



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# LVL-RAKENTEISEN PUUHALLIN RAKENNESUUNNITTELU

TEKIJÄ: Joonas Heinonen

|   |                              |
|---|------------------------------|
| Koulutusala<br>Tekniikan ja liikenteen ala  |                              |
| Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma<br>Rakennustekniikan koulutusohjelma   |                              |
| Työn tekijä(t)<br>Joona Heinonen  |                              |
| Työn nimi<br>LVL-rakenteisen puuhallin rakennesuunnittelu   |                              |
| Päiväys<br>16.6.2016  | Sivumäärä/Liitteet<br>131/15 |
| Ohjaaja(t)<br>Rakennetekniikan yliopettaja, TkT Arto Puurula ja rakennetekniikan lehtori, DI Harry Dunkel   |                              |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t)<br>Iisveden Metsä Oy  |                              |
| Tiivistelmä<br><p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella uusi sahatavaran varastointihalli Iisveden Metsä Oy:lle. Tilajalla oli useita vaihtoehtoja hallin runkoratkaisuksi. Yhtenä vaihtoehtona oli LVL-rakenteinen halli, johon tässä työssä keskityttiin. Insinööriyön tavoitteena oli mitoittaa hallin runko ja piirtää hallin pääpiirustukset sekä LVL-osien tuotantopiirustukset.</p> <p>Suunnitelun lähtökohdiksi tilaaja antoi hallin päämitoiksi noin 40 x 72 metriä. Vapaata korkeutta hallissa tulisi olla vähintään kuusi metriä ja hallin molemmissa päädyissä olisi oltava kaksi kymmenen metrin levyistä kulkuaukkoa. Melko nopeasti runkoratkaisuksi valikoitui mastopilarikehät A-kattokannattajilla. LVL-rakenteisilla A-kattotuoleilla päästään enintään noin 25 metrin jänneväliin, joten halli suunniteltiin 2-laivaiseksi. Mitoituslaskelmat tehtiin Exceltaulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen ja rakenteiden rasitukset saatiin pääosin Frame Analysis-staatiikkaohjelman avulla sekä osittain käsinlaskennalla.</p> <p>Insinööriyön tuloksena saatiin hallin rungon lujuuslaskelmat ja pohja-, leikkaus- ja julkisivupiirustukset sekä LVL-osien tuotantopiirustukset. Tämän insinööriyön tuloksia tullaan käyttämään erityyppisten runkoratkaisujen vertailuun varastohallin lopullista runkotyyppiä valittaessa.</p> |                              |
| Avainsanat<br>LVL, rakennesuunnittelu, puurakentaminen  |                              |
|   |                              |

|  |              |                  |        |
|--|--------------|------------------|--------|
| Field of Study<br>Technology, Communication and Transport  |              |                  |        |
| Degree Programme<br>Degree Programme In Construction Engineering   |              |                  |        |
| Author(s)<br>Joonas Heinonen   |              |                  |        |
| Title of Thesis<br>Designing of LVL Structured Hall  |              |                  |        |
| Date   | 16 June 2016 | Pages/Appendices | 131/15 |
| Supervisor(s)<br>Mr. Arto Puurula, Principal Lecturer, PhD and Mr. Harry Dunkel, Principal Lecturer, M.Sc.   |              |                  |        |
| Client Organisation /Partners<br>Iisveden Metsä Oy   |              |                  |        |
| <p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to design a new sawn timber storage hall for Iisveden Metsä Oy. The customer had several options as the framework for the hall. One of the options was a LVL structured hall, in which this study is focused on. The goal of this thesis was to design the frame of the hall and draw general drawings and production drawings of the LVL parts.</p> <p>The customer gave the starting points for the planning. The main dimensions had to be about 40 x 72 meters and the free height of the hall should be at least six meters. Both ends of the hall should be two ten meters wide doorways. Pretty quickly the frame solution was selected to be LVL structured columns and king post trusses. LVL structured king post trusses can reach a maximum of 25 meters span so the hall was designed to consist of two halls combined together. The design calculations were made with the Excel spreadsheet program and the stresses of the structures were mainly produced with the Frame Analysis program and partially by manual calculations.</p> <p>The results of this thesis were strength calculations, general drawings and production drawings of the LVL parts. The results will be used for comparing the different types of frame solutions when choosing the final frame type for the hall.</p> |              |                  |        |
| Keywords<br>LVL, structural designing, wooden construction   |              |                  |        |
|  |              |                  |        |

## Kiitokset

Kiitän Iisveden Metsää mielenkiintoisen aiheen löytämisestä sekä mahdollisuudesta tehdä insinööri-työ heille. Haluan myös esittää kiitokseni insinööri-työn ohjaajalleni Arto Puurulalle selkeästä ja eteenpäin vievästä ohjauksesta.

Kuopiossa 16.6.2016

Joona Heinonen

## Alkusanat

Tämä insinööriyö on opinnäytetyö, eikä tätä voi käyttää rakennesuunnitelmien asiakirjana eikä LVL-varastohallin rakennesuunnitteluohjeena.

## SISÄLTÖ

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1    | JOHDANTO .....   | 9  |
| 2    | LVL .....  | 10 |
| 3    | HALLIRAKENNUKSEN PERUSTIEDOT .....                                     | 11 |
| 4    | KUORMITUSYHDISTELMÄT .....   | 13 |
| 5    | LUMI- JA TUULIKUORMAT SEKÄ RAKENTEIDEN VINOUESTA JOHTUVAT KUORMAT..... | 14 |
| 5.1  | Lumi .....   | 14 |
| 5.2  | Tuuli .....  | 14 |
| 5.3  | Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat .....                          | 18 |
| 6    | KATTOTUOLI .....   | 20 |
| 6.1  | Vertikaali.....  | 23 |
| 6.2  | Alapaarre .....  | 24 |
| 6.3  | Yläpaarre.....   | 26 |
| 6.4  | Kattotuolin yläpaarteen tuenta levyjäykisteellä.....                   | 31 |
| 7    | ULKOSEINÄLINJAN MASTOPILARI.....                                       | 42 |
| 7.1  | Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta).....                   | 45 |
| 7.2  | Kiepahduskestävyys .....   | 48 |
| 7.3  | Leikkausvoimakestävyys .....   | 51 |
| 7.4  | Mastopilarikehän siirtymä .....  | 52 |
| 8    | KESKILINJAN MASTOPILARI .....  | 53 |
| 8.1  | Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta).....                   | 57 |
| 8.2  | Nurjahduskestävyys Z-suuntaan (heikompi suunta).....                   | 59 |
| 8.3  | Kiepahduskestävyys .....   | 60 |
| 8.4  | Leikkausvoimakestävyys.....  | 63 |
| 9    | NURKKAPILARI.....  | 64 |
| 9.1  | Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta).....                   | 67 |
| 9.2  | Kiepahduskestävyys .....   | 69 |
| 9.3  | Leikkausvoimakestävyys .....   | 72 |
| 9.4  | Päätykehän siirtymä .....  | 73 |
| 10   | KESKILINJAN PÄÄTYPILARI.....   | 74 |
| 10.1 | Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta).....                   | 78 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 10.2 | Nurjahduskestävyys Z-suuntaan (heikompi suunta).....  | 80  |
| 10.3 | Kiepahduskestävyys .....  | 81  |
| 10.4 | Leikkausvoimakestävyys .....  | 84  |
| 11   | TUULIPILARI.....  | 85  |
| 11.1 | Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta).....  | 88  |
| 11.2 | Kiepahduskestävyys .....  | 89  |
| 11.3 | Leikkausvoimakestävyys.....   | 91  |
| 11.4 | Taipuma.....  | 91  |
| 12   | MASTOPILARIN LIITOS KATTOTUOLIIN .....  | 93  |
| 12.1 | Hankolaudan leikkausvoimakestävyys.....   | 94  |
| 12.2 | Ruuvauksen kestävyys (yleisruuveilla) .....   | 95  |
| 12.3 | Ruuvien määrä liitoksessa .....   | 96  |
| 12.4 | Ruuvien sijoittaminen.....  | 96  |
| 13   | YLÄPOHJAN JÄYKISTERISTIKKO .....  | 97  |
| 13.1 | Yläpohjan jäykisteristikon puristussauvan nurjahduskestävyys Z-suuntaan (heikompi suunta).... | 100 |
| 13.2 | Vetotangon kestävyys .....  | 101 |
| 13.3 | Yläpohjan jäykisteristikon puristussauvan tukipainekestävyys .....                            | 102 |
| 13.4 | Yläpohjan jäykisteristikon vetotangon ankkurointikestävyys .....                              | 103 |
| 13.5 | Yläpohjan jäykisteristikon vetotangon ankkurointilevyn tukipainekestävyys.....                | 105 |
| 13.6 | Ulkoseinän jäykisteristikon vetotangon ankkurointikestävyys.....                              | 107 |
| 13.7 | Ulkoseinän jäykisteristikon vetotangon ankkurointilevyn tukipainekestävyys .....              | 109 |
| 13.8 | Keskilinjän jäykisteristikon vetotangon ankkurointikestävyys.....                             | 110 |
| 13.9 | Keskilinjän jäykisteristikon vetotangon ankkurointilevyn tukipainekestävyys.....              | 111 |
| 14   | TUULIPILARIN LIITOS PÄÄTYPALKKIIN .....   | 113 |
| 14.1 | Pultin vetokestävyys.....   | 114 |
| 14.2 | Pultin aluslevyn tukipainekestävyys .....   | 114 |
| 15   | PÄÄTYKEHÄ .....   | 116 |
| 15.1 | Päätypalkki .....   | 118 |
| 15.2 | Vetosauva .....   | 122 |
| 16   | MASTOPILARIN MOMENTTIJÄYKKÄ PERUSTUSLIITOS.....   | 124 |
| 16.1 | Ulosvetokestävyys.....  | 126 |
| 16.2 | Leikkauskestävyys.....  | 127 |
| 16.3 | Lohkeamismurtokestävyys .....   | 127 |

|   |     |
|---|-----|
| 16.4 Liimaruuvien reunaetäisyydet ja liitinvälit..... | 128 |
| 16.5 Pilarikengän kestävyys .....                     | 129 |
| 17 YHTEENVETO.....                                    | 130 |
| LÄHTEET .....   | 131 |
| LIITE 1: POHJAPIIRUSTUS .....                         | 132 |
| LIITE 2: LEIKKAUSPIIRUSTUS .....                      | 133 |
| LIITE 3: JULKISIVUT.....                              | 134 |
| LIITE 4: OSAPIIRUSTUKSET .....                        | 135 |



## 1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä perehdytään puurakenteiden suunnitteluun sekä erityisesti LVL-rakenteisiin. Tilaajana toimiva Iisveden Metsä tarvitsee lisää varastotilaa sahatavaran varastointia varten ja LVL-runkoinen halli on yhtenä vaihtoehtona runkoratkaisua valittaessa. Insinööriyön tavoitteena on mitoittaa hallin runko ja piirtää hallin pääpiirustukset sekä LVL-rungon tuotantokuvat. Tämän työn avulla tilaaja saa enemmän vertailupohjaa valitessaan lopullista halliratkaisua.

Suunnittelutyön aluksi tilaaja antoi hallin päämitoiksi noin 40 x 72 metriä ja vapaaksi sisäkorkeudeksi vähintään kuusi metriä. Hallin molempiin päätyihin tuli suunnitella kaksi kymmenen metrin levyistä kulkuaukkoa. Melko nopeasti hallin runkoratkaisuksi valikoitui mastopilarikehät A-kattokannattajilla. LVL-rakenteisilla A-kattotuoleilla päästään enintään noin 25 metrin jänneväliin, joten halli suunniteltiin 2-laivaiseksi.

Rakenteiden mitoituksen perusteena käytetään eurooppalaisia suunnittelustandardeja eli eurokoodoja. Eurokoodit ovat yhteiseurooppalaisia kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, jotka yhtenäistävät suunnitteluohjeita Euroopan maiden välillä. Mitoituslaskelmat tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen ja rakenteiden rasitukset saatiin pääosin Frame Analysis-staatiikkaohjelman avulla sekä osittain käsinlaskennalla. Tässä työssä käytetyt kaava- ja taulukkoviittaukset sekä kuormitusviittaukset viittaavat Puurakenteiden suunnitteluohjeeseen RIL 205-1-2009 ellei toisin ole mainittu.

## 2 LVL

LVL (Laminated veneer timber) eli viilupuu on 3 millimetriä paksuista sorvatuista viiluista liimaamalla valmistettu jäykkä ja mittatarkka puutuote. Suomessa tehdyissä LVL-tuotteissa raaka-aineena käytetään kuusipuuta. LVL:stä käytetään usein myös nimitystä kertopuu, joka on kuitenkin Metsä Woodin käyttämä tavaramerkki heidän valmistamilleen LVL-tuotteille.

LVL:ää käytetään yleisesti kaikilla rakentamisen sektoreilla uudisrakentamisesta korjausrakentamiseen. Käyttökohteita ovat esimerkiksi palkit, pilarit, kehät, ristikot sekä erilaiset ovi- ja ikkunateollisuuden komponentit. LVL:n enimmäisleveys on noin 2,5 metriä. Enimmäispituus rajoittuu noin 25 metriin kuljetusteknisistä syistä (puuinfo.fi).

LVL:n valmistus sekoitetaan toisinaan vanerin valmistukseen. Vanerin valmistuksessa viilut liimataan kuitenkin ristikkäin. LVL taas valmistetaan siten, että viilujen syysuunta on kokoajan sama (Kerto-S ja Kerto-T). Poikkeuksena kuitenkin Kerto-Q, jossa joka viides viilukerros on liimattu ristikkäin. LVL valmistetaan jatkuvana laattana, joka leikataan jälkepäin halutun mittaisiin osiin. Vaneri taas valmistetaan määrämittäisinä levyinä.

### 3 HALLIRAKENNUKSEN PERUSTIEDOT

Rakennus on 2-laivainen LVL-runkoinen varastohalli. Runkona toimivat kuuden metrin jaolla olevat mastopilarit A-kattokannattajilla. Halli jäykistetään rungon poikkisuunnissa mastopilareilla ja rungon pituussuunnassa kattotuolien väliin hallin molempiin pätyihin sijoitettavilla jäykisteristikoilla. Pääasiallinen käyttötarkoitus on sahatavaran varastointi. Hallin pohjapiirustus, leikkaus sekä julkisivut ovat esitetty kuvissa 1-3.

Käyttöluokka: 2

(kohta 2.3.1.3)

Seuraamusluokka: CC2

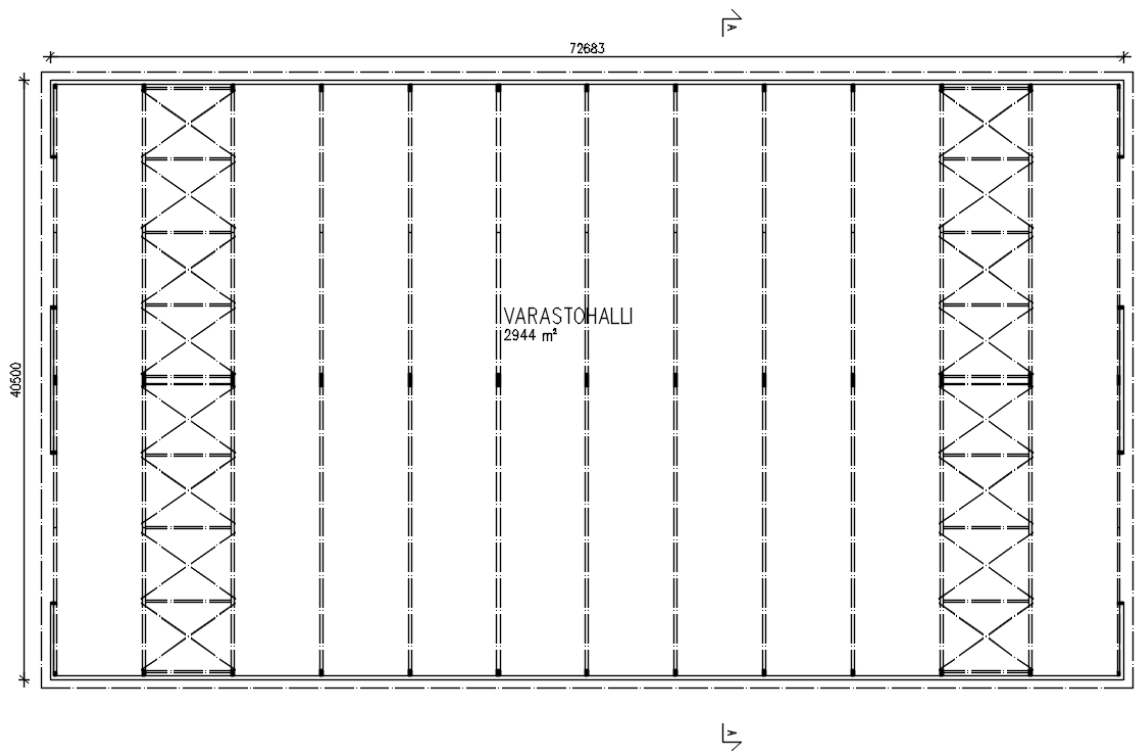
(taulukko 2.1-FI)

Pääasiallinen rakennusmateriaali: puu (LVL)

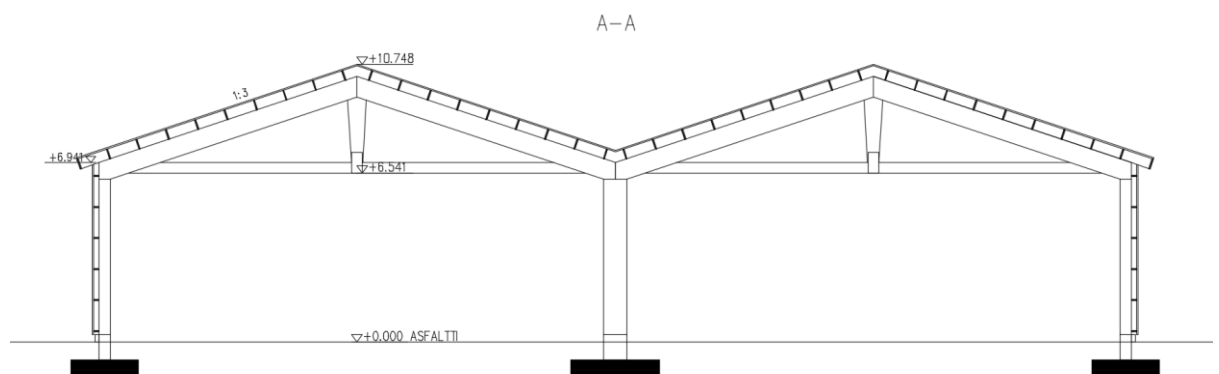
Kerrosluokka: 1

Kokonaiskorkeus: 10,75 m

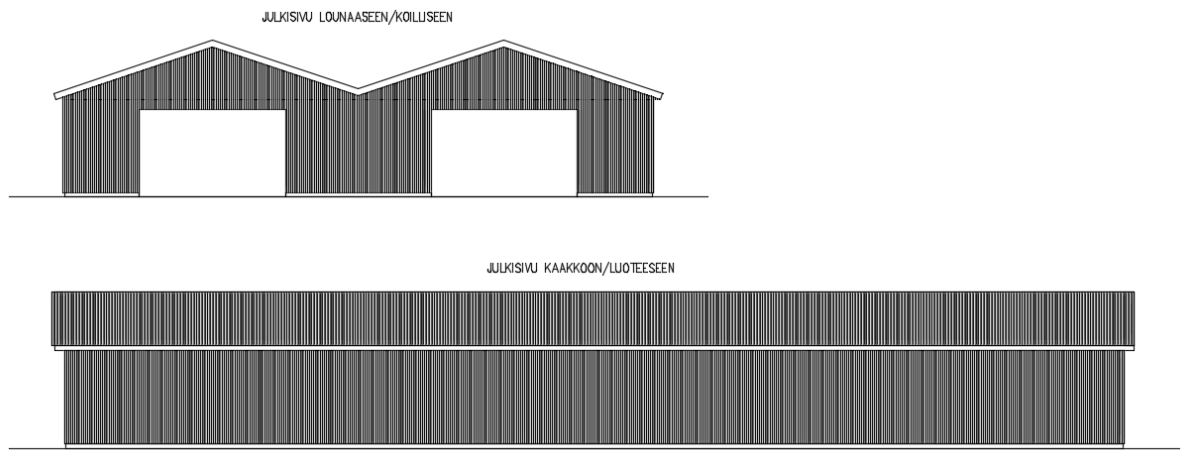
Kerrosala: 2944 m<sup>2</sup>



KUVA 1. Hallin pohjapiirustus (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 2. Leikkaus A-A (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 3. Julkisivut (Heinonen 2016-05-10)

## 4 KUORMITUSYHDISTELMÄT

Rakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon kaikki rakenteita rasittavat kuormat. Pysyvät kuormat sekä määräävä muuttuva kuorma otetaan huomioon täysimääräisenä. Muita muuttuvia kuormia voidaan pienentää pienennyskerroimella  $\psi_0$ . Näin saadaan monta erilaista kuormitusyhdistelmää, joista otetaan kussakin mitoitusilanteessa huomioon kaikkein suurimmat rasitukset aiheuttava kuormitusyhdistelmä eli niin kutsuttu mitoittava kuormitusyhdistelmä. Jokaisella kuormitusyhdistelmällä on oma aikaluokka sen mukaan kuinka pitkään kuormien ajatellaan vaikuttavan. Aikaluokan perusteella määritetään  $k_{mod}$ -kerroin, jolla rakenteiden lujuutta aikaluokasta riippuen joko pienennetään tai suurennetaan.

Tässä työssä pysyviä kuormia ovat ainoastaan omat painot ja muuttuvia kuormia ovat lumi- sekä tuulikuormat. Erilaisia kuormitusyhdistelmiä saatiin yhteensä kahdeksan.

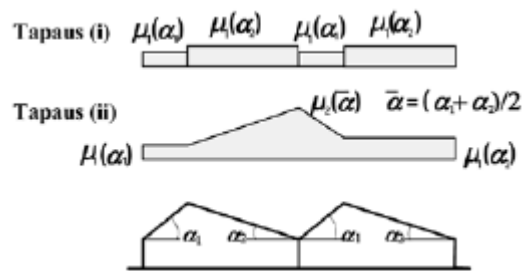
TAULUKKO 1. Kuormitusyhdistelmät (Heinonen 2016-03-01)

|      | tuuli    | lumi, vasen lape | lumi, oikea lape | omapaino | aikaluokka  |
|------|----------|------------------|------------------|----------|-------------|
|      | $\psi_0$ | $\psi_0$         | $\psi_0$         | $\psi_0$ |             |
| KY 1 | 0        | 0                | 0                | 1        | pysyvä      |
| KY 2 | 1        | 0,7              | 0,7              | 1        | hetkellinen |
| KY 3 | 1        | 0,7              | 0,7...1,1375     | 1        | hetkellinen |
| KY 4 | 1        | 0                | 0                | 1        | hetkellinen |
| KY 5 | 0        | 1                | 1                | 1        | keskipitkä  |
| KY 6 | 0,6      | 1                | 1                | 1        | hetkellinen |
| KY 7 | 0        | 1                | 1...1,625        | 1        | keskipitkä  |
| KY 8 | 0,6      | 1                | 1...1,625        | 1        | hetkellinen |

määräävä muuttuva kuorma

## 5 LUMI- JA TUULIKUORMAT SEKÄ RAKENTEIDEN VINOUESTA JOHTUVAT KUORMAT

Lumikuorma määritetään rakennuksen maantieteellisen sijainnin sekä katon muodon ja kattokaltevuuden perusteella. Insinööriyössä tutkitussa kohteessa kyseessä on sahakatto, katon lumikuorma määritetään kuvan 1 mukaan. Tapauksessa (i) lumikuorma on tasainen koko katon alalla. Tapauksessa (ii) rakennuksen keskelle mahdollisesti kinostuvan lumen lisäkuorma otetaan huomioon kolmion muotoisena kuormana katon keskellä.



KUVA 4. Sahakaton lumikuorman muotokertoimet (Puuinfo 2010, 34)

Tuulikuorma määritetään mitoitustapauksille A ja B. Mitoitustapauksen A tuulikuormalla mitoitetaan rakennuksen kokonaisstabiilitetti, kun taas rakennuksen tai rakenteen osapintojen ja niiden kiinnitysten kestävyys mitoitetaan mitoitustapaus B:n tuulikuormalle. Tuulikuorman suuruuteen vaikuttaa rakennuksen maastoluokka sekä rakennuksen korkeus. Maastoluokka määräytyy sen mukaan kuinka tuulisella paikalla rakennus sijaitsee.

### 5.1 Lumi

|         |                       |  |            |
|---------|-----------------------|--|------------|
| $s_k$   | 2,5 kN/m <sup>2</sup> | maanpinnan lumikuorman ominaisarvo                   | (kuva 2.1) |
| $\mu_1$ | 0,8                   | katon muotokerroin yleensä                           | (kuva 2.3) |
| $\mu_2$ | 1,3                   | katon muotokerroin rakennuksen keskellä, tapaus (ii) | (kuva 2.3) |

#### Katolla olevan lumikuorman ominaisarvo yleensä

$$q_k = \mu_1 s_k \quad 2,0 \text{ kN/m}^2 \quad (2.5.5S)$$

#### Katolla olevan lumikuorman ominaisarvo rakennuksen keskellä, tapaus (ii)

$$q_k = \mu_2 s_k \quad 3,25 \text{ kN/m}^2 \quad (2.5.5S)$$

### 5.2 Tuuli

#### Määritetään rakennuksen kokonaistuulikuormat voimakerroinmenetelmällä, mitoitustapaus A

Maastoluokka III (taulukko 2.6)

|           |                        |                                  |
|-----------|------------------------|----------------------------------|
| $H$       | 10,5 m                 | rakennuksen korkeus maanpinnasta |
| $q_p(z)$  | 0,48 kN/m <sup>2</sup> | nopeuspaine                      |
| $C_s C_d$ | 1,0                    | rakennekerroin                   |

#### Tuuli kohtisuoraan sivuseinää vastaan

|     |        |                     |
|-----|--------|---------------------|
| $h$ | 10,5 m | rakennuksen korkeus |
|-----|--------|---------------------|

|   |        |                                |
|---|--------|--------------------------------|
| b | 72,5 m | rakennuksen sivuseinän leveys  |
| d | 40,5 m | rakennuksen päätyseinän leveys |

Tehollinen hoikkuus

$$\lambda = \frac{2h}{b} \quad 0,29 \text{ (RIL 201-1-2011 taulukko 5.1S)}$$

Sivusuhte

$$\frac{d}{\bar{b}} \quad 0,56$$

$c_f$  1,31 voimakerroin (RIL 201-1-2011 taulukko 5.2S)

Kokonaistuulikuorman ominaisarvo sivuseinää vastaan neliökuormana

$$q_{w,k} = c_s c_d c_f q_p(z) \quad 0,63 \text{ kN/m}^2$$

(RIL 201-1-2011 kaava 5.3)

### Tuuli kohtisuoraan päätyseinää vastaan

|   |        |                                |
|---|--------|--------------------------------|
| h | 10,5 m | rakennuksen korkeus            |
| b | 40,5 m | rakennuksen päätyseinän leveys |
| d | 72,5 m | rakennuksen sivuseinän leveys  |

Tehollinen hoikkuus

$$\lambda = \frac{2h}{b} \quad 0,52 \text{ (RIL 201-1-2011 taulukko 5.1S)}$$

Sivusuhte

$$\frac{d}{\bar{b}} \quad 1,79$$

$c_f$  0,93 voimakerroin (RIL 201-1-2011 taulukko 5.2S)

Kokonaistuulikuorman ominaisarvo päätyseinää vastaan neliökuormana

$$q_{w,k} = c_s c_d c_f q_p(z) \quad 0,44 \text{ kN/m}^2$$

(RIL 201-1-2011 kaava 5.3)

### Määritetään rakennuksen osapintojen tuulikuormien maksimiarvot, mitoituspaus B

harjakatto, katon kaltevuus 18,43°

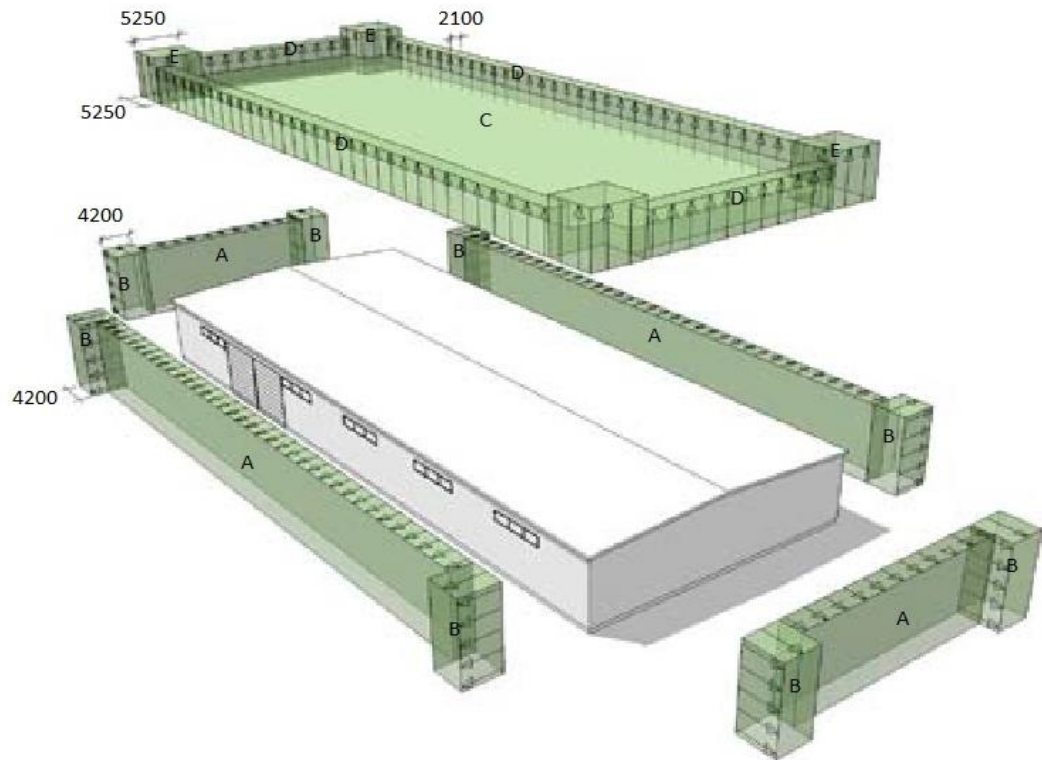
Osapinnan tuulikuorma määritetään kaavalla:

$$q_{w,k} = c_{p,net} q_k(h) \quad \text{(RIL 205-1-2011 kaava 2.5.11S)}$$

Osapintojen tuulikuormat on taulukoituna alla olevan kuvan mukaisille alueille.

$$e = \min(b; 2h) = 2h \quad 21000 \text{ mm}$$

(taulukot 2.8 ja 2.9)



TAULUKKO 2. Hallin osapintojen tuulikuormien maksimiarvot (Puuinfo 2010, 19)

| Alue | $C_{p,net}$ | $q_k(h)$ [kN/m <sup>2</sup> ] | $q_{w,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
|------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|
| A    | -1,1        | 0,48                          | -0,53                          |
| B    | -1,5        | 0,48                          | -0,72                          |
| C    | -1,05       | 0,48                          | -0,50                          |
| D    | -1,63       | 0,48                          | -0,78                          |
| E    | -1,87       | 0,48                          | -0,90                          |

### Yläpohjan tuulikuorman siirtäminen pistekuormaksi reunapilarin yläpään

Yläpohjaan kohdistuva tasainen tuulikuorma  $q_{w,k}$  muutetaan pistekuormaksi  $H_1$  ja siirretään reunapilarin yläpään pistekuormaksi  $H_2$ . Pistekuorman momentti pilarin alapään suhteen (piste A) on pysyvä muuttumattomana, joten kuormaa  $H_2$  suurennetaan kaavalla:

$$M_A = H_1 h_1 = H_2 h_2 \Rightarrow H_2 = \frac{h_1}{h_2} H_1$$

Seinän tuulikuorma yläpohjan osalta mastopilarikehälle käyttörajatilassa:

$$h_1 = 8,25 \text{ m}$$

$$h_2 = 6,0 \text{ m}$$

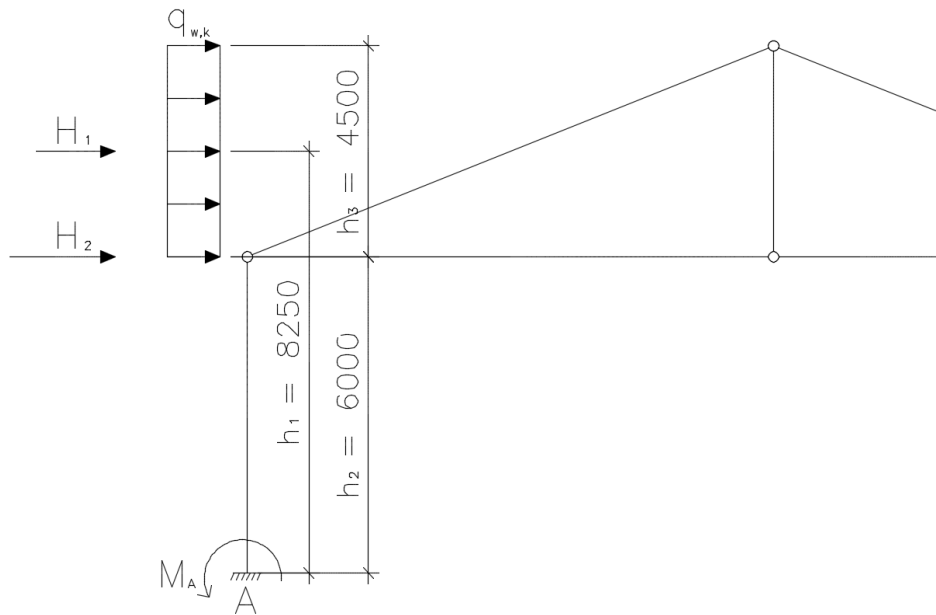
$$h_3 = 4,5 \text{ m}$$

$$q_{w,k} = 4,0 \text{ kN/m} \quad \text{seinän tuulikuorma käyttörajatilassa, ks. luku 7}$$

$$H_1 = q_{w,k} h_3 = 4,0 \text{ kN/m} \cdot 4,5 \text{ m} = 18 \text{ kN}$$

$$H_2 = \frac{h_1}{h_2} H_1 = \frac{8,25 \text{ m}}{6,0 \text{ m}} \cdot 18 \text{ kN} = 24,75 \text{ kN}$$





KUVA 4.1. Mastopilarikehän yläpohjan tuulikuorman siirtäminen pistekuormaksi ulkoseinälinjan mastopilarin yläpäähän (Heinonen 2016-06-15).

Seinän tuulikuorma yläpohjan osalta päätykehälle käyttörajatilassa:

$$h_1 = 8,410 \text{ m}$$

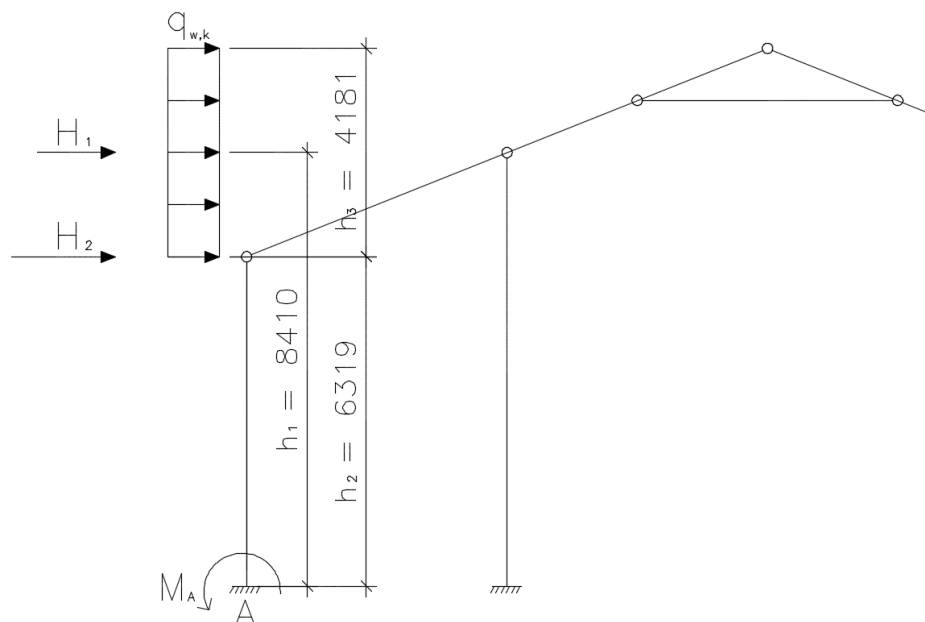
$$h_2 = 6,319 \text{ m}$$

$$h_3 = 4,181 \text{ m}$$

$$q_{w,k} = 2,0 \text{ kN/m} \quad \text{seinän tuulikuorma käyttörajatilassa, ks. luku 9}$$

$$H_1 = q_{w,k} h_3 = 2,0 \text{ kN/m} \cdot 4,181 \text{ m} = 8,362 \text{ kN}$$

$$H_2 = \frac{h_1}{h_2} H_1 = \frac{8,410 \text{ m}}{6,319 \text{ m}} \cdot 8,362 \text{ kN} = 11,13 \text{ kN}$$

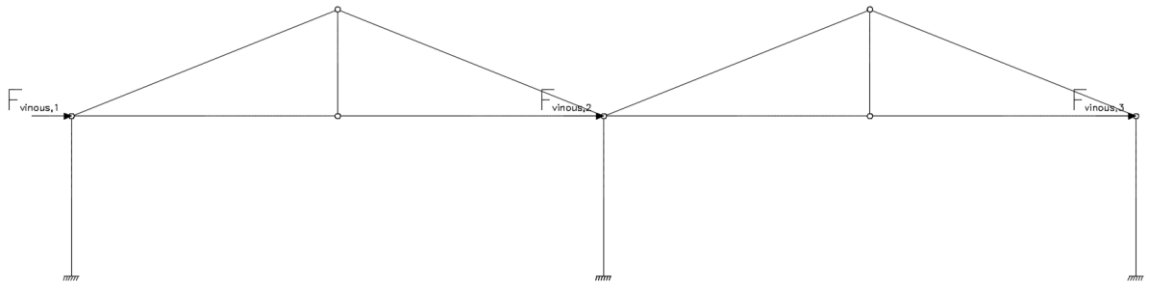


KUVA 4.2. Päätykehän yläpohjan tuulikuorman siirtäminen pistekuormaksi nurkkapilarin yläpäähän (Heinonen 2016-06-15).

### 5.3 Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat

Rungon pystyrakenteiden mahdollisesta asennusvinoudesta tai kuormitusten oletettua epäedullisemmasta vaikutussuunnasta syntyvät kuormat otetaan huomioon lisävaakavoimana pilareiden yläpäässä. Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat rakennuksen lyhemmässä suunnassa lasketaan kaavalla  $H_{dt} = N_d/150$  (RIL 201-1-2011, kaava 6.4S), jossa  $N_d$  on ko. lisävaakavoiman aiheuttavan pystykuorman laskenta-arvo.

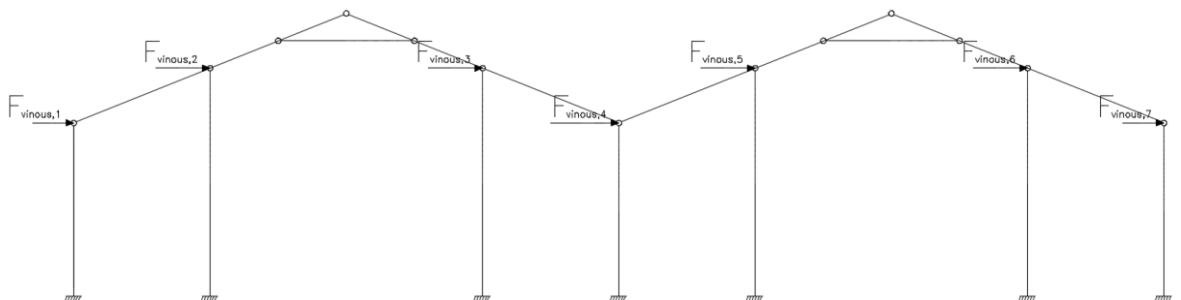
Kuvissa 4.3 ja 4.4 on esitetty vinoudesta johtuvien kuormien sijainnit mastopilarikehässä ja päätykehässä. Taulukoissa 2.1 ja 2.2 on esitetty kyseisten kuormien arvot murtorajatilassa.



KUVA 4.3. Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat mastopilarikehälle (Heinonen 2016-06-15).

TAULUKKO 2.1. Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat mastopilarikehälle murtorajatilassa (Heinonen 2016-06-15).

| Kuormitusyhdistelmä | $F_{\text{vinous},1}$ [kN] | $F_{\text{vinous},2}$ [kN] | $F_{\text{vinous},3}$ [kN] |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| KY 1                | 0,36                       | 0,70                       | 0,36                       |
| KY 2                | 1,26                       | 2,51                       | 1,26                       |
| KY 3                | 1,31                       | 2,98                       | 1,31                       |
| KY 4                | 0,36                       | 0,70                       | 0,36                       |
| KY 5                | 1,65                       | 3,29                       | 1,65                       |
| KY 6                | 1,65                       | 3,29                       | 1,65                       |
| KY 7                | 1,72                       | 3,96                       | 1,72                       |
| KY 8                | 1,72                       | 3,96                       | 1,72                       |



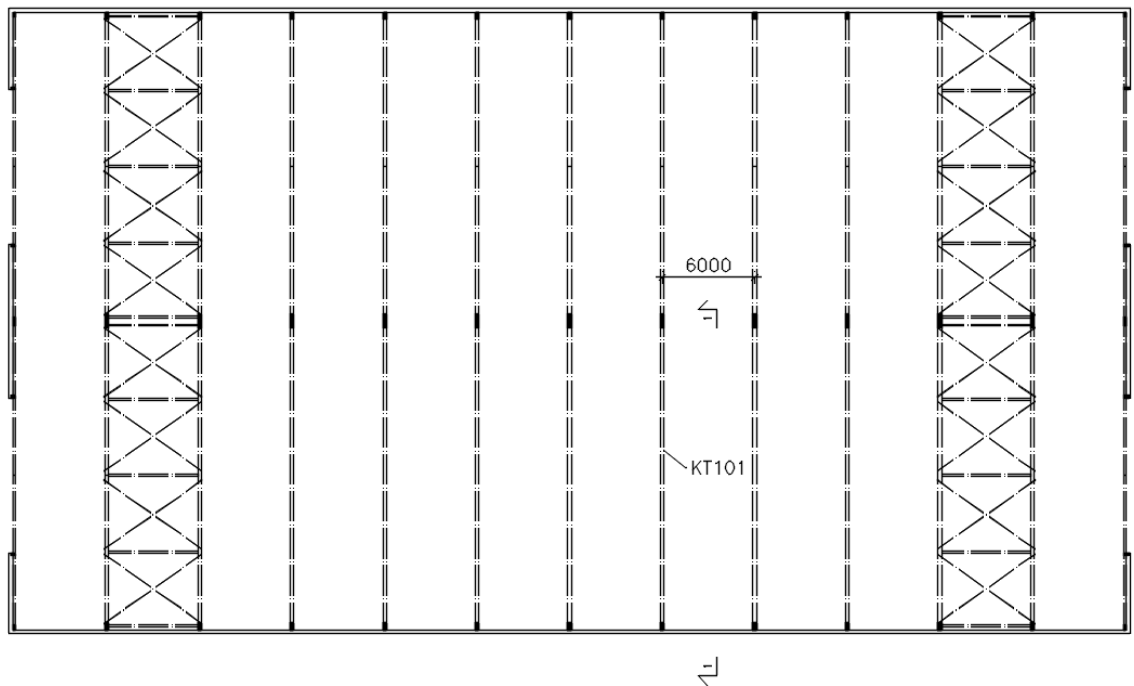
KUVA 4.4. Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat päätykehälle (Heinonen 2016-06-15).

TAULUKKO 2.2. Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat päätykehälle murtorajatilassa (Heinonen 2016-06-15).

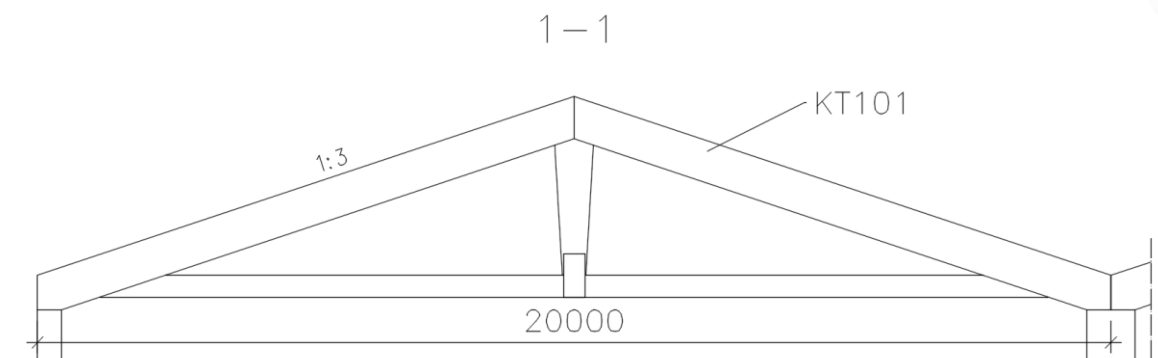
| Kuormitus-<br>yhdistelmä | $F_{\text{vinous},1}$<br>[kN] | $F_{\text{vinous},2}$<br>[kN] | $F_{\text{vinous},3}$<br>[kN] | $F_{\text{vinous},4}$<br>[kN] | $F_{\text{vinous},5}$<br>[kN] | $F_{\text{vinous},6}$<br>[kN] | $F_{\text{vinous},7}$<br>[kN] |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| KY 1                     | 0,06                          | 0,18                          | 0,18                          | 0,10                          | 0,18                          | 0,18                          | 0,06                          |
| KY 2                     | 0,19                          | 0,50                          | 0,50                          | 0,31                          | 0,54                          | 0,54                          | 0,14                          |
| KY 3                     | 0,18                          | 0,50                          | 0,59                          | 0,41                          | 0,63                          | 0,54                          | 0,14                          |
| KY 4                     | 0,10                          | 0,13                          | 0,13                          | 0,15                          | 0,17                          | 0,17                          | 0,06                          |
| KY 5                     | 0,17                          | 0,71                          | 0,70                          | 0,33                          | 0,70                          | 0,71                          | 0,17                          |
| KY 6                     | 0,20                          | 0,68                          | 0,68                          | 0,36                          | 0,70                          | 0,70                          | 0,18                          |
| KY 7                     | 0,17                          | 0,71                          | 0,83                          | 0,47                          | 0,83                          | 0,71                          | 0,17                          |
| KY 8                     | 0,20                          | 0,68                          | 0,81                          | 0,50                          | 0,83                          | 0,72                          | 0,18                          |

## 6 KATTOTUOLI

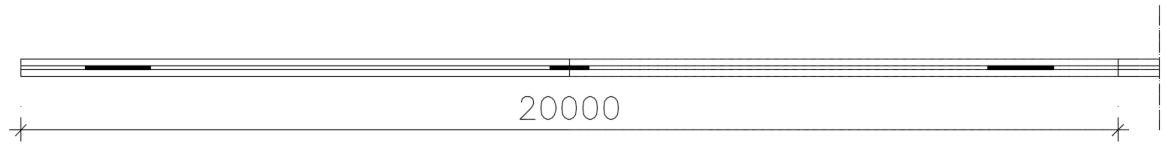
Hallin pääkannattimina toimivat A-kattotuolit, jotka tukeutuvat mastopilareihin. Kattotuolin yläreuna on tuettu kiepahdusta vastaan katto-orsilla. A-kattotuoli jakautuu kolmeen eri elementtiin: vertikaaliin, alapaarteeseen sekä yläpaarteeseen. Kukin osa mitoitetaan erikseen. Vertikaali toimii puristettuna sauvana, joten sen mitoituksessa tutkitaan nurjahduskestävyys sauvan Z-suuntaan eli heikompaan suuntaan. Alapaarre mitoitetaan jatkuvana sauvana yhdistetylle taivutus- ja vetorasitukselle. Yläpaarteen mitoituksessa tutkitaan paarteen taivutuskestävyys, kiepahduskestävyys sekä tukipainekestävyys keskilinjalla, jossa on suurimmat kuormat kinostuvasta lumesta johtuen. Yläpaarre koostuu kahdesta erillisestä sauvasta, jotka mitoitetaan erikseen. Näin ollen statiikkaohjelmasta saatavat yläpaarteen rasitukset puolitetaan, koska ne kohdistuvat kahdelle paarteelle. Lisäksi tutkitaan katto-orren ja kattotuolin yläpaarteen liitoksen kestävyys sekä kiepahdustuen jousijäykkyys. Kattotuolin eri osien välisiä liitoksia ei tässä työssä tutkita, koska niiden mitoituksen vaatima työmäärä on niin suuri suhteutettuna opinnäytetyön laajuuteen.



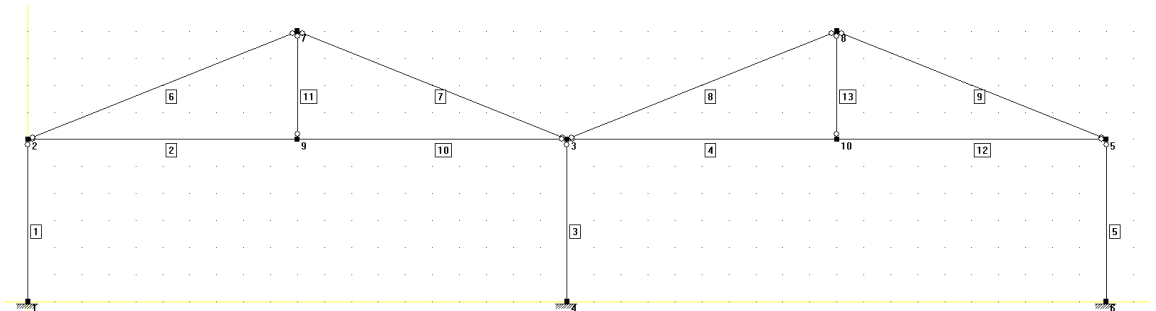
KUVA 5. Kattotuolin sijainti (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 6. Leikkaus 1-1 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 6.1. Kattotuolin vaakaleikkaus. Yläparre koostuu kahdesta erillisestä sauvasta, joiden väliin vertikaalin yläpää sekä alaparre kiinnitetään. Vertikaalin alapää on puskussa alapaarretta vasten ja se kiinnitetään alapaarteeseen liitoksen molemmin puolin asennettavilla LVL-levyillä (Heinonen 2016-06-14).



KUVA 7. Mastopilarikehän staattinen malli (Heinonen 2016-05-10)

### Kattotuolin materiaali

#### Kerto-S

|                   |                         |                                       |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällä                     |
| $s$               | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | KokovaikutusekspONENTTI               |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeellaan                  |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan                      |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällä              |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                  |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällä          |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeellaan       |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällä                     |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeellaan pintaviilun suuntaan      |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaisuus                            |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo                    |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

### Yläpohjan kuormat

|          |                        |                              |
|----------|------------------------|------------------------------|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja                     |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma               |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma          |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma |

### Mitat

|       |          |                        |
|-------|----------|------------------------|
| $L$   | 20000 mm | kattotuolin leveys     |
| $L_0$ | 19325 mm | kattotuolin jänneväli  |
| $k$   | 6,0 m    | pääkannattimien k-jako |

### Mitoittava kuormitusyhdistelmä

Mitoittava kuormitusyhdistelmä vaihtelee kattotuolin eri osien välillä. Jokaisen osan kohdalla on kerrottu, mitä kuormitusyhdistelmää mitoituksessa käytetään.

|                 |     |
|-----------------|-----|
| seuraamusluokka | CC2 |
| $K_{FI}$        | 1,0 |

### Kuormat

Yläpohja käyttörajatilassa

$$P_{k,G,yläpohja} = g_{k1} \cdot k \quad 1,8 \text{ kN/m}$$

Ripustuskuorma käyttörajatilassa

$$P_{k,G,ripustus} = g_{k2} \cdot k \quad 0,6 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa, tapaus (i) (tasainen lumikuorma koko katolla)

$$P_{k,Q,lumi (i)} = q_{k1} \cdot k \quad 12 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa, tapaus (ii) (tasainen lumikuorma vasemmalla lappeella, kinoskuorma oikealla lappeella)

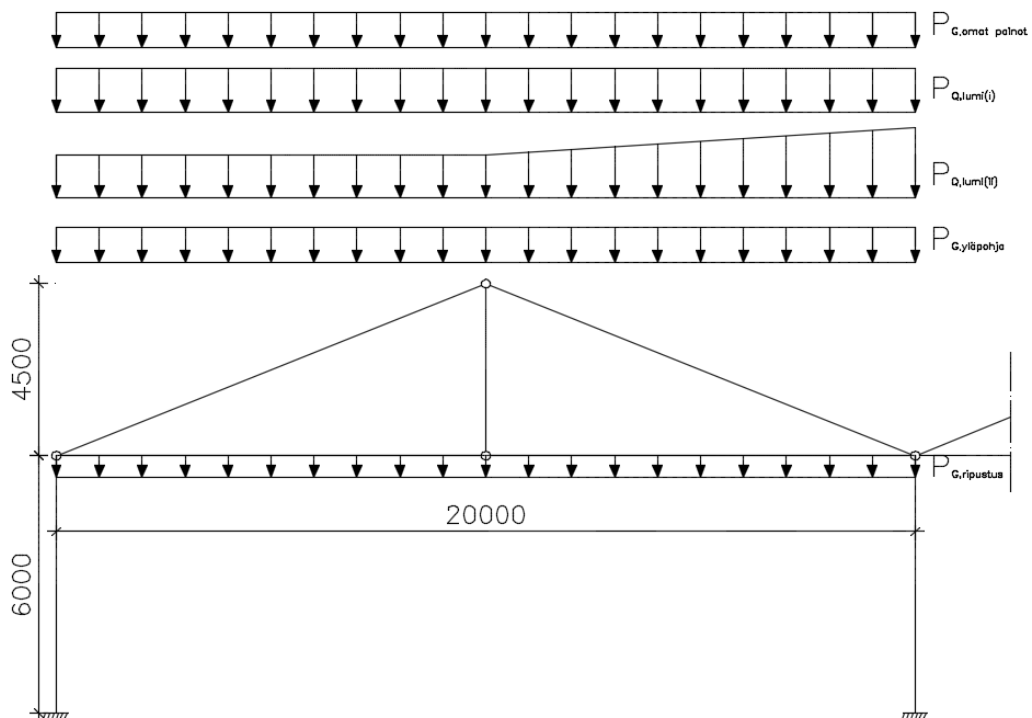
tasainen lumikuorma, vasen lape

$$P_{k,Q,lumi (ii),1} = q_{k1} \cdot k \quad 12 \text{ kN/m}$$

maksimi kinostuva lumikuorma, oikea lape

$$P_{k,Q,lumi (ii),2} = q_{k2} \cdot k \quad 19,5 \text{ kN/m}$$

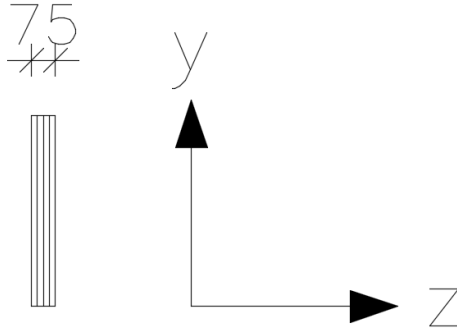
Omat painot tulevat suoraan statiikkaohjelmasta.



KUVA 8. Kattotuolin kuormat (Heinonen 2016-05-10)

## 6.1 Vertikaali

|   |                       |                          |
|---|-----------------------|--------------------------|
| L | 3333 mm               | sauvan pituus            |
| b | 400 mm                | sauvan leveys            |
| h | 75 mm                 | sauvan korkeus           |
| A | 30000 mm <sup>2</sup> | sauvan poikkileikkausala |

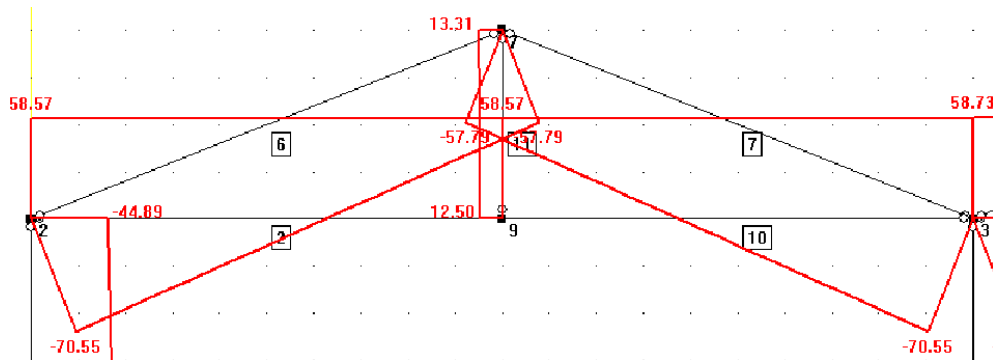


KUVA 9. Vertikaalin poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 1: omapaino 100 %, pysyvä aikaluokka

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa  
G<sub>k</sub> (omapaino)

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa  
1,35K<sub>F1</sub>G<sub>k</sub> (omapaino)

**Nurjahduskestävyys Z-suuntaan (heikompi suunta)**

KUVA 10. Normaalivoimakuvio, KY 1 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)  
N<sub>d</sub> 13,31 kN

Hoikkuusluku  
L<sub>c,y</sub> = 1,0L

3333 mm  
(taulukko 6.1)

$$I_z = \frac{bh^3}{12} \quad 14062500 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad 21,7 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \quad 154,0 \quad (6.20.2S)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 2,69 \quad (6.21)$$

 $k_z$ -kerroin

$$\beta_c \quad 0,1 \quad \text{alkukäyryys kerroin, LVL} \quad (6.29)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad 4,24 \quad (6.28)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$ 

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad 0,13 \quad (6.26)$$

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 0,44 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$$k_{mod} \quad 0,6 \quad \text{pysyvä aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 17,5 \text{ N/mm}^2$$

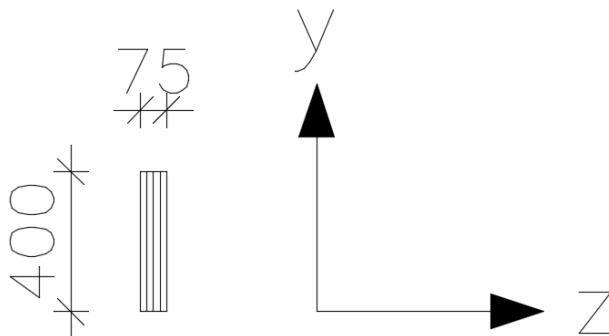
Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,191 \quad (6.2)$$

Käyttöaste  $19,1 \%$ 

## 6.2 Alapaarre

|     |                       |                               |
|-----|-----------------------|-------------------------------|
| $l$ | 20000 mm              | alapaarteen pituus            |
| $b$ | 75 mm                 | alapaarteen leveys            |
| $h$ | 400 mm                | alapaarteen korkeus           |
| $A$ | 30000 mm <sup>2</sup> | alapaarteen poikkileikkausala |



KUVA 11. Alapaarteen poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)



Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 7: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 %, keskipitkä aikaluokka.

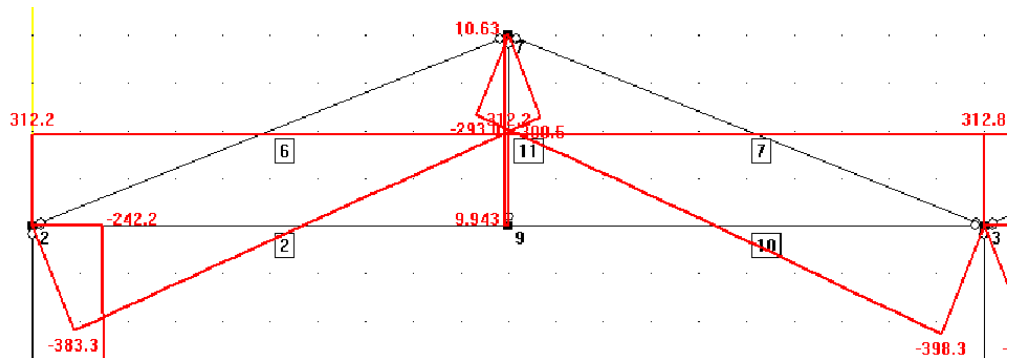
Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$G_k$  (omapaino) +  $Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$1,15K_{FI}G_k$  (omapaino) +  $1,5K_{FI}Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

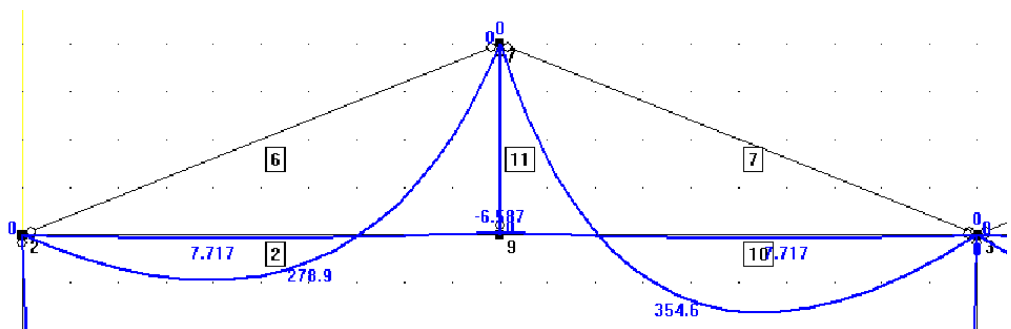
### Yhdistetty taivutus- ja vetokestävyys



KUVA 12. Normaaliavoimakuvio, KY 7 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$N_d$  312,8 kN



KUVA 13. Momenttikuvio, KY 7 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

$M_d$  7,717 kNm

$k_{mod}$  0,8 keskipitkä aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

Vetojäännitys

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A} \quad 10,43 \text{ N/mm}^2$$

$k_i$  -kerroin

$$k_i = \left(\frac{3000}{l}\right)^{s/2} \leq 1,1 \quad 0,89$$

Vetolujuus

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{f,t,0} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 20,8 \text{ N/mm}^2$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6Md}{bh^2} \quad 3,9 \text{ N/mm}^2$$

$k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^5 \leq 1,2 \quad 0,97 \quad (3.3)$$

Taivutuslujuus

$$f_{m,y,d} = \frac{k_h f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 28,3 \text{ N/mm}^2$$

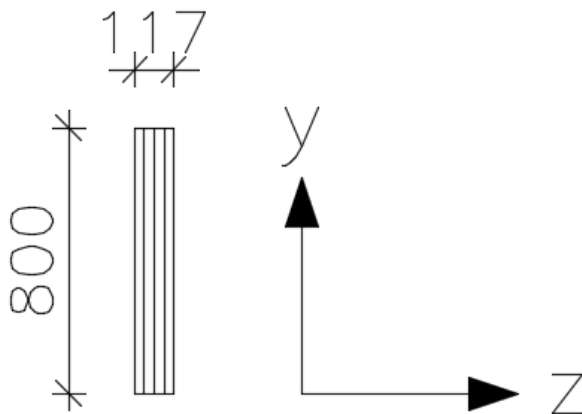
Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad 0,637 \quad (6.17)$$

Käyttöaste 63,7 %

### 6.3 Yläpaarre

|       |                       |                              |
|-------|-----------------------|------------------------------|
| L     | 10550 mm              | yläpaarten pituus            |
| $l_A$ | 450 mm                | tuen pituus                  |
| b     | 117 mm                | yläpaarten leveys            |
| h     | 800 mm                | yläpaarten korkeus           |
| A     | 93600 mm <sup>2</sup> | yläpaarten poikkileikkausala |



KUVA 14. Yläpaarten poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 7: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 %, keskipitkä aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$G_k$  (omapaino) +  $Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$1,15K_{FI}G_k$  (omapaino) +  $1,5K_{FI}Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

### Yhdistetty taivutus- ja puristuskestävyys

Puolet maksimi normaalivoimasta (statiikkaohjelmasta)

$N_d$  199,15 kN ks. KUVA 12

Hoikkuusluku

$L_{c,z} = 1,0L$  10550 mm  
(taulukko 6.1)

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \quad 4992000000 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad 230,9 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,y}}{i_y} \quad 45,7 \quad (6.20.2s)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 0,80 \quad (6.21)$$

$k_y$  -kerroin

$\beta_c$  0,1 alkukäyrydestä riippuva kerroin LVL:lle (6.29)

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad 0,84 \quad (6.27)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad 0,90 \quad (6.25)$$

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 2,13 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$k_{mod}$  0,8 keskipitkä aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 23,3 \text{ N/mm}^2$$

Puolet maksimi taivutusmomentista (statiikkaohjelmasta)

$M_d$  177,3 kNm ks. KUVA 13

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,d} = \frac{6Md}{bh^2} \quad 14,2 \text{ N/mm}^2$$

$k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^S \leq 1,2 \quad 0,89 \text{ (3.3)}$$

Taivutuslujuus

$k_{mod}$  0,8 keskipitkä aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{m,d} = \frac{k_h f_m k_{mod}}{\gamma_M} \quad 26,1 \text{ N/mm}^2$$

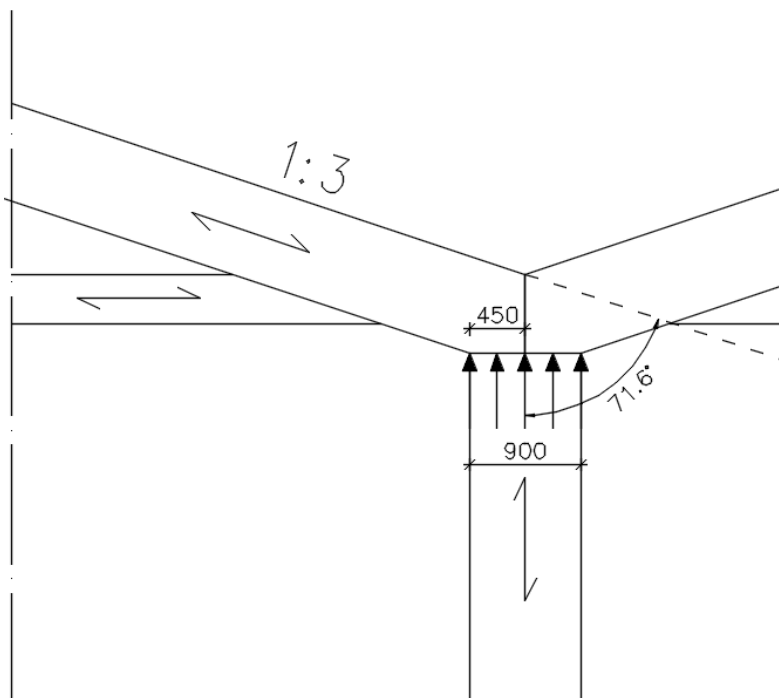
Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,647 \quad (6.23)$$

Käyttöaste 64,7 %

**Tukipainekestävyys (keskilinjalla, puristus vinosti syysuuntaan)**

$\alpha$  71,6 ° katon kaltevuus 1:3



KUVA 15. Keskilinjän tuki (Heinonen 2016-05-10)

Puolet maksimi normaalivoimasta (keskituella, statiikkaohjelmasta)

$N_d$  199,2 kN ks. KUVA 12

Puristusjännitys yläpaarteessa

$$\sigma_{c,a,d} = \frac{N_d}{b l_A} \quad 3,8 \text{ N/mm}^2$$

Yläpaarteen puristuslujuus syysuuntaa vastaan

$k_{mod}$  0,8 keskipitkä aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,edge,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 4,0 \text{ N/mm}^2$$

Yläpaarteen puristuslujuus syysuuntaan

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 23,3 \text{ N/mm}^2$$

$k_{c,90}$  -kerroin

$k_{c,90}$  1,4 Kerto-S (kohta 6.1.5)

Mitoitusehto

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad 3,8 < 6,09 \quad (6.16)$$

Käyttöaste 62,4 %

### Kiepahduskestävyys

Puolet maksimi taivutusmomentista (statiikkaohjelmasta)

$M_d$  177,3 kNm ks. KUVA 13

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \frac{6M_d}{bh^2} \quad 14,2 \text{ N/mm}^2 \quad (6.37)$$

$l$  1200 mm kiepahdustuentaväli (= katto-orsien k-jako)

Sivusuunnassa tuetun palkin tehollinen jänneväli

$$\frac{l_{ef}}{l} = 1,0$$

Kuorma vaikuttaa puristetulla reunalla, joten tehollista jänneväliä suurennetaan mitan 2h verran.

$l_{ef} = l + 2h$  2800 mm

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys

$c$  0,58 Kerto-S

$$\sigma_{m, \text{crit}} = \frac{cb^2}{hle_f} \cdot E_{0,05}$$

$$41,1 \text{ N/mm}^2 \quad (6.31.1S)$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m, \text{crit}}}}$$

$$1,03 \quad (6.30)$$

$k_{\text{crit}}$  -kerroin

$$k_{\text{crit}} = 1,56 - 0,75\lambda_{\text{rel},m}$$

$$0,78 \quad (6.34)$$

Puolet maksimi normaalivoimasta (statiikkaohjelmasta)

$$N_d \quad 199,15 \text{ kN} \quad \text{ks. KUVA 12}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 1,0l_{ef}$$

$$2800 \text{ mm} \quad (\text{taulukko 6.1})$$

$$I_z = \frac{hb^3}{12}$$

$$106774200 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$$

$$33,8 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z}$$

$$82,9 \quad (6.20.2s)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{\text{rel},z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

$$1,45 \quad (6.22)$$

$k_z$  -kerroin

$$\beta_c \quad 0,1$$

alkukäyrydestä riippuva kerroin LVL:lle (6.29)

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{\text{rel},z} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},z}^2)$$

$$1,61 \quad (6.28)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{\text{rel},z}^2}}$$

$$0,43 \quad (6.26)$$

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh}$$

$$2,13 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$$k_{\text{mod}} \quad 0,8$$

keskipitkä aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M}$$

$$23,3 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\left(\frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{crit} f'_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{0,d}}{k_{c,z} f'_{c,0,d}} \leq 1$$

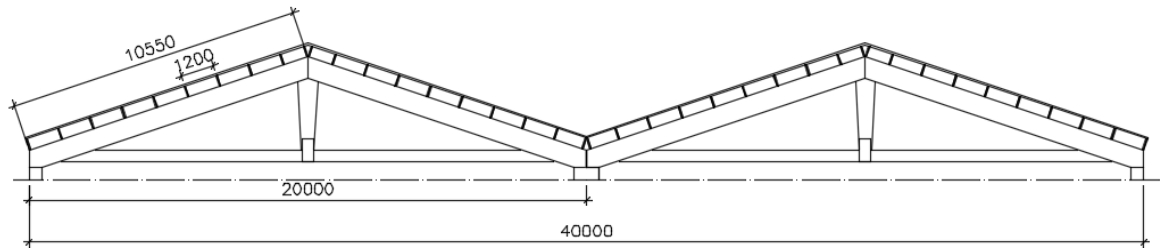
0,693 (6.33)

Käyttöaste

69,3 %

## 6.4 Kattotuolin yläpaarteen tuenta levyjäykisteellä

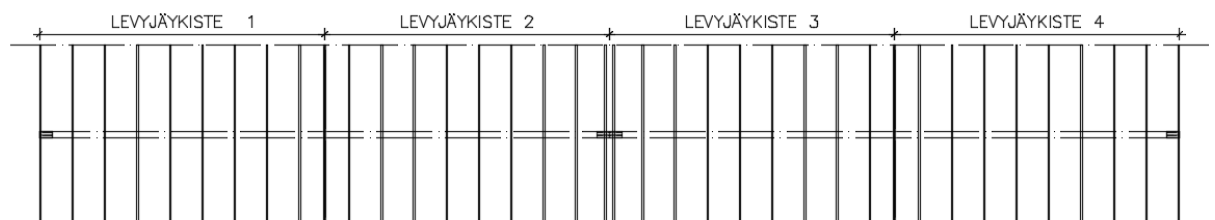
Kattotuolin yläpaarteen sivuttaistuenta toteutetaan yläpaarteen päällä olevilla katto-orsilla, jotka jäykistetään levyjäykistyksellä.



KUVA 16. Yläpohjarakenne (Heinonen 2016-05-10)

### Yläpaarteen sivuttaistuentasysteemi

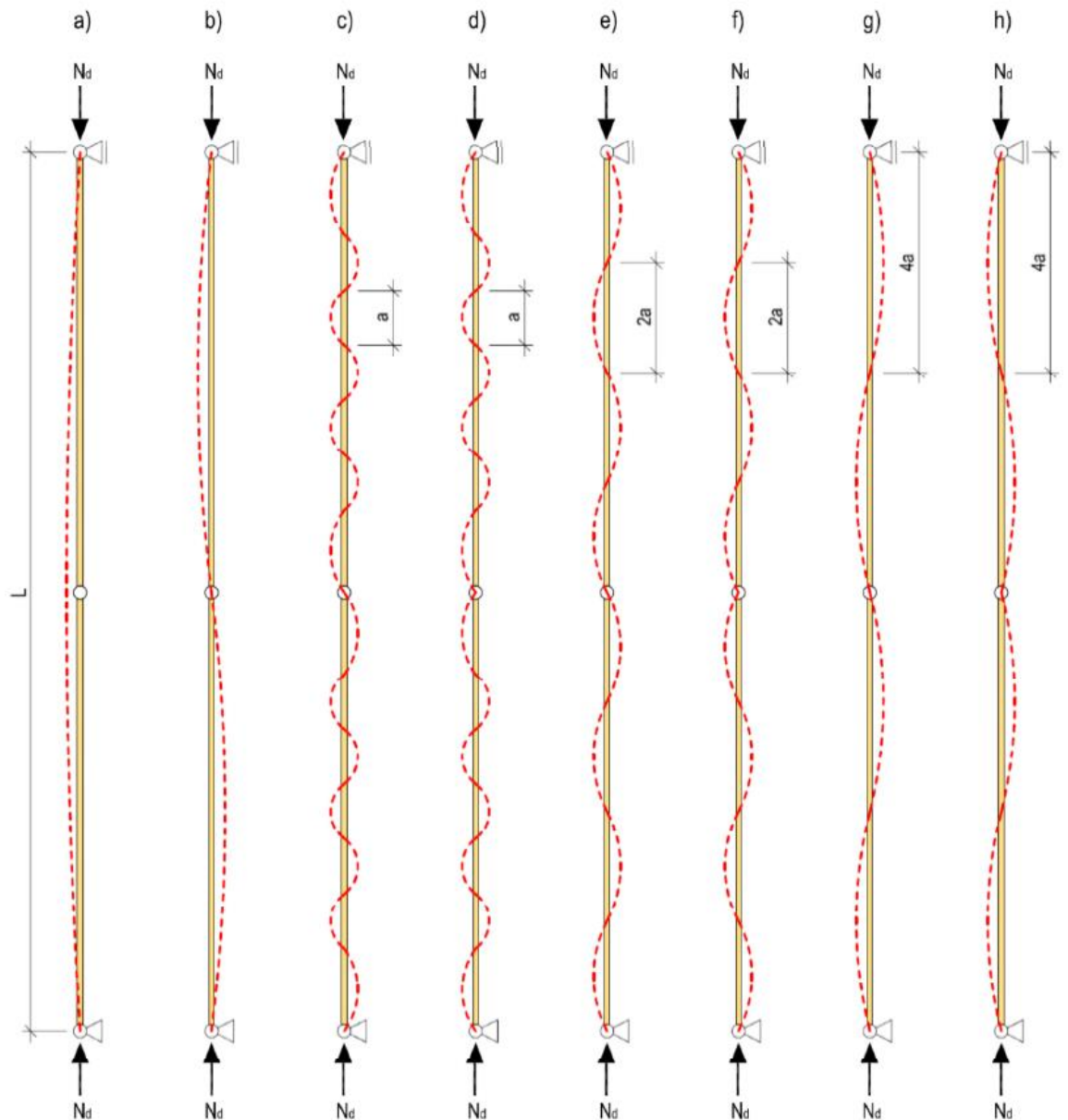
Yläpaarteen sivuttaistuenta tehdään katto-orsien ja niiden päällä olevan levytyksen muodostamalla yhtenäisellä levyjäykisteellä. Levyjäykiste toimii yläpaarteen päällä niin sanottuna laipparakenteena, joka siirtää yläpaarteen tasossa olevat vaakakuormat kattotuolin päihin. Kattotuolin päistä kuormat johdetaan perustuksille. Kattotuolien harjapisteet toimivat nivelellisesti. Levyjäykisteet 1 ja 2 sekä 3 ja 4 kiinnitetään toisiinsa siten, että voimat siirtyvät levyjäykisteiden välillä. Näin harjapisteet saadaan tuettua sivusuunnassa.



KUVA 17. Levyjäykisteet (Heinonen 2016-06-12)

### Nurjahdusmuodot

Yläpaarteeseen voi syntyä kuvassa 18 esitetyt nurjahdusmuodot. S-nurjahduksessa nurjahdusaallonpituus voidaan määrittää tarkasti, joten kaikkia s-nurjahdusmuotoja c-h ei tarvitse tarkastella (a = nurjahdustukien k-jako).



KUVA 18. Nurjahdusmuodot (Puuinfo 2015, Tappivaarnaristikon yläpaarteen tuenta levyjäykisteellä, 5)

### Kriittinen nurjahdusaallonpituus

Määritetään kattotuolin yläpaarteen nurjahdusaallonpituus s-nurjahduksessa. Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 7: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 %, keskipitkä aikaluokka.

Tuen jousijäykkyyksivaatimus

|       |        |     |  |
|-------|--------|-----|--|
| m     | 9      | kpl | poikittaistuettujen kenttien määrä yhdellä lappeella               |
| a     | 1,2    | m   | nurjahdustukien k-jako   |
| $N_d$ | 199,15 | kN  | puolet statiikkaohjelman yläpaarteen puristusvoimasta, ks. KUVA 12 |

$$C_{\text{vaad}} = \left(2 + 2 \cdot \cos\left(\frac{180^\circ}{m}\right)\right) \frac{N_d}{a} \quad 643,9 \text{ N/mm} \quad (9.34.1S)$$



Kriittinen nurjahdusaallonpituus

|          |          |                    |
|----------|----------|--------------------|
| $l_{ef}$ | 10550 mm | yläpaarten pituus  |
| $h$      | 800 mm   | yläpaarten korkeus |
| $b$      | 117 mm   | yläpaarten leveys  |

Heikomman suunnan jäyhyysmomentti

$$I_z = \frac{hb^3}{12} \quad 106774200 \text{ mm}^4$$

$$L_{crit} = \max\left[\frac{\pi}{\sqrt{\frac{C_{paad}}{a \cdot E_{0,05} \cdot I_z}}}; 2a\right] = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{C_{paad}}{a \cdot E_{0,05} \cdot I_z}}} \quad 3872,4 \text{ mm}$$

$$L_{crit} \leq l_{ef}/2 \Rightarrow 3872,4 < 5275 \Rightarrow \text{S-nurjahdus tapahtuu}$$

### Nurjahdustukeen syntyvä voima S-nurjahduksesta

Määritetään kattotuolin nurjahdustukeen aiheutuva voima s-nurjahduksesta. Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 7: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 %, keskipitkä aikaluokka. Tarkastetaan, onko yläpaarre kiepahdusaltis ja aiheutuuko tätä kautta lisäkuormitusta nurjahdustukiin. Yläpaarten vapaa pituus on sama kuin yläpaarten pituus.

|       |           |  |
|-------|-----------|--|
| $l$   | 10550 mm  | yläpaarten vapaa pituus  |
| $M_d$ | 177,3 kNm | puolet statiikkaohjelman yläpaarten maksimimomentista, ks. KUVA 13 |

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,9 \Rightarrow l_{ef} = 0,9 \cdot l \quad 9495 \text{ mm (taulukko 6.3)}$$

Kuorma vaikuttaa puristetulla reunalla, joten tehollista jänneväliä suurennetaan mitan 2h verran.

$$l_{ef,1} = l_{ef} + 2h \quad 11095 \text{ mm} \quad (6.31.1S)$$

$$c = 0,58 \quad \text{suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys, Kerto-S}$$

Kriittinen taivutusjännitys

$$\sigma_{m, crit} = \frac{cb^2}{hl_{ef,1}} \cdot E_{0,05} \quad 10,38 \text{ N/mm}^2$$

$k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^5 \leq 1,2 \quad 0,89 \quad (3.3)$$

$$f_{m,k} = k_h \cdot f_{m,k} \quad 39,1 \text{ N/mm}^2$$

Yläpaarten suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m, crit}}} \quad 2,06 \quad (6.30)$$

$k_{crit}$  -kerroin

$$k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \quad 0,24 \quad (6.34)$$

Puristusvoima yläpaarteen yläreunassa

$$N_{d,1} = (1 - k_{crit}) \cdot \frac{M_d}{h} \quad 169,4 \text{ kN} \quad (9.36)$$

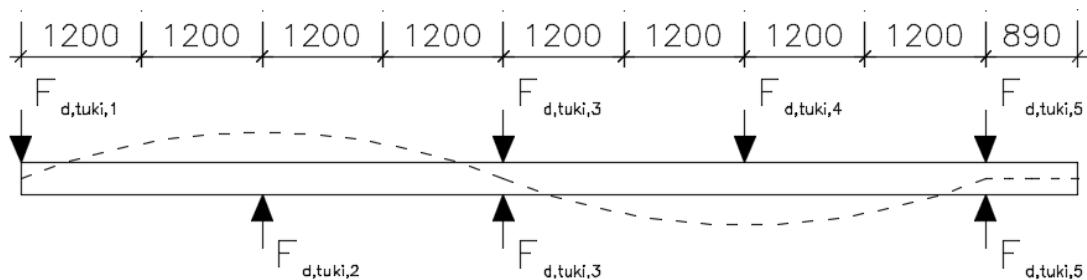
Yläpaarteen kiepahduksesta aiheutuu siis 169,4 kN lisäkuormitusta nurjahdustukiin.

$$N_{d,2} = N_d + N_{d,1} = 199,15 \text{ kN} + 169,4 \text{ kN} \quad 368,55 \text{ kN}$$

$$F_d = N_{d,2}/80 \quad 4,61 \text{ kN} \quad (9.35)$$

$$F_{d,tuki,1} = F_d/2 = 2,305 \text{ kN}$$

$$F_{d,tuki,2} = F_{d,tuki,3} = F_{d,tuki,4} = F_{d,tuki,5} = \frac{F_d}{\frac{L_{crit}}{a} - 1} = 2,07 \text{ kN}$$



KUVA 18.1. Nurjahdustukiin kohdistuvat voimat (Heinonen 2016-06-15)

### Levyjäykisteen rasitukset

Tarkastellaan levyjäykisteen rasituksia, jotka syntyvät nurjahdustuennasta (sisäinen kuorma), rakenteiden vinoudesta johtuvasta lisävaakavoimasta (ulkoinen kuorma) sekä yläpohjan tason tuulikuormista (ulkoinen kuorma). Tässä tapauksessa yläpaarteeseen voi syntyä nurjahdusmuodot a, b, g ja h (ks. KUVA 18). Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY8: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 % + tuuli 60 %, hetkellinen aikaluokka.

Yhdelle kattotuolin päällä olevalle levyjäykisteelle tulevat kuormat:

b            40    m        rakennuksen leveys

l            72    m        rakennuksen pituus

$$\text{Lisävaakavoima } H_{dl} = \frac{b}{l} \cdot \frac{N_d}{150} \geq \frac{N_d}{250} \quad 0,80 \text{ kN (RIL 201-1-2011, kaava 6.5S)}$$

Lisävaakavoima levyjäykisteelle metrikuomana

$$0,80 \text{ kN}/10,55 \text{ m} \quad 0,08 \text{ kN}$$

Päätyseinän tuulikuorma murtorajatilassa            0,75 kN/m<sup>2</sup> (ks. luku 13)

Rakennuksen päädyn pinta-ala (aukot pois lukien)    247 m<sup>2</sup>

Levyjäykisteen pituus = 4 x yläpaarteen pituus        42,2 m

3/8 päädyn tuulikuormasta siirretään levyjäykisteelle. Tuulikuormasta huomioidaan 60 %, koska mitoitettavana kuormitusyhdistelmänä on KY8.

Tuulikuorma levyjäykisteelle metrikuormana

$$0,6 \cdot 3/8 \cdot 0,75 \text{ kN/m}^2 \cdot 247 \text{ m}^2 / 42,2 \text{ m} \qquad 0,99 \text{ kN/m}$$

Ulkoiset kuormat yhteensä

$$0,08 \text{ kN/m} + 0,99 \text{ kN/m} \qquad 1,07 \text{ kN/m}$$

Nurjahdusmuoto a:

$l$                     21,1 m                    jäykistysjärjestelmän jänneväli (= 2 x yläpaarteen pituus)

$n$                     2                    kpl

$$k_l = \min\left[1 ; \sqrt{\frac{15}{l}}\right] = 0,84 \qquad (9.38)$$

$$q_d = k_l \frac{nN}{50l} \qquad 0,59 \text{ kN/m} \qquad (9.37)$$

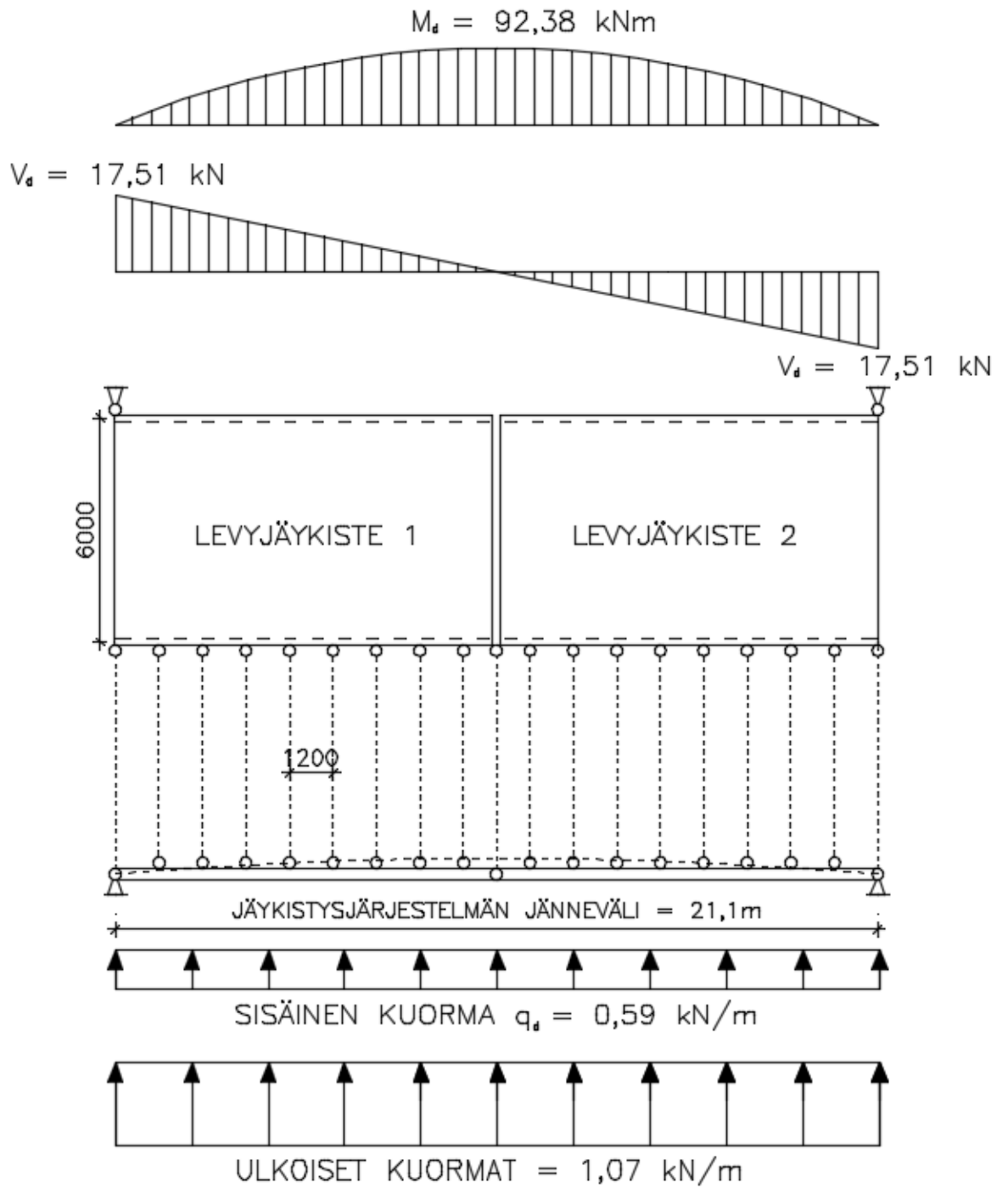
Nurjahdusmuoto b:

$l$                     10,55 m                    jäykistysjärjestelmän jänneväli (= 1 x yläpaarteen pituus)

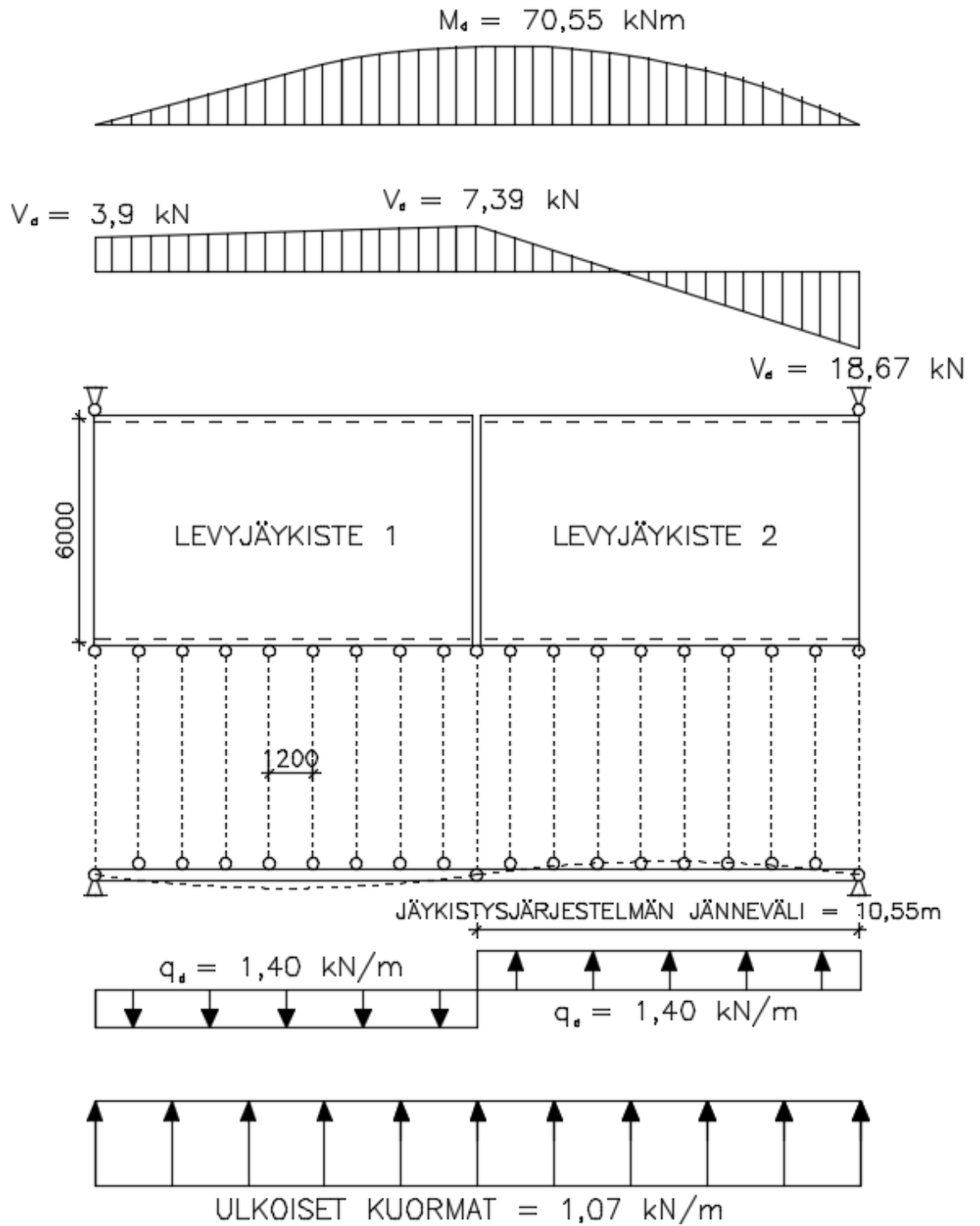
$n$                     2                    kpl

$$k_l = \min\left[1 ; \sqrt{\frac{15}{l}}\right] = 1 \qquad (9.38)$$

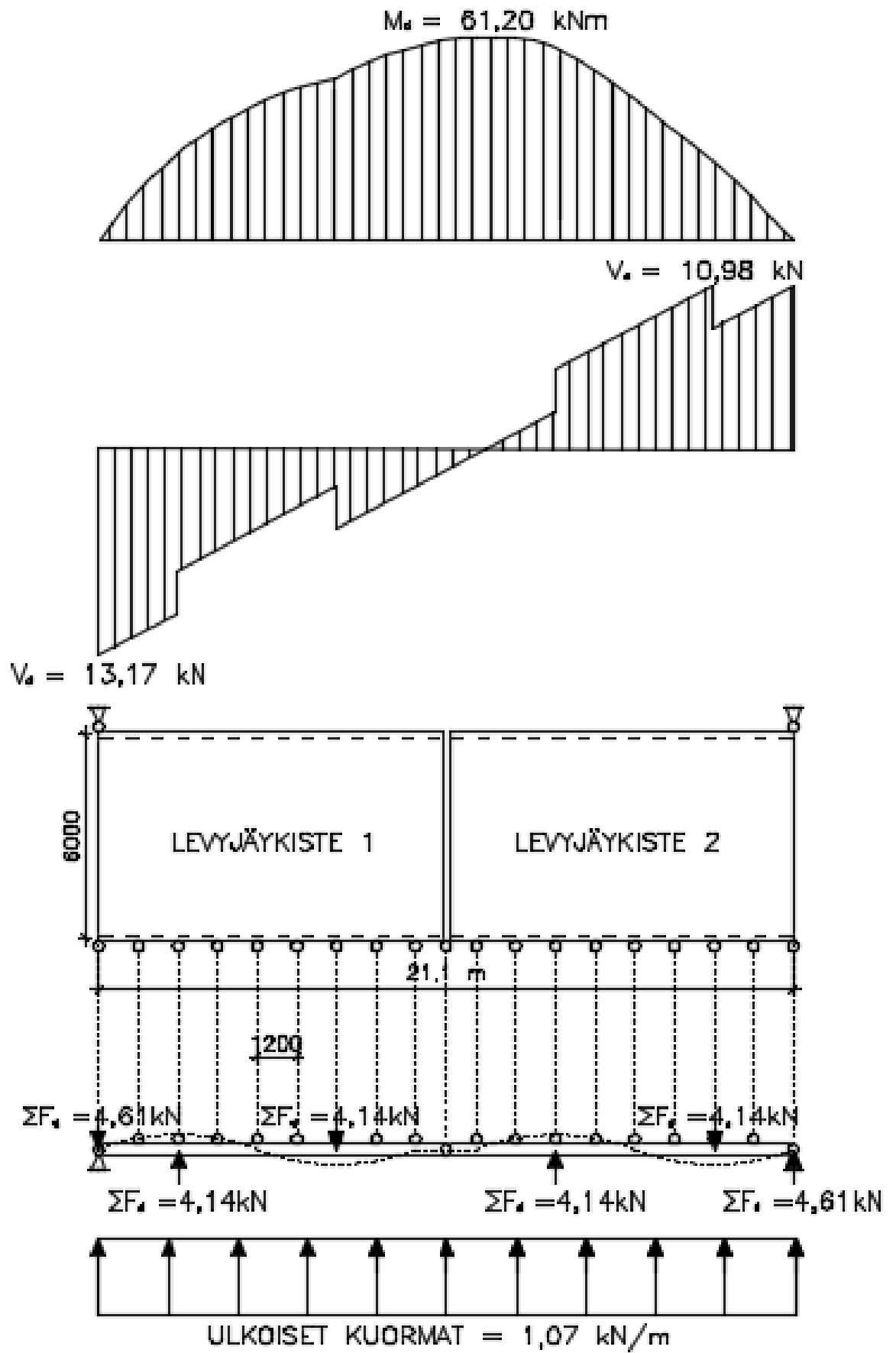
$$q_d = k_l \frac{nN}{50l} \qquad 1,40 \text{ kN/m} \qquad (9.37)$$



KUVA 19. Nurjahdusmuoto a (Heinonen 2016-06-12)



KUVAA 20. Nurjahdusmuoto b (Heinonen 2016-06-12)



KUVA 20.1. Nurjahdusmuoto g (Heinonen 2016-06-15)



**Katto-orren ja kattotuolin yläpaarteen liitoksen kestävyys (kiepahdustuenta)**

Katto-orret kiinnitetään yläpaarteeseen kulmalevyillä, joiden kiinnitykseen käytetään 4,0 x 50 ankkurinauloja.

$k_p$  -kerroin

$$k_p = \sqrt{\frac{\rho_k}{350}} \quad 1,17 \quad (8.5.4S)$$

$k_s$  -kerroin

$d$  4,0 mm ankkurinaulan paksuus  
 $t_t \geq 0,5d$  2,0 mm kulmalevyn paksuus

Kartiokantaisen profiloituneen kampa- tai kierrenaulan (ns. ankkurinaula) yhteydessä voidaan käyttää paksuman teräslevyn kaavoja myös teräslevyn paksuudella  $0,5d \leq t_t < d$ , kun kartio-osan pituus on vähintään  $d$  ja leveys kannassa vähintään  $1,3d$  ja kun kartio pureutuu tiiviisti kiinni teräslevyn reikään (RIL 205-1-2009 sivu 109).

$$k_s = 1,5k_p \quad 1,76 \text{ kN} \quad (8.5.9S)$$

Naulan leikkauskestävyys

$$R_k = 120d^{1,7} \cdot k_s \quad 2225 \text{ N} \quad (8.5.1S)$$

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_M} \quad 2,04 \text{ kN}$$

Naulojen määrä yhdessä kulmalevyn laipassa

$$n = \frac{V_d}{R_d} \approx 10 \text{ kpl}$$

10 kpl nauloja/kulmalevyn laippa

Kulmalevyn leikkausvoimakestävyys tulee tarkastaa kulmalevyjen valmistajan ohjeiden mukaan.

**Kiepahdustuen jousijäykkyys**

Siirtymäkerroin yhdelle naulalle

$$K_{ser} = \rho_{mean}^{1,5} d^{0,8} / 30 \quad 1164 \text{ N/mm}$$

$$\text{Kyseessä teräs-puu -liitos} \Rightarrow 2 \cdot K_{ser} = 2328 \text{ N/mm}$$

Siirtymäkerroin yhdelle kulmalevyliitokselle

$$K_{ser,liitos} = nK_{ser} \quad 23276 \text{ N/mm}$$



Kiepahdustuentasysteemin jäykkyys

a                    5 kpl                    liitoksien lukumäärä jäykisteristikosta keskimmaiselle kattotuolille

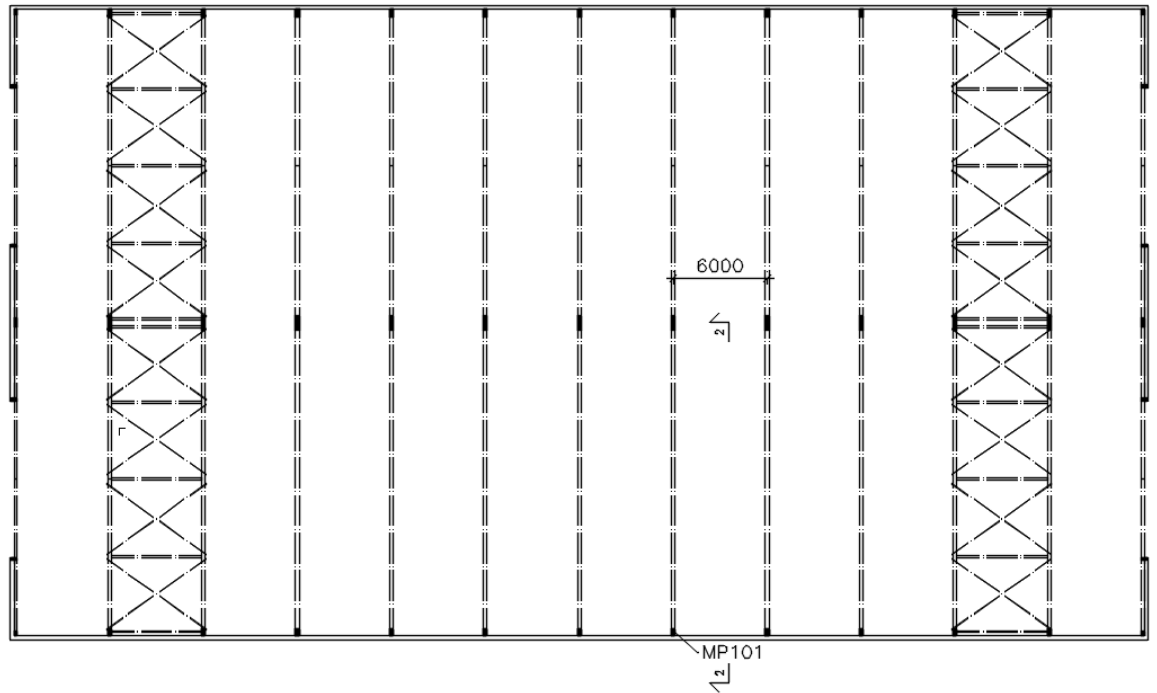
$$C_a = \frac{K_{ser\ liitos}}{a} \qquad 4655 \text{ N/mm}$$

Mitoitusehto

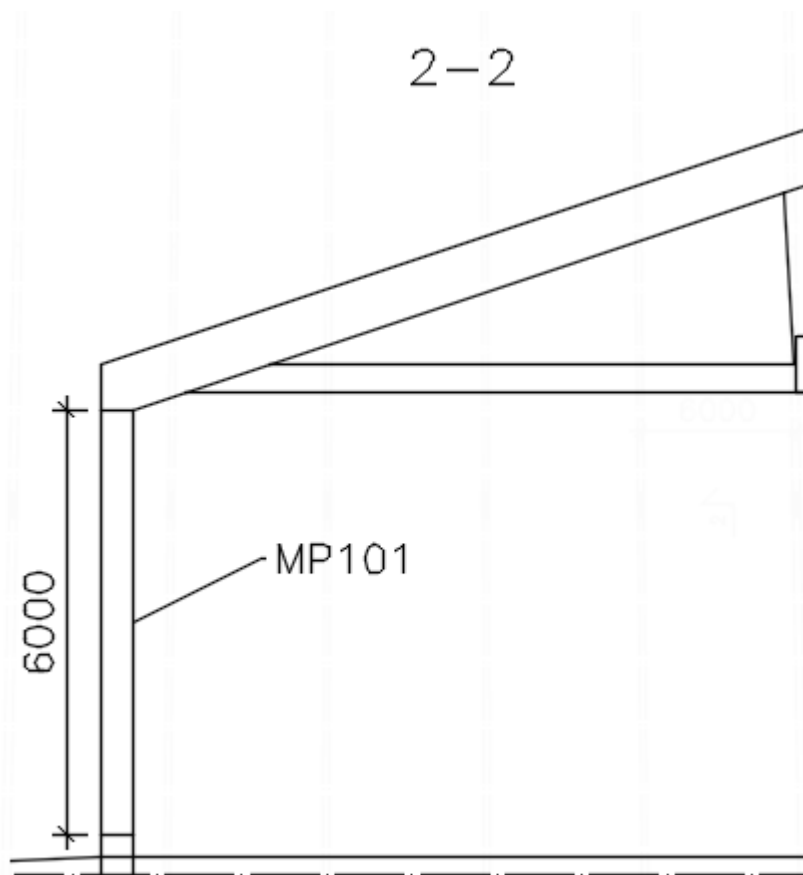
$$\frac{c_{vaad}}{C_a} \leq 1 \qquad 0,277$$

Käyttöaste                    27,7 %

## 7 ULKOSEINÄLINJAN MASTOPILARI



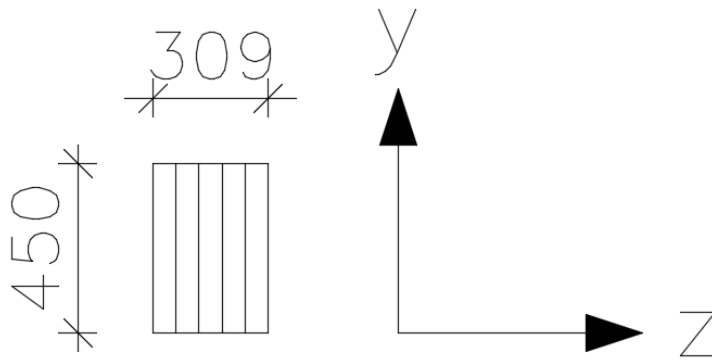
KUVA 17. Ulkoseinälinjan mastopilarin sijainti (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 21. Leikkaus 2-2 (Heinonen 2016-05-10)

Hallin pääpilarit ovat LVL-rakenteisia mastopilareita. Mastopilarit tuetaan heikomman suunnan nurjahdusta vastaan seinäorsilla. Mastopilarilla tarkoitetaan sitä, että pilari mitoitetaan alapäästään jäykäksi rakenteeksi ja näin ollen mastopilareiden varassa oleva kehärakenne ei tarvitse kehän suunnassa erillistä jäykistysrakennetta. Ulkoseinälinjan mastopilarin mitoituksessa tarkastellaan pilarin

nurjahduskestävyys (Y-suuntaan), kiepahduskestävyys ja leikkausvoimakestävyys sekä mastopilarikehän siirtymä.



KUVA 22. Ulkoseinälinjan mastopilarin poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

### Pilarin materiaali

#### Kerto-S

|                   |                         |                                       |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällä                     |
| $s$               | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | Kokovaikutuseksponentti               |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeella                    |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan                      |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällä              |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                  |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällä          |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeella         |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällä                     |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeella pintaviulun suuntaan        |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaistiheys                         |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo                    |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

### Yläpohjan kuormat

|          |                        |                              |
|----------|------------------------|------------------------------|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja                     |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma               |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma          |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma |
| $q_p(z)$ | 0,48 kN/m <sup>2</sup> | tulikuorman nopeuspaine      |

### Mitoittava kuormitusyhdistelmä

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinostunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$$G_k (\text{omapaino}) + Q_{k,1} (\text{tuuli}) + \psi_0 Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$$1,15 K_{FI} G_k (\text{omapaino}) + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} (\text{tuuli}) + 1,5 K_{FI} \psi_{0,2} Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

|                 |     |                              |
|-----------------|-----|------------------------------|
| seuraamusluokka | CC2 |                              |
| $K_{FI}$        | 1,0 |                              |
| $\psi_0$        | 0,7 | lumikuorman yhdistelykerroin |

**Mitat**

|           |                        |   |
|-----------|------------------------|---|
| k         | 6,0 m                  | mastopilarien k-jako                                    |
| B         | 40 m                   | rungon leveys   |
| D         | 72 m                   | rungon pituus   |
| H (noin)  | 10,5 m                 | rakennuksen korkeus                                     |
| L         | 6,0 m                  | pilarin pituus  |
| $C_s C_d$ | 1,0                    | rakennekerroin  |
| $C_f$     | 1,4                    | voimakerroin sivuseinää vastaan (RIL 201-1-2011 s. 137) |
| b         | 309 mm                 | pilarin leveys  |
| h         | 450 mm                 | pilarin korkeus   |
| A         | 139050 mm <sup>2</sup> | pilarin poikkileikkausala                               |

**Kuormat**

Seinän tuulikuorma käyttörajatilassa

$$q_{w,k} = C_s C_d C_f q_p(z) k \quad 4,0 \text{ kN/m}$$

Seinän tuulikuorma yläpohjan osalta käyttörajatilassa, ks. luku 5.2

$$F_{w,k} \quad 24,75 \text{ kN}$$

Yläpohja käyttörajatilassa

$$P_{k,G,y\ddot{a}pohja} = g_{k1} \cdot k \quad 1,8 \text{ kN/m}$$

Ripustuskuorma käyttörajatilassa

$$P_{k,G,ripustus} = g_{k2} \cdot k \quad 0,6 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus i)

$$P_{k,Q,lumi (i)} = \psi_0 q_{k1} \cdot k \quad 8,4 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus ii)

tasainen lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi (ii),1} = \psi_0 q_{k1} \cdot k \quad 8,4 \text{ kN/m}$$

maksimi kinostuva lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi (ii),2} = \psi_0 q_{k2} \cdot k \quad 13,65 \text{ kN/m}$$

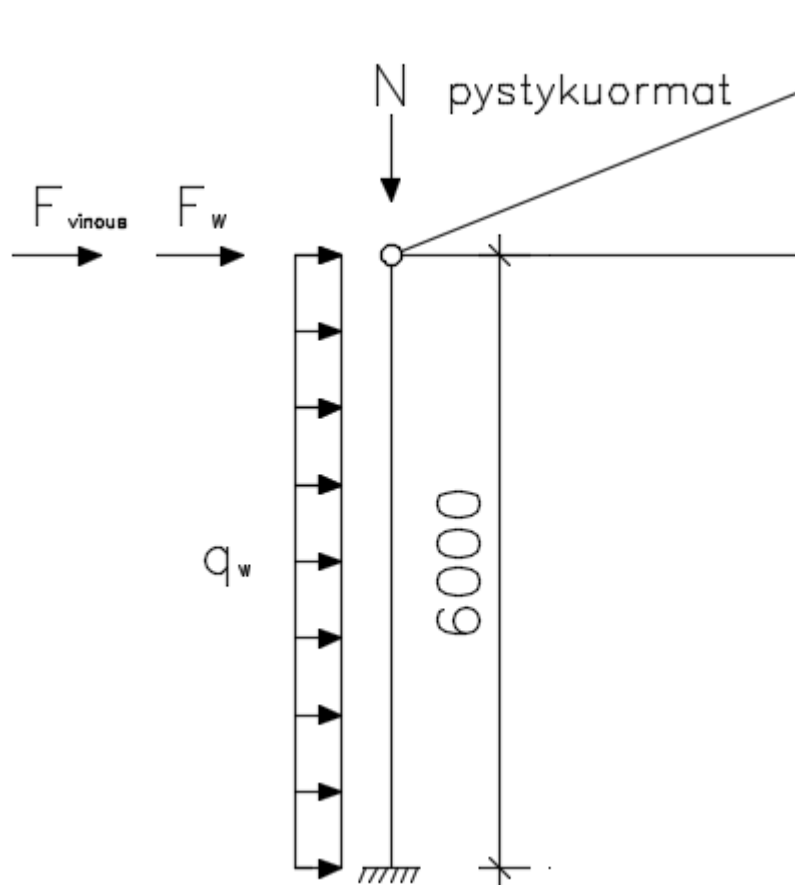
Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat, KY3, ks. luku 5.3

$$F_{v\ddot{u}nuos,1} \quad 1,31 \text{ kN}$$

$$F_{v\ddot{u}nuos,2} \quad 2,98 \text{ kN}$$

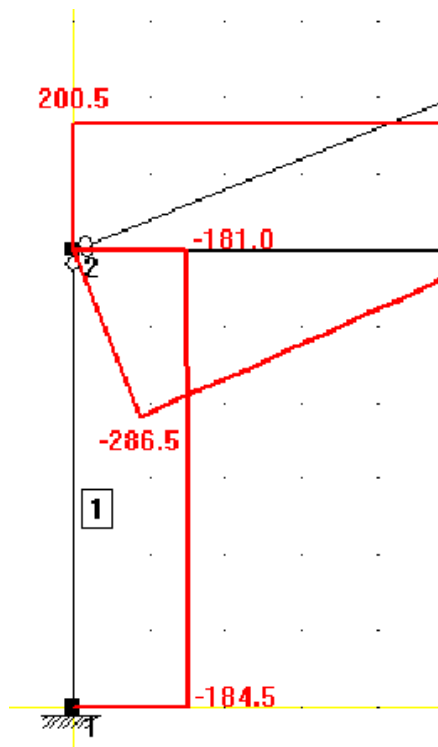
$$F_{v\ddot{u}nuos,3} \quad 1,31 \text{ kN}$$

Pilarin omat painot tulevat suoraan statiikkaohjelmasta.



KUVA 23. Ulkoseinälinjan mastopilarin kuormat, KY3 (Heinonen 2016-06-11)

### 7.1 Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta)



KUVA 24. Normaalivoimakuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$N_d$  184,5 kN

Hoikkuusluku

$L_{c,z} = 2,5L$  15000 mm (taulukko 6.1)

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \quad 2346468750 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad 129,9 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad 115,5 \quad (6.20.2S)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 2,02 \quad (6.21)$$

$k_y$  -kerroin

$\beta_c$  0,1 alkukäyrydestä riippuva kerroin, LVL (6.29)

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad 2,62 \quad (6.27)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad 0,23 \quad (6.25)$$

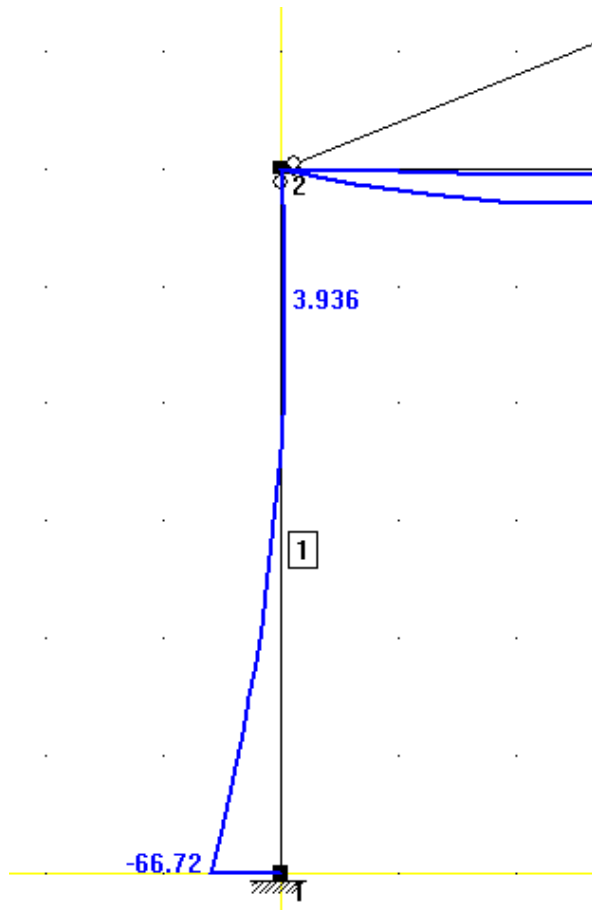
Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 1,33 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$



KUVA 25. Momenttikuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

$M_d$  66,72 kNm

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6M_d}{bh^2} \quad 6,4 \text{ N/mm}^2$$

$k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^5 \leq 1,2 \quad 0,95 \quad (3.3)$$

Taivutuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{m,y,d} = \frac{k_h f_m k_{mod}}{\gamma_M} \quad 38,4 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad 0,344 \quad (6.23)$$

Käyttöaste 34,4 %

## 7.2 Kiepahduskestävyys

Ulkoseinärakenne estää pilaria nurjahtamasta sen heikommassa suunnassa. Pilarin sisäreuna voi kuitenkin kiepahtaa, koska seinärakenne on taivutetun pilarin vedetyllä reunalla.

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

$$M_d \quad 66,72 \text{ kNm} \quad \text{ks. KUVA 25}$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6Md}{bh^2} \quad 9,3 \text{ N/mm}^2$$

$$l \quad 6000 \text{ mm} \quad \text{kiepahdustuentaväli}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,5 \Rightarrow l_{ef} = 0,5 \cdot l \quad 3000 \text{ mm (taulukko 6.3)}$$

Kuorma vaikuttaa vedetyllä reunalla, joten tehollista jänneväliä voidaan pienentää mitan  $0,5h$  verran.

$$l_{ef,1} = l_{ef} - 0,5h \quad 2775 \text{ mm}$$

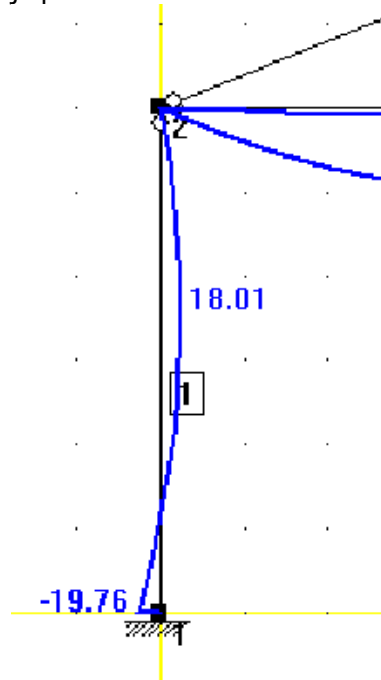
Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli pistekuormille

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,8 \Rightarrow l_{ef} = 0,8 \cdot l \quad 4800 \text{ mm (taulukko 6.3)}$$

Kuorma sijaitsee pilarin keskilinjalla, joten

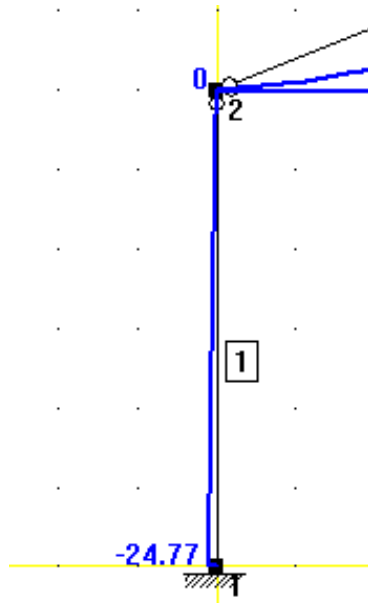
$$l_{ef,2} = l_{ef} \quad 4800 \text{ mm}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle ja pistekuormille



KUVA 26. Tasaisen kuorman aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)





KUVA 27. Pistekuormien aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

|           |           |                                      |
|-----------|-----------|--------------------------------------|
| $M_{d,1}$ | 19,76 kNm | tasaisen kuorman aiheuttama momentti |
| $M_{d,2}$ | 24,77 kNm | pistekuormien aiheuttama momentti    |

$$l_{ef} = \frac{M_{d,1}l_{ef,1} + M_{d,2}l_{ef,2}}{M_{d,1} + M_{d,2}} \quad 3901,4 \text{ mm}$$

Suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys

$$c \quad 0,58 \quad \text{Kerto-S}$$

$$\sigma_{m, \text{crit}} = \frac{cb^2}{hl_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad 365,9 \text{ N/mm}^2 \quad (6.31.1S)$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m, \text{crit}}}} \quad 0,35 \quad (6.30)$$

$$k_{\text{crit}} = 1 \quad (6.34)$$

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$$N_d \quad 184,5 \text{ kN} \quad \text{ks. KUVA 24}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 2,5L \quad 15000 \text{ mm} \quad (\text{taulukko 6.1})$$

$$I_z = \frac{hb^3}{12} \quad 1106386088 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad 89,2 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \quad 168,2 \quad (6.20.2s)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 2,94 \quad (6.22)$$

$k_z$  -kerroin

$$\beta_c \quad 0,1 \quad \text{alkukäyrydestä riippuva kerroin LVL:lle} \quad (6.29)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad 4,95 \quad (6.28)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad 0,11 \quad (6.26)$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 1,33 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$$k_{mod} \quad 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

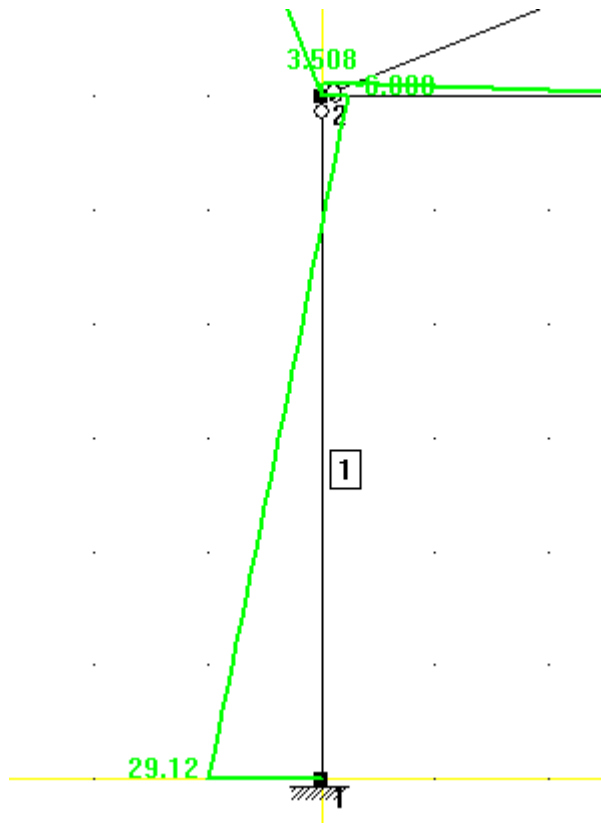
$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\left(\frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{crit} f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,429 \quad (6.33)$$

Käyttöaste  $42,9 \%$

## 7.3 Leikkausvoimakestävyys



KUVA 28. Leikkausvoimakuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi leikkausvoima (statiikkaohjelmasta)

$$V_d \quad 29,12 \text{ kN}$$

 $k_{cr}$  -kerroin

$$k_{cr} \quad 1,0$$

$$b_{ef} = k_{cr} b$$

$$309 \text{ mm} \quad (6.13a)$$

Leikkausjännitys tuella

$$\tau_{d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} h}$$

$$0,31 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuus

$$k_{mod} \quad 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$3,76 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

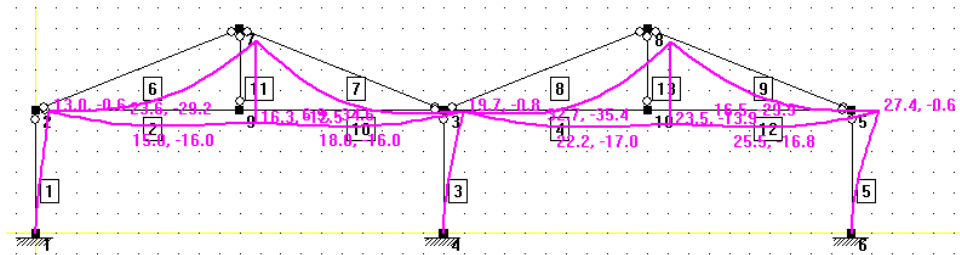
$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

$$0,084 \quad (6.13)$$

$$\text{Käyttöaste} \quad 8,4 \%$$

## 7.4 Mastopilarikehän siirtymä

Mastopilarikehän siirtymä määritetään statiikkaohjelman avulla.



KUVA 29. Siirtymäkuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

$W_{fin}$  27,4 mm siirtymä statiikkaohjelmasta

Rakennuksen vaakasiirtymän enimmäisarvo  
H/300

35 mm (taulukko 7.2)

Mitoitusehto

$$\frac{W_{fin}}{H/300} \leq 1$$

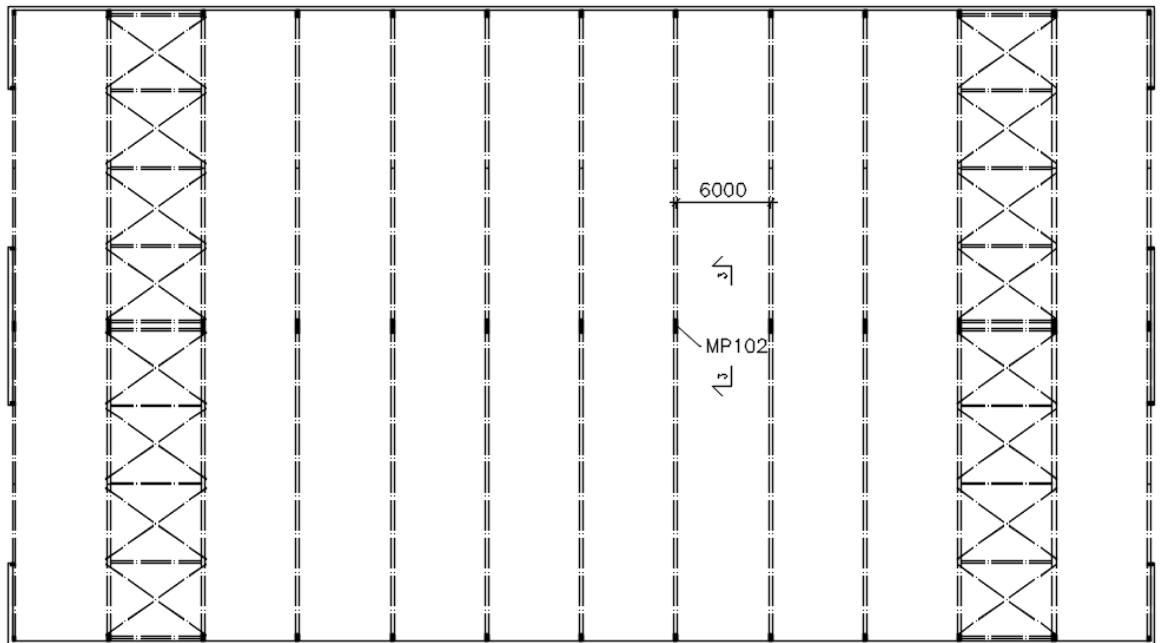
0,783

Käyttöaste 78,3 %

Ulkoseinälinjan pilarin koko 309 x 450. Ulkoseinä rakenne ja sen kiinnitykset mitoitettava kestämään nurjahduksesta aiheutuvat voimat.

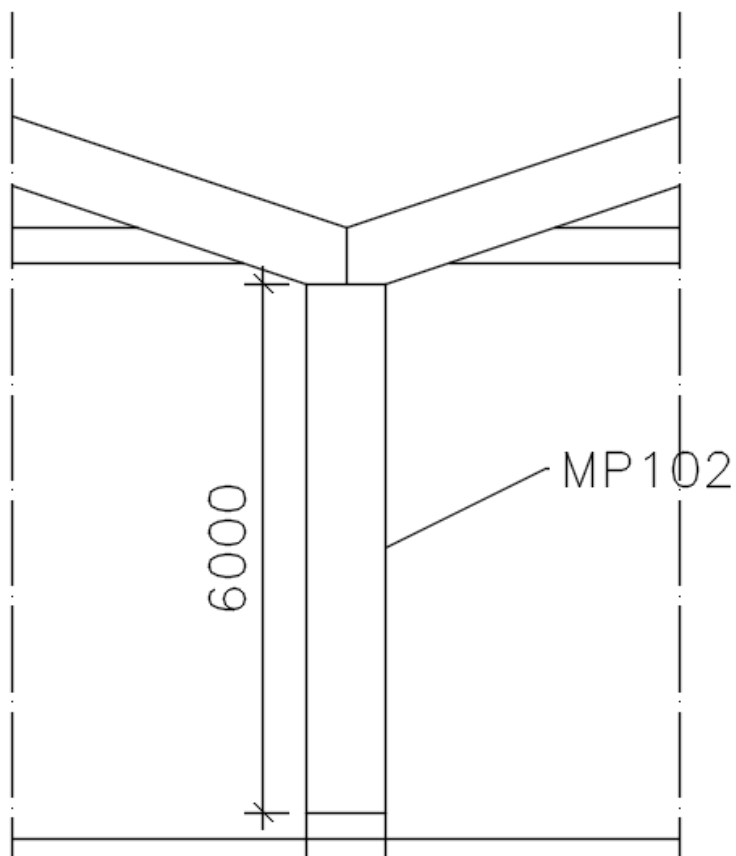
## 8 KESKILINJAN MASTOPILARI

Keskilinjän mastopilaria ei tueta nurjahdusta vastaan kumpaankaan suuntaan, joten sen nurjahduskestävyys tarkastellaan sekä Y- että Z-suuntaan. Lisäksi tarkastellaan pilarin kiepahduskestävyys sekä leikkausvoimakkestävyys.

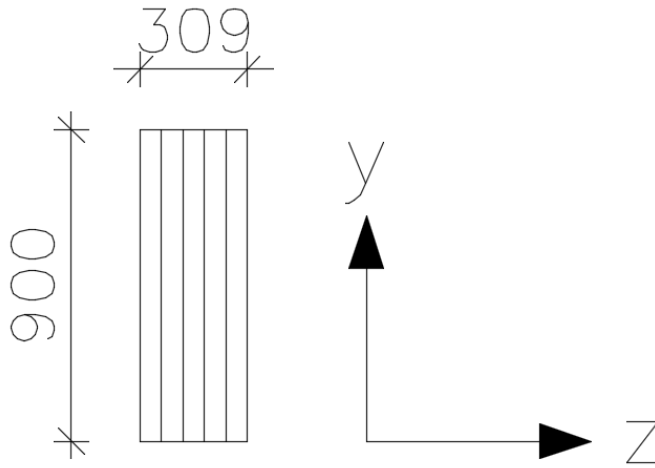


KUVA 30. Keskilinjän mastopilarin sijainti (Heinonen 2016-05-10)

3-3



KUVA 31. Leikkaus 3-3 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 32. Keskilinjan mastopilarin poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

### Pilarin materiaali

#### Kerto-S

|                   |                         |                                       |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällään                   |
| $s$               | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | KokovaikutusekspONENTTI               |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeellaan                  |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan                      |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällään            |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                  |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällään        |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeellaan       |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällään                   |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeellaan pintaviilun suuntaan      |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaisuus                            |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo                    |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

### Yläpohjan kuormat

|          |                        |                              |
|----------|------------------------|------------------------------|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja                     |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma               |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma          |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma |
| $q_p(z)$ | 0,48 kN/m <sup>2</sup> | tuulikuorman nopeuspaine     |

### Mitoittavat kuormitusyhdistelmät

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on pääosin kuormitusyhdistelmä 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinostunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

Nurjahduskestävyys Y-suuntaan tarkastellaan kuitenkin kuormitusyhdistelmällä 7: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 %, keskipitkä aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä 3 käyttörajatilassa

$G_k$  (omapaino) +  $Q_{k,1}$  (tuuli) +  $\psi_{0,2}Q_{k,2}$  (lumi, tapaus ii)

Kuormitusyhdistelmä 3 murtorajatilassa

$1,15K_{FI}G_k$  (omapaino) +  $1,5K_{FI}Q_{k,1}$  (tuuli) +  $1,5K_{FI}\psi_{0,2}Q_{k,2}$  (lumi, tapaus ii)

Kuormitusyhdistelmä 7 käyttörajatilassa

$G_k$  (omapaino) +  $Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

Kuormitusyhdistelmä 7 murtorajatilassa

$1,15K_{FI}G_k$  (omapaino) +  $1,5K_{FI}Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

seuraamusluokka CC2

$K_{FI}$  1,0

$\psi_0$  0,7 lumikuorman yhdistelykerroin

### Mitat

|           |                        |  |
|-----------|------------------------|--|
| k         | 6,0 m                  | mastopilarien k-jako                                       |
| B         | 40 m                   | rungon leveys  |
| D         | 72 m                   | rungon pituus  |
| H         | 10,5 m                 | rakennuksen korkeus  |
| L         | 6,0 m                  | pilarin pituus   |
| $C_s C_d$ | 1,0                    | rakennekerroin   |
| $C_f$     | 1,4                    | voimakerroin sivuseinää vastaan<br>(RIL 201-1-2011 s. 137) |
| b         | 309 mm                 | pilarin leveys   |
| h         | 900 mm                 | pilarin korkeus  |
| A         | 278100 mm <sup>2</sup> | pilarin poikkileikkausala                                  |

### Kuormat

Seinän tuulikuorma käyttörajatilassa

$$q_{w,k} = C_s C_d C_{fp}(z)k \quad 4,0 \text{ kN/m}$$

Seinän tuulikuorma yläpohjan osalta käyttörajatilassa, ks. luku 5.2

$$F_{w,k} \quad 24,75 \text{ kN}$$

Yläpohja käyttörajatilassa

$$P_{k,G,y\ddot{a}pohja} = g_{k1} \cdot k \quad 1,8 \text{ kN/m}$$

Ripustuskuorma käyttörajatilassa

$$P_{k,G,ripustus} = g_{k2} \cdot k \quad 0,6 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus i)

$$P_{k,Q,lumi(i)} = \psi_0 q_{k1} \cdot k \quad 8,4 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus ii)

tasainen lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi(ii),1} = \psi_0 q_{k1} \cdot k \quad 8,4 \text{ kN/m}$$

maksimi kinostuva lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi(ii),2} = \psi_0 q_{k2} \cdot k \quad 13,65 \text{ kN/m}$$

Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat, KY3, ks. luku 5.3

$$F_{vinuos,1} = F_{vinuos,3} \quad 1,31 \text{ kN}$$

$$F_{vinuos,2} \quad 2,98 \text{ kN}$$

Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat, KY7, ks. luku 5.3

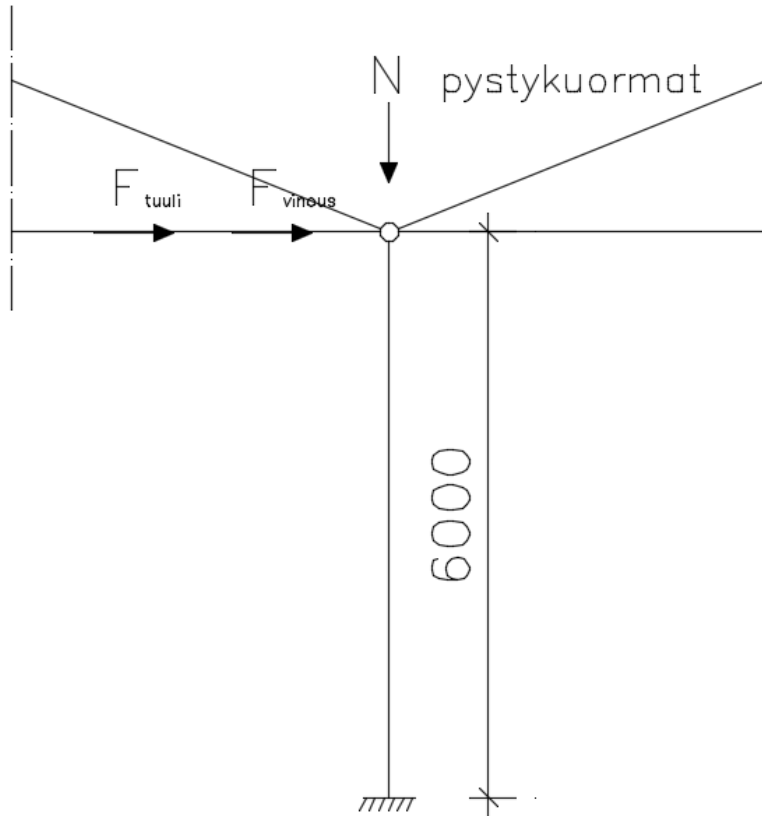
$$F_{\text{vinous},1} = F_{\text{vinous},3}$$

1,72 kN

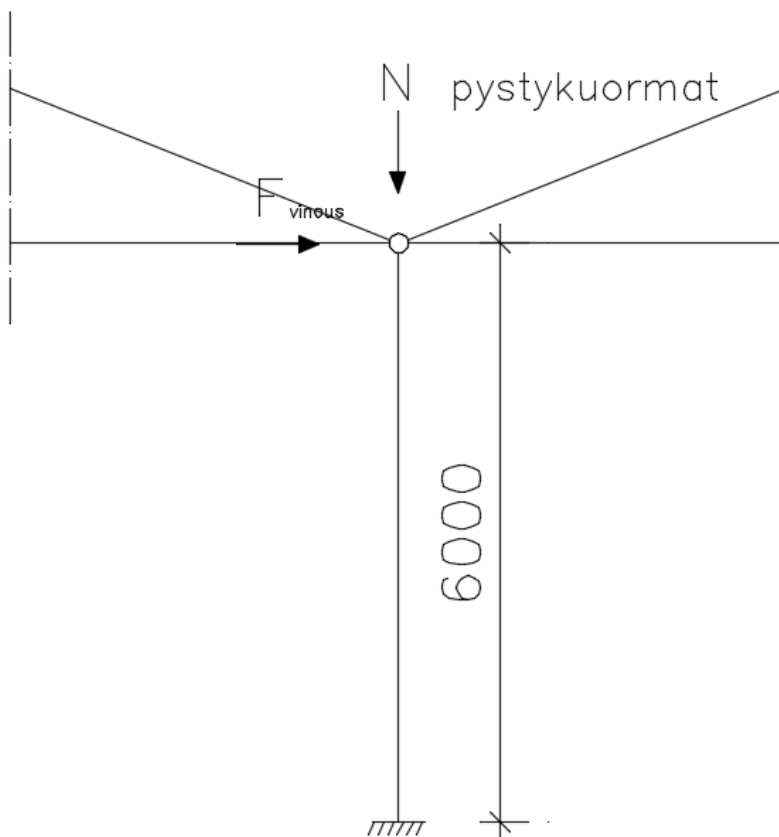
$$F_{\text{vinous},2}$$

3,96 kN

Omat painot tulevat suoraan statiikkaohjelmasta.



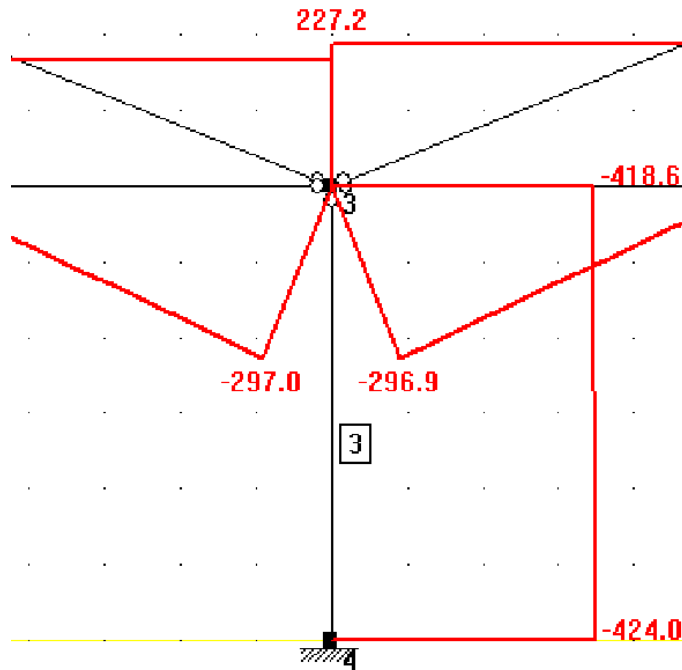
KUVA 33. Keskilinjan mastopilarin kuormat, KY3 (Heinonen 2016-06-11)



KUVA x. Keskilinjan mastopilarin kuormat, KY7 (Heinonen 2016-06-11)



## 8.1 Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta)



KUVA 34. Normaali voimakuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$$N_d = 424,0 \text{ kN}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,z} = 2,5L = 15000 \text{ mm (taulukko 6.1)}$$

$$I_y = \frac{bh^3}{12} = 18771750000 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 259,8 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} = 57,7 \quad (6.20.2S)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = 1,01 \quad (6.21)$$

 $k_y$  -kerroin

$$\beta_c = 0,1 \quad \text{alkukäyrästä riippuva kerroin LVL:lle} \quad (6.29)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 1,04 \quad (6.27)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$ 

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0,76 \quad (6.25)$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} = 1,52 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

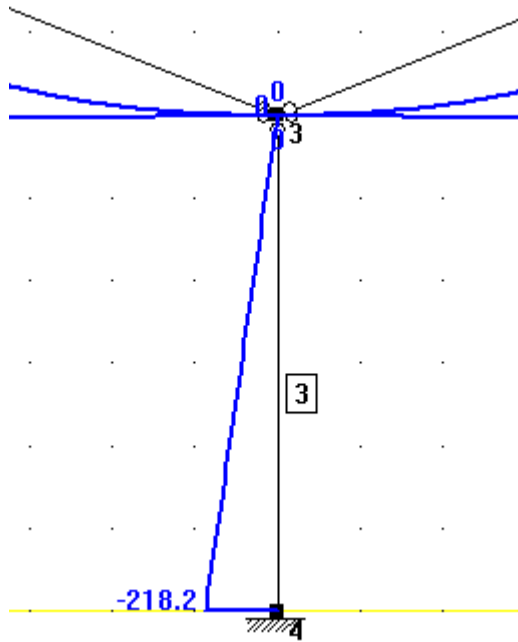
 $k_{mod}$ 

1,1

hetkellinen aikaluokka, KL2

(taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M}$$

32,1 N/mm<sup>2</sup>

KUVA 35. Momenttikuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

 $M_d$ 

218,2 kNm

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6M_d}{bh^2}$$

5,2 N/mm<sup>2</sup> $k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^s \leq 1,2$$

0,88 (3.3)

Taivutuslujuus

 $k_{mod}$ 

1,1

hetkellinen aikaluokka, KL2

(taulukko 3.1)

$$f_{m,y,d} = \frac{k_h f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_M}$$

35,4 N/mm<sup>2</sup>

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

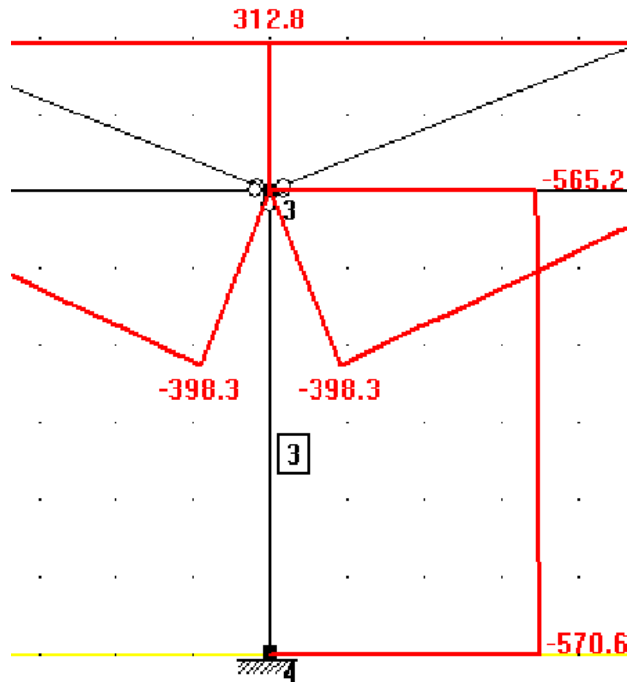
0,210

(6.23)

Käyttöaste

21,0 %

## 8.2 Nurjahduskestävyys Z-suuntaan (heikompi suunta)



KUVA 36. Normaaliavoimakuvio, KY7 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$$N_d = 570,6 \text{ kN}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 2,5L$$

15000 mm (taulukko 6.1)

$$I_z = \frac{hb^3}{12}$$

2212772175 mm<sup>4</sup>

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$$

89,2 mm

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z}$$

168,2 (6.20.2S)

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

2,94 (6.21)

 $k_z$ -kerroin

$$\beta_c = 0,1 \quad \text{alkukäyrydestä riippuva kerroin LVL:lle} \quad (6.29)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 4,95 \quad (6.27)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$ 

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

0,11 (6.25)

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh}$$

2,05 N/mm<sup>2</sup>

Puristuslujuus

|           |     |                            |                |
|-----------|-----|----------------------------|----------------|
| $k_{mod}$ | 0,8 | keskipitkä aikaluokka, KL2 | (taulukko 3.1) |
|-----------|-----|----------------------------|----------------|

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 23,3 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,786$$

Käyttöaste 78,6 %

### 8.3 Kiepahduskestävyys

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta) ks. KUVA 35

|       |           |
|-------|-----------|
| $M_d$ | 218,2 kNm |
|-------|-----------|

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6M_d}{bh^2} \quad 15,2 \text{ N/mm}^2$$

|     |         |  |
|-----|---------|--|
| $l$ | 6000 mm | kiepahdustuentaväli (= pilarin pituus) |
|-----|---------|--|

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,5 \Rightarrow l_{ef} = 0,5 \cdot l \quad 3000 \text{ mm (taulukko 6.3)}$$

Kuorma vaikuttaa vedetyllä reunalla, joten tehollista jänneväliä voidaan pienentää mitan 0,5h verran.

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| $l_{ef,1} = l_{ef} - 0,5h$ | 2550 mm |
|----------------------------|---------|

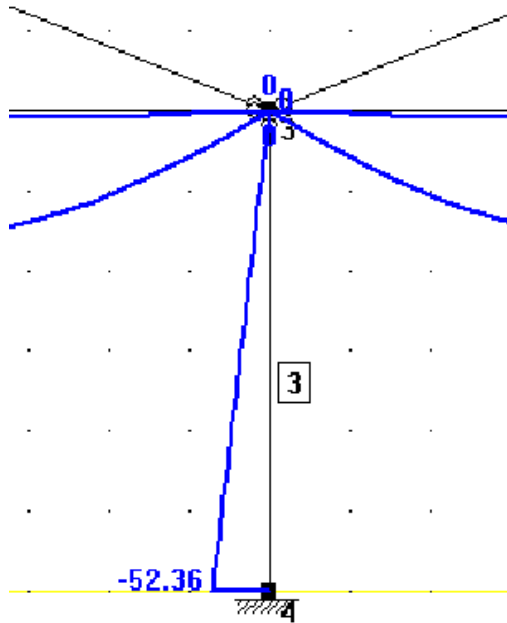
Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli pistekuormille

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,8 \Rightarrow l_{ef} = 0,8 \cdot l \quad 4800 \text{ mm (taulukko 6.3)}$$

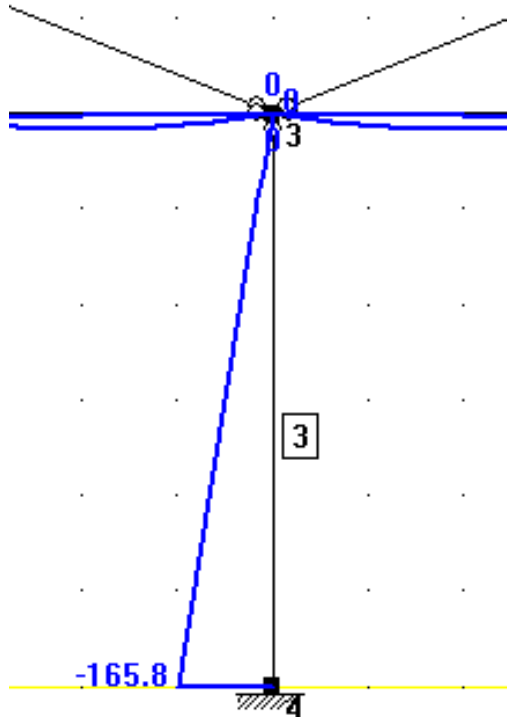
Kuorma sijaitsee pilarin keskilinjalla

|                     |         |
|---------------------|---------|
| $l_{ef,2} = l_{ef}$ | 4800 mm |
|---------------------|---------|

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle ja pistekuormille



KUVA 37. Tasaisen kuorman aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 38. Pistekuorman aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

|           |           |  |
|-----------|-----------|--|
| $M_{d,1}$ | 52,36 kNm | tasaisen kuorman aiheuttama momentti (statiikkaohjelmasta) |
| $M_{d,2}$ | 165,8 kNm | pistekuormien aiheuttama momentti (statiikkaohjelmasta)    |

$$l_{ef} = \frac{M_{d,1} l_{ef,1} + M_{d,2} l_{ef,2}}{M_{d,1} + M_{d,2}} \quad 4260 \text{ mm}$$

Suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys

$$c \quad 0,58 \quad \text{Kerto-S}$$

$$\sigma_{m, \text{crit}} = \frac{cb^2}{hl_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad 167,6 \text{ N/mm}^2 \quad (6.31.1S)$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,\text{crit}}}} \quad 0,51 \quad (6.30)$$

$$k_{\text{crit}} = 1 \quad (6.34)$$

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$$N_d = 424,0 \text{ kN} \quad \text{ks. KUVA 34}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 2,5L \quad 15000 \text{ mm} \quad (\text{taulukko 6.1})$$

$$I_z = \frac{hb^3}{12} \quad 2212772175 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad 89,2 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \quad 168,2 \quad (6.20.2s)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{\text{rel},z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 2,94 \quad (6.22)$$

 $k_z$ -kerroin

$$\beta_c = 0,1 \quad \text{alkukäyryydestä riippuva kerroin LVL:lle} \quad (6.29)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{\text{rel},z} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},z}^2) \quad 4,95 \quad (6.28)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$ 

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{\text{rel},z}^2}} \quad 0,11 \quad (6.26)$$

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 1,52 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$$k_{\text{mod}} = 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

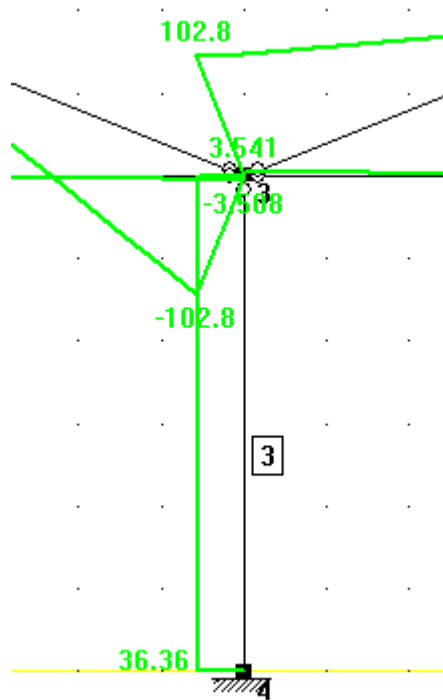
$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{\text{crit}} f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,611 \quad (6.33)$$

$$\text{Käyttöaste} \quad 61,1 \%$$

## 8.4 Leikkausvoimakestävyys



KUVA 39. Leikkausvoimakuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi leikkausvoima (statiikkaohjelmasta)

$$V_d = 36,36 \text{ kN}$$

 $k_{cr}$  -kerroin

$$k_{cr} = 1,0$$

$$b_{ef} = k_{cr}b$$

$$309 \text{ mm} \quad (6.13a)$$

Leikkausjännitys tuella

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef}h}$$

$$0,20 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuus

$$k_{mod} = 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$3,76 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

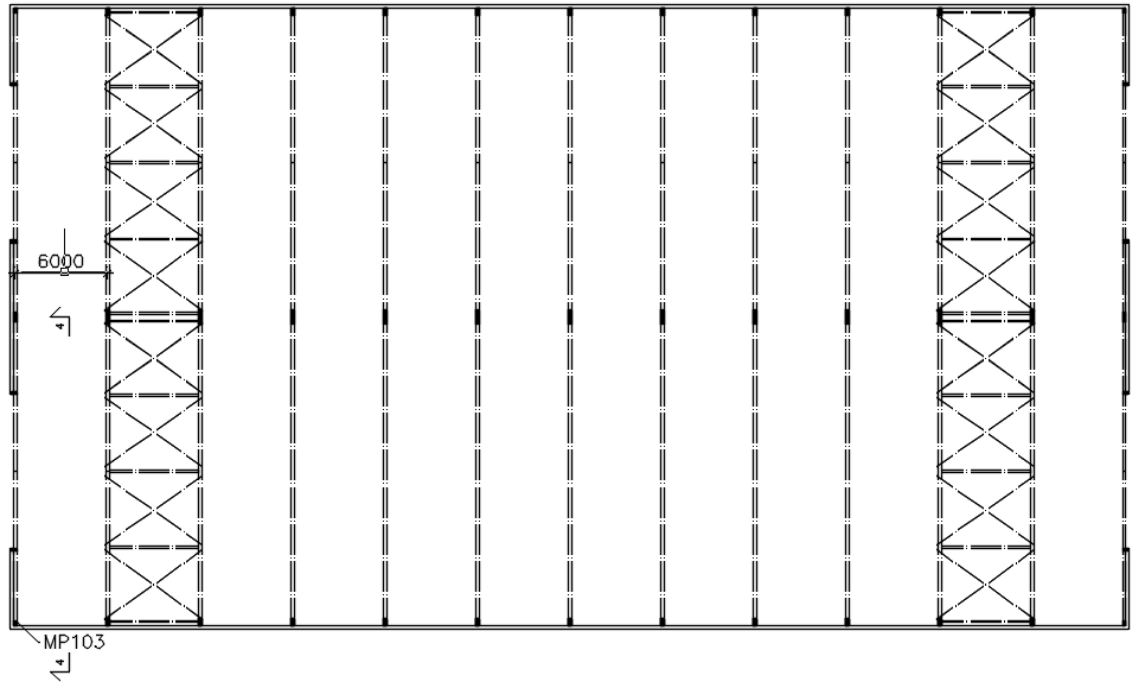
$$0,052 \quad (6.13)$$

$$\text{Käyttöaste} = 5,2 \%$$

Keskilinjän mastopilarin koko 309 x 900.

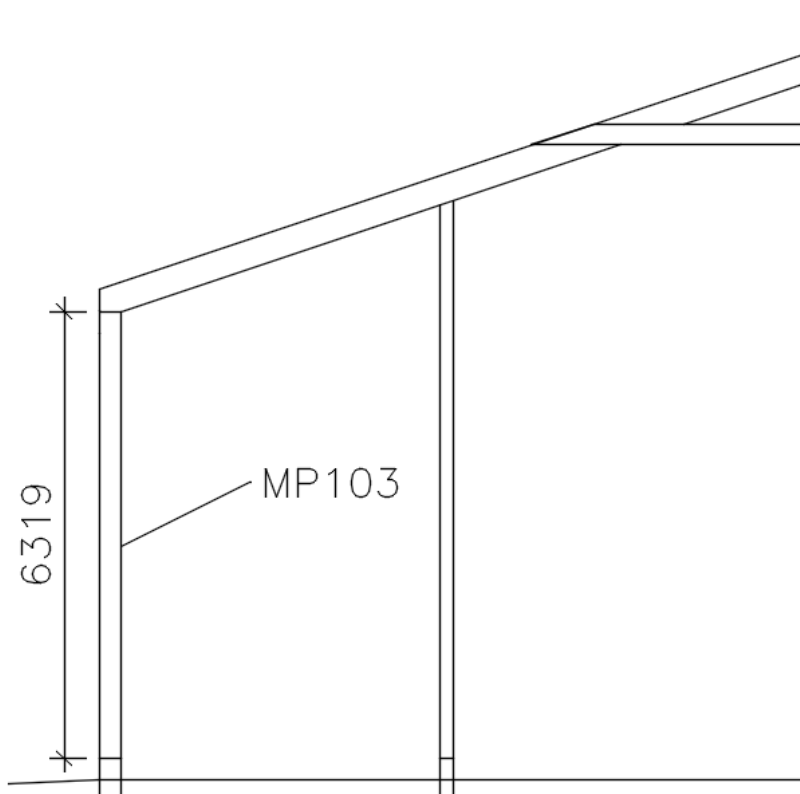
## 9 NURKKAPILARI

Nurkkapilari mitoitetaan samalla periaatteella, kuin ulkoseinälinjan mastopilarikin. Nurkkapilarit ovat tuettu heikomman suunnan nurjahdusta vastaan seinäorsilla. Nurkkapilarin kuormitusala on puolet ulkoseinälinjan mastopilarin kuormitusalasta ja näin ollen pilarin dimensiotkin ovat pienemmät. Nurkkapilarin mitoituksessa tarkastellaan pilarin nurjahduskestävyys Y-suuntaan, kiepahduskestävyys ja leikkausvoimakestävyys sekä päätykehän siirtymä.



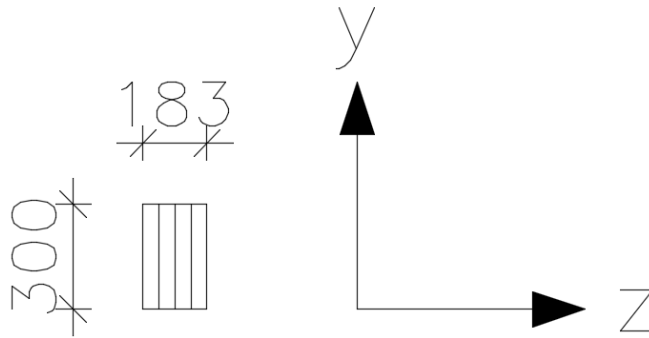
KUVA 40. Nurkkapilarin sijainti (Heinonen 2016-05-10)

4 – 4



KUVA 41. Leikkaus 4-4 (Heinonen 2016-05-10)





KUVA 42. Nurkkapilarin poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

### Pilarin materiaali

#### Kerto-S

|                   |                         |                                       |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällään                   |
| $s$               | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | Kokovaikutuseksponentti               |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeellaan                  |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan                      |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällään            |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                  |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällään        |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeellaan       |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällään                   |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeellaan pintaviilun suuntaan      |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaistiheys                         |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo                    |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

### Yläpohjan kuormat

|          |                        |                              |
|----------|------------------------|------------------------------|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja                     |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma               |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma          |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma |
| $q_p(z)$ | 0,48 kN/m <sup>2</sup> | tuulikuorman nopeuspaine     |

### Mitoittava kuormitusyhdistelmä

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinos-  
tunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$$G_k (\text{omapaino}) + Q_{k,1} (\text{tuuli}) + \psi_0 Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$$1,15K_{FI}G_k (\text{omapaino}) + 1,5K_{FI}Q_{k,1} (\text{tuuli}) + 1,5K_{FI}\psi_{0,2}Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

seuraamusluokka CC2

$K_{FI}$  1,0

$\psi_0$  0,7 lumikuorman yhdistelykerroin

### Mitat

|           |                       |  |
|-----------|-----------------------|--|
| k         | 3,0 m                 | pilarin kuormitusleveys                                    |
| B         | 40 m                  | rungon leveys  |
| D         | 72 m                  | rungon pituus  |
| H         | 10,5 m                | rakennuksen korkeus  |
| L         | 6,3 m                 | pilarin pituus   |
| $C_s C_d$ | 1,0                   | rakennekerroin   |
| $C_f$     | 1,4                   | voimakerroin sivuseinää vastaan<br>(RIL 201-1-2011 s. 137) |
| b         | 183 mm                | pilarin leveys   |
| h         | 300 mm                | pilarin korkeus  |
| A         | 54900 mm <sup>2</sup> | pilarin poikkileikkausala                                  |

### Kuormat

Seinän tuulikuorma käyttörajatilassa

$$q_{w,k} = C_s C_d C_f q_p(z) k \quad 2,0 \text{ kN/m}$$

Seinän tuulikuorma yläpohjan osalta käyttörajatilassa, ks. luku 5.2

$$F_{w,k} \quad 11,13 \text{ kN}$$

Yläpohja käyttörajatilassa

$$P_{k,G,y\ddot{a}pohja} = g_{k1} \cdot k \quad 0,9 \text{ kN/m}$$

Ripustuskuorma käyttörajatilassa

$$P_{k,G,ripustus} = g_{k2} \cdot k \quad 0,3 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus i)

$$P_{k,Q,lumi (i)} = \psi_0 q_{k1} \cdot k \quad 4,2 \text{ kN/m}$$

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus ii)

tasainen lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi (ii),1} = \psi_0 q_{k1} \cdot k \quad 4,2 \text{ kN/m}$$

maksimi kinostuva lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi (ii),2} = \psi_0 q_{k2} \cdot k \quad 6,825 \text{ kN/m}$$

Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat, KY3, ks. luku 5.3

$$F_{vinous,1} \quad 0,18 \text{ kN}$$

$$F_{vinous,2} \quad 0,50 \text{ kN}$$

$$F_{vinous,3} \quad 0,59 \text{ kN}$$

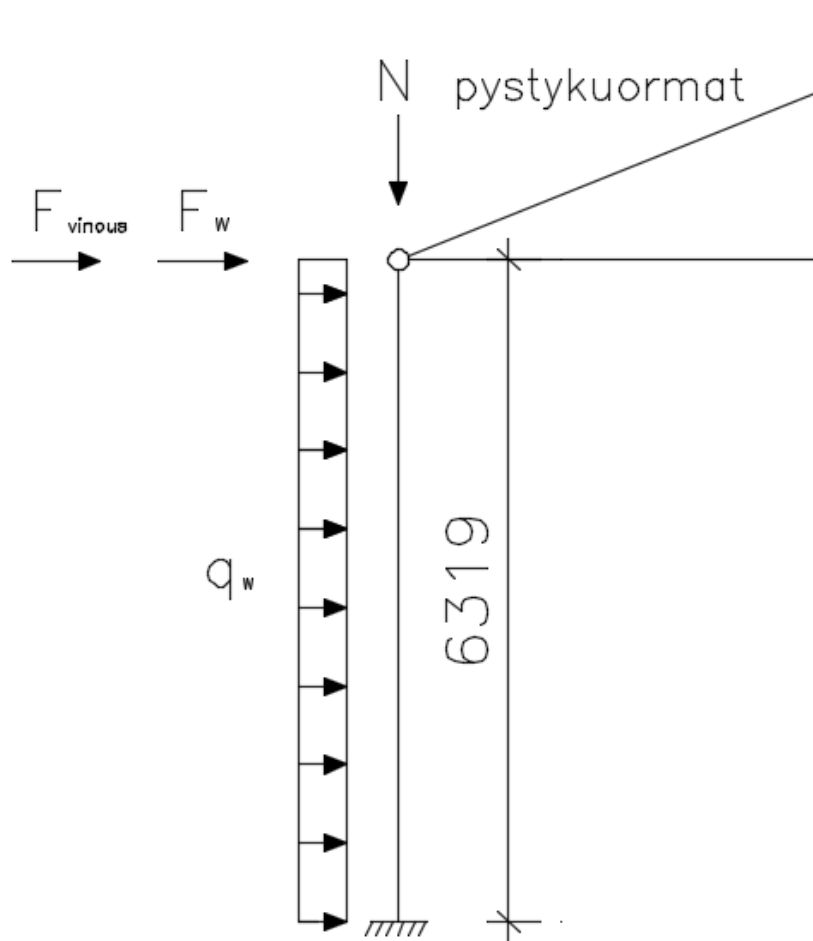
$$F_{vinous,4} \quad 0,41 \text{ kN}$$

$$F_{vinous,5} \quad 0,63 \text{ kN}$$

$$F_{vinous,6} \quad 0,54 \text{ kN}$$

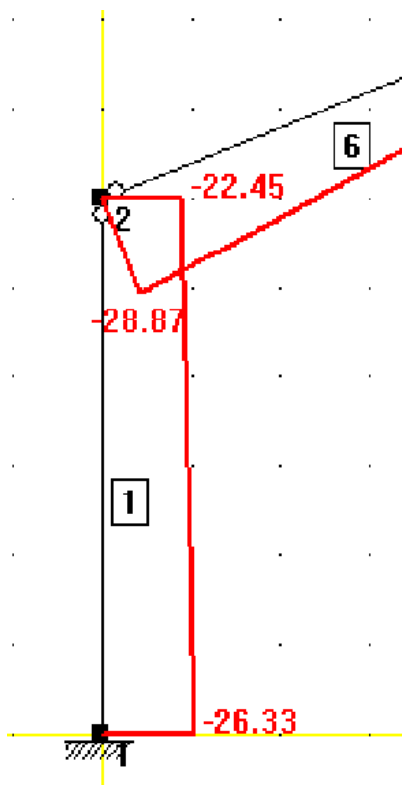
$$F_{vinous,7} \quad 0,14 \text{ kN}$$

Omat painot tulevat suoraan statiikkaohjelmasta.



KUVA 43. Nurkkapilarin kuormat, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

### 9.1 Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta)



KUVA 44. Normaalivoimakuvio, KY 3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$N_d$  26,33 kN

Hoikkuusluku

$L_{c,z} = 2,5L$  15797,5 mm (taulukko 6.1)

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \quad 411750000 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad 86,6 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad 182,4 \quad (6.20.2S)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 3,19 \quad (6.21)$$

$k_y$  -kerroin

$\beta_c$  0,1 alkukäyrydestä riippuva kerroin, LVL (6.29)

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad 5,73 \quad (6.27)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad 0,10 \quad (6.25)$$

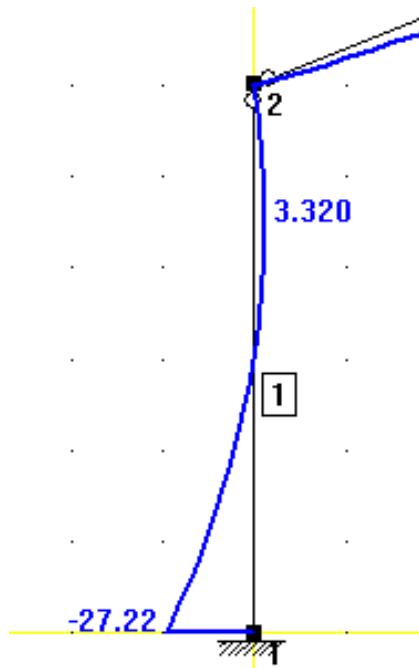
Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 0,48 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$



KUVA 45. Momenttikuvio, KY 3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

$$M_d = 27,22 \text{ kNm}$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6Md}{bh^2} = 9,9 \text{ N/mm}^2$$

$k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^5 \leq 1,2 = 1,00 \quad (3.3)$$

Taivutuslujuus

$$k_{mod} = 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

$$f_{m,y,d} = \frac{k_h f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_M} = 40,3 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 = 0,403 \quad (6.23)$$

$$\text{Käyttöaste} = 40,3 \%$$

## 9.2 Kiepahdukkestävyys

Ulkoseinä rakenne estää pilaria nurjahtamasta sen heikommassa suunnassa. Pilarin sisäreuna voi kuitenkin kiepahtaa, koska seinärakenne on taivutetun pilarin vedetyllä reunalla.

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

$$M_d = 27,22 \text{ kNm} \quad \text{ks. KUVA 45}$$

## Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6Md}{bh^2}$$

16,3 N/mm<sup>2</sup>

l 6319 mm kiepahdustuentaväli

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,5 \Rightarrow l_{ef} = 0,5 \cdot l$$

3159,5 mm (taulukko 6.3)

Kuorma vaikuttaa vedetyllä reunalla, joten tehollista jänneväliä voidaan pienentää mitan 0,5h verran.

$$l_{ef,1} = l_{ef} - 0,5h$$

3009,5 mm

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli pistekuormille

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,8 \Rightarrow l_{ef} = 0,8 \cdot l$$

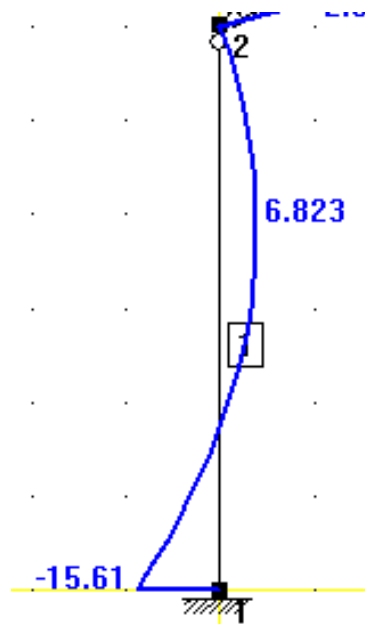
5055,2 mm (taulukko 6.3)

Kuorma sijaitsee pilarin keskilinjalla

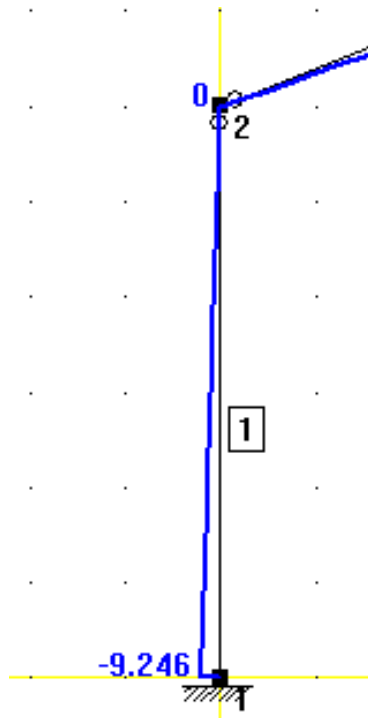
$$l_{ef,2} = l_{ef}$$

5055,2 mm

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle ja pistekuormille



KUVA 46. Tasaisen kuorman aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 47. Pistekuormien aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

|           |           |   |
|-----------|-----------|---|
| $M_{d,1}$ | 15,61 kNm | tasaisen kuorman momentti (statiikkaohjelmasta) |
| $M_{d,2}$ | 9,25 kNm  | pistekuormien momentti (statiikkaohjelmasta)    |

$$l_{ef} = \frac{M_{d,1}l_{ef,1} + M_{d,2}l_{ef,2}}{M_{d,1} + M_{d,2}} \quad 3770 \text{ mm}$$

Suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys

|     |      |         |
|-----|------|---------|
| $c$ | 0,58 | Kerto-S |
|-----|------|---------|

$$\sigma_{m, \text{crit}} = \frac{cb^2}{hl_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad 199,2 \text{ N/mm}^2 \quad (6.31.1S)$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m, \text{crit}}}} \quad 0,47 \quad (6.30)$$

$$k_{\text{crit}} = 1 \quad (6.34)$$

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

|       |          |             |
|-------|----------|-------------|
| $N_d$ | 26,33 kN | ks. KUVA 44 |
|-------|----------|-------------|

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 2,5L \quad 15798 \text{ mm} \quad (\text{taulukko 6.1})$$

$$I_z = \frac{hb^3}{12} \quad 153212175 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad 52,8 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \quad 299,0 \quad (6.20.2s)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 5,23 \quad (6.22)$$

$k_z$ -kerroin

$$\beta_c \quad 0,1 \quad \text{alkukäyrydestä riippuva kerroin LVL:lle} \quad (6.29)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad 14,42 \quad (6.28)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad 0,04 \quad (6.26)$$

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 0,48 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$$k_{mod} \quad 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

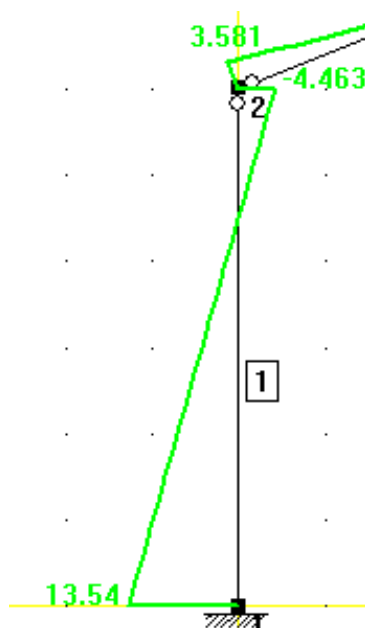
$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,579 \quad (6.33)$$

Käyttöaste  $57,9 \%$

### 9.3 Leikkausvoimakestävyys



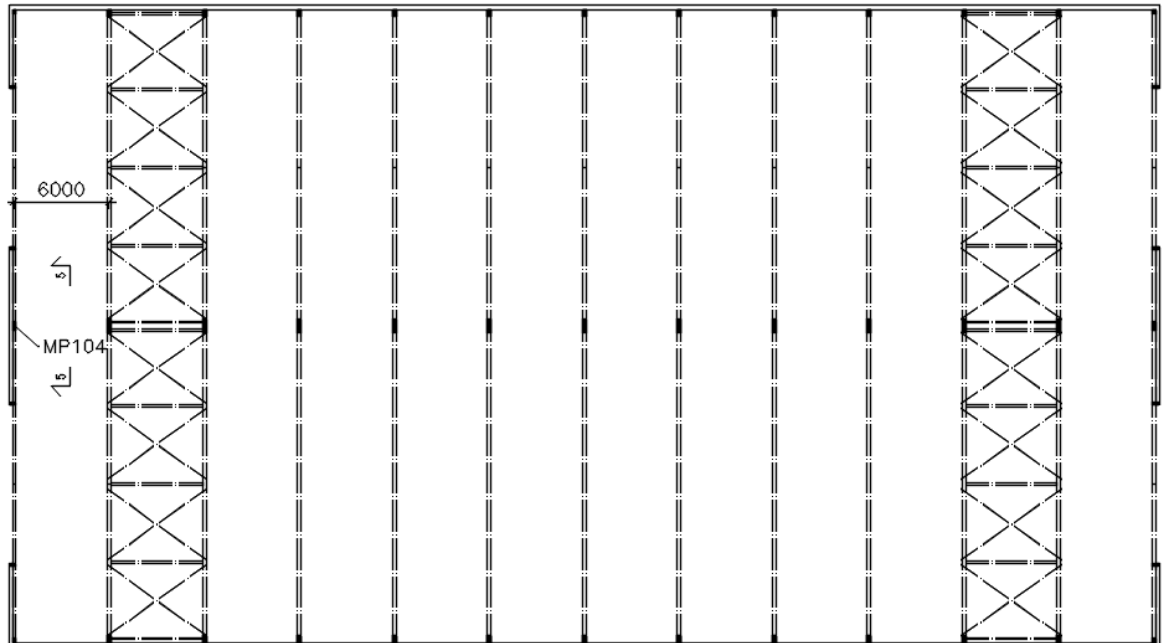
KUVA 48. Leikkausvoimakuvio, KY 3 (Heinonen 2016-05-10)





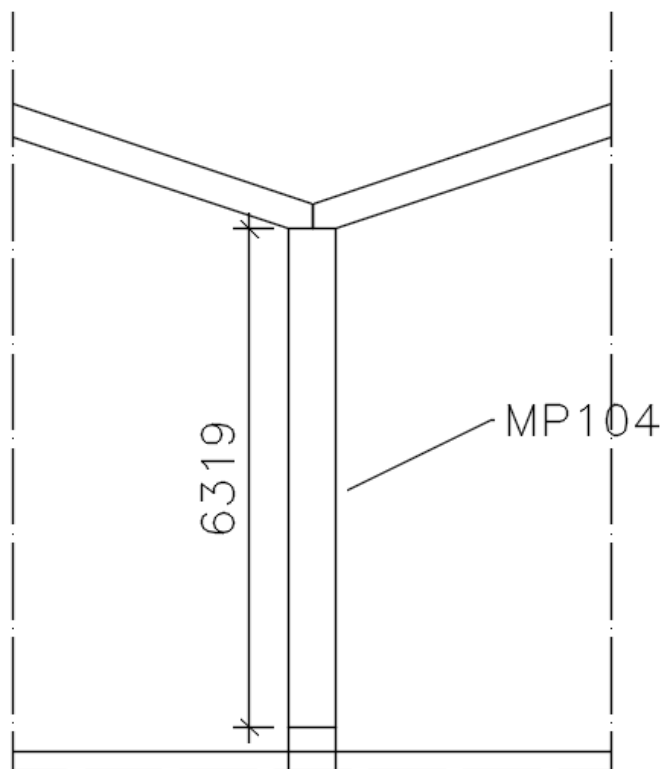
## 10 KESKILINJAN PÄÄTYPILARI

Keskilinjän pääty Pilarista tarkastetaan pilarin nurjahduskestävyys Y- ja Z-suuntaan, kiepahduskestävyys sekä leikkausvoimakkestävyys.

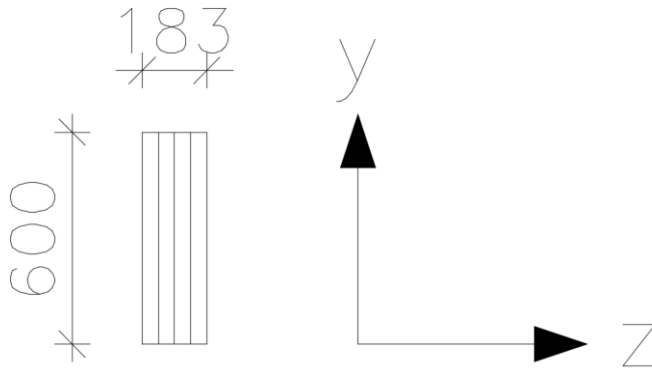


KUVA 50. Keskilinjän pääty pilarin sijainti (Heinonen 2016-05-10)

5-5



KUVA 51. Leikkaus 5-5 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 52. Keskilinjan pääty Pilarin poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

### Pilarin materiaali

#### Kerto-S

|                   |                         |  |
|-------------------|-------------------------|--|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällä                      |
| $s$               | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | KokovaikutusekspONENTTI                |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeella                     |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan                       |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällä               |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                   |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällä           |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeella          |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällä                      |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeella pintaviilun suuntaan         |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                           |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                           |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                           |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                           |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaisuus                             |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo                     |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | materiaalimominaisuuden osavarmuusluku |

### Yläpohjan kuormat

|          |                        |                              |
|----------|------------------------|------------------------------|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja                     |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma               |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma          |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma |

### Mitoittava kuormitusyhdistelmä

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on kuormitusyhdistelmä 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinostunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

Nurjahduskestävyys Y-suuntaan tarkastellaan kuitenkin kuormitusyhdistelmällä 7: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 %, keskipitkä aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä 3 käyttörajatilassa

$$G_k (\text{omapaino}) + Q_{k,1} (\text{tuuli}) + \psi_{0,2} Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

Kuormitusyhdistelmä 3 murtorajatilassa

$$1,15 K_{FI} G_k (\text{omapaino}) + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} (\text{tuuli}) + 1,5 K_{FI} \psi_{0,2} Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

Kuormitusyhdistelmä 7 käyttörajatilassa

$G_k$  (omapaino) +  $Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

Kuormitusyhdistelmä 7 murtorajatilassa

$1,15K_{FI}G_k$  (omapaino) +  $1,5K_{FI}Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

seuraamusluokka CC2

$K_{FI}$  1,0

### Mitat

|   |                        |                           |
|---|------------------------|---------------------------|
| k | 3,0 m                  | pilarin kuormitusleveys   |
| B | 40 m                   | rungon leveys             |
| D | 72 m                   | rungon pituus             |
| H | 10,5 m                 | rakennuksen korkeus       |
| L | 6,3 m                  | pilarin pituus            |
| b | 183 mm                 | pilarin leveys            |
| h | 600 mm                 | pilarin korkeus           |
| A | 109800 mm <sup>2</sup> | pilarin poikkileikkausala |

### Kuormat

Seinän tuulikuorma käyttörajatilassa

$q_{w,k} = C_s C_d C_r q_p(z) k$  2,0 kN/m

Seinän tuulikuorma yläpohjan osalta käyttörajatilassa, ks. luku 5.2

$F_{w,k}$  11,13 kN

Yläpohja käyttörajatilassa

$P_{k,G,yläpohja} = g_{k1} \cdot k$  0,9 kN/m

Ripustuskuorma käyttörajatilassa

$P_{k,G,ripustus} = g_{k2} \cdot k$  0,3 kN/m

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus i)

$P_{k,Q,lumi(i)} = q_{k1} \cdot k$  6 kN/m

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus ii)

tasainen lumikuorma

$P_{k,Q,lumi(ii),1} = q_{k1} \cdot k$  6 kN/m

maksimi kinostuva lumikuorma

$P_{k,Q,lumi(ii),2} = q_{k2} \cdot k$  9,75 kN/m

Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat, KY3, ks. luku 5.3

$F_{vinous,1}$  0,18 kN

$F_{vinous,2}$  0,50 kN

$F_{vinous,3}$  0,59 kN

$F_{vinous,4}$  0,41 kN

$F_{vinous,5}$  0,63 kN

$F_{vinous,6}$  0,54 kN

$F_{vinous,7}$  0,14 kN

Rakenteiden vinoudesta johtuvat kuormat, KY7, ks. luku 5.3

$$F_{\text{vinous},1} = F_{\text{vinous},7}$$

0,17 kN

$$F_{\text{vinous},2} = F_{\text{vinous},6}$$

0,71 kN

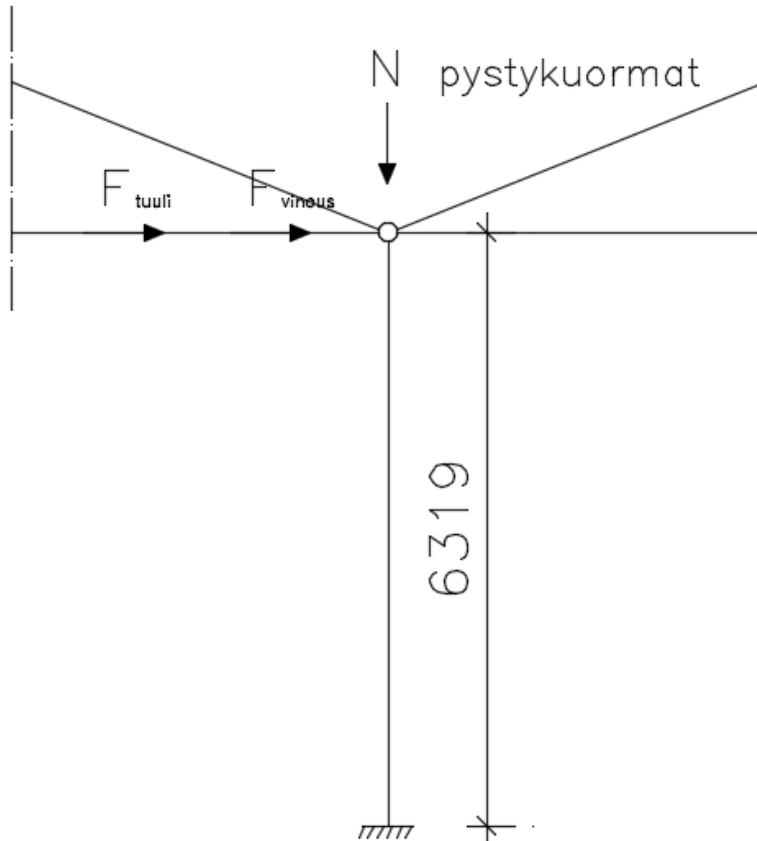
$$F_{\text{vinous},3} = F_{\text{vinous},5}$$

0,83 kN

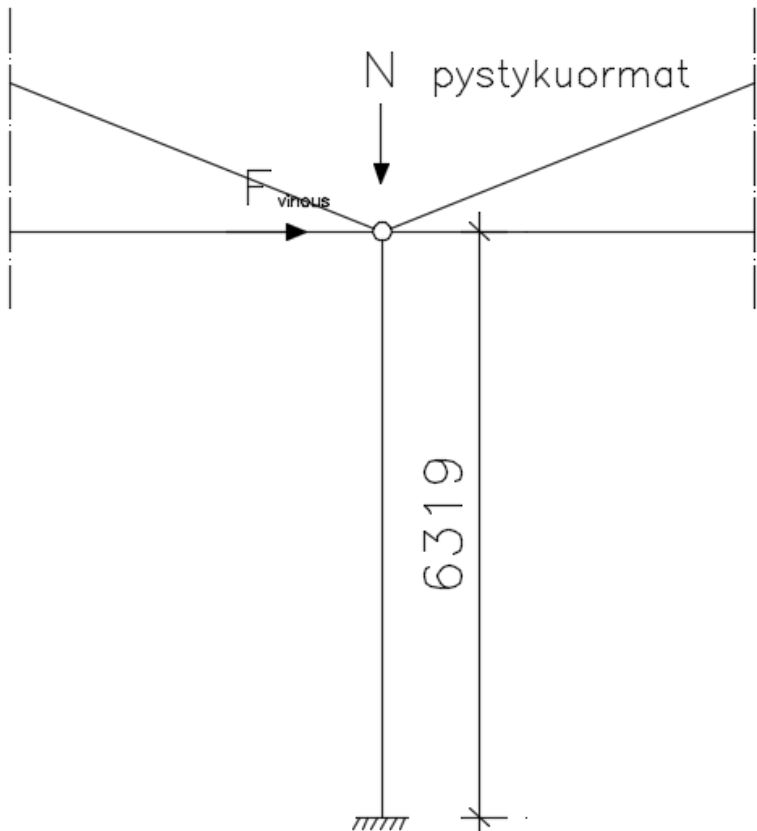
$$F_{\text{vinous},4}$$

0,47 kN

Omat painot tulevat suoraan statiikkaohjelmasta.

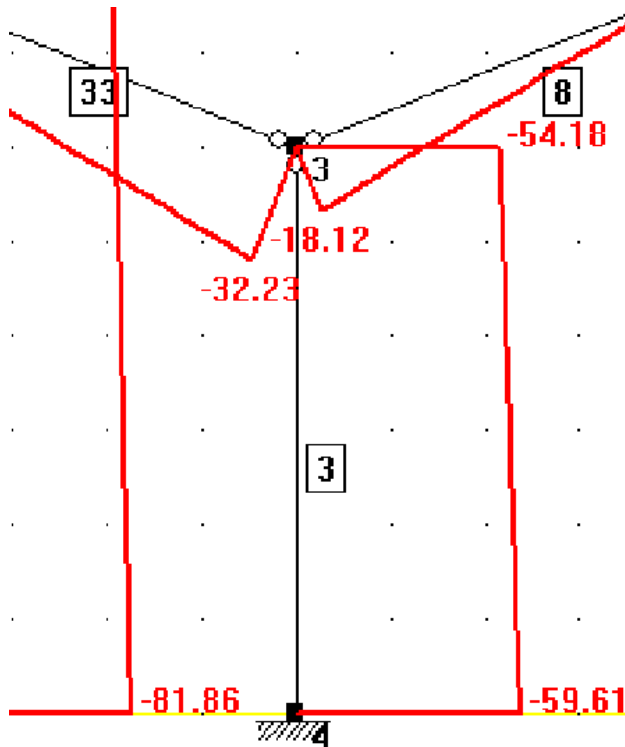


KUVA 53. Keskilinjan pääty pilarin kuormat, KY3 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 54. Keskilinjan pääty pilarin kuormat, KY7 (Heinonen 2016-05-10)

## 10.1 Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta)



KUVA 55. Normaali voimakuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

 $N_d = 59,61 \text{ kN}$ 

Hoikkuusluku

$$L_{c,z} = 2,5L$$

15797,5 mm (taulukko 6.1)

$$I_y = \frac{bh^3}{12}$$

3294000000 mm<sup>4</sup>

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

173,2 mm

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y}$$

91,2 (6.20.2S)

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}'}}$$

1,59 (6.21)

 $k_y$  -kerroin
 $\beta_c = 0,1$  alkukäyrydestä riippuva kerroin LVL:lle (6.29)

 $k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) = 1,84$  (6.27)
Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$ 

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

0,36 (6.25)

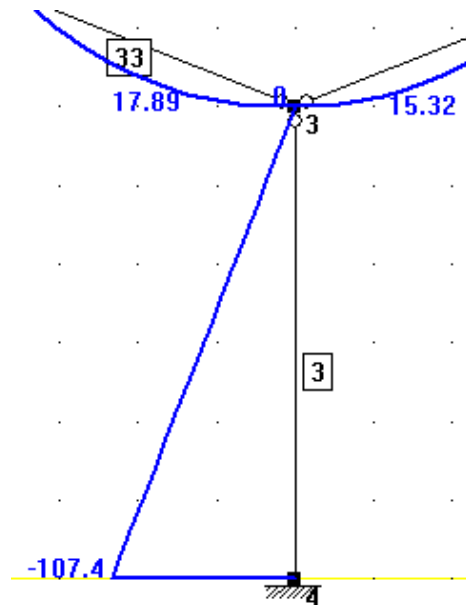
## Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 0,54 \text{ N/mm}^2$$

## Puristuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$



KUVA 56. Momenttikuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

## Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

$M_d$  107,4 kNm

## Taivutusjäännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6Md}{bh^2} \quad 9,8 \text{ N/mm}^2$$

 $k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^S \leq 1,2 \quad 0,92 \quad (3.3)$$

## Taivutuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

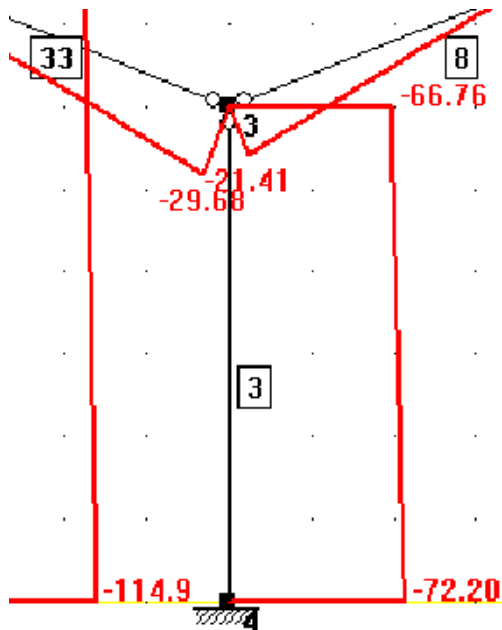
$$f_{m,y,d} = \frac{k_h f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 37,1 \text{ N/mm}^2$$

## Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad 0,310 \quad (6.23)$$

Käyttöaste 31,0 %

## 10.2 Nurjahduskestävyys Z-suuntaan (heikompi suunta)



KUVA 57. Normaaliavoimakuvio, KY7 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

 $N_d$  72,20 kN

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 2,5L$$

15797,5 mm (taulukko 6.1)

$$I_z = \frac{hb^3}{12}$$

306424350 mm<sup>4</sup>

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$$

52,8 mm

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_y}$$

299,0 (6.20.2S)

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

5,23 (6.21)

 $k_z$ -kerroin $\beta_c$  0,1 alkukäyrästä riippuva kerroin LVL:lle (6.29) $k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2)$  14,42 (6.27)Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$ 

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}}$$

0,04 (6.25)

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh}$$

0,66 N/mm<sup>2</sup>



Puristuslujuus

|           |     |                            |                |
|-----------|-----|----------------------------|----------------|
| $k_{mod}$ | 0,8 | keskipitkä aikaluokka, KL2 | (taulukko 3.1) |
|-----------|-----|----------------------------|----------------|

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 23,3 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,785$$

Käyttöaste 78,5 %

### 10.3 Kiepahduskestävyys

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta) ks. KUVA 56

|       |           |
|-------|-----------|
| $M_d$ | 107,4 kNm |
|-------|-----------|

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6M_d}{bh^2} \quad 9,8 \text{ N/mm}^2$$

|     |         |  |
|-----|---------|--|
| $l$ | 6319 mm | kiepahdustuentaväli (= pilarin pituus) |
|-----|---------|--|

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,5 \Rightarrow l_{ef} = 0,5 \cdot l \quad 3159,5 \text{ mm (taulukko 6.3)}$$

Kuorma vaikuttaa vedetyllä reunalla, joten tehollista jänneväliä voidaan pienentää mitan 0,5h verran.

$$l_{ef,1} = l_{ef} - 0,5h \quad 2859,5 \text{ mm}$$

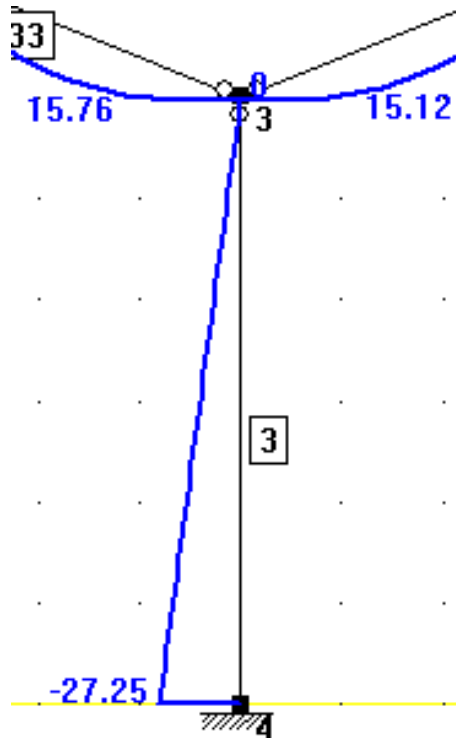
Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli pistekuormille

$$\frac{l_{ef}}{l} = 0,8 \Rightarrow l_{ef} = 0,8 \cdot l \quad 5055,2 \text{ mm (taulukko 6.3)}$$

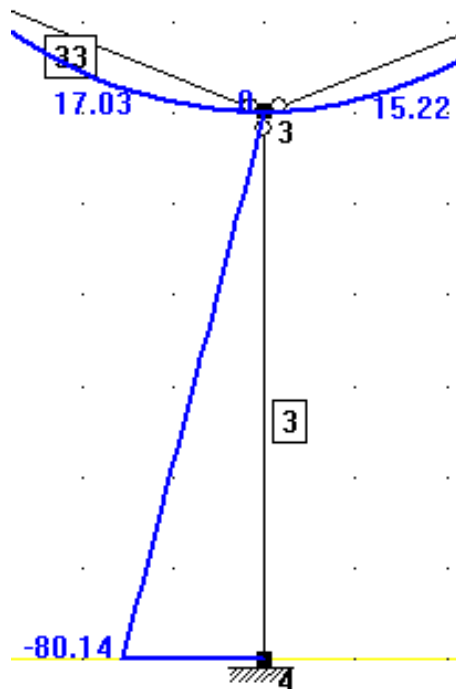
Kuorma sijaitsee pilarin keskilinjalla

$$l_{ef,2} = l_{ef} \quad 5055,2 \text{ mm}$$

Sivusuunnassa tukemattoman pilarin tehollinen jänneväli tasaiselle kuormalle ja pistekuormille



KUVA 58. Tasaisen kuorman aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 59. Pistekuormien aiheuttama momentti, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

|           |           |  |
|-----------|-----------|--|
| $M_{d,1}$ | 27,25 kNm | tasaisen kuorman aiheuttama momentti (statiikkaohjelmasta) |
| $M_{d,2}$ | 80,14 kNm | pistekuormien aiheuttama momentti (statiikkaohjelmasta)    |

$$l_{ef} = \frac{M_{d,1} l_{ef,1} + M_{d,2} l_{ef,2}}{M_{d,1} + M_{d,2}} \quad 4498 \text{ mm}$$

Suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys

|     |      |         |
|-----|------|---------|
| $c$ | 0,58 | Kerto-S |
|-----|------|---------|

$$\sigma_{m, \text{crit}} = \frac{cb^2}{hl_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad 83,5 \text{ N/mm}^2 \quad (6.31.1S)$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad 0,73 \quad (6.30)$$

$$k_{crit} = 1 \quad (6.34)$$

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$$N_d \quad 59,6 \text{ kN} \quad \text{ks. KUVA 55}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 2,5L \quad 15798 \text{ mm} \quad (\text{taulukko 6.1})$$

$$I_z = \frac{hb^3}{12} \quad 306424350 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad 52,8 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \quad 299,0 \quad (6.20.2s)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 5,23 \quad (6.22)$$

 $k_z$ -kerroin

$$\beta_c \quad 0,1 \quad \text{alkukäyryydestä riippuva kerroin LVL:lle} \quad (6.29)$$

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad 14,42 \quad (6.28)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$ 

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad 0,04 \quad (6.26)$$

Puristusjäännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 0,54 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$$k_{mod} \quad 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

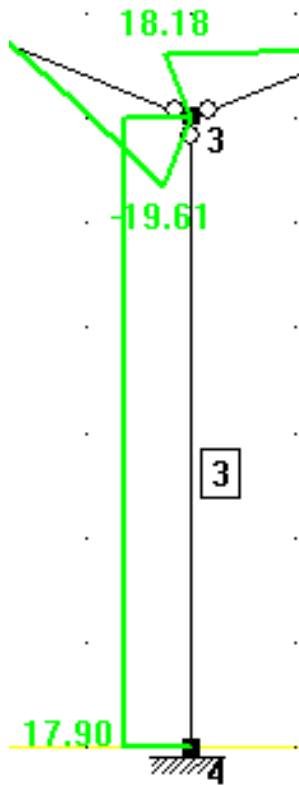
$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,541 \quad (6.33)$$

$$\text{Käyttöaste} \quad 54,1 \%$$

## 10.4 Leikkausvoimakestävyys



KUVA 60. Leikkausvoimakuvio, KY3 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi leikkausvoima (statiikkaohjelmasta)

 $V_d$  17,9 kN $k_{cr}$  -kerroin $k_{cr}$  1,0 $b_{ef} = k_{cr}b$ 

183 mm (6.13a)

Leikkausjännitys tuella

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef}h}$$

0,24 N/mm<sup>2</sup>

Leikkauslujuus

 $k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} k_{mod}}{\gamma_M}$$

3,76 N/mm<sup>2</sup>

Mitoitusehto

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

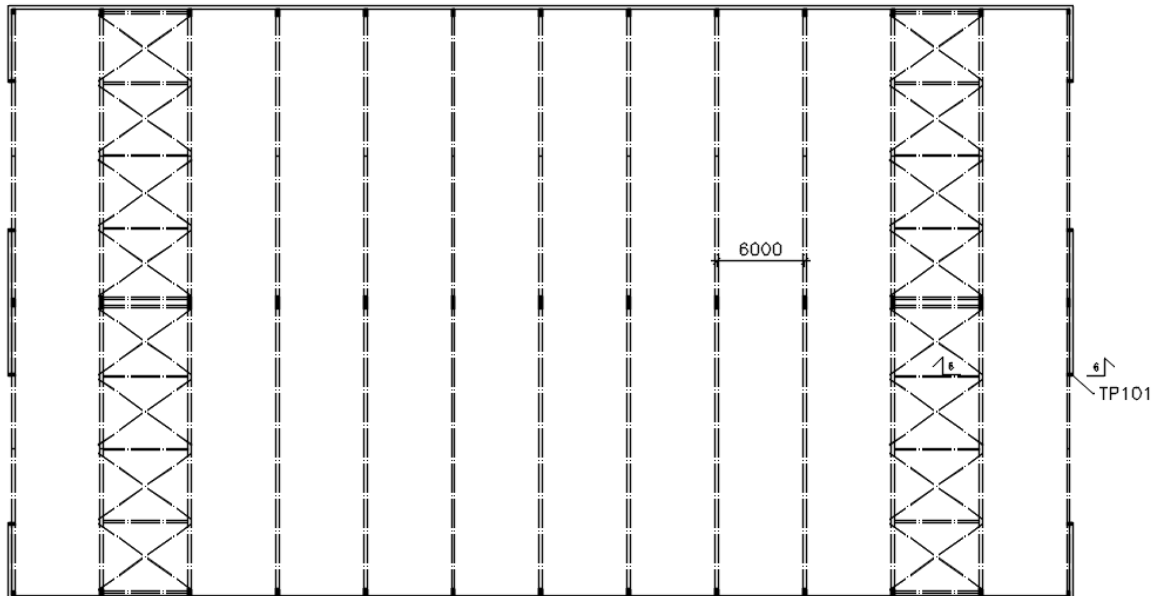
0,065 (6.13)

Käyttöaste 6,5 %

Keskilinjän päätypilarin koko 183 x 600.

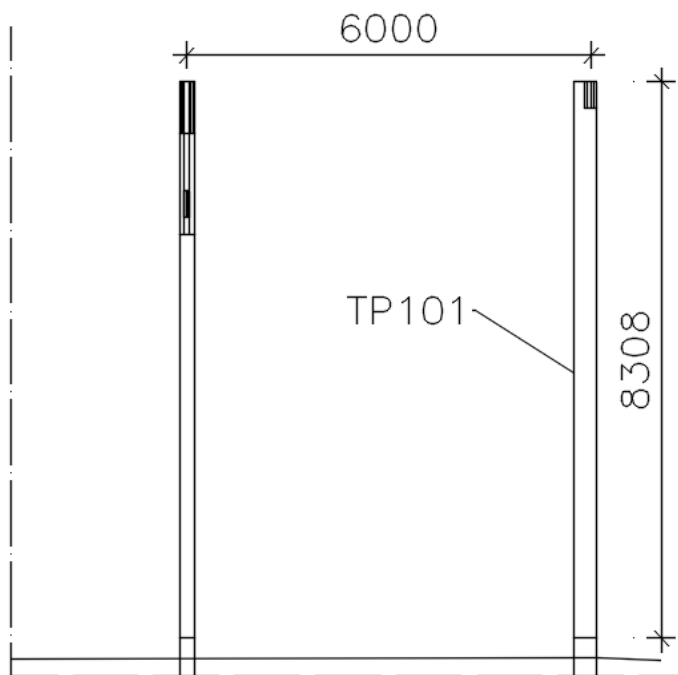
## 11 TUULIPILARI

Tuulipilarin yläpää on kiinnitetty nivelellisesti hallin päätypalkkiin. Pilarin alapää on jäykästi tuettu. Tuulipilarin mitoitustarkastelussa tarkastellaan pilarin nurjahduskestävyys Y-suuntaan, kiepahduskestävyys, leikkausvoimakestävyys sekä pilarin taipuma. Tuulipilari on tuettu heikomman suunnan nurjahdusta vastaan seinäorsilla, joten nurjahduskestävyyttä Z-suuntaan ei tarvitse tarkastella.

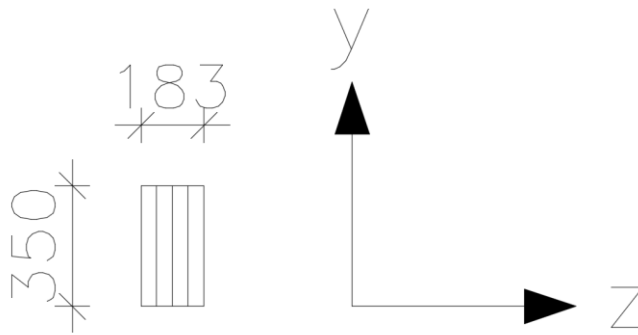


KUVA 61. Tuulipilarin sijainti (Heinonen 2016-05-10)

6-6



KUVA 62. Leikkaus 6-6 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 63. Tuulipilarin poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

### Pilarin materiaali

#### Kerto-S

|                   |                         |  |
|-------------------|-------------------------|--|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällään                                      |
| $s$               | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | Kokovaikutuseksponentti                                  |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeellaan                                     |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan   |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällään                               |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                                     |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällään                           |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeellaan                          |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällään                                      |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeellaan pintaviilun suuntaan                         |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli   |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli   |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli   |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli   |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaistiheys  |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |
| $\gamma_M$        | 1,2                     |  |

### Yläpohjan kuormat

|          |                        |   |
|----------|------------------------|---|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja  |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma  |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma   |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma                                  |
| $q_{k3}$ | 1,0 kN/m               | kattotuolin omapaino lumikuorma keskimmaiselle tuulipilarille |
| $q_k$    | 2,47 kN/m <sup>2</sup> |   |
| $q_p(z)$ | 0,48 kN/m <sup>2</sup> | tuulikuorman nopeuspaine                                      |

### Mitoittava kuormitusyhdistelmä

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinostunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$$G_k \text{ (omapaino)} + Q_{k,1} \text{ (tuuli)} + \psi_0 Q_{k,2} \text{ (lumi, tapaus ii)}$$

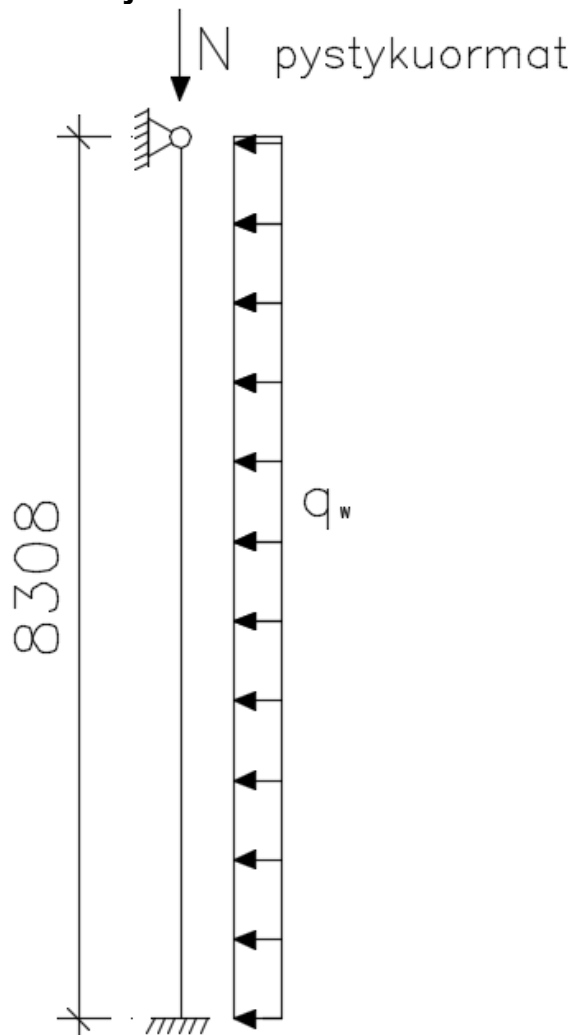
Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$$1,15 K_{FI} G_k \text{ (omapaino)} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} \text{ (tuuli)} + 1,5 K_{FI} \psi_{0,2} Q_{k,2} \text{ (lumi, tapaus ii)}$$

|                 |     |                              |
|-----------------|-----|------------------------------|
| seuraamusluokka | CC2 |                              |
| $K_{FI}$        | 1,0 |                              |
| $\psi_0$        | 0,7 | lumikuorman yhdistelykerroin |

**Mitat**

|           |                       |   |
|-----------|-----------------------|---|
| s         | 6,0 m                 | mastopilarikehien k-jako                                    |
| k         | 7,5 m                 | tuulipilarin kuormitusleveys                                |
| B         | 40 m                  | rungon leveys   |
| D         | 72 m                  | rungon pituus   |
| H (noin)  | 10,5 m                | rakennuksen korkeus   |
| L         | 8,3 m                 | pilarin pituus  |
| $C_s C_d$ | 1,0                   | rakennekerroin  |
| $C_f$     | 1,05                  | voimakerroin päätyseinää vastaan<br>(RIL 201-1-2011 s. 137) |
| b         | 183 mm                | pilarin leveys  |
| h         | 350 mm                | pilarin korkeus   |
| A         | 64050 mm <sup>2</sup> | pilarin poikkileikkausala                                   |

**Kuormat ja rasitukset**

KUVA 64. Tuulipilarin kuormat (Heinonen 2016-05-10)

Seinän tuulikuorma käyttörajatilassa

$$q_{w,k} = C_s C_d C_f q_p(z) k$$

3,8 kN/m

Seinän tuulikuorma murtorajatilassa

$$q_{w,d} = 1,5K_{FI}q_{w,k} \quad 5,66 \text{ kN/m}$$

Pilarin pystykuorma murtorajatilassa

$$N_d = (1,15K_{FI}(g_{k1} + g_{k2}) + 1,5K_{I\psi_{0,2}}q_{k2})k + 1,15K_{FI}q_{k3}k \quad 77,30 \text{ kN}$$

Pilarin taivutusmomentti tuulikuormasta murtorajatilassa pilarin juuressa

$$M_{d1} = \frac{9q_w d L^2}{128} \quad 27,41 \text{ kNm}$$

Pilarin taivutusmomentti kuorman epäkeskisyydestä murtorajatilassa pilarin juuressa

$$e \quad 95,5 \text{ mm} \quad \text{kuorman epäkeskisyy}$$

$$M_{d2} = N_d e \quad 7,4 \text{ kNm}$$

Pilarin leikkausvoima tuulikuormasta murtorajatilassa

$$V_{d1} = \frac{5q_w d L}{8} \quad 29,4 \text{ kN}$$

Pilarin leikkausvoima kuorman epäkeskisyydestä murtorajatilassa

$$V_{d2} = \frac{N_{de} + \frac{N_{de}}{2}}{L} \quad 1,3 \text{ kN}$$

## 11.1 Nurjahduskestävyys Y-suuntaan (vahvempi suunta)

Maksimi normaalivoima

$$N_d \quad 77,30 \text{ kN}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,z} = 0,85L \quad 7055 \text{ mm (taulukko 6.1)}$$

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \quad 653843750 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad 101,0 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad 69,8 \quad (6.20.2S)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 1,22 \quad (6.21)$$

$k_y$  -kerroin

$$\beta_c \quad 0,1 \quad \text{alkukäyrydestä riippuva kerroin, LVL} \quad (6.29)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad 1,29 \quad (6.27)$$



Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad 0,58 \quad (6.25)$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 1,21 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

Maksimi taivutusmomentti

$$M_d = M_{d1} + M_{d2} \quad 34,8 \text{ kNm}$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6Md}{bh^2} \quad 9,3 \text{ N/mm}^2$$

$k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^5 \leq 1,2 \quad 0,98 \quad (3.3)$$

Taivutuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{m,y,d} = \frac{k_h f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 39,6 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad 0,300 \quad (6.23)$$

Käyttöaste 30,0 %

## 11.2 Kiepahduskestävyys

Maksimi taivutusmomentti

$$M_d \quad 34,8 \text{ kNm}$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6Md}{bh^2} \quad 17,8 \text{ N/mm}^2$$

a 1200 mm kiepahdustuentaväli (= seinäorsijako)

Sivusuunnassa tuetun pilarin tehollinen jänneväli, kun kuormitus pilarin puristetulla reunalla  
 $l_{ef} = a + 2h$  1900 mm (taulukko 6.3)

Suorakaidepilarin kriittinen taivutusjännitys

c 0,58 Kerto-S

$$\sigma_{m, crit} = \frac{cb^2}{hl_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad 338,8 \text{ N/mm}^2 \text{ (6.31.1S)}$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m, crit}}} \quad 0,36 \quad (6.30)$$

$$k_{crit} = 1 \quad (6.34)$$

Maksimi normaalivoima

$N_d$  77,3 kN

Hoikkuusluku

$$L_{c,y} = 0,85L \quad 7055 \text{ mm} \quad (\text{taulukko 6.1})$$

$$I_z = \frac{hb^3}{12} \quad 178747537,5 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad 52,8 \text{ mm}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \quad 133,5 \quad (6.20.2s)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 2,34 \quad (6.22)$$

$k_z$ -kerroin

$\beta_c$  0,1 alkukäyrydestä riippuva kerroin LVL:lle (6.29)

$$k_z = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad 3,33 \quad (6.28)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,z}$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad 0,18 \quad (6.26)$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{bh} \quad 1,21 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

|           |     |                             |                |
|-----------|-----|-----------------------------|----------------|
| $k_{mod}$ | 1,1 | hetkellinen aikaluokka, KL2 | (taulukko 3.1) |
|-----------|-----|-----------------------------|----------------|

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\left( \frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,417 \quad (6.33)$$

|            |        |
|------------|--------|
| Käyttöaste | 41,7 % |
|------------|--------|

### 11.3 Leikkausvoimakestävyys

Maksimi leikkausvoima

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| $V_d = V_{d1} + V_{d2}$ | 30,7 kN |
|-------------------------|---------|

 $k_{cr}$  -kerroin

|          |     |
|----------|-----|
| $k_{cr}$ | 1,0 |
|----------|-----|

|                     |        |         |
|---------------------|--------|---------|
| $b_{ef} = k_{cr} b$ | 183 mm | (6.13a) |
|---------------------|--------|---------|

Leikkausjännitys tuella

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{ef} h} \quad 0,72 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuus

|           |     |                             |                |
|-----------|-----|-----------------------------|----------------|
| $k_{mod}$ | 1,1 | hetkellinen aikaluokka, KL2 | (taulukko 3.1) |
|-----------|-----|-----------------------------|----------------|

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 3,76 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1 \quad 0,191 \quad (6.13)$$

|            |        |
|------------|--------|
| Käyttöaste | 19,1 % |
|------------|--------|

### 11.4 Taipuma

Pilarin jäyhyysmomentti

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \quad 653843750 \text{ mm}^4$$

Hetkellinen taipuma

$$W_{\text{inst,Q}} = \frac{q_w k L^4}{185 E \text{mean} I_y} \quad 10,7 \text{ mm}$$

Taipumaraja

$L/300$

27,7 mm (taulukko 7.2)

Mitoitusehto

Tuulikuormalla lopputaipuma  $W_{\text{net,fin}} = W_{\text{inst}}$

$$\frac{W_{\text{net,fin}}}{L/300} \leq 1$$

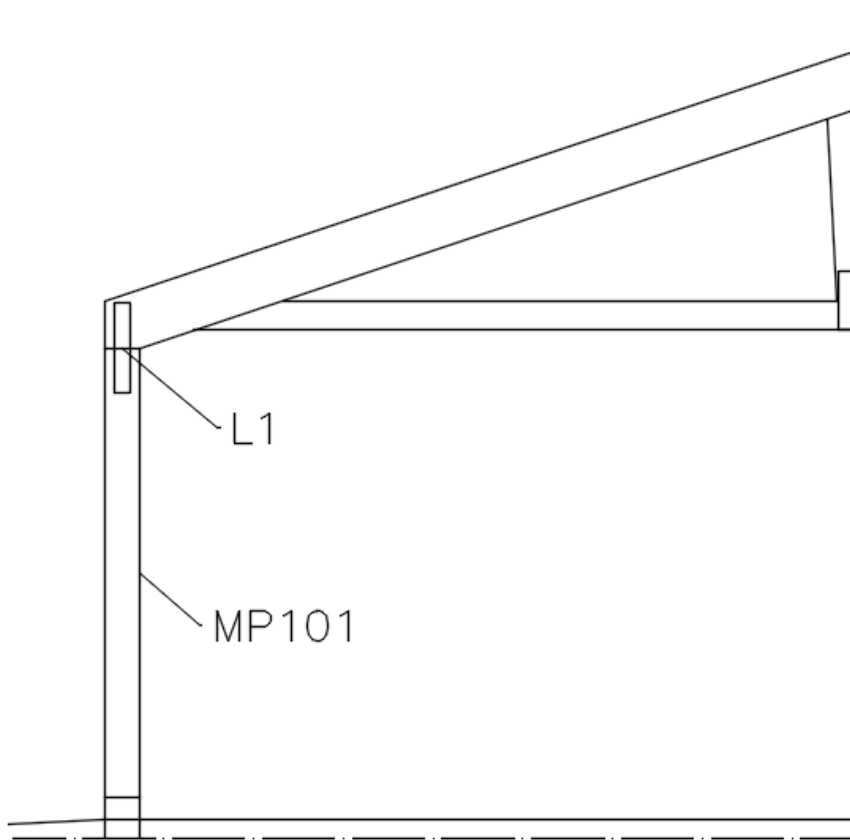
0,388

Käyttöaste                      38,8 %

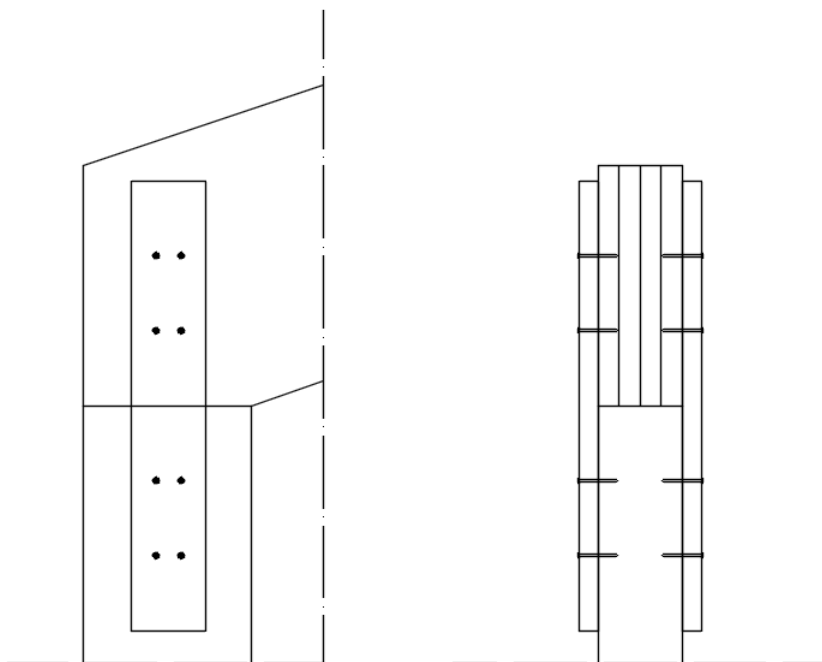
Tuulipilarin koko 183 x 350.

## 12 MASTOPILARIN LIITOS KATTOTUOLIIN

Mastopilarin ja kattotuolin välinen liitos tehdään hankolautoilla eli pilari ja kattotuoli yhdistetään toisiinsa liitoksen molemmin puolin ruuvattavilla laudoilla. Mitoituksessa tarkastellaan hankolaudan leikkausvoimakestävyys sekä ruuvauksen kestävyys. Lisäksi määritetään liitoksessa tarvittavien ruuvien määrä ja ruuvien sijoittaminen.



KUVA 65. Liitoksen sijainti (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 66. Mastopilarin ja kattotuolin hankolautaliitos (Heinonen 2016-05-10)

## Hankolaudan materiaali

### Kerto-S

|                   |       |                   |                                    |
|-------------------|-------|-------------------|------------------------------------|
| $f_{m,k}$         | 44    | N/mm <sup>2</sup> | Taivutus syrjällään                |
| $s$               | 0,12  | N/mm <sup>2</sup> | Kokovaikutuseksponentti            |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50    | N/mm <sup>2</sup> | Taivutus lappeellaan               |
| $f_{t,0,k}$       | 35    | N/mm <sup>2</sup> | Veto syysuuntaan                   |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8   | N/mm <sup>2</sup> | Veto poikittain syrjällään         |
| $f_{c,0,k}$       | 35    | N/mm <sup>2</sup> | Puristus syysuuntaan               |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0   | N/mm <sup>2</sup> | Puristus poikittain syrjällään     |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8   | N/mm <sup>2</sup> | Puristus poikittain lappeellaan    |
| $f_{v,k}$         | 4,1   | N/mm <sup>2</sup> | Leikkaus syrjällään                |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3   | N/mm <sup>2</sup> | Lappeellaan pintaviilun suuntaan   |
| $E_{mean}$        | 13800 | N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                       |
| $E_{0,05}$        | 11600 | N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                       |
| $G_{edge, mean}$  | 600   | N/mm <sup>2</sup> | Liukumoduuli                       |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400   | N/mm <sup>2</sup> | Liukumoduuli                       |
| $\rho_k$          | 480   | kg/m <sup>3</sup> | Ominaisihteys                      |
| $\rho_{mean}$     | 510   | kg/m <sup>3</sup> | Tiheyden keskiarvo                 |
| $\gamma_M$        | 1,2   |                   | materiaalimomintien osavarmuusluku |

### Mitat

|     |     |     |                            |
|-----|-----|-----|----------------------------|
| $b$ | 51  | mm  | hankolaudan leveys         |
| $h$ | 200 | mm  | hankolaudan korkeus        |
| $n$ | 2   | kpl | hankolautojen määrä/liitos |
| $L$ | 6,0 | m   | mastopilarin pituus        |

### Mitoittava kuormitusyhdistelmä

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinostunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

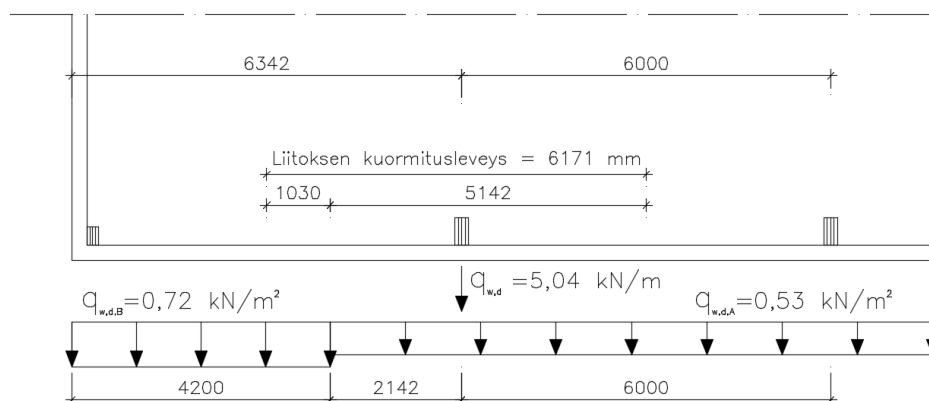
Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$$G_k \text{ (omapaino)} + Q_{k,1} \text{ (tuuli)} + \psi_0 Q_{k,2} \text{ (lumi, tapaus ii)}$$

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$$1,15 K_{FI} G_k \text{ (omapaino)} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} \text{ (tuuli)} + 1,5 K_{FI} \psi_{0,2} Q_{k,2} \text{ (lumi, tapaus ii)}$$

## 12.1 Hankolaudan leikkausvoimakestävyys



KUVA 67. Tuulen imukuorma mastopilarikahlelle (Heinonen 2016-05-10)

$$q_{w,d} = 1,5 \cdot (0,72 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,03 \text{ m} + 0,53 \text{ kN/m}^2 \cdot 5,142 \text{ m}) = 5,2 \text{ kN/m}$$

$$F_{w,d} = \frac{3}{8} \cdot L \cdot q_{w,d} \quad 11,7 \text{ kN}$$

Leikkausvoima liitoksessa

$$V_d \quad 11,7 \text{ kN}$$

$k_{cr}$  -kerroin

$$k_{cr} \quad 1,0$$

$$b_{ef} = k_{cr} b$$

$$51 \text{ mm} \quad (6.13a)$$

Leikkausjännitys tuella

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{n b_{ef} h} \quad 0,86 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuus

$$k_{mod} \quad 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 3,76 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1 \quad 0,229$$

Käyttöaste 22,9 %

## 12.2 Ruuvauksen kestävyys (yleisruuveilla)

$d$  6,0 mm ruuvin nimellishalkaisija (kierteen ulkohalkaisija)

$d_i$  4,5 mm ruuvin kierteisen osan sisähalkaisija (sydänmitta)

$l$  100 mm ruuvin pituus

$$d_{ef} = 1,1 d_i \quad 4,95 \text{ mm}$$

Ruuvien leikkauskestävyys

$t_1$  51 mm ruuvien tunkeumasyvyyks hankolautaan

$t_2$  49 mm ruuvien tunkeumasyvyyks liitettävään osaan

$$k_e = \min\left(\frac{t_1}{8d_{ef}}; \frac{t_2}{12d_{ef}}\right) \quad 0,82 \quad (6.5.6S)$$

$$k_p = \sqrt{\frac{\rho_k}{350}} \quad 1,17 \quad (8.5.4S)$$

$$R_k = 120 d_{ef}^{1,7} \quad 1820 \text{ N} \quad (8.5.1S)$$

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$R_d = \frac{k_{mod} k_p R_k k_e}{\gamma_M} \quad 1611 \text{ N} \quad (8.5.3S)$$

### 12.3 Ruuvien määrä liitoksessa

Maksimi leikkausvoima

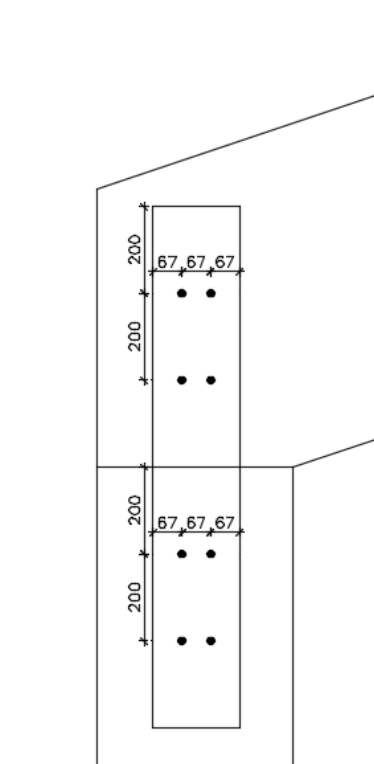
$V_d$  11,7 kN

Ruuvien määrä

$$n = \frac{F_w d}{R_d} \approx 8 \text{ kpl/hankolauta}$$

Hankolaudat kiinnitetään liitoksen molemmin puolin molemmista päistään neljällä 6x100 yleisruuvilla. Yhteensä liitokseen tulee siis 16 ruuvia.

### 12.4 Ruuvien sijoittaminen

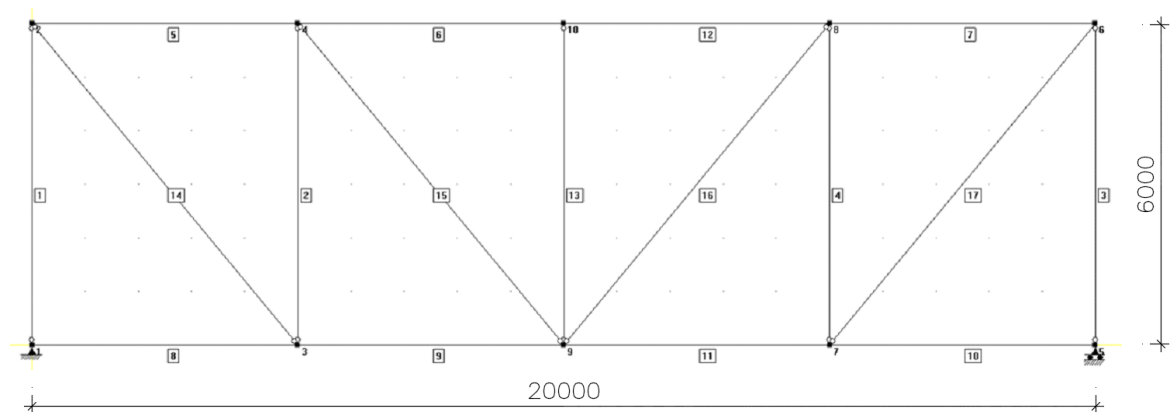


KUVA 68. Ruuvien sijoittaminen (Heinonen 2016-05-10)



## 13 YLÄPOHJAN JÄYKISTERISTIKKO

Mastopilarit jäykistävät hallin rungon poikittaissuunnassa. Pituussuunnassa halli jäykistetään mastopilarien ja kattotuolien väliin asennettavilla jäykisteristikoilla. Yläpohjan jäykisteristikot koostuvat kahdesta osasta, yksi kullekin kattotuolin jänneväliille. Jäykisteristikot sijoitetaan hallin molempiin pätyihin ja ne suunnitellaan toimiviksi kahdessa vastakkaisessa suunnassa. Yläpohjan jäykisteristikoilta kuormat johdetaan seinien jäykisteristikoille, jotka sijoitetaan molemmille ulkoseinälinjoille sekä keskilinjalle yläpohjan jäykisteristikon kanssa samaan pilariväliin. Seinien jäykisteristikoilta kuormat viedään perustuksille. Päätuseinät tuetaan tuulipilareiden avulla perustuksiin ja katto-orsien välityksellä jäykisteristikoihin. Päätuseinät jäykistetään hallin poikkisuunnassa mastopilareina toimivien nurkkapilareiden avulla. Mitoituksessa tarkastellaan yläpohjan jäykisteristikon puristussauvan nurjahduskestävyys Z-suuntaan, jäykisteristikon vetotangon kestävyys, puristussauvan tukipainekestävyys, vetotangon ankkurointikestävyys ja vetotangon ankkurointilevyn tukipainekestävyys sekä yläpohjan että seinien jäykisteristikoille. Jäykisteristikoiden taipumia ei tarkastella tässä työssä.



KUVA 69. Yläpohjan jäykisteristikon staattinen malli (Heinonen 2016-05-10)

### Jäykisteristikon materiaalit

#### Puristussauvat, Kerto-S

|                   |                         |   |
|-------------------|-------------------------|---|
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                        |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällä                |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeella               |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                                |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominäistiheys                               |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | LVL:n materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

#### Vetosauvat, teräs

|            |                       |  |
|------------|-----------------------|--|
| $f_k$      | 640 N/mm <sup>2</sup> | kierretangon myötöraja (8.8)                       |
| $\gamma_M$ | 1,1                   | kierretangon materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

### Yläpohjan kuormat

|          |                        |                              |
|----------|------------------------|------------------------------|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja                     |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma               |
| $g_{k3}$ | 1,0 kN/m               | kattotuolin omapaino         |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma          |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma |
| $q_p(z)$ | 0,48 kN/m <sup>2</sup> | tuulikuorman nopeuspaine     |

**Mitoittava kuormitusyhdistelmä**

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinos-  
tunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$$G_k (\text{omapaino}) + Q_{k,1} (\text{tuuli}) + \psi_0 Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$$1,15K_{FI}G_k (\text{omapaino}) + 1,5K_{FI}Q_{k,1} (\text{tuuli}) + 1,5K_{FI}\psi_{0,2}Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

seuraamusluokka CC2  
K<sub>FI</sub> 1,0

$\psi_0$  0,7 lumikuorman yhdistelykerroin

**Mitat**

|                  |          |  |
|------------------|----------|--|
| k                | 6,0 m    | kattotuolien k-jako  |
| B                | 40 m     | rungon leveys  |
| D                | 72 m     | rungon pituus  |
| H (noin)         | 10,5 m   | rakennuksen korkeus  |
| C <sub>sCd</sub> | 1,0      | rakennekerroin   |
| C <sub>f</sub>   | 1,05     | voimakerroin päätyseinää vastaan<br>(RIL 201-1-2011 s. 137)  |
| C <sub>fr</sub>  | 0,01     | kitkakerroin lumelle, sileä pinta<br>(RIL 201-1-2011 s. 165) |
| k <sub>1</sub>   | 4817 mm  | nurkkapilarin ja tuulipilarin väli                           |
| k <sub>2</sub>   | 10366 mm | tuulipilareiden väli   |
| L <sub>1</sub>   | 6319 mm  | nurkkapilarin pituus   |
| L <sub>2</sub>   | 8300 mm  | tuulipilarin pituus  |
| L                | 20,0 m   | kattotuolin leveys   |

**Kuormat ja rasitukset**

3/8 päätyseinän tuulikuormasta siirretään päätypalkille ja siitä edelleen katto-orsien  
välityksellä yläpohjan jäykisteristikolle. Loput 5/8 päädyn tuulikuormasta siirretään  
tuulipilarien välityksellä suoraan perustuksille.

Päätyseinän tuulikuorma käyttörajatilassa

$$q_{w,k} = C_s C_d C_{fr} q_p(z) \quad 0,5 \text{ kN/m}^2$$

Päätyseinän tuulikuorma murtorajatilassa

$$q_{w,d} = 1,5K_{FI}q_{w,k} \quad 0,75 \text{ kN/m}^2$$

Tuulipilarien tukivoimat päätypalkille murtorajatilassa

$$F_{w,d,1} = \frac{3}{8} q_{w,d} d \frac{k_1}{2} L_1 \quad 4,3 \text{ kN}$$

$$F_{w,d,2} = \frac{3}{8} q_{w,d} d \frac{k_1 + k_2}{2} L_2 \quad 17,8 \text{ kN}$$

Katon kitkan aiheuttama tuulikuorma murtorajatilassa

Kitkakuorman vaikutusalan pituus (RIL 201-1-2011 s. 166)

$$D - \min[2B; 4H] \quad 30,0 \text{ m}$$

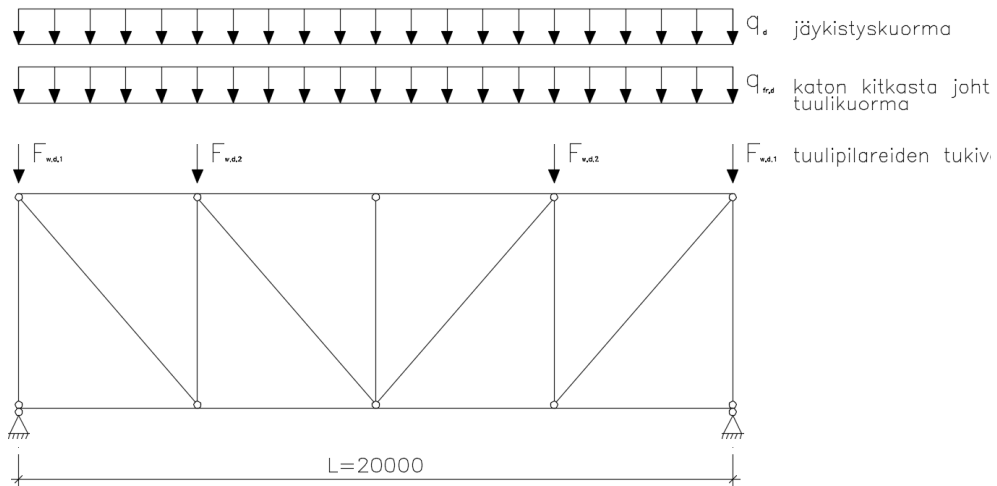
$$q_{fr,d} = 1,5K_{FI}C_{fr}q_p(z) \cdot (D - \min[2B; 4H])$$

0,2 kN/m

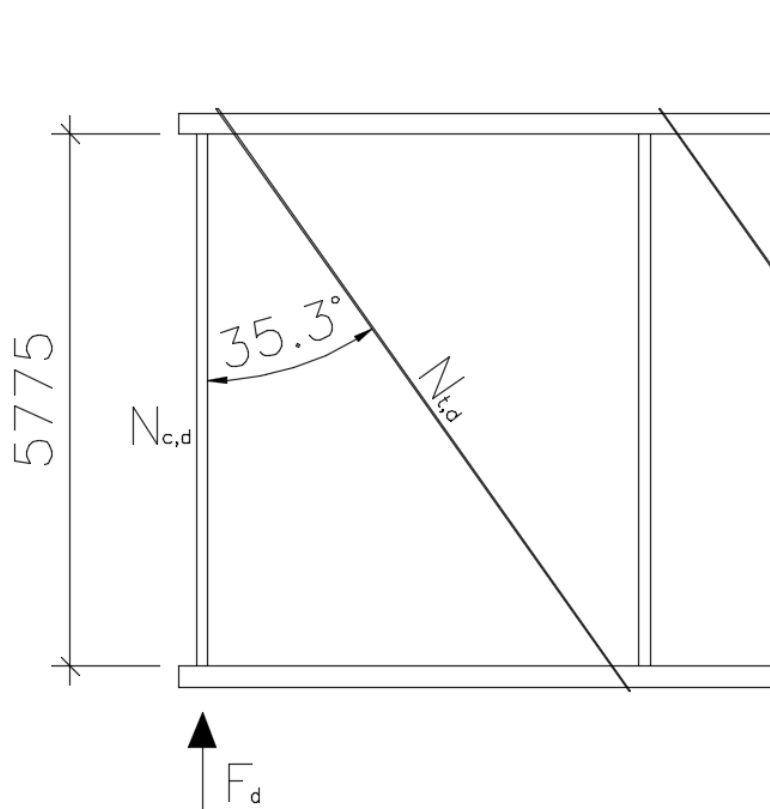
Kattotuoleista johtuva jäykistyskuorma murtorajatilassa

 $q_d$  1,40 kN/m

ks. luku 6.4

**Jäykisteristikon kuormat**

Kuva 70. Jäykistysristikon kuormat (Heinonen 2016-05-10)

**Jäykisteristikon sauvavoimat murtorajatilassa**

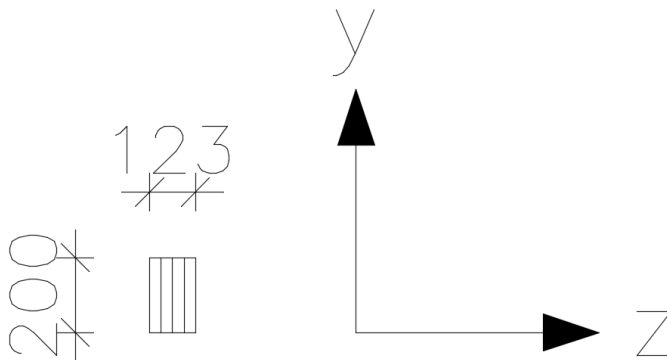
KUVA 71. Jäykisteristikon sauvavoimat murtorajatilassa (Heinonen 2016-05-10)

$$F_d = F_{w,d,1} + F_{w,d,2} + \frac{q_{fr,d}}{2} + \frac{q_d L}{2} \quad 36,2 \text{ kN}$$

$$N_{c,d} = F_d \quad 36,2 \text{ kN}$$

$$N_{t,d} = \frac{N_{c,d}}{\cos 35,3} \quad 44,4 \text{ kN}$$

### 13.1 Yläpohjan jäykisteristikon puristussauvan nurjahduskestävyys Z-suuntaan (heikompi suunta)



KUVA 72. Jäykisteristikon puristussauvan poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

|   |                       |                          |
|---|-----------------------|--------------------------|
| b | 200 mm                | sauvan leveys            |
| h | 123 mm                | sauvan korkeus           |
| A | 24600 mm <sup>2</sup> | sauvan poikkileikkausala |
| L | 5691 mm               | sauvan pituus            |

Maksimi puristusvoima

$$N_{c,d} \quad 36,2 \text{ kN}$$

Hoikkuusluku

$$L_{c,z} = 1,0L \quad 5691 \text{ mm (taulukko 6.1)}$$

$$I_y = \frac{bh^3}{12} \quad 31014450 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad 35,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad 160 \quad (6.20.25)$$

Muunnettu hoikkuusluku

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad 2,80 \quad (6.21)$$

$k_y$  -kerroin

$$\beta_c \quad 0,1 \quad \text{alkukäyrydestä riippuva kerroin, LVL} \quad (6.29)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad 4,55 \quad (6.27)$$

Nurjahduskerroin  $k_{c,y}$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_{y+} \sqrt{k_{y+}^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad 0,12 \quad (6.25)$$

Puristusjännitys

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{c,d}}{bh} \quad 1,47 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad 0,374 \quad (6.23)$$

Käyttöaste 37,4 %

## 13.2 Vetotangon kestävyys

$d$  16 mm kierretangon nimellishalkaisija

Maksimi vetovoima

$N_{t,d}$  44,4 kN

Kierretangon tehollinen pinta-ala

$d_{ef} = 0,82d$  13,12 mm

$$A_{ef} = \frac{\pi d_{ef}^2}{4} \quad 135 \text{ mm}^2$$

Vetojännitys

$$\sigma_{t,d} = \frac{N_{t,d}}{A_{ef}} \quad 328,5 \text{ N/mm}^2$$

Vetolujuus

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \quad 581,8 \text{ N/mm}^2$$

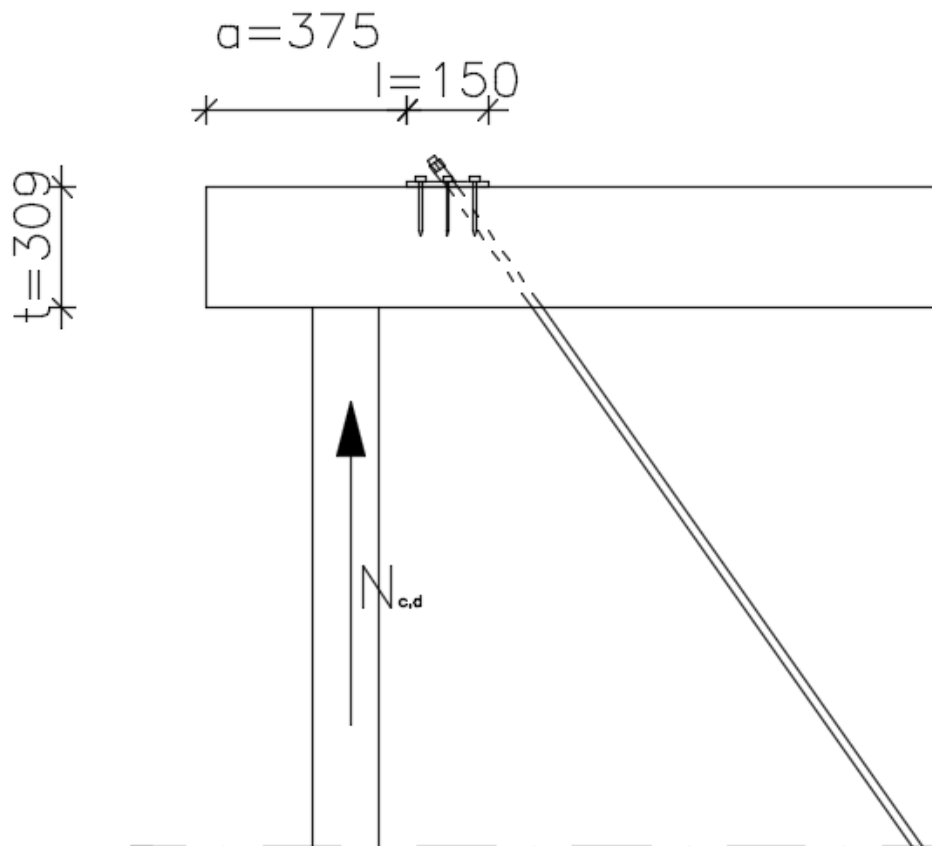
Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{t,d}}{f_d} \leq 1 \quad 0,565$$

Käyttöaste

56,5 %

## 13.3 Yläpohjan jäykisteristikon puristussauvan tukipainekestävyys



KUVA 73. Yläpohjan jäykisteristikon puristussauvan liitos (Heinonen 2016-05-10)

|   |        |  |
|---|--------|--|
| a | 200 mm | etäisyys kattotuolin ulkoreunasta puristussauvan reunaan |
| l | 123 mm | tuen leveys<br>(= puristussauvan korkeus)                |

Tukireaktio

|           |         |
|-----------|---------|
| $N_{c,d}$ | 36,2 kN |
|-----------|---------|

Puristusjännitys yläpaarteessa

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{c,d}}{bl} \quad 1,5 \text{ N/mm}^2$$

Yläpaarteen puristuslujuus syysuuntaa vastaan

|           |     |                             |                |
|-----------|-----|-----------------------------|----------------|
| $k_{mod}$ | 1,1 | hetkellinen aikaluokka, KL2 | (taulukko 3.1) |
|-----------|-----|-----------------------------|----------------|

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,flat} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 1,7 \text{ N/mm}^2$$

 $k_{c,90}$  -kerroin

|            |     |         |
|------------|-----|---------|
| $k_{c,90}$ | 1,4 | Kerto-S |
|------------|-----|---------|

Tehollinen kosketuspinnan pituus

$$l_{c,90,ef} = 30 \text{ mm} + l + 30 \text{ mm} \quad 183 \text{ mm}$$

Tukipainekerroin

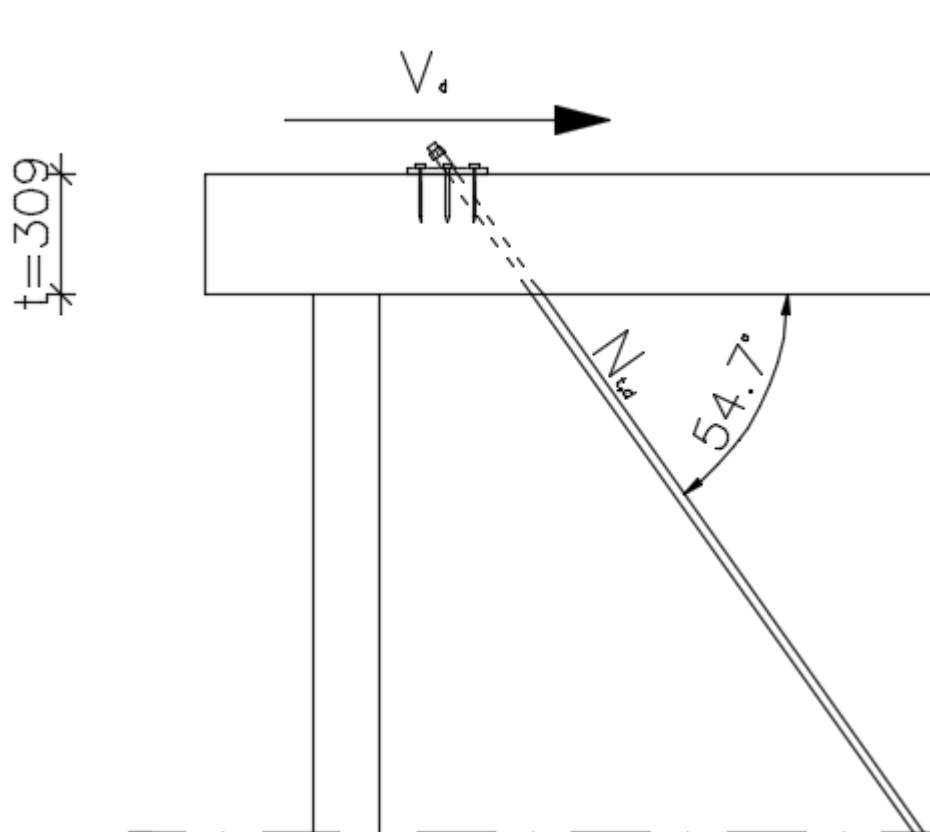
$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad 2,1$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \quad 0,429 \quad (6.3)$$

Käyttöaste 42,9 %

### 13.4 Yläpohjan jäykisteristikon vetotangon ankkurointikestävyys



KUVA 74. Yläpohjan jäykisteristikon vetotangon liitos (Heinonen 2016-05-10)

Liitoksessa käytetään kansiruuveja 6x100 (4.6) ja teräslevyä 150x150x10. Yläpariteiden väliin liitoksen kohdalle asennetaan LVL-levy 800x800x75.

|       |        |                         |
|-------|--------|-------------------------|
| $t_t$ | 10 mm  | teräslevyn paksuus      |
| $t$   | 309 mm | puun paksuus            |
| $d$   | 6 mm   | kansiruuvien halkaisija |
| $L$   | 100 mm | ruuvien pituus          |

Kansiruuvien minimivälit

Syysuuntaan

$$a_1 = (4 + \cos\alpha)d$$

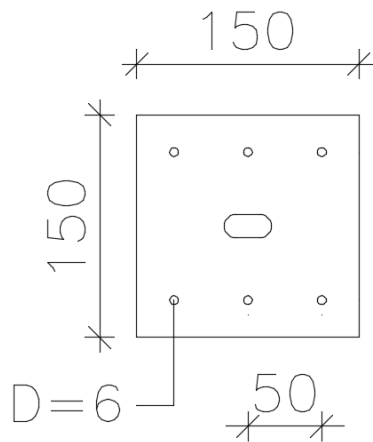
30 mm

Syysuuntaa vastaan

$$a_z = 4d$$

24 mm

Ankkurointilevy



KUVA 75. Ankkurointilevy (Heinonen 2016-05-10)

Leikkausvoima teräslevyn ja yläpaarteen välillä

$$V_d = N_{t,d} \cos 54,7^\circ$$

25,7 kN

Kansiruuvin sileän osan tunkeuma puuhun

$$l = 0,4 \cdot L - t_t$$

30 mm

$$l \geq 4d \Rightarrow d_{ef} = d$$

Kansiruuvin leikkausvoimakestävyys

$d \geq 6 \text{ mm} \Rightarrow$  leikkauskestävyys määritetään pulttiliitosten sääntöjen mukaan.

$$t_t = 10 \text{ mm} \geq d = 6 \text{ mm} \Rightarrow \text{kaava 8.37.2S}$$

$f_{u,k}$  400 N/mm<sup>2</sup> kansiruuvin vetomurtolujuuden ominaisarvo

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

12658,3 Nmm

Reunapuristuslujuus kulmassa 0° syysuuntaan nähden.

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

37,00 N/mm<sup>2</sup> (8.32)

$$f_h = f_{h,0,k}$$

(8.28.3S)

$t$  90 mm kansiruuvin tunkeuma puuhun

$$R_k = \min[f_h t d; 1,3 f_h t d \left( \sqrt{2 + \frac{4M_y}{f_h d t^2}} - 1 \right); 3 \sqrt{M_y f_h d}]$$

5028,9

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2

(taulukko 3.1)

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_M}$$

4,61 kN



Kansiruvien määrä

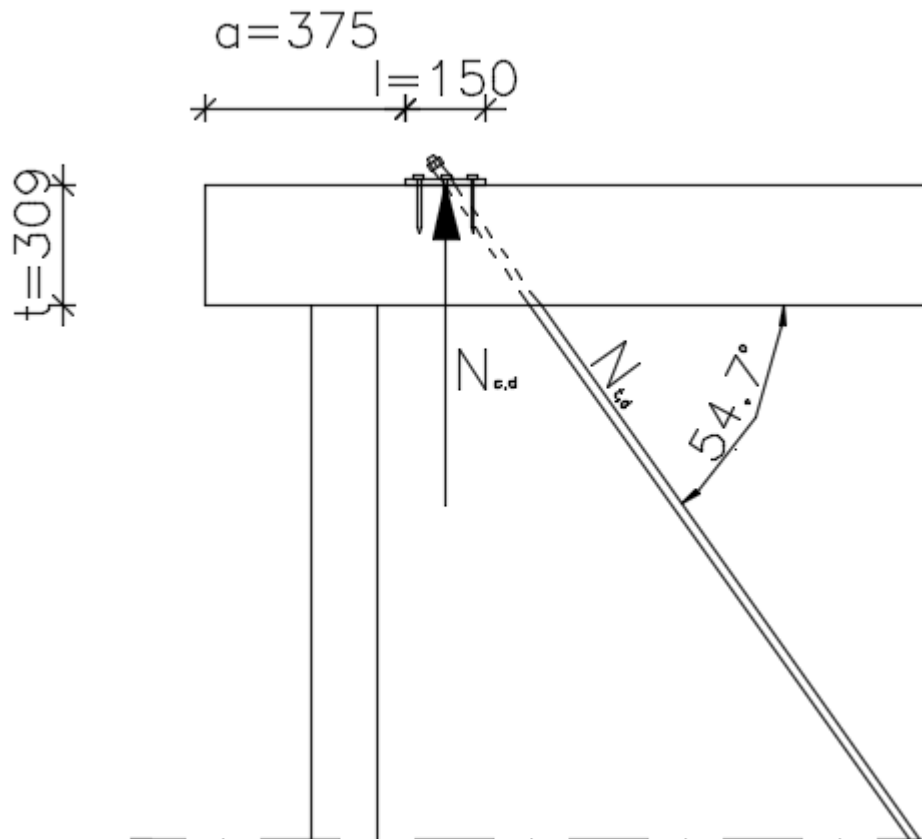
$$n = \frac{V_d}{R_d}$$

6 kpl

Laitetaan 6 kansiruvia.

Teräslevyn kestävyys tulee tarkastella erikseen.

### 13.5 Yläpohjan jäykisteristikon vetotangon ankkurointilevyn tukipainekkestävyys



KUVA 76. Yläpohjan jäykisteristikon vetotangon liitos (Heinonen 2016-05-10)

|             |                       |  |
|-------------|-----------------------|--|
| a           | 375 mm                | etäisyys kattotuolin ulkoreunasta ankkurointilevyn reunaan |
| l           | 150 mm                | tuen leveys (=ankkurointilevyn leveys)                     |
| $A_{ef}$    | 21870 mm <sup>2</sup> | ankkurointilevyn tehollinen pinta-ala                      |
| Tukireaktio |                       |  |
| $N_{c,d}$   | 36,2 kN               |  |

Puristusjännitys yläpaarteessa

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{c,d}}{A_{ef}}$$

1,7 N/mm<sup>2</sup>

Yläpaarteen puristuslujuus syysuuntaa vastaan

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,flat} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 1,7 \text{ N/mm}^2$$

$k_{c,90}$  -kerroin

$k_{c,90}$  1,4 Kerto-S

Tehollinen kosketuspinnan pituus

$$l_{c,90,ef} = 30 \text{ mm} + l + 30 \text{ mm} \quad 210 \text{ mm}$$

Tukipainekerroin

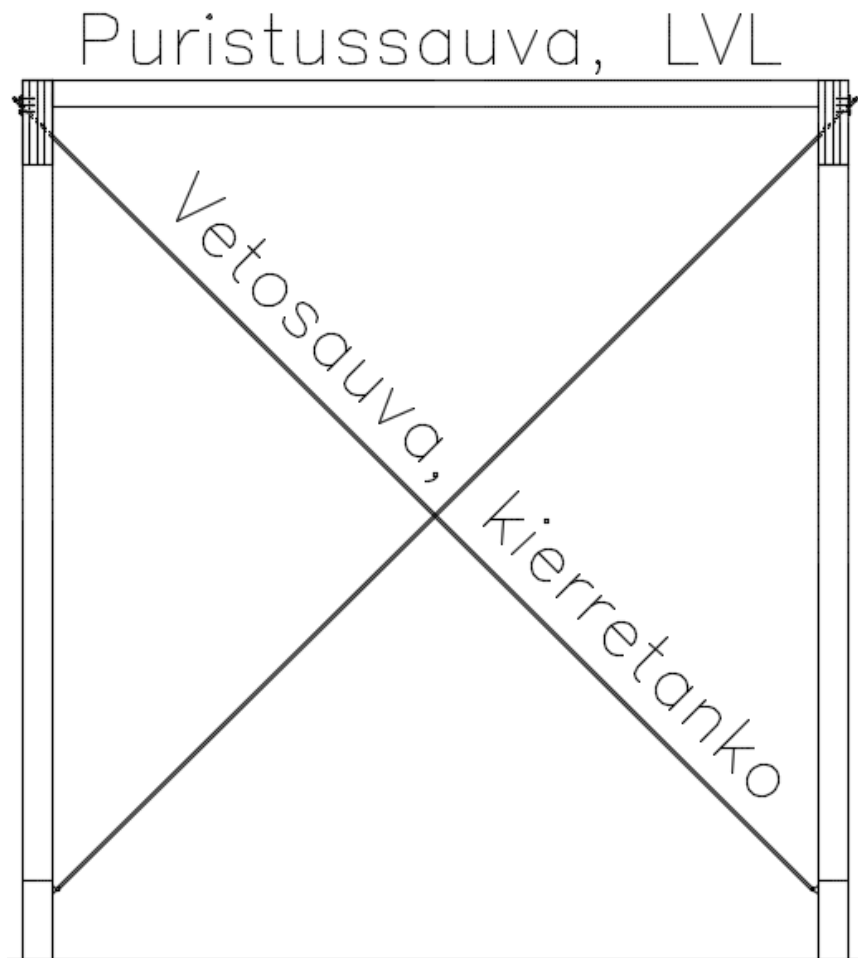
$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad 2,0$$

Mitoitusehto

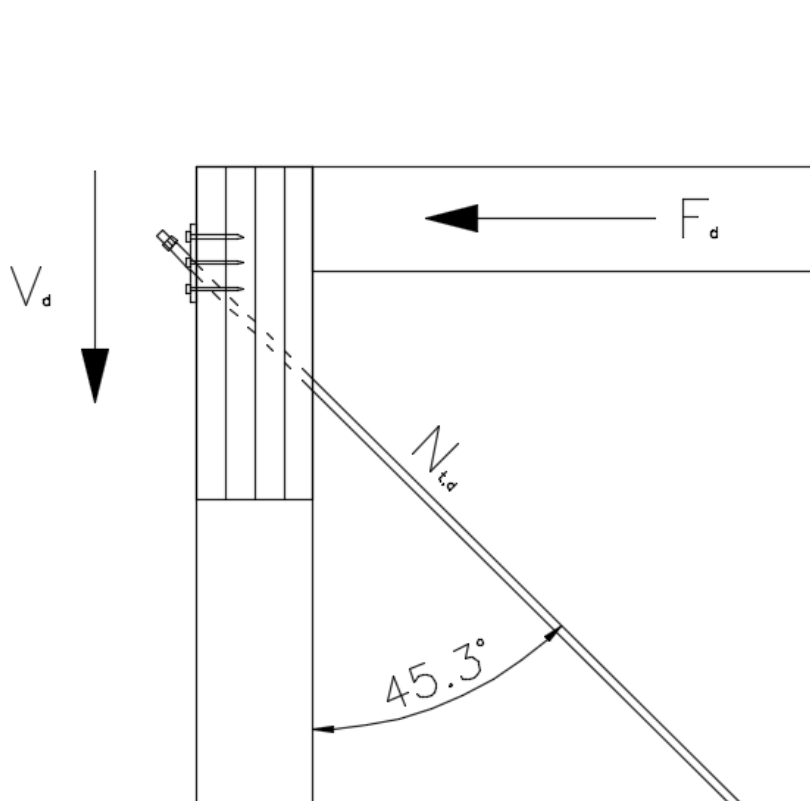
$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,\perp} \cdot f'_{c,90,d}} \leq 1 \quad 0,512 \quad (6.3)$$

Käyttöaste 51,2 %

## 13.6 Ulkoseinän jäykisteristikon vetotangon ankkurointikestävyys



KUVA 76.1. Seinän jäykisteristikko (Heinonen 2016-06-14)



KUVA 77. Seinän jäykisteristikon vetotangon liitos (Heinonen 2016-05-10)

Liitoksessa käytetään kansiruuveja 8x140 (4.6) ja teräslevyä 150x150x10.

|       |        |                         |
|-------|--------|-------------------------|
| $t_t$ | 10 mm  | teräslevyn paksuus      |
| $t$   | 309 mm | puun paksuus            |
| $d$   | 8 mm   | kansiruuvien halkaisija |
| $L$   | 140 mm | ruuvien pituus          |

Kansiruuvien minimivälit

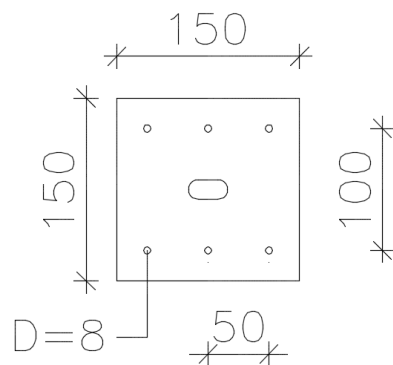
Syysuuntaan

$$a_1 = (4 + \cos\alpha)d \quad 32 \text{ mm}$$

Syysuuntaa vastaan

$$a_2 = 4d \quad 32 \text{ mm}$$

Ankkurointilevy



KUVA 78. Ankkurointilevy (Heinonen 2016-05-10)

Leikkausvoima teräslevyn ja yläpaarteen välillä

$$F_d = N_{c,d} \quad 36,2 \text{ kN} \quad \text{puristussauvasta aiheutuva voima}$$

$$V_d = \frac{F_d}{\tan 45,3} \quad 35,9 \text{ kN}$$

Kansiruuvien sileän osan tunkeuma puuhun

$$l = 0,4 \cdot L - t_t \quad 46 \text{ mm}$$

$$l \geq 4d \Rightarrow d_{ef} = d$$

Kansiruuvien leikkauskestävyys

$d \geq 6 \text{ mm} \Rightarrow$  leikkauskestävyys määritetään pulttiliitosten sääntöjen mukaan.

$$t_t = 10 \text{ mm} \geq d = 8 \text{ mm} \Rightarrow \text{kaava 8.37.2S}$$

$$f_{u,k} \quad 400 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kansiruuvien vetomurtolujuuden ominaisarvo}$$

$$M_y = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad 26743,3 \text{ Nmm} \quad (8.30)$$

Reunapuristuslujuus kulmassa  $90^\circ$  syysuuntaan nähden.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01d) \cdot p_k \quad 36,21 \text{ N/mm}^2 \quad (8.32)$$

$$f_h = f_{h,k} \quad (8.28.3S)$$

t 130 mm kansiruuvin tunkeuma puuhun

$$R_k = \min[f_h t d; 1,3 f_h t d (\sqrt{2 + \frac{4M_y}{f_h d t^2}} - 1); 3\sqrt{M_y f_h d}] \quad 8350,2 \quad (8.37.2S)$$

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_M} \quad 7,65 \text{ kN}$$

Kansiruuvi määrä

$$n = \frac{V_d}{R_d} \quad 5 \text{ kpl}$$

Laitetaan 8 kansiruuviä.

Teräslevyn kestävyys tulee tarkastella erikseen.

### 13.7 Ulkoseinän jäykisteristikon vetotangon ankkurointilevyn tukipainekkestävyys

l 150 mm tuen leveys (=ankkurointilevyn leveys)

$A_{ef}$  21870 mm<sup>2</sup> ankkurointilevyn tehollinen pinta-ala

Tukireaktio (statiikkaohjelmasta)

$N_{c,d}$  36,2 kN

Puristusjännitys yläpaarteessa

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{c,d}}{A_{ef}} \quad 1,7 \text{ N/mm}^2$$

Yläpaarteen puristuslujuus syysuuntaa vastaan

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,flat} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 1,7 \text{ N/mm}^2$$

$k_{c,90}$  -kerroin

$k_{c,90}$  1,4 Kerto-S

Tehollinen kosketuspinnan pituus

$l_{c,90,ef} = 30 \text{ mm} + l + 30 \text{ mm}$  210 mm

Tukipainekerroin

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad 2,0$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \quad 0,512 \quad (6.3)$$

Käyttöaste 51,2 %

### 13.8 Keskilinjän jäykisteristikon vetotangon ankkurointikestävyys

Keskilinjän jäykisteristikko mitoitetaan vastaavalla tavalla ulkoseinälinjan jäykisteristikon kanssa. Ainoastaan rasiukset ovat kaksinkertaisia. Liitoksessa käytetään kansiruuveja 10x140 (4.6) ja teräslevyä 200x150x10.

|       |        |                         |
|-------|--------|-------------------------|
| $t_t$ | 10 mm  | teräslevyn paksuus      |
| $t$   | 309 mm | puun paksuus            |
| $d$   | 10 mm  | kansiruuvien halkaisija |
| $L$   | 140 mm | ruuvien pituus          |

Kansiruuvien minimivälit

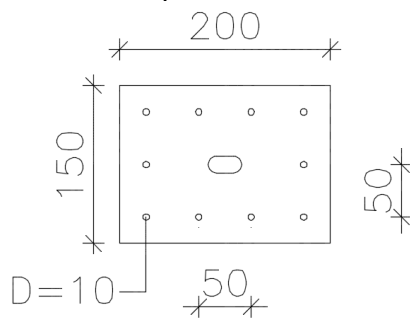
Syysuuntaan

$$a_1 = (4 + \cos\alpha)d \quad 40 \text{ mm}$$

Syysuuntaa vastaan

$$a_2 = 4d \quad 40 \text{ mm}$$

Ankkurointilevy



KUVA 78.1. Ankkurointilevy (Heinonen 2016-06-14)

Leikkausvoima teräslevyn ja yläpaarteen välillä

$$F_d = N_{c,d} \quad 72,5 \text{ kN} \quad \text{puristussauvasta aiheutuva voima}$$

$$V_d = \frac{F_d}{\tan 45,3} \quad 71,7 \text{ kN}$$

Kansiruuvien sileän osan tunkeuma puuhun

$$l = 0,4 \cdot L - t_t \quad 46 \text{ mm}$$

$$l \geq 4d \Rightarrow d_{ef} = d$$

Kansiruuvin leikkauskestävyys

$d \geq 6 \text{ mm} \Rightarrow$  leikkauskestävyys määritetään pulttiliitosten sääntöjen mukaan.

$$t_t = 10 \text{ mm} \geq d = 10 \text{ mm} \Rightarrow \text{kaava 8.37.2S}$$

$$f_{u,k} \quad 400 \text{ N/mm}^2 \quad \text{kansiruuvin vetomurtolujuuden ominaisarvo}$$

$$M_y = 0,3f_{u,k}d^{2,6} \quad 47772,9 \text{ Nmm} \quad (8.30)$$

Reunapuristuslujuus kulmassa  $90^\circ$  syysuuntaan nähden.

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01d) \cdot \rho_k \quad 35,42 \text{ N/mm}^2 \quad (8.32)$$

$$f_h = f_{h,k} \quad (8.28.3S)$$

$$t \quad 130 \text{ mm} \quad \text{kansiruuvin tunkeuma puuhun}$$

$$R_k = \min[f_h t d; 1,3f_h t d \left( \sqrt{2 + \frac{4M_y}{f_h d t^2}} - 1 \right); 3\sqrt{M_y f_h d}] \quad 12341,3 \quad (8.37.2S)$$

$$k_{mod} \quad 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_M} \quad 11,31 \text{ kN}$$

Kansiruuviin määrä

$$n = \frac{V_d}{R_d} \quad 7 \text{ kpl}$$

Laitetaan 10 kansiruuviä.

Teräslevyn kestävyys tulee tarkastella erikseen.

### 13.9 Keskilinjän jäykisteristikon vetotangon ankkurointilevyn tukipainekestävyys

$$l \quad 200 \text{ mm} \quad \text{tuen leveys (=ankkurointilevyn leveys)}$$

$$A_{ef} \quad 28758 \text{ mm}^2 \quad \text{ankkurointilevyn tehollinen pinta-ala}$$

Tukireaktio (statiikkaohjelmasta)

$$N_{c,d} \quad 72,5 \text{ kN}$$

Puristusjännitys yläpaarteessa

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{c,d}}{A_{ef}} \quad 2,5 \text{ N/mm}^2$$

Yläpaarteen puristuslujuus syysuuntaa vastaan

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,flat} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 1,7 \text{ N/mm}^2$$

$k_{c,90}$  -kerroin

$k_{c,90}$  1,4 Kerto-S

Tehollinen kosketuspinnan pituus

$$l_{c,90,ef} = 30 \text{ mm} + l + 30 \text{ mm} \quad 260 \text{ mm}$$

Tukipainekerroin

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad 1,8$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \quad 0,840 \quad (6.3)$$

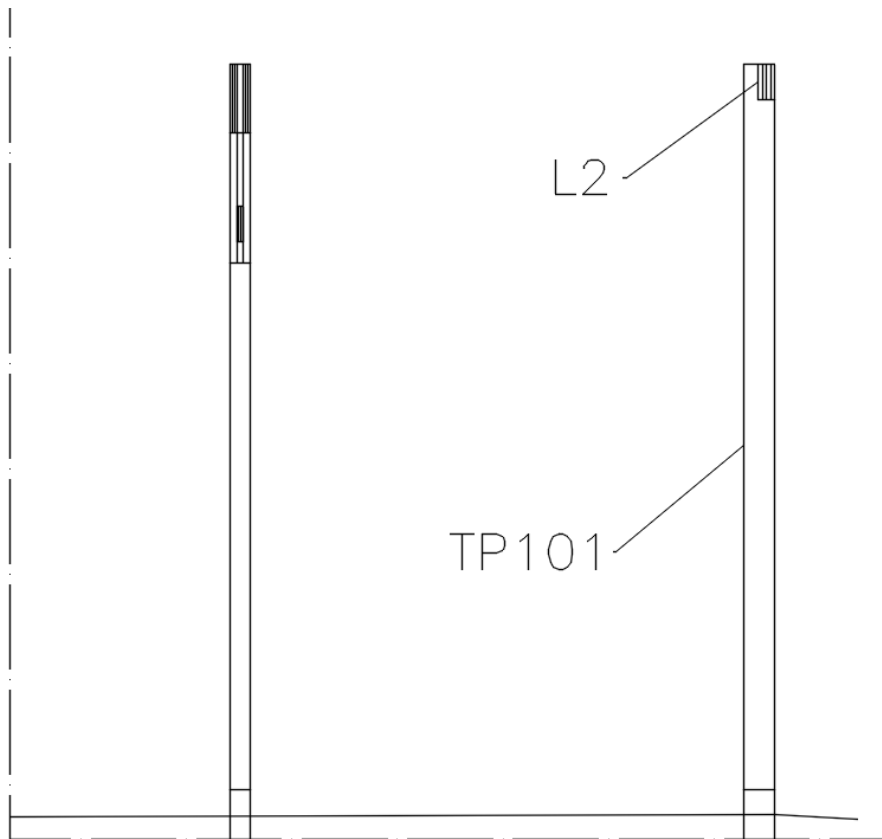
Käyttöaste 84,0 %

Tuulipilarien tukivoimat siirretään yläpohjan jäykistysristikolle tuulipilarien kohdalla olevilla katto-or-silla. Katto-orret kiinnitetään päätypalkkeihin ja kattotuoleihin kulmalevyillä ja ankkurinauloilla. Kulmalevyliitoksen leikkausvoimakkestävyys tulee tarkastaa valmistajan ohjeiden mukaan. Seinien veto-tankojen alapäät ankkuroidaan suoraan pilarikenkään.

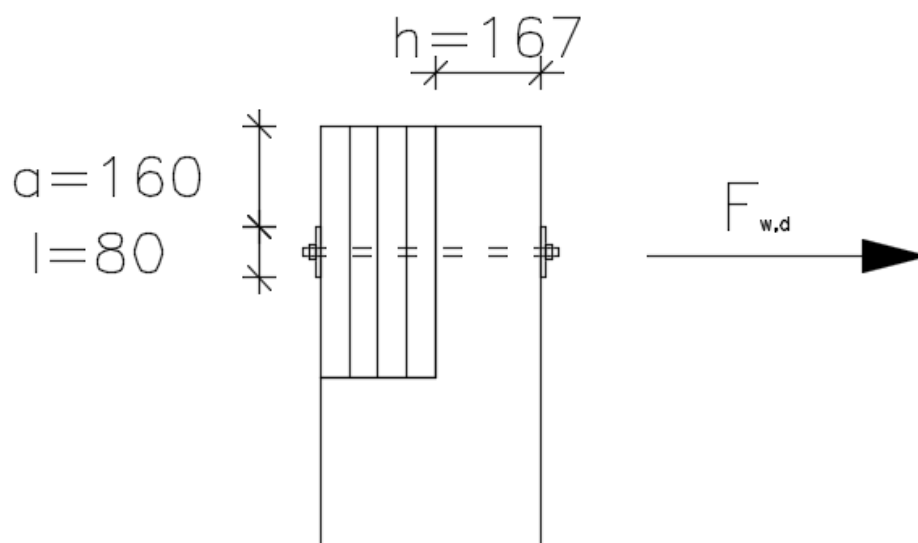


## 14 TUULIPILARIN LIITOS PÄÄTYPALKKIIN

Päätyseinän tuulipilarin ja päätypalkin liitos tehdään loviliitoksella ja pultilla. Pystykuormat siirtyvät pilarille loviliitoksen kautta ja tuulikuorma pultin ja aluslevyn välityksellä. Liitoksen mitoituksessa tarkastellaan pultin vetokestävyys sekä pultin aluslevyn tukipainekestävyys.



KUVA 79. Liitoksen sijainti (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 80. Tuulipilarin liitos päätypalkkiin (Heinonen 2016-05-10)

## 14.1 Pultin vetokestävyys

|            |                       |   |
|------------|-----------------------|---|
| d          | 12 mm                 | pultin halkaisija                                       |
| $f_{u,k}$  | 640 N/mm <sup>2</sup> | pultin vetomurtolujuuden ominaisarvo (lujuusluokka 8.8) |
| $\gamma_M$ | 1,1                   | pultin materiaaliominaisuuden osavarmuusluku            |

Maksimi vetovoima

|           |         |  |
|-----------|---------|--|
| $N_{t,d}$ | 17,8 kN | = $F_{w,d,2}$ , ks. yläpohjan jäykisteristikko |
|-----------|---------|--|

Pultin tehollinen pinta-ala

|                  |         |
|------------------|---------|
| $d_{ef} = 0,82d$ | 9,84 mm |
|------------------|---------|

$$A_{ef} = \frac{\pi d_{ef}^2}{4} \quad 76 \text{ mm}^2$$

Vetojännitys

$$\sigma_{t,d} = \frac{N_{t,d}}{A_{ef}} \quad 234,5 \text{ N/mm}^2$$

Vetolujuus

$$f_d = \frac{f_{u,k}}{\gamma_M} \quad 581,8 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{t,d}}{f_d} \leq 1 \quad 0,403$$

Käyttöaste 40,3 %

## 14.2 Pultin aluslevyn tukipainekestävyys

Aluslevynä käytetään teräslevyä 80x80x8.

|                   |                       |                                |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------|
| $t_t$             | 8 mm                  | aluslevyn paksuus              |
| d                 | 12 mm                 | pultin halkaisija              |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup> | Puristus poikittain syrjällään |

Aluslevyn tehollinen pinta-ala

$$d_{ef} = \min[12t_t; 4d] \quad 48 \text{ mm (kohta 8.5.2)}$$

$$A_{ef} = \frac{\pi d_{ef}^2}{4} \quad 1809,6 \text{ mm}^2$$

Tukireaktio

|           |         |
|-----------|---------|
| $N_{c,d}$ | 17,8 kN |
|-----------|---------|

Puristusjännitys aluslevyn alla

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{c,d}}{A_{ef}} \quad 9,9 \text{ N/mm}^2$$

Puristuslujuus syysuuntaa vastaan

Aluslevyn alla voidaan käyttää puun leimapainelujuudelle arvoa  $3,0 \cdot f_{c,90,edge,k}$  (kohta 8.5.2)  
 $k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,90,d} = \frac{3,0 f_{c,90,edge,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 18,0 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

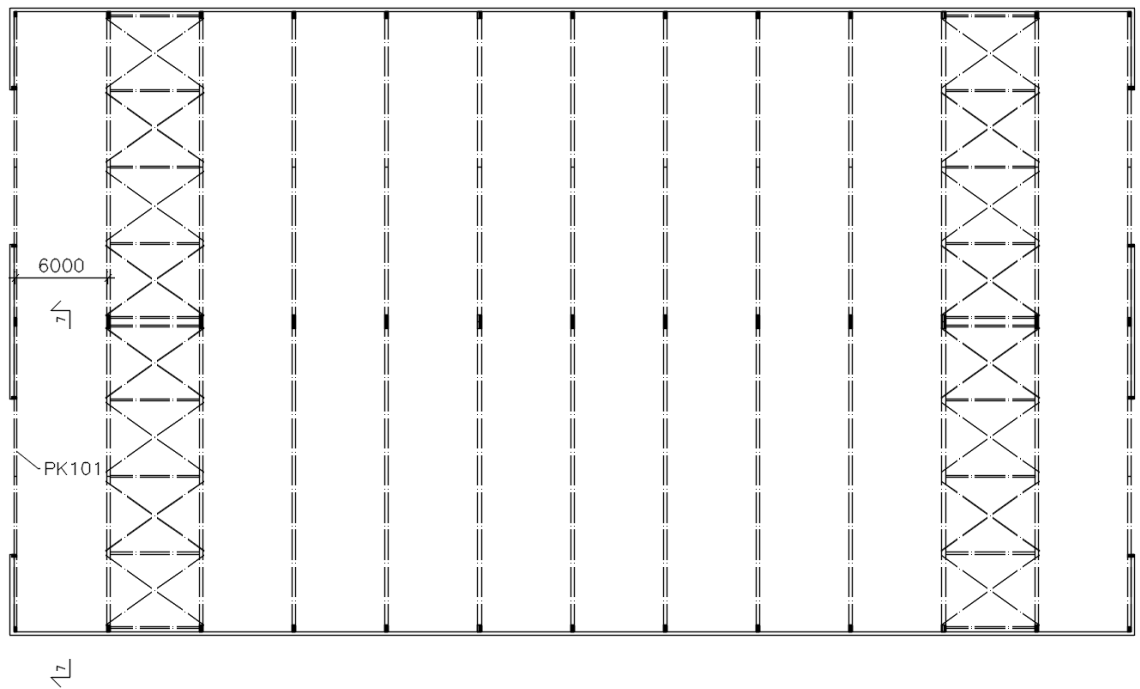
$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,d}} \leq 1 \quad 0,547 \quad (6.3)$$

Käyttöaste 54,7 %

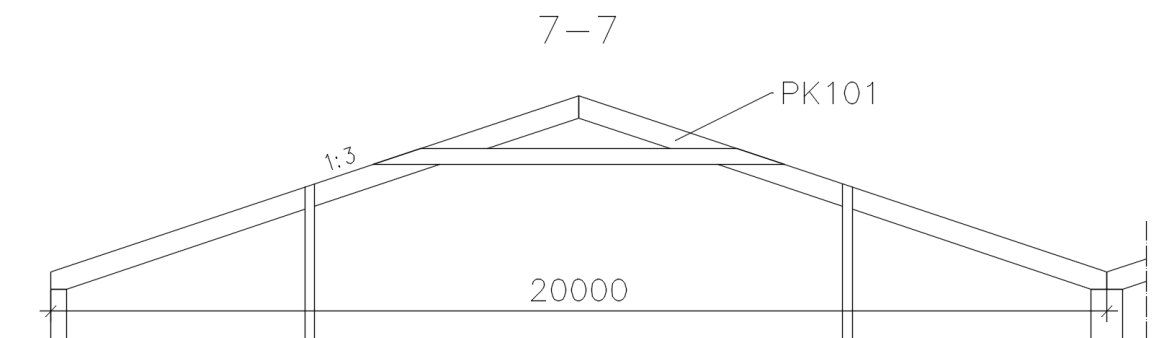
Teräslevyn kestävyys tulee tarkastaa erikseen.

## 15 PÄÄTYKEHÄ

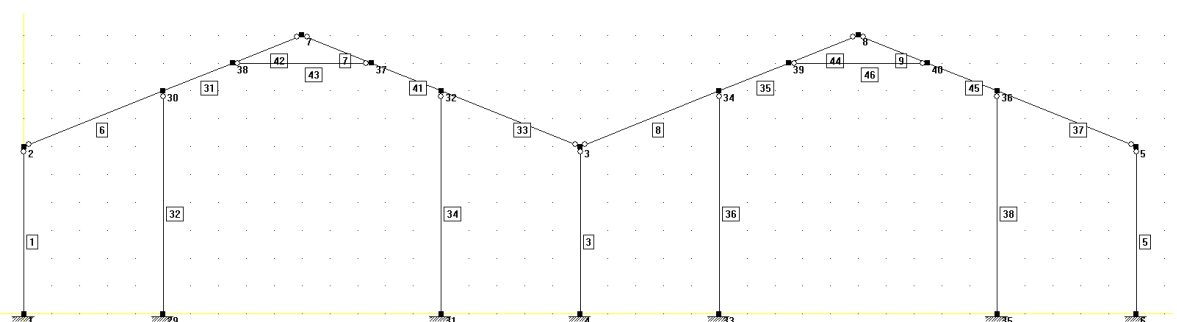
Hallin päädyn rakenne koostuu nurkkapilarien sekä keskilinjan pääty Pilarin ja tuulipilarien päällä olevista päätypalkeista sekä päätypalkkien molemmiin puolin sijoitettavista vetosauvoista. Vetosauvojen tarkoituksena on vähentää laivan keskiosan pitkistä jännevälillä aiheutuvia päätypalkkien suuria rasituksia. Mitoituksessa tarkasteltiin päätypalkin taivutuskestävyys, tukipainekestävyys, kiepahduskestävyys, leikkausvoimakestävyys ja taipuma sekä vetosauvan vetokestävyys.



KUVA 81. Päätykehän sijainti (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 82. Leikkaus 7-7 (Heinonen 2016-05-10)



KUVA 83. Päätykehän staattinen malli (Heinonen 2016-05-10)

**Päätypalkin materiaali**

Kerto-S

|                   |                         |                                       |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällään                   |
| s                 | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | KokovaikutusekspONENTTI               |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeellaan                  |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan                      |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällään            |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                  |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällään        |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeellaan       |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällään                   |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeellaan pintaviilun suuntaan      |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaisihteys                         |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo                    |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

**Yläpohjan kuormat**

|          |                        |                              |
|----------|------------------------|------------------------------|
| $g_{k1}$ | 0,3 kN/m <sup>2</sup>  | yläpohja                     |
| $g_{k2}$ | 0,1 kN/m <sup>2</sup>  | ripustuskuorma               |
| $q_{k1}$ | 2,0 kN/m <sup>2</sup>  | tasainen lumikuorma          |
| $q_{k2}$ | 3,25 kN/m <sup>2</sup> | maksimi kinostuva lumikuorma |

**Mitoittava kuormitusyhdistelmä**

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 7: omapaino 100 % + kinostunut lumi 100 %, keskipitkä aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

$G_k$  (omapaino) +  $Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$1,15K_{FI}G_k$  (omapaino) +  $1,5K_{FI}Q_{k,1}$  (lumi, tapaus ii)

|                 |     |
|-----------------|-----|
| seuraamusluokka | CC2 |
| $K_{FI}$        | 1,0 |

**Mitat**

|   |        |                        |
|---|--------|------------------------|
| b | 183 mm | palkin leveys          |
| l | 183 mm | tuulipilarin leveys    |
| h | 400 mm | palkin korkeus         |
| k | 3,0 m  | palkin kuormitusleveys |

**Kuormat**

Yläpohja käyttörajatilassa

$P_{k,G,yläpohja} = g_{k1} \cdot k$

0,9 kN/m

Ripustuskuorma käyttörajatilassa

$$P_{k,G,ripustus} = g_{k2} \cdot k$$

0,3 kN/m

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus i)

$$P_{k,Q,lumi(i)} = q_{k1} \cdot k$$

6 kN/m

Lumikuorma käyttörajatilassa (tapaus ii)

tasainen lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi(ii),1} = q_{k1} \cdot k$$

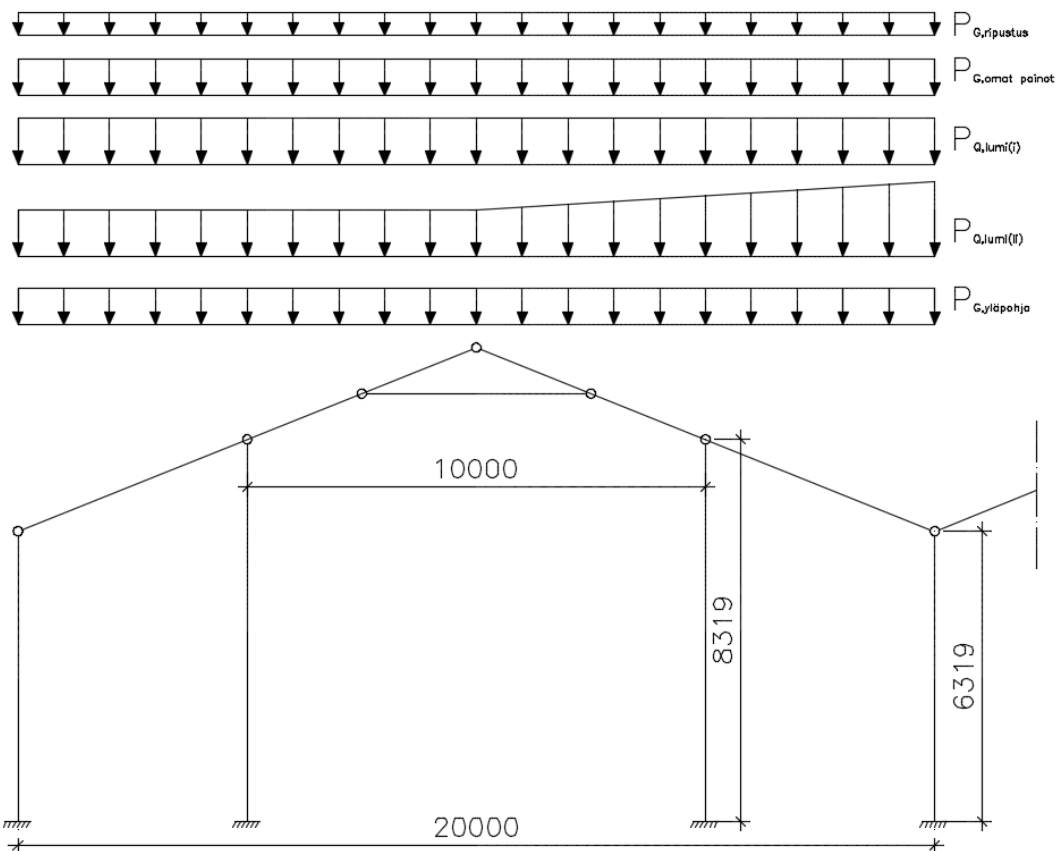
6 kN/m

maksimi kinostuva lumikuorma

$$P_{k,Q,lumi(ii),2} = q_{k2} \cdot k$$

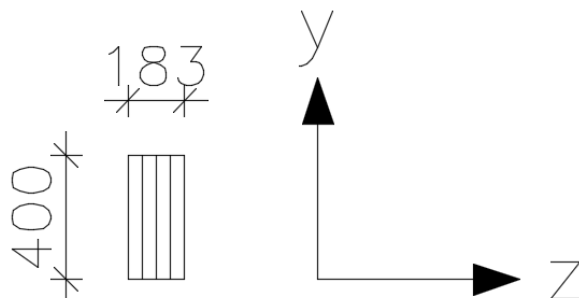
9,75 kN/m

Omat painot tulevat suoraan statiikkaohjelmasta.



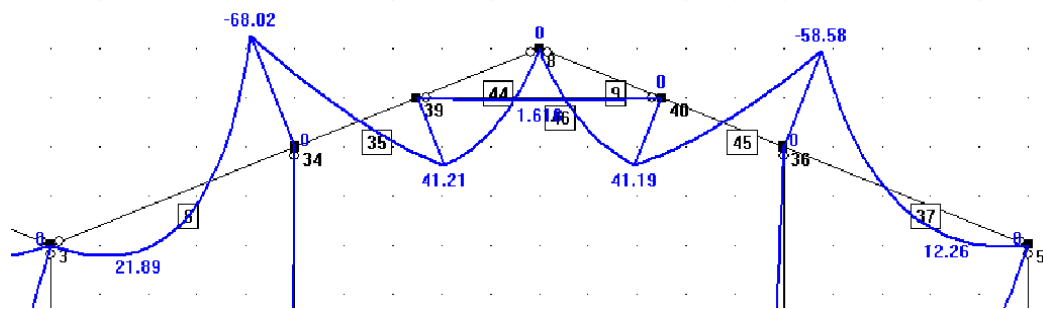
KUVA 84. Päättykehän kuormat (Heinonen 2016-05-10)

### 15.1 Päätypalkki



KUVA 85. Päätypalkin poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

## Taivutuskestävyys



KUVA 86. Momenttikuvio, KY 7 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi taivutusmomentti (statiikkaohjelmasta)

$M_d$  68,02 kNm

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,d} = \frac{\epsilon M_d}{bh^2} \quad 13,9 \text{ N/mm}^2$$

$k_h$  -kerroin

$$k_h = \left(\frac{300}{h}\right)^S \leq 1,2 \quad 0,97 \text{ (3.3)}$$

Taivutuslujuus

$k_{mod}$  0,8 keskipitkä aikaluokka, KL2  
(taulukko 3.1)

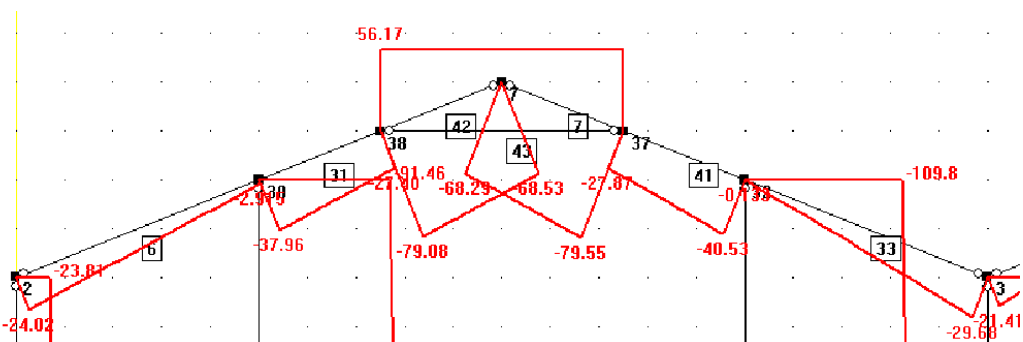
$$f_{m,d} = \frac{k_h f_m k_{mod}}{\gamma_M} \quad 28,3 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad 0,492$$

Käyttöaste 49,2 %

## Tukipainekestävyys palkissa



KUVA 87. Normaalivoimakuvio, KY 7 (Heinonen 2016-05-10)

Tukireaktio (tuulipilarin kohdalla, statiikkaohjelmasta)

$N_d$  40,53 kN

Puristusjännitys palkissa

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_d}{bl} \quad 1,2 \text{ N/mm}^2$$

Palkin puristuslujuus syysuuntaa vastaan

$k_{mod}$  0,8 keskipitkä aikaluokka, KL2  
(taulukko 3.1)

$$f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,ed,ge,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 4,0 \text{ N/mm}^2$$

$k_{c,90}$  -kerroin

$k_{c,90}$  1,4 Kerto-S

Tehollinen kosketuspinnan pituus

$l_{c,90,ef} = 30 \text{ mm} + l + 30 \text{ mm}$  243 mm

Tukipainekerroin

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} \cdot k_{c,90} \quad 1,9$$

Mitoitusehto

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,\perp} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \quad 0,163 \quad (6.3)$$

Käyttöaste 16,3 %

### Kiepahdukestävyys

Maksimi taivutusmomentti kentässä (statiikkaohjelmasta)

$M_d$  41,21 kNm ks. KUVA 75

Taivutusjännitys

$$\sigma_{m,\nu,d} = \frac{6Md}{bh^2} \quad 8,4 \text{ N/mm}^2$$

a 1200 mm kiepahdustuentaväli (=katto-orsien k-jako)

Sivusuunnassa tuetun palkin tehollinen jänneväli

$l_{ef} = a + 2h$  2000 mm

Suorakaidepalkin kriittinen taivutusjännitys

c 0,58 Kerto-S



$$\sigma_{m, \text{crit}} = \frac{cb^2}{hl_{ef}} \cdot E_{0,05} \quad 281,6 \text{ N/mm}^2 \quad (6.31.15)$$

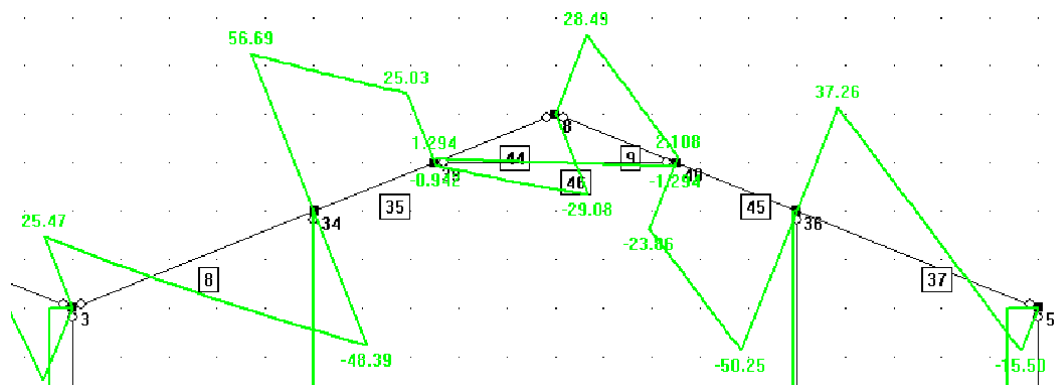
Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m, \text{crit}}}} \quad 0,40 \quad (6.30)$$

$$k_{\text{crit}} = 1 \quad (6.34)$$

Koska  $k_{\text{crit}}=1$ , palkki ei ole kiepahdusherkkä. Näin ollen kiepahduksen jännitysehtoja ei tarvitse tarkastaa.

### Leikkausvoimakkestävyys



KUVA 88. Leikkausvoimakuvio, KY 7 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi leikkausvoima (statiikkaohjelmasta)

$$V_d \quad 56,69 \text{ kN}$$

$k_{\text{cr}}$  -kerroin

$$k_{\text{cr}} \quad 1,0$$

$b_{\text{ef}} = k_{\text{cr}}b$

$$183 \text{ mm (6.13a)}$$

Leikkausjännitys tuella

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{b_{\text{ef}}h} \quad 1,16 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuus

$$k_{\text{mod}} \quad 0,8 \quad \text{keskipitkä aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)}$$

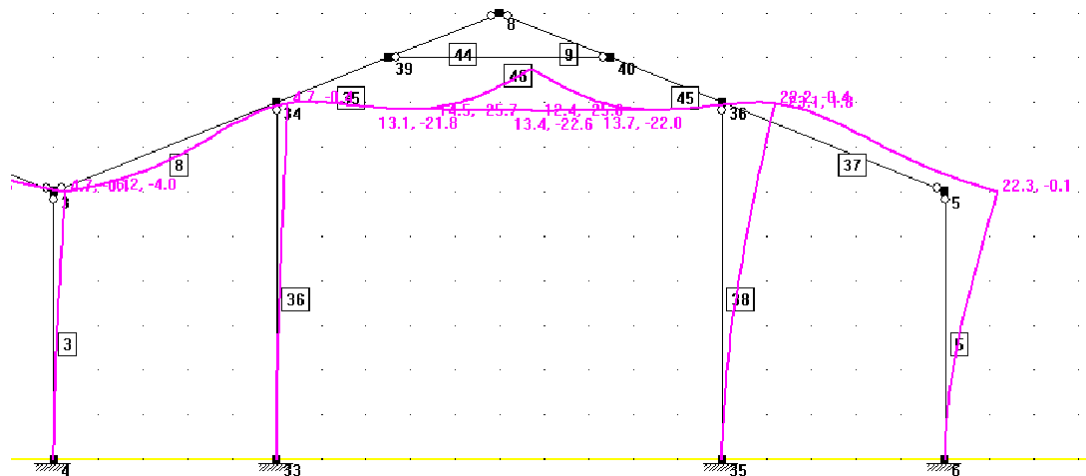
$$f_{v,d} = \frac{f_{v,k} k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \quad 2,73 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1 \quad 0,425 \quad (6.13)$$

$$\text{Käyttöaste} \quad 42,5 \%$$

## Taipuma



KUVA 89. Taipumakuvi, KY 7 (Heinonen 2016-05-10)

Taipuma määritetään statiikkaohjelman avulla.

L 10000 mm tuen keskeltä tuen keskelle

$W_{net,fin}$  23,6 mm taipuma statiikkaohjelmasta

Taipuman enimmäisarvo

L/300

33,3 mm  
(taulukko 7.2)

Mitoitusehto

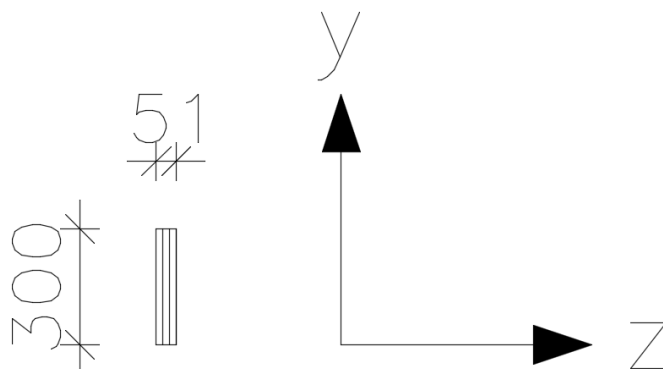
$$\frac{W_{net,fin}}{L/300} \leq 1$$

0,708

Käyttöaste 70,8 %

Päätypalkin koko 183 x 400.

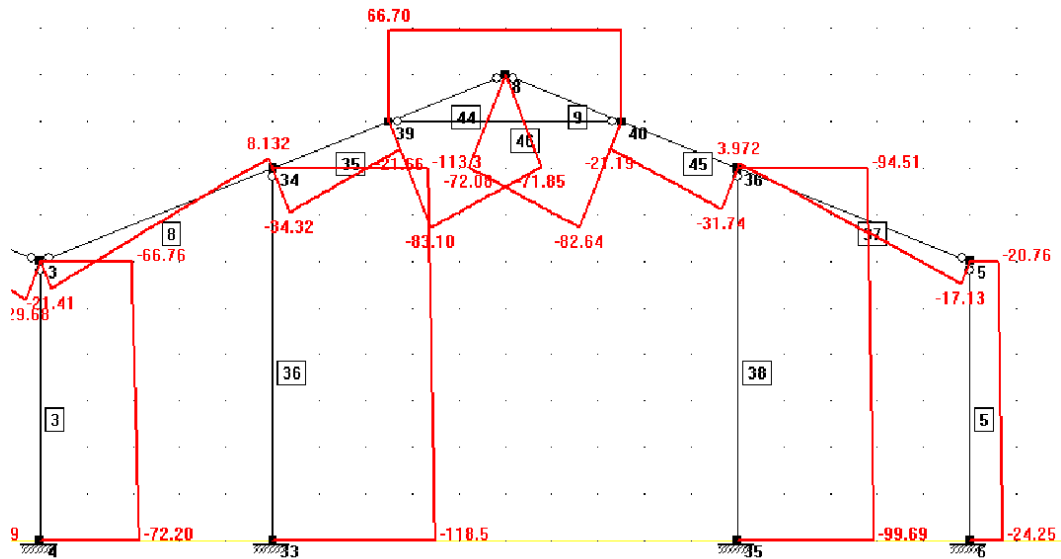
## 15.2 Vetosauva



KUVA 90. Päädyn vetosauvan poikkileikkaus (Heinonen 2016-05-10)

|   |                       |                                  |
|---|-----------------------|----------------------------------|
| l | 6900 mm               | vetosauvan pituus                |
| b | 102 mm                | vetosauvan leveys<br>(= 2x51 mm) |
| h | 300 mm                | vetosauvan korkeus               |
| A | 30600 mm <sup>2</sup> | vetosauvan poikkileikkausala     |

### Vetokestävyys



KUVA 91. Normaalivoimakuvio, KY 7 (Heinonen 2016-05-10)

Maksimi normaalivoima (statiikkaohjelmasta)

$N_d$  66,70 kN

$k_{mod}$  0,8 keskipitkä aikaluokka, KL2  
(taulukko 3.1)

Vetojäännitys

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A} \quad 2,18 \text{ N/mm}^2$$

$k_l$  -kerroin

$$k_l = \left(\frac{3000}{l}\right)^{s/2} \leq 1,1 \quad 0,95$$

Vetolujuus

$$f_{t,0,d} = \frac{k_l f_{t,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 22,2 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

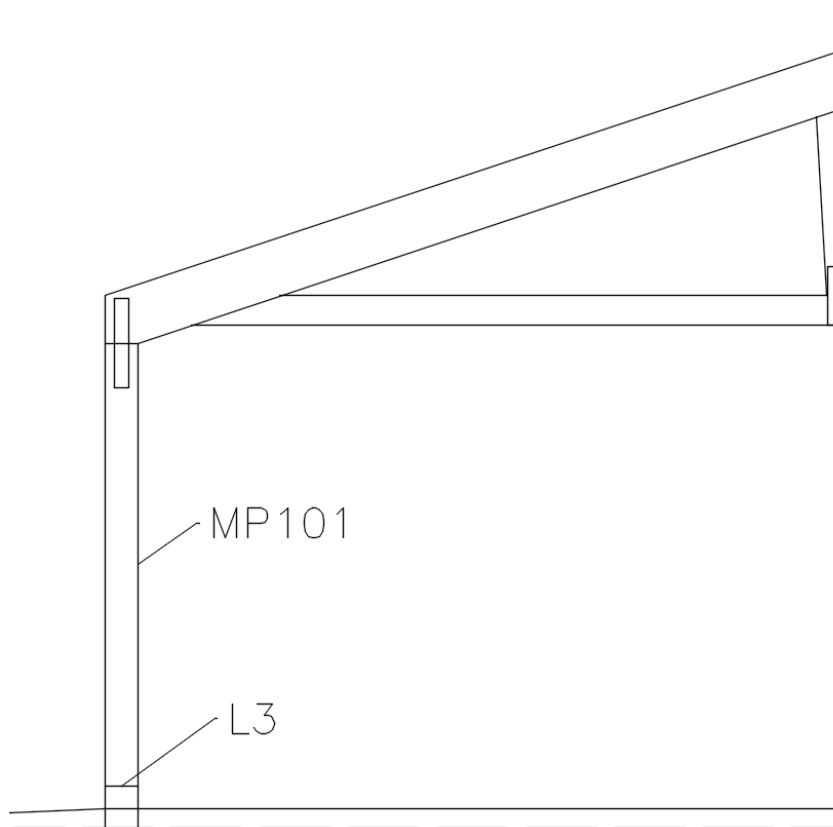
$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1 \quad 0,098 \quad (6.1)$$

Käyttöaste 9,8 %

Vetosauvan koko 51 x 300.

## 16 MASTOPILARIN MOMENTTIJÄYKKÄ PERUSTUSLIITOS

Mastopilarin momenttijäykkä perustusliitos toteutetaan liimaruuviliitoksena. Laskelmissa käytetään liimapuupilarin mitoituksessa käytettäviä laskentaohjeita ja liimaruuvien kapasiteetteja, koska vastaavia ohjeita ei ollut saatavana LVL:lle. Liimaruuviliitoksen etuna on se, että liimaruuvit jäävät pilarin sisään, joten niitä ei tarvitse erikseen palosuoja. Liitoksen muut teräsovat taas jäävät jälkivalun sisään suojaan.



KUVA 92. Liitoksen sijainti (Heinonen 2016-05-10)

### Materiaalit

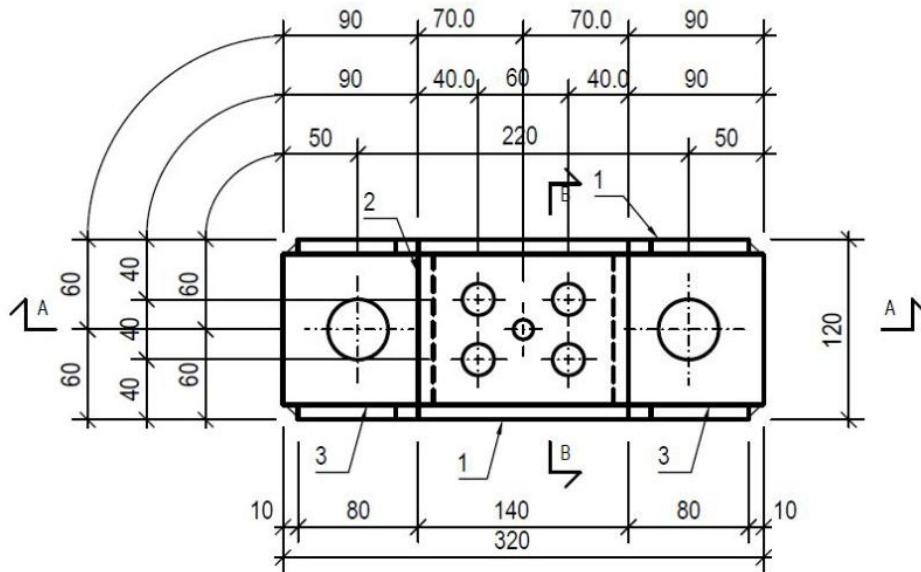
#### Kerto-S

|                   |                         |                                       |
|-------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $f_{m,k}$         | 44 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus syrjällä                     |
| $s$               | 0,12 N/mm <sup>2</sup>  | Kokovaikutuseksponentti               |
| $f_{m,0,flat,k}$  | 50 N/mm <sup>2</sup>    | Taivutus lappeella                    |
| $f_{t,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Veto syysuuntaan                      |
| $f_{t,90,edge,k}$ | 0,8 N/mm <sup>2</sup>   | Veto poikittain syrjällä              |
| $f_{c,0,k}$       | 35 N/mm <sup>2</sup>    | Puristus syysuuntaan                  |
| $f_{c,90,edge,k}$ | 6,0 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain syrjällä          |
| $f_{c,90,flat,k}$ | 1,8 N/mm <sup>2</sup>   | Puristus poikittain lappeella         |
| $f_{v,k}$         | 4,1 N/mm <sup>2</sup>   | Leikkaus syrjällä                     |
| $f_{r,0,k}$       | 2,3 N/mm <sup>2</sup>   | Lappeella pintaviulun suuntaan        |
| $E_{mean}$        | 13800 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $E_{0,05}$        | 11600 N/mm <sup>2</sup> | Kimmomoduuli                          |
| $G_{edge, mean}$  | 600 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $G_{edge, 0,05}$  | 400 N/mm <sup>2</sup>   | Liukumoduuli                          |
| $\rho_k$          | 480 kg/m <sup>3</sup>   | Ominaisihteys                         |
| $\rho_{mean}$     | 510 kg/m <sup>3</sup>   | Tiheyden keskiarvo                    |
| $\gamma_M$        | 1,2                     | materiaaliominaisuuden osavarmuusluku |

|                |         |   |
|----------------|---------|---|
| Teräs          |         |   |
| $R_{y,k}$      | 101 kN  | myötäämisestä riippuva vetokestävyyden arvo, lujuusluokka 5.8 |
| $R_{a,k}$      | 67,2 kN | tartuntakestävyyden ominaisarvo, lujuusluokka 5.8, KL 2       |
| $\gamma_{M,y}$ | 1,1     | ruuvien myötäämisen osavarmuusluku                            |

### Mitat

|          |        |                          |
|----------|--------|--------------------------|
| b        | 225 mm | pilarin leveys           |
| h        | 450 mm | pilarin korkeus          |
| D        | 19 mm  | liimaruuvien halkaisija  |
| $L_{ef}$ | 490 mm | tartuntapituus pilarissa |



KUVA 93. Pilarikenkä (Puuinfo 2015, Mastopilarin perustusliitos liimaruuveilla, 4)

### Mitoittava kuormitusyhdistelmä

Mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY 3: omapaino 100 % + tuuli 100 % + kinostunut lumi 70 %, hetkellinen aikaluokka.

Kuormitusyhdistelmä käyttörajatilassa

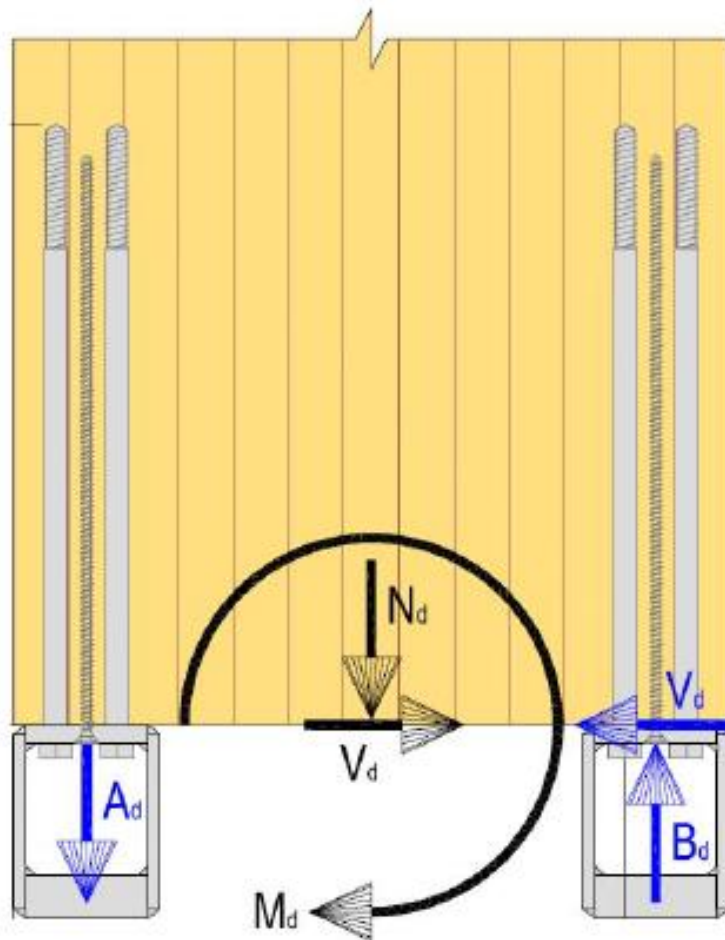
$$G_k (\text{omapaino}) + Q_{k,1} (\text{tuuli}) + \psi_0 Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

Kuormitusyhdistelmä murtorajatilassa

$$1,15 K_{FI} G_k (\text{omapaino}) + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} (\text{tuuli}) + 1,5 K_{FI} \psi_{0,2} Q_{k,2} (\text{lumi, tapaus ii})$$

### Rasitukset

|       |          |  |
|-------|----------|--|
| $V_d$ | 27,0 kN  | leikkausvoima (statiikkaohjelmasta), ks. KUVA 25 |
| $M_d$ | 67,7 kNm | momentti (statiikkaohjelmasta), ks. KUVA 22      |
| $N_d$ | 184,5 kN | normaalivoima (statiikkaohjelmasta), ks. KUVA 21 |



KUVA 94. Pilarin alapään liitokseen kohdistuvat voimat (Puuinfo 2015, Mastopilarin perustusliitos liimaruuveilla, 4)

$$e = h - (2 \cdot (40 \text{ mm} + 20 \text{ mm})) \quad 330 \text{ mm}$$

puristetun puolen liimaruuvit ( $n = 4$  kpl):

$$B_d = \frac{M_d}{e} + \frac{N_d}{2} \quad 297,5 \text{ kN}$$

vedetyn puolen liimaruuvit ( $n = 4$  kpl):

$$A_d = \frac{M_d}{e} - \frac{N_d}{2} \quad 113,0 \text{ kN}$$

### 16.1 Ulosvetokestävyys

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$R_{a,x,d} = \min\left[\frac{R_{y,k}}{\gamma_{M,y}}; k_{mod} \frac{R_{a,k}}{\gamma_M}\right] \quad 61,6 \text{ kN}$$

Liitoksen vedetyllä puolella on liimaruuveja 4 kpl

$$F_{t,d} = A_d \leq n t^{0,9} R_{a,x,d} \quad 113,0 \leq 214,5$$

käyttöaste 52,7 %

Puristuspuoli mitoitetaan pilarikengän leveyden mukaan

$k_{mod}$  1,1 hetkellinen aikaluokka, KL2 (taulukko 3.1)

$$f_{c,0,d} = \frac{f_{c,0,k} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

$$A = 100 \text{ mm} \cdot 140 \text{ mm} \quad 14000 \text{ mm}^2$$

$$\frac{B_d}{A} \leq f_{c,0,d} \quad 21,3 \leq 32,1$$

käyttöaste 66,2 %

## 16.2 Leikkauskestävyys

Leikkauskestävyys otetaan puristetuilla ruuveilla. Yhden puristetun ruuvin kapasiteetti saadaan taulukosta 3.

TAULUKKO 3. Puristetun liimaruuviliitoksen leikkauskestävyyden mitoitusarvo  $R_{v,d}$  [kN] yhtä ruuvia kohden käyttöluokissa 1 ja 2, kun ruuvien etäisyys poikkileikkauksen leikkauskuormitetusta reunasta on  $\geq 0,5h$  ja ruuvien keskiöetäisyys  $a_h \geq a_{h,s}$  (Puuinfo 2015, Mastopilarin perustusliitos liimaruuveilla, 6).

| Ruuvi \ Aikaluokka | pysyvä | keskipitkä | hetkellinen |
|--------------------|--------|------------|-------------|
| S235JRG2           | 5,2    | 6,0        | 7,0         |
| Lujuusluokka 5.8   | 6,1    | 7,1        | 8,3         |

Tarkastetaan leikkauskuormitettujen ruuvien reunaetäisyyskuormitetusta reunasta:  
 $0,5 \cdot 450 \text{ mm} = 225 \text{ mm} < 330 \text{ mm}$ , ok

Liimaruuvien lujuusluokka on 5.8 ja aikaluokka hetkellinen:

$$R_{v,d} \quad 8,3 \text{ kN}$$

Koko liitoksen leikkauskestävyys:

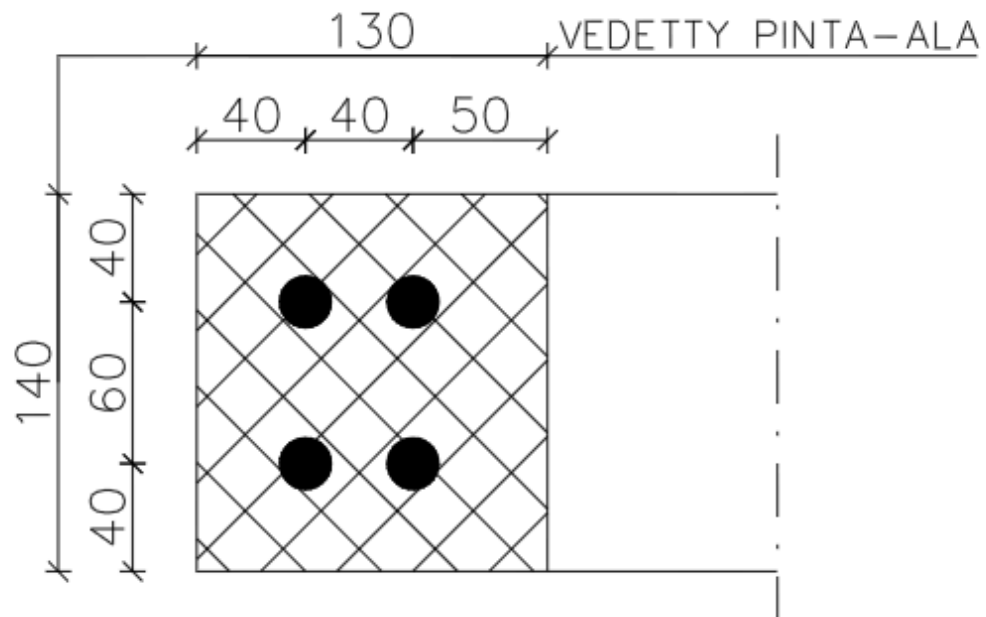
$$4 \cdot R_{v,d} \quad 33,2 \text{ kN}$$

$$4 \cdot R_{v,d} > V_d \quad 33,2 > 27,0$$

käyttöaste 81,4 %

## 16.3 Lohkeamismurtokestävyys

Lasketaan tehollinen pinta-ala  $A_{ef}$ , jossa huomioidaan liimaruuveja varten poratut reiät  $D = 16 \text{ mm}$ . Tehollinen pinta-ala ulottuu enintään  $50 \text{ mm}$ :n päähän ruuvista. Jos pinta-alat menevät päällekkäin, samaa alaa ei huomioida kahteen kertaan.



KUVA 95. Tehollinen pinta-ala (Puuinfo 2015, Mastopilarin perustusliitos liimaruuveilla, 6)

$$A_{ef} = 140 \text{ mm} \cdot 130 \text{ mm} \quad 18200 \text{ mm}^2$$

$$k_{mod} \quad 1,1 \quad \text{hetkellinen aikaluokka, KL2} \quad (\text{taulukko 3.1})$$

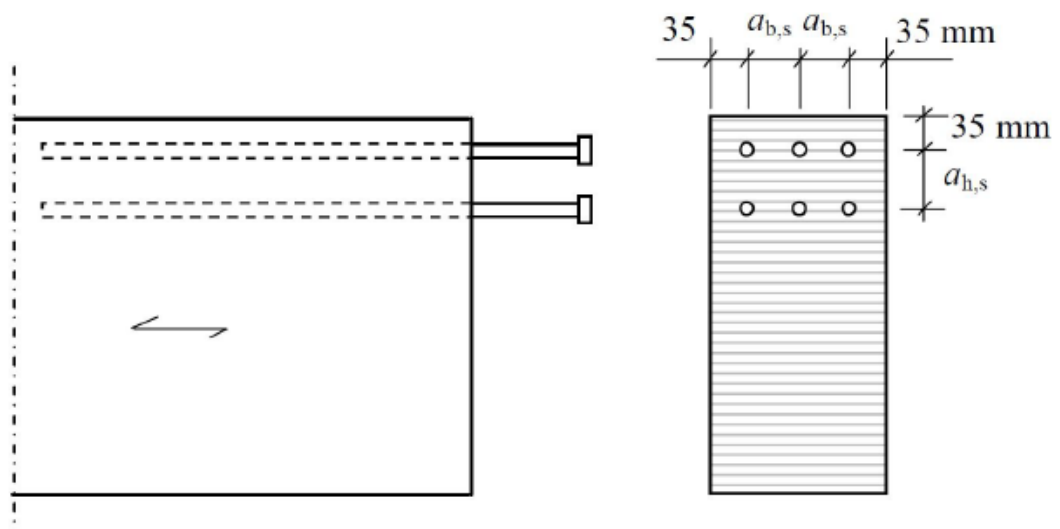
$$f_{t,0,d} = \frac{f_{t,0,k} k_{mod}}{\gamma_M} \quad 32,1 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,0,d} \cdot A_{ef} \geq N_d = A_d \quad 583,9 \geq 113,0$$

$$\text{käyttöaste} \quad 19,4 \%$$

#### 16.4 Liimaruuvien reunaetäisyydet ja liitinvälit

Pienimmät sallittavat liimaruuvien reunaetäisyydet ja keskinäiset etäisyydet on esitetty kuvassa 96. Esitetyt arvot edellyttävät, että liimaruuvien valmistuksessa reiän kohdistustarkkuus on  $\pm 2 \text{ mm}$  ja, että poratun reiän vinous on enintään  $L/100$ .



KUVA 96. Liimaruuvien reunaetäisyydet ja liitinvälit (Puuinfo 2015, Mastopilarin perustusliitos liimaruuveilla, 7)



$a_{b,s}$  60 mm  
 $a_{h,s}$  75 mm

## 16.5 Pilarikengän kestävyys

Pilarikengän kestävyys voidaan tarkastaa taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Pilarikengien vetokapasiteetit lopputilanteessa (Puuinfo 2015, Mastopilarin perustusliitos liimaruuveilla, 7)

| <b>Vetokapasiteetti lopputilanteessa <math>N_{Rd}</math> [kN]</b> |                                      |     |     |     |
|---|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| Pilarikengä   | Liimaruuvien lukumäärä / pilarikengä |     |     |     |
|   | 10                                   | 8   | 6   | 4   |
| 265   | 575                                  | 475 | 375 | -   |
| 240   | 575                                  | 475 | 375 | -   |
| 215   | -                                    | 475 | 375 | -   |
| 190   | -                                    | 475 | 375 | -   |
| 165   | -                                    | -   | 375 | 260 |
| 140   | -                                    | -   | -   | 260 |
| 115   | -                                    | -   | -   | 260 |

$$N_{R,d} \geq N_d \qquad 260,0 \geq 184,5$$

käyttöaste 71,0 %

Asennusaikainen kestävyys sekä peruspulttien kapasiteetti on tarkasteltava erikseen.

## 17 YHTEENVETO

Hallin suunnittelu ja mitoitus oli ennako-odotuksiin nähden varsin haastavaa ja työlästä. Oli yllättävää huomata, kuinka paljon melko yksinkertaisenkin rakennuksen rakenteiden suunnittelu vaatii työtä ja aikaa. Tässä insinööriyössä ei edes pystytty mitoittamaan koko rakennusta, vaan etenkin liitosten suunnittelua jouduttiin jättämään vähemmälle työn laajuuden kohtuullisena pitämisen vuoksi. Suunnittelutyön aikana vastaan tuli haasteita, joita ei rakennesuunnittelijan opintojeni aikana ollut tullut esille. Varsinkin A-kattotuolin mitoittaminen tuotti haasteita, koska ristikoiden suunnittelun opetus oli opintojaksoilla hyvin vähäistä. Kysymyksiin etsittiin vastauksia niin kirjallisuudesta kuin ohjaavilta opettajiltakin ja lopulta vastaukset aina löytyivätkin. Opinnäytetyöprosessi oli kaikkiaan hyvin opettavainen projekti. Pääsin soveltamaan ja syventämään opinnoista saamiani tietoja ja kehityin rakennesuunnittelijana.

## LÄHTEET

Puinfo. 2015. Esimerkkilaskelma mastopilarin perustusliitos liimaruuveilla.

Puinfo. 2015. Esimerkkilaskelma tappivaarnaristikon yläpaarten tuenta levyjäykisteellä.

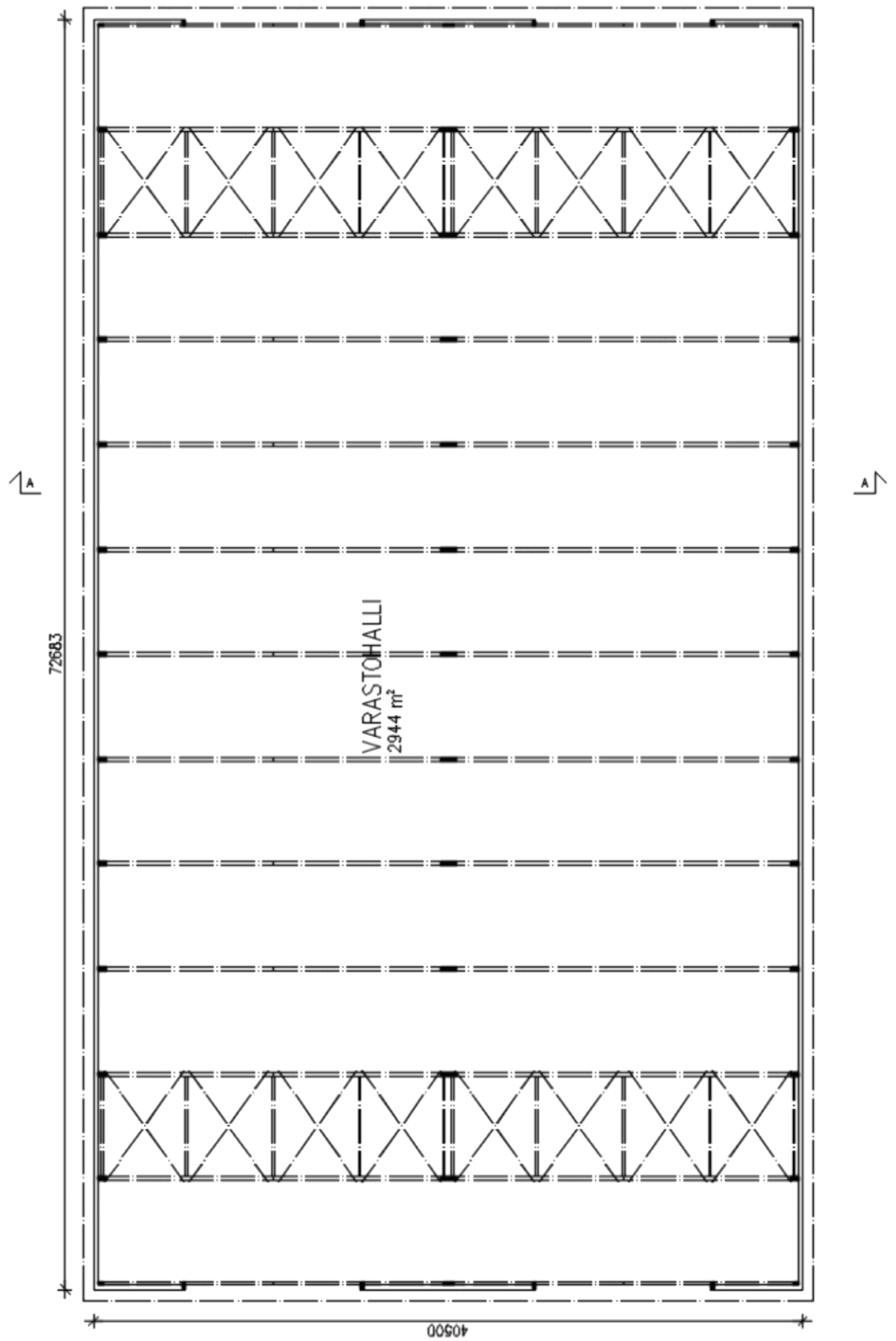
Puinfo.fi [verkkoaineisto]. [viitattu 2016-04-25] Saatavissa: <http://www.puinfo.fi/>

Polku: puinfo.fi. Puutieto. Insinööripuutuotteet. Viilupuu (LVL,KERTOPUU).

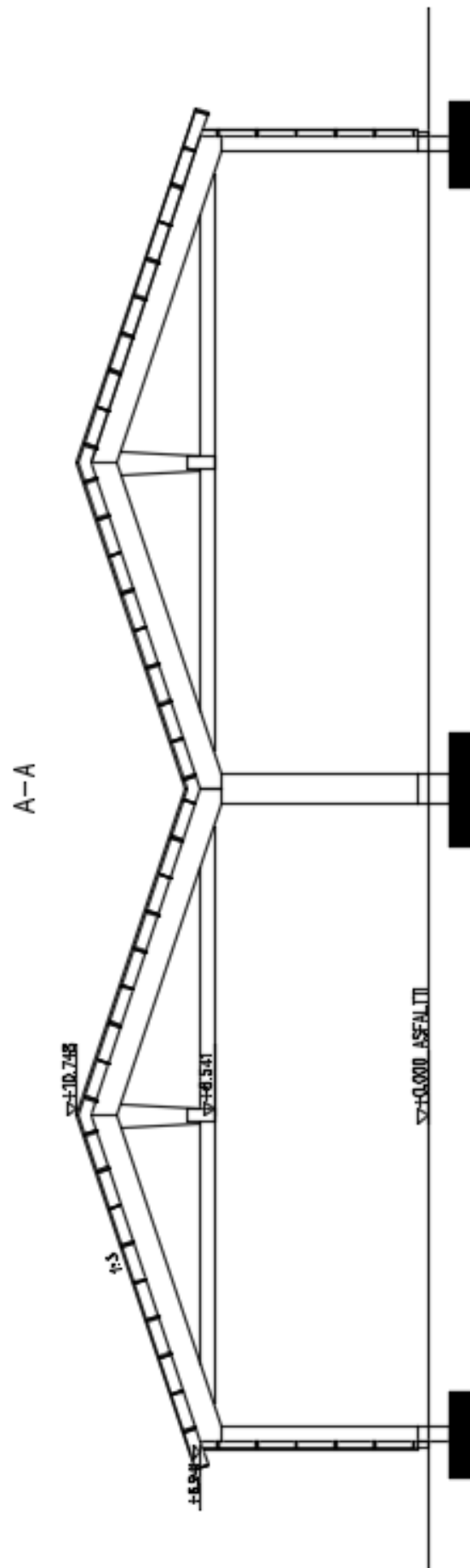
PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELUOHJE: RIL 205-1-2009. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

SUUNNITTELUPERUSTEET JA RAKENTEIDEN KUORMAT: RIL 201-1-2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry

## LIITE 1: POHJAPIIRUSTUS

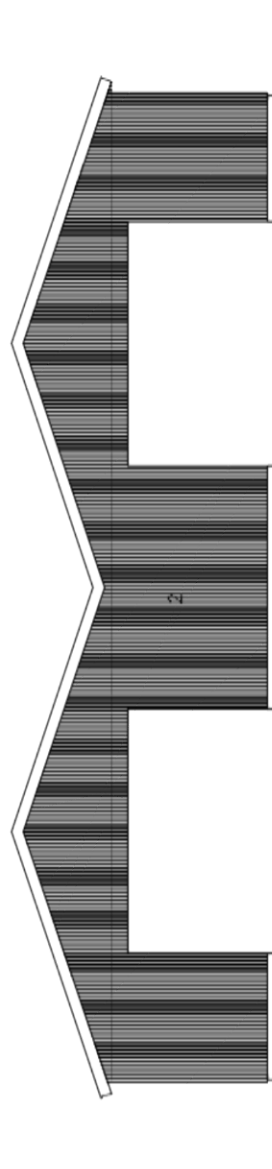


## LIITE 2: LEIKKAUSPIIRUSTUS



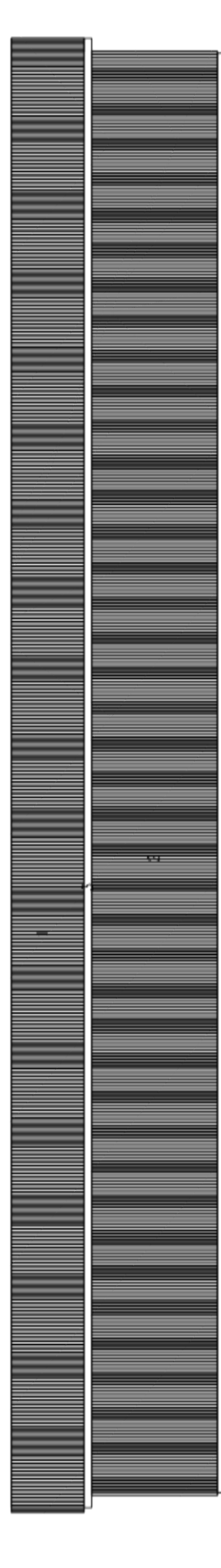
## LIITE 3: JULKISIVUT

JULKISIVU LOUNAASEN/KOILLISEEN



- 1 PELTIKATE, sinkitty
- 2 LOMALAUDOTTUS, punainen
- 3 PUU

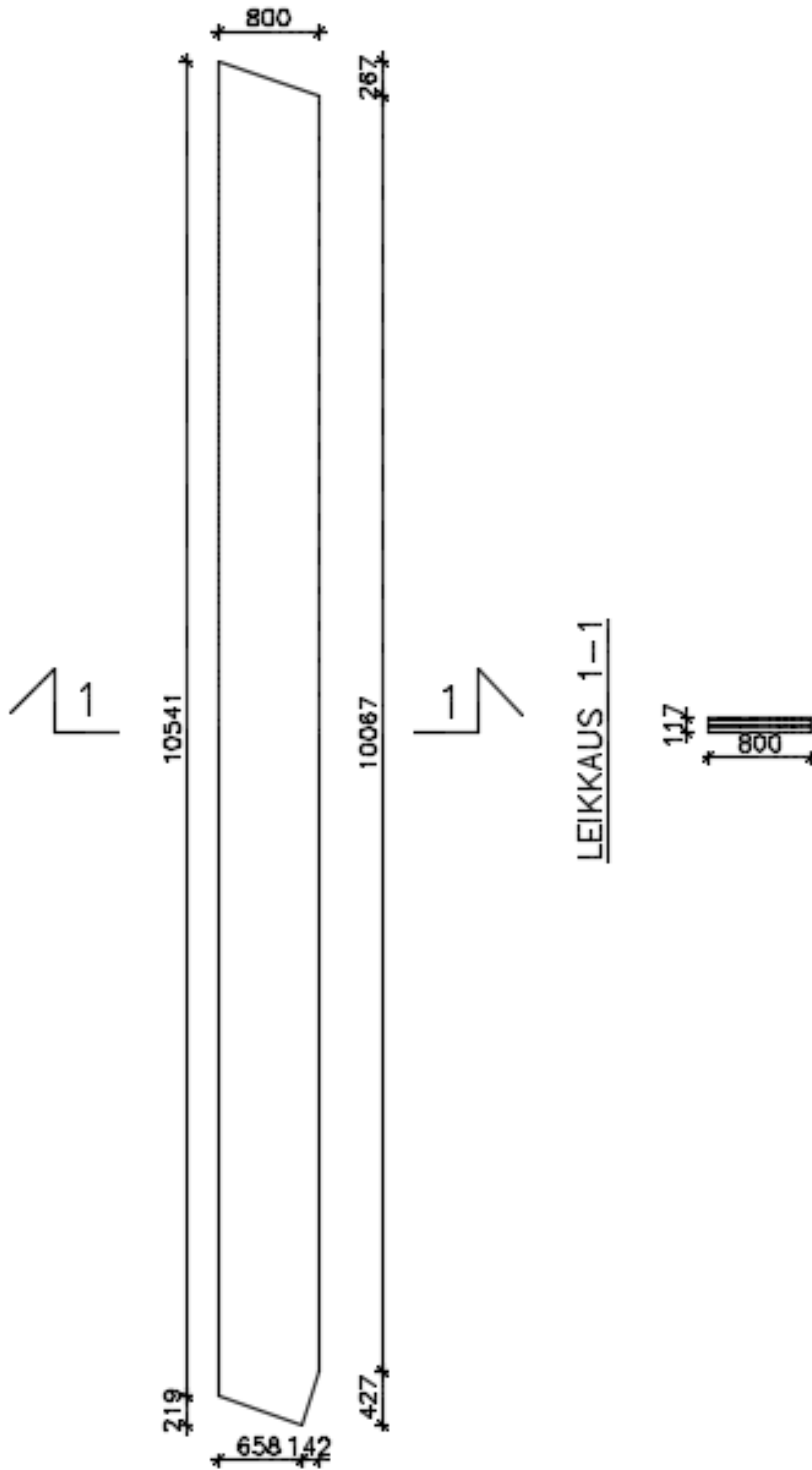
JULKISIVU KAAKKOON/LUOTEESEEN



## LIITE 4: OSAPIIRUSTUKSET

KATTOTUOLIN  
YLÄPAARRETYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

1

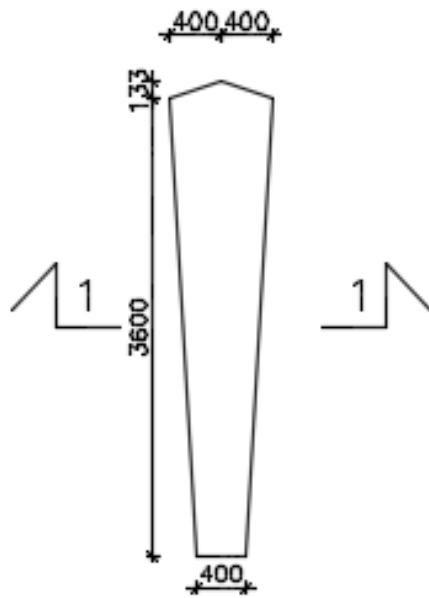


|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 88 KPL  |

KATTOTUOLIN  
VERTIKAALI

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

2



LEIKKAUS 1-1

75

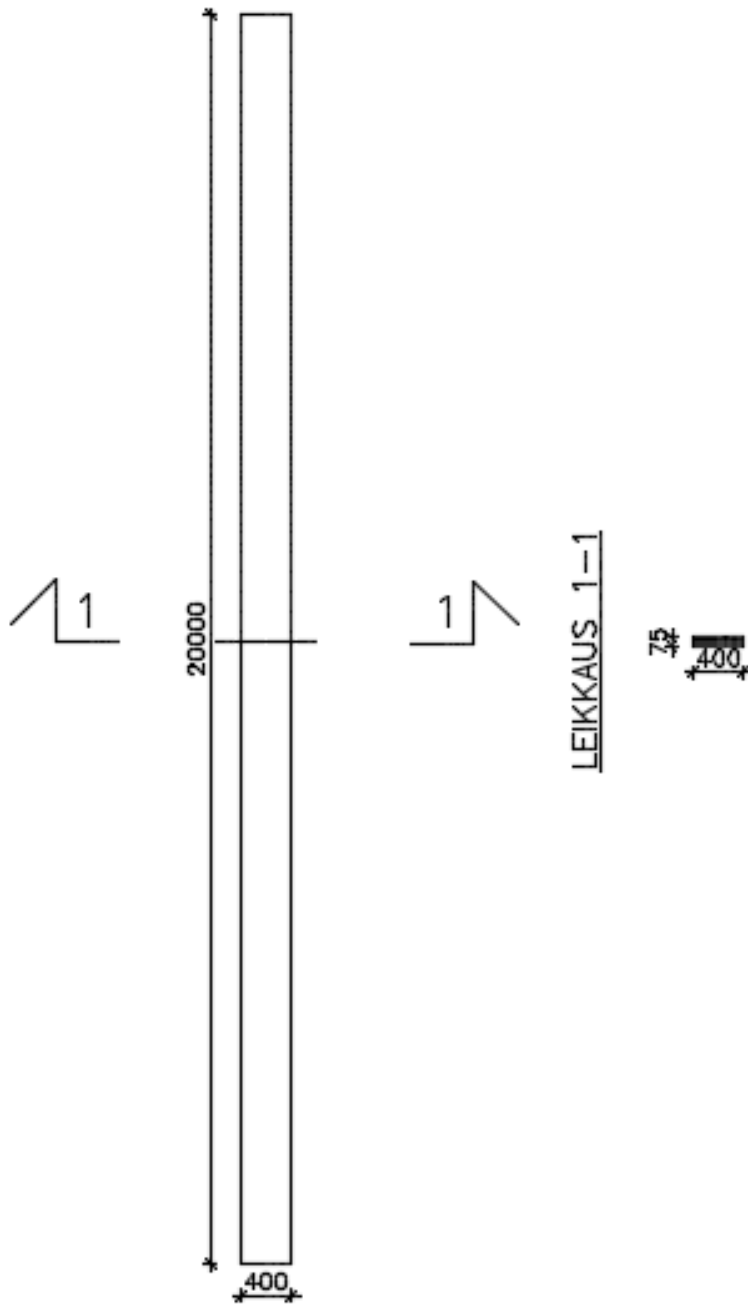
|                        |         |
|------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:        | -       |
| MATERIAALI:            | KERTO-S |
| LITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:          | 22 KPL  |



KATTOTUOLIN  
ALAPAAARRE

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

3

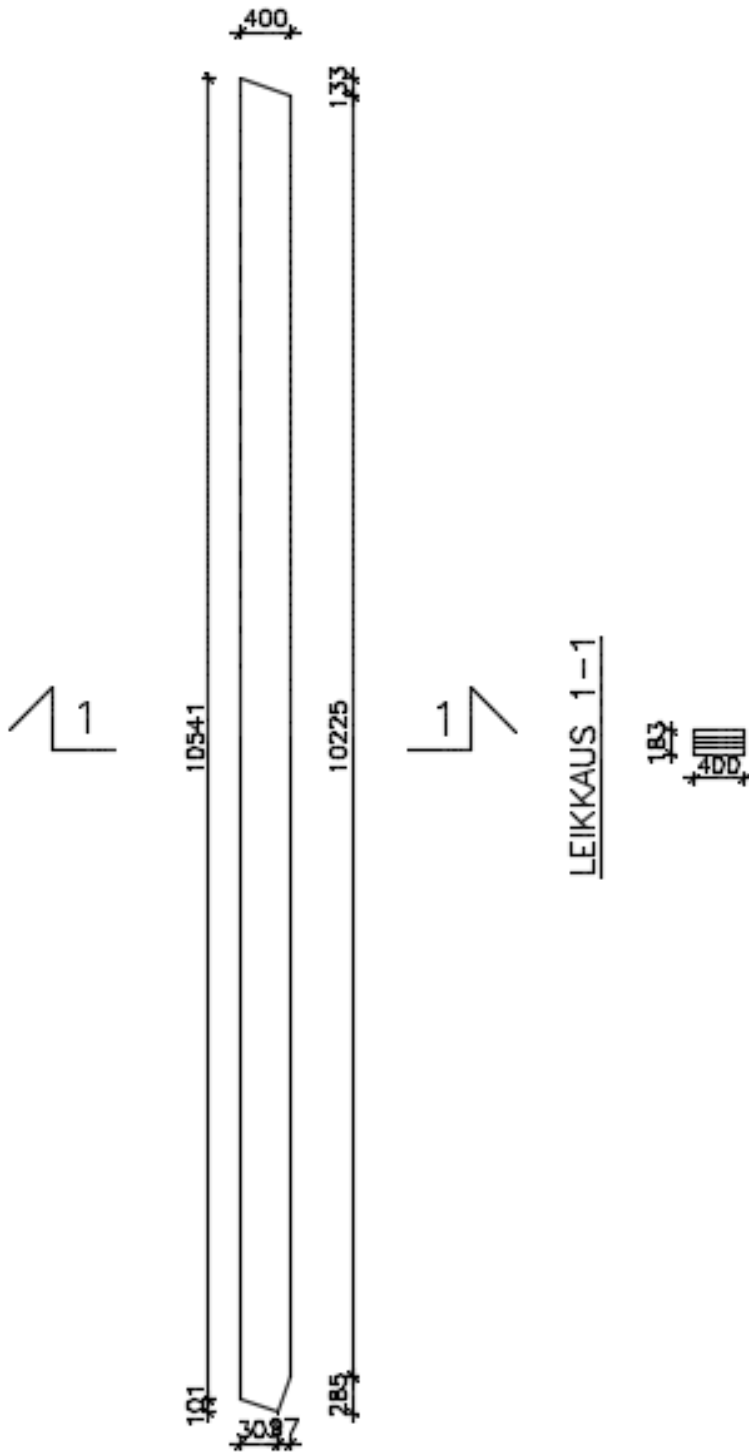


|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 22 KPL  |

PÄÄTYPALKKI

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

4

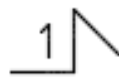
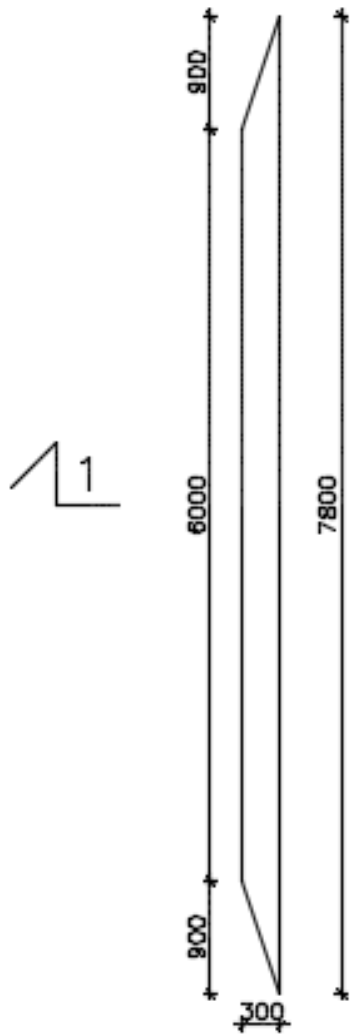


|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 0 KPL   |

PÄÄTYKEHÄN  
VETOSAUVA

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

5



LEIKKAUS 1-1

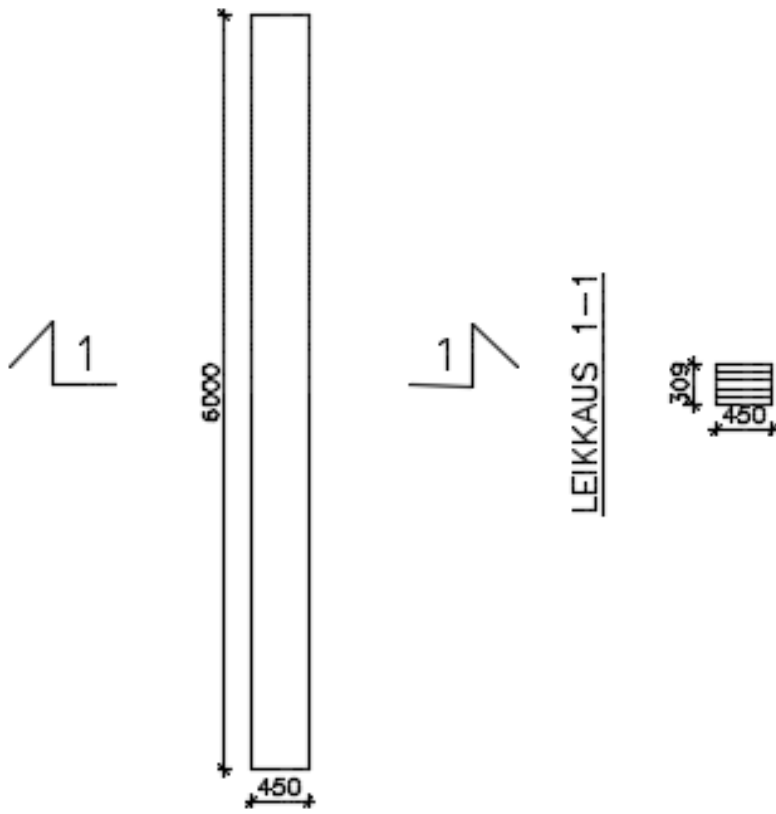
5:1  
300

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 8 KPL   |

ULKOSEINÄLINJAN  
MASTOPILARI

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

6

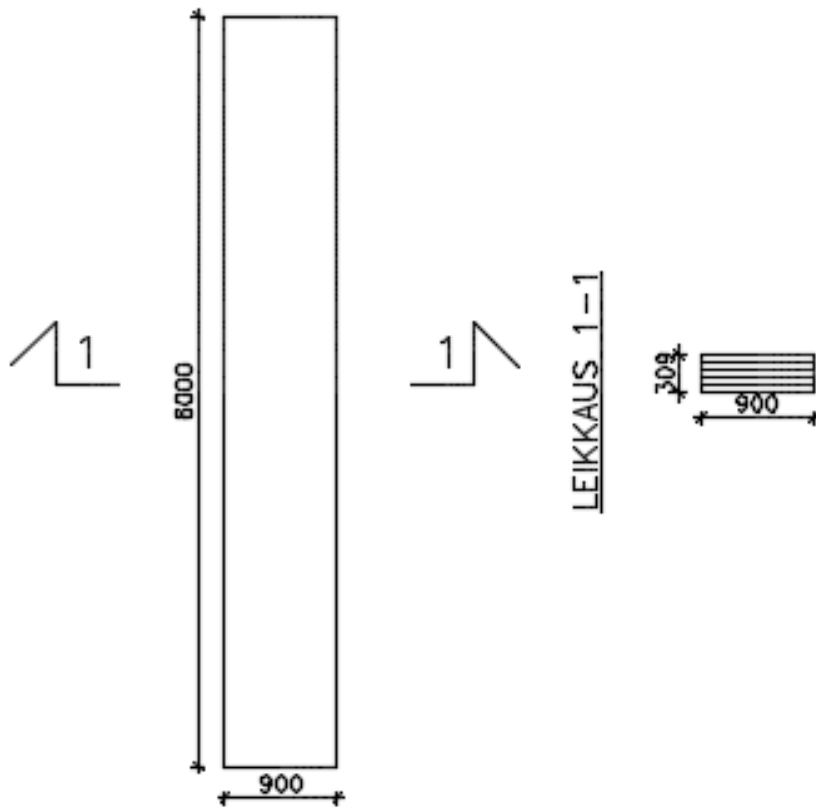


|                        |         |
|------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:        | -       |
| MATERIAALI:            | KERTO-S |
| LITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:          | 22 KPL  |

KESKILINJAN  
MASTOPILARI

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

7

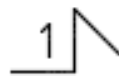
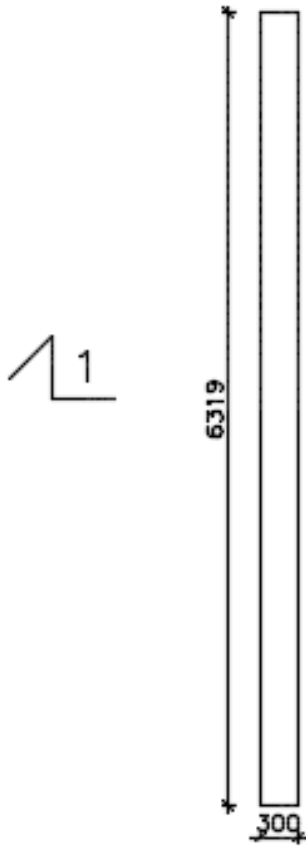


|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 11 KPL  |

NURKKAPILARI

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

8



LEIKKAUS 1-1

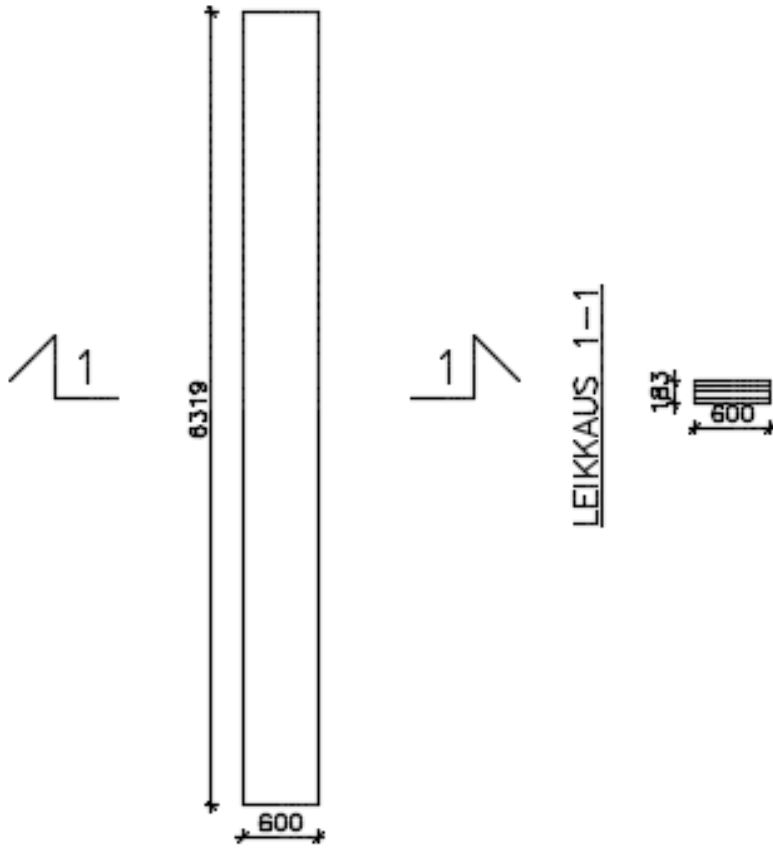


|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 4 KPL   |

KESKILINJAN  
PÄÄTYPILARI

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

9

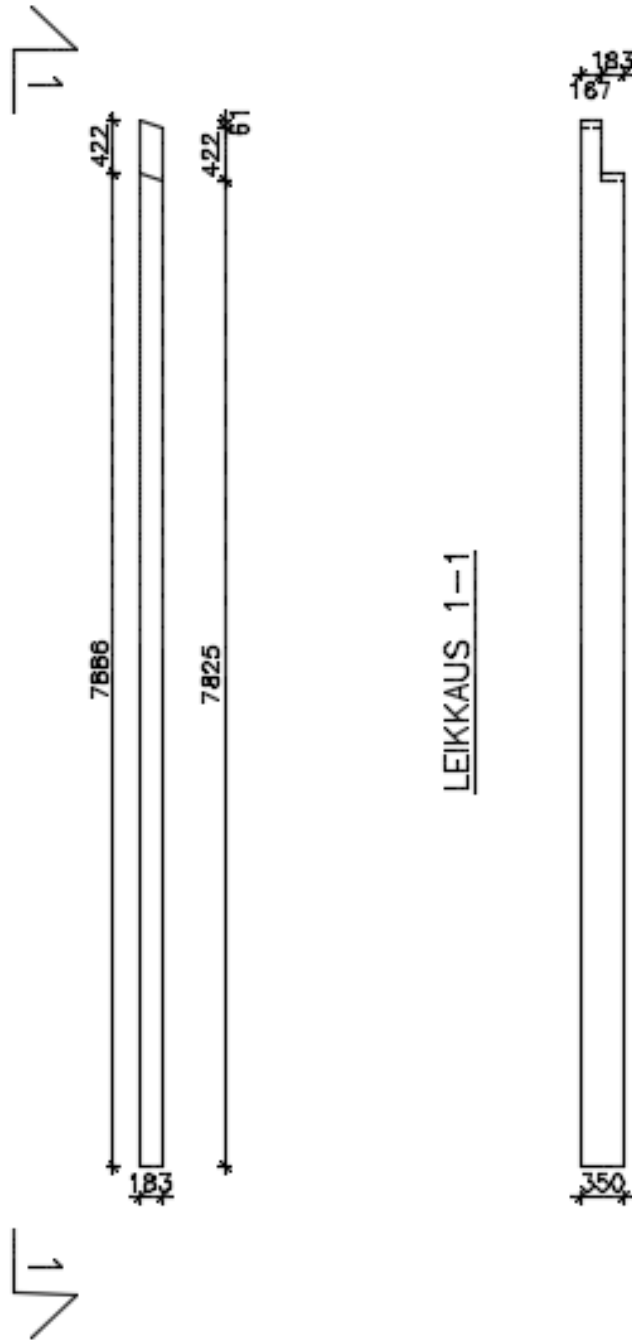


|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 2 KPL   |

TUULIPILARI 1

TYÖ N:0 101  
LEIKKAUS

10



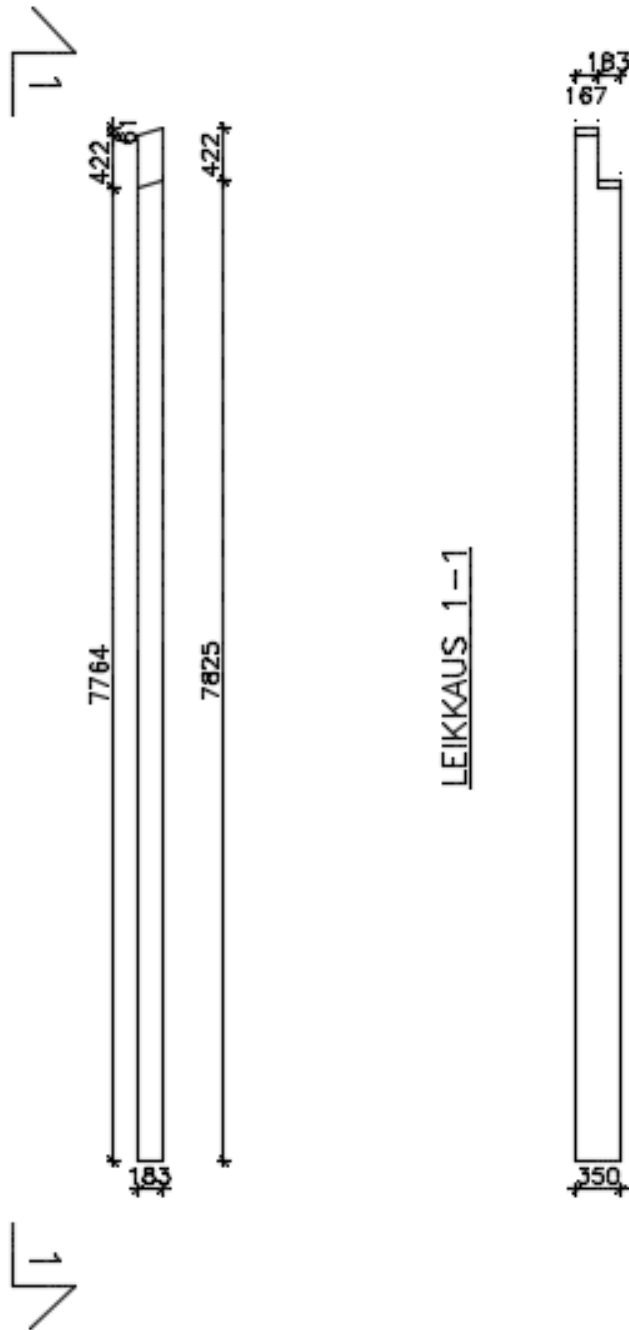
|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALM.STEIJÄÄN:          | 4 KPL   |



TUULIPILARI 2

TYÖ N:O 101  
LEIKKAUS

11

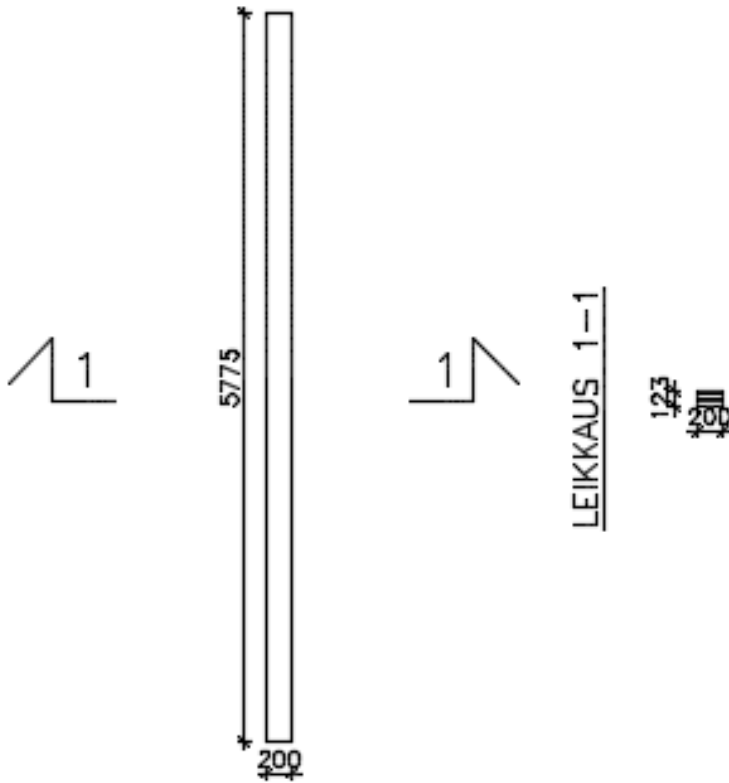


|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PINTAKÄSITTELY:         | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 4 KPL   |

JÄYKISTERISTIKON  
PURISTUSSAUVA

TYÖ N:0 101  
LEIKKAUS

12



|                         |         |
|-------------------------|---------|
| PIINTAKÄSITTELY:        | -       |
| MATERIAALI:             | KERTO-S |
| LIITTYVÄT PIIRUSTUKSET: | -       |
| VALMISTETAAN:           | 24 KPL  |