

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Talorakennustekniikka  
Timo Hietanen

Opinnäytetyö

## **NR-kattojen jäykistyslementtien laskennallinen analyysi**

Työn ohjaaja

Lehtori Raimo Koreasalo, TAMK

Työn tilaaja

Dosentti Tuomo Poutanen

Tampere 6/2010

Hietanen, Timo  
NR-kattojen jäykistyslementtien laskennallinen analyysi  
30 sivua + CD-ROM  
Kesäkuu 2010  
Työn ohjaaja Raimo Koreasalo  
Työn tilaaja Tuomo Poutanen

---

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoituksena oli analysoida laskennallisesti Tuomo Poutasen kehittämien, sormi-jatketusta laudasta valmistettujen naulalevyristikkokattojen jäykistyskappaleiden toimintaa eri kuormitustilanteissa ja erikokoisilla ristikoilla. Poutasen uudenlainen jäykistyskonsepti on tarkoi-tettu korvamaan nykyisin käytössä olevat jäykistysmenetelmät mittatarkoilla ja nopeasti asennet-tavilla elementeillä.

Jäykistyslementtien analysointi tehtiin käyttäen 3-ulotteista FEM-laskentaohjelma Ansysiä, minkä lisäksi rakenteiden kriittisimpiä kohtia tutkittiin käsin käyttäen apuna taulukkolaskentaoh-jelmaa. Laskelmien perusteella jäykistyskonseptin mukaisia U-pukkeja voidaan käyttää NR-kattojen jäykistämiseen, mutta suunnitteluohjeen laatiminen kyseisille elementeille edellyttää vielä jatkolaskelmien tekemistä.



## Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	8
2	Tutkittavat jäykistyskappaleet .....	10
2.1	L- ja U-pukit.....	10
2.2	Seinäpukki.....	10
3	Laskennan suorittaminen.....	11
3.1	Kuormitustapaukset .....	11
3.2	Käytetyt ristikot.....	11
3.3	Rakenteiden mallinnus.....	12
3.3.1	Geometria.....	12
3.3.2	Elementit .....	13
3.3.3	Materiaaliominaisuudet.....	13
3.4	Koneellinen laskenta.....	15
3.5	Käsin tehdyt tarkastelut .....	15
3.5.1	Yksittäiset jännitykset.....	16
3.5.2	Yhdistetyt rasitukset.....	17
4	Keskeiset tulokset.....	20
4.1	L-pukki.....	20
4.1.1	Ristikko 6,3 m; asennus; pukit 22 mm x 100 mm.....	20
4.1.2	Ristikko 6,3 m; lopullinen tilanne; pukit 22 mm x 100 mm .....	21
4.1.3	Ristikko 13,6 m; asennus; pukit 25 mm x 125 mm.....	21
4.1.4	Yhteenveto.....	21
4.2	U-pukki .....	22
4.2.1	Ristikko 6,3 m; asennus; pukit 22 mm x 100 mm.....	22
4.2.2	Ristikko 6,3 m; lopullinen tilanne; pukit 22 mm x 100 mm .....	22
4.2.3	Skaalattu ristikko 8,2 m; asennus; pukit 22 mm x 100 mm.....	23
4.2.4	Skaalattu ristikko 8,2 m; lopullinen tilanne; pukit 22 mm x 100 mm .....	23
4.2.5	Ristikko 13,6 m; asennus; pukit 25 mm x 125 mm.....	24
4.2.6	Ristikko 13,6 m; lopullinen tilanne; pukit 25 mm x 125 mm .....	28
4.2.7	Yhteenveto.....	28
5	Johtopäätökset ja jatkotutkimukset .....	29
	Lähteet.....	30

## **Liitteet (CD-ROM)**

Liite 1	Ristikkopiirustus 6,3 m malliristikosta (1:25)
Liite 2	Ristikkopiirustus 13,6 m malliristikosta (1:25)
Liite 3	Laskelmissa käytettyjen ristikoiden rakennemallit (1:20)
Liite 4	Excel-käsintarkastelut

## Symboliluettelo

A	poikkileikkauksen pinta-ala, $\text{mm}^2$
b	poikkileikkauksen leveys, mm (vääntövastusta laskettaessa pidemmän sivun mitta)
h	poikkileikkauksen korkeus, mm
c	vääntövastusta laskettaessa poikkileikkauksen lyhyemmän sivun mitta, mm
$E_k$	ominaiskimmomoduli, $\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{bk}$	ominaistaivutuslujuus, $\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{ck}$	ominaispuristuslujuus, $\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{tk}$	ominaisvetolujuus, $\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{vk}$	ominaisleikkauslujuus syiden suunnassa, $\text{N}/\text{mm}^2$
$f_{v\perp k}$	ominaisleikkauslujuus syiden suuntaan nähden kohtisuorassa suunnassa, $\text{N}/\text{mm}^2$
$G_k$	ominaisliukumoduli, $\text{N}/\text{mm}^2$
$i, i_{y-y}, i_{z-z}$	jäyhyyssäde (y-suunnassa, z-suunnassa)
$I, I_{y-y}, I_{z-z}$	jäyhyysmomentti (y-suunnassa, z-suunnassa), $\text{mm}^4$
$k_s, k_{s,y-y}, k_{s,z-z}$	hoikkuudesta ja epäkeskisyydestä riippuva kerroin
L	sauvan todellinen pituus, mm
$L_c$	sauvan tuentatavasta riippuva nurjahduspituus, mm
$M_t$	vääntömomentti, Nmm
$V, V_y, V_z$	leikkausvoima (y-suunnassa, z-suunnassa), N
$W, W_{y-y}, W_{z-z}$	taivutusvastus (y-suunnassa, z-suunnassa), $\text{mm}^3$
$W_t$	vääntövastus
$\beta$	poikkileikkauksen sivujen pituuksien suhteesta riippuva kerroin vääntövastuksen laskennassa
$\sigma_b, \sigma_{b,y}, \sigma_{b,z}$	taivutusjännitys (y-suunnassa, z-suunnassa), $\text{N}/\text{mm}^2$
$\sigma_{t/c}$	normaalijännitys (veto / puristus), $\text{N}/\text{mm}^2$
$\sigma_v, \sigma_{v,y}, \sigma_{v,z}$	leikkausjännitys (y-suunnassa, z-suunnassa), $\text{N}/\text{mm}^2$
$\lambda, \lambda_{y-y}, \lambda_{z-z}$	hoikkuusluku (y-suunnassa, z-suunnassa)
$\eta$	poikkileikkauksen sivujen pituuksien suhteesta riippuva kerroin vääntövastuksen laskennassa

$\tau_{\max} = \tau_A$

vääntömomentista aiheutuva leikkausjännitys poikkileikkauksen pidemmälle sivulle,  $\text{N/mm}^2$

$\tau_B$

vääntömomentista aiheutuva leikkausjännitys poikkileikkauksen lyhyemmälle sivulle,  $\text{N/mm}^2$

# 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö on jatkoa Tampereen ammattikorkeakoulun opiskelijan Toni Marttilan tekemälle insinööriyölle ”NR-ristikkokaton jäykistys sormijatketuilla puuelementeillä”. Marttila tutki Tampereen teknillisen yliopiston dosentti Tuomo Poutasen toimeksiannosta ristikkokattojen jäykistämistä sormijatketuista puuosista valmistetuilla erimuotoisilla jäykistys-elementeillä. Poutanen on tutkinut sormijatketun puun ominaisuuksia ja todennut, että siitä voidaan valmistaa mitatarkkoja ristikkokaton jäykistys-elementtejä, jotka ovat nopeasti asennettavissa. (Marttila 2007, 8.)

Marttilan työssään esittelemät jäykistyskappaleet ovat U-pukki, S-pukki, O-pukki, Y-pukki, seinäkiinnityspukki ja tuuliristikko. Marttilan työn pohjalta voidaan todeta, että kyseisiä puuelementtejä voidaan käyttää ristikkokattojen jäykistämiseen. Marttilan työssä käytiin läpi myös yleistä teoriaa ristikkokattojen jäykistämisestä, jota tässä työssä ei ole tarkoituksenmukaista toistaa (Marttila 2007, 14-20).

Tämän tutkintotyön tarkoituksena oli Marttilan työn pohjalta jatkaa erilaisten jäykistyskappaleiden laskennallista analysointia ja löytää teknisesti, tuotannollisesti ja taloudellisesti järkevin, mahdollisimman yksinkertainen ristikkokaton jäykistysjärjestelmä sekä laatia kyseiselle järjestelmälle yksiselitteinen suunnitteluohje.

Lähtökohtana oli keskittyä sekä U-pukkiin että siitä edelleen kehitettyyn L-pukkiin (kuvio 1) ja viedä näillä laskelmat loppuun. L-pukin etu U-pukkiin nähden on helpompi kuljetus ja varastointi, mutta toisaalta se kestää vähemmän rasituksia. Työn tavoitteena oli selvittää, voiko kattoristikon sekä työnaikaisen että lopullisen jäykistyksen tehdä näillä kyseisillä kappaleilla käyttämättä tuuliristikkoja. Lopputuloksena työstä oli tarkoituksena syntyä ristikkokaton jäykistyksen suunnitteluohje käyttäen em. jäykistyskappaleita.

Työn kuluessa Poutanen toi esille myös Z-pukin, joka olisi hänen alustavien arvioidensa mukaan käyttökelpoinen ja tehokas jäykistyskappale (Poutanen). Z-pukin käsittely jätettiin tämän työn ulkopuolelle, mutta sen tarkempi laskennallinen analyysi olisi paikallaan.

Laskenta suoritettiin pääasiassa tietokoneohjelman avulla, sillä käsiteltävien hyperstaattisten 3-ulotteisten rakenteiden käsinlaskenta on lähes mahdotonta. Laskentaohjelmanä käytettiin samaa Ansys-nimisen FEM-laskentaohjelman opiskelijaversiota, jota myös Marttilan työssä käytettiin. Ansysin etuina on muun muassa se, että sillä voidaan mallintaa käytännössä minkälainen raken-



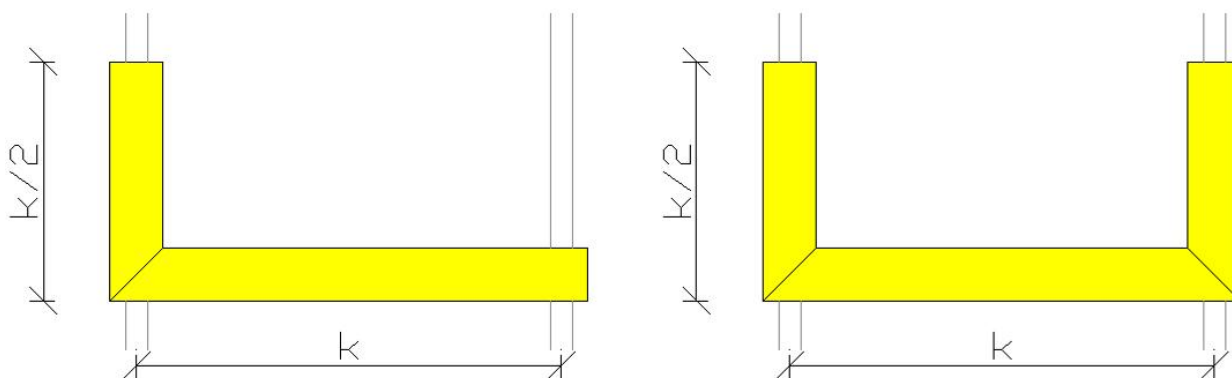
ne tahansa. Ohjelman mittavan ominaisuusvalikoiman varjopuolena on sen suhteellisen korkea käyttöönottokynnys. Ansys ei myöskään yleisenä FEM-laskentaohjelmana ole suunnattu nimenomaisesti rakennesuunnitteluun. Työn tekeminen alkoikin Ansysin käytön opiskelulla. Opiskelumateriaalina toimi kanadalaisen Albertan yliopiston [www-sivuilla](http://www.sivuilla) olevat esimerkkilaskelmat sekä Ansysin mukana tuleva sähköinen dokumentaatio (Release 10.0 Documentation for ANSYS).

## 2 Tutkittavat jäykistyskappaleet

Tässä esitellään opinnäytetyössä analysoidut Tuomo Poutasen jäykistyskonseptin mukaiset jäykistyskappaleet.

### 2.1 L- ja U-pukit

U-pukki koostuu riippuen kattoristikoiden k/k-jaosta joko n. 900 mm:n tai n. 1200 mm:n pituisesta vaakaosasta, jonka molempiin päihin on jäykin sormiliitoksin liitetty k/2-pituiset pystyosat. L-pukki on rakenteeltaan vastaava, mutta toinen pystyosista on jätetty pois. Pukit naulataan kattoristikon vertikaalisauvoihin ja/tai yläpaarteisiin, ja ne toimivat katon jäykistyksen lisäksi nurjahdusalttiiden vertikaalisauvojen nurjahdustuentana. Pukit on valmistettu 22 mm x 100 mm- tai 25 mm x 125 mm -laudasta.



Kuvio 1: L- ja U-pukit

### 2.2 Seinäpukki

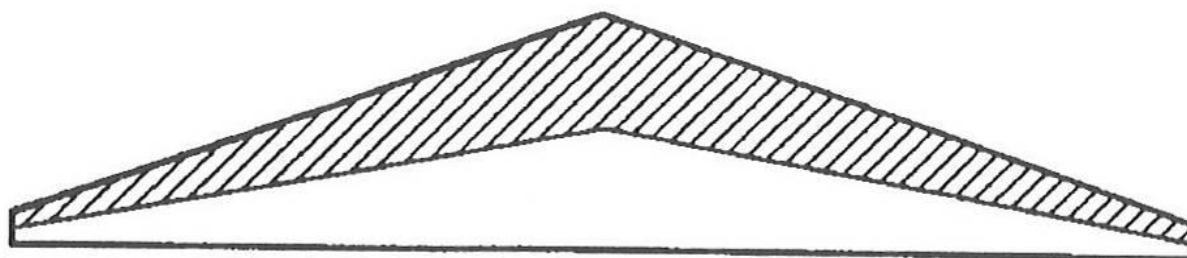
Seinäpukki on ristikon ensimmäisten pystysauvojen väliin ulkoseinän kohdalle asennettava, sormijatketusta 32 mm:n laudasta valmistettu U-muotoinen pukki. Seinäpukki kiinnitetään ristikoiden väliin hahlokiinnityksellä, ja se siirtää voimat yläpaarteilta seinälinjoille.

Tässä työssä käytettiin lähes kaikissa laskentamalleissa seinäpukkeja riippumatta varsinaiseen jäykistykseen käytetystä elementistä.

### 3 Laskennan suorittaminen

#### 3.1 Kuormitustapaukset

Jäykistyskappaleita on tutkittu mallilla, joka koostuu neljästä kattoristikosta, sekä kahdella kuormitustapauksella. Asennusaikaisessa tilanteessa kattoristikoita rasittaa päädystä  $0,25 \text{ kN/m}^2$ :n suuruinen tuulenpaine. Lopullisessa tilanteessa ristikoita rasittaa lumikuorma  $2,0 \text{ kN/m}^2$  (kuvio 2), kattorakenteiden omapaino  $0,5 \text{ kN/m}^2$ , päädystä puhaltava tuuli  $0,5 \text{ kN/m}^2$ , lämmöneristeen paino alapaarteille  $0,175 \text{ kN/m}^2$  sekä alkuvinoudesta johtuva yläpaarteen vaakakuorma  $N/100$ . Lämmöneristeen paksuudeksi on tässä työssä valittu  $350 \text{ mm}$  ja painoksi  $0,5 \text{ kN/m}^3$ . Ristikoiden omapainoa ei ole laskelmissa huomioitu.



Kuvio 2: Vesikaton jäykistysrakenteita rasittava osuus (viivoitettu alue) päätyyn kohdistuvasta tuulikuormasta lopullisessa tilanteessa (RIL 248–2008, 21).

#### 3.2 Käytetyt ristikot

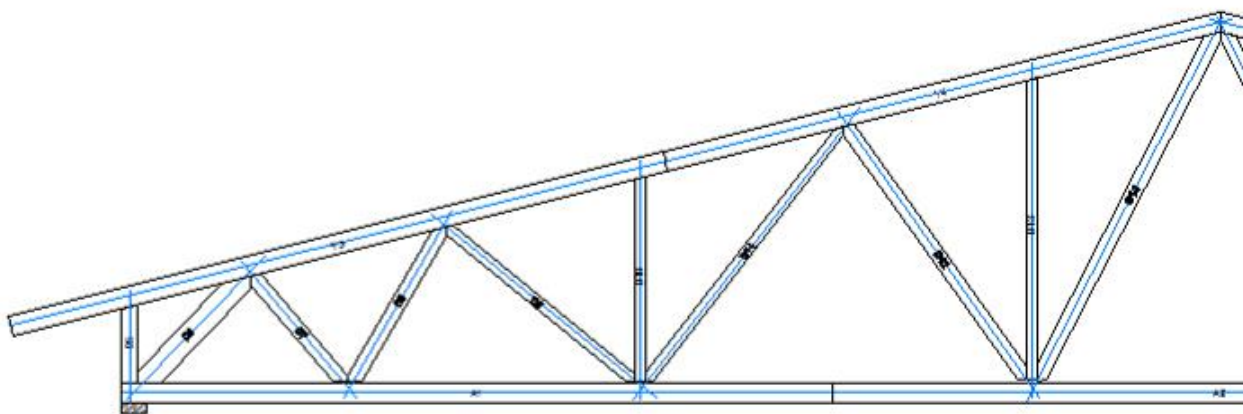
Laskennassa käytetyt kattoristikot ovat tyypillisiä Suomessa käytettäviä harjaristikoita. Ristikoiden jännevälit vaihtelevat noin  $6 \text{ m}$ :stä lähes  $14 \text{ m}$ :in. Jännevälistään  $6,3 \text{ m}$ :n ja  $13,6 \text{ m}$ :n ristikot ovat mallinnettu liitteiden 1 ja 2 ristikkopiirustuksista. Jännevälistään  $8,2 \text{ m}$ :n ja  $10,0 \text{ m}$ :n ristikot ovat mallinnettu skaalaamalla  $6,3 \text{ m}$ :n ristikkoa kertoimilla  $1,30$  ja  $1,59$  vastaavasti. Myös ristikoiden sauvojen poikkileikkauksia on skaalattu samassa suhteessa. Joitakin laskelmia on tehty myös  $6,3 \text{ m}$ :n ristikosta skaalatulla  $13,4 \text{ m}$ :n ristikolla (kerroin  $2,13$ ), mutta on osoittautunut, että tuloksissa esiintyy tällöin jo huomattavaa virhettä, joka johtuu ilmeisesti epäedullisesta sauvajajosta ristikon kokoon nähden. Kattoristikoiden k/k-välinä on käytetty  $900 \text{ mm}$ :ä lukuun ottamatta  $13,6 \text{ m}$  ristikkoa, jonka mallinnuksessa on käytetty k/k-väliä  $1200 \text{ mm}$ . Ristikoissa on käytetty lujuusluokkien T24 ja T30 puutavaraa.

### 3.3 Rakenteiden mallinnus

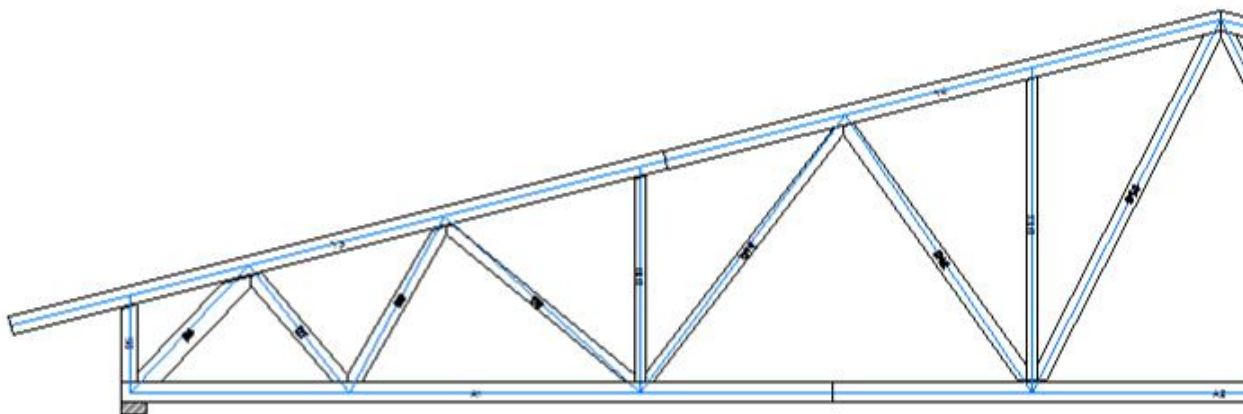
Mallinnettaessa rakenteita laskennallista analyysiä varten ei laskentamalli voi koskaan täydellisesti vastata todellista tilannetta. Seuraavassa on esitetty tämän työn yhteydessä tehtyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia laskentamallien suhteen.

#### 3.3.1 Geometria

Ristikon sauvojen pintakeskiöviivat eivät todellisuudessa kohtaa ristikon nurkkapisteissä (kuvio 3). Laskennan yksinkertaistamiseksi rakennemalleja idealisoitiin siten, että pintakeskiöviivat siirrettiin yhtymään solmupisteissä (kuvio 4). Tästä aiheutuva virhe laskennassa on hyvin pieni.



Kuvio 3: Ristikon sauvojen todellisten pintakeskiöviivojen sijainti



Kuvio 4: Laskentamallin korjattujen pintakeskiöviivojen sijainti

Ristikon naulalevyliitosten aiheuttama liitoskohtien lujuuden pienentyminen otettiin laskennassa huomioon pienentämällä puun kimmoarvoja 10 prosenttiin 50 mm:n matkalla liitoskohdasta jokaiseen suuntaan. Laskennallisesti todettiin, että pienennyksen vaikutus on mitätön, mutta ottamalla se huomioon on laskenta varmemmalla puolella.

Ristikot on tuettu toisesta päästä nivelellä ja toisesta päästä liukutuella. Z-suuntainen siirtymä (katon harjan suuntainen) oli molemmilla tuilla lukittu.

### 3.3.2 Elementit

Kun ristikon geometria tiedetään, voidaan valita elementit, joilla rakenne mallinnetaan. Ansysin mukana tulee mittava lista erityyppisiä elementtejä, joista osa on vain 2-ulotteiseen tarkasteluun sopivia ja osa myös 3-ulotteiseen. Ristikot ja jäykistyskappaleet mallinnettiin käyttäen BEAM188-elementtiä, joka on 3-ulotteinen Timoshenkon palkkiteoriaa noudattava palkkielementti. BEAM188-elementin alku- ja loppupisteissä on molemmissa kuusi vapausastetta (siirtymät x-, y- ja z-suunnissa sekä kiertymät x-, y- ja z-akselien ympäri).

### 3.3.3 Materiaaliominaisuudet

Ristikot mallinnettiin käyttäen puutavaran T24 ja T30 lujuusarvoja RakMK B10 (2001, 7) mukaisesti. Taulukossa 1 on esitetty kuormien aikaluokat ja taulukossa 2 sahatavaran materiaaliominaisuudet.

Taulukko 1: Kuormien aikaluokat (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B10 2001, 5)

<b>TAULUKKO 3.1</b> Kuormien aikaluokat.	
Aikaluokka	Esimerkkejä
A	Omapaino
Pitkäaikainen	Maan- ja vedenpaine
kesto > 1,5 kk	Koneet Varastoitu tavara
B	Hyötykuorman pintakuorma
Lyhytaikainen	Lumikuorma Kosteuden vaihtelun aiheuttamat kuormat
C	Tuuli
Hetkellinen	Hyötykuorman pistekuorma $\leq 2 \text{ kN}$
kesto < 10 h	Kaiteeseen vaikuttava kuorma

Taulukko 2: Sahatavaran materiaaliominaisuudet (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B10 2001, 7)

<b>TAULUKKO 4.1.</b>				
Sahatavaran ominaislujuudet ja -kimmomoduulit sekä keskimääräiset kimmomoduulit aikaluokassa B ja kosteustilassa 1. Yksikkö MN/m <sup>2</sup> .				
Lujuusluokka	T40	T30	T24	T18
		T3	T2	T1
<b>Lujuuksia laskettaessa</b>				
Taivutus, $f_{bk}$	29	23	20	16
Puristus, $f_{ck}$	28	22	19	15
Puristus, $f_{c,1k}$	4,5	3,7	3,1	2,6
Veto, $f_{tk}$	19	15	13	8
Veto, $f_{tLk}$	0,4	0,4	0,4	0,4
Leikkaus, $f_{vk}$	2	2	2	2
Leikkaus, $f_{vLk}$	1	1	1	1
Kimmomoduuli, $E_k$	7000	6000	5000	4000
Liukumoduuli, $G_k$	350	300	250	200
<b>Muodonmuutoksia laskettaessa</b>				
Kimmomoduuli, $\bar{E}$	8500	7000	6500	5500
Kimmomoduuli, $\bar{E}_\perp$	280	230	180	160
Liukumoduuli, $\bar{G}$	420	350	320	270

Materiaalimalleina on käytetty ortrooppisia malleja, joiden kimmoarvot aikaluokassa C ja kosteusluokassa 1 (materiaaliominaisuuksien korjauskerroin 1,3, Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B10 2001, 7) ovat seuraavat:

- T24
  - $E_x = 8450 \text{ MPa}$
  - $E_y = 234 \text{ MPa}$
  - $E_z = 234 \text{ MPa}$
  - $G_{x,y,z} = 416 \text{ MPa}$ .
- T30
  - $E_x = 9100 \text{ MPa}$
  - $E_y = 299 \text{ MPa}$
  - $E_z = 299 \text{ MPa}$
  - $G_{x,y,z} = 455 \text{ MPa}$ .

Ristikon naulalevyliitoksissa käytettiin materiaalimalleja, joissa kimmoarvot oli pienennetty 10 prosenttiin edellä mainituista 50 mm:n etäisyydellä liitoksesta.

Jäykistyskappaleissa käytettiin puutavaran T24 arvoja.

### 3.4 Koneellinen laskenta

Ristikoita ja jäykistyskappaleita analysoitiin ANSYS ED 10.0 -FEM-laskentaohjelmalla. FEM (Finite Element Method, elementtimenetelmä) on rakenteissa vaikuttavien voimien ja siirtymien laskemiseen käytettävä menetelmä, jossa rakenne jaetaan tavoiteltavasta laskentatarkkuudesta riippuvaan määrään elementtejä. Rakenteisiin vaikuttavat voimat voidaan laskea elementtien liitoskohdissa eli solmupisteissä. Kyseessä on ANSYSin lähes maksuton opiskelijalisenssi, mikä johdosta laskentamallissa on joitakin rajoituksia liittyen muun muassa elementtien ja solmupisteiden sallittuun lukumäärään. Tämän takia työssä on voitu tutkia malleja, joissa on korkeintaan neljä ristikköä.

### 3.5 Käsin tehdyt tarkastelut

Koska Ansysistä ei saada suoraan esimerkiksi leikkausjännityksiä tai yhdistettyjä rasiituksia, suoritettiin kriittisten sauvojen kestävyystarkistuksia käsinlaskentana käyttäen Microsoftin Excel-tilukkolaskentaohjelmaa.

Lähtötietoina laskelmissa on käytetty

- sauvan poikkileikkausarvoja ja pituutta

- kosteus- ja aikaluokasta riippuvia materiaaliominaisuuksia (kts. kohta 3.3.3 Materiaaliominaisuudet)
- sauvan tuentatavasta ja dimensioista riippuvaa nurjahduskerrointa
- sauvan poikkileikkauksesta riippuvia vääntöjännityskertoimia.

Lisäksi laskelmiin tarvittiin seuraavat Ansys-laskelmasta saatavat rasitukset ja jännitykset:

- sauvan leikkausjännitys y- ja z-suunnissa (N)
- sauvan vääntömomentti (Nmm)
- sauvan normaalijännitys (MPa)
- sauvan taivutusjännitys y- ja z-suunnissa (MPa).

Seuraavassa on esitetty tehdyt laskelmat ja käytetyt kaavat.

### 3.5.1 Yksittäiset jännitykset

#### **Puhdas leikkausjännitys**

Puhtaasti leikkausvoimasta poikkileikkauksen y-suunnassa aiheutuva leikkausjännitys saadaan kaavasta

$$\sigma_{v,y} = \frac{V_y}{A} \quad (1)$$

#### **Leikkausjännitys taivutuksen yhteydessä**

Leikkausjännitys taivutuksen yhteydessä lasketaan suorakaidepoikkileikkaukselle kaavasta

$$\sigma_{v,y} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_y}{A} \quad (2)$$

#### **Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys**

Vääntömomentista aiheutuva leikkausjännitys poikkileikkauksen pidemmälle sivulle A ja lyhyemmälle sivulle B saadaan seuraavista kaavoista (Outinen, Koski & Salmi 2000, 257-258):

$$\tau_A = \tau_{\max} = \frac{M_t}{W_t} \quad (3)$$



$$\tau_B = \eta \cdot \tau_A \quad (4)$$

Vääntövastus  $W_t$  saadaan kaavasta (Outinen, Koski & Salmi 2000, 258):

$$W_t = \beta bc^2 \quad (5)$$

Kaavassa 5  $b$  tarkoittaa poikkileikkauksen pidemmän sivun mitta ja  $c$  lyhyemmän. Kaavan 4 kerroin  $\eta$  ja kaavan 5 kerroin  $\beta$  saadaan taulukosta 3.

Taulukko 3: Sivujen pituuksien suhteesta  $b/c$  riippuva vääntöjännityksen kerroin (Outinen, Koski & Salmi 2000, 258)

$b/c$	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	$\infty$
$\alpha$	0,141	0,196	0,229	0,249	0,263	0,281	0,299	0,307	0,313	0,333
$\beta$	0,208	0,231	0,246	0,258	0,267	0,282	0,299	0,307	0,313	0,333
$\eta$	1,000	0,859	0,795	0,766	0,753	0,745	0,743	0,742	0,742	0,742

### 3.5.2 Yhdistetyt rasitukset

#### Yhdistetty normaali- ja taivutusjännitys

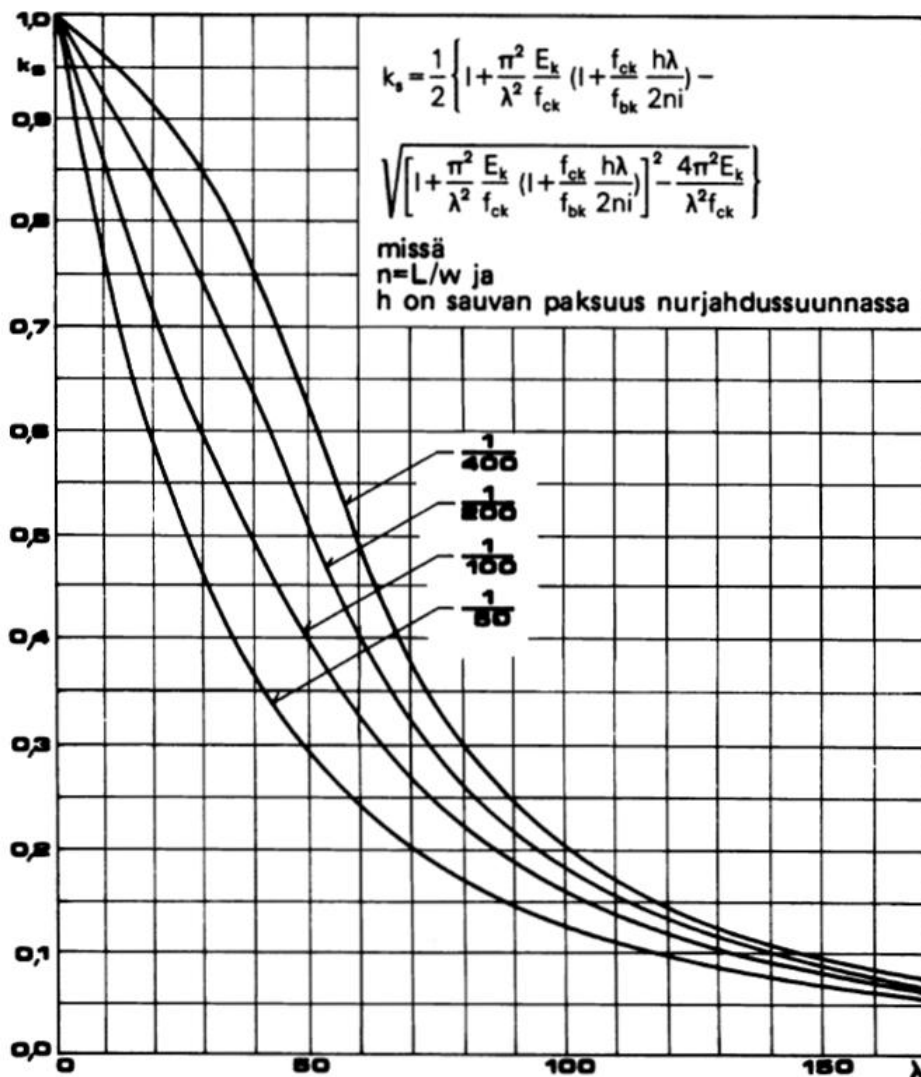
Puristetun ja taivutetun sauvan kestävyys tarkistetaan normaalisti kaavalla

$$\frac{\sigma_c}{k_s \cdot f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1 \quad (6)$$

Kaavassa 6 tekijä  $k_s$  on sauvan alkupäkeskisyyden ja hoikkuuden huomioonottava kerroin. Kerroin  $k_s$  saadaan kuviosta 5 ja seuraavista kaavoista:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{L_c}{i} \quad (8)$$



Kuvio 5: Nurjahduksen huomioonottava kerroin  $k_s$  (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B10 2001, 9)

Sauvan nurjahduspituus  $L_c$  määräytyy sauvan tuentatavan mukaan. Tässä työssä ristikon sauvojen nurjahduspituudeksi on oletettu  $1,0 \times L$ , joka on hieman varmallalla puolella.

Koska tässä työssä on tarkastellaan 3-ulotteisia rakenteita, joiden sauvoissa voi esiintyä taivutusjännityksiä kahteen suuntaan, tarkastetaan vedetyn ja taivutetun sauvan kestävyys kaavalla

$$\frac{\sigma_t}{f_t} + \frac{|\sigma_{b,y}| + |\sigma_{b,z}|}{f_b} \leq 1 \quad (9)$$

Puristetun ja taivutetun sauvan kestävyys tarkistetaan seuraavilla kaavoilla:

$$\frac{|\sigma_c|}{k_{s,y} \cdot f_c} + \frac{|\sigma_{b,y}| + |k \cdot \sigma_{b,z}|}{f_b} \leq 1 \quad (10)$$

$$\frac{|\sigma_c|}{k_{s,z} \cdot f_c} + \frac{|k \cdot \sigma_{b,y}| + |\sigma_{b,z}|}{f_b} \leq 1 \quad (11)$$

Nämä kaavat ottavat huomioon myös nurjahdussuuntaan kohtisuoraan vaikuttavan taivutuksen pienennettynä kertoimella  $k$ . Eurocoden mukainen  $k$ -kertoimen arvo suorakaidepoikkileikkaukselle on 0,7 (RIL 205–2003, 66), jota myös tässä työssä käytetään, vaikka mitoitus ei muuten olekaan Eurocoden mukainen.

### **Yhdistetty leikkaus- ja vääntöjännitys**

Kun poikkileikkaukseen kohdistuu sekä puhdasta leikkausvoimaa että väännöstä aiheutuvaa leikkausvoimaa, tarkistetaan kapasiteetti leikkausta vastaan seuraavilla kaavoilla:

$$\frac{\sigma_{v,y} + \tau_A}{f_{v\perp}} \leq 1 \quad (12)$$

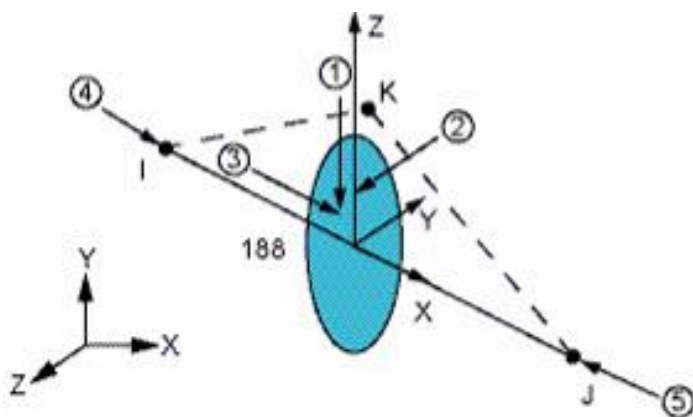
$$\frac{\sigma_{v,z} + \tau_B}{f_{v\perp}} \leq 1 \quad (13)$$

Kaavoissa 12 ja 13 on oletettu, että tarkasteltavan sauvan poikkileikkaus on  $y$ -suunnassa pidempi.

## 4 Keskeiset tulokset

Tässä on esitelty tutkintotyössä tutkittujen rakenteiden ja kuormitustapausten keskeiset tulokset. Kriittisimpien rakenneosien kohdalta kestävyystarkasteluja on tehty Microsoftin Excel-taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen, ja näiden laskujen tulokset ovat tutkintotyön liitteenä olevalla CD-ROM-levyllä.

Siirtymät on ilmoitettu suhteessa globaalin koordinaatistoon, mutta elementeille tulevien kuormien suunnat on ilmoitettu suhteessa elementin omaan koordinaatistoon (kuvio 6). BEAM188-elementin x-akseli kulkee aina elementin päiden (I ja J) kautta. Tässä työssä käytetyissä malleissa elementin y-akseli on aina samansuuntainen globaalin xy-tason kanssa ja elementeissä, jotka ovat globaalin z-akselin suuntaisia (kuten jäykistyskappaleiden kaksi ristikköä toisiinsa liittävät vaakaosat), y-akseli on samansuuntainen globaalin y-akselin kanssa.



Kuvio 6: BEAM188-elementin geometria (Release 10.0 Documentation for ANSYS)

### 4.1 L-pukki

#### 4.1.1 Ristikko 6,3 m; asennus; pukit 22 mm x 100 mm

#### **L-pukit**

Rakenne ei toimi; päätyristikko ei pysy pystyssä.

#### **L-pukit + seinäpukit**

Siirtymät z-suunnassa ovat +290 mm / -88 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun kestävyyttä.

**L-pukit + seinäpukit + yhdet lisäjäykisteet**

Siirtymät z-suunnassa ovat +91 mm / -21 mm. Taivutusjäännitykset eivät ylitä puun kestävyyttä.

Tarkempi tarkastelu taulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen on tehty seuraaville elementeille:

- 291: lisäjäykisteen lyhyt osa
- 292: lisäjäykisteen pitkä osa
- 271 ... 273: yläpaarre lisäjäykisteen kohdalla
- 160 ... 162: lyhyt vertikaali
- 65, 119 ... 122, 132: tuetun vertikaalin yläosa
- 13, 14, 25: alapaarre vertikaalien välissä
- 293 ... 295: toinen yläpaarre lisäjäykisteen kohdalla.

Käsinlaskennan perusteella sauvojen rasitukset eivät ylitä puun kestävyyttä.

4.1.2 Ristikko 6,3 m; lopullinen tilanne; pukit 22 mm x 100 mm

**L-pukit + seinäpukit + yhdet lisäjäykisteet**

Siirtymät z-suunnassa ovat +250 mm / -51 mm. L-pukille aiheutuu taivutusjäännitystä noin 35,4 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

4.1.3 Ristikko 13,6 m; asennus; pukit 25 mm x 125 mm

**Kahdet L-pukit + seinäpukit + kolmet lisäjäykisteet**

Siirtymät z-suunnassa ovat +450 mm / -58 mm. L-pukille aiheutuu taivutusjäännitystä noin 31,4 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

4.1.4 Yhteenveto

Asennusaikaisessa tilanteessa ei L-pukeilla toteutettua jäykistystä saada tulosten perusteella järkevällä jäykisteiden määrällä toimimaan. Johtopäätös perustuu laskentaan 13,6 m:n ristikkolla.

## 4.2 U-pukki

### 4.2.1 Ristikko 6,3 m; asennus; pukit 22 mm x 100 mm

#### **U-pukit**

Siirtymät z-suunnassa ovat +278 mm / -70 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun kestävyyttä. U-pukille aiheutuva maksimitaivutusjännitys on noin 7,5 MPa.

#### **U-pukit + seinäpukit**

Siirtymät z-suunnassa ovat +253 mm / -82 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun kestävyyttä. U-pukille aiheutuva maksimitaivutusjännitys on noin 3,5 MPa, joka on noin puolet verrattuna tapaukseen, jossa ei ole käytetty seinäpukkeja. Ristikoiden taipumissa ei ole suurta eroa.

#### **U-pukit + seinäpukit + yhdet lisäjäykisteet**

Siirtymät z-suunnassa ovat +63 mm / -5 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun kestävyyttä. U-pukille aiheutuva maksimitaivutusjännitys on noin 8,5 MPa.

### 4.2.2 Ristikko 6,3 m; lopullinen tilanne; pukit 22 mm x 100 mm

#### **U-pukit + seinäpukit**

Siirtymät z-suunnassa ovat +607 mm / -221 mm. Alapaarteelle aiheutuu taivutusjännitystä noin 28,9 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

#### **U-pukit + seinäpukit + yhdet lisäjäykisteet**

Siirtymät z-suunnassa ovat +190 mm / -16 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun lujuutta.

Tarkempi tarkastelu taulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen on tehty seuraaville elementeille:

- 1: yläpaarten uloke
- 281 ... 283: yläpaarre ensimmäisen vertikaalin ja diagonaalin välissä
- 277: lisäjäykisteen pitkä osa
- 276: lisäjäykisteen lyhyt osa
- 316: seinäpukin pystyosa
- 107 ... 114: U-pukin vaakaosa
- 18, 20, 21, 131, 133: tuettu vertikaali

- 13, 14, 25: alapaarre tuettujen vertikaalien välissä
- 46, 47: yläpaarre harjan vieressä.

Käsinlaskennan perusteella voidaan todeta, että suuren vääntömomentin takia puun leikkauskestävyys ylittyy yläpaarteessa harjan vieressä kahdeksalla prosentilla.

4.2.3 Skaalattu ristikko 8,2 m; asennus; pukit 22 mm x 100 mm

### **U-pukit**

Siirtymät z-suunnassa ovat +373 mm / -90 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun kestävyyttä. U-pukille aiheutuva maksimitaivutusjännitys on noin 13,5 MPa.

Tarkempi tarkastelu taulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen on tehty seuraaville elementeille:

- 231 .. 238: U-pukin vaakaosa
- 227 ... 230: U-pukin pystyosa
- 198, 199: tuetun vertikaalin alaosa
- 204, 218 ... 222: tuetun vertikaalin yläosa
- 155 ... 157: pukin puoleinen pitkä diagonaali
- 171, 172: yläpaarre tuetun vertikaalin ja harjan välissä
- 21 ... 23: alapaarre vertikaalien välissä.

Käsinlaskennan perusteella sauvojen rasitukset eivät ylitä puun kestävyyttä.

4.2.4 Skaalattu ristikko 8,2 m; lopullinen tilanne; pukit 22 mm x 100 mm

### **U-pukit + seinäpukit**

Siirtymät z-suunnassa ovat +740 mm / -264 mm. Alapaarteelle aiheutuva maksimitaivutusjännitys, noin 28,1 MPa, ylittää puun lujuuden.

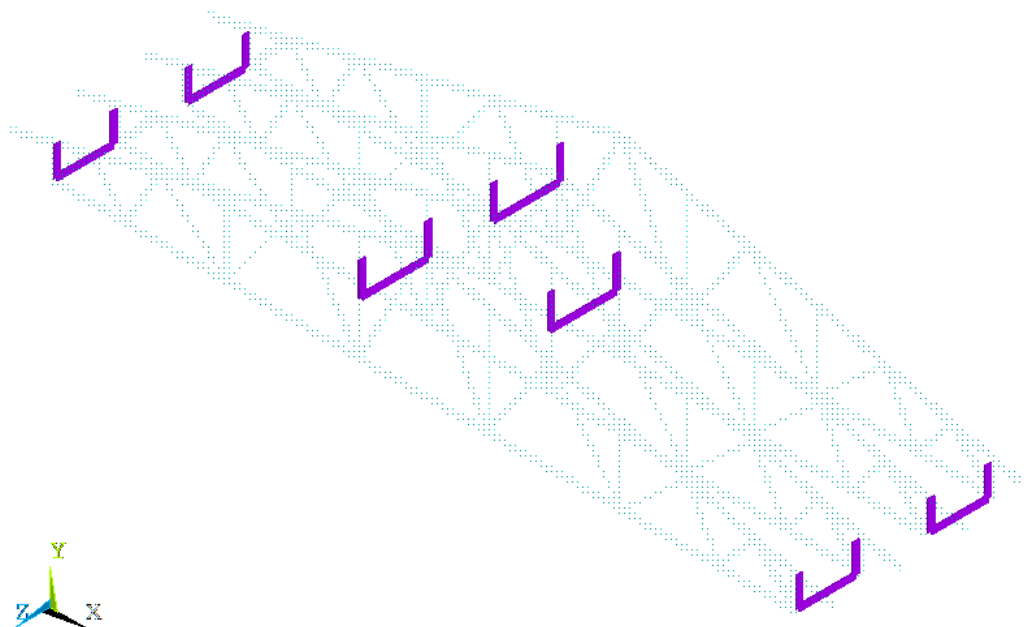
### **U-pukit + seinäpukit + yhdet lisäjykisteet**

Siirtymät z-suunnassa ovat +282 mm / -61 mm. U-pukille aiheutuu taivutusjännitystä maksimissaan noin 49,1 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

#### 4.2.5 Ristikko 13,6 m; asennus; pukit 25 mm x 125 mm

##### **U-pukit + seinäpukit**

U- ja seinäpukkien sijoittelu on esitetty kuviossa 7.



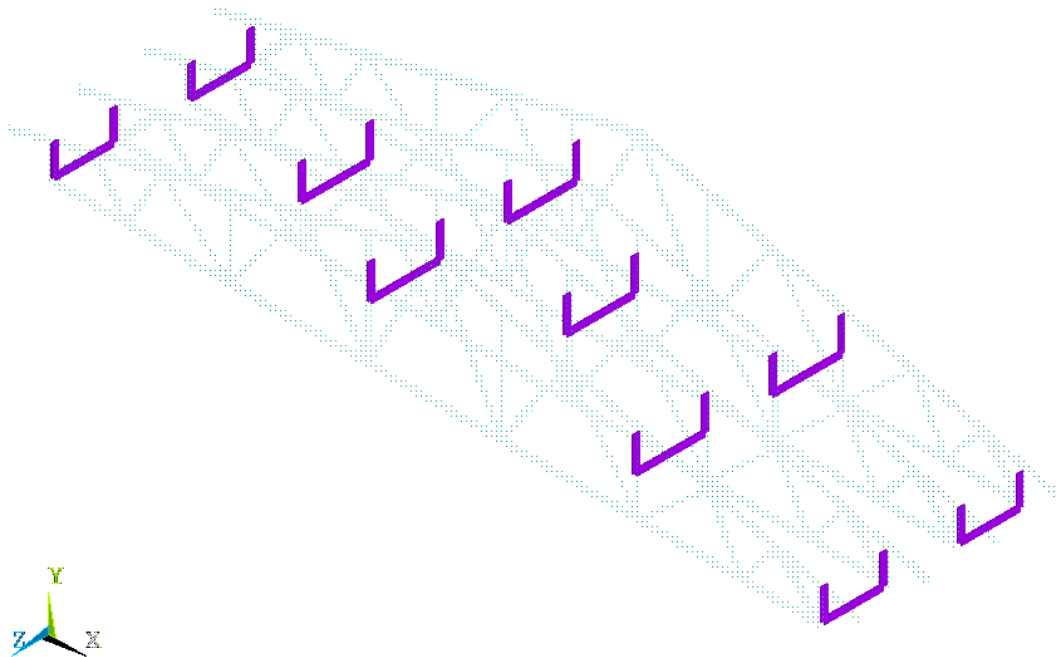
Kuvio 7: U-pukit + seinäpukit, ristikot 13,6 m

Siirtymät z-suunnassa ovat +4310 mm / 722 mm. Alapaarteelle aiheutuu taivutusjännitystä maksimissaan noin 43,6 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

##### **Kahdet U-pukit + seinäpukit**

U- ja seinäpukkien sijoittelu on esitetty kuviossa 8.



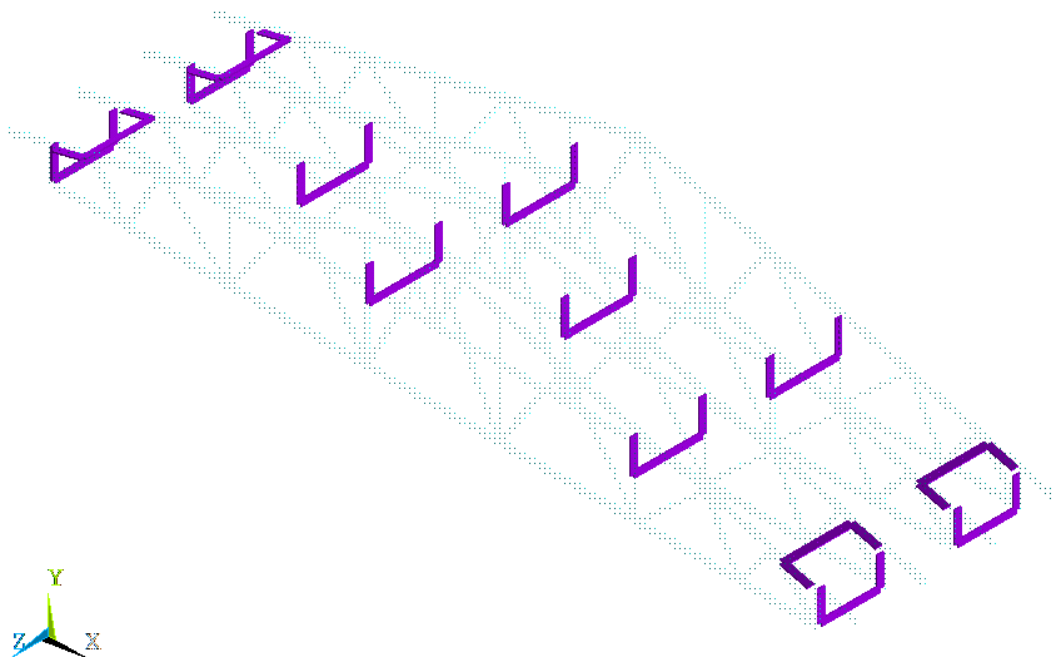


Kuvio 8: Kahdet U-pukit + seinäpukit, ristikot 13,6 m

Siirtymät z-suunnassa ovat +4293 mm / 718 mm. Alapaarteelle aiheutuu taivutusjännitystä maksimissaan noin 42,6 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

### **Kahdet U-pukit + seinäpukit + yhdet lisäjäykisteet**

U- ja seinäpukkien sekä lisäjäykisteiden sijoittelu on esitetty kuviossa 9.

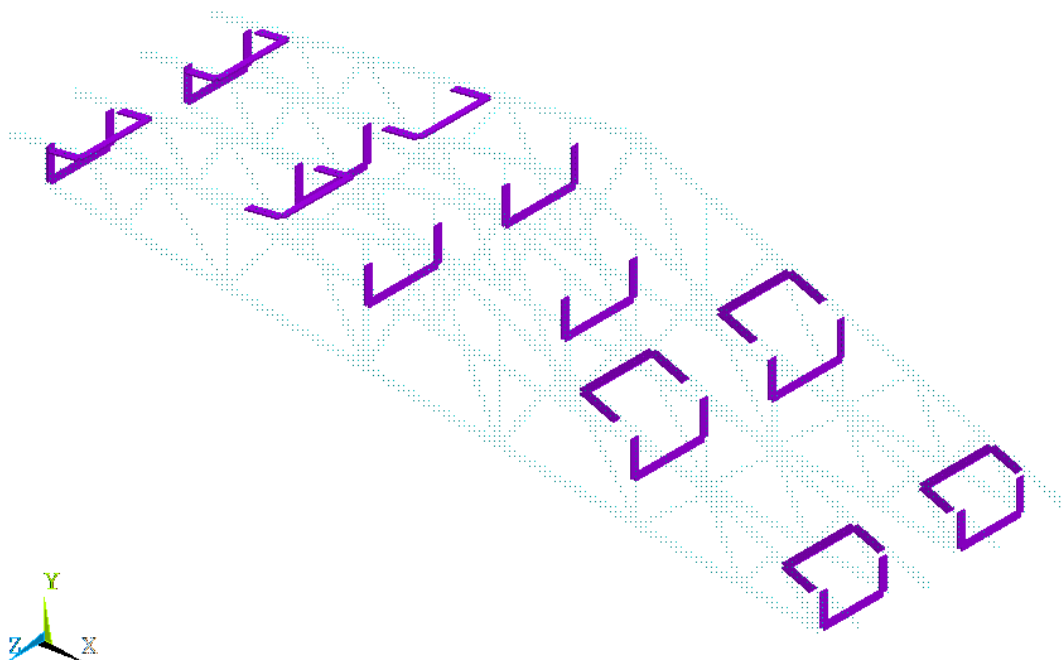


Kuvio 9: Kahdet U-pukit + seinäpukit + yhdet lisäjäykisteet, ristikot 13,6 m

Siirtymät z-suunnassa ovat +945 mm / -12 mm. Yläpaarteelle aiheutuu taivutusjännitystä noin 32,2 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

### **Kahdet U-pukit + seinäpukit + kahdet lisäjäykisteet**

U- ja seinäpukkien sekä lisäjäykisteiden sijoittelu on esitetty kuviossa 10.



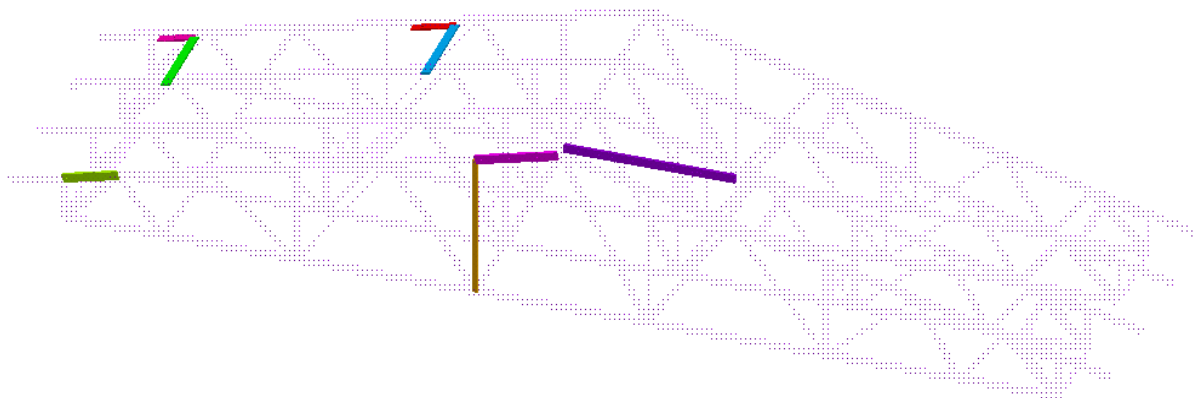
Kuvio 10: Kahdet U-pukit + seinäpukit + kahdet lisäjäykisteet, ristikot 13,6 m

Siirtymät z-suunnassa ovat +414 mm / -8 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun lujuutta.

Tarkempi tarkastelu taulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen on tehty seuraaville elementeille:

- 484: 1. lisäjäykisteen lyhyt osa
- 483: 1. lisäjäykisteen pitkä osa
- 8: yläpaarre harjan ja 1. vertikaalin välissä
- 520: 2. lisäjäykisteen lyhyt osa
- 519: 2. lisäjäykisteen pitkä osa
- 63, 64, 389 ... 391: tuettu vertikaali
- 305, 376: alapaarre vertikaalien välissä
- 455 ... 457: yläpaarre 1. lisäjäykisteen kohdalla.

Elementtien sijainnit on havainnollistettu kuviossa 11.

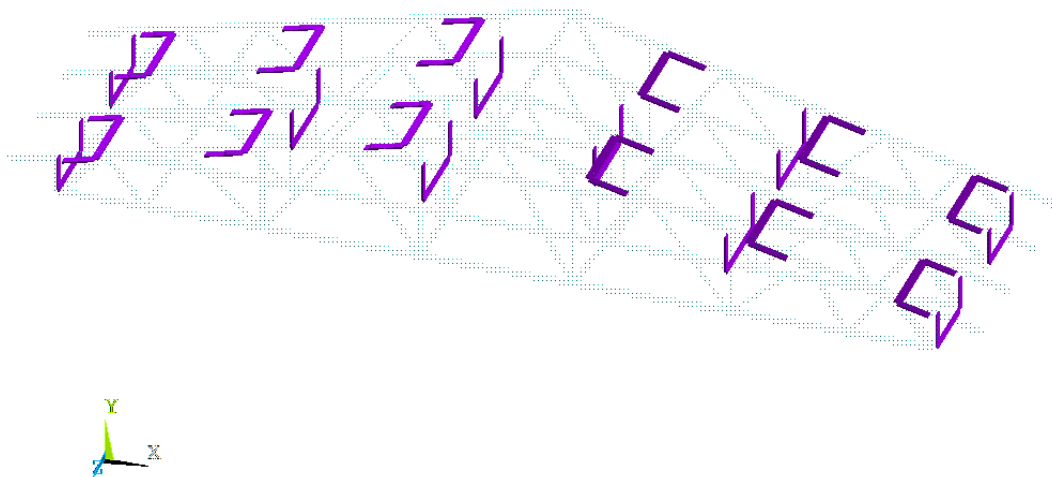


Kuvio 11: Kahdet U-pukit + seinäpukit + kahdet lisäjäykisteet, ristikot 13,6 m; asennus, käsin-tarkastellut elementit

Käsinlaskennan perusteella voidaan todeta, että suuresta vääntömomentista aiheutuva leikkaus-jännitys ylittää puun kestävyuden yläpaarteessa lisäjäykisteen kohdalla. Yhdistetty leikkaus- ja vääntöjännitys ylittää puun kestävyuden yläpaarten lyhyellä sivulla noin 18 prosentilla.

#### **Kahdet U-pukit + seinäpukit + kolmet lisäjäykisteet**

U- ja seinäpukkien sekä lisäjäykisteiden sijoittelu on esitetty kuviossa 12.



Kuvio 12: Kahdet U-pukit + seinäpukit + kolmet lisäjäykisteet, ristikot 13,6 m

Siirtymät z-suunnassa ovat +217 mm / -5 mm. Taivutusjännitykset eivät ylitä puun lujuutta.

Tarkempi tarkastelu taulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen on tehty elementeille 464 ... 466 (yläpaarre 1. lisäjäykisteen kohdalla), vastaavassa kohdassa, jossa edellisessä tapauksessa puun leikkauslujuus ylittyi. Käsinlaskennan perusteella voidaan todeta, että lisättäessä lisäjäykisteiden

määrää saadaan yhdistetty leikkaus- ja vääntöjännitys ko. kohdassa pienenemään noin 77 prosenttiin puun kestävydestä.

4.2.6 Ristikko 13,6 m; lopullinen tilanne; pukit 25 mm x 125 mm

#### **Kahdet U-pukit + seinäpukit + kolmet lisäjäykisteet**

Siirtymät z-suunnassa ovat +759 mm / -19 mm. Suurin taivutusjännitys aiheutuu vertikaalille ollen ja on noin 79,0 MPa, joka ylittää puun lujuuden.

4.2.7 Yhteenveto

Analysoitaessa U-pukin toimintaa 13,6 m:n ristikkokaton jäykistämisessä voidaan todeta, että käyttämällä kaksia U-pukkeja vertikaaleissa sekä kolmia lisäjäykisteitä, voidaan rakenne saada toimimaan ainakin asennusaikaisessa tilanteessa. Lopullisen tilanteen laskelmissa ei ole huomioitu ruoteiden vaikutusta. Jos niiden avulla saadaan taivutusjännitykset ja siirtymät huomattavasti pienenemään, voidaan todeta, että U-pukilla NR-katon jäykistäminen voidaan toteuttaa myös pienemmillä ristikkokoilla. Tarkempi jäykisteiden määrä muilla ristikkokoilla vaatii vielä lisää laskentaa sekä tarkkuuden vuoksi n. 8 m ja 10 m ristikoiden mallintamista todellisten ristikkopiirustusten mukaisina skaalaamisen sijaan.

## 5 Johtopäätökset ja jatkotutkimukset

Laskennallisten analyysien perusteella U- ja seinäpukkien yhdistelmällä on mahdollista järjestää NR-katon jäykistäminen ainakin katon asennuksen aikaisesti. Tässä työssä ei käsitelty ruoteiden vaikutusta katon jäykistykseen. Ruoteiden vaikutuksen voidaan kuitenkin arvioida olevan niin suuri, että katto on mahdollista jäykistää U-pukkeja käyttäen myös valmiin katon kuormituksia vastaan. Tarkempia laskelmia kuitenkin tarvitaan eri ristikkokokooilla jäykistyselementtien suunnitteluohjeen laatimiseksi.

L-pukkien käyttäminen ristikkokattojen jäykistämiseen ei laskelmien perusteella ole kannattavaa. L-pukin ongelma on se, että sen toista päätä ei voi kiinnittää ristikkoon momenttijäykästi, koska kiinnityspisteitä on vain yksi. Tästä johtuen L-pukkeja täytyisi asentaa moninkertainen määrä U-pukkeihin nähden.

Työn aikana esille tulleen Z-pukin käyttömahdollisuuksia on myös syytä tutkia laskennallisesti. Z-pukin etuna U-pukkiin nähden on kuljetusystävällisyys.

## **Lähteet**

### **Painetut lähteet**

RIL 248–2008, NR-kattorakenteen jäykistyksen suunnittelu. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki 2008.

RIL 205–2003, Puurakenteiden suunnittelu, Euronormi. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 2003. 167 s.

Kähkönen, Leo, Kantavat puurakenteet -insinööriopetus. Rakennustieto Oy. Jyväskylä 1997. 148 s.

Outinen, Koski, Salmi, Lujuusopin perusteet. Pressus Oy. Tampere 2000. 560 s.

### **Painamattomat lähteet**

Poutanen, Tuomo. Haastattelut 2008 ja 2009.

Marttila, Toni, NR-ristikkokaton jäykistys sormijatketuilla elementeillä. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. Tampere 2007. 48 s. + 45 liites.

Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B10 Puurakenteet, ohjeet. Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto. 2001.

### **Sähköiset lähteet**

Release 10.0 Documentation for ANSYS. [sähköinen dokumentaatio.] Saatavissa Ansys 10.0 -ohjelman mukana.