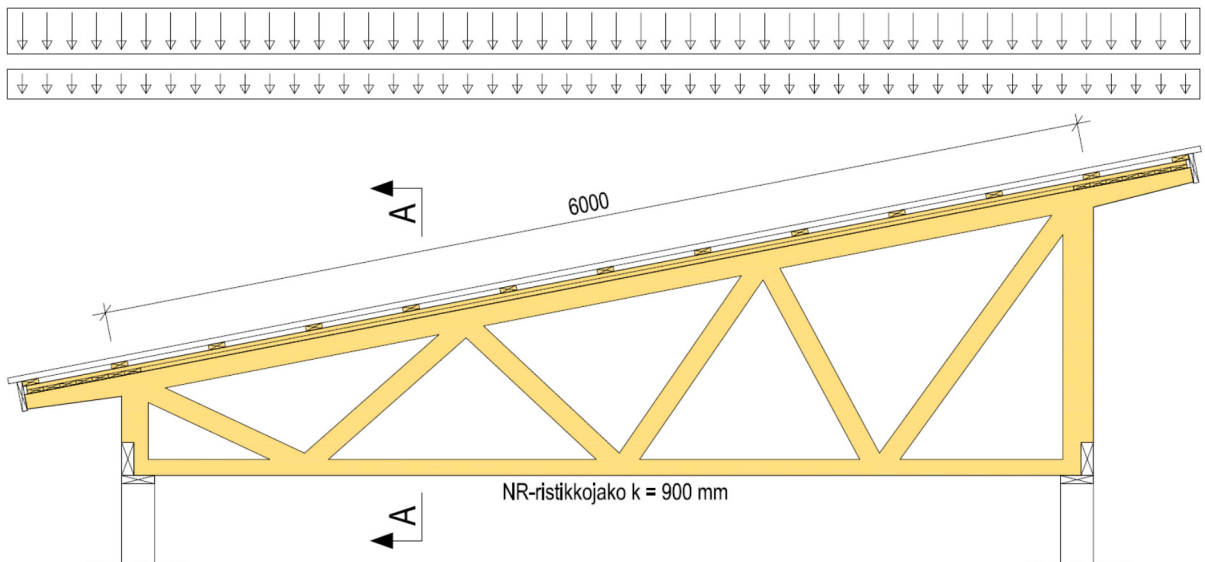
Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet

- ⇒ Sahatavaran C24 kimmomoduulin ominaisarvo $E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2$
- ⇒ Sahatavaran C18 kimmomoduulin keskiarvo $E_{0,\text{mean}} = 9000 \text{ N/mm}^2$

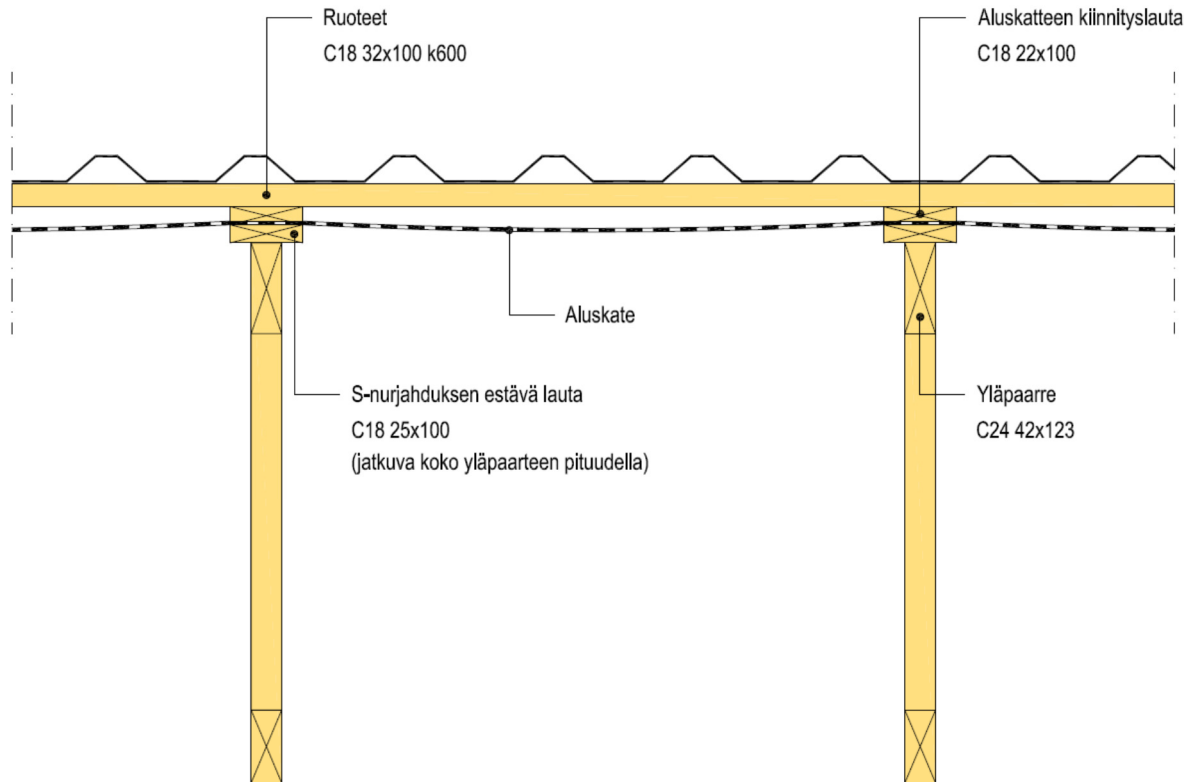
3 RAKENTEEN TIEDOT

Tarkastellaan alla olevan kuvan mukaisen NR-ristikon yläpaarten sivuttaistuenta. NR-ristikkosuunnittelija on suunnitellut yläpaarten dimension sillä perusteella, että 600 mm on suurin mahdollinen sivuttaistukien jako (mitta a). Tarkastellaan seuraavat yläpaarten heikonsuunnan nurjahdusmuodot:

- s-nurjahdus, jossa yläpaarre nurjahtaa eri suuntiin vaihtuen suuntaa tietyn aallonpituuden mukaan
- nurjahdus yhteen suuntaan, jossa yläpaarre nurjahtaa yhteen suuntaan koko yläpaarten pituudella



Leikkaus A - A



4 RAKENTEEN KUORMAT

Tarkastellaan tässä esimerkissä vain alla esitetyt kuormitustapaukset. Myös muut kuormitustapaukset tulee tutkia.

Kuormitustapaus 1 (KT 1): Omapaino 100 % + Lumi 100 % (keskipitkä aikaluokka)

Yläpohjan omapaino $g_k = 0,8 \text{ kN/m}^2$ (100 %)

Lumikuorma maassa $s_k = 2,75 \text{ kN/m}^2$ (100 %)

Lumikuorma katolla $q_{k,lumi} = \mu \cdot s_k \Rightarrow 0,8 \cdot 2,75 \text{ kN/m}^2 = 2,2 \text{ kN/m}^2$

Kuormitustapaus 2 (KT 2): Omapaino 100 % + Lumi 100 % + Tuuli 60 % (hetkellinen aikaluokka)

Yläpohjan omapaino $g_k = 0,8 \text{ kN/m}^2$ (100 %)

Lumikuorma maassa $s_k = 2,75 \text{ kN/m}^2$ (100 %)

Lumikuorma katolla $q_{k,lumi} = \mu \cdot s_k \Rightarrow 0,8 \cdot 2,75 \text{ kN/m}^2 = 2,2 \text{ kN/m}^2$

Päätyseinältä johtuva sekä katon kitkan aiheuttama tuulikuorma $q_{w,k} = 0,2 \text{ kN/m}$ (60 %)

Edellä olevista kuormitustapauksista katon lappeen tasoon syntyy seuraavat vaakasuuntaiset kuormat:

KT 1: Omapaino 100 % + Lumi 100 % (keskipitkä aikaluokka)

- yläpaarteissa on normaalivoima $N_d = 17$ kN (saadaan NR-ristikkosuunnittelijalta), josta määritetään jäykistyskuorma q_d yhteen suuntaan tapahtuvan nurjahduksen yhteydessä sekä nurjahdustuen voima F_d s-nurjahduksen yhteydessä.

- lisävaakavoima yhdeltä NR-ristikolta

$$H_{L,d} = \max \left\{ \begin{aligned} &\frac{B}{L} \cdot \frac{(1,15 \cdot k \cdot g_k + 1,5 \cdot k \cdot q_{k,lumi})}{150} = \frac{6}{14,3} \cdot \frac{(1,15 \cdot 0,9 \cdot 0,8 + 1,5 \cdot 0,9 \cdot 2,2)}{150} = 0,011 \text{ kN/m} \\ &\frac{(1,15 \cdot k \cdot g_k + 1,5 \cdot k \cdot q_{k,lumi})}{250} = \frac{(1,15 \cdot 0,9 \cdot 0,8 + 1,5 \cdot 0,9 \cdot 2,2)}{250} = 0,015 \text{ kN/m (määräävä)} \end{aligned} \right.$$

KT 2: Omapaino 100 % + Lumi 100 % + Tuuli 60 % (hetkellinen aikaluokka)

- yläpaarteissa on normaalivoima

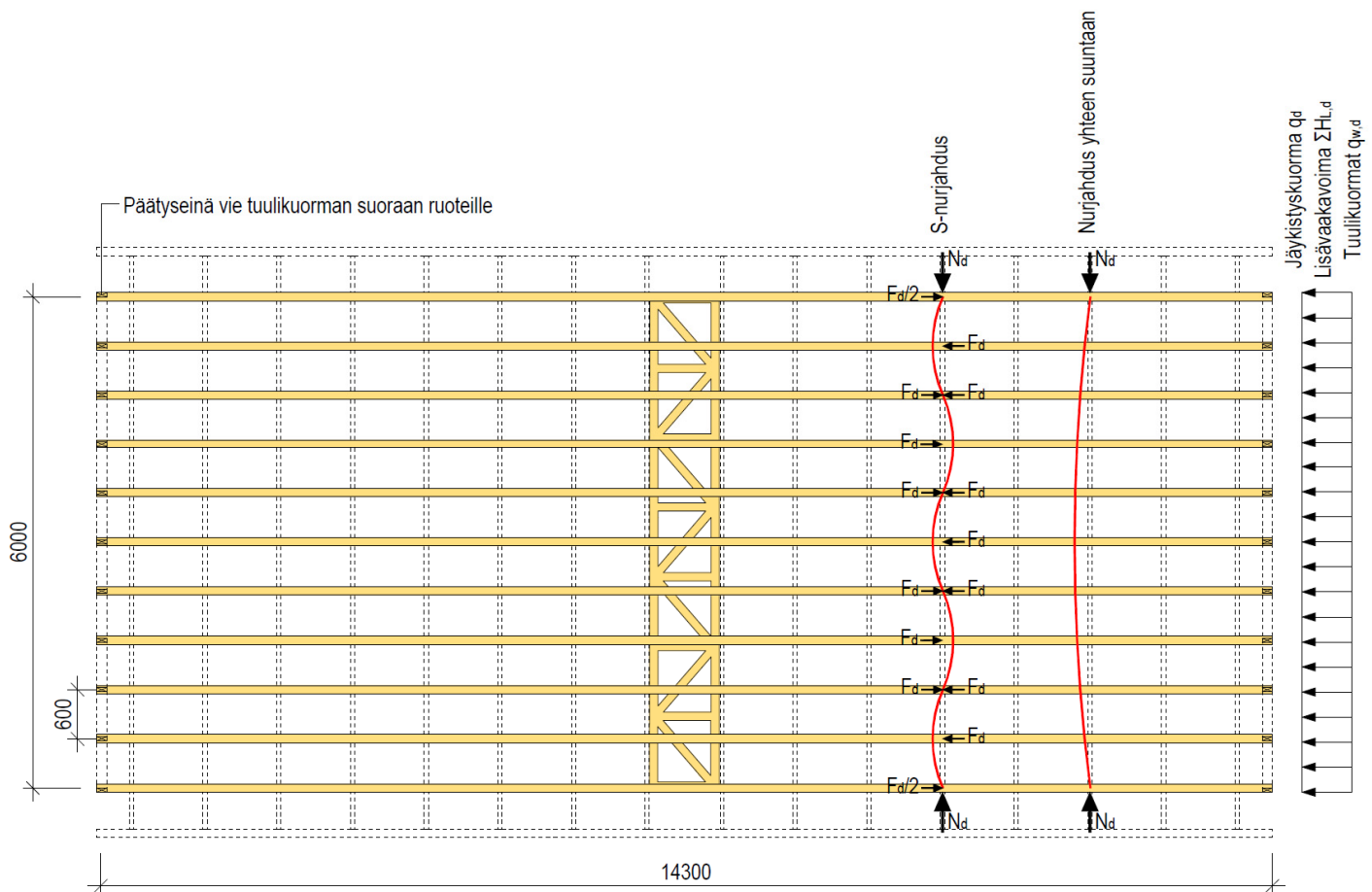
$$N_d = 17 \text{ kN}$$

- lisävaakavoima yhdeltä NR-ristikolta

$$H_{L,d} = 0,015 \text{ kN/m}$$

- tuulikuormat

$$q_{w,d} = 0,3 \text{ kN/m}$$



5 S-NURJAHDUS

S-nurjahdus estetään tässä esimerkissä yläpaarteen päällä olevalla jatkuvalla laudalla C18 25x100. Tämän laudan avulla ruoteen kohdalla oleva voima siirretään viereisten ruoteiden kohdalle (nurjahdusaallon 0-kohtaan). Jatkuvan laudan avulla yläpaarteen päälle syntyy ”laippa”, joka pitää yläpaarteen stabiilina s-nurjahduksen kannalta. Yksinkertaistetaan laskentamalli kyseisen laudan tapauksessa yksiaukkoiseksi palkiksi nurjahdusaallonpituudella.

Tuen jousijäykkyysvaatimus

$m = 10$ poikittaistuettujen kenttien lukumäärä

$a = 0,6$ nurjahdustukien k-jako

$$C_{vaad} \geq \left(2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{m}\right) \right) \cdot \frac{N_d}{a} = \left(2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{10}\right) \right) \cdot \frac{17}{0,6} = 111 \text{ N/mm}$$

Kriittinen nurjahdusaallonpituus

$$N_d = 17 \text{ kN}$$

$$C_{vaad} = 111 \text{ N/mm}$$

$$E_{0,05} = 7400 \text{ N/mm}^2 \text{ (yläpaarre)}$$

$$I_z = \frac{123 \cdot 42^3}{12} = 759402 \text{ mm}^4 \text{ (yläpaarteen heikon suunnan jäyhyysmomentti)}$$

$$\ell_s = \max \begin{cases} \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C_{vaad}}{a \cdot E_{0,05} \cdot I_z}}} \geq 2 \cdot a \Rightarrow \ell_s = \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{111}{600 \cdot 7400 \cdot 759402}}} = 1312 \text{ mm} \\ \ell_s = 2 \cdot a = 2 \cdot 600 = 1200 \text{ mm} \end{cases}$$

$$\ell_s \leq \frac{L}{2} \Rightarrow \text{S-nurjahdus tapahtuu}$$

Käytetään kuitenkin $\ell_s = 1200$, jotta se on jaollinen mitalla $L = 6000$.

Nurjahdustuen voima s-nurjahduksesta

$$F_d = \frac{N_d}{50} = \frac{17}{50} = 0,34 \text{ kN}$$

$$k_{S,red} = \frac{a}{\ell_s - a} = \frac{600}{1200 - 600} = 1,0$$

$$F_{d,tuki,1} = \frac{F_d}{2} = \frac{0,34}{2} = 0,17 \text{ kN}$$

$$F_{d,tuki,2} = F_{d,tuki,3} = k_{S,red} \cdot F_d = 1,0 \cdot 0,34 = 0,34 \text{ kN}$$

Nurjahdustuen voima lisävaakavoimasta

Tässä jäykistysyhteisöissä lisävaakavoimaa ei huomioida s-nurjahduksen yhteydessä, koska s-nurjahdus estetään eri jäykisteellä kuin nurjahdus yhteen suuntaan (s-nurjahdus $\rightarrow$ jäykistelaute, nurjahdus $\rightarrow$ jäykisteristikko)

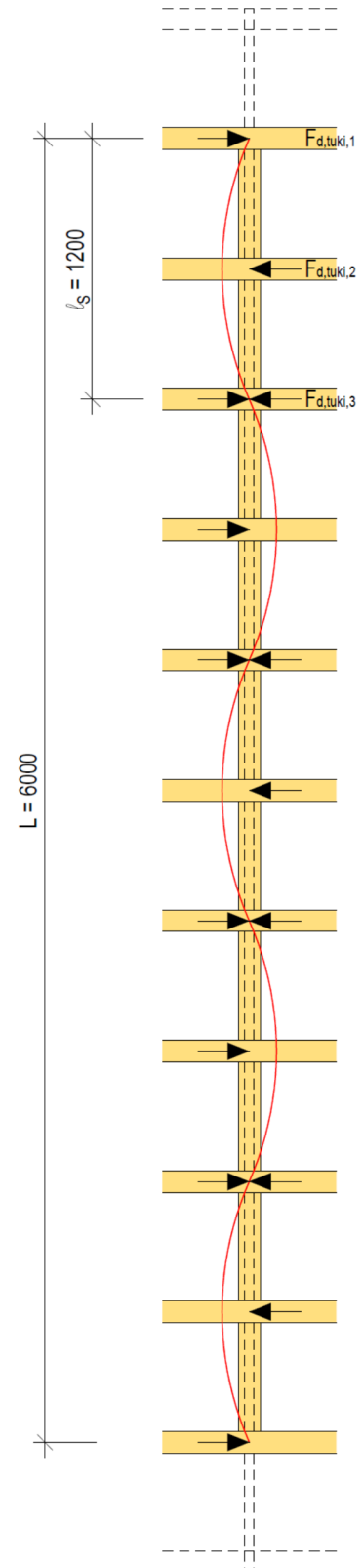
Nurjahdustuen maksimivoima kuormitustapauksessa 1

$$F_{d,tuki,max} = F_{d,tuki,2} = 0,34 \text{ kN}$$

Nurjahdustuen maksimivoima kuormitustapauksessa 2

Tuulikuorma johdetaan ruoteita pitkin suoraan jäykisteristikolle, joten se ei rasita s-nurjahduksen estävää lautaa

$$F_{d,tuki,max} = F_{d,tuki,2} = 0,34 \text{ kN}$$



Kiinnitetään yläpaarteen päällä oleva s-nurjahduksen estävä lauta yläpaarteeseen pyöreillä konenauloilla 2,5x65. Laitetaan jokaisen ruoteen kohdalle 2 kpl kyseisiä nauloja. Tarkastellaan naulaliitoksen lujuutta kuormitustapauksessa 1 (keskipitkä aika-luokka), kun liitosta kuormittaa s-nurjahdus.

Naulan kestävyys ja jäykkyys (kone-naula 2.5x60)

$$R_d = \frac{k_{mod}}{\gamma_{M,liitos}} \cdot 120 \cdot d^{1,7} = \frac{0,8}{1,3} \cdot 120 \cdot 2,5^{1,7} = 350 \text{ N}$$

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d^{0,8}}{30} = \frac{380^{1,5} \cdot 2,5^{0,8}}{30} = 514 \text{ N/mm}$$

$$k_{def,liitos} = 2 \cdot k_{def} = 2 \cdot 0,8 = 1,6$$

$$K_{u,fin} = \frac{\frac{2}{3} \cdot K_{ser}}{(1 + \psi_2 \cdot k_{def,liitos})} = \frac{\frac{2}{3} \cdot 514}{(1 + 0,2 \cdot 1,6)} = 260 \text{ N/mm}$$

Naula liitoksen kestävyys (2x kone-naula 2.5x60)

$$F_{d,naula} = \frac{F_{d,tuki,max}}{n} = \frac{340}{2} = 170 \text{ N} < R_d \text{ OK!}$$

Tarkastellaan s-nurjahduksen estävän laudan ja sen liitosten siirtymää kuormitustapauksessa 1 (keskipitkä aikaluokka), kun laudaa kuormittaa s-nurjahdus (lisävaakavoimaa ei huomioida jäykkyytarkastuksessa missään jäykistyssysteemissä). Siirtymä tulee määrittää lopputilassa, koska viruman vaikutus tulee huomioida. Myös laudan kestävyys tulee tarkastaa (ei tarkastella tässä esimerkissä).

Naulaliitosten siirtymät

$$u_{fin,naula} = \frac{\frac{F_{d,tuki,2}}{K_{u,fin}}}{\frac{2}{260}} = \frac{\frac{340}{260}}{\frac{2}{260}} = 0,65 \text{ mm (2x kone-naula 2.5x60)}$$

$$u_{fin,naula} = \frac{\frac{F_{d,tuki,1}}{K_{u,fin}}}{\frac{1}{260}} = \frac{\frac{170}{260}}{\frac{1}{260}} = 0,65 \text{ mm (1x kone-naula 2.5x60)}$$

Laudan taipuma

Yksinkertaistetaan jatkuva lauta yksiaukkoiseksi palkiksi

$$u_{inst,lauda} = \frac{F_{d,tuki,2} \cdot L^3}{48 \cdot E_{0,mean} \cdot I} = \frac{340 \cdot 1200^3}{48 \cdot 9000 \cdot 2,1 \cdot 10^6} = 0,65 \text{ mm}$$

$$k_{def} = 0,8$$

$$\psi_2 = 0,2$$

$$u_{fin,lauda} = (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot u_{inst,lauda} = (1 + 0,2 \cdot 0,8) \cdot 0,65 = 0,75 \text{ mm}$$

Tuennan jousijäykkyys

Yläpaarteen liitos s-nurjahduksen estävään lautaan ($F_{d,tuki,2}$)

$$u_{fin,naula} = 0,65 \text{ mm}$$

S-nurjahduksen estävän laudan taipuma ($F_{d,tuki,2}$)

$$u_{fin,lauda} = 0,75 \text{ mm}$$

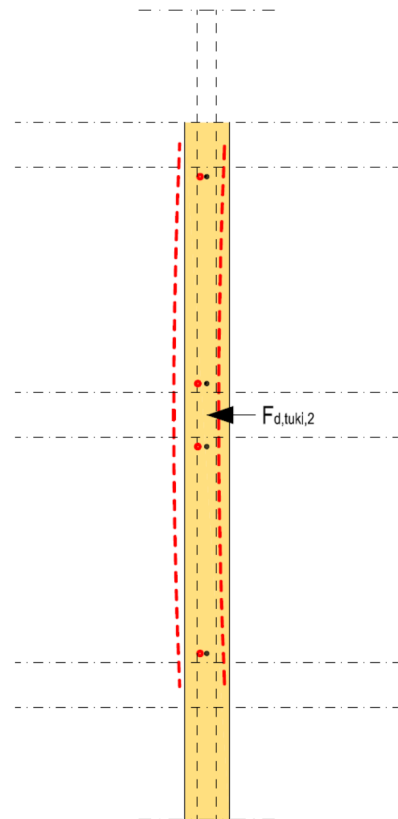
S-nurjahduksen estävän laudan pään liitos yläpaarteeseen ($F_{d,tuki,1}$)

$$u_{fin,naula} = 0,65 \text{ mm}$$

Siirtymä yhteensä

$$\sum u_{fin} = 2,05 \text{ mm}$$

$$C = \frac{F_{d,tuki,2}}{\sum u_{fin}} = \frac{340}{2,05} = 166 \text{ N/mm} > C_{vaad} = 111 \text{ N/mm OK!}$$



6 NURJAHDUS YHTEEN SUUNTAAN

Yläpaarteen nurjahtaminen yhteen suuntaan estetään yläpaarteiden välissä olevalla jäykisteristikolla. Tässä esimerkissä jäykisteristikko on sijoitettu rakennuksen keskelle. Nurjahduksesta syntyvän sisäisen jäykistyskuorman lisäksi kyseistä jäykisteristikkoa tulee kuormittamaan katon lappeen tasossa olevat tuulikuormat ja NR-ristikoiden lisävaakavoima. Yläpaarteiden välissä oleva jäykiste siirtää kyseiset kuormat NR-ristikon päihin (tukipisteisiin eli nurjahdusaallon 0-kohtaan).

Yläpaarre pyrkii nurjahtamaan yhteen suuntaan koko sen pituudella, jolloin tästä syntyy jäykisterakenteelle tasainen vaakuorma (jäykistyskuorma).

Jäykistyskuorma kaikilta yläpaarteilta

$$n = 16 \text{ kpl}$$

$$k_1 = 1,0$$

$$N_d = 17 \text{ kN}$$

$$\ell = L = 6,0 \text{ m}$$

$$q_d = k_\ell \cdot \frac{n \cdot N_d}{50 \cdot \ell} = 1,0 \cdot \frac{16 \cdot 17}{50 \cdot 6} = 0,91 \text{ kN/m}$$

Lisävaakavoima kaikilta NR-ristikoilta

$$n = 16 \text{ kpl}$$

$$H_{L,d} = 0,015 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma H_{L,d} = n \cdot H_{L,d} = 16 \cdot 0,015 = 0,24 \text{ kN/m}$$

Tuulikuorma yläpaarteen tasossa

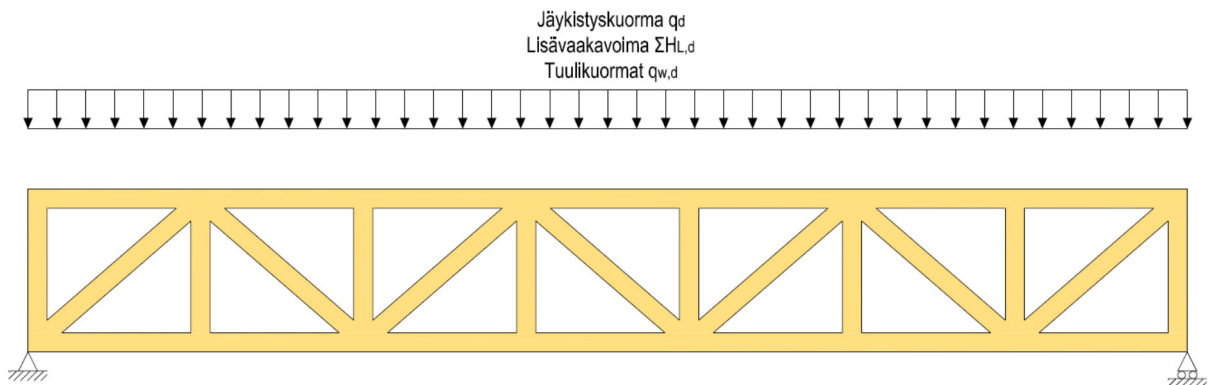
$$q_{w,d} = 0,3 \text{ kN/m}$$

Jäykisteristikon kuormitus

$$\text{Kuormitustapaus 1: } \Sigma q_d = q_d + \Sigma H_{L,d} = 0,91 + 0,24 = 1,15 \text{ kN/m}$$

$$\text{Kuormitustapaus 2: } \Sigma q_d = q_d + \Sigma H_{L,d} + q_{w,d} = 0,91 + 0,24 + 0,3 = 1,45 \text{ kN/m}$$

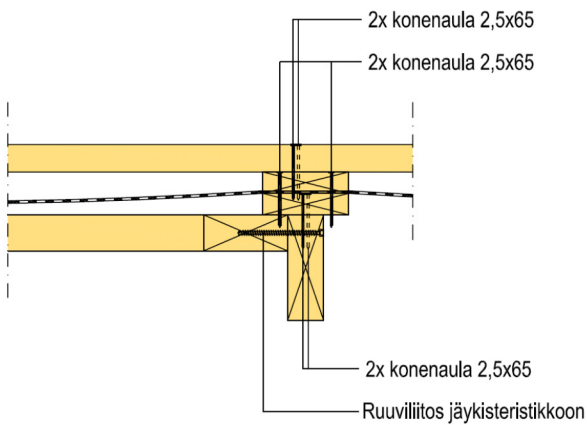
Jäykisteristikon suunnittelee NR-ristikkosuunnittelija päärakennesuunnittelijan antamille ominaiskuormille. Jäykisteristikon taipuma lopputilassa (viruma mukana) murtorajatilan kuormituksesta (jäykistyskuorma, lisävaakavoima, tuulikuorma) saa olla enintään $L/500$. Tässä esimerkissä taipua saa olla 12 mm.



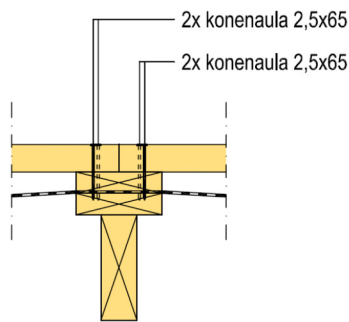
7 RUOTEIDEN KIINNITYS (nurjahdus yhteen suuntaan)

Ruoteet välittävät kuormat jäykisteristikolle. Ruoteet tulee mitoittaa normaalivoiman ja taivutuksen yhteisvaikutukselle. Tätä ei tarkastella tässä esimerkissä. Tutkitaan kuitenkin alla olevissa kuvissa olevia liitoksia. Jäykisteristikko on rakennuksen keskellä, joten sen molemmille puolille jää 7 kpl NR-ristikoita. Jäykisteristikon molemmilla puolilla olevat NR-ristikot ovat kiinnitetty suoraan jäykisteeseen NR-ristikon yläpaarteeseen läpi.

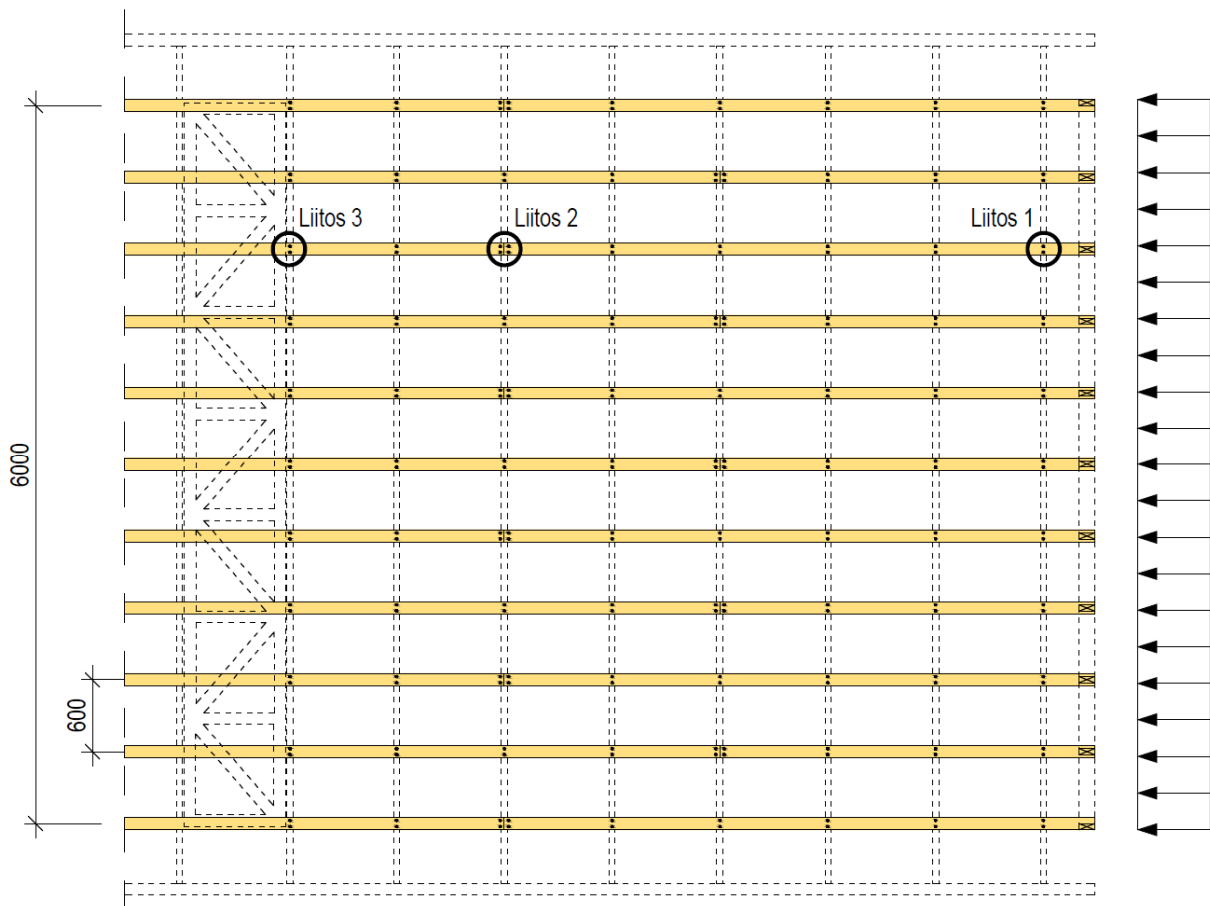
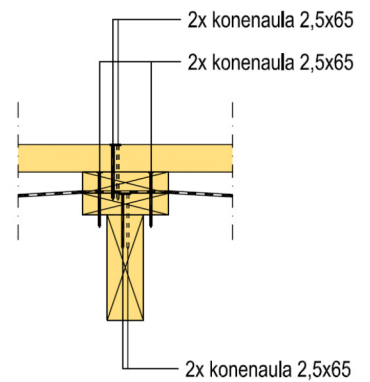
Liitos 3



Liitos 2



Liitos 1



HUOMIO!

Yksinkertaistamisen vuoksi käytetään kaikissa liitoslaskelmissa naulan kestävyysnäkökulman keskipitkän aikaluokan kestävyyttä, vaikka joissakin voitaisiin käyttää hetkellisen aikaluokan kestävyyttä.

Liitos 1 (s-nurjahduksen estävän laudan kiinnitys yläpaarteeseen ja vesikatteen alusrakenteisiin)

- S-nurjahdus estetään yläpaarten päällä olevalla laudalla, joka kiinnitetään yläpaarteeseen jokaisen ruoteen kohdalla konenauloilla 2 kpl 2,5x65 (kyseisen laudan kiinnitysten täytyy kestää sekä s-nurjahdus että nurjahdus yhteen suuntaan)
- Liitosvoima $F_{d,L1}$ syntyy yläpaarten jäykistyskuormasta sekä yläpaarten lisävaakavoimasta (tuulikuormat suoraan ruoteille)
- Käytetään ruodeliitoksessa pyöreitä konenauloja 2 kpl 2,5x65 $\Rightarrow R_{d,liitos} = 0,70 \text{ kN}$

$n = 1 \text{ kpl}$ (NR-ristikoiden määrä, joilta liitosvoima kertyy)

$a = 600 \text{ mm}$

$k_1 = 1,0$

$N_d = 17 \text{ kN}$

$\ell = L = 6,0 \text{ m}$

$$F_{d,qd,1} = k_{\ell} \cdot \frac{n \cdot N_d}{50 \cdot \ell} \cdot a = 1,0 \cdot \frac{1 \cdot 17}{50 \cdot 6} \cdot 0,6 = 0,034 \text{ kN}$$

$$F_{d,Hd,1} = n \cdot H_{L,d} \cdot a = 1 \cdot 0,015 \cdot 0,6 = 0,009 \text{ kN}$$

$$F_{d,L1} = F_{d,qd,1} + F_{d,Hd,1} = 0,034 + 0,009 = 0,043 \text{ kN} < R_{d,liitos} \text{ OK!}$$

Liitos 2 (ruoteen jatkos)

- Liitosvoima $F_{d,L2}$ syntyy yläpaarteiden jäykistyskuormasta, yläpaarteiden lisävaakavoimasta ja tuulikuormista
- Käytetään ruodejatkoksessa pyöreitä konenauloja 2 kpl 2,5x65 $\Rightarrow R_{d,liitos} = 0,70 \text{ kN}$

$n = 6 \text{ kpl}$ (NR-ristikoiden määrä, joilta liitosvoima kertyy)

$a = 600 \text{ mm}$

$k_1 = 1,0$

$N_d = 17 \text{ kN}$

$\ell = L = 6,0 \text{ m}$

$$F_{d,qd,2} = k_{\ell} \cdot \frac{n \cdot N_d}{50 \cdot \ell} \cdot a = 1,0 \cdot \frac{6 \cdot 17}{50 \cdot 6} \cdot 0,6 = 0,204 \text{ kN}$$

$$F_{d,Hd,2} = n \cdot H_{L,d} \cdot a = 6 \cdot 0,015 \cdot 0,6 = 0,054 \text{ kN}$$

$$F_{d,qw,2} = q_{w,d} \cdot a = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18 \text{ kN}$$

$$F_{d,L2} = F_{d,qd,2} + F_{d,Hd,2} + F_{d,qw,2} = 0,204 + 0,054 + 0,18 = 0,44 \text{ kN} < R_{d,liitos} \text{ OK!}$$

Liitos 3 (ruoteen kiinnitys jäykisteristikon kohdalla)

- Liitosvoima $F_{d,L3}$ syntyy yläpaarteiden jäykistyskuormasta, yläpaarteiden lisävaakavoimasta ja tuulikuormista
- Käytetään ruodeliitoksessa pyöreitä konenauloja 2 kpl 2,5x65 $\Rightarrow R_{d,liitos} = 0,70 \text{ kN}$

$n = 7 \text{ kpl}$ (NR-ristikoiden määrä, joilta liitosvoima kertyy)

$a = 600 \text{ mm}$

$k_1 = 1,0$

$N_d = 17 \text{ kN}$

$\ell = L = 6,0 \text{ m}$

$$F_{d,qd,3} = k_{\ell} \cdot \frac{n \cdot N_d}{50 \cdot \ell} \cdot a = 1,0 \cdot \frac{7 \cdot 17}{50 \cdot 6} \cdot 0,6 = 0,238 \text{ kN}$$

$$F_{d,Hd,3} = n \cdot H_{L,d} \cdot a = 7 \cdot 0,015 \cdot 0,6 = 0,063 \text{ kN}$$

$$F_{d,qw,3} = q_{w,d} \cdot a = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18 \text{ kN}$$

$$F_{d,L3} = F_{d,qd,3} + F_{d,Hd,3} + F_{d,qw,3} = 0,238 + 0,063 + 0,18 = 0,48 \text{ kN} < R_{d,liitos} \text{ OK!}$$

Ruuviliitos jäykisteristikoon mitoitetaan liitosvoimalle, joka kertyy kahdeksalta NR-ristikolta.

Yläpaarten päälle suunniteltu s-nurjahduksen estävä jäykistelauta on 100 mm leveä, joten tarkastetaan seuraavassa, että pystytäänkö ruoteet jatkamaan laudan päällä kuten edellä oletettiin (pääty- ja reunaetäisyydet). Alla olevasta kuvasta nähdään, että 100 mm leveä lauta ei ole riittävä, jotta ruoteet voitaisiin jatkaa puskujatkoksella laudan päällä. Ruoteet voidaan jatkaa alla esitetyillä kolmella erilaisella tavalla. Lisäksi tulee tarkastaa, että ruoteen kiinnitys on riittävä tuulen aiheuttamille imukuormille.

