

# Esimerkkilaskelma

---

Tappivaarnaristikon yläpaarten  
tuenta levyjäykisteellä

3.1.2019

## Sisällysluettelo

|    |                                                     |        |
|----|-----------------------------------------------------|--------|
| 1  | LÄHTÖTIEDOT .....                                   | - 3 -  |
| 2  | MATERIAALI .....                                    | - 3 -  |
| 3  | RAKENTEEN TIEDOT .....                              | - 3 -  |
| 4  | YLÄPAARTEEN SIVUTTAISTUENTASYSTEEMI.....            | - 4 -  |
| 5  | NURJAHDUSMUODOT.....                                | - 5 -  |
| 6  | KRIITTINEN NURJAHDUSAALLONPITUUS.....               | - 6 -  |
| 7  | NURJAHDUSTUKEEN SYNTYVÄ VOIMA S-NURJAHDUKSESTA..... | - 7 -  |
| 8  | LEVYJÄYKISTEEN RASITUKSET .....                     | - 8 -  |
| 9  | TUEN JOUSIJÄYKKYYS.....                             | - 13 - |
| 10 | LEVYJÄYKISTEEN JOUSTAVUUS.....                      | - 14 - |
| 11 | YHTEENVETO .....                                    | - 15 - |

## 1 LÄHTÖTIEDOT

|                  |                                                             |
|------------------|-------------------------------------------------------------|
| Rakennuspaikka:  | Helsinki                                                    |
| Rakenne:         | Tappivaarnaristikko                                         |
| Seuraamusluokka: | CC1                                                         |
| Normit:          | Puurakenteet: RIL 205-1-2017, SFS EN 1995-1-1<br>Kuormat: - |

## 2 MATERIAALI

### Liimapuupaarre GL30h 215x450

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

palkin korkeus alle 600 mm

⇒ taivutuslujuuden ominaisarvon korotuskerroin  $k_h = 1,03$

### Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet

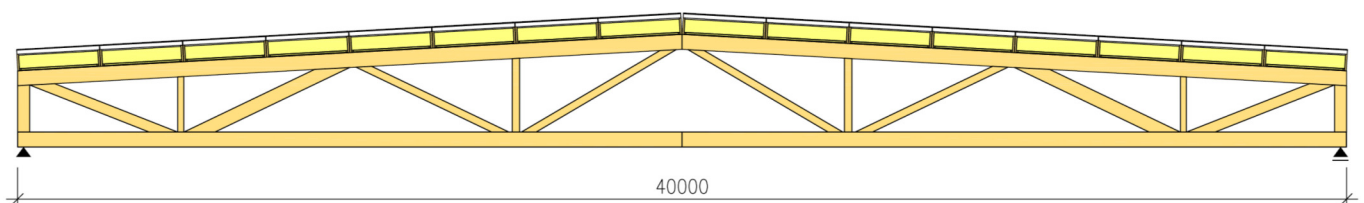
⇒ puristuslujuuden ominaisarvo  $f_{c,0,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$

⇒ taivutuslujuuden ominaisarvo  $f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$

⇒ kimmomoduulin ominaisarvo  $E_{0,05} = 11300 \text{ N/mm}^2$

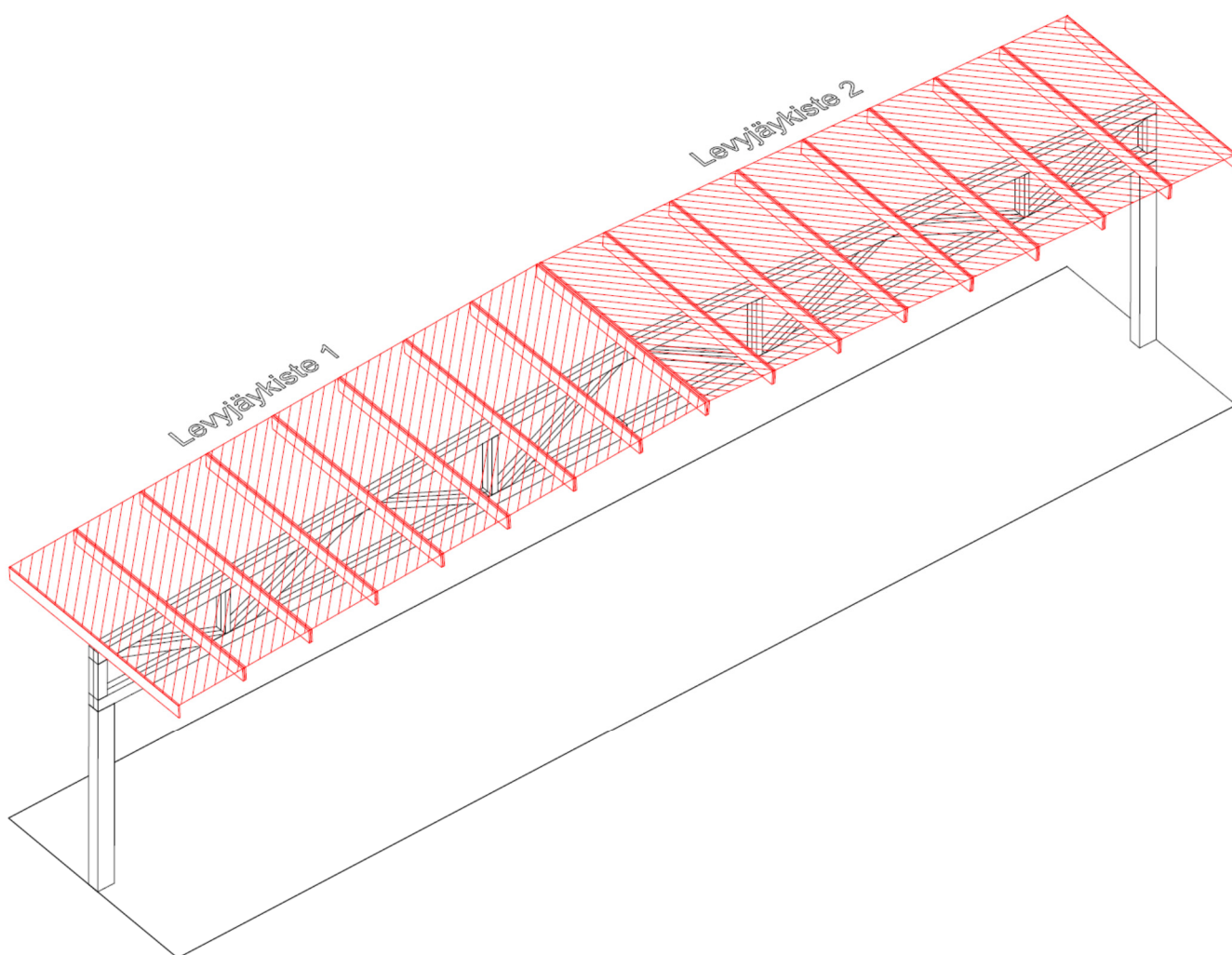
## 3 RAKENTEEN TIEDOT

Tarkastellaan tappivaarnaristikon yläpaarteen sivuttaistuenta levyjäykisteellä. Tappivaarnaristikon jänneväli on  $L = 40 \text{ m}$  ja sen yläpaarteen sivuttaistuenta tehdään yläpaarteen päällä olevilla levyjäykistetyillä kattoelementeillä. Kattoelementit ovat 2500 mm leveitä ja niiden reunapalkit muodostavat yläpohjan sekundäärirakenteen. Sekundäärirakenne kantaa yläpohjan kuormat ja muodostaa tukipisteen yläpaarteen sivuttaistuennalle. Tappivaarnaristikoiden k-jako on 8 m ja **ristikoita on kaksi rinnakkain**.



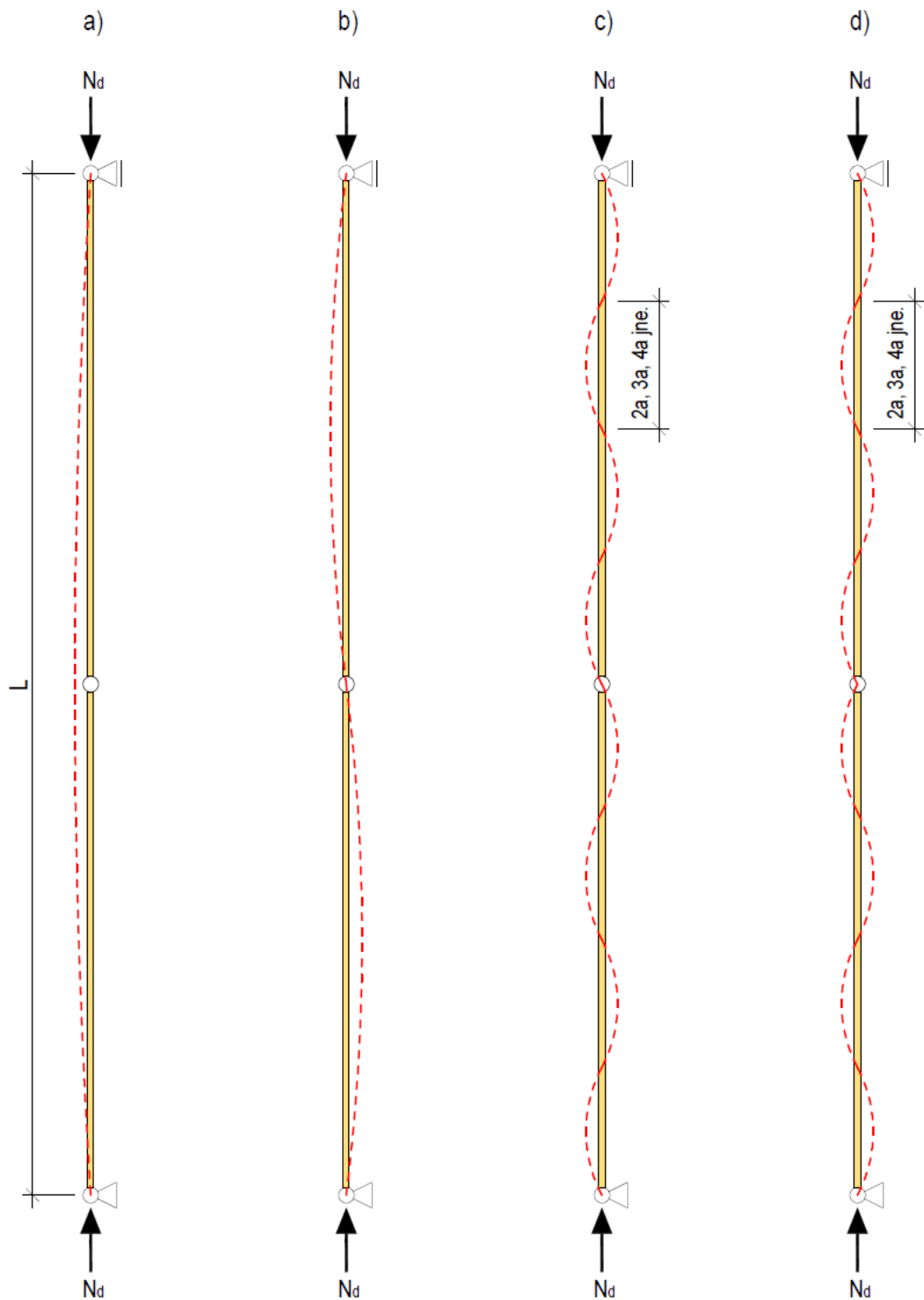
## 4 YLÄPAARTEEN SIVUTTAISTUENTASYSTEEMI

Tässä esimerkissä yläpaarteen sivuttaistuenta tehdään kattoelementtien muodostamalla yhtenäisellä levyjäykisteellä. Levyjäykiste toimii paarteen päällä ”laipparakenteena”, joka siirtää paarteen tasossa olevat vaakakuormat ristikon päihin. Ristikon päistä ulkoiset kuormat viedään perustuksille. **Jotta levyjäykiste 1 ja 2 voisivat tukea harjapisteen (nivel) sivusuunnassa, tulee levyjäykiste 1 ja 2 kiinnittää toisiinsa siten, että voimat siirtyvät levyjäykisteiden välillä.** Tässä esimerkissä on kaksi ristikkoa rinnakkain, joten molemmat ristikot tulee kiinnittää levyjäykisteeseen.



## 5 NURJAHDUSMUODOT

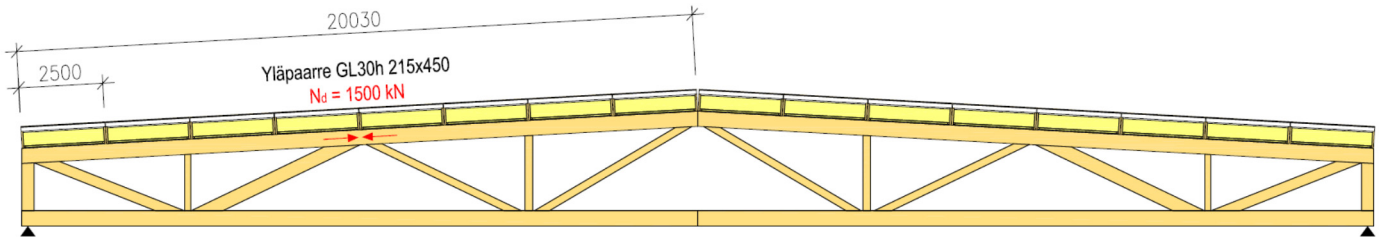
Yleisellä tasolla yläpaarteeseen voi syntyä alla olevassa kuvassa esitettyjä nurjahdusmuotoja. Ristikon harjalla olevaa liitosta käsitellään nivelenä, vaikka se ei ole täysin vapaa nivel (tappivaarnaliitoksen teräslevyt muodostavat tietynlaisen jäykkyyden). S-nurjahduksessa kriittinen nurjahdusaallonpituus voidaan määrittää tarkasti, joten kaikkia s-nurjahduksen aallonpituuksia ei tarvitse tarkastella ( $a$  = nurjahdustukien k-jako).



## 6 KRIITTINEN NURJAHDUSAALLONPITUUS

Määritetään kyseisen tappivaarnaristikon yläpaarteen kriittinen nurjahdusaallonpituus s-nurjahduksessa. Tappivaarnaristikoita on kaksi rinnakkain, jolloin **yhteen ristikkoon syntyy seuraavassa esitetyt rasitukset**. Tarkastellaan tässä esimerkissä vain alla esitetty kuormitustapaus. Myös muut kuormitustapaukset tulee tutkia.

**Kuormitustapaus 1 (KT 1):** omapaino 100 % + lumi 100 % (keskipitkä aikaluokka)



### Tuen jousijäykkyysvaatimus

$m = 8$  poikittaistuettujen kenttien lukumäärä lappeella

$a = 2,5$  nurjahdustukien k-jako

$$C_{vaad} = \left( 2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{m}\right) \right) \cdot \frac{N_d}{a} = \left( 2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{8}\right) \right) \cdot \frac{1500}{2,5} = 2309 \text{ N/mm}$$

### Kriittinen nurjahdusaallonpituus

$$N_d = 1500 \text{ kN}$$

$$C_{vaad} = 2309 \text{ N/mm}$$

$$E_{0,05} = 11300 \text{ N/mm}^2$$

$$\ell_{ef} = 20030 \text{ mm}$$

$$I_z = \frac{450 \cdot 215^3}{12} = 37,3 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \text{ (heikon suunnan jäyhyysmomentti)}$$

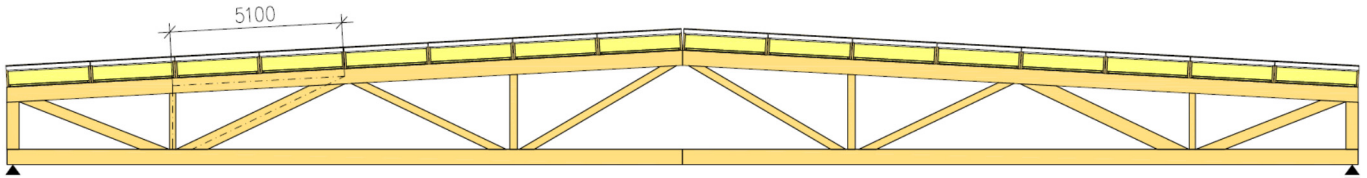
$$\ell_s = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{C_{vaad}}{a \cdot E_{0,05} \cdot I_z}}} \geq 2 \cdot a \Rightarrow \ell_s = \frac{\pi}{\sqrt[4]{\frac{2309}{2500 \cdot 11300 \cdot 37,3 \cdot 10^7}}} = 4592 \text{ mm} \\ \ell_s = 2 \cdot a = 2 \cdot 2500 = 5000 \text{ mm (määräävä)} \end{array} \right.$$

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

## 7 NURJAHDUSTUKEEN SYNTYVÄ VOIMA S-NURJAHDUKSESTA

Määritetään kyseisen tappivaarnaristikon yläpaarten nurjahdustukeen syntyvä voima s-nurjahduksesta. Tarkastellaan tässä esimerkissä vain alla esitetty kuormitustapaus. Myös muut kuormitustapaukset tulee tutkia.

**Kuormitustapaus 1 (KT 1):** omapaino 100 % + lumi 100 % (keskipitkä aikaluokka)



Tarkastetaan, onko yläpaarprofiili kiepahdusaltis ja syntyykö tätä kautta lisäkuormitusta nurjahdustukiin. Uumasauvojen välillä vapaa yläpaarten pituus on maksimissaan 5100 mm.

$\ell_{ef} = 5100 \text{ mm}$  (yläpaarten tukematon pituus uumasauvojen välillä)

$\frac{\ell_{ef}}{\ell} = 0,8 \Rightarrow \ell_{ef} = 0,8 \cdot 5100 = 4080 \text{ mm}$  (pistekuorma jännevälän keskellä)

$\ell_{ef}$ -mittaa suurennetaan 2h verran, koska kuorma puristetulla reunalla

$\ell_{ef} = 10000 + 2 \cdot h = 4080 + 2 \cdot 450 = 4980 \text{ mm}$

$c = 0,68$

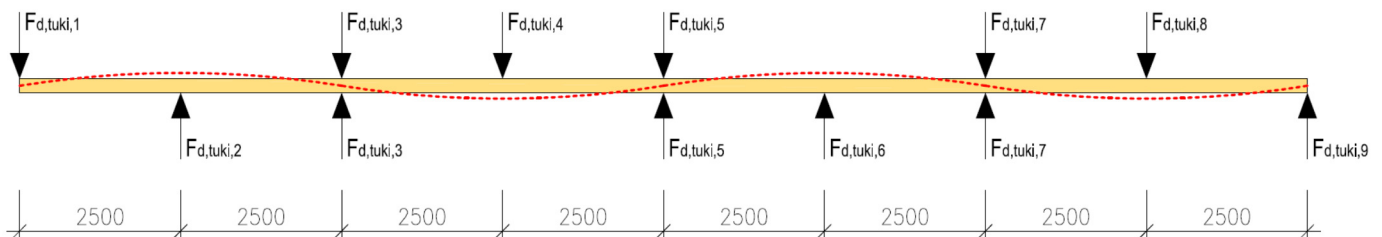
$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h \cdot \ell_{ef}} \cdot E_{0,05} = \frac{0,68 \cdot 215^2}{450 \cdot 4980} \cdot 11300 = 158,5 \text{ N/mm}^2$

$k_h = 1,03$

$f_{m,k} = k_h \cdot f_{m,k} = 1,03 \cdot 30 = 30,9 \text{ N/mm}^2$

$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{30,9}{158,5}} = 0,44$

$k_{crit} = 1 \Rightarrow$  yläpaarre ei ole kiepahdusaltis, joten kiepahduksesta ei synny voimia sivuttaistuentasysteemiin



$F_d = \frac{N_d}{80} = \frac{1500}{80} = 19 \text{ kN}$

$k_{S,red} = \frac{a}{\ell_S - a} = \frac{2500}{5000 - 2500} = 1,0$

$F_{d,tuki,1} = F_{d,tuki,9} = \frac{F_d}{2} = \frac{19}{2} = 9,5 \text{ kN}$

$F_{d,tuki,2} = F_{d,tuki,3} = F_{d,tuki,4} = F_{d,tuki,5} = F_{d,tuki,6} = F_{d,tuki,7} = F_{d,tuki,8} = k_{S,red} \cdot F_d = 1,0 \cdot 19 = 19 \text{ kN}$

## 8 LEVYJÄYKISTEEN RASITUKSET

Tarkastellaan seuraavassa levyjäykisteen rasituksia, jotka syntyvät nurjahdustuennasta (sisäinen kuorma), lisävaakavoimasta (ulkoinen kuorma) ja yläpohjan tason tuulikuormista (ulkoinen kuorma). Tässä tapauksessa yläpaarteeseen voi syntyä kohdassa 5 esitetyt nurjahdusmuodot, joten tarkastellaan vain näitä nurjahdusmuotoja ja vain alla esitetty kuormitustapaus. Myös muut kuormitustapaukset tulee tutkia.

**Kuormitustapaus 2 (KT 2):** omapaino 100 % + lumi 100 % + tuuli 60 % (hetkellinen aikaluokka)

Oletetaan tässä esimerkissä seuraavat kuormat yhdelle ristikkoparin päällä olevalle levyjäykisteelle:

- lisävaakavoima yhdeltä tappivaarnaristikkoparilta 0,15 kN/m (omapaino 100 % + lumi 100 %)

- tuulikuorma 0,45 kN/m (tuuli 60 %)

- **ulkoiset kuormat yhteensä 0,6 kN/m (omapaino 100 % + lumi 100 % + tuuli 60 %)**

Nurjahdusmuoto a)

$n = 2$  (kaksi ristikkoa rinnakkain)

$\ell = 40060$  mm (jäykistysjärjestelmän jänneväli 2x yläpaarteen pituus)

$$k_{\ell} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \sqrt{\frac{15}{40,06}} \end{array} \right\} \Rightarrow k_{\ell} = 0,61$$

$$q_d = k_{\ell} \cdot \frac{n \cdot N_d}{50 \cdot \ell} = 0,61 \cdot \frac{2 \cdot 1500}{50 \cdot 40,06} = 0,9 \text{ kN/m (omapaino 100 \% + lumi 100 \%)}$$

Nurjahdusmuoto b)

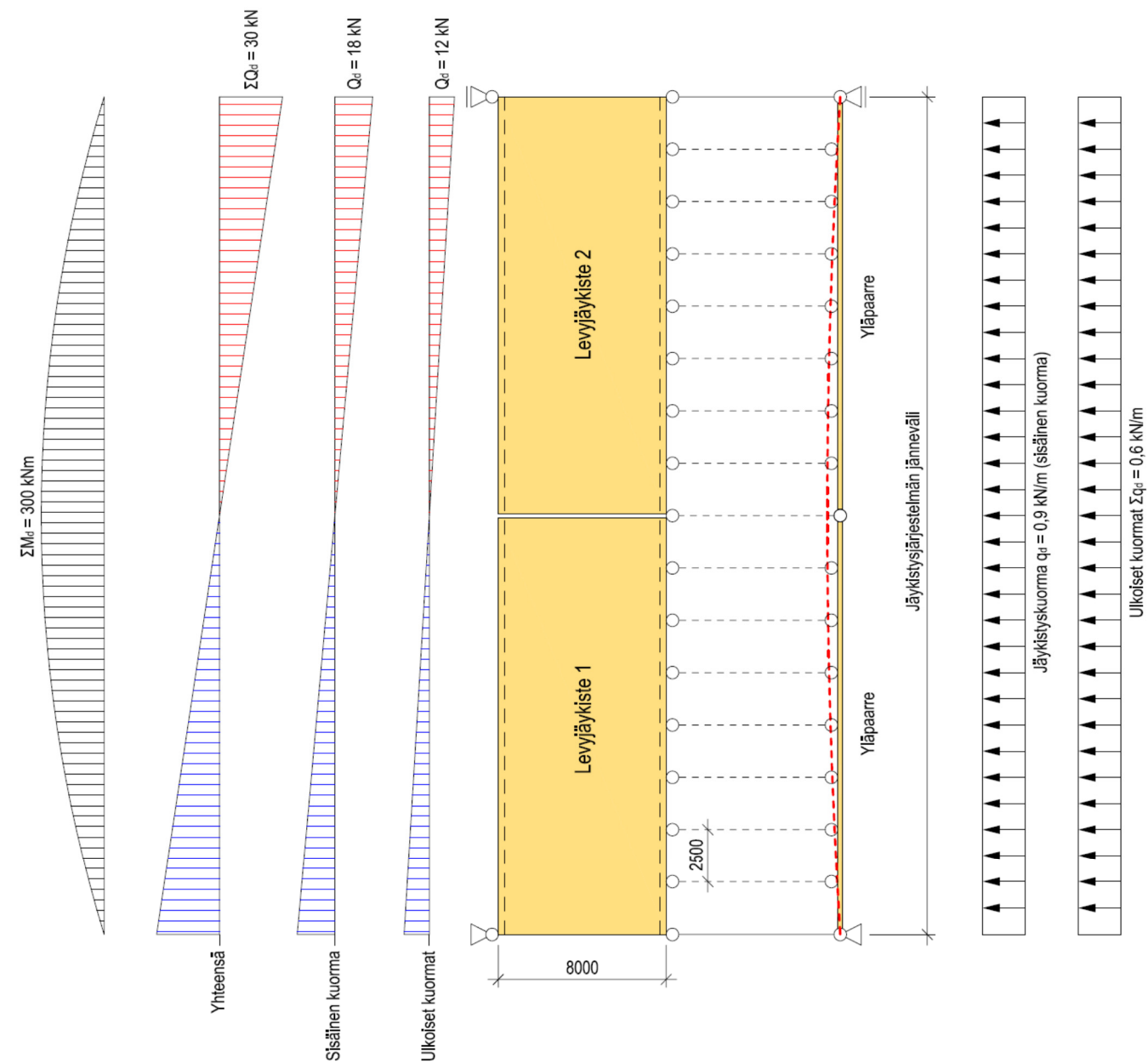
$n = 2$  (kaksi ristikkoa rinnakkain)

$\ell = 20030$  mm (jäykistysjärjestelmän jänneväli 1x yläpaarteen pituus)

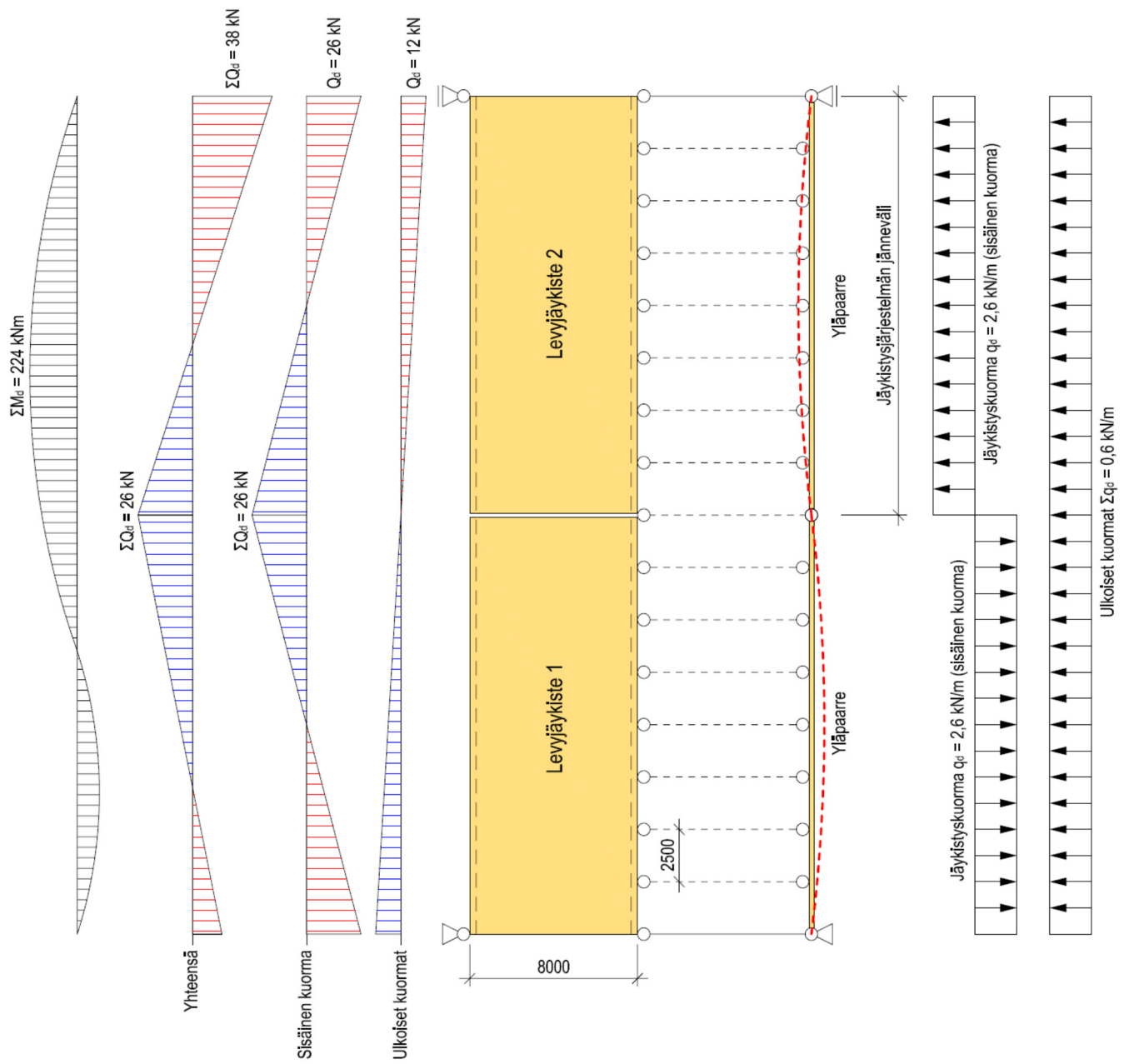
$$k_{\ell} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ \sqrt{\frac{15}{20,03}} \end{array} \right\} \Rightarrow k_{\ell} = 0,87$$

$$q_d = k_{\ell} \cdot \frac{n \cdot N_d}{50 \cdot \ell} = 0,87 \cdot \frac{2 \cdot 1500}{50 \cdot 20,03} = 2,6 \text{ kN/m (omapaino 100 \% + lumi 100 \%)}$$

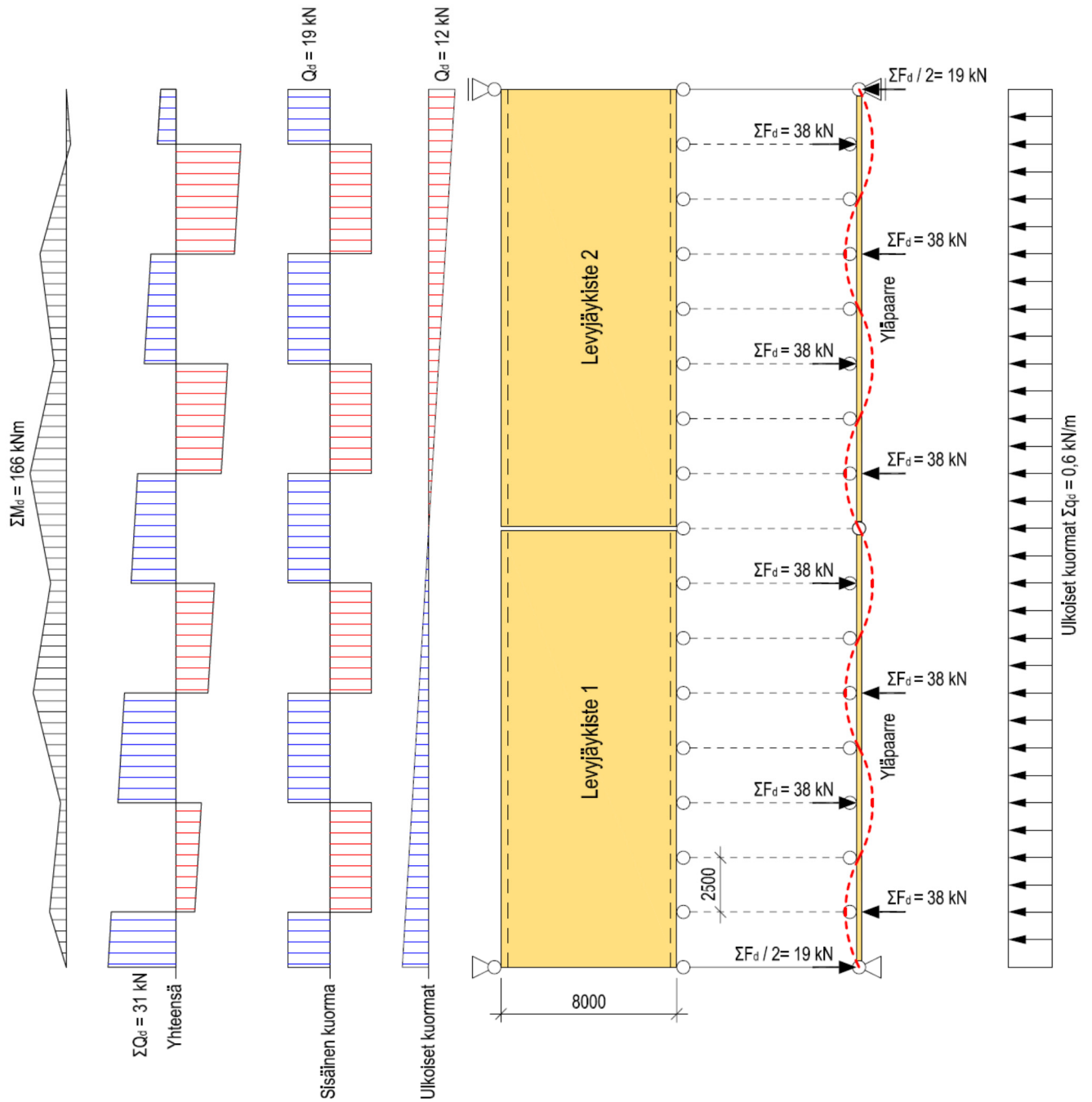
Nurjahdusmuoto a)



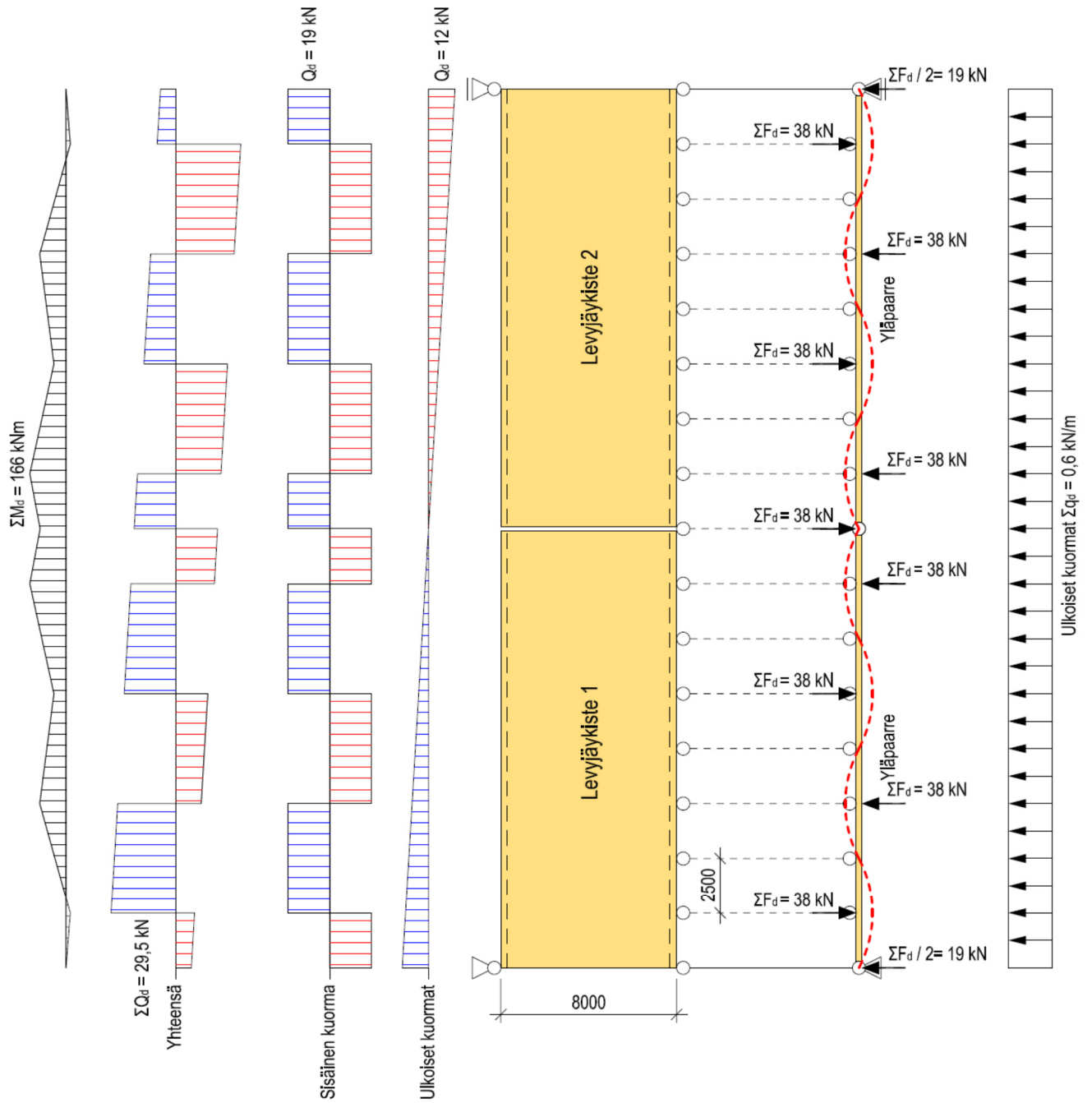
Nurjahdusmuoto b)



Nurjahdusmuoto c)

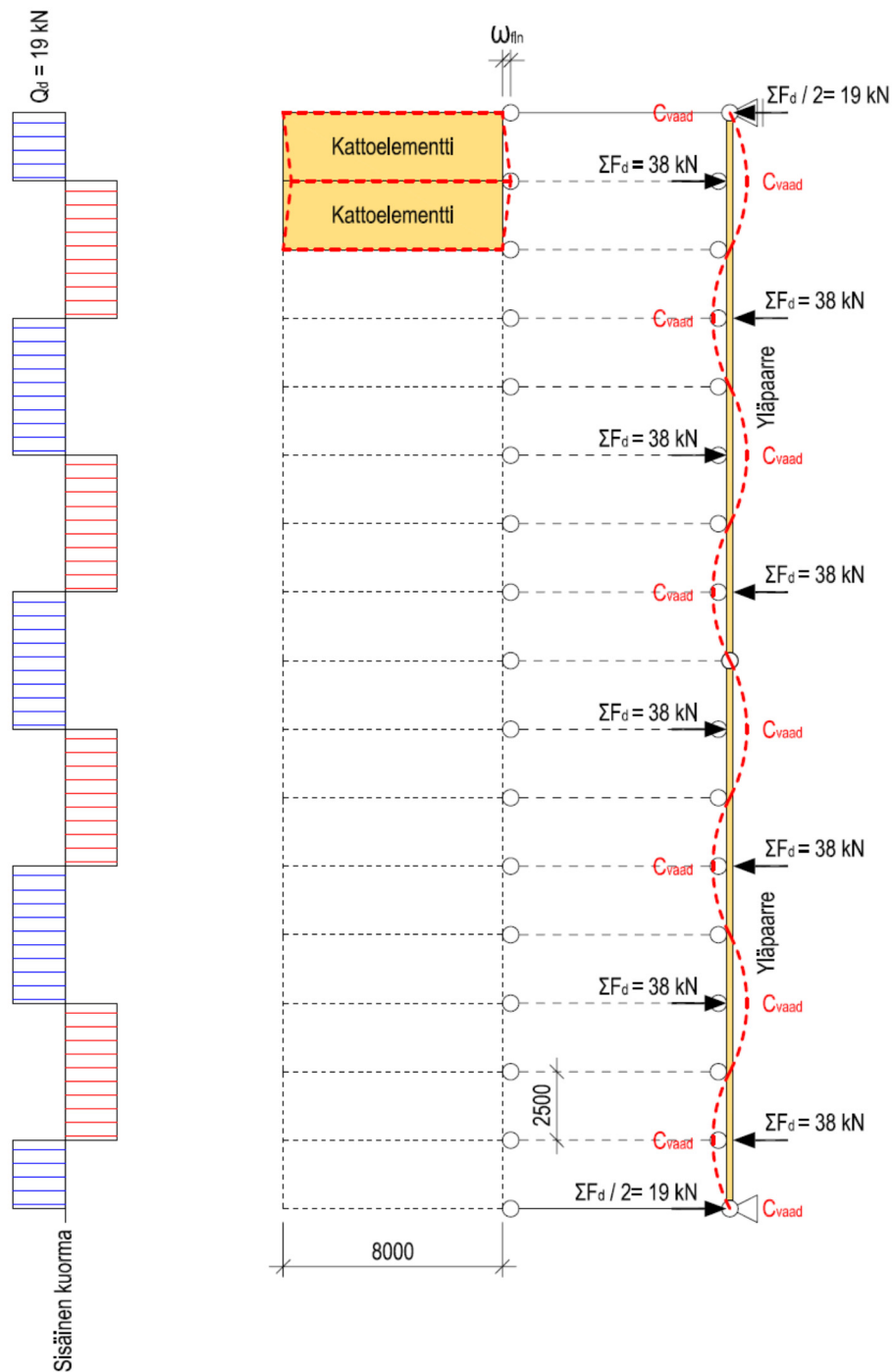


Nurjahdusmuoto d)



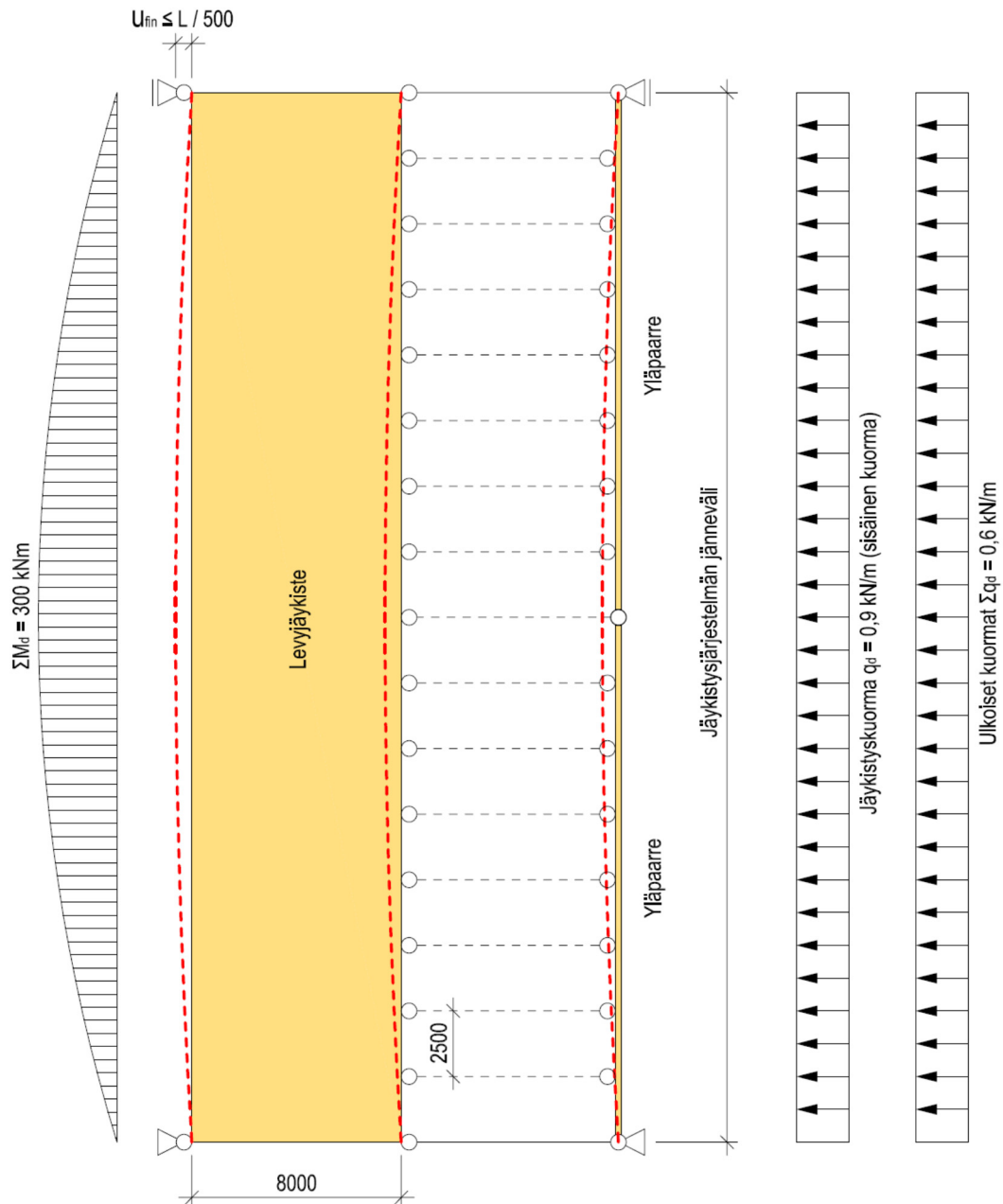
## 9 TUEN JOUSIJÄYKKYYS

Nurjahdustuen jousijäykkyys tarkastetaan s-nurjahdusmuodolle. Ulkoisia kuormia ei huomioida jousijäykkyyden tarkastuksessa. Tässä tapauksessa tuen jousijäykkyys tarkastetaan alla esitetylle systeemille, jossa kattoelementti siirtää sisäisen voiman  $\Sigma F_d = 38 \text{ kN}$  nurjahdusaallon 0-kohtiin. Tuen jousijäykkyys määritetään kattoelementin sekä kattoelementin ja yläpaarteiden liitosten lopputilan siirtymien perusteella, kun kattoelementtiä kuormittaa alla olevassa kuvassa olevat kuormat.



## 10 LEVYJÄYKISTEEN JOUSTAVUUS

Koko levyjäykiste saa joustaa murtorajatilassa enintään  $L / 500$ , kun levyjäykistettä kuormittaa sisäiset ja ulkoiset kuormat. Levyjäykisteen joustavuus tarkastellaan levyjäykisteen lopputilan (viruma huomioiden) siirtymän perusteella.



## 11 YHTEENVETO

Tässä esimerkissä tarkasteltiin tappivaarnaristikon yläpaarten päällä olevan levyjäykisteen rasituksia. Levyjäykiste koostuu 2,5 m leveistä kattoelementeistä, jotka liitetään toisiinsa. Tarkastelussa oli vain yksi kuormitustapaus (myös muut kuormitustapaukset tulee tarkastaa). Lisäksi tulee mitoittaa kattoelementin ja yläpaarten välinen liitos (ei tutkita tässä esimerkissä).

**Kuormitustapaus 2 (KT 2):** omapaino 100 % + lumi 100 % + tuuli 60 % (hetkellinen aikaluokka)

Suurimmat leikkausvoimat levyjäykisteeseen syntyvät nurjahdusmuodossa b. Levyjäykisteen päässä  $Q_d = 38$  kN ja harjalla  $Q_d = 26$  kN. Suunnittelun ja asennuksen kannalta kannattaa käyttää samanlaista levytystä ja elementtien välistä kiinnitystä. Näin ollen kattoelementtien levyjäykiste ja kattoelementtien väliset liitokset mitoitetaan tässä tapauksessa leikkausvoimalle  $Q_d = 38$  kN. Suurin momentti levyjäykisteeseen syntyy nurjahdusmuodosta a, joten levyjäykisteen paarteet mitoitetaan momentille  $M_d = 300$  kNm, josta paarrevoima  $N_d = 38$  kN ( $z = 7,9$  m). Tukipisteen jousijäykkyys tarkastetaan kohdan 9 mukaan ja koko jäykisteen joustavuus kohdan 10 mukaan.