

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Rakennustekniikka
Talonrakennustekniikka

Tutkintotyö

Toni Marttila

NR-ristikkokaton jäykistys sormijatketuilla puuelementeillä

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2007

Raimo Koreasalo, TAMK
Tuomo Poutanen, Woodfocus Oy

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka

Talonrakennustekniikka

Marttila, Toni

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Toukokuu 2007

Hakusanat

NR-ristikkokaton jäykistys sormijatketuilla puuelementeillä

46 sivua + 3 liitettä (55 liitesivua)

Raimo Koreasalo, TAMK

Tuomo Poutanen, Woodfocus Oy

sormiliitos, puu, ristikko, sivuttaistuenta, jäykistys, FEM, Ansys

TIIVISTELMÄ

Tutkintotyöni käsittelee Tuomo Poutasen kehittelemien jäykistekappaleiden toimintaa naulalevyristikkokaton jäykistyksessä. Jäykistekappaleet eroavat tavanomaisista jäykistepukeista lähinnä siinä, että niiden nurkat on toteutettu jäykkinä sormijatkoksina. Jäykistekonsepti pitää sisällään eri muotoisia pukkeja, joilla voidaan toteuttaa ristikoiden työaikainen tuenta, vaakakuormien kuljetus yläpaarteelta alapaarteelle sekä lopullinen uumasauvojen nurjahdustuenta. Tehtäväni on ollut suorittaa lujuuslaskelmia eri tuentatapauksista tavanomaisten kuormien rasittamina ja raportoida tulokset työn teettäjälle, Tuomo Poutaselle. Tarkastelun alaisena ovat olleet ristikoihin ja jäykisteisiin syntyvät jännitykset ja muodonmuutokset. Ne laskettiin pääasiassa FEM-ohjelman avulla, mutta joitakin tarkasteluja on tehty myös käsinlaskentana. Suoritettujen laskelmien mukaan jäykisteet toimivat niin, että niitä voitaisiin käyttää mainituissa tarkoituksissa. On kuitenkin huomioitava, että vaikka laskelmat sinänsä ovat melko tarkkoja, ne eivät kuitenkaan ikinä täysin vastaa todellista rakennetta. Tulosten perusteella näyttää kuitenkin siltä, että jäykisteitä kannattaa kokeilla käytännössä ainakin kokeellisesti.

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka

Talonrakennustekniikka

Marttila Toni

Engineering Thesis

Thesis Supervisor

Commissioning Company

May 2007

Keywords

Roof bracing with finger jointed timber elements

46 pages + 3 appendices (55 appendix pages)

Raimo Koreasalo, Tampere Polytechnic University

Tuomo Poutanen, Woodfocus Ltd.

finger joint, timber, truss, brace, FEM, Ansys

ABSTRACT

The purpose of this Engineering Thesis was to explore the behavior of a new type brace element as truss brace. This new element type has been invented by Tuomo Poutanen. The brace concept includes blocks with different shape, which are made of finger jointed timber. Comparing to common braces the biggest difference is that these new ones have rigid corners. These blocks not only work as temporary support while installation, but they can also transfer horizontal loads from upper flange to lower and support vertical strut against buckling. My task has been to commit strength calculation in different supporting cases and report the results to the thesis supervisor, Tuomo Poutanen. Stresses and deflections of structure were solved mainly using FEM- software. A part of the post processing has done manually. The results show that these braces work as they were planned. However, it is important to understand that although the calculations are quite accurate the real construction is never fully similar than in theory. But in the end, based on the results, it would be worthwhile to use these new braces in practice, at least experimentally.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	7
2. JÄYKISTEET SORMIJATKETUSTA PUUSTA.....	8
3. NAULALEVYRISTIKKOKATON TOTEUTUS	10
3.1 Pääperiaate	10
3.2 Kuormat	11
3.3 Pystykuormat	11
3.4 Vaakakuormat.....	12
3.4.1 Tuulenpaine	12
3.4.2 Epäkeskisyyksistä aiheutuvat kuormat	13
3.5 Käytössä olevat jäykistysmenetelmät	14
3.5.1 Työaikainen tuenta.....	15
3.5.2 Puristetun uumasauvan nurjahdustuenta.....	15
3.5.3 Puristetun paarteen nurjahdustuenta	17
3.5.4 Yläpaarteiden tasoon sijoitetut vaakaristikot.....	18
3.5.5 Pukkijäykistys.....	18
3.5.6 Levyjäykistys.....	19
3.5.7 Vanteet.....	19
3.5.8 Ruoteiden alapuolinen vinolaudoitus	19
3.5.9 Yläpaarteen alapintaan asennettava erillinen vinosidonta.....	20
3.5.10 Pukit ja jäykistysristikot	20
4. JÄYKKÄNURKKAISET JÄYKISTEET.....	21
4.1 U-pukki	21
4.2 S-pukki.....	22
4.3 O-pukki	23
4.4. Y-pukki	24
4.5 Seinäkiinnityspukki	25
4.6 Tuuliristikko.....	26
5. LASKENTA.....	27
5.1 Rakenteen laskentamalli	28
5.1.1 Geometria	28
5.1.2 Elementit.....	30
5.1.2 Materiaaliominaisuudet	30
5.1.2.1 Puun materiaaliominaisuudet lyhyesti.....	30
5.1.2.2 Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet.....	33
5.2 Käsintehdyt tarkastelut.....	33
5.2.1 Yksittäiset jännitykset.....	34
5.2.2 Puristussauvan nurjahdustarkastelu	35
5.2.4 Yhdistetyt jännitykset	37
6. TULOKSET	40
6.1 Tulosten jälkikäsitteleminen	41
6.2 Tulosten arviointi	42
6.2.1 Pukkien toiminta.....	42
6.2.2 Ristikoiden koon vaikutus rasiin.....	44

6.2.3 U-pukin toiminta nurjahdustukena 44

LÄHTEET

LIITTEET (CD:llä)

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1 | Laskentatulosten yhteenveto |
| 2 | Malliristikko |
| 3 | Jännitystaulukko |

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

k-jako	keskeltä keskelle mitta, jakoväli, kk
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
PLY	Puurakentamisen laatu yhdistys
E	kimmomoduli
G	liukumoduli
f_{ck}	ominaispuristuslujuus
f_{tk}	ominaisvetolujuus
f_{bk}	ominaistaiutuslujuus
f_{vk}	ominaisleikkauslujuus syyn suunnassa
f_{vfk}	ominaisleikkauslujuus syihin nähden kohtisuorassa suunnassa
N	normaalivoima
V	leikkausvoima
M_b	taivutusmomentti
M_t	vääntömomentti
$\sigma_{t/c}$	normaalijännitys (veto / puristus)
σ_v	leikkausjännitys
σ_b	taivutusjännitys
b	poikkileikkauksen leveys
h	poikkileikkauksen korkeus
A	poikkileikkausala
I	jäyhyysmomentti
W	taivutusvastus
λ	hoikkuusluku
i	jäyhyys säde
L_c	nurjahduspituus
k_s	hoikkuudesta ja epäkeskisyydestä riippuva kerroin

1. JOHDANTO

Tutkintyöni liittyy Tuomo Poutasen kehittelemiin, uudenlaisiin naulalevyristikkokaton jäkistyskappaleisiin. Poutanen toimii dosenttina Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan osatolla, ja hänen erikoisalaansa ovat puurakenteet. Sain tehtäväkseni kattorakenteen kolmiulotteisen tarkastelun rasiutusten ja muodonmuutosten suhteen. Laskelmat suoritetaan tietokoneella, sillä kyseessä on hyperstaattinen avaruusrakente, jonka käsinlaskenta olisi äärettömän työlästä. Nykypäivänä paljon yksinkertaisemmatkin rakennemallit lasketaan työelämässä yleensä tietokoneella.

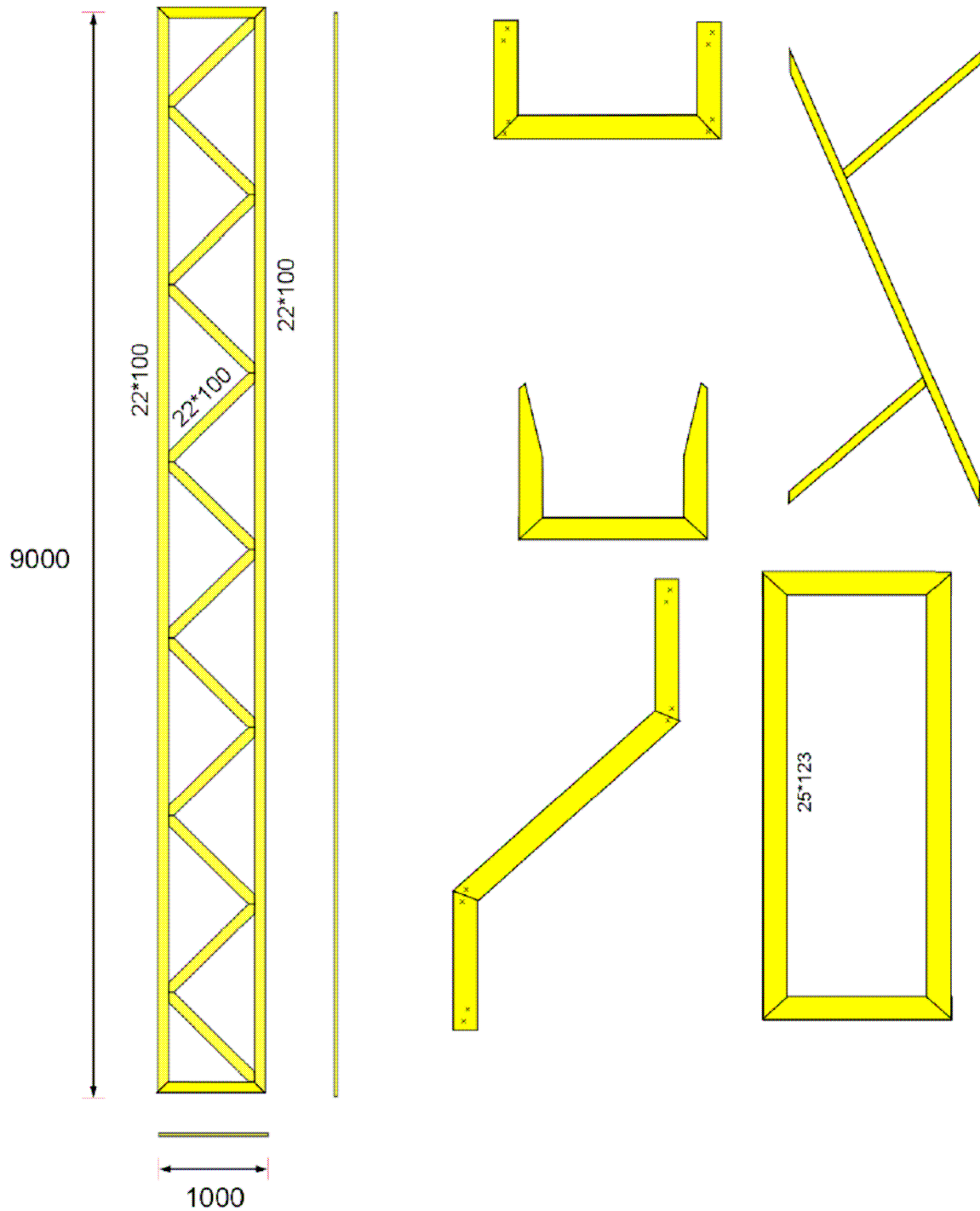
Hyperstaattiset rakenteet ratkaistaan FEM-laskennalla (Finite Element Method), missä rakenne jaetaan halutusta laskutarkkudesta riippuen riittävän pieniksi osiksi ja koostetaan osien jäykkyyshyhtälöistä koko rakenteen jäykkyyttä vastaava yhtälöryhmä. Ratkaistavia yhtälöitä kertyy helposti tuhansia, joten vain tietokoneen käyttö laskennassa tulee kysymykseen. Markkinoilla on paljon eritasoisia FEM-ohjelmia. Niitä ei käytetä ainoastaan rakenteiden lujoustarkasteluihin, vaan myös esimerkiksi termodynamiikan ja magnetismin ongelmia ratkotaan FEM-ohjelmilla. Yleensä pätee, että mitä rajoittuneempi ohjelma on kyseessä, sitä helpompaa ja kätevämpää sen käyttö on. Vastaavasti monipuoliset ohjelmat ovat työläitä käyttää ja niiden käyttö vaatii elementtimenetelmän paremman tuntemuksen.

Tähän työhön valittiin laskentaohjelmaksi Ansys ED 10.0. Ohjelma on hyvin monipuolinen, ja sillä voidaan laskea rakenteiden lisäksi paljon muutakin. Kyseessä on lähes ilmainen opiskelijalisenssi, minkä vuoksi ohjelmassa on joitakin rajoituksia. Ansysin tärkein ominaisuus moniin muihin ohjelmiin verrattuna tässä työssä on se, että sillä voidaan ratkaista myös 3-ulotteisia rakenteita. Hyvänä ominaisuutena mainittakoon vielä epälineaaristen tehtävien ratkaisu, jolloin voidaan tutkia myös esimerkiksi nurjahdustapauksia. Ohjelman valintaa vaikutti myös se, että työn käynnistyessä ei vielä tiedetty, mitä kaikkea tulaisiin laskemaan. Mahdollisimman monipuolisen ohjelman valinnalla säästyttiin usean eri ohjelman käytön opettelulta.

Työskentelyni alkoi uuden, hyvin raskaan ohjelman käytön opettelulla. Oppiminen tapahtui miltei täysin itsenäisesti, sillä kyseinen ohjelma on suhteellisen marginaalisen joukon käytössä ja kursseja siitä järjestetään harvoin. Kirjallisuuttakaan ei ohjelmasta juuri ole. Ohjelman käytön opettelu avainasemmassa oli kanadalaisen Albertan yliopiston nettisivuilla julkaistut Ansys- laskentaesimerkit.

2. JÄYKISTEET SORMIJATKETUSTA PUUSTA

Tuomo Poutanen on tutkinut sormijatketun puun ominaisuuksia ja todennut, että siitä voitaisiin valmistaa kattoristikoiden jäykistäviä osia mittatarkkoina elementteinä. Sormijatkettua puuta kuormitettaessa murtuminen tapahtuu ehjän puun eikä liitoksen kohdalta, joten jäykkänurkkaisten kappaleiden valmistaminen on mahdollista. Tämä mahdollistaa esimerkiksi sen, että naulalevyristikon ristiinreivattu kaatumistuki välipuineen voidaan korvata puukehällä, jossa on sormijatkokset nurkissa. Kuvassa 1 on esitetty Poutasen kehittelemiä tukielementtejä. Vasemmalla on yläpaarteiden päälle naulattava tuuliristikko ja oikealla erilaisia ristikoiden väliin sijoitettavia kaatumis- ja nurjahdustukia.



Kuva 1. Sormijaketusta puusta valmistettavia jäykisteitä

3. NAULALEVYRISTIKKOKATON TOTEUTUS

3.1 Pääperiaate

Katon päätarkoitus on suojata rakennusta ulkoisilta rasituksilta ja kestää sille kohdistuvat kuormat. Kattorakenteeseen kohdistuvat kuormat ovat yleensä lumi- ja tuulikuormat sekä yläpohjarakenteiden paino.

Muitakin kuormia voi kohteesta riippuen esiintyä. Päärakennesuunnittelija ilmoittaa ristikkosuunnittelijalle edellä mainittujen kuormien ominaisarvot, ristikon ulkomitat sekä tukien paikat. Näiden tietojen pohjalta ristikkosuunnittelija suunnittelee ristikot. Ristikkosuunnittelija näkee ristikon xy-tasossa ja suunnittelee ristikon kantamaan tason suuntaisia kuormia. Ristikkosuunnittelija merkitsee suunnitelmaansa ne osat ristikosta, jotka pitää tukea nurjahdusta vastaan z-suunnassa. Päärakennesuunnittelijan on suunniteltava kattorakenne sellaiseksi kolmiulotteiseksi kokonaisuudeksi, että se kestää myös ristikkotason kohtisuorat rasitukset. Tällaisia rasituksia aiheuttaa sauvan nurjahduksen lisäksi, tuuli ja rakenteiden epäkeskisyys. Työaikaisessa tilanteessa ristikoita kuormittaa lähinnä sivuttainen tuulenpaine. Rakennesuunnittelijan on suunniteltava myös ristikoiden työnaikanen tuenta.

Katon jäykistys tulisi tehdä mahdollisimman yksinkertaisin rakentein, ja rakenteita rasittavat voimat tulisi viedä sivuseinille mahdollisimman lyhyttä ”reittiä” käyttäen. Näin voidaan säästää työ- ja materiaalikustannuksissa sekä minimoida mahdollisuus vaarallisiin työvirheisiin. Mitä useamman liitoksen kautta voimat välittyvä seinille, sitä suuremmalla todennäköisyydellä rakenteessa on heikko kohta, josta koko katon romahtaminen voi saada alkunsa. Jos tuentarakenteina käytetään esimerkiksi vetotankoina toimivia lautoja, on niiden jäykkyyden muutos kääntäen verrannollinen pituuden lisäykseen. Eli kun tukirakenteen pituus puolittuu, voidaan myös poikkileikkausala puolittaa jäykkyyden säilyessä samana. On myös hyvä välttää ylimääräisten naulaliitosten käyttämistä, sillä myös ne heikentävät rakenteen jäykkyyttä.

NR-katto tulee tukea ja jäykistää ainakin seuraavilta osin: /5/

- NR-kannattajien työaikainen tuenta kaatumista vastaan
- päätykannattajien tuenta tuulenpainetta vastaan
- ylä- ja/tai alapaarretason (levy)jäykistys
- NR-kannattajan puristetut paarteet on aina tuettava sivusuunnassa
- nurjahdusalttiiden sauvojen sivuttaistuenta.

3.2 Kuormat

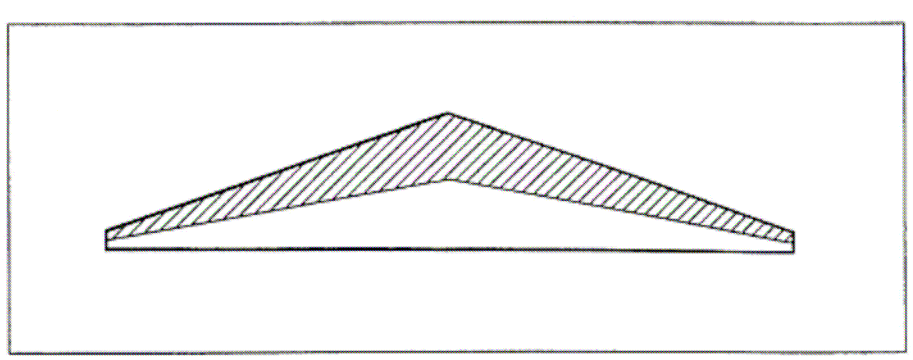
3.3 Pystykuormat

Suomen olosuhteissa kattoristikolle aiheutuu pystykuormia pääasiassa lumen ja yläpohjarakenteiden painosta sekä tuulesta. Myös alapaarteeseen vaikuttaa pieniä kuormia, kuten esimerkiksi sisäkaton omapaino. Vesikattorakenteiden painona käytetään yleensä 0.5 kN/m^2 . Lumikuorman suuruus riippuu katon muodosta ja rakennuksen sijainnista ollen noin 2 kN/m^2 . Tuulen aiheuttama voima alaspäin on melko vähäinen verrattuna lumikuormaan. Yleensä mitoituksessa tarkistetaan, että kattorisikot on kiinnitetty riittävän hyvin tuulen nostavaa voimaa vastaan.

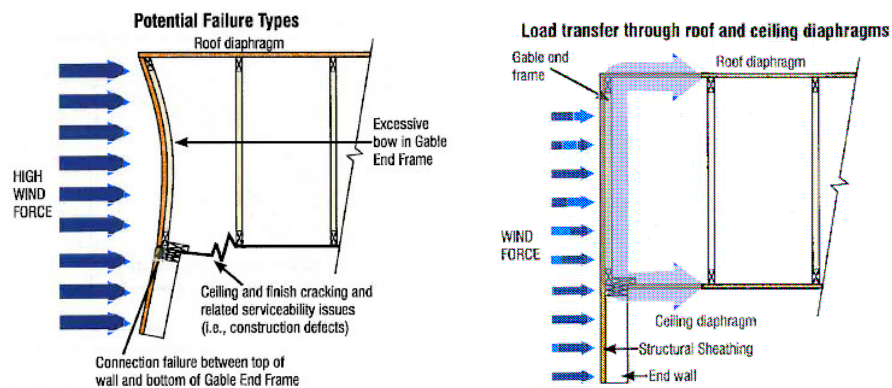
3.4 Vaakakuormat

3.4.1 Tuulenpaine

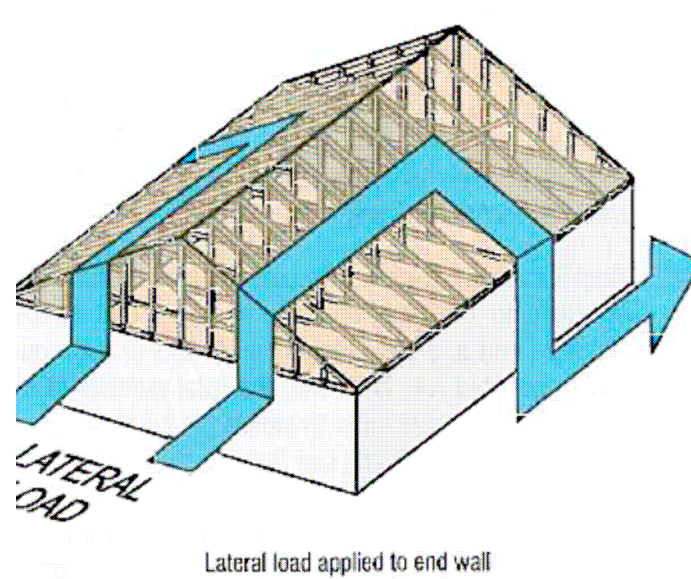
Suurin sivuttaiskuormien aiheuttaja on tuulenpaine. Sen suuruus vaihtelee rakennuksen geometrian ja sijainnin mukaan. Työaikaisessa tilanteessa tuulenpaine kuormittaa jokaisen asennetun ristikon paarteiden ja sauvojen pintoja. Lopullisessa tilanteessa sivuttainen tuuli kuormittaa vain päätyjä, mutta huomattavasti suuremmalta pinta-alalta. Päädyn tuulikuorman oletetaan jakautuvan ylä- ja alapaarretasoille kuvan 2 mukaisesti. Yläpaarretasoa kuormittaa tuulenpaine rasteroitulta alalta. Kuvissa 3 ja 4 on havainnollistettu tuulikuorman välittyminen päädyistä perustuksille. Kuvat ovat peräisin amerikkalaisesta BCSI 2006 ristikkojäykistysohjeesta /1/.



Kuva 2. Tuulikuormien oletettu jakautuma päädyssä /5/



Kuva 3. Tuulikuorman jakautuminen päätyseinällä /1/



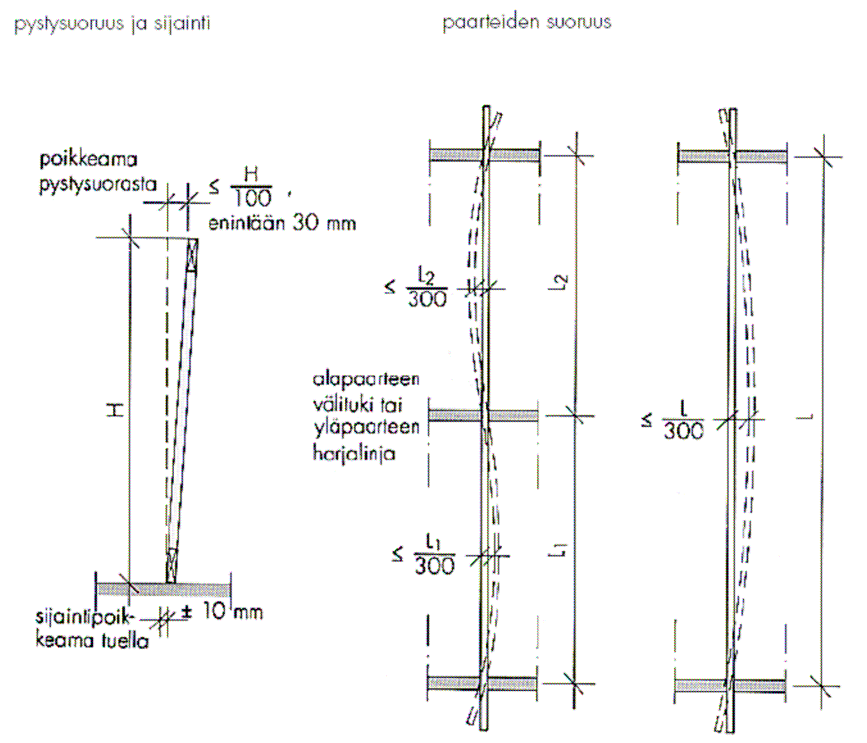
Kuva 4. Tuulikuorman välittyminen päädystä perustuksille /1/

Kuvasta 3 nähdään, kuinka päätyyn puhaltavan tuulen aiheuttama kuormitus jakautuu ylä- ja alapaarretasolle. Mikäli rakennuksen päätyrakenne on tehty naulalevyristikolla kuten kuvassa, syntyy seinän yläpään ja ristikon alapaarteen välille nivel. Tällöin alapaarretaso on jäykistettävä niin, ettei nivel pääse työntymään sisäänpäin. Mikäli pääty on toteutettu ylös viedyillä runkotolpilla ja päätypalkilla, ei alapaarretasoa tarvitse välttämättä jäykistää, sillä tällöin niveltä ei pääse syntymään ja voimat välittyvät yläpaarretasolta jäykisteiden avulla sivuseinille. Molemmissa tapauksissa on huolehdittava, että yläpaarretaso on riittävän jäykkä.

3.4.2 Epäkeskisyyksistä aiheutuvat kuormat

Sivuttaiskuormia aiheutuu myös pystykuormia kantavien rakenteiden epäkeskisyyksistä. Nurjahdusalttiin sauvan aiheuttama sivuttaiskuorma tukirakenteille on noin 2 % sitä puristavasta normaalivoimasta. Myös ristikon vinoudesta aiheutuu vaakakuormia. RT-kortistossa asennuksessa sallituille mittapoikkeamille on asetettu kuvan 4 mukaiset toleranssit. Pystysuoraan linjaan sallitaan $H/100$:n suuruinen,

kuitenkin enintään 30 mm:n poikkeama /8/. Tästä pystysuoruuspoikkeamasta aiheutuu se, että puristussauvan päähän syntyy vaakasuora voimakomponentti, jonka suuruus on noin 1 % pystysuorasta voimasta. Jos esimerkiksi ristikon yläpaarteelle kohdistuva katon omapaino ja lumikuorma aiheuttavat 2.25 kN/m:n suuruisen viivakuorman, kohdistuu yläpaarteelle vielä 0.0225 kN/m:n suuruinen vaakakuorma. Jänneväliltään 10-metrisessä ristikossa olisi vaakakuorman kokonaisvaikutus noin 225 N (22.5 kg), eli kyse on kuitenkin hyvin pienestä kuormasta.



Kuva 4. NR-kannattajien asenustoleranssit

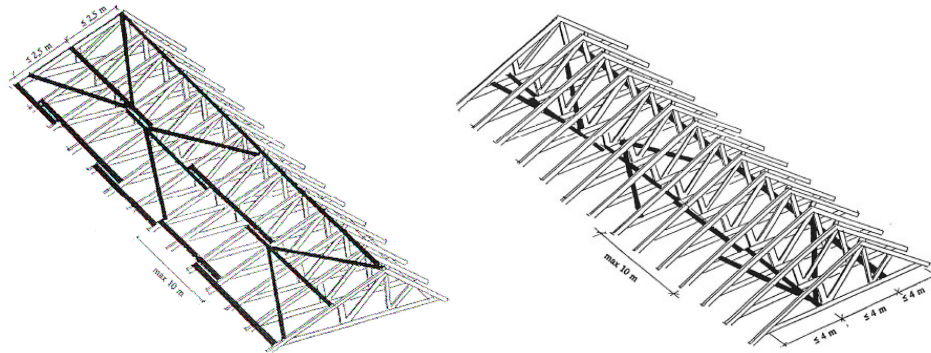
3.5 Käytössä olevat jäykistysmenetelmät /4;5/

Seuraavassa on esitelty lyhyesti käytössä olevia naulalevyristikkokaton jäykistämistapoja. Ne on poimittu Ympäristöministeriön julkaisusta NR-

kattorakenteen jäykistyksen suunnittelu (2000) sekä PLY:n Naulalevyrakenteet-oppaasta (1993).

3.5.1 Työaikainen tuenta

Ristikoiita rasittaa työaikana pääasiassa tuulenpaine. Ristikot on heti paikallenoston jälkeen tuettava niin, etteivät ne kaadu tuulen vaikutuksesta. Ylä- ja alapaarteet tuetaan kuvan 5 mukaisilla reivauksilla. Yläpaarteiden vinositeet voidaan korvata paikallarakennetulla tai valmiilla tuuliristikolla ja NR-pukeilla. Kuvan mukainen yläpaarteiden työaikainen tuenta joudutaan purkamaan ja lopulliset jäykisteet rakennetaan erikseen.

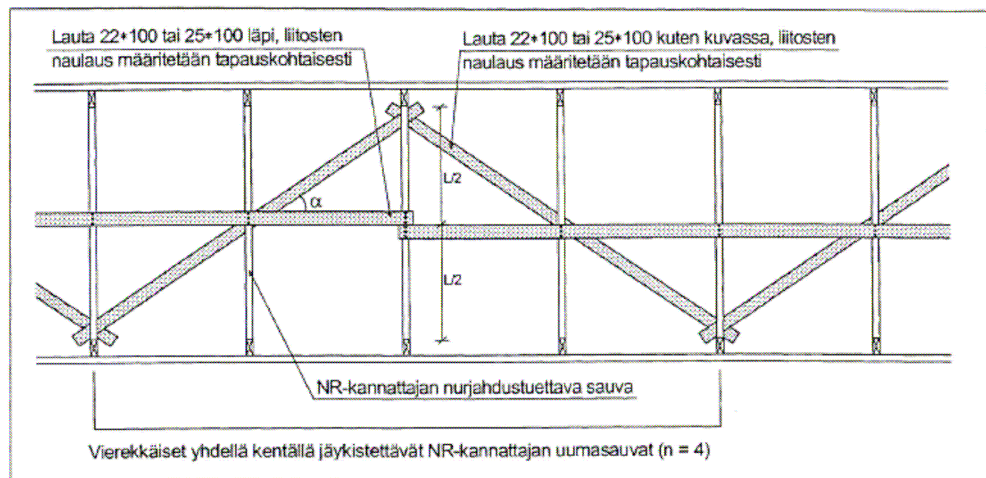


Kuva 5. Ristikoiden työaikainen tuenta

3.5.2 Puristetun uumasauvan nurjahdustuenta

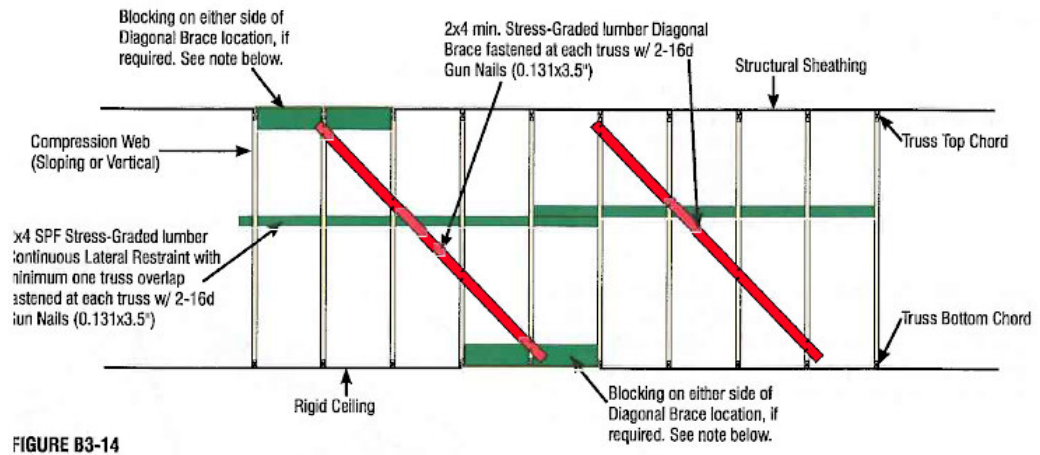
Tarpeenvaatiessa joudutaan NR-ristikon joitakin uumasauvoja tukemaan kannattajan tasoon nähden kohtisuorassa suunnassa nurjahdusta vastaan. Ristikkosuunnittelijan tulee

merkata nurjahdustuettavat sauvat ja paarteet ristikkopiirustukseen, jotta rakennesuunnittelija voi suunnitella nurjahdustuennan.



Kuva 6. Esimerkki uumasauvan nurjahdustuennasta. /5/

Kuvassa 6 nähdään Ympäristöministeriön vuonna 2000 julkaiseman ohjeen mukainen uumasauvan nurjahdustuenta. Hoikkuutensa vuoksi lautojen voidaan ajatella toimivan ainoastaan vetotankoina, joilla voimat kuljetetaan nurjahdusalttiilta sauvalta ylä- ja/tai alapaarretasoon. Nurjahdustuenta suunniteltaessa on huomioitava, että tason johon voimat viedään, on oltava jäykistetty niin, että voimat välittyvät tason kautta seinälinjoille. Muussa tapauksessa on vaarana, että sauvan alkaessa nurjahtaa aiheutuu muille ko. tuentasysteemiin liitetuille sauvoille tai paarteille ylimääräisiä rasituksia.



Kuva 7. Uumasauvan nurjahdustuentaohje /1/

Ympäristöministeriön tuentamallissa voimat välittyvä vinositeeltä uumasauvan päähän ja siten naulalevyliitoksen kautta alapaarteelle. Tällainen saattaa pitkällä aikavälillä rasittaa naulalevyliitosta haitallisesti. Parempi tapa olisi viedä kuormat paarteiden väliin asennetuille kapuloille kuvan 7 tapaan, jolloin rasitus jakautuu tasaisemmin.

3.5.3 Puristetun paarteen nurjahdustuenta

Puristetut paarteosat vaativat lähes aina sivuttaistuennan. Yleensä ristikon alapaarre on vedetty ja yläpaarre ainakin osittain puristettu. Yläpaarteen puristetut osat vaativat sivusuuntaisen nurjahdustuennan. Yleensä nurjahdustuenta hoidetaan ruoteilla ja jollain jäykistävällä osalla kuten vinosidonnulla, poimulevykätteella tai vaakaristikolla, joka välittää voimat ruoteilta seinälinjalle. Puristetuttujen osien tuennat on aina mietittävä tapauskohtaisesti. Esimerkiksi ulokkeellisen ristikon alapaarre on yleensä puristettu.

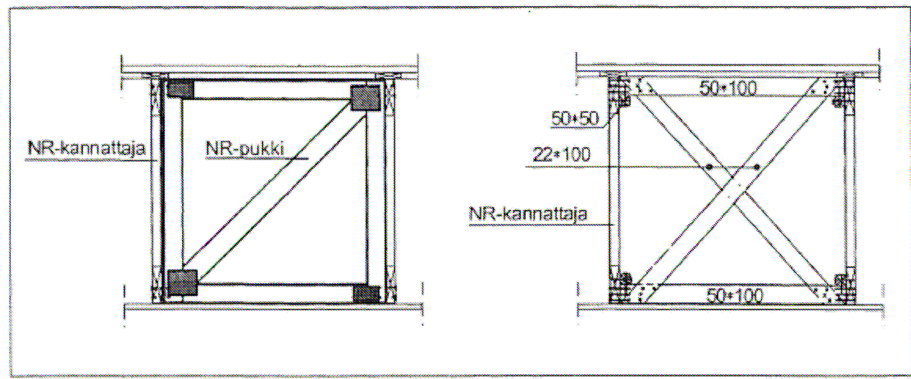
3.5.4 Yläpaarteiden tasoon sijoitetut vaakaristikot

Jäykistävät vaakaristikot voidaan tehdä paikalla tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää tehdasvalmisteisia NR-jäykistysristikoita. Vaakaristikot naulataan NR-kannattajien yläpaarteisiin, joko niiden päälle tai väliin. Vaakajäykistysristikon uumasauvat mitoitetaan nurjahdustukemattomina ja paarteet oletetaan heikommassa suunnassa riittävästi tuetuiksi kun ne kiinnitetään riittävän hyvin kattokannattajan yläpaarteeseen. Paikallarakennettavan vaakaristikon paarteina toimivat kannattajien yläpaarteet.

Sivuseinille tehdään vinosidonta tai asennetaan NR-pukki, jolla voimat välittyvä yläpaarretasosta seinille ja sitä kautta perustuksille.

3.5.5 Pukkijäykistys

Mikäli NR-kannattajien alapaarretaso on jäykistetty, voidaan kattorakenteen jäykistykseen käyttää paikalla valmistettuja tai tehdasvalmisteisia pukkeja, jotka asennetaan NR-ristikoiden väliin. Kuvan 8 mukaiset pukit asennetaan niin tiheään, että yläpaarre pystyy välittämään niille pukkien väliin jääviltä ruoteilta tulevat vaakavoimat. Pukit asennetaan yläpaarretasoon rakennuksen molempiin päätyihin ja tarvittaessa myös keskiosalle. Pukkijäykistys aiheuttaa ristikon alapaarteeseen pystykuorman, mikä pitää huomioida suunnittelussa.



Kuva 8. Periaatekuva: NR-pukki sekä paikalla rakennettava pukki

3.5.6 Levyjäykistys

Suoraan paarteisiin kiinnitetyt levyt toimivat paarteiden sivuttaistukena sekä vaakajäykisteenä. Tällöin levytys ja sen kiinnikkeet on mitoittettava jäykisteeksi ja levytyksen pitää ulottua pitkittäisille seinälinjoille. Sekä ylä- että alapaarretaso on mahdollista jäykistää tällä menetelmällä.

3.5.7 Vanteet

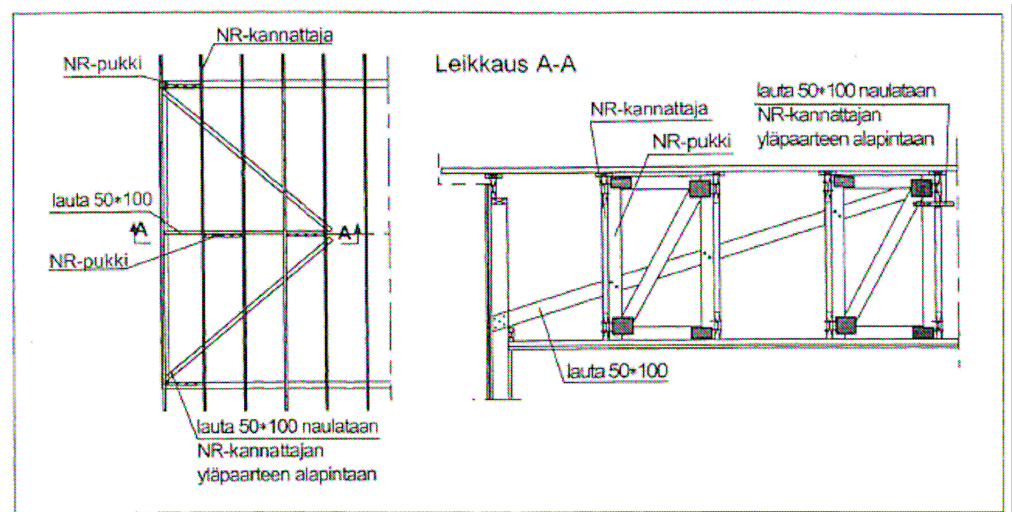
Jäykistyksen toteuttamiseen voidaan käyttää metallisia vanteita. Niiden lämpölaajeneminen, kiristys ja kiinnitys ovat kuitenkin ongelmallisia.

3.5.8 Ruoteiden alapuolinen vinolaudoitus

Rakennuksen molempiin päätyihin ruoteiden alapuolelle naulattavalla vinolaudoituksella voidaan jäykistää yläpaarretaso vaakavoimia vastaan. Lisäksi tarvitaan seinälinjoilla pukit, joilla voimat välitetään yläpaarretasolta seinille.

3.5.9 Yläpaarteen alapintaan asennettava erillinen vinosidonta

Vinositeenä toimiva lauta naulataan yläpaarteen alapintaan kuvan 9 mukaisesti. Kaltevuuskulma määräytyy NR-kannattajan uumasauvojen jaon mukaan. Seinälinjoille asennetaan pukit, jotka välittävät voimat yläpaarretasolta seinille.



Kuva 9. Jäykistys erillisellä vinosidonnalla

3.5.10 Pukit ja jäykistysristikot

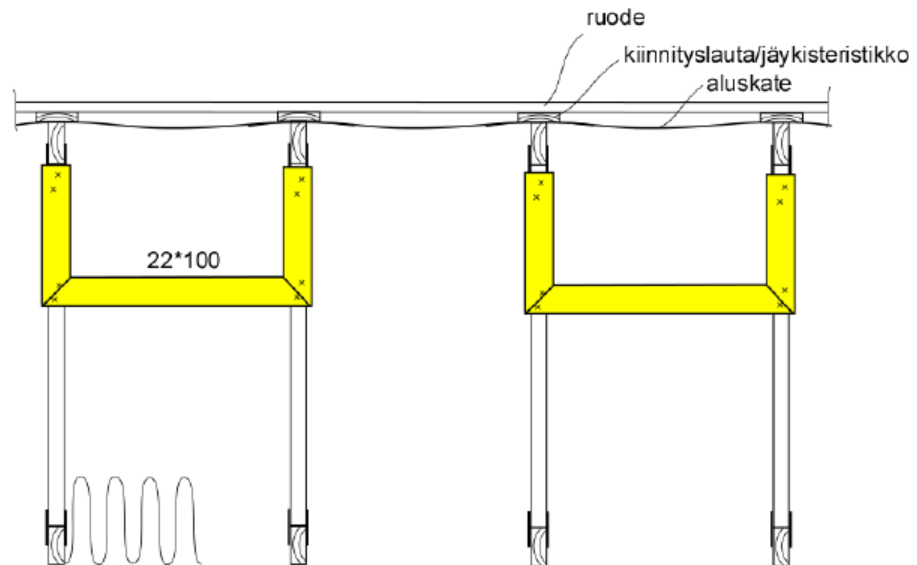
Pukit asennetaan joka toiseen kannattajaväliin ja niiden lisäksi tarvitaan jäykistävä vaakaristikko molempiin pätyihin. Pukit toimivat asennusaikaisena tuentana ja NR-pukit voivat lisäksi toimia myös uumasauvan nujahdustukena.

4. JÄYKKÄNURKKAISET JÄYKISTEET

Sormijatketut jäykkänurkkaiset elementit ovat vaihtoehtoja edellä mainituille jäykistyskappaleille. Kuvasta 1 nähtiin Poutasen jäykistekonsepti. Seuraavassa on esitelty jäykistekappaleet ja niiden käyttömahdollisuudet yksitellen.

4.1 U-pukki

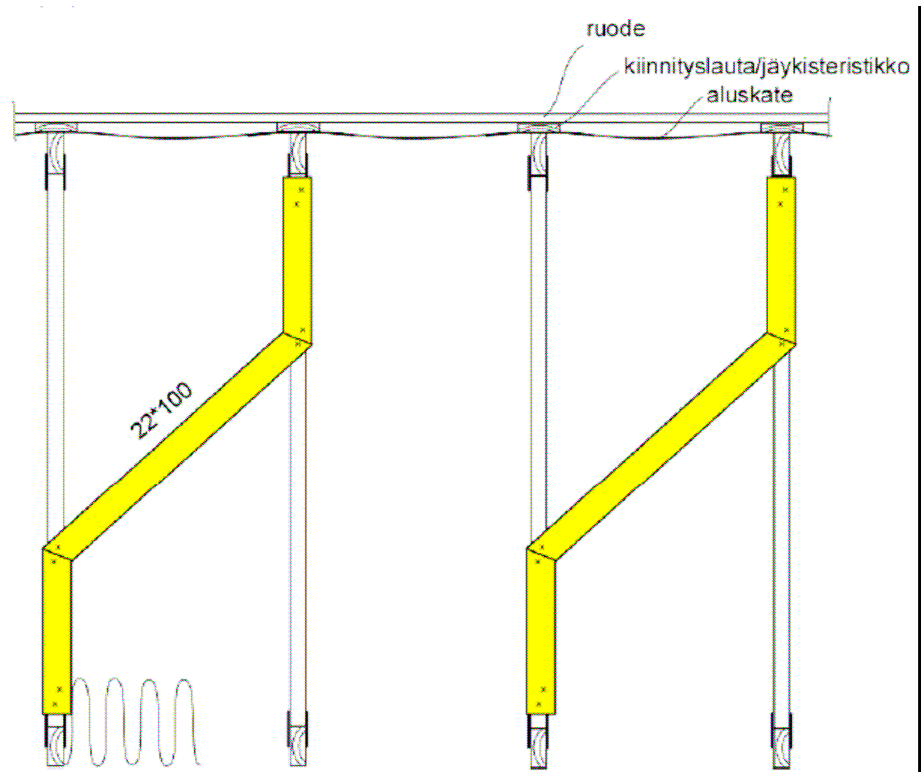
Pukki on valmistettu poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm:n laudasta. Pukki naulataan ristikoiden vertikaalisauvojen kylkiin kuvan 10 mukaisesti. U-pukit toimivat sekä työaikaisena että lopullisena kaatumistuentana. Lisäksi niitä voidaan käyttää uumasauvan nurjahdustukena.



Kuva 10. U-pukki

4.2 S-pukki

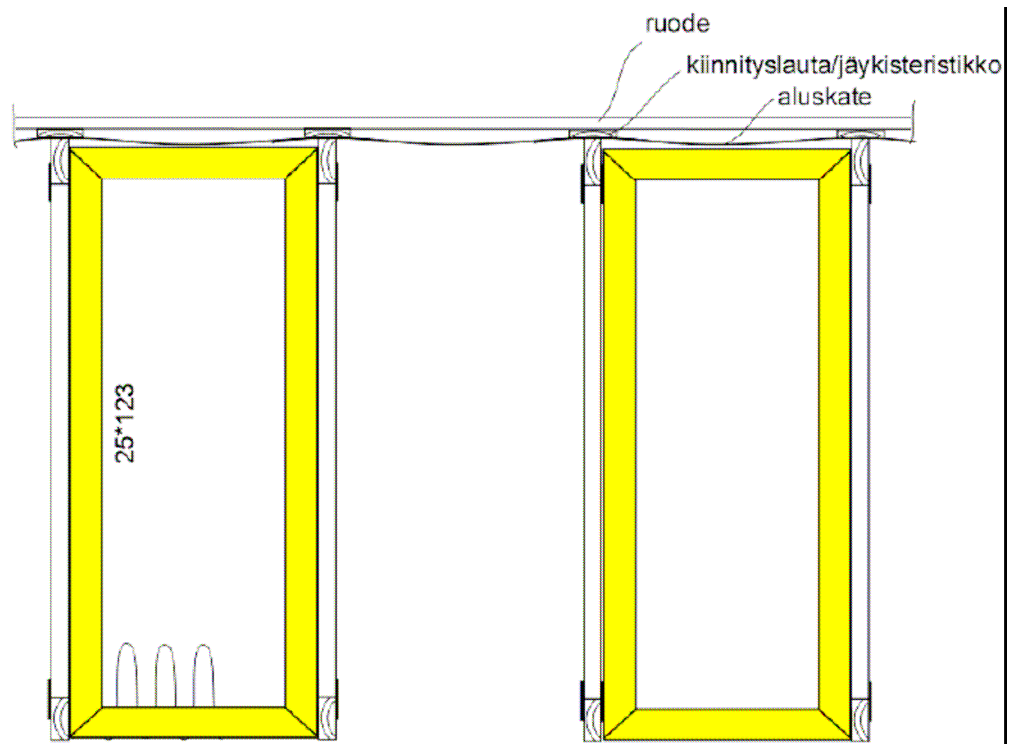
S-pukki (kuva 11) on käyttötarkoitukseltaan ja asennustavaltaan samanlainen kuin u-pukki, mutta se on suunniteltu käytettäväksi suuremmille voimille. Myös s-pukki on valmistettu poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm:n laudasta.



Kuva 11. S-pukki

4.3 O-pukki

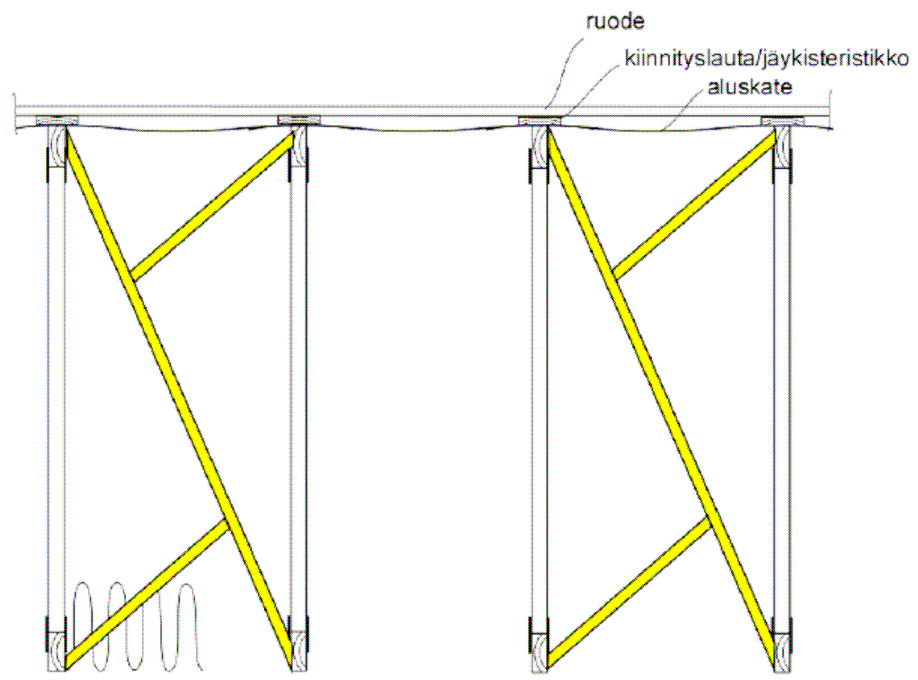
O-pukki (kuva 12) toimii kaatumis- ja nurjahdustukena ja tuo kuormat yläpaarteelta alapaarteelle. Se on valmistettu poikkileikkaukseltaan 25 mm x 123 mm:n laudasta. Sitä voidaan käyttää sekä asennusaikaisena että lopullisena tukena. O-pukki toimii myös uumasauvan nurjahdustukena.



Kuva 12. O-pukki

4.4. Y-pukki

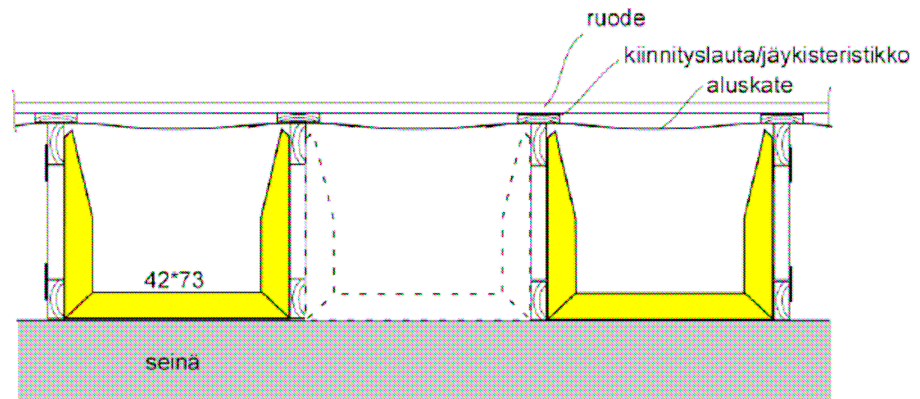
Y-pukki (kuva 13) on asennus- ja jäykistepukki, joka tuo kuormat yläpaarteelta alapaarteelle. Se on valmistettu poikkileikkaukseltaan 32 mm x 73 mm:n laudasta. Sitä voidaan käyttää sekä asennusaikaisena että lopullisena tukena.



Kuva 13. Y-pukki

4.5 Seinäkiinnityspukki

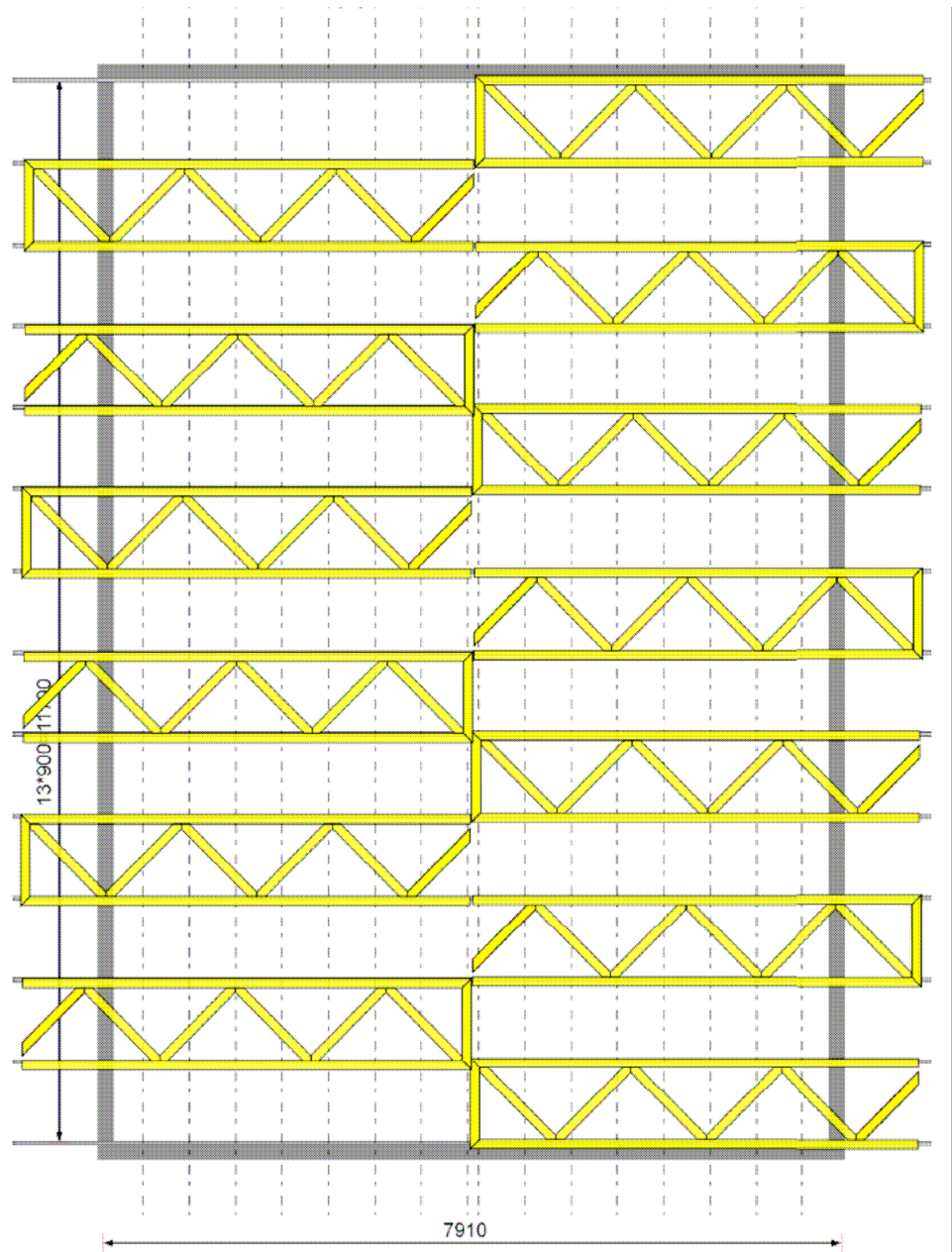
Poikkileikkaukseltaan 42 mm x 73 mm:n laudasta valmistettu seinäkiinnityspukki (kuva 14) tuo voimat yläpaarteelta seinälinjoille. Pukit kiinnitetään ristikoiden väliin hahlokiinnityksellä.



Kuva 14. Seinäkiinnityspukki

4.6 Tuuliristikko

Yläpaarteiden päälle naulattava tuuliristikko (kuva 15) on poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm:n lautaa. Yhdessä seinäkiinnityspukin kanssa sillä voidaan jäykistää rakennuksen päädyt ja tarvittaessa muutkin ristikkovälit.



Kuva 15. Tuuliristikko

5. LASKENTA

Laskelmissa tutkittiin, minkälaisia rasituksia rakenteeseen syntyy, kun käytetään edellä esiteltyjä tukikappaleita. Tutkittiin kaksi eri päätapausta: millaisia rasituksia tukikappaleeseen kohdistuu ja minkälaiset rasitukset tuettaviin rakenteisiin eli naulalevyristikoihin syntyy tukikappaleita käytettäessä. Ensimmäiseksi mallinnettiin päädyistä luettuna kaksi ensimmäistä ristikkoa ja kokeiltiin niihin edellä mainittuja jäykisteitä ja nurjahdustukia. Tarkastelun alaisena oli kaksi eri päätapausta:

1. Asennusaika:

Miten ristikot on jäykistettävä, jotta ne kestävät kaatumatta 0.25 kN/m^2 :n sivutuulen?

2. Lopullinen tilanne:

Miten ristikot kestävät lumikuorman 2 kN/m^2 , katon omanpainon 0.5 kN/m^2 , tuulenpaineen päätyyn 0.5 kN/m^2 ja alkuvinoudesta aiheutuvan yläpaarten vaakakuorman $N/100$?

Ristikoiden omaa painoa ei ole huomioitu. Varsinainen rasitusten ja deformaatioiden laskenta tehtiin Ansys 10.0 FEM -laskentaohjelmalla. Tutkimusristikkona oli liitteen 2 mukainen, Suomessa hyvin yleinen ristikkomalli.

Laskenta suoritettiin pääasiassa kolmella eri kattoristikkokokoolla. Alapaarten jännevälit olivat noin 6.2 m, 8.2 m ja 13.4 m. Ristikoiden k-jako on kaikissa tapauksissa 900 mm. Pienin ristikko mallinnettiin liitteen 2 mukaisesta kattoristikosta. Isommat ristikot mallinnettiin skaalaamalla alkuperäinen ristikko kertoimilla 1.32 ja 2.16. Poikkileikkausarvot suurennettiin samassa suhteessa.

5.1 Rakenteen laskentamalli

5.1.1 Geometria

Ristikon geometria mallinnettiin pintakeskiöviivojen mukaan, eikä epäkeskisyyksiä huomioitu tässä tilanteessa. Kuvasta 16a ilmenee, että diagonaalisauvojen pintakeskiöviivat eivät todellisuudessa yhdy nurkissa, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi oletetaan, että voimat välittyvät kaikilla sauvoilla aksiaalisesti. Kuvassa 16b ristikon pintakeskiöviivat on idealisoitu siten, että ne yhtyvät nurkissa, ja näin ollen ristikon geometria muuttuu laskennallisesti järkeväksi. Muutoksen havainnollistamiseksi alkuperäiset pintakeskiöviivat on kuvattu pisteviivalla. Kuvasta 16c nähdään ristikon solmupisteiden koordinaatit ja elementtijako. Kaikissa laskuissa ei käytetty täysin samaa elementtijakoa, koska ”kiinnityspisteitä” tarvittiin eri määrä eri jäykisteille. Tämä menettely ei kuitenkaan muuta tuloksia ainakaan epätarkempaan suuntaan.

Teoreettinen nivelristikko ei sovi tähän tarkasteluun, sillä siirryttäessä tasosta avaruuteen muuttuu nivelristikko staattisesti määrätystä rakenteesta mekanismiksi. Teoriassa se vaatisi paljon enemmän tukia kuin todellinen ristikko. Näin ollen nivelristikko ei sovi laskentamalliksi sivuttaistuennan tutkimiseen. Rakennetta kuvaa hyvin kehäristikkomalli, jossa paarteet ovat jatkuvia ja diagonaalit liittyvät niihin nivelin, sillä mittauksin on osoitettu, että mekaanisin liittimin liitetyille diagonaaleille ei synny momenttia juuri lainkaan [2;6]. Tässä päädyttiin käyttämään mallia, jossa kaikki liitokset ovat jäykkiä, mutta naulalevyliitospöydissä sauvojen kimmokerroin on pienennetty 50 mm:n matkalta 10 %:iin käytettävästä puun kimmoisuudesta.

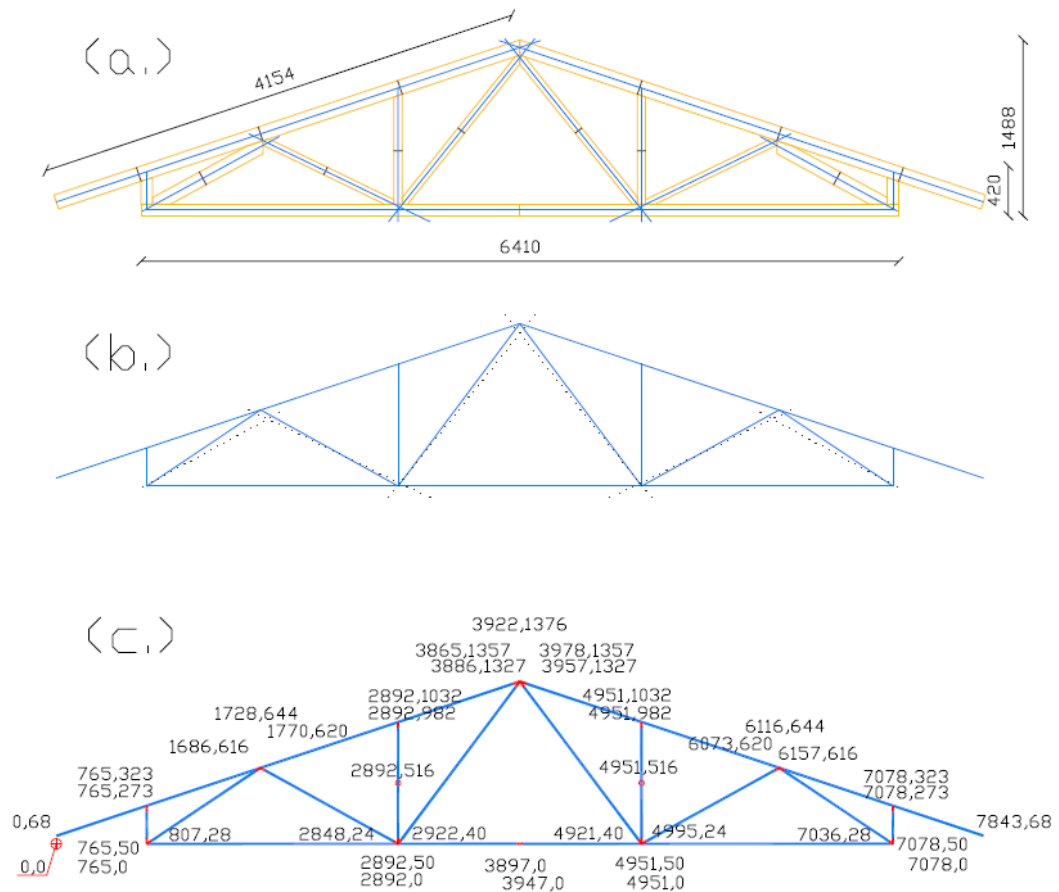
Ristikot on tuettu toisesta päästä nivelellä ja toisesta päästä liukutuella. Lukitut solmuniirtymät tukipisteissä ovat siis seuraavat:

Tuki 1: Tuki 2:

$-u_x$

$-u_y$ $-u_y$

$-u_z$ $-u_z$



Kuva 16. a. Ristikko ja pintakeskiöviivat b. Mallinnettu geometria c. Laskentamallin elementtijako ja solmupisteiden koordinaatit

5.1.2 Elementit

Kun laskentamallin geometria tiedetään, voidaan seuraavaksi valita elementit, joista malli koostetaan. Jotta laskentaa voitaisiin pitää luotettavana, täytyy elementin vastata rakenteen osan todellista toimintaa riittävällä tarkkuudella. Kaikkiin elementteihin liittyy *input*- ja *output*-data. Input-data on tietoa, joka syötetään ohjelmaan laskentaa varten ja output-data on laskennasta ulos saatava tieto. Input-data koostuu pakollisista ja vaihtoehtoisista tiedoista. Ansysin help-tiedosto sisältää elementtikirjaston, johon on listattu kaikki ohjelman käyttämät elementtityypit. Elementtikohtaisista tiedoista nähdään, mitä tietoja kullekin elementille pitää ja voidaan syöttää sekä mitä tietoja elementistä saadaan ulos.

Tutkitut rakennemallit on koostettu Ansysksen BEAM188- ja LINK180- elementeistä. BEAM188 on 3D-palkkielementti, jonka alku ja loppusolmuilla on kullakin kuusi vapausastetta. Vastaavasti 3D-sauvaelementillä LINK180 on molemmissa solmuissa kolme vapausastetta.

5.1.2 Materiaaliominaisuudet

5.1.2.1 Puun materiaaliominaisuudet lyhyesti /7;10/

NR-kattoristikoissa käytetään ainoastaan mitallistettua tai höylättyä lujuuslajiteltua sahatavaraa. Käytettävät lujuusluokat ovat T40, T30, T24 ja T18. Tässä työssä tarkastellaan puun lujuusluokkaa T24, ja myös jäykistävien kappaleiden oletetaan olevan samaa puuta. Lujuus ja kimmoarvoina käytetään RakMK B10:n mukaisia arvoja (taulukko 1).

Puu on ortotrooppinen aine, eli sen materiaaliominaisuudet ovat erilaiset eri suunnissa. Puun eri lujuusarvoista taivutuslujuus f_{bk} on suurin. Hyvälaatuisen suomalaisen havusahatavaran ominaistaivutuslujuus lyhytaikaisessa kuormituksessa on noin 20 Mpa. Puun puristuslujuus f_{ck} on noin 95 % taivutuslujuudesta. Vetolujuus f_{tk} on pienempi kuin puristus- ja taivutuslujuus ollen noin 65% taivutuslujuudesta. Puussa on niin sanotusti kaksi eri lujuutta: peruslujuus ja lujuusvian lujuus. Peruslujuus on riippuvainen lähinnä ainoastaan puun tiheydestä, kun taas jälkimmäiseen vaikuttaa kappaleen muoto.

Puun puristusrurto on luonteeltaan sen soluseinämien nurjahdus tai lommahdus. Puristusrurto on paikallinen ja sitkeä. Puristusrurto tapahtuu äänettämästi ja vähitellen, ja se tapahtuu suurimman puristusjäännityksen kohdalla, se ei ”hakeudu” lujuusvian kohdalle.

Vetomurto on erilainen. Se tapahtuu yleensä lujuusvian kohdalta, erityisesti vinosyisestä paikasta. Vedetty puu murtuu siis yleensä maksimijännityksen lähimmästä heikosta kohdasta. Vetomurto on hauras, äkkinäinen ja äänekäs. Varsinaista murtoa voi edeltää paukahtelevia pienoismurtumia.

Puun yleisin lujuusvika on vinosyisyys. Syyt ovat tällöin vinossa voiman vaikutussuoraan nähden. Myös oksat ovat lujuutta heikentäviä kohtia puussa. Oksamurtuminen tapahtuu yleensä oksan ympäriltä, mikä johtuu ympäröivien syiden vinonoudesta.

Taulukko 1. Sahatavaran ominaislujuudet ja kimmomoduulit (RakMK B10) /10/

Sahatavaran ominaislujuudet ja -kimmomoduulit sekä keskimääräiset kimmomoduulit aikaluokassa B ja kosteustilassa 1. Yksikkö MN/m².

Lujuusluokka	T40	T30 T3	T24 T2	T18 T1
Lujuuksia laskettaessa				
Taivutus, f_{bk}	29	23	20	16
Puristus, f_{ck}	28	22	19	15
Puristus, $f_{c,tk}$	4,5	3,7	3,1	2,6
Veto, f_{tk}	19	15	13	8
Veto, $f_{t,tk}$	0,4	0,4	0,4	0,4
Leikkaus, f_{vk}	2	2	2	2
Leikkaus, $f_{v,tk}$	1	1	1	1
Kimmomoduuli, E_k	7000	6000	5000	4000
Liukumoduuli, G_k	350	300	250	200
Muodonmuutoksia laskettaessa				
Kimmomoduuli, \bar{E}	8500	7000	6500	5500
Kimmomoduuli, \bar{E}_\perp	280	230	180	160
Liukumoduuli, \bar{G}	420	350	320	270

Taulukko 2. Kuormitusten aikaluokat (RakMK B10) /10/

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 ≤ 2 kN
kesto < 10 h	Kaiteeseen vaikuttava kuorma

5.1.2.2 Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet

Rakenteen mallintamisessa on käytetty kahta ortotrooppista materiaalimallia. Pääosin tuulen kuormittamassa rakennemallissa on laskettaessa käytetty T24 sahatavaran aikaluokan C kimmoarvoja.

Materiaalin 1 kimmo-ominaisuudet ovat seuraavat:

- E_x 8450 MPa
- E_y 234 MPa
- E_z 234 MPa
- $G_{x,y,z}$ 416 MPa

Materiaalin 2 kimmoarvot ovat 10 % materiaalin 1 arvoista. Pääosin lumen kuormittamassa tapauksessa on materiaalille 1 käytetty aikaluokan B kimmoarvoja.

5.2 Käsintehdävät tarkastelut

Koska tietokonenlaskelmissa ei huomioida rakenteen epäkeskisyyksiä ja laskenta suoritetaan ensimmäisen kertaluvun menetelmällä, täytyy saataville tuloksille tehdä joitakin tarkasteluja. Tarkastelut tehdään kriittisimmille rakenneosille ”käsineläskentana” taulukkoläskentaohjelmaa apuna käyttäen. Talukkoläskentaohjelmassa käytetään seuraavassa esiteltyjä lujuusopin kaavoja ja ratkaisumenetelmiä.

5.2.1 Yksittäiset jännitykset

Normaalijännitykset: veto ja puristus

$$\sigma_{t/c} = \frac{N}{A} \quad (1)$$

Leikkausjännitys (puhdas)

$$\sigma_v = \frac{V}{A} \quad (2)$$

Leikkausjännitys (taivutuksen yhteydessä):

Maksimijännitys sijaitsee neutraaliakselilla ja se lasketaan suorakaidepoikkileikkauksessa kaavalla 3.

$$\sigma_v = \frac{3 V}{2 bh} \quad (3)$$

Taivutusjännitys

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} \quad (4)$$

Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys

Maksimijännitys suorakaidepoikkileikkauksen reunalla saadaan kaavasta 5.

$$\tau_{\max} = \tau_A = \frac{M_t}{W_t} \quad (5)$$

jossa

τ_A = Leikkausjännitys poikkileikkauksen pidemmän sivun keskellä

M_t = Poikkileikkauksessa vaikuttava vääntömomentti.

Suorakaidepoikkileikkauksessa $W_t = \beta bc^2$, missä

b = pidemmän sivun mitta

c = lyhyemmän sivun mitta

β = taulukosta 3 sivusuhteen funktiona saatava kerroin

Taulukko 3. Sivusuhteen funktiona saatavat kertoimet väännölle

b/c	1	1,5	2	2,5	3	4	6	8	10	∞
α	0,141	0,196	0,229	0,249	0,263	0,281	0,299	0,307	0,313	1/3
β	0,208	0,231	0,246	0,258	0,267	0,282	0,299	0,307	0,311	1/3
η	1,000	0,859	0,795	0,766	0,753	0,745	0,743	0,742	0,742	0,742

Suorakaidepoikkileikkauksessa väännöstä aiheutuva leikkausjännitys on suurimmillaan pidemmän sivun keskellä. Lyhyemmän sivun maksimijännitys saadaan kaavasta 6.

$$\tau_B = \eta \tau_A \quad (6)$$

5.2.2 Puristussauvan nurjahdustarkastelu

Hoikka puristussauva mitoitetaan kaavalla 7.

$$\frac{|\sigma_c|}{k_s f_c} + \frac{|\sigma_b|}{f_b} \leq 1 \quad (7)$$

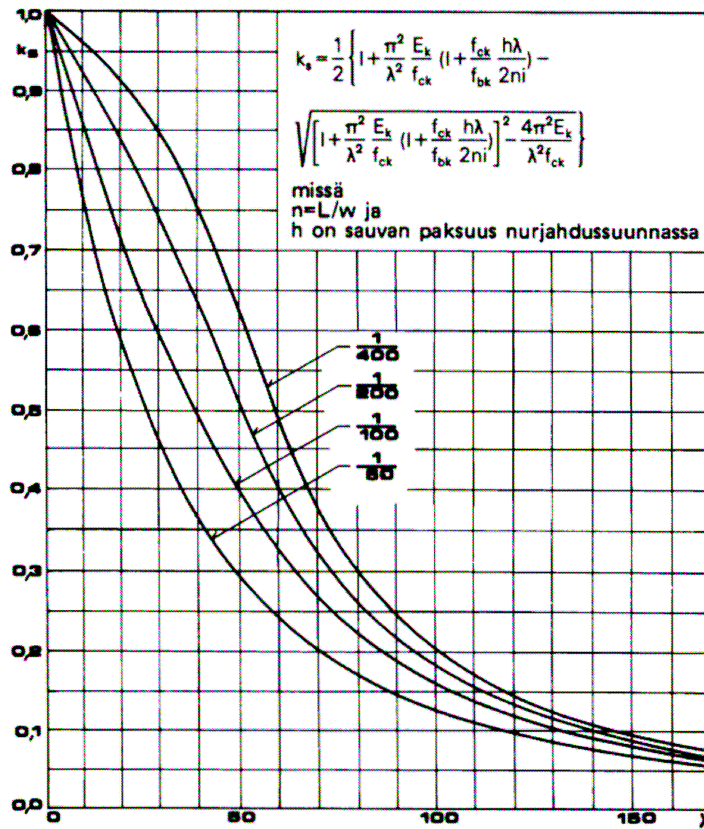
Kerroin k_s saadaan sauvan alkuepäkeskisyyden ja hoikkuuden funktiona kuvasta 17. Nurjahduskäyrissä on huomioitu puun vaihtelevien materiaaliominaisuuksien vaikutus nurjahdusherkkyyteen. Sauvan hoikkuus saadaan laskettua kaavoilla 8 ja 9. Sauvan nurjahduspituus L_c määräytyy kiintytävän mukaan (taulukko 4).

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{L_c}{i} \quad (9)$$

Taulukko 4. Sauvan nurjahduspituus (RakMK B10)

Tuentatapa	Nurjahdus- pituus L_c
Sauva on jäykästi kiinnitetty molemmista päistään	0,7 L
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta ja nivelellisesti toisesta päistään	0,85 L
Sauva on nivelöity molemmista päistään	1,0 L
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta päästä ja toisesta päästä kiinnitetty suunnalleen, muttei asemalleen	1,5 L
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta päistään ja toisesta päistään vapaa	2,5 L



Kuva 17. Nurjahduksen huomioon ottava kerroin k_s (RakMK B10)

5.2.4 Yhdistetyt jännitykset

Edellä mainittujen yksittäisten jännitysten lisäksi on tarkasteltava myös niistä koostuvia jännitysyhdistelmiä.

Yhdistetty normaali- ja taivutusjännitys

Veto- ja taivutusjäännityksen yhteisvaikutus voidaan tarkistaa kaavalla 10.

$$\frac{\sigma_t}{f_t} + \left| \frac{\sigma_{bz} + \sigma_{by}}{f_b} \right| \leq 1 \quad (10)$$

Puristus- ja taivutusjännityksen yhteisvaikutus tulee tarkistaa kaavojen 11 ja 12 mukaan, sillä yleensä puristuksessa nurjahduskapasiteetti on määräävämpi kuin puristuslujuus. Tarkistetaan tasonurjahdus molempiin suuntiin huomioiden myös nurjahdussuuntaa kohtisuoraan vaikuttavat momentit.

$$\left| \frac{\sigma_c}{k_{sz} \cdot f_c} \right| + \left| \frac{\sigma_{bz} + k\sigma_{by}}{f_b} \right| \leq 1 \quad (11)$$

$$\left| \frac{\sigma_c}{k_{sy} \cdot f_c} \right| + \left| \frac{k\sigma_{bz} + \sigma_{by}}{f_b} \right| \leq 1 \quad (12)$$

missä k_{sz} ja k_{sy} ovat nurjahduskäyrältä saatavat kertoimet z- ja y-suunnassa

k on kerroin jolla nurjahdussuuntaan nähden kohtisuoraan vaikuttava momentti pienennetään. Eurocoden mukainen arvo suorakaidepoikkileikkaukselle on 0,7. Käytetään sitä tarkasteluissa, vaikkei kyse muuten ole eurocoden mukaisesta mitoituksesta.

Yhdistetty leikkaus- ja vääntöjännitys

Puhdas leikkaus vaikuttaa tasaisesti poikkileikkauksen koko alalla, kun taas väännön aiheuttama leikkaus on suurimmillaan poikkileikkauksen pidemmällä reunalla. Yhteisvaikutus on aksiaalisesti symmetrinen ja sen suurin arvo voi puhtaasta leikkauksesta riippuen olla, joko pidemmällä tai lyhyemmällä sivulla. Molemmat on siis tarkistettava. Alla olevissa kaavoissa on oletettu, että y-suunta on pidempi kuin z-suunta.

Yhteisvaikutus pidemmällä sivulla

$$\frac{\sigma_{vy} + \tau_A}{f_{v\perp}} \leq 1 \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_{vz} + \tau_B}{f_{v\perp}} \leq 1 \quad (14)$$

6.TULOKSET

Laskentatuloksista on koottu yhteenveto, jossa on graafisesti esitettyä kaikkien laskentatapausten oleelliset kohdat. Yhteenveto on liitteenä 1. Lukuun ottamatta u-pukin nurjahdustarkastelua, kaikki tulokset on koottu numeerisessa muodossa tutkintotyö-CD:lle. Laskentatapauksista on seuraavat tiedostot:

- SOLMUISTEET.TXT
- ELEMENTIT.TXT
- SOLMUSIIRTYMÄT.TXT
- MOMENTIT.TXT
- JÄNNITYKSET.TXT
- LEIKKAUSVOIMAT.TXT
- TUKIREAKTIOT.TXT

Tekstitiedostot ovat pitkiä ja niistä on vaikea hahmottaa rakenteen kokonaiskuvaa, mutta niistä nähdään tarvittaessa solmupisteiden tarkat arvot.

Käytetystä elementtijaosta johtuen on kuvaajia tarkasteltaessa huomioitava, että ohjelman antamat taivutusmomenttien ja siirtymien arvot pätevät tarkasti vain solmupisteissä, koska Ansys ei interpoloi väliarvoja parapoloidisesti elementin alueella vaan lineaarisesti. Tästä huolimatta siirtymien ja jännitysten kriittiset arvot voidaan päätellä. On myös mahdollista tehdä interpolointi käsin, kun elementin kentässä vaikuttava kuormitus ja elementin päiden solmuvoimat tunnetaan. Varsinkin taivutusmomentteja ja -jännityksiä arvioitaessa on hyvä tarkastaa kohdat, joissa leikkausvoimakuvaaja vaihtaa merkkiään. Näissä kohdissa sijaitsee momenttien ääriarvot. Huomioitavaa on myös se, että kuvissa esiintyvät rasitukset tulostuvat elementtien lokaalien koordinaattiakseleiden mukaan. Tämä on helposti havaittavissa liitteen 1 kuvasta 13, jossa u-pukkien palkkielementtien lokaali koordinaatisto on kohtisuorassa globaaliin koordinaatistoon nähden. On syytä korostaa, että vaikka

laskutoimitukset sinänsä ovat melko tarkkoja, ne kuvaavat todellista rakennetta kuitenkin likimääräisesti. Esimerkiksi naulalevyliitosten jäykkyyden arviointi on hankalaa. Liitteen 1 kuvasta 58 käy ilmi, kuinka liitosten jäykkyys vaikuttaa siirtymiin. Kuvan perusteella voidaan todeta, että jos liitoksen jäykkyys otaksutaan suuremmaksi kuin kohdassa 5.1.1, saadaan siirtymät helposti pienemmään muutamalla senttimetrillä.

6.1 Tulosten jälkikäsitely

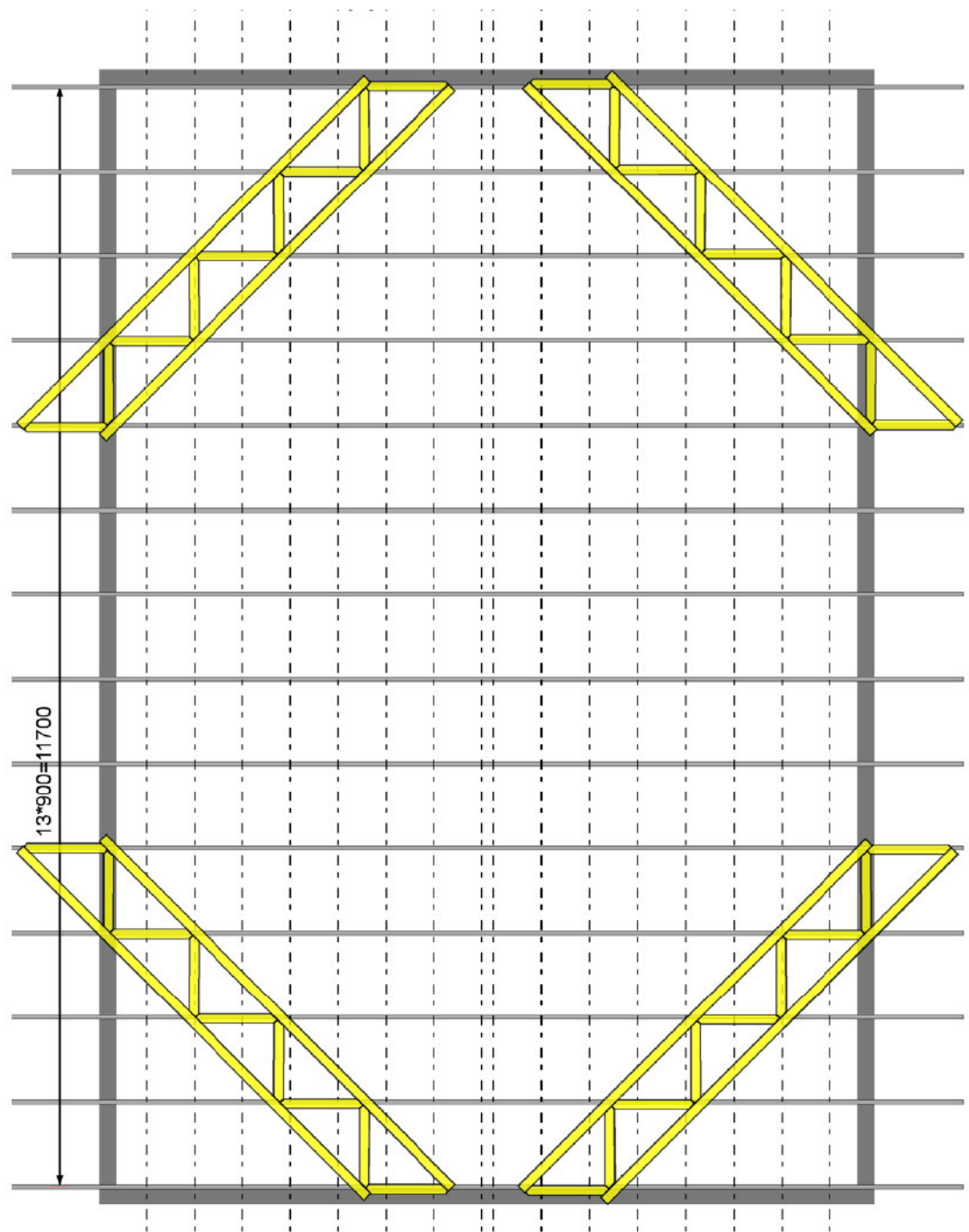
Ansysta saataisiin helposti tulostettua erilaisten murtumishypoteesien mukaisia jännitys jakaumia. Rakenneterästä tarkasteltaessa esimerkiksi Von Mises -jännitys antaa hyvän kuvan siitä, missä sijaitsevat rakenteen kriittiset jännitykset. Kuten kohdassa 5.1.2.1 todetaan, puulla on hyvin erilaiset lujuusarvot eri suuntaisille jännityksille. Se ei noudata Ansysta valmiiksi löytyviä murtumishypoteeseja. Siksi onkin turvallisempaa tarkastella viivamaisen elementin yksittäisiä jännityksiä ja summailla manuaalisesti kriittisissä pisteissä vaikuttavat rasitukset yhdistetyiksi jännityksiksi. Summaamisen jälkeen verrataan tuloksia puun eri lujuusarvoihin. Käytännössä tällainen rasitusten yhdistely kannattaa tehdä taulukkolaskentaohjelmalla. Liitteeseen 3 on laskettu kohdan 5.2. mukaisesti laskettuja jännitystapauksia. Tulosten yhteenvedossa on mainittu, mikäli kyseisestä tapauksesta on tehty tarkempi jännitystarkastelu.

6.2 Tulosten arviointi

6.2.1 Pukkien toiminta

Staattisena kuormana 0.25 kN/m^2 aiheuttaa pelkillä u-pukeilla tuettujen 6.2-metrinen ristikoiden harjoille noin 27 cm:n siirtymät. Yläpaarten hoikkuuden vuoksi pukkeja tulisi olla enintään 2.5 m:n välein. Tällöin siirtymät olisivat maksimissaan noin 24 cm. Ristikossa vaikuttavista jännityksistä merkittävin on taivutusjännitys, joka on suuruudeltaan noin 11 MPa, eli noin puolet puun kapasiteetista. Mikäli asennusaikaisen taipuman ei katsota olevan mitoittava tekijä voidaan todeta, että pelkät pukit toimivat asennusaikaisena tuentana. On huomioitava, että ristikon koon kasvaessa on käytettävä riittävään suuren kapasiteetin omaavaa jäykistepukkia. Liitteestä 1 nähdään kaikkien pukkityyppien toiminta. S-pukin toiminnassa on huomionarvoista se, että vinon osan kulman suuruus vaikuttaa oleellisesti sen toimintaan. Liitteen 1 kohdassa 2.3 on tutkittu tuuliristikon vaikutus. Tuloksista nähdään, että sillä saadaan oleellisesti pienennettyä sivusuuntaisia taipumia. Voidaan olettaa, että jäykkänurkkainen lautaristikko toimii vähintään yhtä tehokkaasti kuin laskennassa käytetty nivelnurkkainen.

Laskelmien perusteella tultiin sellaiseen tulokseen, että naulalevyristikoiden yläpaarretasoon tarvitaan jäykisteristikot. Olisi tehokasta naulata ne kuvan 18 mukaisesti 45° :een kulmaan siten, että niiden diagonaalisauvat osuvat yläpaarteiden kohdalle. Työaikaiseen jäykistykseen käytettäisiin U-, S- ja O-pukkeja. Y-pukki on osoittautunut tehokkaaksi, mutta silti liian kalliiksi.



Kuva 18. Tuuliristikoiden sijoittelu

6.2.2 Ristikoiden koon vaikutus rasitukseen

Liitteen 1 taulukosta 1 ja kuvasta 51 (kuvaaja) nähdään, miten ristikon koon kasvu vaikuttaa rasitukseen. Ristikon suurin taivutusjännitys esiintyy alapaarteessa kiinnityspukin kohdalla. Se on kaikissa tapauksissa lähes saman suuruinen, koska jännnevälin kasvaessa myös poikkileikkaus ja vakiopaineen aiheuttama viivakuorma kasvavat. Suhteet eivät siis muutu. Kuitenkin taipumat näyttäisivät kasvavan koon toisessa potenssissa. Taipuman suurin arvo esiintyy ristikon harjalla, koska ristikot pyrkivät kaatumaan tukipisteidensä muodostaman akselin ympäri. Kaatumisen estää ristikoiden väliin asennettu pukki. Kun katsotaan rakennetta sivulta voidaan nähdä, että kaatumista estävän pukin muodostama momenttivarsi pienenee, kun k-jako pysyy ristikoiden geometrian kasvaessa vakiona. Toinen vaikuttava seikka on se, että pukin poikkileikkaus pysyy ristikoiden kasvaessa samana. Nämä kaksi asiaa vaikuttavat oleellisesti rakenteen jäykkyyteen kaatumista vastaan. Jäykistepukissa vaikuttavan taivutusjännityksen kasvu koon kolmannessa potenssissa on selitettävissä samoilla seikoilla kuin taipumakin.

6.2.3 U-pukin toiminta nurjhdustukena

U-pukin toimintaa nurjhdustukena testattiin liitteen 1 kuvan 52 mukaisella mallilla. Sauvojen pituus ja k-jako on 900 mm. U-pukin korkeus on 450 mm. Malli koostuu samoista viivamaisista BEAM188-palkkielementeistä kuin ristikkomallitkin. Laskennassa käytettiin T24-B-1:n mukaisia kimmoarvoja, koska todellisuudessa nurjhduskuorma aiheutuu lumesta. Tässä rakenne on jaettu 50 mm:n pituisiin elementteihin, jotta tapaukselle voidaan suorittaa epälineaarisen geometrian ratkaisu. Sauvojen yläpää ja u-pukin päät on kiinnitetty sivusuunnassa (u_x , u_z), eli ne pääsevät liikkumaan vain pystysuunnassa. Sauvojen alapää on kiinnitetty nivellisesti (u_x , u_y , u_z). U-pukki on kiinnitetty nurkistaan molempiin sauvoihin nivellisesti (u_x , u_y , u_z).

Sauvojen poikkileikkaus on 70 mm x 42 mm ja u-pukin 100 mm x 22 mm. Kummankin pystysauvan yläpäähän vaikuttaa T24-B-1:n puristuslujuutta (19 MPa) vastaava voima -56 kN. L/100 epäkeskisyys on huomioitu vastaavana momenttina (M_z) -504 Nm. Tapaus on laskettu ensin ilman u-pukin epäkeskisyyttä ja on todettu, että u-pukin vaakaosaan syntyy 1,22 kN:n normaalivoima. U-pukin ja tuettavan sauvan keskiöiden välinen etäisyys on 46 mm. U-pukin molempiin päihin on lisätty normaalivoiman epäkeskisyyttä vastaavat momentit (M_y) +56 Nm ja -56 Nm, ja tämän jälkeen tapaus on ratkaistu uudelleen. Laskenta on suoritettu siten, että kuormitusta on lisätty 1/20 kerrallaan ja seuraava laskenta on tehty aina muuttuneen geometrian mukaan. Liitteen 1 kuvasta 53 nähdään, että sauva nurjahtaa kun kuorman suuruus on noin 45 kN. Pystyssauvan keskellä vaikuttava reunapuristusjännitys nurjahdushetkellä saadaan kun summataan normaalijännitys ja liitteen 1 kuvasta 54 laskettava taitutusjännitys.

Normaalijännitys nurjahdushetkellä:

$$\frac{-45000N}{70mm \cdot 42mm} \approx -15.3MPa$$

Taivutusjännitys nurjahdushetkellä:

$$-\frac{320000Nmm}{\left(\frac{70mm \cdot (42mm)^2}{6}\right)} \approx -15.6MPa$$

Jännitysten yhteisvaikutus aiheuttaa -30.9 MPa:n suuruisen reunapuristusjännityksen pystysauvan keskelle ennen stabiliteetin menetyttä. Sallittu arvo olisi noin -20 MPa. Sauva siis murtuu ennen varsinaista nurjahdusta. Iteroimalla saadaan, että sallittua jännitystä vastaava puristava voima on noin 35 kN.

Tämän mukaan RakMk B10:n nurjahduskerrointa k_s vastaava arvo olisi 0.625 (35kN / 56kN). B10:n mukaisesti käsin laskettuna vastaava sauva ilman nurjahdustukea saa

arvon $k_s = 0.25$. Näiden laskujen mukaan u-pukilla saavutetaan tässä tapauksessa 2.5-kertainen kapasiteetti nurjahdustukemattomaan sauvaan nähden. On kuitenkin huomioitava, että toisin kun B10:ssä, tässä ei ole huomioitu puun syiden vinouden heikentävää vaikutusta.

LÄHTEET

- 1 BCSI. WTCA – TPI. 2006. USA.
- 2 Kähkönen, Leo. Kantavat puurakenteet – insinööriopetus.
- 3 Leivo, Aki – Pitkänen, Jani, Eurocode 5 esimerkkilaskelmat. Wood Focus Oy. Kotka 1997.
- 4 Naulalevyrakenteet-opas. PLY. 1993
- 5 NR-kattorakenteen jäykistyksen suunnittelu. Ympäristöministeriö. 2000.
- 6 Thelanderson, Sven – Larsen, Hans, Timber Engineering. WILEY. England 2003.
- 7 Poutanen, Tuomo, Puun ominaisuudet ja lajittelu. TTKK.
- 8 RT 85-10495. Rakennustieto Oy. 1993.
- 9 Saarineva, Jarmo, Lujuusoppi. Pressus Oy. Tampere 1995.
- 10 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. 2001.

Teettäjä:

Tuomo Poutanen

Puuinfo Oy

TAMPERE 2007

Laskutulosten yhteenveto

NR-ristikkokaton jäykistys sormijatketuilla puuelementeillä

Tekijä:

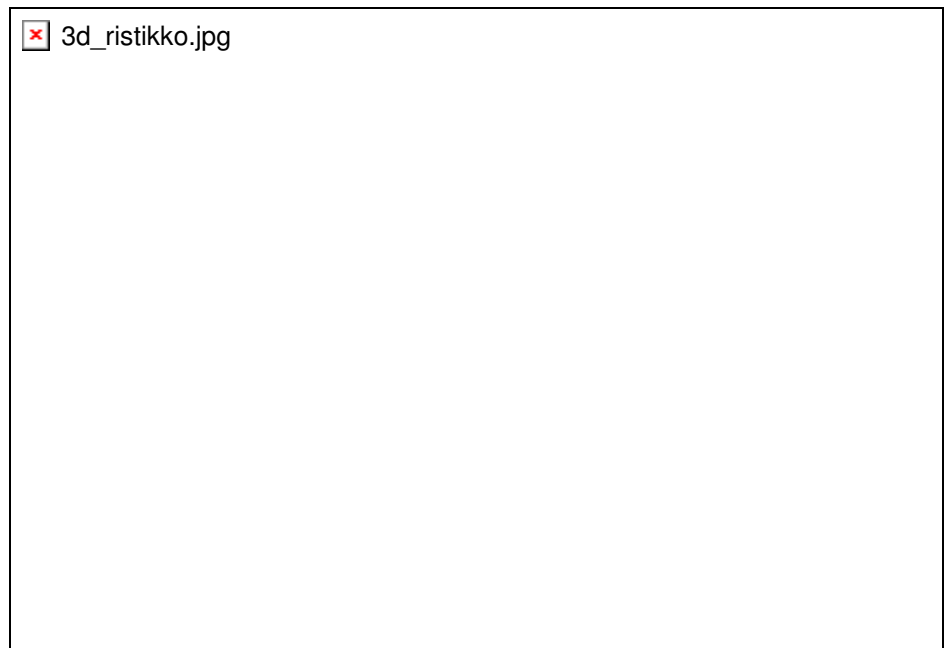
Toni Marttila

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	3
2.	TULOKSET	3
2.1	U-pukki ja kaksi 6,2m ristikkoa	4
2.2	U-pukki ja neljä 6,2m ristikkoa	11
2.3	Lisäjäykisteiden vaikutus	12
2.4	S-pukki ja kaksi 6,2m ristikkoa	20
2.5	S-pukki ja kaksi 8,2m ristikkoa	21
2.6	S-pukki ja kaksi 13,4m ristikkoa.....	28
2.7	S-pukki ja kaksi 13,4m ristikkoa + lisäjäykisteet	32
2.8	Y-pukki ja kaksi 13,4m ristikkoa	35
2.9	Y-pukki ja kaksi 13,4m ristikkoa + lisäjäykisteet.....	40
2.10	O-pukki ja kaksi 13,4m ristikkoa	41
2.11	Jännevälin vaikutus rasiin	46
2.12	U-pukin toiminta nurjahdustukena.....	48
2.13	Lopullinen tilanne	50

1. JOHDANTO

Tämä raportti on osa tutkintotyötäni ”*NR-ristikkokaton jäykistys sormijatketuilla puuelementeillä*”. Raporttiin on koottu yhteenveto laskentatuloksista. Laskentamallin esittely ja tulosten arviointi on tehty tutkintotyön varsinaisessa kirjallisessa osuudessa. Laskennan tarkoituksena oli selvittää minkälaisia jännityksiä ja muodonmuutoksia kattoristikoiden (kuva 1) ja niiden välissä käytettäville erilaisille jäykisteille syntyy.



Kuva 1. Kattoristikot

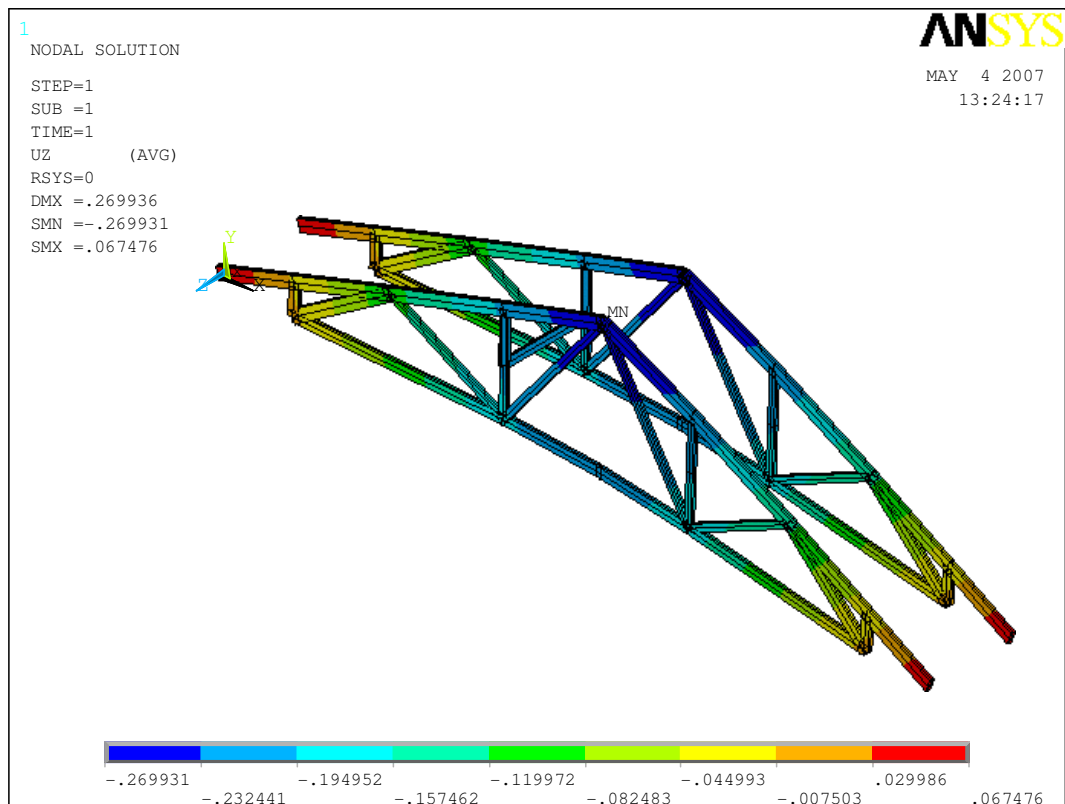
2. TULOKSET

Tässä käydään läpi vain tulosten pääkohdat. Kaikki arvot on esitetty numeerisessa muodossa tutkintotyö-CD:llä. Ansysista ei saada tulostettua leikkaus- tai vääntöjännityksiä vaan ne täytyy laskea manuaalisesti vastaavista voimista ja momenteista. Kriittisten kohtien

tarkempi jännitystarkastelu on taulukoitu liitteessä 3. Siinä on tarkasteltu nurjahdusvarmuutta ja yhdistettyjen jännitysten vaikutuksia.

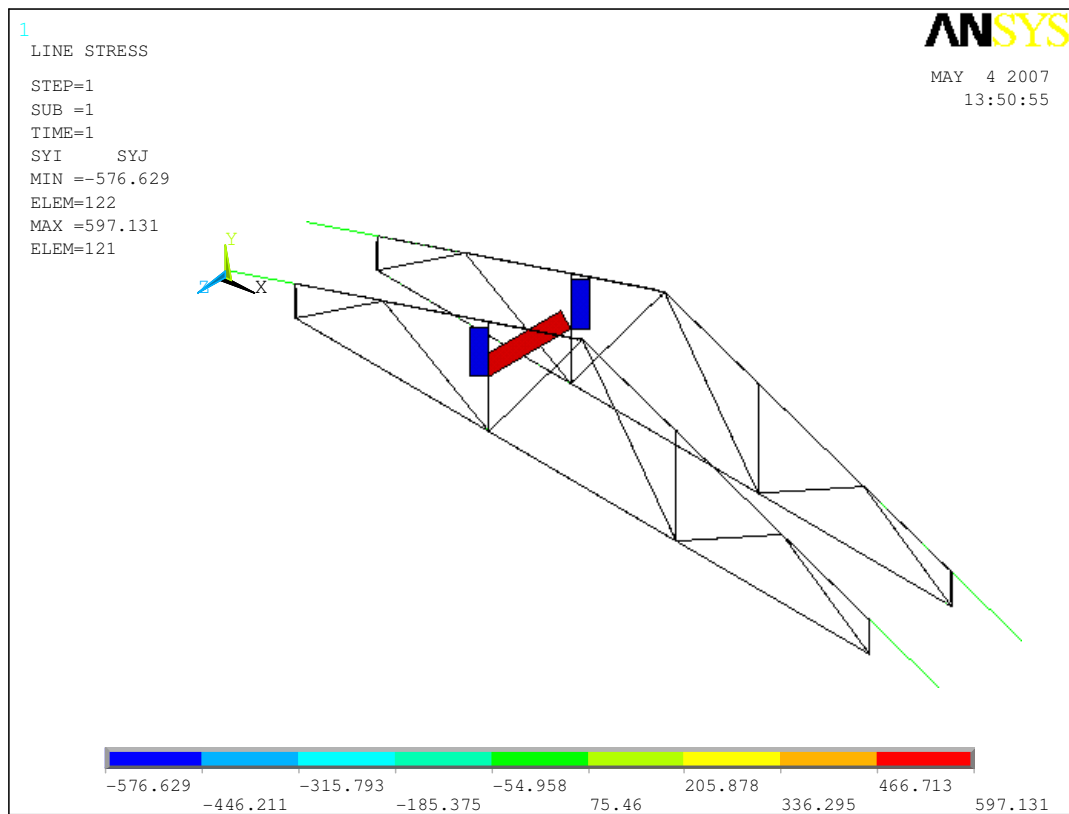
2.1 U-pukki ja kaksi 6,2m ristikköä

Jäykkänurkkainen U-pukki on kiinnitetty päistään ja nurkistaan nivellisesti ristikoiden vertikaalisauvoihin. Pukki on poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm:n lautaa. Kuvassa 2 on esitetty rakenteen siirtymät.



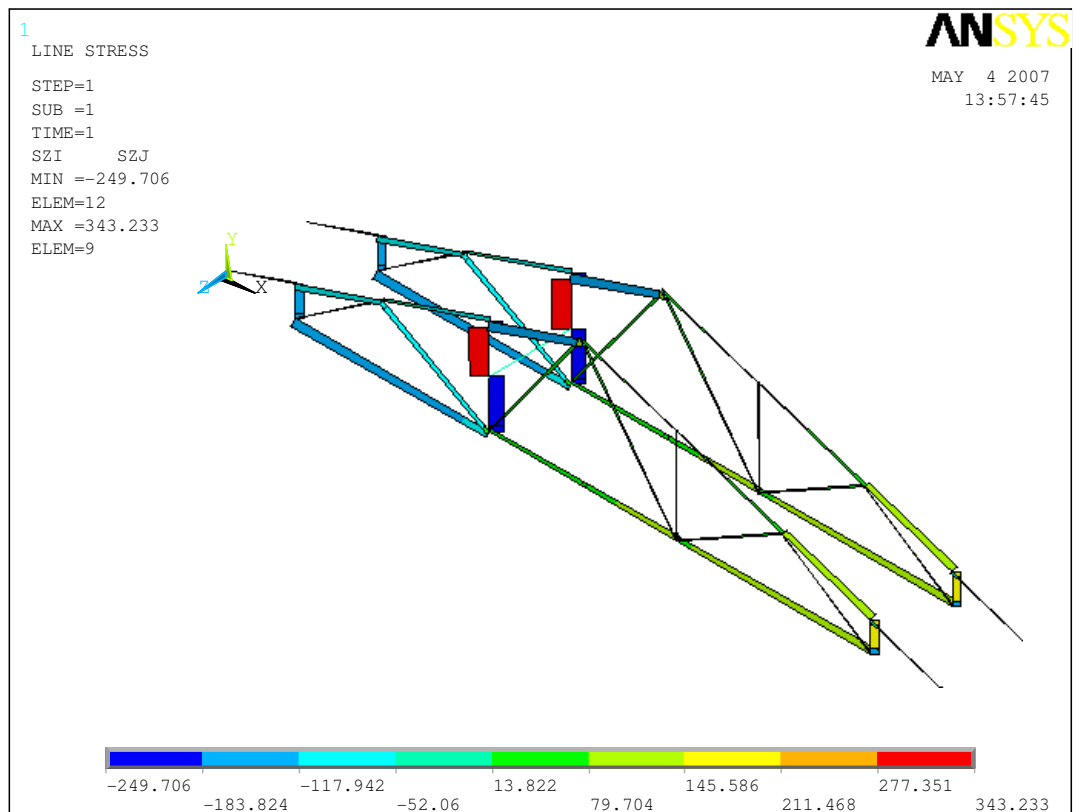
Kuva 2. Siirtymät z-suunnassa [m].

Kuvasta 2 nähdään, että suurimmat siirtymä esiintyvät ristikoiden harjalla ja paarteiden päissä. Harjat myötävät tuulen voimasta noin 27 cm ja paarteiden kärjet työtyvät noin 6.8 cm vastakkaiseen suuntaan. Suurimman siirtymän suhteellinen arvo on noin $L/23$.



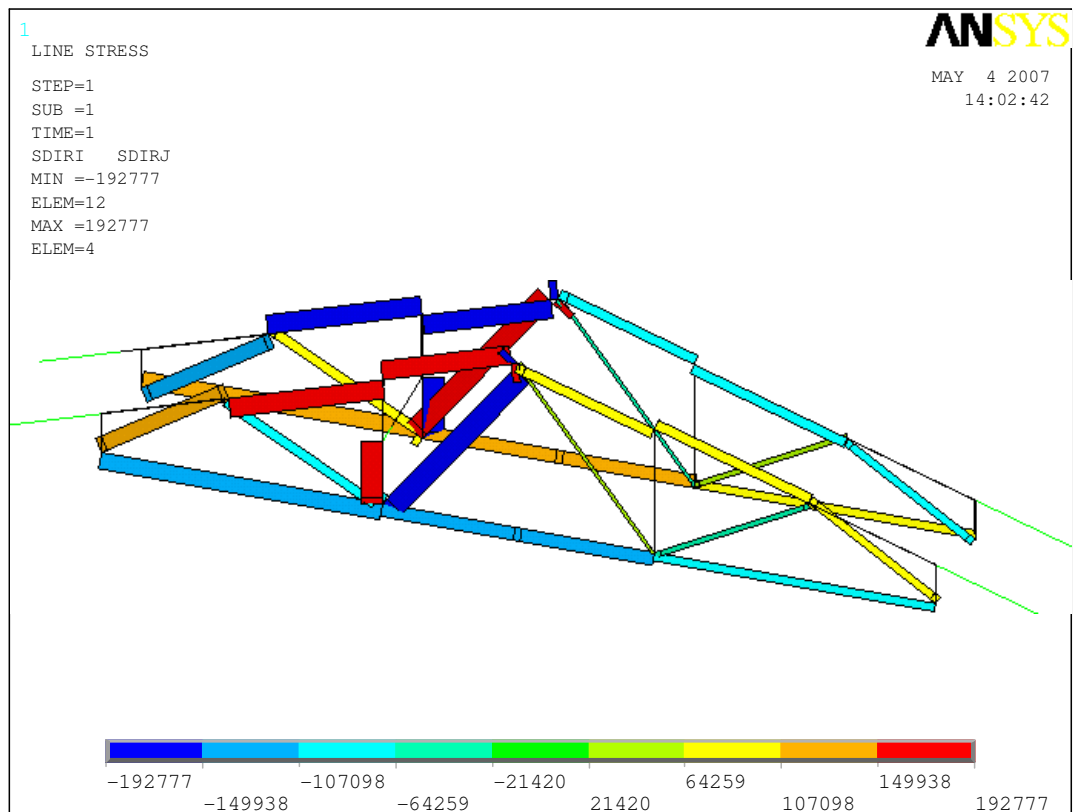
Kuva 3. Leikkausvoima y-suunnassa [N]

Kuvasta 3 nähdään, että y-suunnan suurin leikkausvoima 597 N vaikuttaa u-pukin vaakaosassa.



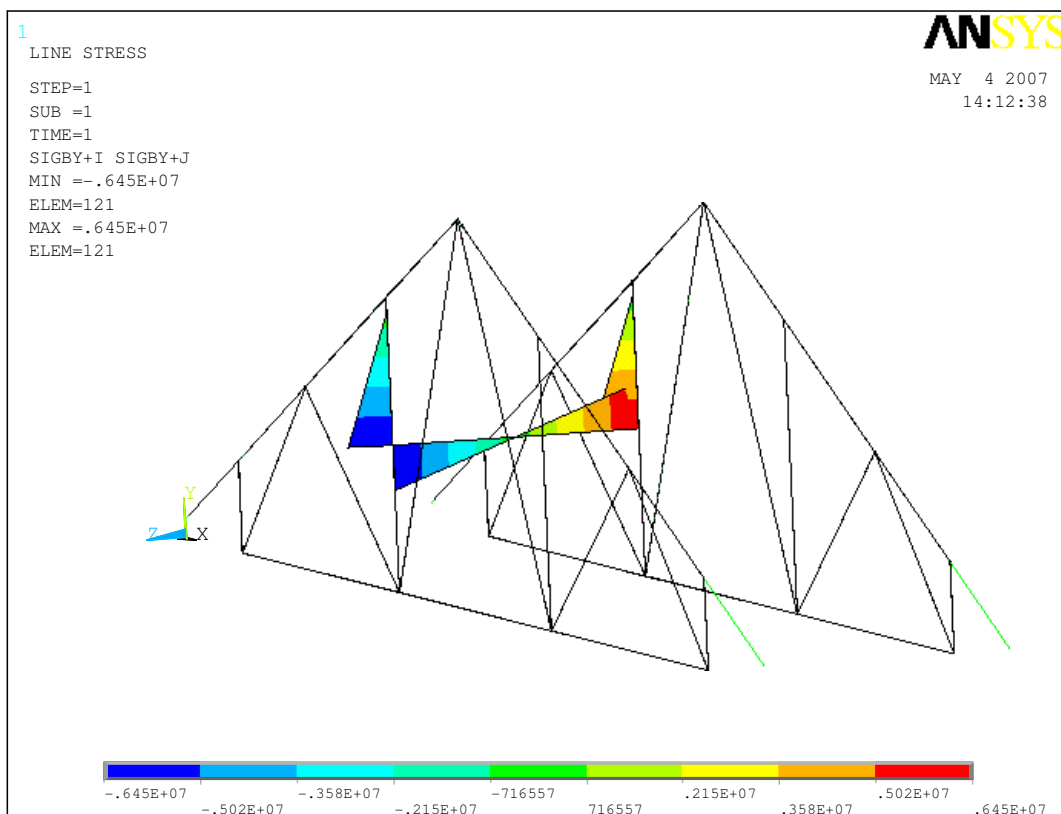
Kuva 4. Leikkausvoima z-suunnassa [N]

Kuvasta 4 nähdään, että z-suunnan suurin leikkausvoima 344 N vaikuttaa vertikaalisauvoissa, joihin u- pukki on kiinitetty.



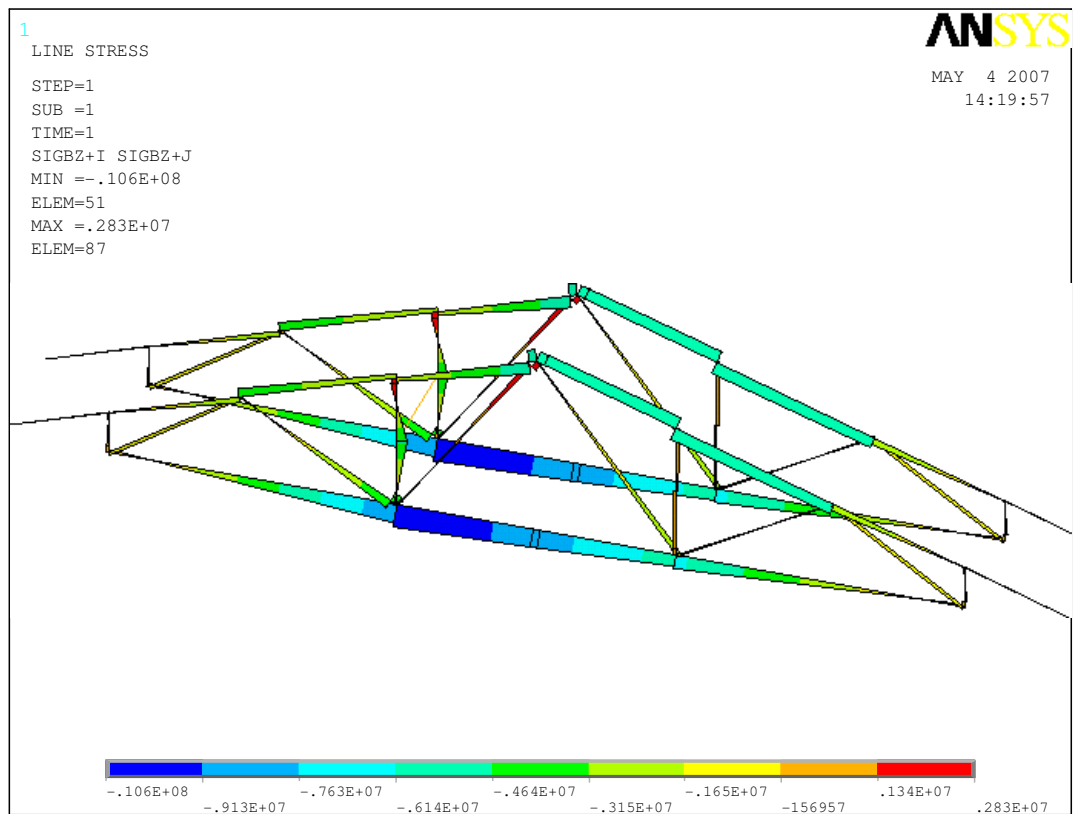
Kuva 5. Normaalijännitykset [Pa]

Kuvasta 5 nähdään, että suurimmat normaalijännitykset vaikuttaa tuen puoleisissa pitkissä diagonaaleissa, tuetussa vertikaalissa ja yläpaarteessa. Ne ovat itseisarvoltaan lähes yhtäsuuret, noin 0.2 MPa.



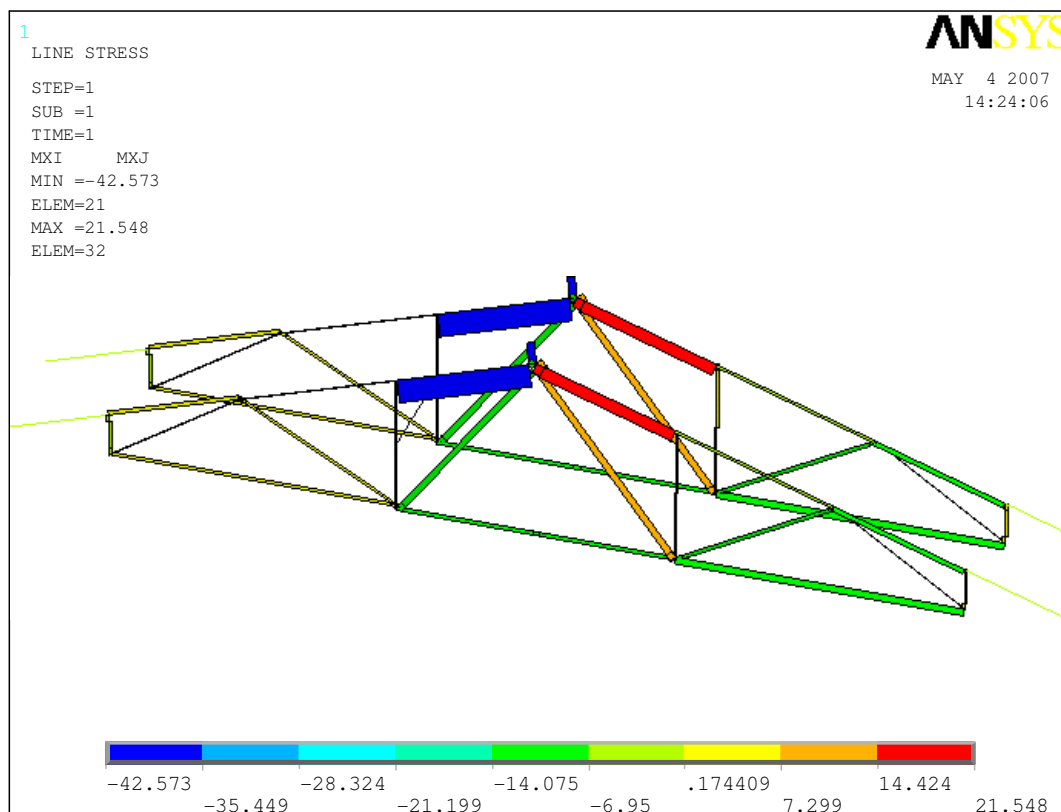
Kuva 6. Taivutusjännitys elementin +y-pinnassa [Pa]

Kuvasta 6 nähdään, että oleellisia y-suunnan pintojen taivutusjännityksiä esiintyy ainoastaan u-pukissa. Suurin arvo on 6.45 MPa.



Kuva 7. Taivutusjännitys elementin +z-pinnassa [Pa]

Kuvasta 7 nähdään että suurimmat z-suunnan pintojen taivutusjännitykset esiintyvät alapaarteessa, diagonaalien liitoskohdassa. Suurin arvo on 10.6 MPa.



Kuva 8. Vääntömomenti [Nm]

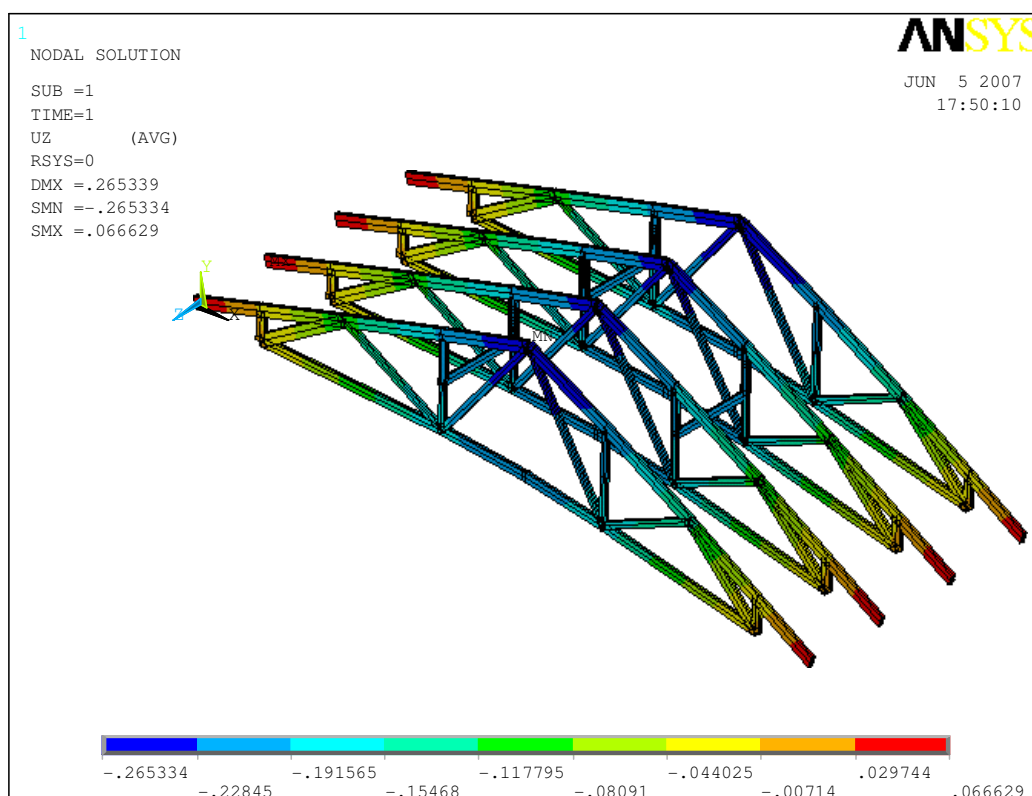
Kuvasta 8 nähdään, että suurin vääntömomenti esiintyy yläpaarteessa u-pukin lähellä. Väännön suurin arvo on noin 43 Nm. Tämä voidaan muuttaa reunan leikkausjännitykseksi manuaalisesti. Reunan maksimileikkausjännitykseksi saadaan tällöin 0.76 MPa (kts. taulukko).

Tarkempi jännitys- ja stabiiliteetti tarkastelu on tehty seuraaville osille:

- E121, u-pukin vaakaosa
- E21, 1.ristikön yläpaarre harjan vasemmalla puolella
- E51, 1. ristikön alapaarre diagonaalien liitoskohdassa
- E4, 1. ristikön tuetun vertikaalin alaosa

2.2 U-pukki ja neljä 6,2m ristikkoa

Tutkitaan ristikoiden määrän lisäyksen vaikutusta. Edelliseen rakenteeseen on lisätty kaksi ristikkoa. U-pukit on sijoitettu jokatoisessa ristikkovälissä eri puolelle harjalinjaa. Kuvassa 9 on esitetty rakenteen siirtymät.



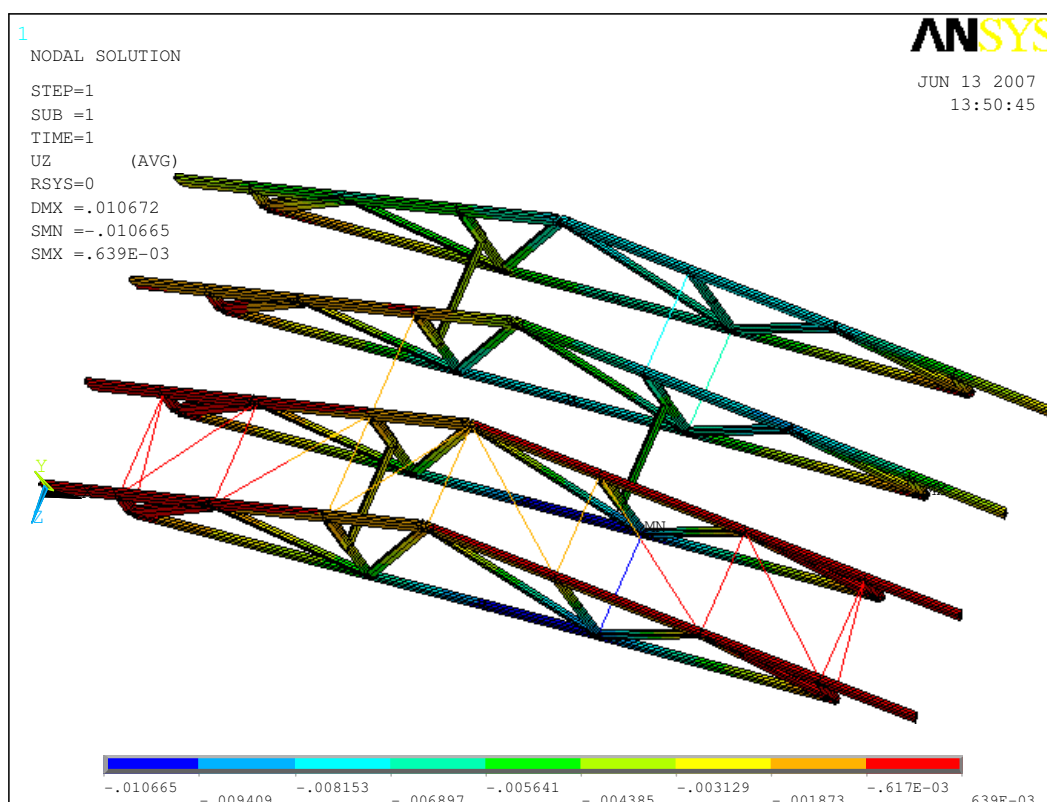
Kuva 9. Siirtymät z-suunnassa [m].

Kuvasta 9 nähdään, että suurimmat siirtymä esiintyvät ristikoiden harjalla ja paarteiden päissä, kuten kahden ristikon mallissakin. Harjat myötävät tuulen voimasta noin 27 cm ja paarteiden kärjet työtyvät noin 6.7 cm vastakkaiseen suuntaan. Suurimman siirtymän suhteellinen arvo on noin $L/23$. Itseisarvoltaan suusimmat siirtymät ovat aavistuksen verran pienemmät kuin kahden ristikon mallissa, ja ne esiintyvät reunimmaisissa ristikoissa.

Ristikoiden lisäyksen vaikutus jännityksiin on yhtä marginaalinen kuin siirtymiinkin.

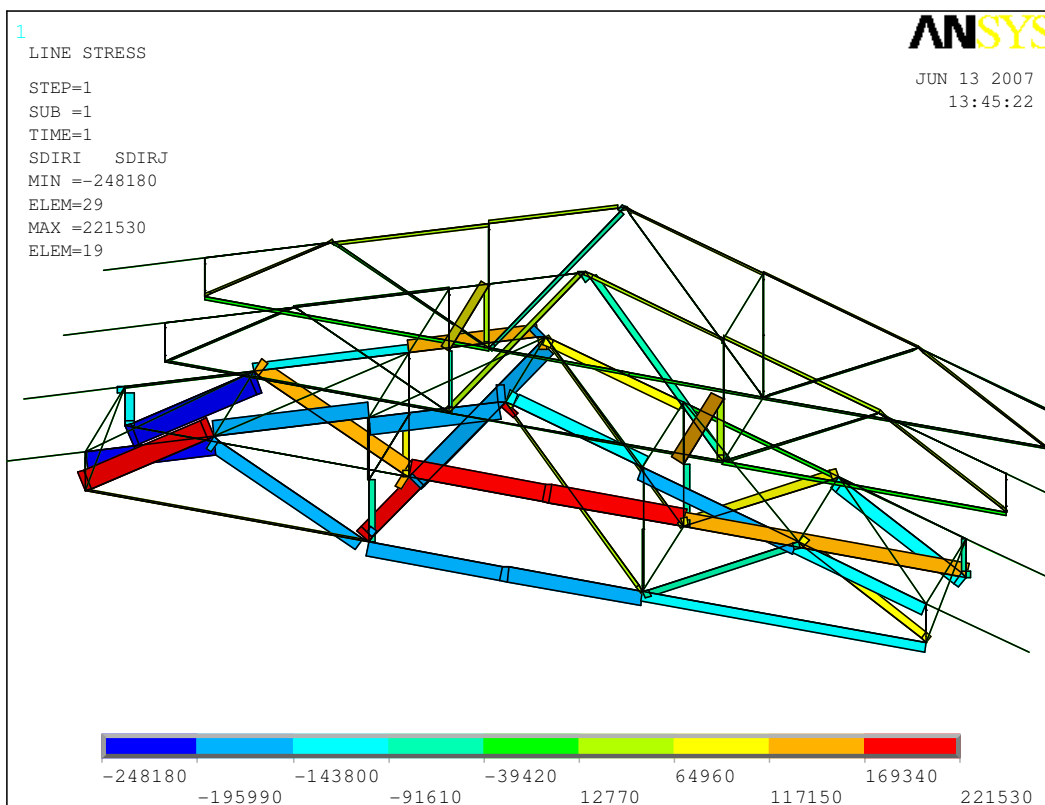
2.3 Lisäjäykisteiden vaikutus

Koska edellä tutkitun rakenteen siirtymät ovat suuret kokeillaan siirtymien rajoittamista lisäjäykisteillä. Ne ovat poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm lautaa, ja ne toimivat veto-/puristussauvoina. Lisäjäykisteet näkyvät kuvassa 10 ohuina viivoina.



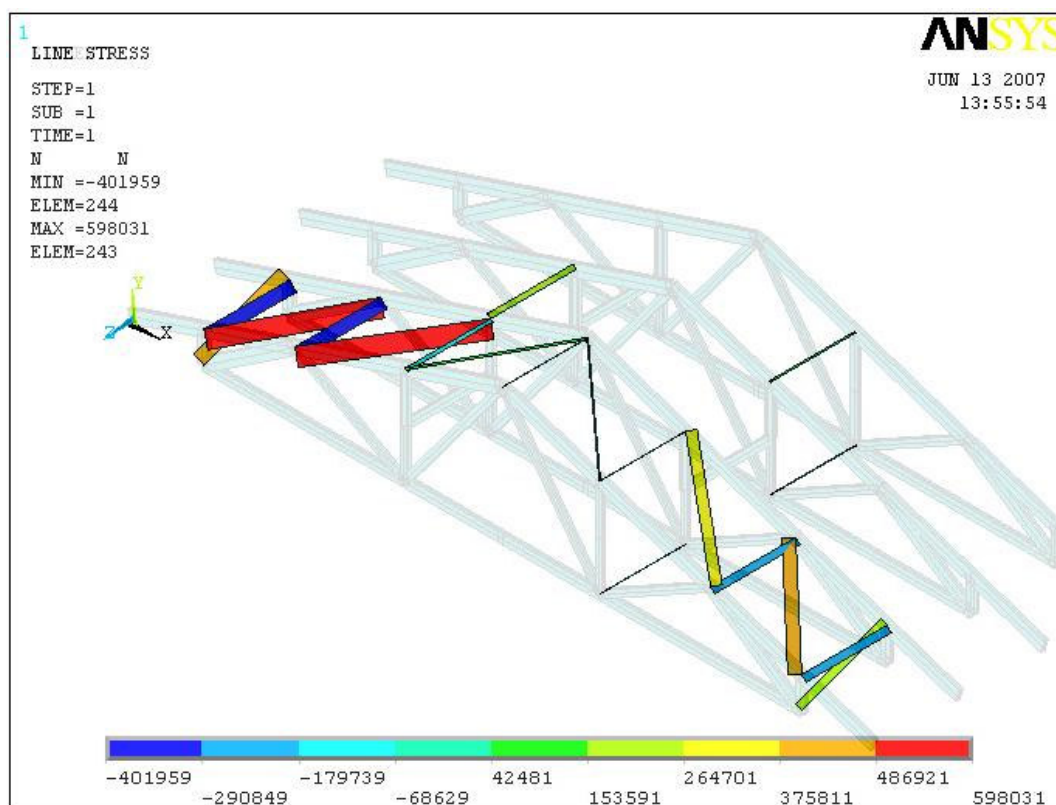
Kuva 10. Siirtymät z-suunnassa [m].

Kuvan 10 mukaisella lisäjäykisteiden asettelulla on suurimman solmuisiirtymän itseisarvo noin 1.1 cm. Sen suhteellinen arvo on noin $L/620$.



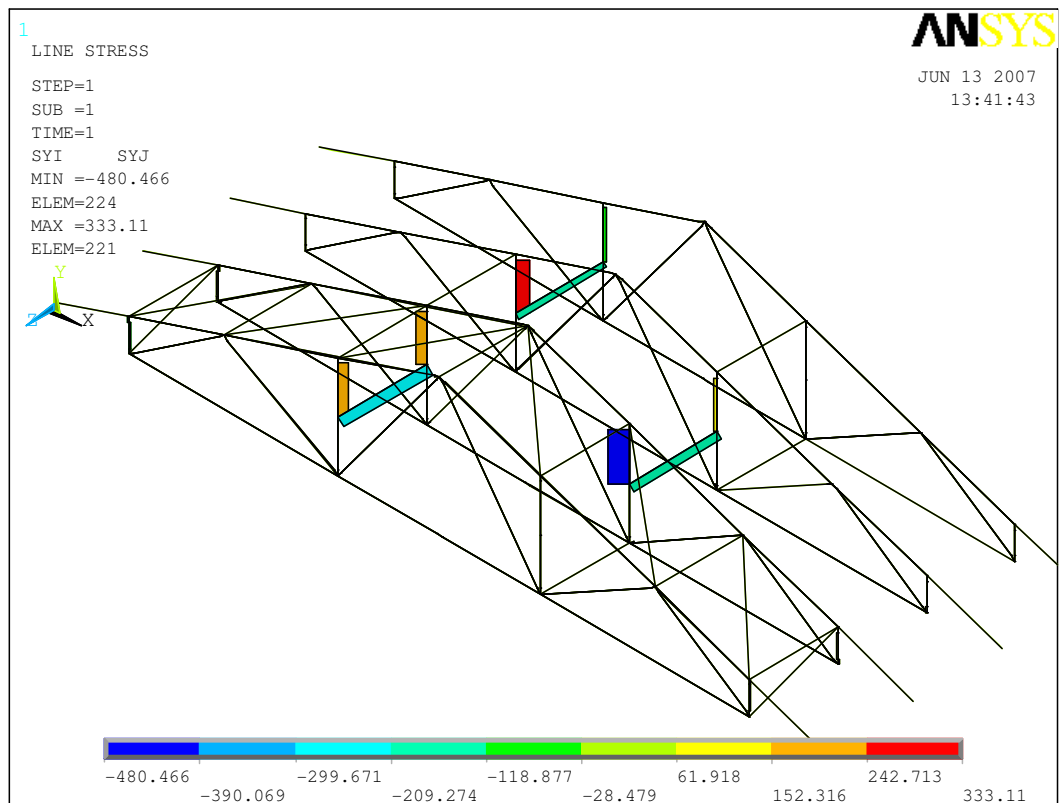
Kuva 11. Normaalijännitykset palkkielementeissä [Pa]

Kuvasta 11 nähdään, että palkkielementtien normaalijännitykset ovat pienet, enimmillään -0.25 MPa puristusta.



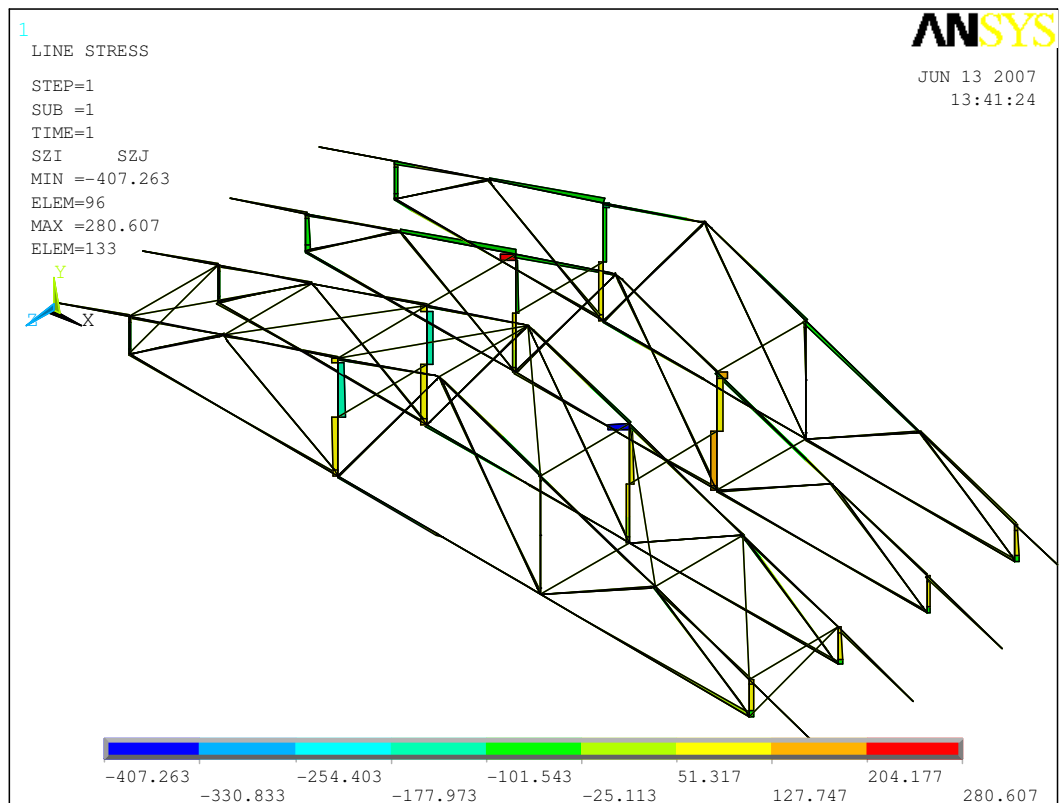
Kuva 12. Normaalijännitykset sauvaelementeissä [Pa]

Kuvaajassa on näkyvillä ainoastaan lisäjäykistesauvat. Palkkielementit on karsittu selvyiden vuoksi pois kuvasta. Suurin vetojännitys 0.60 MPa vaikuttaa vasemman puolimmaisessa vaaka diagonaalissa. Suurin puristusjännitys -0.41 MPa vaikuttaa vasemman puolimmaisessa vaakasauvassa.



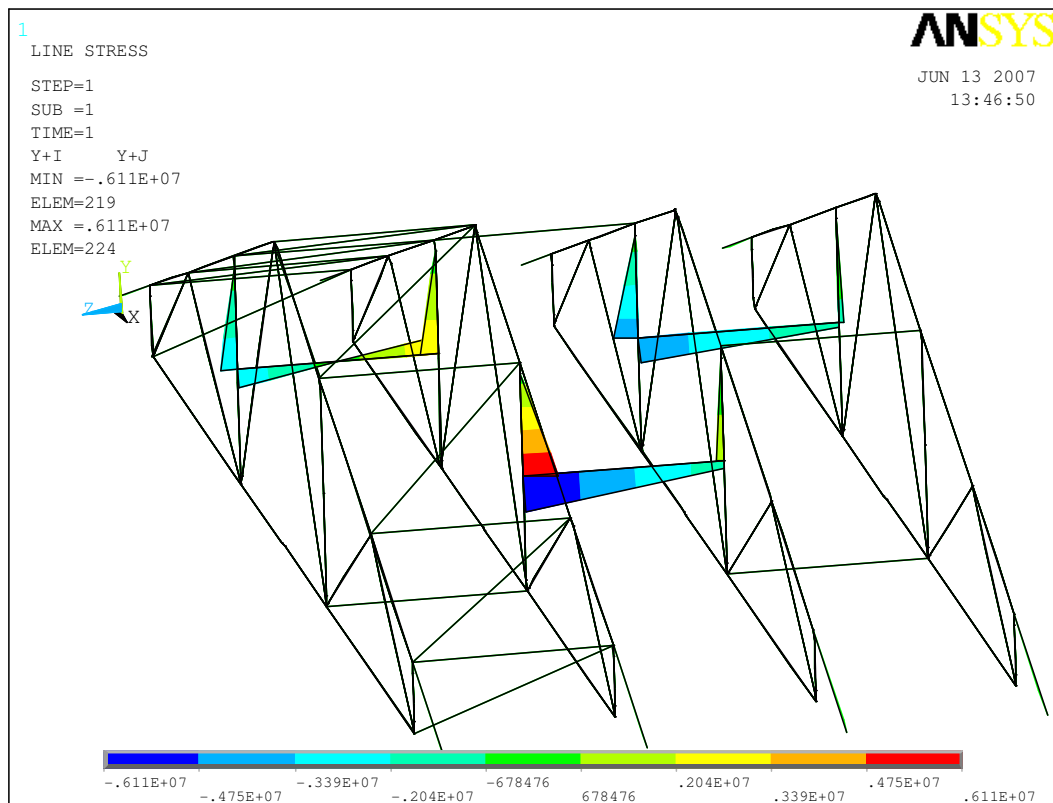
Kuva 13. Leikkausvoima y-suunnassa [N]

Kuvasta 13 nähdään, että suurin y-suunnan leikkausvoima 481 N vaikuttaa keskimmäisessä u-pukissa.



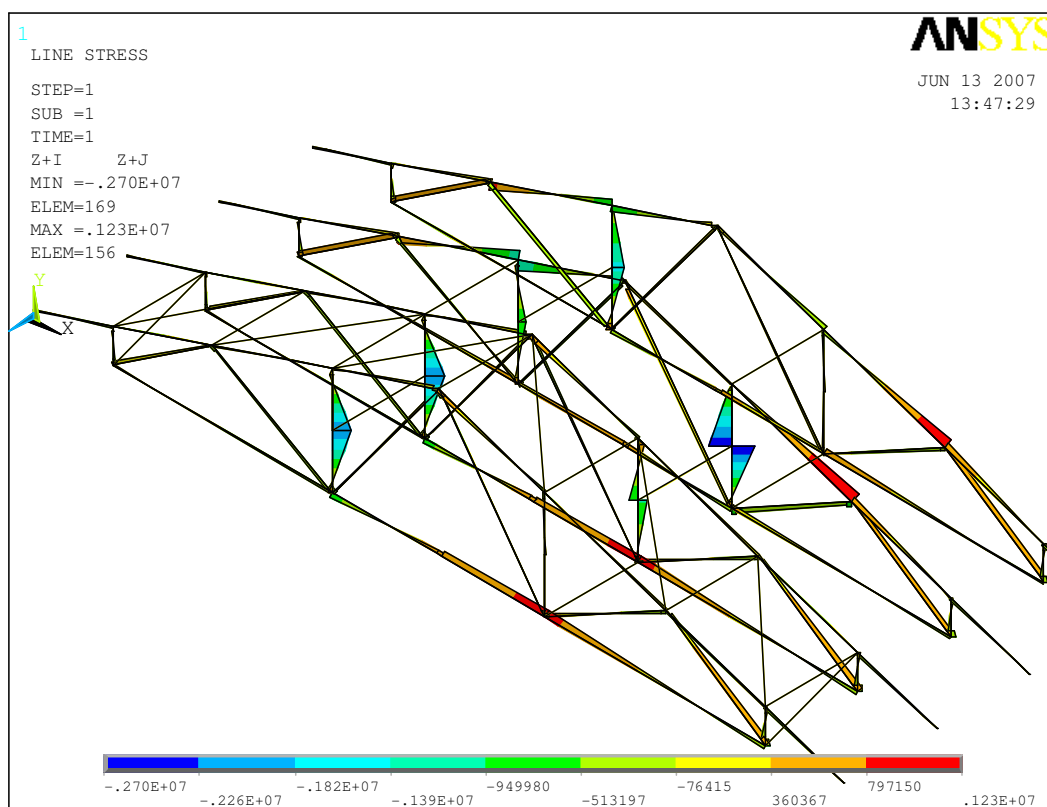
Kuva 14. Leikkausvoima Z- suunnassa [N]

Kuvasta 14 nähdään, että suurin z-suunnan leikkausvoima 407 N vaikuttaa toisen ristikon vasemmassa vertikaalisauvassa.



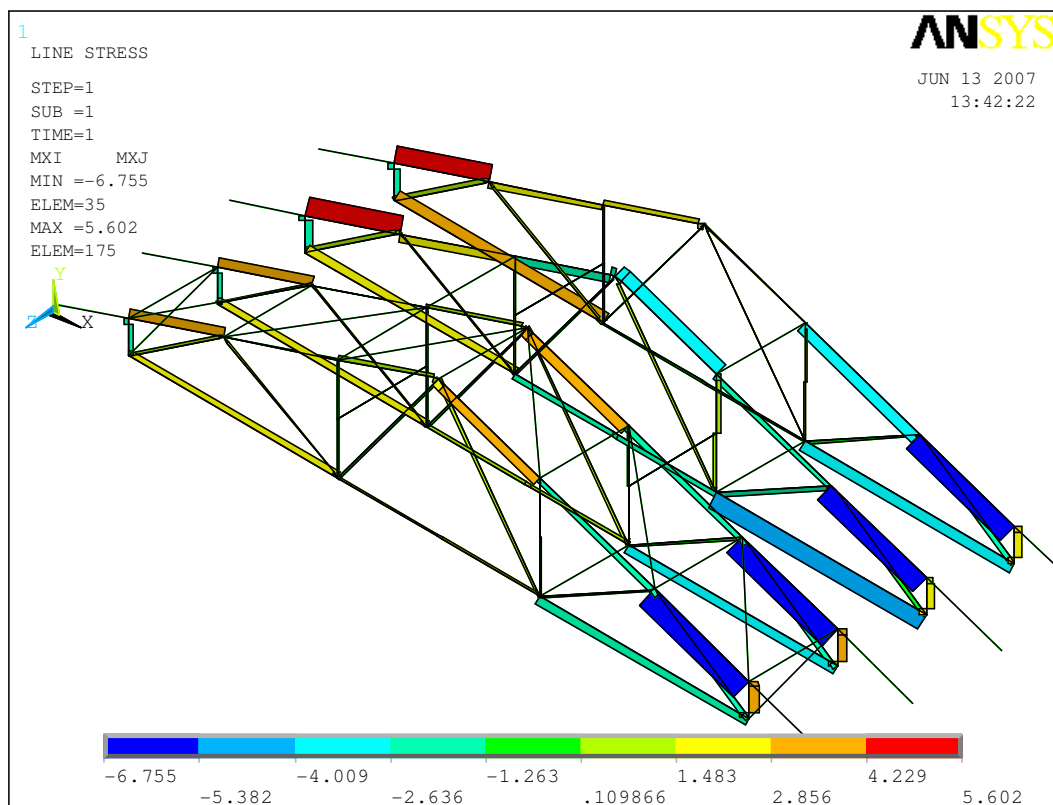
Kuva 15. Taivutusjännitys elementin +y-pinnassa [Pa]

Kuvasta 15 nähdään, että suurin y-pinnan taivutusjännitys 6.1 MPa vaikuttaa keskimmäisen u-pukin nurkassa.



Kuva 16. Taivutusjännitys elementin +z-pinnassa [Pa]

Kuvasta 16 nähdään, että suurin z-pinnan taivutusjännitys 2.7 MPa vaikuttaa kolmannen ristikon vertikaalissa.



Kuva 17. Vääntömomentti [Nm]

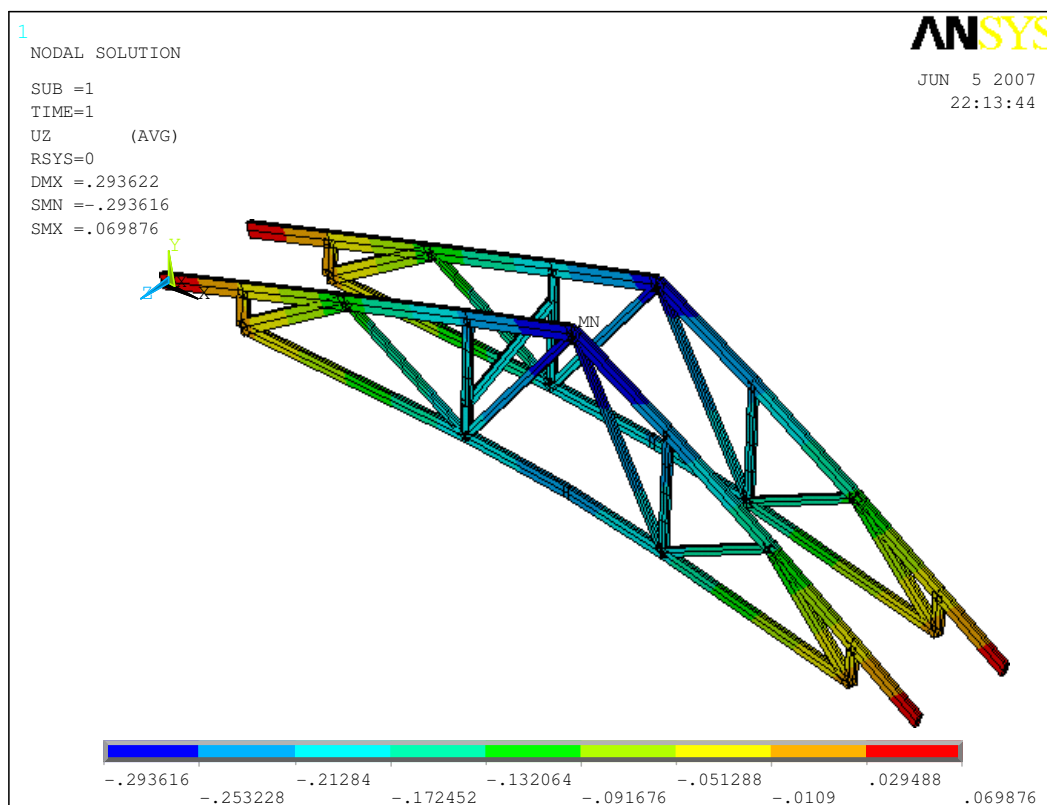
Suurin vääntömomentti noin 6.8 Nm vaikuttaa ristikoiden yläpaarteessa oikealla.

Tarkempi jännitys- ja stabiiliteettitarkastelu on tehty seuraaville osille:

- E244, Puristussauva vasemman tuen kohdalla

2.4 S-pukki ja kaksi 6,2m ristikkoa

Jäykkänurkkainen s-pukki on kiinnitetty päistään ja nurkistaan nivellisesti ristikoiden vertikaalisauvoihin. Pukki on poikkileikkaukseltaan 22 x 100 lautaa. Tässä tapauksessa s-pukin vino osa on 29.2° :een kulmassa globaaliin xz- tasoon nähden. Kuvassa 18 on esitetty rakenteen siirtymät.



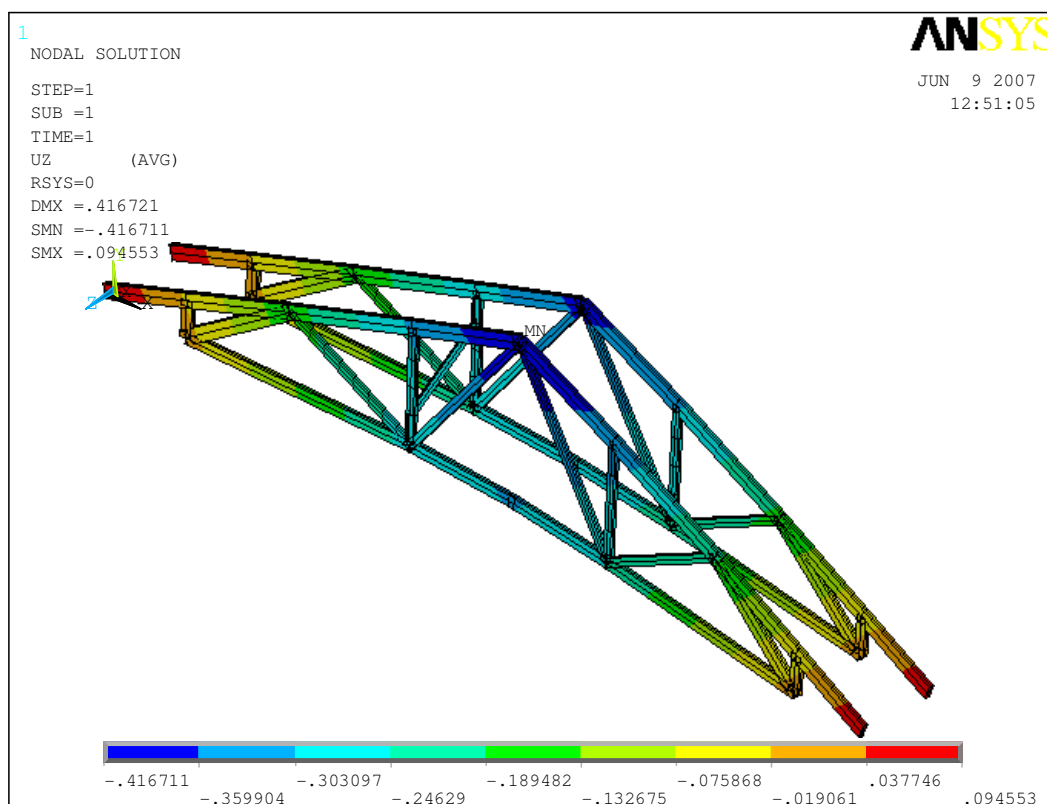
Kuva 18. Siirtymät z- suunnassa [m]

Suurin z- suunnan siirtymä noin 30 cm tapahtuu etummaisen ristikon harjalla. Yläpaarteiden kärjet työntyvät noin 7 cm vastakkaiseen suuntaan. Suurimman siirtymän suhteellinen arvo on noin $L/20$.

Siirtymät ovat suuruudeltaan samaa luokkaa kuin u-pukillakin. Taivutusjännitys s-pukissa on noin 55 MPa ja alapaarteessa hieman yli 20 MPa, joten tässä ei käydä läpi kyseistä tapausta tarkemmin.

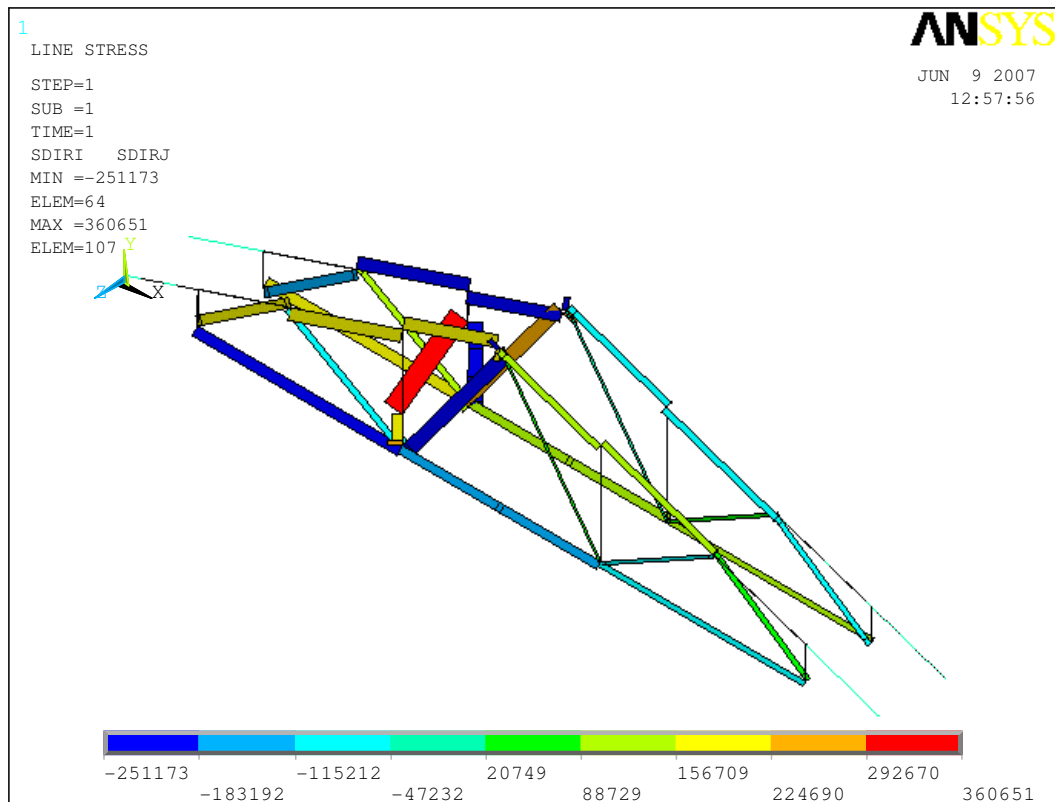
2.5 S-pukki ja kaksi 8,2m ristikkoja

Jäykkänurkkainen s-pukki on kiinnitetty päistään ja nurkistaan nivellisesti ristikoiden vertikaalisauvoihin. Pukki on poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm lautaa. Kohdan 3.4 tapaukseen verrattuna s-pukin vino osuus on eri kulmassa, koska ristikoiden korkeus on suurempi niiden välisen etäisyyden pysyessä kuitenkin 900 mm:ssä. Tässä tapauksessa s-pukin vino osa on 46° :een kulmassa globaaliin xz-tasoon nähden. Kuvassa 19 on esitetty rakenteen siirtymät.



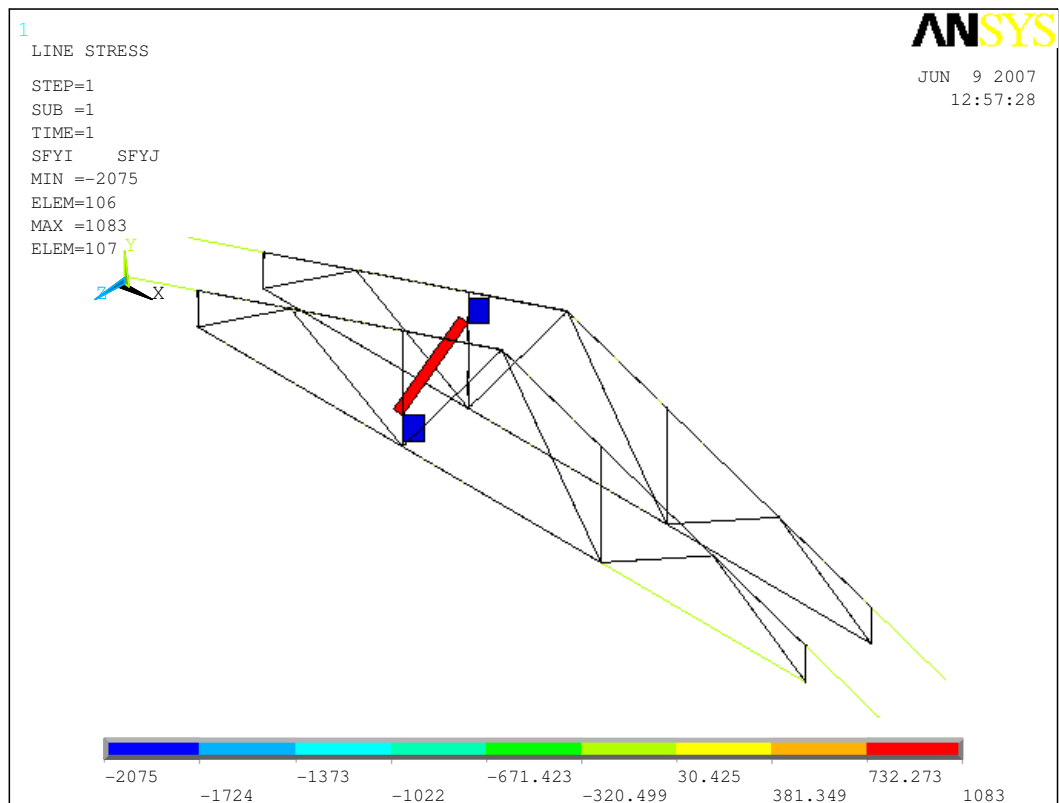
Kuva 19. Siirtymät z- suunnassa [m]

Suurin z-suuntainen siirtymä noin 42 cm esiintyy etummaisesta ristikon harjalla. Yläpaarteiden kärjet työntyvät vastakkaiseen suuntaan noin 9.5 cm. Suurimman siirtymän suhteellinen arvo on noin $L/20$.



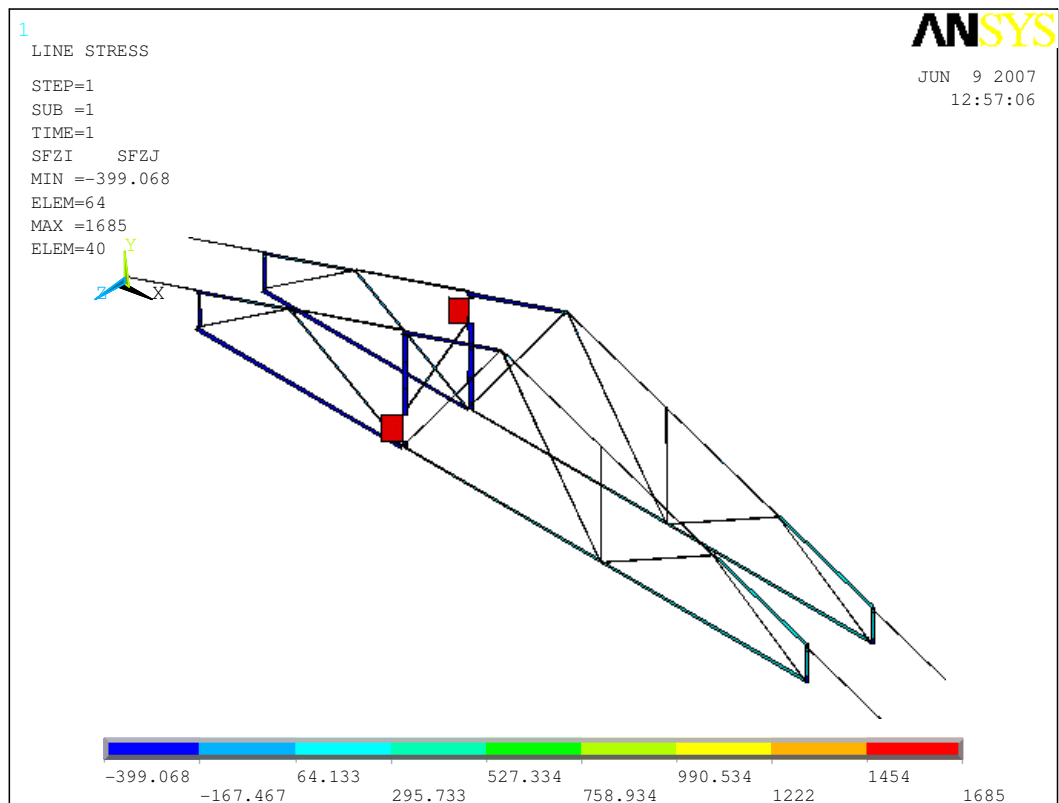
Kuva 20. Normaalijännitykset [Pa]

Kuvasta 20 nähdään, että suurin normaalijännitys 0.36 MPa esiintyy s-pukin vinossa osassa.



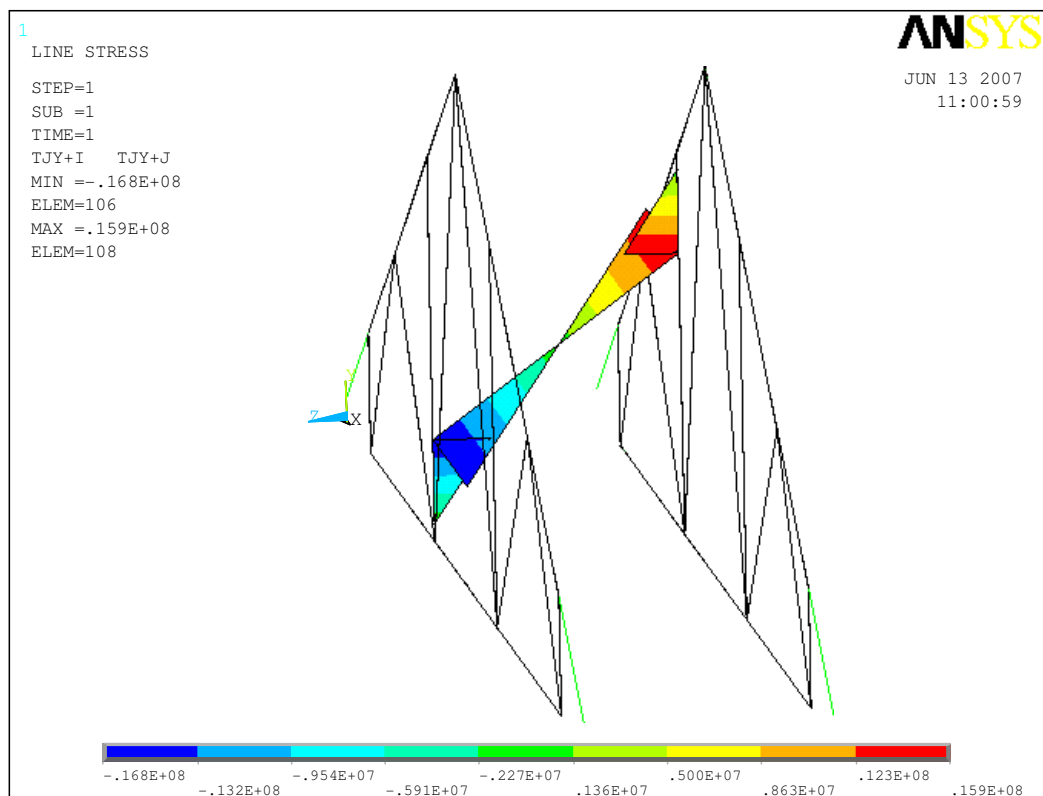
Kuva 21. Leikkausvoima y-suunnassa [N]

Kuvasta 21 nähdään, että suurin y-suunnan leikkausvoima 2075 N vaikuttaa s-pukin pystyosassa. Puhdas leikkausjännitys on tällöin 0.95 MPa ja taivutusleikkausjännitys 1.42 MPa.



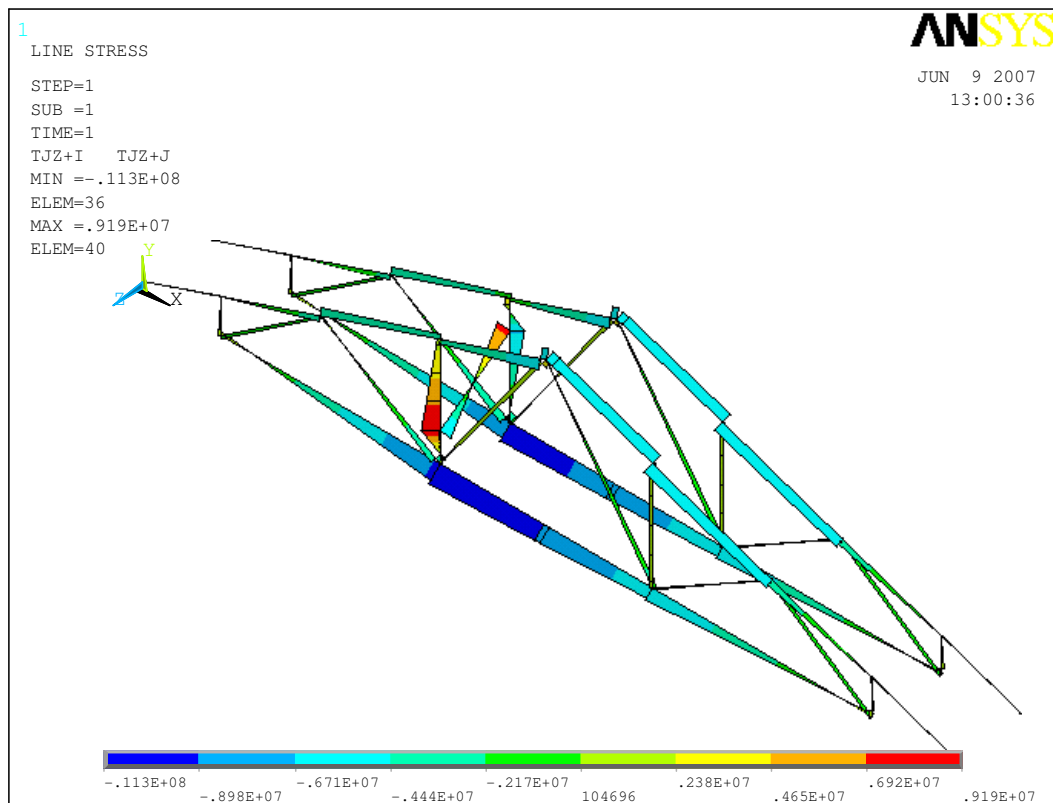
Kuva 22. Leikkausvoima z-suunnassa [N]

Kuvasta 22. nähdään, että suurin z-suunnan leikkausvoima 1685 N vaikuttaa tuetussa verikaalisauvassa. Puhdas leikkausjännitys on tällöin 0.33MPa ja taivutusleikkausjännitys 0.50 MPa.



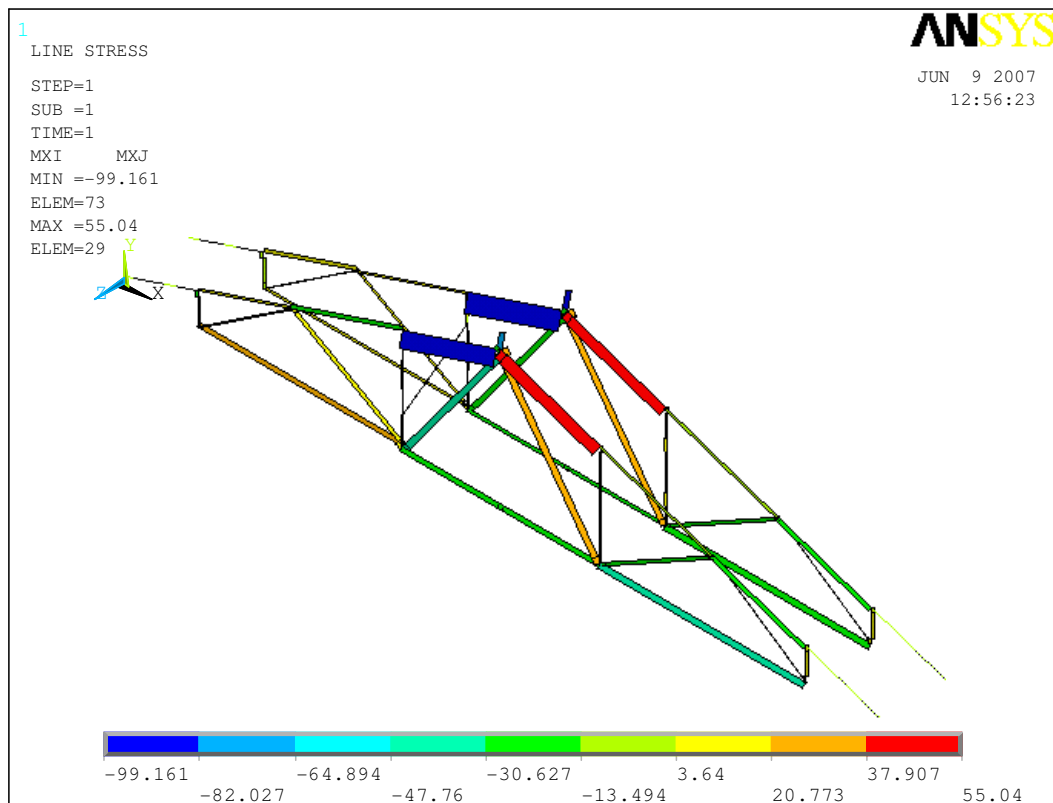
Kuva 23. Taivutusjännitys elementin +y-pinnassa [Pa]

Kuvasta 23 nähdään, että suurin y-pinnan taivutusjännitys 16.8 MPa esiintyy s-pukin kulmassa. Arvo on huomattavasti pienempi kuin kohdan 3.4 tapauksessa johtuen s-pukin suotuisammasta kulmasta.



Kuva 24. Taivutusjännitys elementin +z-pinnassa [Pa]

Kuvasta 24 nähdään, että suurin z-pinnan taivutusjännitys 11.3 MPa vaikuttaa etummaisesta ristikon alapaarteesta diagonaalien liitoskohdassa. Tuetussa vertikaalisauvassa vaikuttaa 9.2 MPa :n taivutusjännitys.



Kuva 25. Vääntömomentti [Nm]

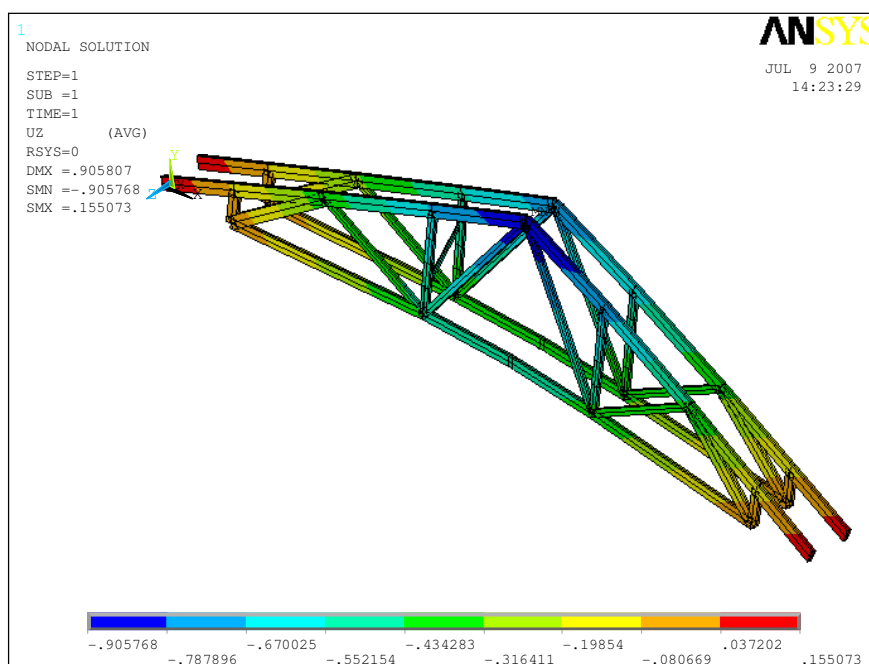
Kuvasta 25 nähdään, että suurin vääntömomentti 100 Nm vaikuttaa yläpaarteessa harjan vasemmalla puolella.

Tarkempi jännitys- ja stabiiliteetti tarkastelu on tehty seuraaville osille:

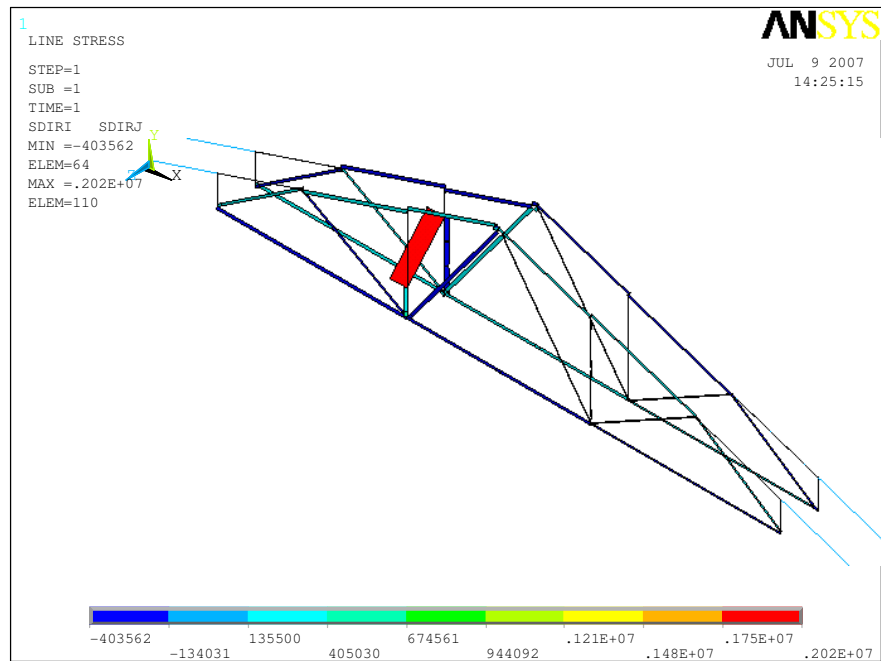
E28, 1. ristikon yläpaarre harjan vasemmalla puolella

2.6 S-pukki ja kaksi 13,4m ristikköä

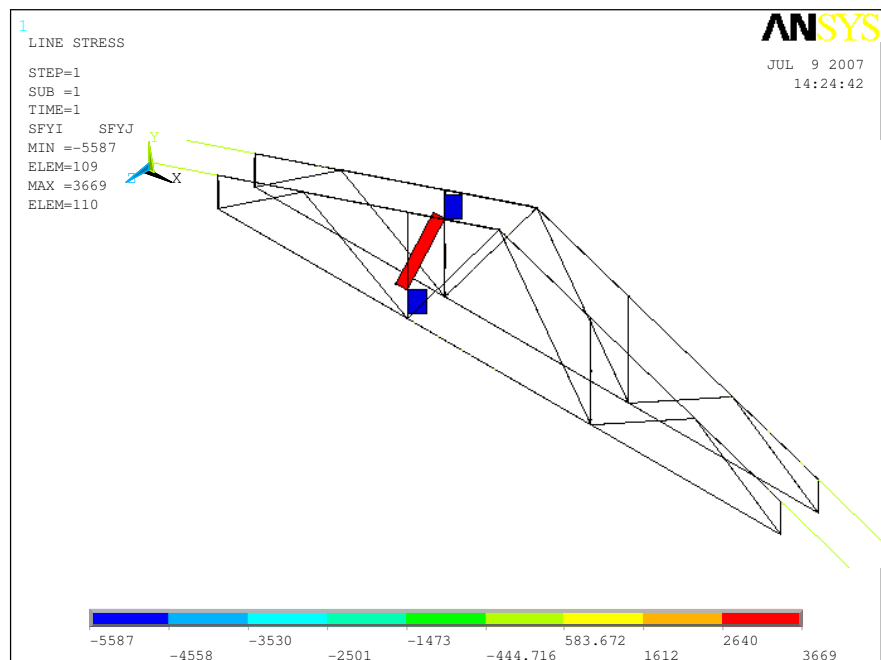
Jäykkänurkkainen s-pukki on kiinnitetty päistään ja nurkistaan nivellisesti ristikoiden vertikaalisauvoihin. Pukki on poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm lautaa. Kohtien 2.4 ja 2.5 tapauksiin verrattuna s-pukin vino osuus on eri kulmassa, koska ristikoiden korkeus on suurempi niiden välisen etäisyyden pysyessä kuitenkin 900 mm:ssä. Tässä tapauksessa s-pukin vino osa on noin 50°:een kulmassa globaaliin xz- tasoon nähden. Kuvassa 26 on esitetty rakenteen siirtymät.



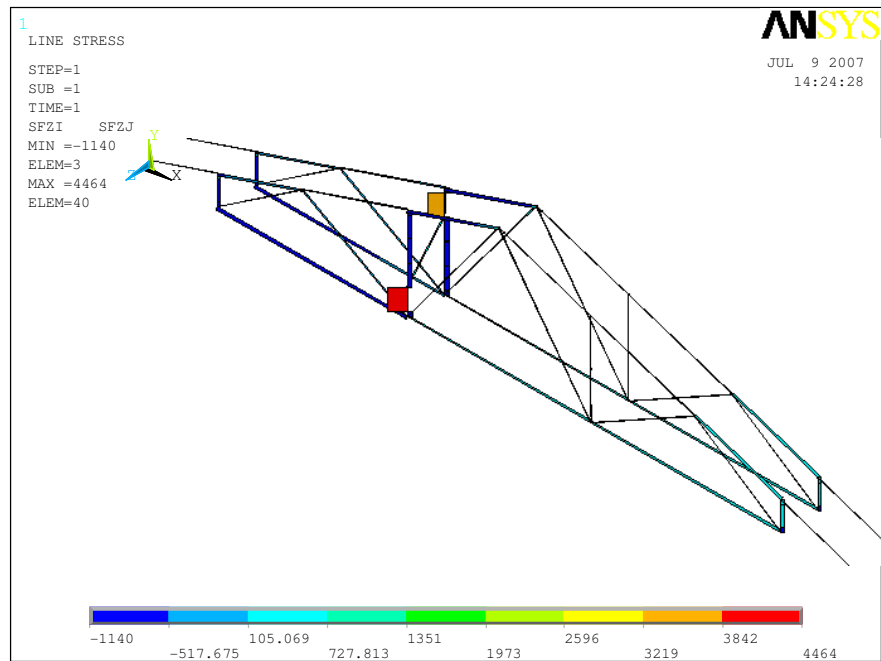
Kuva 26. Siirtymät z-suunnassa [m]



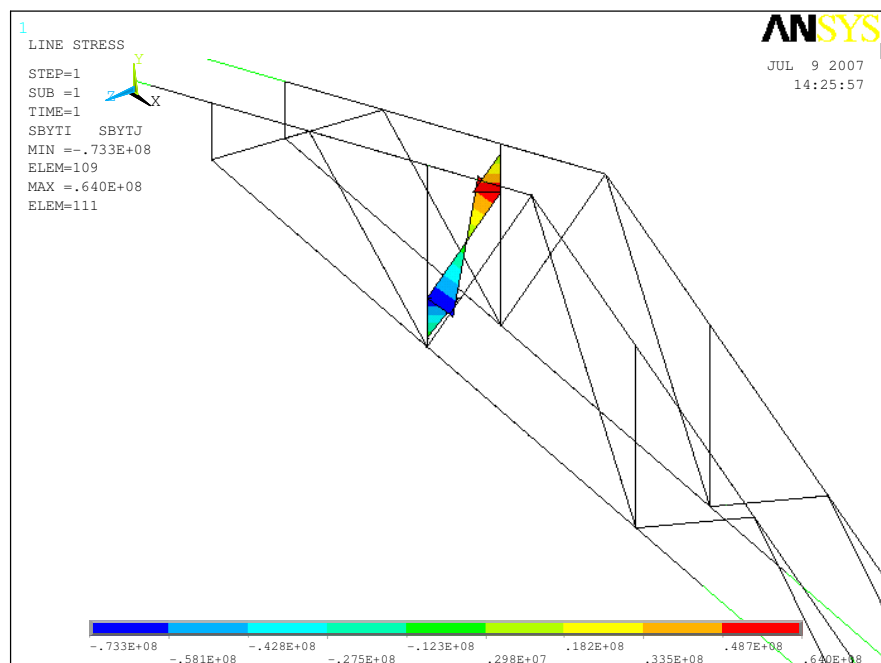
Kuva 27. Normaalijännitykset [Pa]



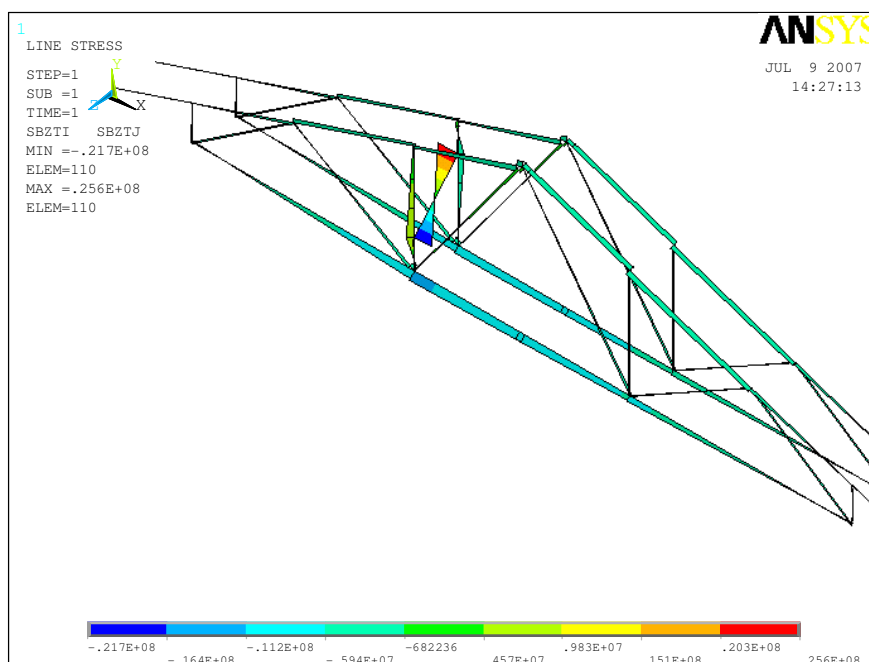
Kuva 28. Leikkausvoima y-suunnassa [N]



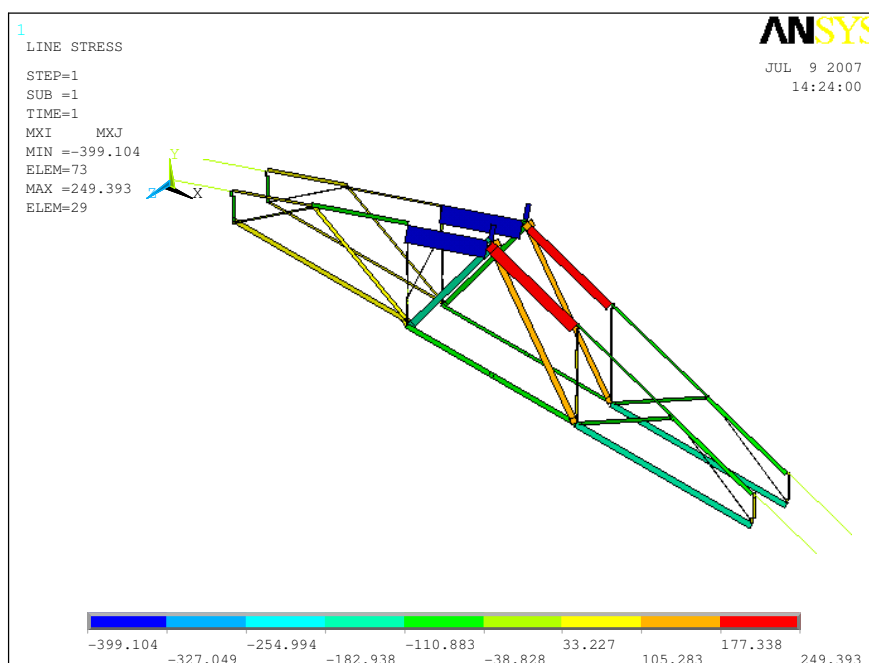
Kuva 29. Leikkausvoima z-suunnassa [N]



Kuva 30. Taivutusjännitys +y-pinnassa [Pa]



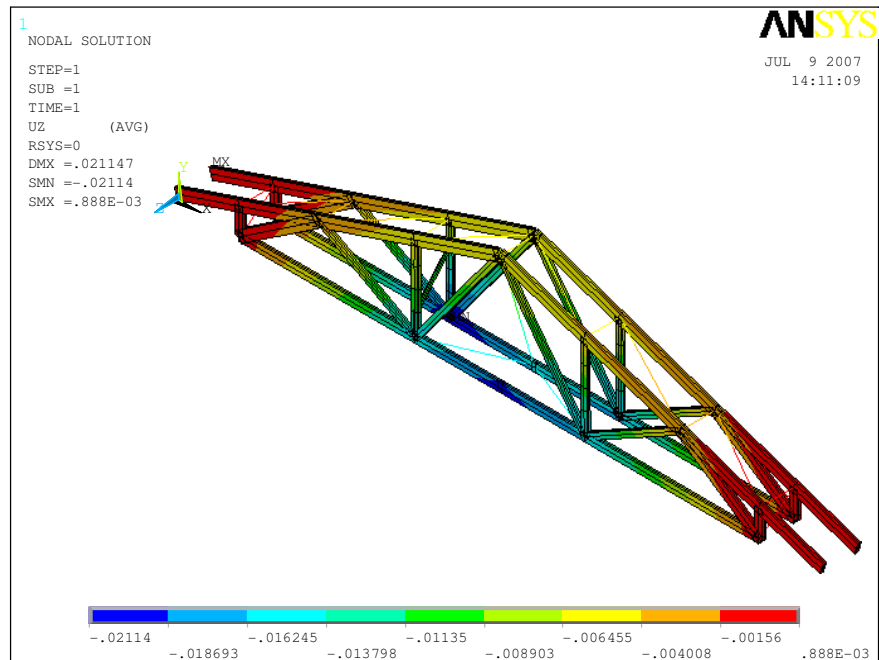
Kuva 31. Taivutusjännitys +z-pinnassa [Pa]



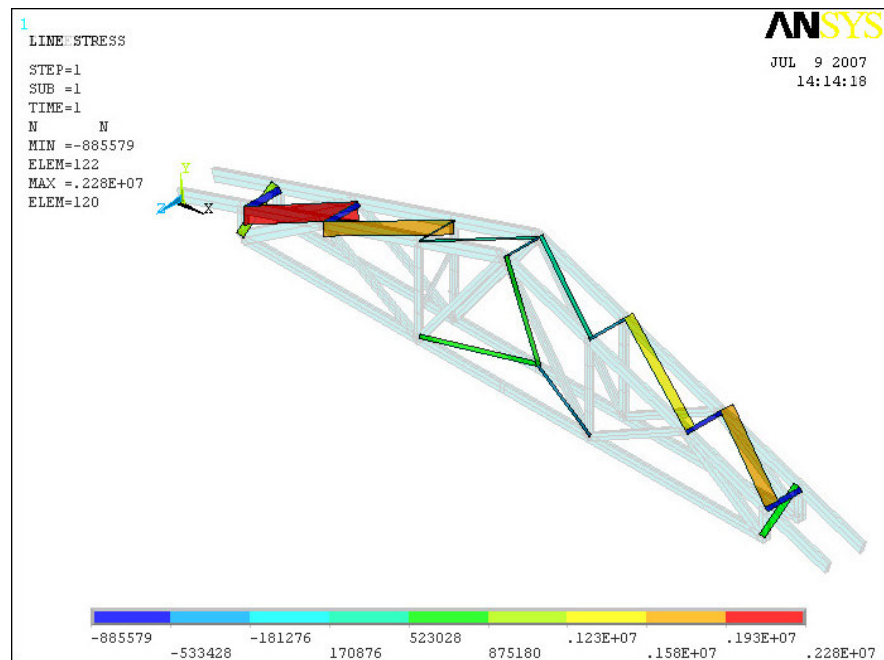
Kuva 32. Vääntömomentti [Nm]

2.7 S-pukki ja kaksi 13,4m ristikkoa + lisäjäykisteet

Kohdan 2.6 rakenteeseen on lisätty poikkileikkaukseltaan 22 mm x 100 mm veto-/puristussauvoja rajoittamaan taipumia ja jännityksiä. Kuvasta 33 nähdään, että rakenteen suurin siirtymä on noin 2.1 cm.

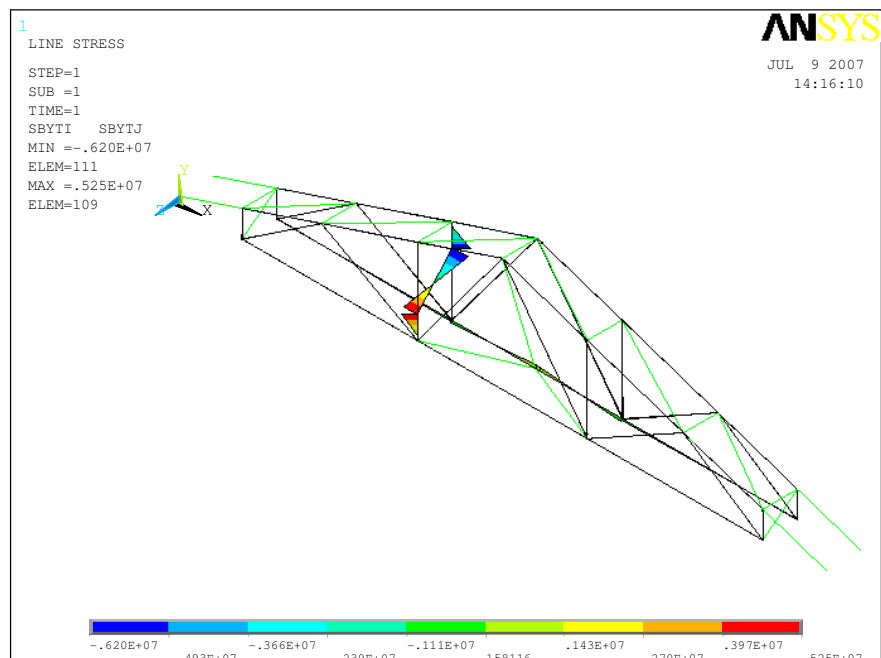


Kuva 33. Siirtymät z-suunnassa [m]



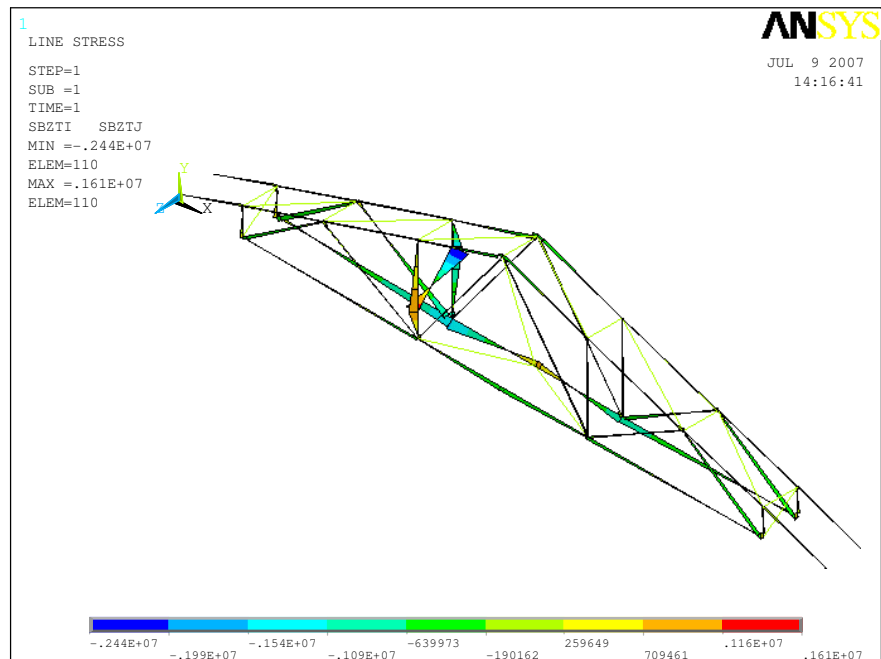
Kuva 34. Normaalijännitykset sauvaelementeissä [Pa]

Kuvasta 34 nähdään, että sauvaelementtien suurin puristusjännitys on 0.89 MPa ja suurin vetojännitys 2.28 MPa.



Kuva 35. Taivutusjännitys +y-pinnassa

Kuvasta 35 nähdään, että suurin y-pinnan taivutusjännitys 6.2 MPa vaikuttaa s-pukin nurkassa.

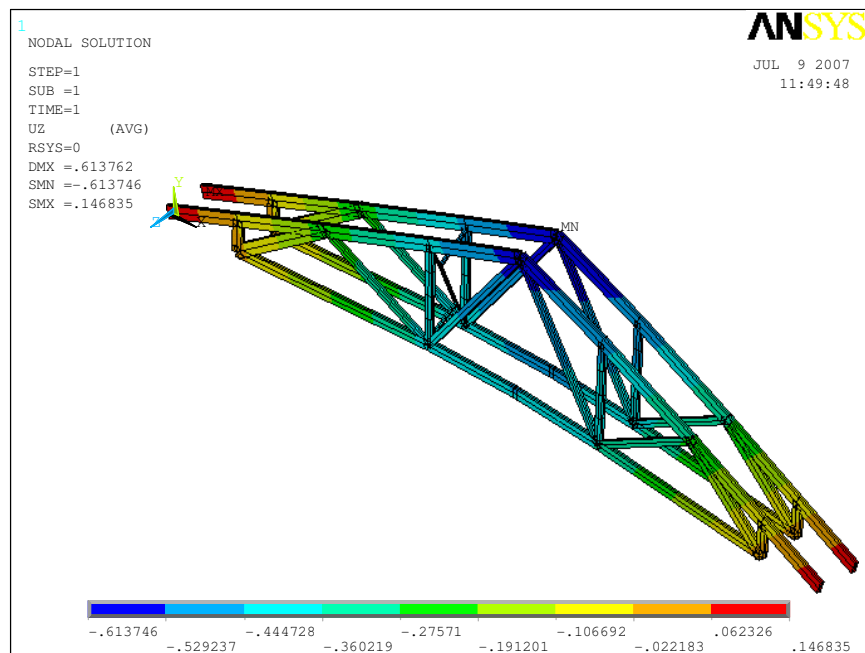


Kuva 36. Taivutusjännitys +z-pinnassa

Kuvasta 36 nähdään, että suurin z-pinnan taivutusjännitys 2.44 MPa vaikuttaa s-pukin nurkassa.

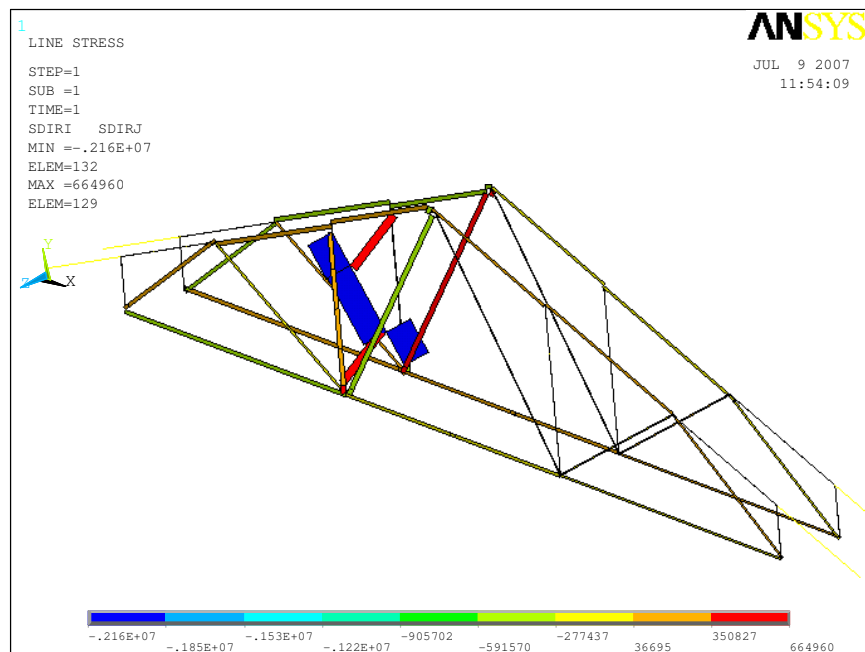
2.8 Y-pukki ja kaksi 13,4m ristikköä

Jäykkänurkkainen y-pukki on kiinnitetty päistään nivellisesti ristikoiden vertikaalisauvoihin. Pukki on poikkileikkaukseltaan 32 mm x 73 mm lautaa. Kuvassa 37 on esitetty rakenteen z-suunnan siirtymät. Tässä on huomioitava, että y-pukin lokaali koordinaatisto on käännetty, jotta sahatavara on saatu lappeelleen.



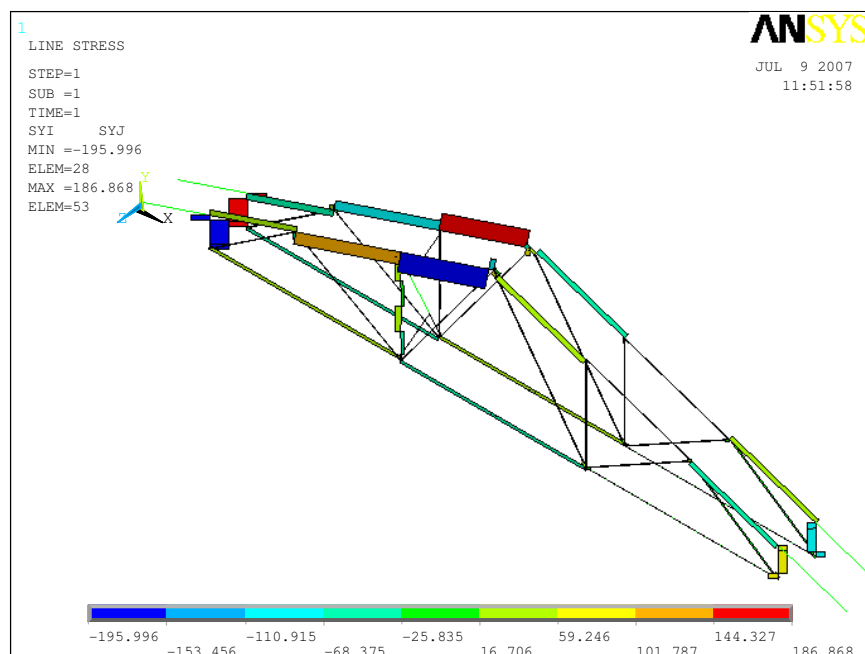
Kuva 37. Siirtymät z-suunnassa [m]

Kuvasta 37 nähdään, että rakenteen suurin siirtymä on noin 62 cm.



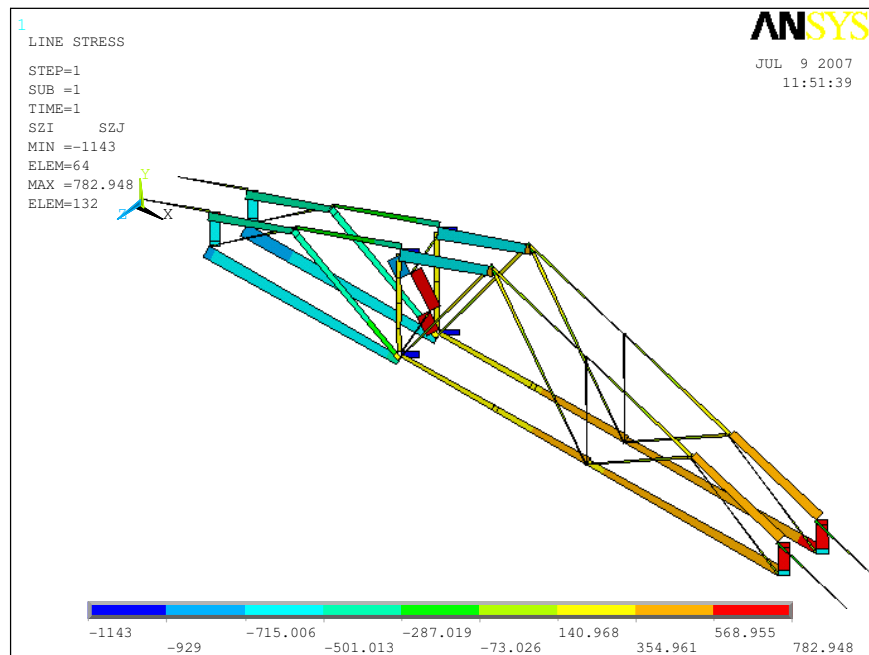
Kuva 38. Normaalijännitykset [Pa]

Itseisarvoltaan suurin normaalijännitys -2.2 MPa vaikuttaa y-pukin pitkässä osassa.



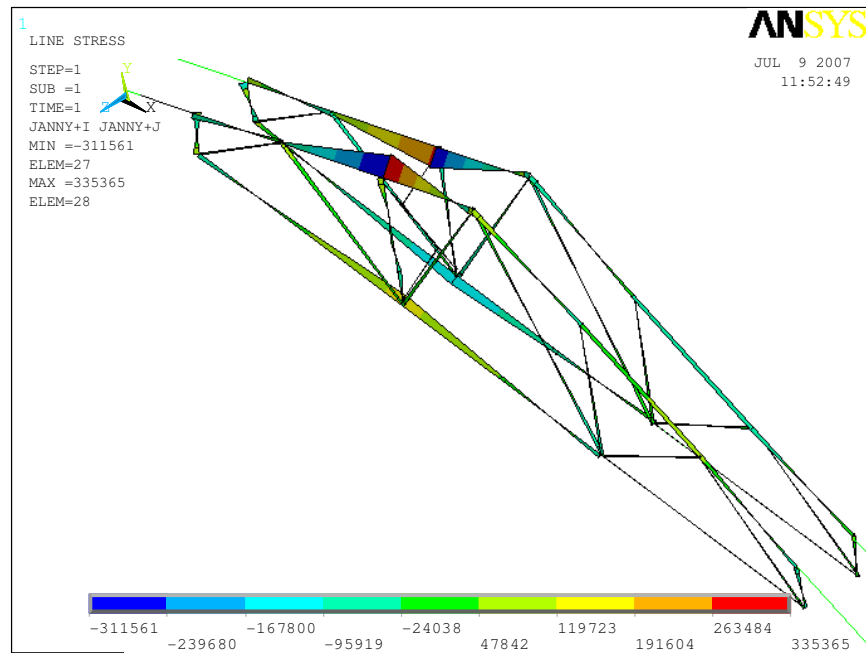
Kuva 39. Leikkausvoima y-suunnassa [N]

Kuvasta 39 nähdään, että suurin y-suunnan leikkausvoima 196 N vaikuttaa etummaisesta ristikon yläpaarteesta.



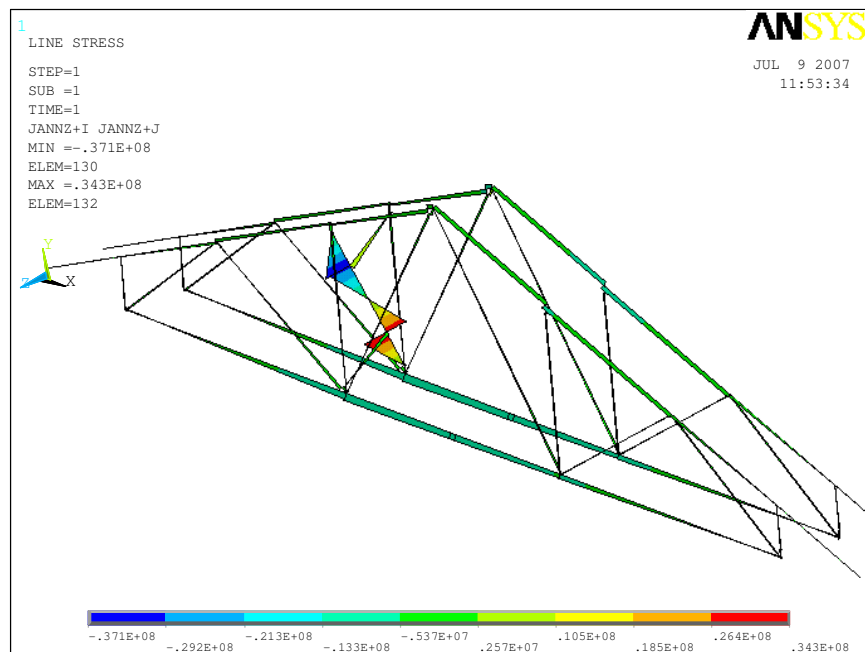
Kuva 40. Leikkausvoima z-suunnassa [N]

Kuvasta 40 nähdään, että suurin z-suunnan leikkausvoima 1143 N vaikuttaa y-pukin kohdalla vertikaalisauvan alaosassa.



Kuva 41. Taivutusjännitys +y-pinnassa [N]

Kuvasta 41 nähdään, että suurin +y-pinnan taivutusjännitys 0.34 MPa vaikuttaa yläpaarteessa jäykistepukin kohdalla. Aiemmin mainitun koordinaattimuutoksen takia y-pukin ylä- ja alapinnan taivutusjännitykset näkyvät z-pinnan taivutusjännityksenä kuvassa 42.

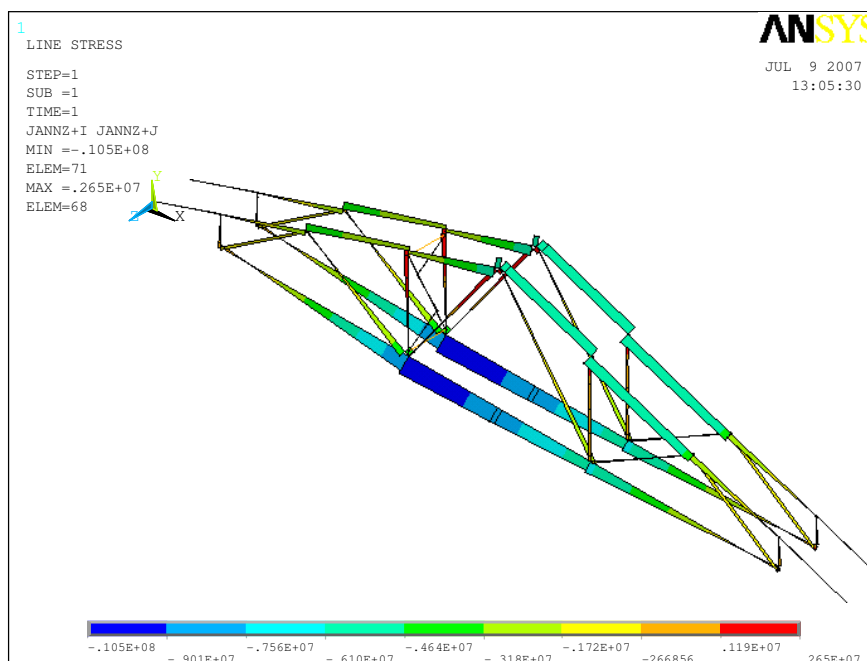


Kuva 42. Taivutusjännitys +z-pinnassa [N]

Kuvasta 42 nähdään, että suurin taivutusjännitys 38.1 MPa vaikuttaa y-pukin ylemmässä haarakohdassa.

2.9 Y-pukki ja kaksi 13,4m ristikköä + lisäjäykisteet

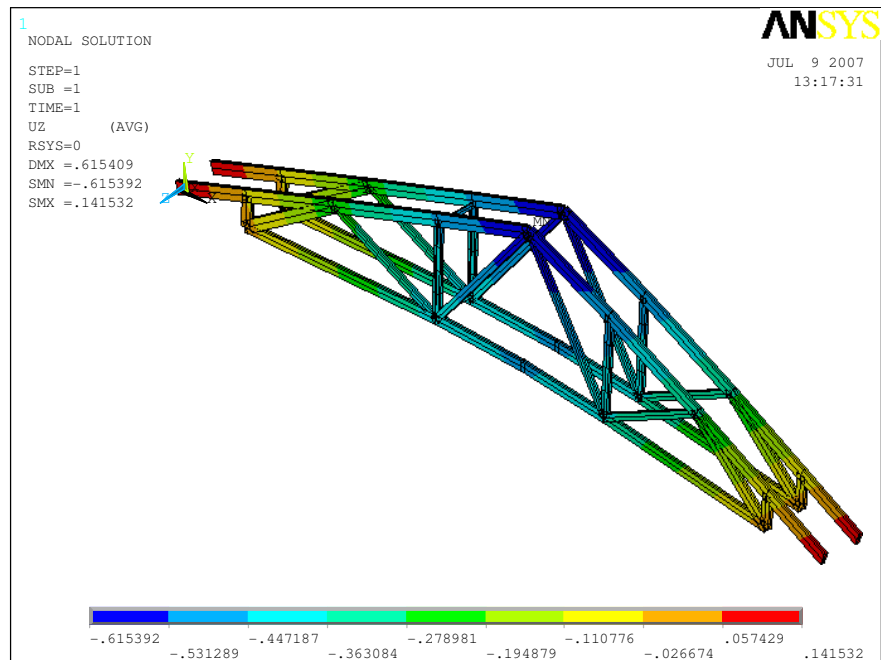
Kuvasta 43 nähdään, että 22 mm x 100 mm laudat y-pukin ylä- ja alapäässä laskevat taivutusjännitystä oleellisesti. Lisäjäykistetyssä tapauksessa suurin rakenteen suurin taivutusjännitys 10.5 MPa vaikuttaa alapaarteessa pukin kohdalla. Suurimman siirtymän arvo on noin 57 cm.



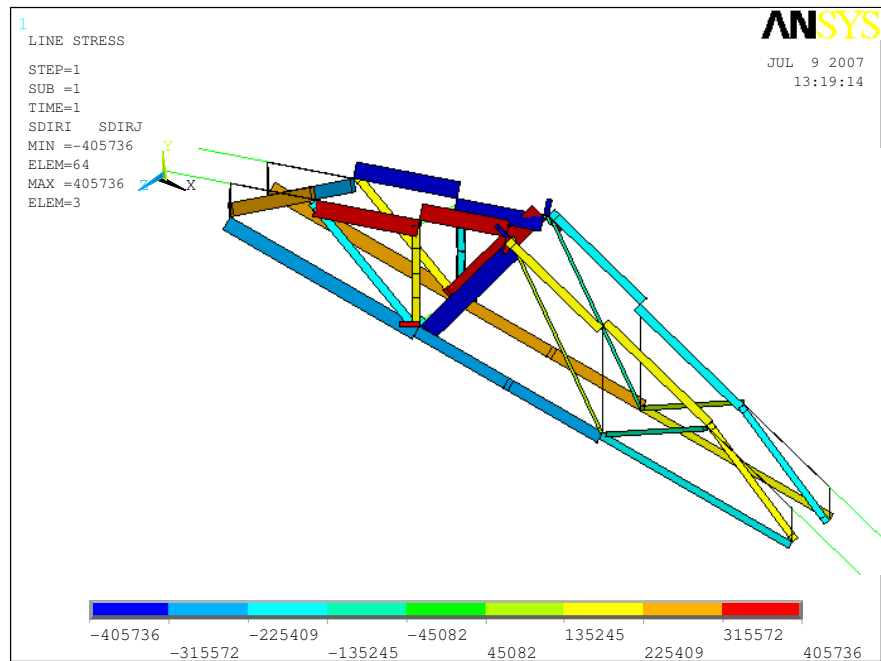
Kuva 43. Taivutusjännitys +z-pinnassa

2.10 O-pukki ja kaksi 13,4m ristikköä

Jäykkänurkkainen o-pukki on kiinnitetty päistään nivellisesti ristikoiden vertikaalisauvoihin. Pukki on poikkileikkaukseltaan 25 mm x 123 mm lautaa. Kuvassa 44 on esitetty rakenteen z-suunnan siirtymät. Suurin siirymä on noin 62 cm.

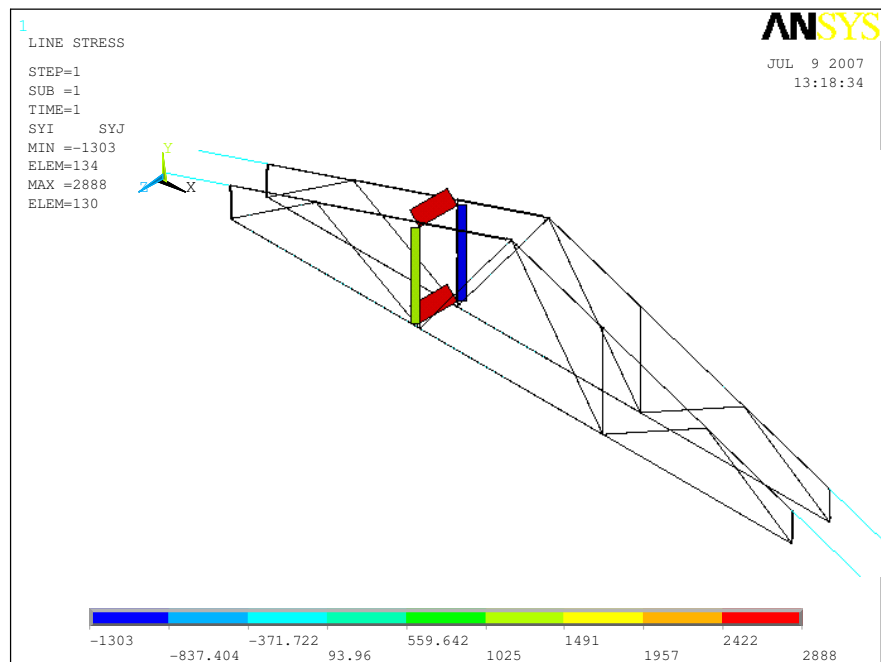


Kuva 44. Siirtymät z-suunnassa [m]



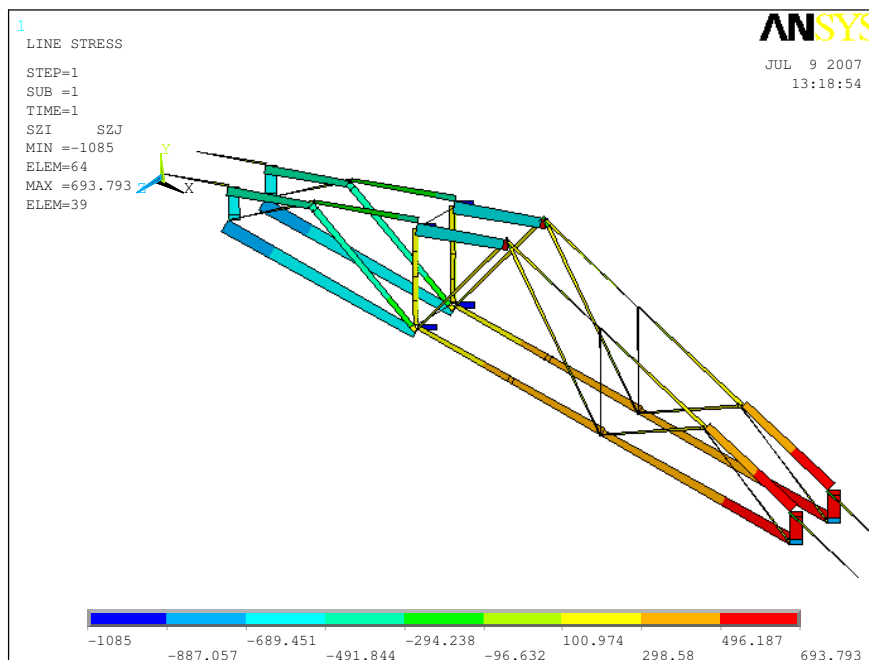
Kuva 45. Normaalijännitykset [Pa]

Kuvasta 45 nähdään, että suurin normaalijännitys $-0,41$ MPa vaikuttaa etummaisena ristikon pitkässä diagonaalissa.



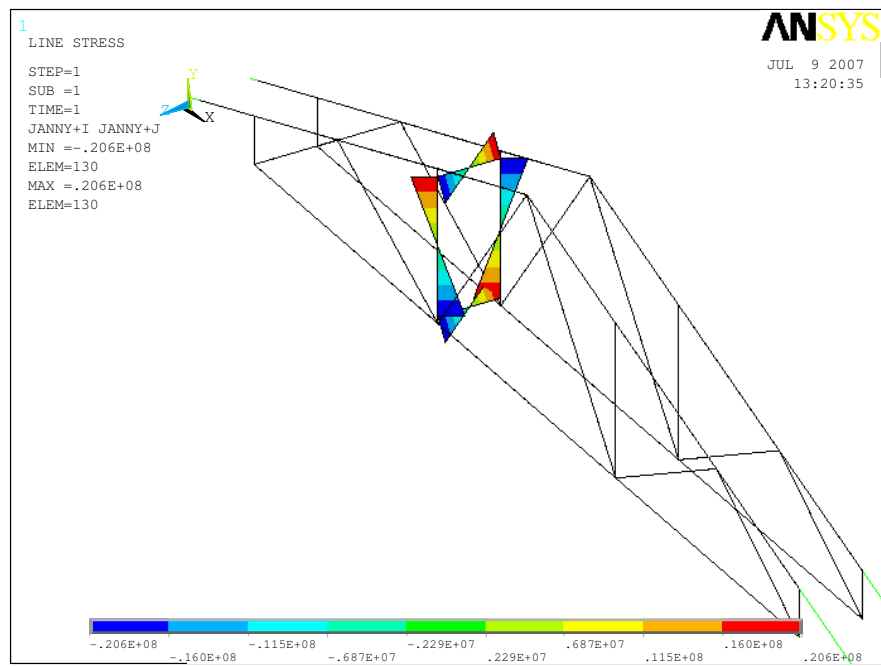
Kuva 46. Leikkausvoima y-suunnassa [N]

Kuvasta 46 nähdään, että suurin y-suunnan leikkausvoima 2.9 kN vaikuttaa o-pukin vaakaosissa.



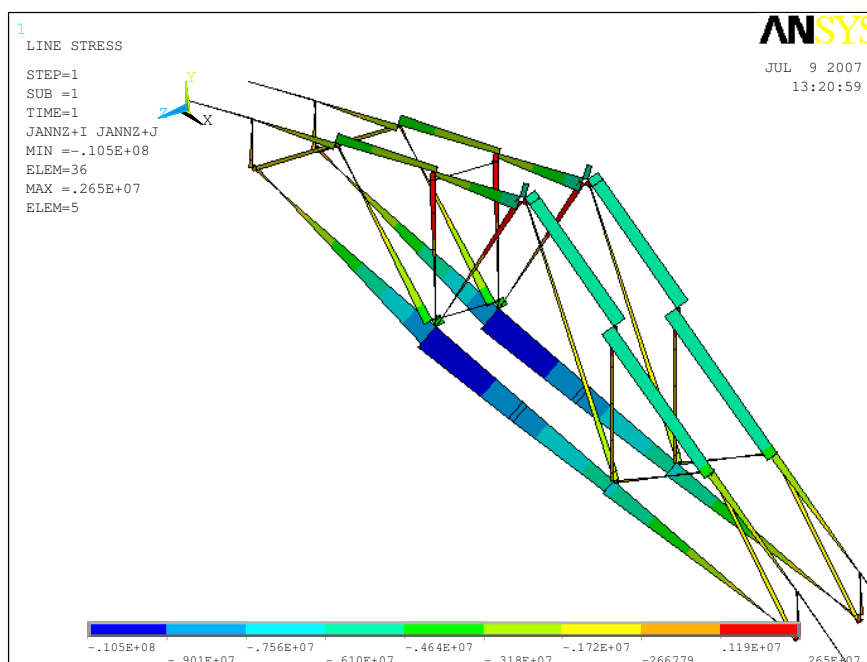
Kuva 47. Leikkausvoima z-suunnassa [N]

Kuvasta 47 nähdään, että suurin z-suunnan leikkausvoima 1.1 kN vaikuttaa tuetun vertikaalin alaosassa.



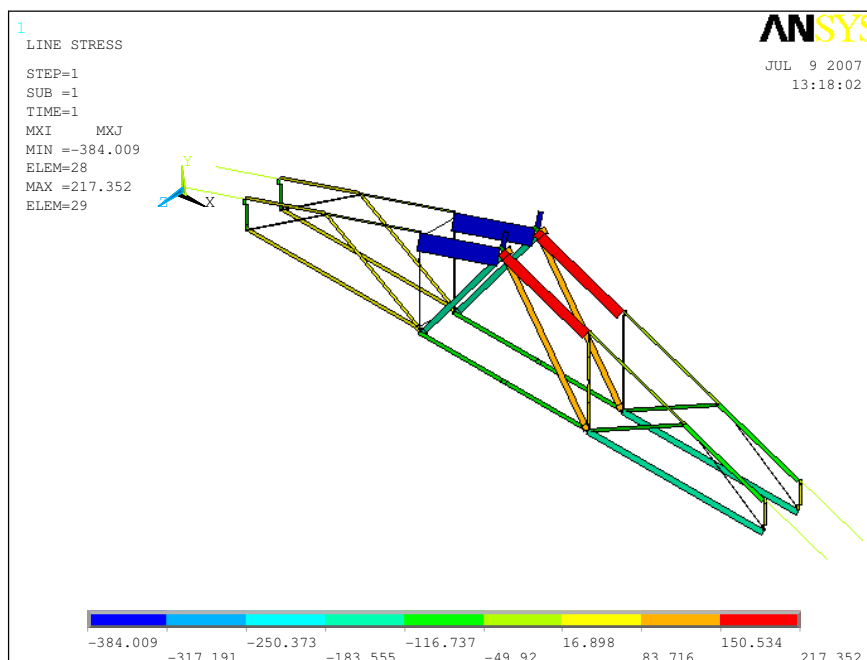
Kuva 48. Taivutusjännitys +y-pinnassa

Kuvasta 48 nähdään, että suurin y-pinnan taivutusjännitys 20.6 MPa vaikuttaa o-pukin nurkissa.



Kuva 49. Taivutusjännitys +z-pinnassa

Kuvasta 49 nähdään, että suurin z-pinnan taivutusjännitys 10.5 MPa vaikuttaa ristikoiden alapaarteissa.



Kuva 50. Vääntömomentti

Kuvasta 50 nähdään, että suurin vääntömomenti 384 Nm vaikuttaa ristikoiden yläpaarteessa.

2.11 Jännevälin vaikutus rasituksiin

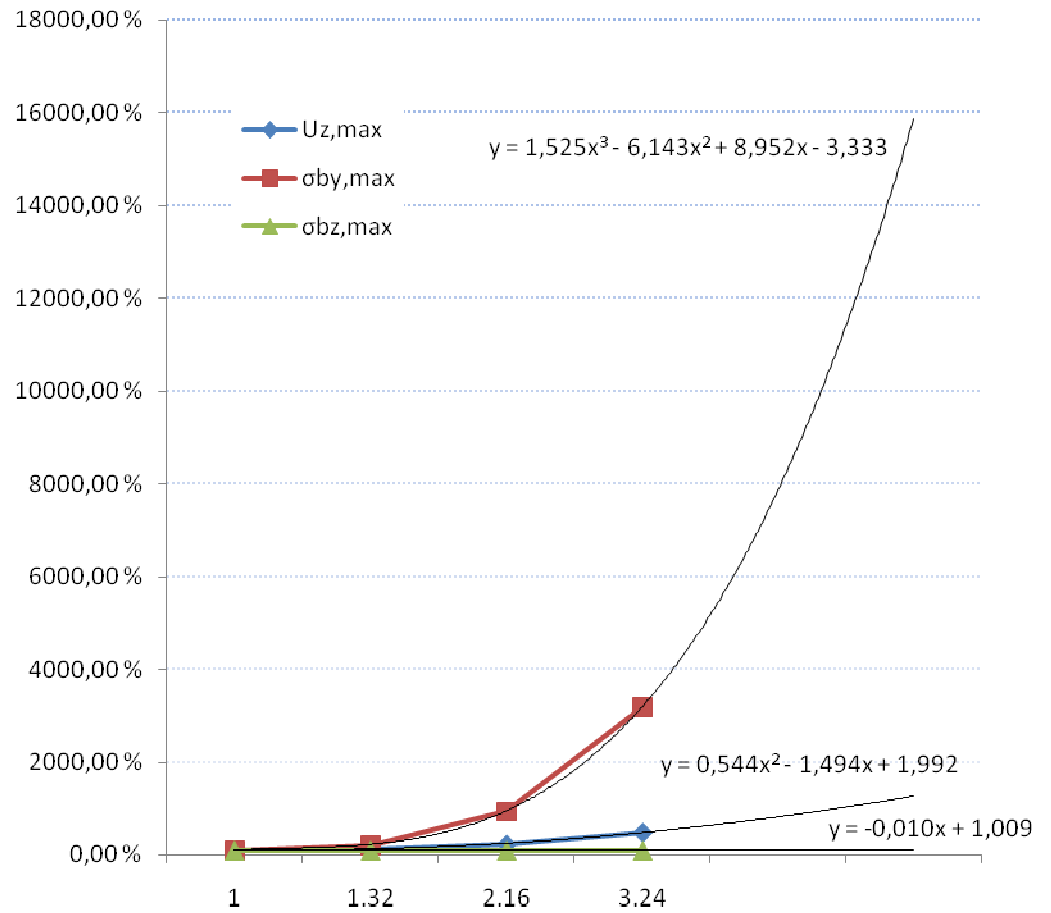
Jotta tiedettäisiin kuinka ristikon jännevälin kasvattaminen vaikuttaa muodonmuutoksiin ja rasituksiin laskettiin neljä samanlaista tapausta eri jänne väleillä. Jäykisteeksi valittiin o-pukki, koska se on geometrialtaan vähiten puolueellien, kun jännevälin kasvaessa ristikkojako pysyy samana. Myös o-pukin poikkileikkauskoko on kaikissa tapauksissa 25mm x 123mm. Tapaukset laskettiin jo aiemmin käytetyillä 6.2 , 8.2 ja 13.4 metrisillä ristikoilla. Tämän lisäksi laskettiin sama vielä 20 metrisellä ristikolla, koska tarvittiin selvyyden vuoksi vielä lisää tuloksia. Ristikoiden poikkileikkaukset on suhteutettu jänneväliin, joten kaikki ristikot ovat yhdenmuotoisia. Kaikissa tapauksissa on käytetty staattista painetta 0.25 kN/m^2 . Tutkittavat rasitukset olivat suurin siirtymä, suurin taivutusjännitys alapaarten etupinnassa ja suurin taivutusjännitys o-pukissa. Tulokset on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Rasitukset eri jänneväleillä

Jänneväli	6,2m	8,2m	13,4m	20m
Suhteellinen koko	1	1.32	2.16	3.24
$U_{z,max}$ [mm]	270	354	616	1288
$\sigma_{by,max}$ [MPa]	2,19	4,81	20,6	69,6
$\sigma_{bz,max}$ [MPa]	10,8	10,7	10,5	10,5

Ristikon koon vaikutus käy paremmin ilmi kuvasta 51, joka kertoo tutkittujen rasitusten kasvun ristikon koon funktiona. Käyriin on tehty taulukkolaskentaohjelman avulla funktion sovitus eli ns. trendiviiva. Sen avulla voidaan arvioida mielivaltaisen kokoisen rakenteen rasitukset, kun

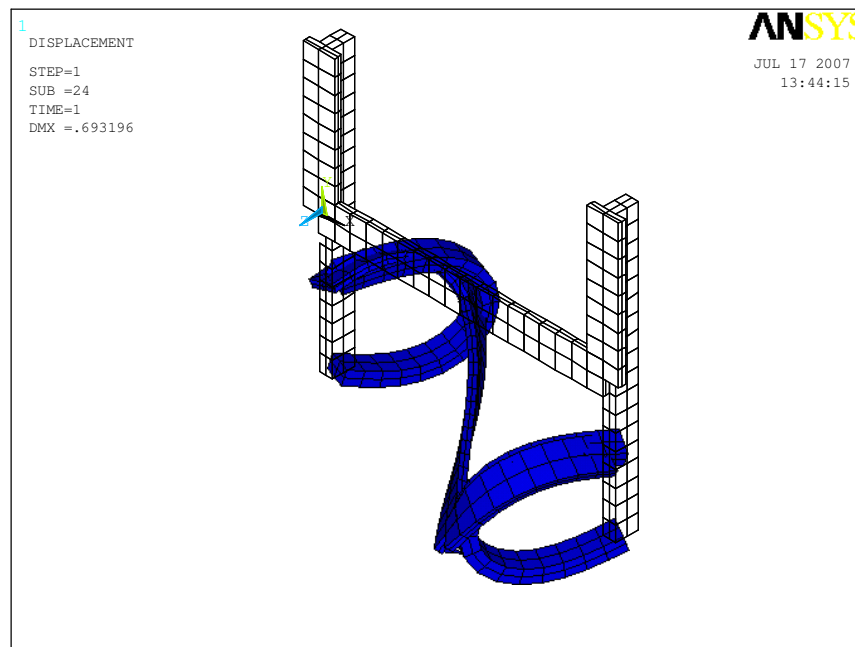
ristikoiden muoto, kimmo-ominaisuudet, k-jako ja jäykistepukit pysyvät samanlaisina.



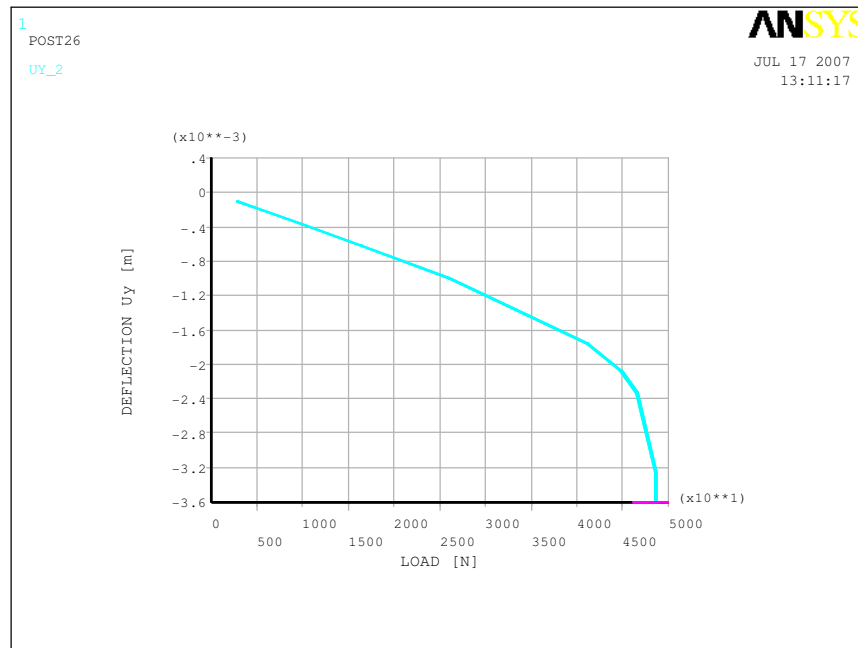
Kuva 51. Ristikön koon vaikutus rasitukseen (k-jako kaikissa 900mm)

2.12 U-pukin toiminta nurjahdustukena

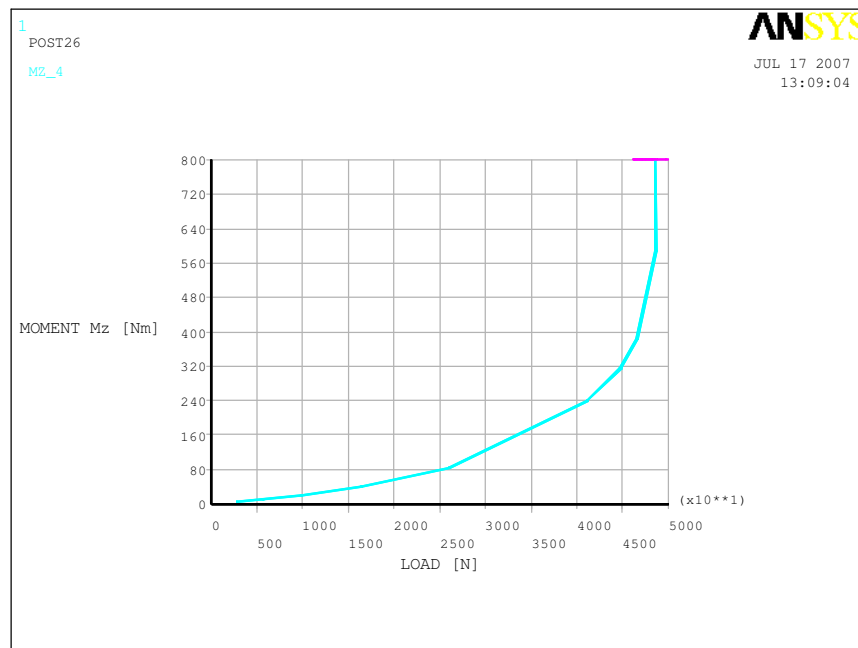
Tässä on tutkittu kuinka u-pukki toimii nurjahdustukena. Laskennassa on käytetty T24-B-2 luokan kimmoarvoja. Kuvasta 52 nähdään kuinka rakenne taipuu kuormitettaessa. Todellisuudessa puu kuitenkin murtuu ennen kuin kuvan mukainen muoto saavutetaan. Kuvissa 53 ja 54 on esitetty epälineaarisen ratkaisun avulla saadut kuvaajat, joista käy ilmi siirtymät ja momentit kuorman kasvaessa.



Kuva 52. Rakennemallin muoto ennen ja jälkeen kuormituksen



Kuva 53. Sauvanpään y-siirtymä kuorman kasvaessa [m, N]



Kuva 54. Taivutusmomentti M_z sauvan keskellä kuorman kasvaessa [Nm, N]

2.13 Lopullinen tilanne

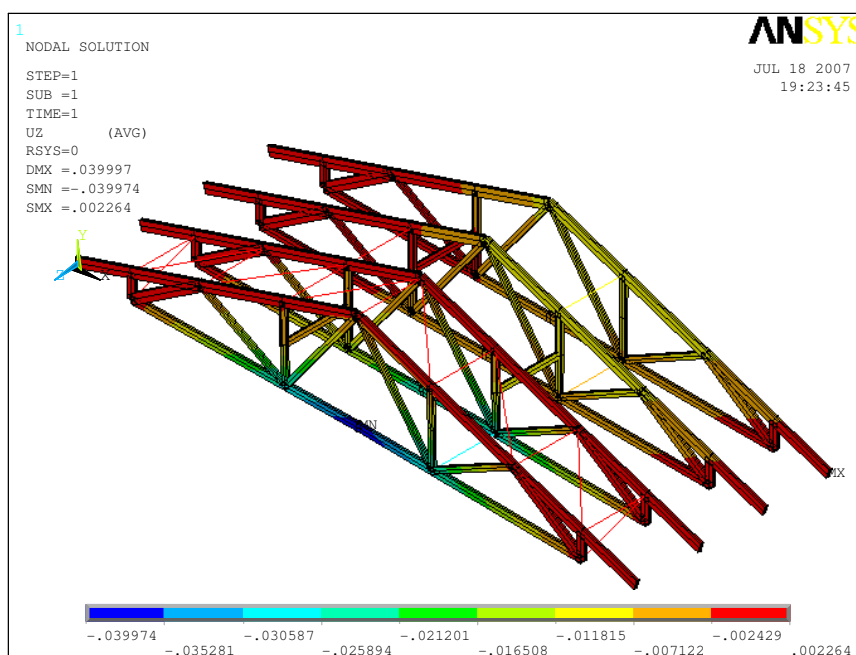
Tässä on tutkittu ristikkokaton toimintaa lopullisessa tilanteessa, jolloin rakennetta kuormittaa tuulenpaine, lumi, katon omapaino ja epäkeskisyydestä aiheutuvat vaaka kuormat.

Lumikuorma määritelty yläpaarteen kohtisuorana viivakuormana, joten 18°:een harjakulmasta aiheutuu pieni virhe lopputulokseen.

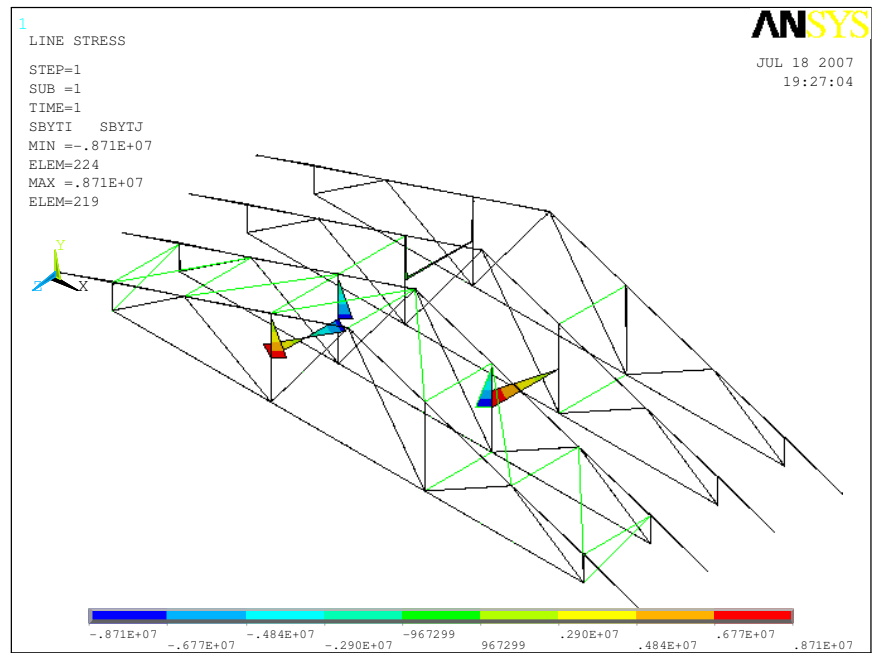
Katteiden ja ruoteiden positiivista vaikutusta ei ole huomioitu.

Oleellisimmat rasitukset ovat taivutusjännitykset.

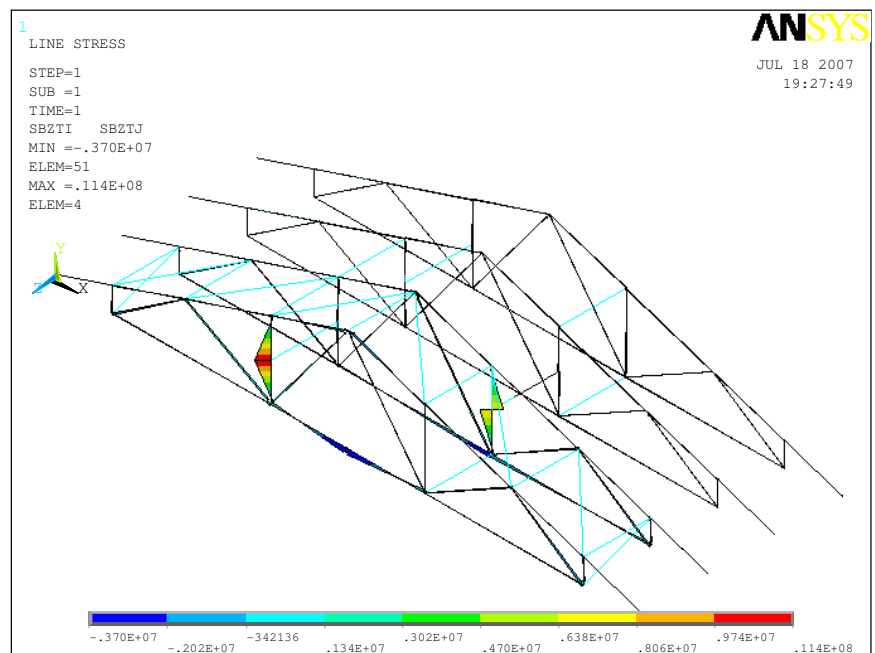
Laskennassa on käytetty T24-B-1 luokan kimmoarvoja.



Kuva 55. Siirtymät z-suunnassa



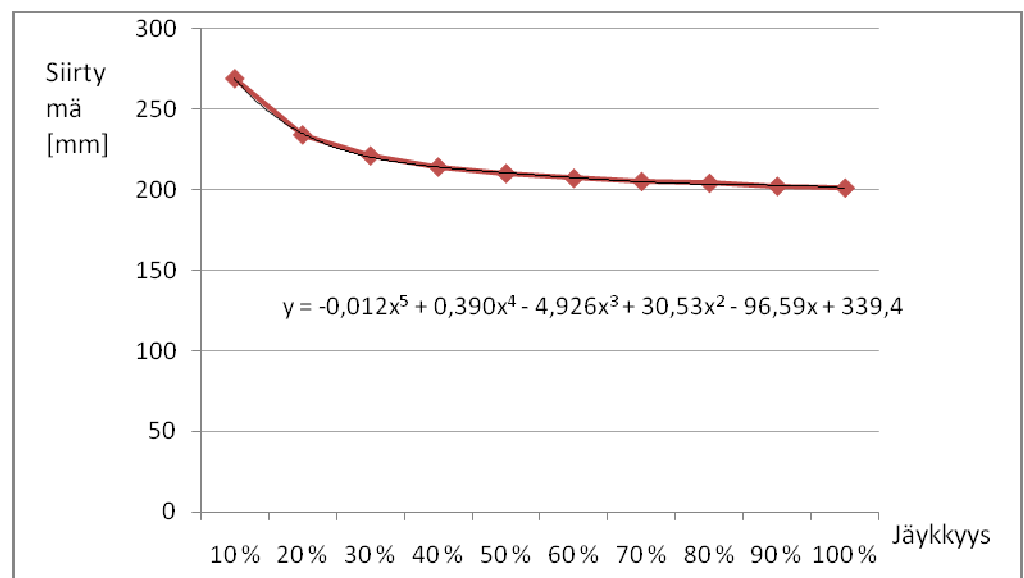
Kuva 56. Taivutusjännitys +y-pinnassa



Kuva 57. Taivutusjännitys +z-pinnassa

2.14 Liitosten jäykkyyden vaikutus siirtymiin

Tässä on tutkittu vertailun vuoksi kuinka liitosten jäykkyyden muutos vaikuttaa suurimman z-suunnan siirtymän arvoon. Liitosten mallinnus on käyty läpi tutkintotyön kohdassa 5.1.1. Vertailu tehtiin kahdella 6.2 metrisellä ristikolla, jotka on tuettu toisiinsa yhdellä o-pukilla. Tapauksia laskettiin 10 kpl. käyttäen eri liitosjäykkyyksiä. Tulokset ja sovitettu käyrä on esitetty kuvassa 58.



Kuva 58. Liitosten jäykkyyden vaikutus siirtymiin

71.6 108.4	Y2 2 kpl 42*122 L=4154 T24	122 (129) 41
52 118.7 151.4 132 (109) 61.3 28.6 (150)	D4 2 kpl 42*122 L=1077 T24	72 50
95 27 (150) 10.3 61.3 (57) 148 169.7 118.7 27		
108.4 32 71.6 (102)	D3 2 kpl 42*97 L= 227 T24	97
44 141.8 146.7 53 (57) 38.2 33.3 (64)	D7 2 kpl 42*70 L=1605 T24	35
35 35 (45) 51.6 38.2 (57) 28 128.4 141.8 44		
72 154.2 115.8 17 (80) 25.8 64.2 (39)	D5 2 kpl 42*70 L=1233 T24	35
35 35 (39) 64.2 44.2 (50) 17 115.8 135.8 36		
71.6 108.4	D6 2 kpl 42*70 L= 929 T24	70
(74) 71.6 23 108.4		

LAADUNVALVONTAPÖYTÄKIRJA VALMISTUKSESTA VASTAAVA Tark=Tarkastanut Toler. Tark. Huomautuksia	LUJ.LAJ.TUNNUS SORMIJ.TUNNUS
Rakenteen pituus +10	
korkeus hi +-10	
Kapuloiden sijainnit h2 +-10	
Puutavaran dimensiot	
Levyjen sijoitus +- 8	
Koko	
pain. puhun	
Liitosten raot	
Korotukset	
Kosteusprosentit MIN MAX	
Yläpaarre	
Alapaarre	
Uumasauvat	

Suunn: Juho Töllli tekn. yo
Pvm: 01.07.2005

Levy LeveysxPituus Kpl
M 18 H 51 x 120 8
M 18 H 86 x 200 2
M 18 H 121 x 200 10
M 18 H 149 x 240 4
Summa 24

Yhteensä 24 kpl = 0.47 m2

KOHDE: TN0605/
RAK: 11974
TN1-3.0-060-00-04 kpl

1:25

VALMISTUSPVM. ___ / ___ 20__ VUORO ___ VALM. MÄÄRÄ ___ TEKIJÄ ___

VALMISTUSPVM. ___ / ___ 20__ VUORO ___ VALM. MÄÄRÄ ___ TEKIJÄ ___

VALMISTUSPVM. ___ / ___ 20__ VUORO ___ VALM. MÄÄRÄ ___ TEKIJÄ ___

VALMISTUSPVM. ___ / ___ 20__ VUORO ___ VALM. MÄÄRÄ ___ TEKIJÄ ___

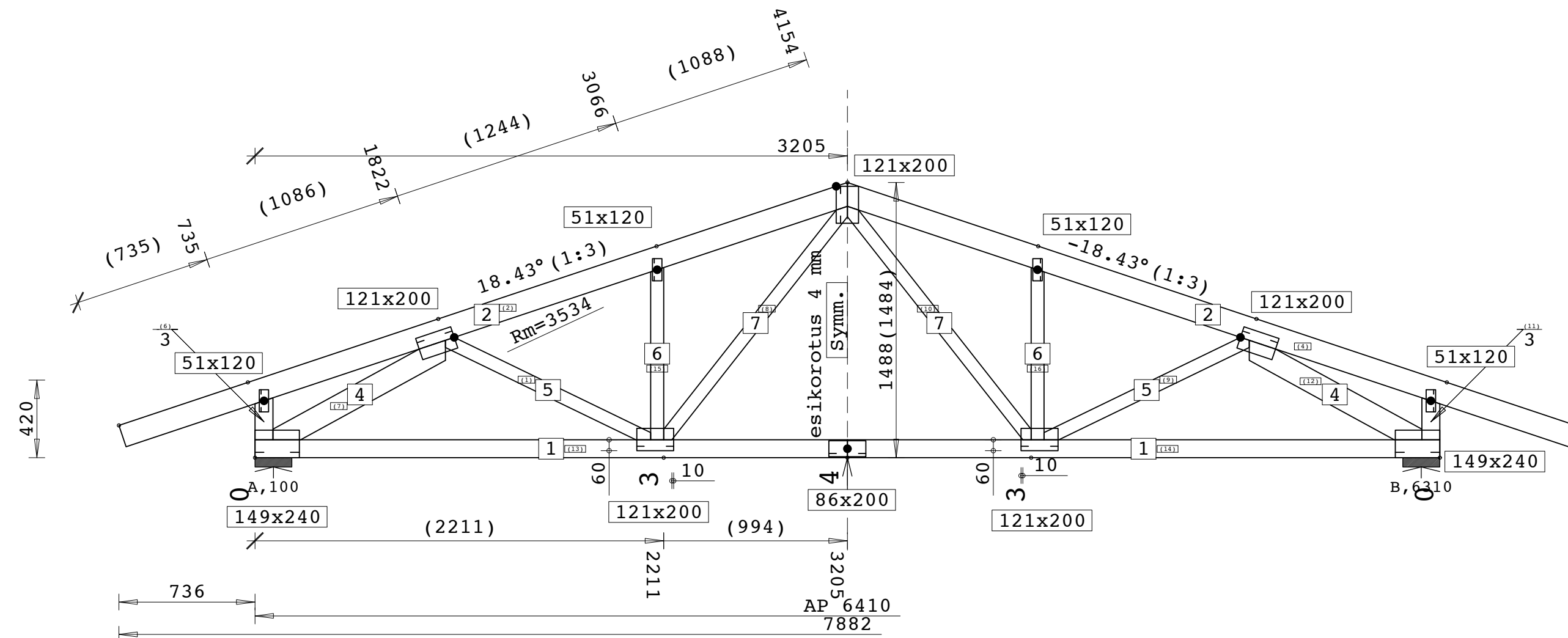
VALMISTUSPVM. ___ / ___ 20__ VUORO ___ VALM. MÄÄRÄ ___ TEKIJÄ ___

VALMISTUSPVM. ___ / ___ 20__ VUORO ___ VALM. MÄÄRÄ ___ TEKIJÄ ___

VALMISTUSPVM. ___ / ___ 20__ VUORO ___ VALM. MÄÄRÄ ___ TEKIJÄ ___

Puutavaratil. 104 dm3

PUUTAVARA JA LUJUUSLUOKAT
Alapaarteet
(1) 42x97 T24
Yläpaarteet
(2) 42x122 T24
Diagonaalit
(3) 42x97 T24
(4) 42x122 T24
(5) 42x70 T24
(6) 42x70 T24
(7) 42x70 T24



SUUNNITTELUOHJELMISTO **TVERTEX** Versio 8.0 / 2R

SFS-SERTIFIOINTI ON TARKASTANUT JA HYVÄKSYNYT TÄMÄN SUUNNITTELUOHJELMAN NR-RAKENTEIDEN SUUNNITTELUUN 12.12.2000

NAULALEVYT VTT:n lausunto Voimassa
M 18 H RTE 3657/03 31.10.2008

SIJOITUS:
Symmetrisesti liitokseen nähden ellei toisin merkitty.
Levyn pääsuunta osoitettu viivoituksella --.
Sijoitustoleranssi 8 mm ellei toisin merkitty.
Naulalevyn kohdistuspiste (●) puun reunaan.

KOSTEUSLUOKKA 2
MAKSIMI KUORMITUSLEVEYS k 900 mm

KUORMITUKSET lumi 2.00 kN/m2
omapaino yläpaarre 0.55 kN/m2
alapaarre 0.25 kN/m2
tuuli 0.60 kN/m2
hyötykuorma alap. 0.00 kN/m2

PAARTEIDEN MAKSIMI RUODEVÄLI 1050 mm

Aika	Tuki A	Tuki B
luokka	x kN y kN	x kN y kN
Tuenta 1 B	0.0 10.0	0.0 10.0
Tuenta 1 C	0.3 9.8	0.0 9.8
	-0.3 0.0	0.0 0.0
Pysyvän kuorman osuus	28 %	28 %
Tukileveys	148 mm	148 mm

Tukireaktiot on esitetty ominaisarvoina (ilman osavarmuuskertoimia)

YLÄPAARTEEN MAX.TAIPUMA 7 mm JA SITÄ VASTAAVA VAAKASIIRTYMÄ 2 mm
ALAPAARTEEN MAX.TAIPUMA 8 mm JA MAX.VAAKASIIRTYMÄ 2-TUELLA 2 mm

PUIDEN JA LIITOSTEN MITOITUS

Puu nro	Q	Qvert	N	M	Summa	Puu nro	Kap.	F	M
kn			kn	kNm		nro	kn		Nm
(13)	0.41	0.10	13.22	0.22	0.54	149x240	0.45	14.46	-208
(14)	-0.41	0.10	13.22	0.22	0.54	(6)	0.46	2.93	-51
(2)	3.10	0.59	0.84	1.00	0.64	(7)	0.98	11.77	-352
(4)	-3.10	0.59	0.84	1.00	0.64	(13)	0.28	14.46	-454
(1)	0.02	0.01	2.13	0.01	0.09	149x240	0.45	14.46	208
(6)	-0.37	0.09	-5.68	-0.05	0.15	(11)	0.46	2.93	51
(7)	-1.07	0.20	-15.89	-0.54	0.91	(12)	0.98	11.77	352
(8)	0.01	0.00	4.40	0.01	0.18	(14)	0.28	14.46	454
(9)	-0.02	0.01	2.13	-0.01	0.09	51x120	0.32	2.80	4
(10)	-0.01	0.00	4.40	-0.01	0.18	(2)	0.63	2.80	-10
(11)	0.37	0.09	-5.68	0.05	0.15	(6)	0.51	2.93	-19
(12)	1.07	0.20	-15.89	-0.54	0.91	51x120	0.32	2.80	-4
(15)	0.00	0.00	-3.72	0.00	0.25	(4)	0.63	2.80	10
(16)	-0.00	0.00	-3.72	-0.00	0.25	(11)	0.51	2.93	19
						121x200	0.45	17.05	43
						(1)	0.80	4.15	-10
						(2)	0.60	17.05	-433
						(7)	0.83	14.33	-227
						121x200	0.45	17.05	-43
						(4)	0.61	17.05	442
						(9)	0.80	4.15	10
						(12)	0.83	14.33	227
						86x200	0.42	12.63	-58
						(13)	0.55	12.63	-19
						(14)	0.58	12.63	120
						121x200	0.23	6.35	-126
						(2)	0.70	7.87	142
						(4)	0.70	7.87	-142
						(8)	0.50	4.40	15
						(10)	0.50	4.40	-15
						51x120	0.23	1.96	3
						(2)	0.44	1.96	-10
						(15)	0.37	1.96	-16
						121x200	0.25	4.40	10
						(1)	0.26	2.13	-6
						(8)	0.78	4.40	7
						(13)	0.13	2.25	-103
						(15)	0.28	2.35	2
						121x200	0.25	4.40	-10
						(9)	0.26	2.13	6
						(10)	0.78	4.40	-7
						(14)	0.13	1.85	113
						(16)	0.28	2.35	-2
						51x120	0.23	1.96	-3
						(4)	0.44	1.96	10
						(16)	0.37	1.96	16

Päiväys Päärakennesuunnittelija

Päärakennesuunnittelija hyväksyy nimikirjoituksellaan NR-rakenteen ulkomitat, kuormat ja tuennat ja varmistaa liittymisen huomioimisen muihin rakenteisiin sekä kokonaisjäykistyksen. NR-suunnittelija ei vastaa kokonaisjäykistyksestä.

K.osa Stadsdel Kylä By Kortteli Kvarter Tomttit Tomt Arkistomerk. Arkivant		Suunnitteluohjelmisto Versio 8.0 / 2R	
Toimenpide Atgard		Piirustuslaji Ritningstyp	Juoks. nro Löp. nr.
UUDISRAKENNUS		RAKENNEPIIRUSTUS	
Kohteen nimi ja osoite Objektets namn och adress		Sisälto Innehåll	Kaavat Skolor
		TN1-3.0-060-00-04	1:25
		K-JAKO 900 PIT 6410 Ha	
		KALT 18.43	
PYHÄNÄN Rakennustuote Oy Leiviskäntie 2 92930 PYHÄNÄ Puh 08-8196 111 Fax 08-8196 111		Vastavaa NR-suunnittelija	Suunn.ala Plan.omr. Piir.nro Ritn.nr. Muutos Andring
Päiväys Datering Suunn. Konstr. AH		RAK 11974	
01.07.2005		Juho Töllli tekn. yo	

LIITE 3		T24-C-1						KUORMITUKSET											
		f_b	26 MPa	f_v	2,6 MPa														
		f_c	24,7 MPa	f_v	1,3 MPa														
		f_t	16,9 MPa																
Tapaus	Rakenneosa	L_c [mm]	b [mm]	h [mm]	A [mm ²]	W_{z-z} [mm ³]	W_{y-y} [mm ³]	i_{z-z}	i_{y-y}	$K_{s,z-z}$	$K_{s,y-y}$	b/c	Vääntöjännitys-kertoimet taulukosta			W_t [mm ³]	Leikkausvoima		Vääntö-momentti
R6m_2_u-pukki	E121, u-pukin vaakaosa	900	22	100	2200	36667	8067	31	142	0,60	0,09	4,55	0,286	0,287	0,744	13891	598	0	0
R6m_2_u-pukki	E21, 1. ristikon yläparre harjan vasemmalla puolella	1025	42	122	5124	104188	35868	29	85	0,60	0,20	2,90	0,260	0,262	0,750	56384	0	185	43
R6m_2_u-pukki	E51, 1. ristikon alapaarre diagonaalien liitoskohdassa	1005	42	97	4074	65863	28518	36	83	0,53	0,22	2,31	0,240	0,250	0,775	42777	2,8	48	7,1
R6m_2_u-pukki	E4, 1. ristikon tuetun vertikaalin alaosa	500	42	70	2940	34300	20580	25	41	0,65	0,49	1,67	0,200	0,235	0,850	29018	1,400	250,000	2,500
R6m_4_u-pukki +lisäjäykisteet	E244, Puristussauva vasemman tuen kohdalla	900	100	22	2200	8067	36667	142	31	0,08	0,60	4,55				0	0	0	0
R8m_2_s-pukki	E28, 1. ristikon yläparre harjan vasemmalla puolella	1350	55	160	8800	234667	80667	29	85	0,60	0,20	2,91	0,260	0,262	0,755	126808	39,000	240,000	100
Nurjahdustesti		900	70	42	2940	20580	34300	74	45	0,25	0,45	1,67				0			

YKSITTÄISET JÄNNITYKSET									YHDISTETYT JÄNNITYKSET				KESTÄVYYDET			
Normaalijännitys	Puhdas leikkaus • f_v		Taivutusleikkaus neutraaliakselilla • f_v		Taivutusjännitys (..akselin ympäri)		Väännöstä aiheutuva leikkaus reunassa		Yhdistetty taivutus- ja normaalijännitys (Vastak. Kulmissa)		Puhdas leikkaus + vääntöleikkaus		Nurjahdus- kestävyys puristuksessa		Taivutus- ja normaalijännitys • 1	
• t_c [MPa]	• v_z [MPa]	• v_y [MPa]	• v_z [MPa]	• b_y [MPa]	• b_z [MPa]	• A [MPa]	• B [MPa]	• b_y • b_z • N [Mpa]	• b_y • b_z • N [Mpa]	• v_y • A [MPa]	• v_z • B [MPa]	$K_{s,z-z}$ • f_c [Mpa]	$K_{s,y-y}$ • f_c [Mpa]	z-z	y-y	
0	0,27	0,00	0,41	0,00	0	6,45	0,00	0,00	6,45	-6,45	0,27	0,00	14,82	2,22	0,25	0,17
0,2	0,00	0,04	0,00	0,05	6,2	0	0,76	0,57	6,40	-6,00	0,76	0,61	14,82	4,94	0,18	0,25
-0,114	0,00	0,01	0,00	0,02	10,6	0,065	0,17	0,13	10,55	-10,78	0,17	0,14	13,09	5,43	0,30	0,43
0,200	0,00	0,09	0,00	0,13	4,9	0,01	0,09	0,07	5,11	-4,71	0,09	0,16	16,06	12,10	0,14	0,20
-0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	-0,41	-0,41	#DIV/0!	#DIV/0!	1,98	14,82	0,21	0,03
0,220	0,00	0,03	0,01	0,04	5,7	0,18	0,79	0,60	6,10	-5,66	0,79	0,62	14,82	4,94	0,17	0,24
	0,00	0,00	0,00	0,00			#DIV/0!	#DIV/0!	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	6,18	11,12	0,00	0,00