

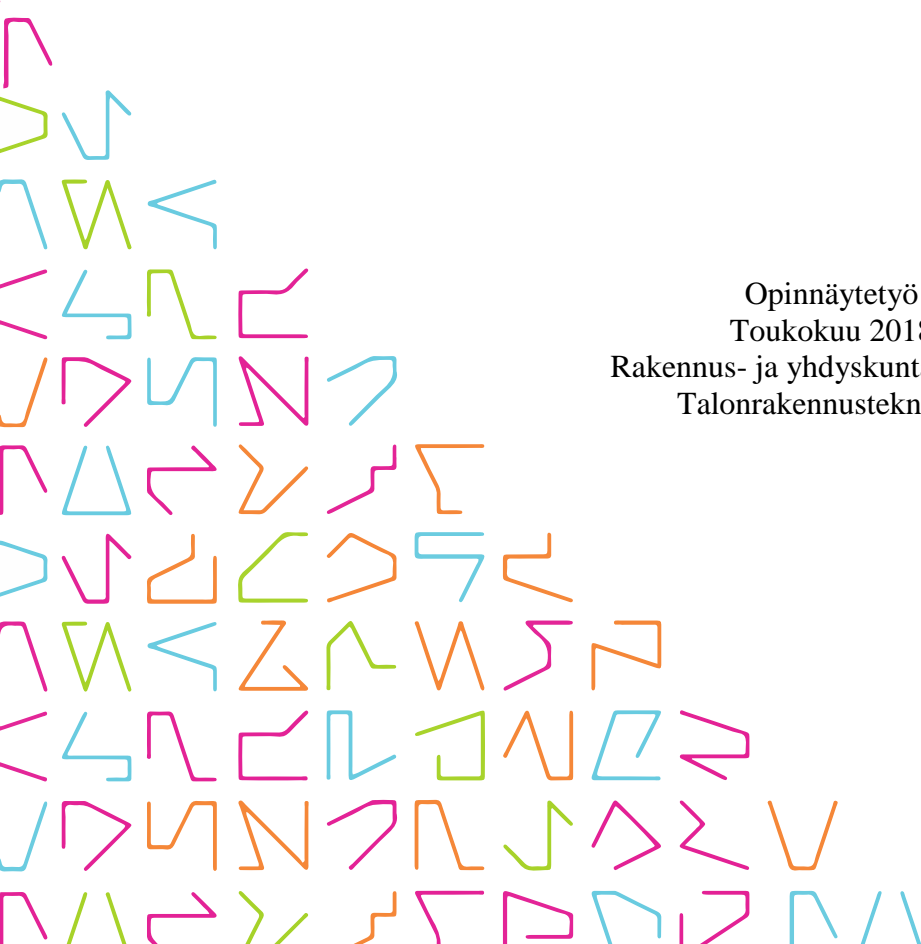


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

LIIMARISTIKOIDEN MITOITUS

Marko Rekola

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Talonrakennustekniikka

REKOLA, MARKO:
Liimaristikoiden mitoitus

Opinnäytetyö 70 sivua, joista liitteitä 39 sivua
Toukokuu 2018

Tämä työ tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston dosentti Tuomo Poutasen kehittyvän puurakentamisen osaprojektina. Työssä selvitettiin paarteiden, diagonaalien ja liitosten rasituksia tasakorkeille liimaristikoille seitsemän metrin jänneväliin asti. Työn tavoitteena on tutkia, kuinka paljon eri mitoitusatapojen tulokset eroavat toisistaan. Ristikoiden liitokset ovat liimattuja sormiliitoksia. Työssä ei mitoiteta itse liitoksia, mutta selvitetään niihin syntyviä rasituksia ja jännityksiä. Selvitykseen käytettiin pääasiassa FEM-Design 17 3D Structure -ohjelmistoa. Muita ohjelmia, joita mitoituksessa käytettiin, olivat Mathcad Prime 4.0, Mathcad 15 ja AutoCAD 2017.

Tässä työssä selvitettiin eri ohjelmilla saatavia rasitus- ja jännitystuloksia liimaristikoiden kriittisissä osissa. Lisäksi vertailtiin eri ohjelmien ja muiden laskijoiden saamia käyttöasteita. Käsineläskentää käytettiin jännitysten laskennassa eri kohdissa ristikköä.

Aluksi käydään läpi työn tavoitteet ja rajaukset, jonka jälkeen kerrotaan siitä, miten laskennassa hyödynnettyjä työkaluja käytettiin apuna. Samalla kerrotaan myös hieman laskennan kulusta. Lopuksi verrataan eri laskentatapojen tuloksia ja pohditaan, mistä erot voisivat johtua ja miten esimerkiksi jännityksiä ja eroja voidaan pienentää.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Building Construction

REKOLA, MARKO:
Designing of Glued Timber Trusses

Bachelor's thesis 70 pages, appendices 39 pages
May 2018

This thesis was assigned by adjunct professor Tuomo Poutanen from Tampere University of Technology. In this thesis glued timber trusses were designed up to a span of 7 meters. All of the joints are finger joints but the designing of the joints is not covered in this thesis. The main software used in designing was FEM-Design 17 3D Structure. Other software programs used in designing were Mathcad Prime 4.0, Mathcad 15 and AutoCAD 2017.

The goal of this thesis was to find out how the aforementioned programs can be used to design glued timber trusses. A comparison of results gained by different calculation methods is also presented in this thesis. At the end of the thesis are suggestions about how to lower tensions in trusses and differences between different calculation methods.

Key words: truss, design calculation, wooden structure, glued timber truss

SISÄLLYS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 6 |
| 2 | TAVOITE JA RAJAUKSET | 7 |
| 3 | MITOITUSTYÖKALUT | 9 |
| | 3.1 FEM-Design 17 3D Structure | 9 |
| | 3.2 Mathcad Prime 4.0 ja Mathcad 15 | 9 |
| | 3.3 AutoCAD 2017 | 9 |
| 4 | LASKENTA | 10 |
| | 4.1 Lähtötiedot | 10 |
| | 4.2 Mallinnus | 11 |
| | 4.3 Mathcad-laskelmat..... | 13 |
| | 4.4 Kolmannen osapuolen laskelmat | 13 |
| | 4.5 Jännitysten laskenta | 13 |
| | 4.6 Jännitysten laskenta lovetussa diagonaalissa | 16 |
| 5 | TULOSTEN VERTAILU | 18 |
| | 5.1 Yleistä vertailusta | 18 |
| | 5.2 Taivutus ja normaalivoima | 19 |
| | 5.3 Leikkausjännitys | 21 |
| | 5.4 Taipuma | 24 |
| | 5.5 Nivelliitos solmukohdissa..... | 25 |
| | 5.6 Lovetun diagonaalin momentti ja normaalivoima | 28 |
| | 5.7 Uloimman diagonaalin jännitykset neljällä diagonaalilla..... | 28 |
| 6 | POHDINTA..... | 29 |
| | LÄHTEET | 31 |

LYHENTEET JA TERMIT

| | |
|------------------|---|
| A | Poikkileikkauksen pinta-ala |
| b | Poikkileikkauksen leveys |
| b_{ef} | Poikkileikkauksen tehollinen leveys |
| $f_{c,0,d}$ | Puristuslujuuden mitoitusarvo |
| $f_{m,y,d}$ | Taivutuslujuuden mitoitusarvo y-akselin suhteen |
| $f_{m,z,d}$ | Taivutuslujuuden mitoitusarvo z-akselin suhteen |
| $f_{t,0,d}$ | Vetolujuuden mitoitusarvo |
| $f_{v,d}$ | Leikkauslujuuden mitoitusarvo |
| h | Poikkileikkauksen korkeus |
| $k_{c,y}$ | Nurjahduskerroin y-akselin suhteen |
| $k_{c,z}$ | Nurjahduskerroin z-akselin suhteen |
| k_{crit} | Kiepahduskerroin |
| k_m | 0,7 sahatavaran, liimapuun ja LVL:n suorakaidepoikkileikkauksella |
| L | Ristikon jänneväli |
| M_{Ed} | Momentin mitoitusarvo |
| N_{Ed} | Normaalivoiman mitoitusarvo |
| V_{Ed} | Leikkausvoiman mitoitusarvo |
| W | Poikkileikkauksen taivutusvastus |
| σ_{Ed} | Taivutus- ja normaalivoimajännityksen yhteenlaskettu mitoitusarvo |
| $\sigma_{c,0,d}$ | Syysuuntaisen puristusjännityksen mitoitusarvo |
| $\sigma_{m,y,d}$ | Taivutusjännityksen mitoitusarvo y-akselin suhteen |
| $\sigma_{m,z,d}$ | Taivutusjännityksen mitoitusarvo z-akselin suhteen |
| $\sigma_{t,0,d}$ | Vetojännityksen mitoitusarvo |
| τ_{Ed} | Leikkausjännityksen mitoitusarvo |

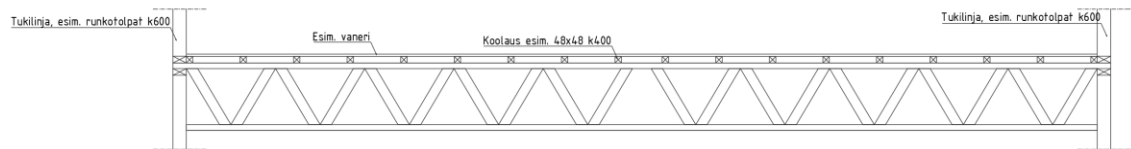
1 JOHDANTO

Dosentti Tuomo Poutanen on kehitellyt tutkimuksissaan välipohjan kantavaksi rakenteeksi tarkoitetun liimaristikkorakenteen. Liimaristikko on tasoristikko, jossa liitokset ovat liimattuja sormiliitoksia. Liimaristikoiden tarkoituksena on korvata välipohjapalkit (pääkannattimet tai vasaorret). Ristikoissa käytetään liitoksissa pelkästään liimaa, joka korvaa metalliset kiinnikkeet ja puuta, joka on uusiutuva luonnonmateriaali. Koska ristikoiden kantavuus on hyvä, voidaan ne sijoittaa harvempaan kuin tavalliset välipohjakannattimet, jotka ovat tyypillisesti kooltaan viilupuisina 51 mm x 200 mm tai 45 mm x 260 mm tai sahatavarana 48 mm x 198 mm. Jänneväli näissä on rajallisempi kuin liimaristikolla. Välipohjapalkkien jakoväli on useimmiten tiheämpi kuin 600 mm, esimerkiksi 400 mm.

Työn alussa esitellään ristikon käyttökohteita talokohteissa. Seuraavaksi työssä esitellään mitoitusvälineitä ja niiden käyttöä jännitysten ja taipumien ratkaisemisessa. Tämän jälkeen vertaillaan laskentatuloksia keskenään. Lopussa pohditaan vielä vertailujen tuloksia ja ristikoiden mahdollista käyttöä sekä jatkotutkimustarpeita. Kaikki työhön liittyvät liitteet ovat luottamuksellisia, joten ne on jätetty julkaistavasta opinnäytetyöstä pois.

2 TAVOITE JA RAJAUKSET

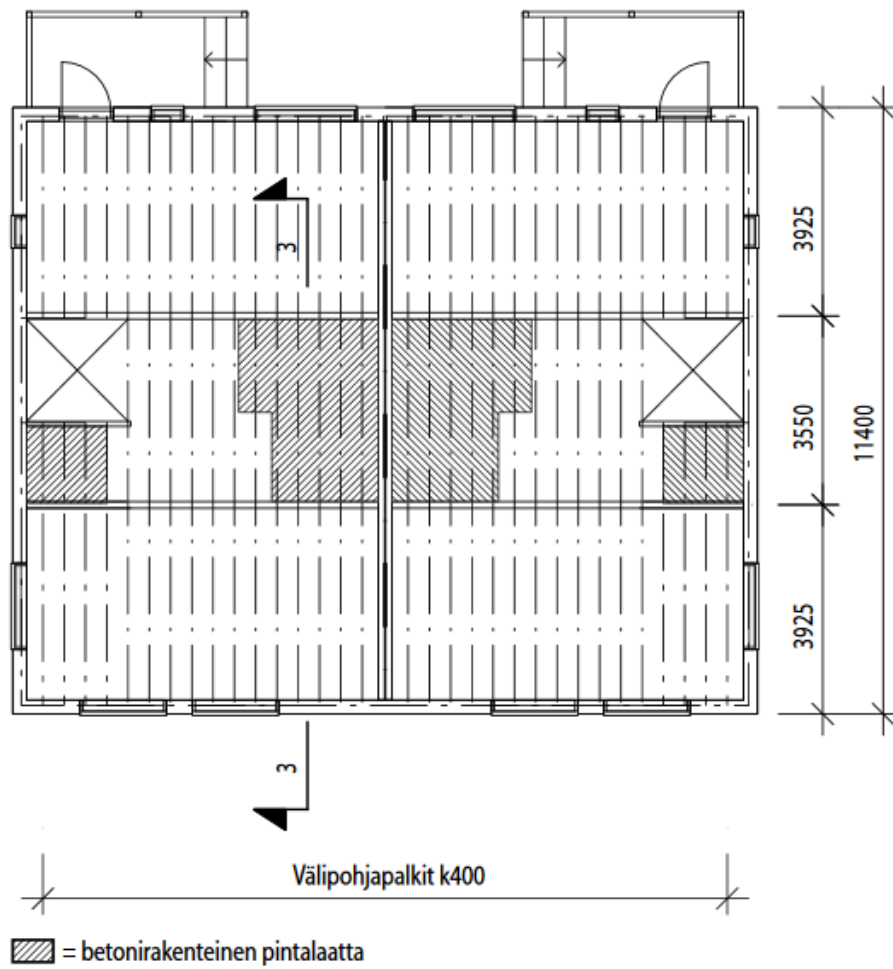
Välipohjan tuentaan tarkoitetuille liimaristikoille tulevia rasituksia ovat esimerkiksi rakenteiden omapaino, hyötykuorma, värähtely ja palokuorma. Myös ääneneristys tulee ottaa huomioon välipohjarakenteissa. Tässä työssä ei mitoiteta ristikoita värähtelylle, palolle eikä tukipaineelle. Myöskään liitoksia ei käsitellä laskennallisesti. Ristikot ovat tasakorkeita ja voivat olla korkeudeltaan 300 mm, 400 mm tai 500 mm. Suurin jänneväli tässä työssä mitoitettaville ristikoille on 7 metriä. Pidempiä ristikoita voitaisiin todennäköisesti valmistaa lujuuden puolesta kasvattamalla poikkileikkauksia tai vaihtamalla puun lujuutta kestävämmäksi, mutta työn toimeksiantajalle riitti ristikon mitoittaminen 7 metrin jänneväliin asti. Ristikot on tarkoitettu käytettäväksi toimisto- ja asuinrakennuksien välipohjissa. Kuvassa 1 on esitetty periaatemalli ristikon tuennasta ja välipohjan rakenteesta.



KUVA 1. Periaatekuva välipohjan rakenteesta

LVI-putket voidaan viedä 300 mm korkean ristikon diagonaalien välistä, mikäli niiden suurin halkaisija on 160 mm, mikä on tyypillinen ilmastointiputken halkaisijan koko.

Tyypillisesti välipohjapalkkien jänneväli on noin 4 metriä, mikä on huomattavasti lyhyempi kuin tässä työssä käsiteltävien ristikoiden jänneväli. Tästä syystä rakennuksissa tarvitaan vähemmän kantavia väliseiniä ja samalla säästetään materiaalikustannuksissa. Kuvassa 2 on esitetty esimerkkirakenne tyypillisestä välipohjarakenteesta asuinhuoneessa.



Leikkaus 3-3



KUVA 2. Tyypillinen välipohjarakenne asuinhuoneessa (Puuinfo 2010, 1)

Työssä ei käsitellä koeristikoiden koekuormitustuloksia.

3 MITOITUSTYÖKALUT

3.1 FEM-Design 17 3D Structure

FEM-Design 17 on mitoitus- ja mallinnusohjelma, joka käyttää mitoittamisessa elementtimenetelmää (Finite Element Analysis) ja eurokoodeja. Elementtimenetelmällä voidaan päästä hyvinkin tarkkoihin tuloksiin riippuen siitä, kuinka moneen eri laskentaosaan jokin kappale jaetaan. Ohjelman on kehittänyt ruotsalainen StruSoft ohjelmistokehitysyritys, jolla on yli 30 vuoden kokemus rakentamiseen liittyvien ohjelmistojen kehityksessä (StruSoft 2018).

3.2 Mathcad Prime 4.0 ja Mathcad 15

Mathcad Prime 4.0:n ja Mathcad 15:n on kehittänyt ohjelmistoyritys PTC. PTC on vuodesta 1985 kehittänyt ohjelmistoja avuksi yrityksille suunnitteluun, tuotantoon ja palveluun (PTC 2018). Toimintaperiaatteet molemmissa ohjelmistoissa on samat, ainoastaan ominaisuuksissa on eroja. Mathcadia voidaan käyttää erilaisten laskelmien tekemiseen, kuten rakenteiden mitoitukseen kirjoittamalla oikeat kaavat ja lähtöarvot järjestyksessä ohjelmaan, jonka jälkeen Mathcad laskee halutut väli- ja lopputulokset yksikköineen. Tässä työssä käsinlasketut jännitykset laskettiin Mathcad Prime 4.0:lla.

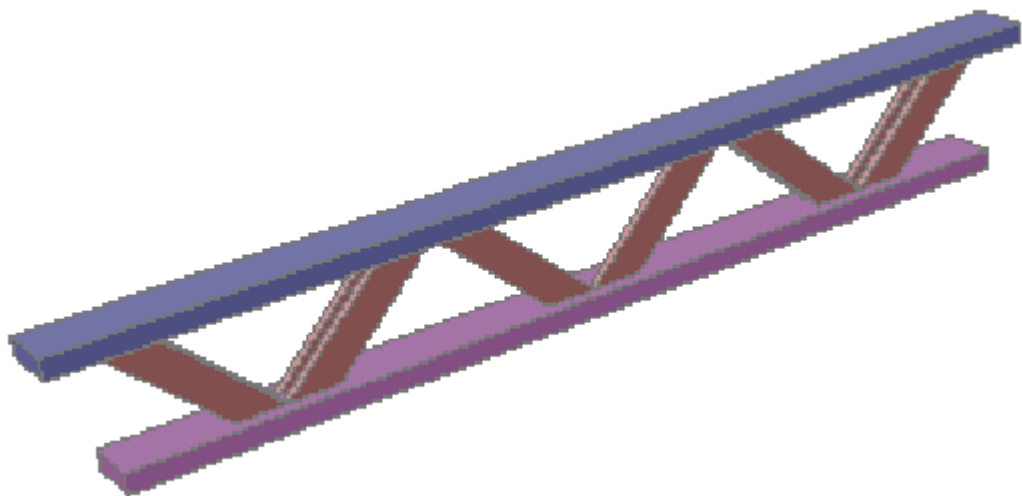
3.3 AutoCAD 2017

AutoCAD on Autodeskin kehittämä CAD-ohjelma (Computer-aided Design), jolla voidaan piirtää ja suunnitella esimerkiksi erilaisia pohjapiirustuksia tai rakennekuvia. AutoCADilla voidaan myös suunnitella kolmiulotteisesti.

4 LASKENTA

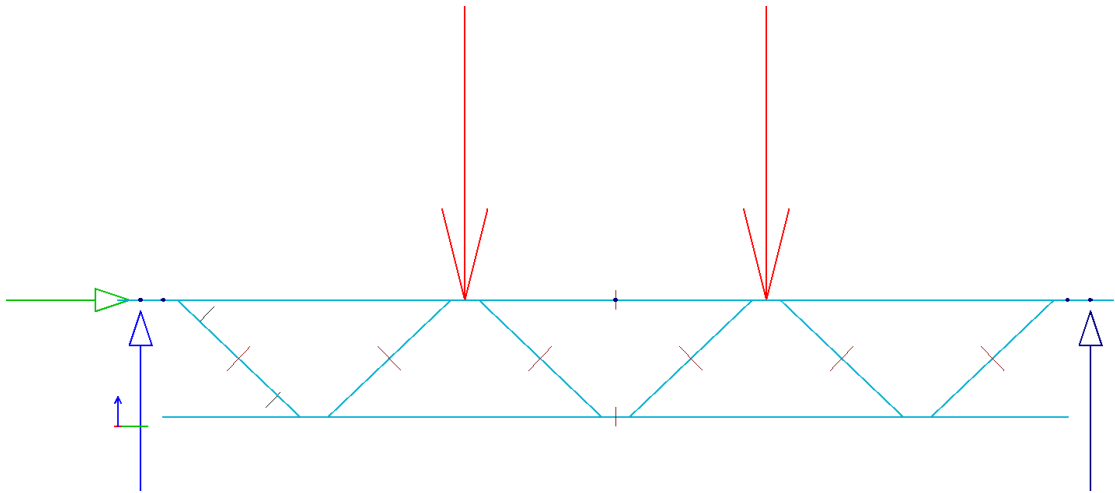
4.1 Lähtötiedot

Ristikot, jotka tässä työssä mitoitettiin, olivat suurimmaksi osaksi valmiiksi mallinnettu DWG-tiedostomuotoon. Valmiiden kuvien perusteella ristikoidelle saatiin mitat ja poikkileikkaukset. Diagonaalien poikkileikkaukset olivat kaikissa ristikoidissa samat, mutta niitä saattoi olla useampi vierekkäin erityisesti ristikon päässä. Ylä- ja alapaarten profiilikoot riippuivat ristikon jännevälillä. Koeristikoidissa paarteiden profiilikoot olivat 42 mm x 123 mm ja muissa ristikoidissa 42 mm x 173 mm. Yläpaarre oli pituudeltaan ristikon leveys ja alapaarre oli tästä 200 mm:ä lyhyempi. Diagonaalien profiilikoko jokaisessa ristikossa oli 73 mm x 20 mm. Kuvassa 3 on esitetty ristikon 2200x300 versio 1A:n 3D-mallikuva, josta nähdään kuinka ristikon eri osat sijoittuvat toisiinsa nähden. Kyseessä on yksi koekuormitusristikoista.



KUVA 3. Ristikon 3D-mallikuva

Työn toimeksiantajalta saatiin kuormat, jotka riippuivat ristikon koosta. Pääasiassa yläpaarteelle tuli välipohjan omasta painosta ja hyötykuormasta tasaista kuormaa, kun taas alapaarteelle tuli huomattavasti pienempi omapaino ripustuskuormasta. Koeristikoidissa kuormitukset muodostuivat kahdesta pistekuormasta yläpaarten kahdelle keskimmaiselle solmupisteelle. Kuvassa 4 on esitetty kuormien sijoittuminen koeristikossa.



KUVA 4. Pistekuormien sijainti koeristikossa

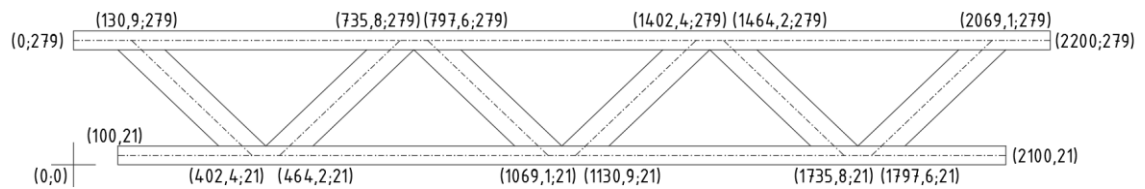
Koeristikoita lukuun ottamatta ristikoiden kuormitusleveys oli 600 mm. Puun lujuusluokka oli sahatavara C24 ja käyttöluokka 1.

Diagonaalit kiinnittyvät paarteisiin sormiliitoksella ja liitokset liimataan toisiinsa, jolloin ristikoissa ei tarvita esimerkiksi ruuveja tai muita liittimiä. Tästä liitostavasta johtuen diagonaalit oletetaan kiinnittyvän jäykästi paarteisiin, jolloin niille tulee normaalivoiman lisäksi momenttia ja leikkausvoimaa.

Ristikoiden mitoituksessa tuet oletetaan joko 50 mm tai 90 mm yläpaarteen päistä kesemmälle ristikkoo. Mikäli ulointa diagonaalia on lovettu, oletetaan tuet tällöin 110 mm päähän yläpaarteen päistä.

4.2 Mallinnus

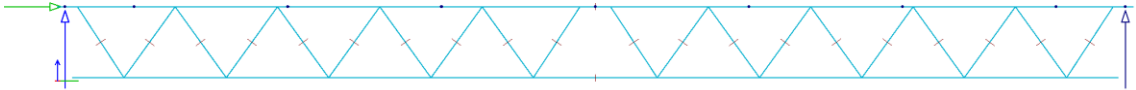
Ennen ristikon mitoittamista FEM-Designilla, piti ristikko sijoittaa sopivaan koordinaatistoon. Tässä tapauksessa käytettiin AutoCADia koordinaatiston luomiseksi. Valmiiksi DWG-muodossa oleva ristikko avattiin AutoCADilla ja sijoitettiin kuvitteelliseen koordinaatistoon, jonka jälkeen kaikille paarteille ja diagonaaleille piirrettiin keskiviivat. Näiden keskiviivojen solmupisteiden ja paarteiden päätepisteiden koordinaatit merkittiin AutoCAD-kuvaan. Kuvassa 5 on esitetty malliksi, miltä koordinaatisto näytti ristikolla 2200x300.



KUVA 5. Ristikon koordinaatit

Kuvassa 5 esitetyt koordinaatit ovat millimetreinä. Näiden koordinaattien avulla voitiin mallintaa ristikko FEM-Designiin ja laskea ristikon rasitukset. Origo oletettiin aina alapaarten alareunan ja yläpaarten vasemman reunan kuvitteelliseen risteyskohtaan. Koordinaatteja syötettäessä FEM-Designiin täytyi jälkimmäinen koordinaatti sijoittaa z-koordinaatin paikalle, jotta ristikko mallintui oikein päin. Tämä tarkoittaa sitä, että y-koordinaatin paikalle sijoitettiin nolla.

FEM-Designissa mallinnus aloitettiin valitsemalla ensimmäisenä Suomen eurokoodinormisto ohjelman käynnistyksen yhteydessä. Tämän jälkeen valittiin structure-välilehdeltä rakennetyypiksi palkki (Beam) ylävalikosta ja muutettiin rakenteen asetuksista poikkileikkaus, materiaali, materiaalin lujuusluokka ja rakenteen sijainti piirtoviivaan nähden halutunlaisiksi. Diagonaaleille määritettiin myös päiden tuentatapa paarteisiin. Sen jälkeen ristikko mallinnettiin koordinaattien avulla. Seuraavaksi valittiin tuet structure-välilehden support-kohdasta. Tuot sijoitettiin halutulle etäisyydelle yläpaarten päistä. Vasempaan päähän sijoitettiin kaksiarvoinen tuki ja oikeaan päähän yksiarvoinen tuki. Ristikko myös tuettiin sivuttaissuunnassa metrin välein, jotta välttyttiin sivuttaissuuntaiselta liikkeeltä. Mallintamisen jälkeen luotiin kuormitustapaukset ja -yhdistelmät, jotka löytyvät loads-välilehdeltä. Kuormat sijoitettiin oikean suuruusina viivakuormina ylä- ja alapaarteille huomioiden ristikkojako. Lopuksi siirryttiin timber design -välilehdelle ja painettiin calculate-nappia, jonka jälkeen määritettiin avautuneessa ikkunassa, mitä haluttiin laskea. Tässä tapauksessa valittiin kohdat load cases, load combinations ja design calculations. Kun ohjelma oli laskelmat suorittanut, voitiin tarkastella, millaisia momenteja, leikkaus- ja normaalivoimia, sekä jännityksiä rakenteissa esiintyi. Taipumamitoitus tehtiin muuten samalla tavalla kuin edellä, mutta kahden vierekkäisen diagonaalin päät sijoitettiin samoihin pisteisiin ylä- ja alapaarteilla työn toimeksiantajan toiveesta. Kuvassa 6 on esitetty, miten diagonaalien keskiviivat sijoittuvat FEM-Design -mallissa toisiinsa nähden taipumamitoituksessa.



KUVA 6. Diagonaalien sijainti laskentamallissa taipumamitoituksessa

4.3 Mathcad-laskelmat

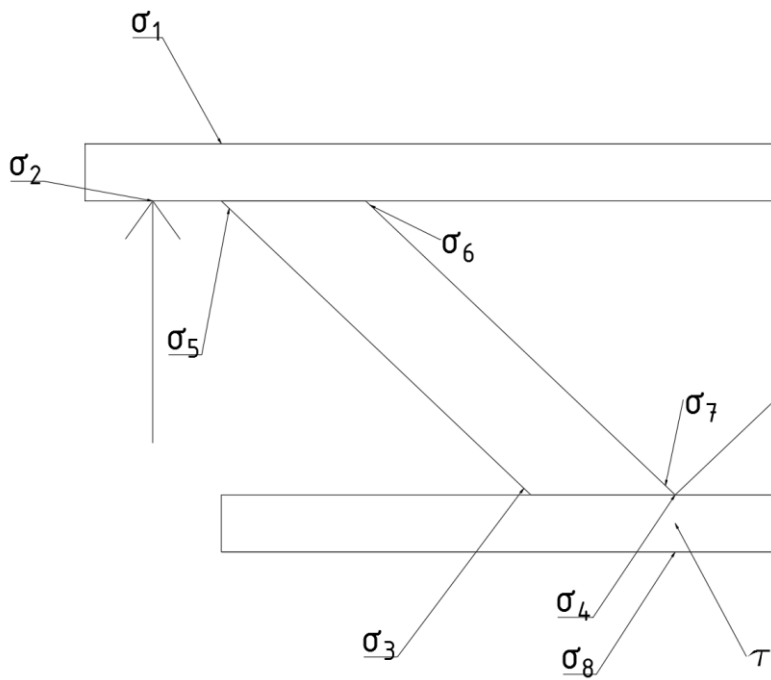
Mathcad-laskelmat tehtiin työn toimeksiantajan valmiiksi luomalla laskentapohjalla. Mitoitus aloitettiin syöttämällä lähtötietoihin ristikon jänneväli, korkeus ja kuormat. Laskentapohja antoi lopputulokset kuvaajalla käyttöasteina, jossa käyttöasteet olivat pystyakselilla ja ristikon jänneväli vaakakselilla. Laskentapohja laski ristikon yhdistetyn taivutuksen ja normaalivoiman, leikkausvoiman ja taipuman käyttöasteet. Mathcad-laskentapohjasta saatiin yhdistetyn taivutuksen ja normaalivoiman käyttöasteet ainoastaan ylä- ja alapaarteiden keskikohdille. Diagonaaleille Mathcad ei laskenut kyseisiä käyttöasteita. Mathcad ei myöskään laskenut leikkausta muille osille kuin yläpaarteelle.

4.4 Kolmannen osapuolen laskelmat

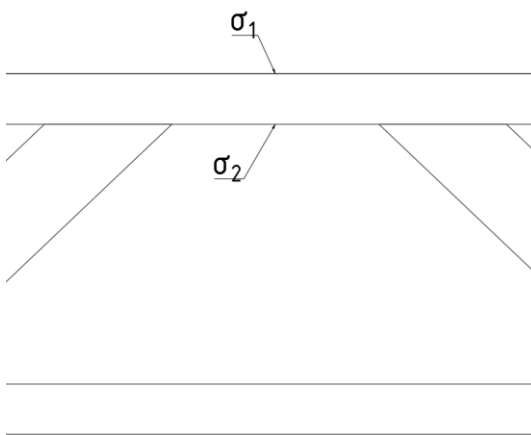
Osasta ristikoita oli eräs rakennesuunnittelutoimisto tehnyt myös mitoitusta. Tämän osapuolen laskelmista kävi ilmi ristikon eri osien leikkaus- ja normaalivoimien suuruudet ja käyttöasteet. Myös yhdistetyn taivutuksen ja normaalivoiman suuruudet ja käyttöasteet tulivat ilmi. Taipuman suuruus millimetreinä oli myös merkitty laskelmiin. Näissä laskelmissa tuet oli oletettu 50 mm päähän yläpaarten päistä ja sivuttaistuenta oli 1,20 m välein.

4.5 Jännitysten laskenta

Toimeksiantajan pyynnöstä ristikon uloimmalle diagonaalille, sekä ylä- ja alapaarteille laskettiin taivutuksesta ja normaalivoimasta syntyvät jännitykset kuvien 7 ja 8 mukaisissa kohdissa. Kuvassa 7 on myös esitetty leikkausjännityksen laskentakohta alapaarteessa.



KUVA 7. Jännitysten laskentapisteet ristikon päässä



KUVA 8. Jännitysten laskentapisteet keskellä ristikköä

Osassa ristikoita on keskellä ristikköä pieni väli, kuten kuvassa 8 näkyy. Tämä yleensä syntyy, kun diagonaalit halutaan asettaa tasaisesti ristikon päistä alkaen samalla kaltevuudella.

Koeristikoissa jännitykset laskettiin ainoastaan uloimman diagonaalin nurkissa. Mitoitus tehtiin siten, että FEM-Designista katsottiin mitoitettavassa kohdassa ristikon osan momentin ja normaalivoiman suuruus. Tämän jälkeen arvot sijoitettiin kaavaan 1.

$$\sigma_{Ed} = \pm \frac{M_{Ed}}{W} \pm \frac{N_{Ed}}{A} \quad (1)$$

Kaavassa 2 on esitetty taivutusvastuksen laskenta suorakaidepoikkileikkaukselle.

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (2)$$

Momentti ja normaalivoima voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia arvoja. Momentin merkki riippuu siitä, kummassa pinnassa jännitystä lasketaan. Mikäli jännitystä lasketaan vedetyllä puolella, on merkki positiivinen. Päinvastaisesti, jos jännitystä lasketaan puristetulla puolella, on merkki negatiivinen. Sama logiikka pätee normaalivoimaan. Jos normaalivoima on puristusta, merkki on negatiivinen. Normaalivoiman ollessa vetoa on merkki positiivinen.

Käyttöasteet momentin ja normaalivoiman yhteisvaikutukselle laskettiin käyttäen kaavoja 3-7. Kaavoja 3 ja 4 käytettiin tapauksessa, jossa normaalivoima oli vetoa ja kaavoja 5-7 käytettiin tapauksessa, jossa normaalivoima oli puristusta.

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (3)$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (6)$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (7)$$

Näiden kaavojen perusteella selvitettiin suurin käyttöaste mitoitettavalle poikkileikkaukselle ristikossa.

Mitoitusleikkausvoima laskettiin suorakaidepoikkileikkauksen leikkausvoiman laskentaan tarkoitetulla kaavalla (kaava 8).

$$\tau_{Ed} = \frac{1,5 \cdot V_{Ed}}{b_{ef} \cdot h} \quad (8)$$

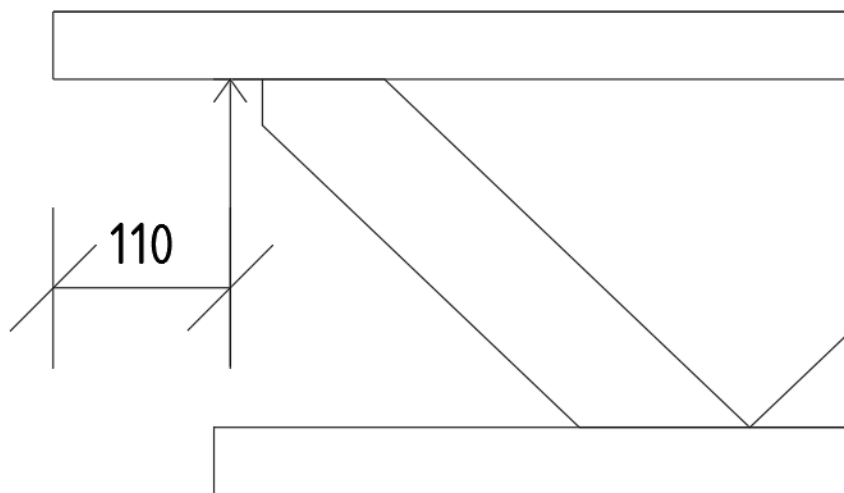
Kerroin b_{ef} saadaan kertomalla poikkileikkauksen leveys b kertoimella 0,67. Tätä ehtoa tulee noudattaa, mikäli puurakenne kuuluu käyttöluokkaan 1. (Kevarinmäki 2011, 25.)

Käyttöasteet leikkausvoimalle saatiin jakamalla leikkausvoima leikkauskestävyydellä (kaava 9).

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_{v,d}} \leq 1 \quad (9)$$

4.6 Jännitysten laskenta lovetussa diagonaalissa

Kuvassa 9 on esitetty, miltä lovi näyttää diagonaalissa. Loven tarkoituksena oli pienentää diagonaalissa esiintyviä jännityksiä erityisesti vasemmassa ylänurkassa.



KUVA 9. Lovettu diagonaali

Lovetun diagonaalin jännityksiä laskettaessa FEM-Design -malli tehtiin muuten samaan tapaan kuin muissakin tapauksissa, mutta tuet siirrettiin 110 mm päähän yläpaarteen

päistä. FEM-Designissa diagonaaleja ei pysty erikseen loveamaan, joten malli oli täysin samanlainen kuin muissakin tapauksissa ja täten laskentamallia jouduttiin hieman yksinkertaistamaan. Mitoituksessa muuttui ainoastaan poikkileikkauksen koko ja siten myös taivutusvastus. Todellisuudessa lovetun pään poikkileikkauksen keskilinja siirtyisi hieman muun poikkileikkauksen keskilinjasta sivuun, mutta laskentamallissa se oletettiin jatkuvan samaa linjaa pitkin, joten diagonaalille tuleva momentti ja normaalivoima poikkeavat todenmukaisesta tilanteesta hieman. Tämä vaikuttaa jonkin verran jännitysten suuruuksiin.

5 TULOSTEN VERTAILU

5.1 Yleistä vertailusta

Vertailut tehtiin pääasiassa käyttöasteina siten, että verrattiin kunkin ohjelman ja suunnittelutoimiston laskelmia keskenään. Ainoastaan taipumavertailu tehtiin millimetreinä. Mathcad ei mitoittanut kaikille osille jokaista rasiusta. Esimerkiksi alapaarten leikkausta ohjelma ei mitoittanut. FEM-Designissa mitoitus tehtiin tapauksissa, jossa tuet olivat 50 mm ja 90 mm yläpaarten päistä. Muissa laskelmissa tuet oletettiin 50 mm yläpaarten päistä keskemmälle. Vertailut tehtiin myös tapauksessa, jossa tuet FEM-Designissa olivat 90 mm yläpaarten päistä. Vertailtavat ristikot olivat mitoiltaan 5700 mm x 300 mm (kuva 10), 6600 mm x 400 mm (kuva 11) ja 7000 mm x 500 mm (kuva 12).



KUVA 10. Ristikon 5700 mm x 300 mm FEM-Design -malli



KUVA 11. Ristikon 6600 mm x 400 mm FEM-Design -malli



KUVA 12. Ristikon 7000 mm x 500 mm FEM-Design -malli

Taulukoissa 1-15 olevat arvot ovat vertailuarvoja FEM-Designin antamiin arvoihin. Mikäli luku on negatiivinen (-), tarkoittaa se sitä, että FEM-Designin laskema arvo on suurempi verrattavaan laskelmaan. Päinvastoin, jos luku on positiivinen (+), on FEM-Designin laskema arvo pienempi verrattavaan laskelmaan.

5.2 Taivutus ja normaalivoima

Yläpaarten käyttöasteet FEM-Designilla mitoitettuna olivat 4-28 prosenttiyksikköä suuremmat kuin muilla mitoitustavoilla, kun FEM-Designissa tuet olivat 50 mm yläpaarten päistä. Mitä korkeampi ristikko oli, sitä enemmän käyttöasteissa oli eroja. Suunnittelutoimiston ja Mathcadin välillä erot vaihtelivat 0-3 prosenttiyksikön välillä. Kun tuet olivat 90 mm yläpaarten päistä, oli FEM-Designin antamat käyttöasteet 14-41 prosenttiyksikköä pienemmät kuin muilla mitoitustavoilla. Taulukossa 1 on esitetty suunnittelutoimiston ja Mathcadin yläpaarten käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 1. Yläpaarten taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | -4 | -4 |
| 6600 x 400 | -13 | -16 |
| 7000 x 500 | -26 | -28 |

Taulukossa 2 on esitetty suunnittelutoimiston ja Mathcadin yläpaarten käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 2. Yläpaarten taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | +41 | +41 |
| 6600 x 400 | +29 | +26 |
| 7000 x 500 | +16 | +14 |

Alapaarten käyttöasteet FEM-Designilla mitoitettuna olivat 7-18 prosenttiyksikköä suuremmat kuin muilla mitoitustavoilla, kun tuet olivat FEM-Designissa 50 mm yläpaarten päistä. Suunnittelutoimiston laskelmiin verrattuna ristikoilla 5700 mm x 300 mm ja 6600 mm x 400 mm käyttöaste-ero oli sama, mutta ristikolla 7000 mm x 500 mm ero pieneni muutaman prosenttiyksikön. Mathcad laskelmiin verrattuna ristikoiden

5700 mm x 300 mm ja 7000 mm x 500 mm käyttöaste-erot olivat hyvin saman suuruiset, mutta ristikolla 6600 mm x 300 mm käyttöaste-ero oli selvästi suurempi. Kun tuet olivat 90 mm yläpaarten päistä, FEM-Designin antamat käyttöaste-erot vaihtelivat -9-+28 prosenttiyksikön välillä verrattuna muihin laskentatapoihin. Ainoastaan ristikolla 6600 mm x 400 mm käyttöasteet olivat suuremmat suunnittelutoimiston ja Mathcadin laskelmissa kuin FEM-Designissa.

Taulukossa 3 on esitetty suunnittelutoimiston ja Mathcadin alapaarten käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 3. Alapaarten taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | -10 | -11 |
| 6600 x 400 | -10 | -18 |
| 7000 x 500 | -7 | -10 |

Taulukossa 4 on esitetty suunnittelutoimiston ja Mathcadin alapaarten käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 4. Alapaarten taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | -7 | -8 |
| 6600 x 400 | +28 | +20 |
| 7000 x 500 | -6 | -9 |

Uloimmalla diagonaalilla vertailu voitiin tehdä vain suunnittelutoimiston laskelmiin. Diagonaalin käyttöasteet FEM-Designilla mitoitettuna olivat 19-20 prosenttiyksikköä suuremmat kuin suunnittelutoimiston laskelmissa tapauksessa, jossa tuet olivat 50 mm yläpaarten päistä. Tukien ollessa 90 mm yläpaarten päistä FEM-Designin antamat käyttöasteet olivat 8-29 prosenttiyksikköä pienemmät kuin suunnittelutoimiston laskelmissa. Ristikolla 6600 mm x 400 mm käyttöaste-ero oli selvästi suurempi kuin

kahdella muulla ristikolla. Taulukossa 5 on esitetty suunnittelutoimiston uloimman diagonaalin käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä. Mathcad ei mitoitannut diagonaalia.

TAULUKKO 5. Uloimman diagonaalin taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | -19 |
| 6600 x 400 | -19 |
| 7000 x 500 | -20 |

Taulukossa 6 on esitetty suunnittelutoimiston uloimman diagonaalin käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 6. Uloimman diagonaalin taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | +8 |
| 6600 x 400 | +29 |
| 7000 x 500 | +10 |

5.3 Leikkausjännitys

Leikkausjännityksen käyttöasteet yläpaarteissa olivat FEM-Designissa 4-47 prosenttiyksikköä suuremmat kuin muilla mitoitustavoilla tukien ollessa 50 mm yläpaarten päistä. FEM-Designin ja suunnittelutoimiston laskelmissa erot olivat vain muutaman prosenttiyksikön, mutta Mathcadin antamat käyttöasteet erosivat useita kymmeniä prosenttiyksiköitä muista laskentamenetelmistä. Kun tuet olivat 90 mm yläpaarten päistä, FEM-Designin antamat käyttöasteet erosivat -46-+31 prosenttiyksikköä muista laskentamenetelmistä. Ristikolla 6600 mm x 400 mm käyttöaste-erot poikkesivat kahdesta muusta ristikosta. Suunnittelutoimiston laskelmiin verrattuna FEM-Designin käyttöaste oli 31 prosenttiyksikköä pienempi. Mathcadilla

laskettu käyttöaste sen sijaan oli yhdeksän prosenttiyksikköä suurempi. Taulukossa 7 on esitetty suunnittelutoimiston ja Mathcadin yläpaarten käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 7. Yläpaarten leikkausjännityksen käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | -6 | -38 |
| 6600 x 400 | -5 | -45 |
| 7000 x 500 | -4 | -47 |

Taulukossa 8 on esitetty suunnittelutoimiston ja Mathcadin yläpaarten käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 8. Yläpaarten leikkausjännityksen käyttöaste-erot, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | -5 | -37 |
| 6600 x 400 | +31 | -9 |
| 7000 x 500 | -3 | -46 |

Alapaarteella vertailu tehtiin ainoastaan FEM-Designin ja suunnittelutoimiston laskelmien välillä. Ristikoilla 6600 mm x 400 mm ja 7000 mm x 500 mm käyttöasteet suunnittelutoimiston laskelmissa olivat yli 100 prosenttiyksikköä pienemmät kuin FEM-Designin laskelmissa käyttöasteissa tukien ollessa 50 mm yläpaarten päistä. Ristikolla 5700 mm x 300 mm ero oli kahdeksan prosenttiyksikköä. Tukien ollessa 90 mm yläpaarten päistä käyttöaste-erot vaihtelivat 5-112 prosenttiyksikön välillä. Mitä korkeampi ristikko oli, sitä enemmän käyttöasteissa oli eroa. Taulukossa 9 on esitetty suunnittelutoimiston alapaarten käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä. Mathcad ei mitoitannut tässä tapauksessa alapaarretta.

TAULUKKO 9. Alapaarteen leikkausjännityksen käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarteen päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | -8 |
| 6600 x 400 | -105 |
| 7000 x 500 | -116 |

Taulukossa 10 on esitetty suunnittelutoimiston alapaarteen käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 90 mm yläpaarteen päistä.

TAULUKKO 10. Alapaarteen leikkausjännityksen käyttöaste-erot, kun tuet ovat 90 mm yläpaarteen päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | -5 |
| 6600 x 400 | -66 |
| 7000 x 500 | -112 |

Diagonaalin käyttöaste-erot FEM-Designin ja suunnittelutoimiston laskelmien välillä olivat -8-+6 prosenttiyksikköä tukien ollessa 50 mm yläpaarteen päistä. Kun tuet olivat 90 mm yläpaarteen päistä käyttöaste-erot olivat +6-+14 prosenttiyksikköä.

Taulukossa 11 on esitetty suunnittelutoimiston uloimman diagonaalin käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 50 mm yläpaarteen päistä. Mathcad ei mitoitannut diagonaalia.

TAULUKKO 11. Uloimman diagonaalin leikkausjännityksen käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarteen päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | -8 |
| 6600 x 400 | -7 |
| 7000 x 500 | -7 |

Taulukossa 12 on esitetty suunnittelutoimiston uloimman diagonaalin käyttöaste-erot FEM-Designin arvoihin verrattuna, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 12. Uloimman diagonaalin leikkausjännityksen käyttöaste-erot, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | +6 |
| 6600 x 400 | +14 |
| 7000 x 500 | +6 |

5.4 Taipuma

Taipumarajat eri rakenteille on määritetty puurakenteiden lyhennytyssä suunnitteluohjeessa ja ne on esitelty taulukossa 13.

TAULUKKO 13. Taipumarajat erityyppisille rakenteille (Kevarinmäki 2011, 21).

| Rakenne | $w_{inst}^{1)}$ | $w_{net,fin}^{2)}$ | $w_{fin}^{3)}$ |
|--|-----------------|--------------------|----------------|
| Pääkannattimet | $l/400$ | $l/300$ | $l/200$ |
| Orret ja muut toisiokannattimet | - | $l/200$ | $l/150$ |
| Rakennuksen vaakasiirtymä | - | $H/300$ | - |
| l on jänneväli H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus ¹⁾ Koskee pelkästään lattioita ²⁾ Koskee suoria ja esikorotettuja rakenteita, mutta ei tukipisteiden välillä kaarevia tai taitteellisia kannattimia ³⁾ Koskee esikorotettuja sekä tukipisteiden välillä kaarevia tai taitteellisia rakenteita | | | |

Koska kyseessä on pääkannatin, käytetään taipumarajana kaavassa 10 esitettyä rajaa.

$$\frac{L}{300} \quad (10)$$

Kun tuet olivat 50 mm yläpaarten päistä, taipumaerot olivat FEM-Design laskelmiin verrattuna 2,0-3,6 mm:ä pienemmät muilla laskentamenetelmillä. Tukien ollessa 90 mm yläpaarten päistä erot pienenevät 0,8-2,2 mm:iin muihin laskentatapoihin verrattuna. Taulukossa 14 on esitetty taipumien erot suunnittelutoimiston ja Mathcadin laskelmiin, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 14. Taipumien erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (mm) | Ero Mathcadin laskelmiin (mm) |
|---------------|--|-------------------------------|
| 5700 x 300 | -3,6 | -2,2 |
| 6600 x 400 | -2,5 | -3,0 |
| 7000 x 500 | -2,0 | -2,8 |

Taulukossa 15 on esitetty taipumien erot suunnittelutoimiston ja Mathcadin laskelmiin, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä.

TAULUKKO 15. Taipumien erot, kun tuet ovat 90 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (mm) | Ero Mathcadin laskelmiin (mm) |
|---------------|--|-------------------------------|
| 5700 x 300 | -2,2 | -0,8 |
| 6600 x 400 | -1,2 | -1,7 |
| 7000 x 500 | -1,0 | -1,8 |

5.5 Nivelliitos solmukohdissa

Vertailun vuoksi osa jännityksistä laskettiin FEM-Designissa myös siten, että paarteiden ja diagonaalien solmukohdat muutettiin nivelellisiksi. Tämän tarkoituksena oli selvittää, muuttuiko käyttöaste-erot muihin laskelmiin verrattuna. Taulukoissa 16-19 on esitetty erot käyttöasteissa muihin laskelmiin verrattuna prosenttiyksikköinä.

Taulukossa 16 on esitetty yläpaarten yhdistetyn taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot muihin laskelmiin verrattuna.

TAULUKKO 16. Yläpaarteen taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarteen päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | -5 | -5 |
| 6600 x 400 | -14 | -17 |
| 7000 x 500 | -26 | -28 |

Taulukossa 17 on uloimman diagonaalin yhdistetyn taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot verrattuna suunnittelutoimiston arvoihin.

TAULUKKO 17. Uloimman diagonaalin taivutuksen ja normaalivoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarteen päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | +41 |
| 6600 x 400 | -2 |
| 7000 x 500 | +46 |

Taulukossa 18 on yläpaarteen leikkausvoiman käyttöaste-erot muihin laskelmiin verrattuna.

TAULUKKO 18. Yläpaarteen leikkausvoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarteen päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) | Ero Mathcadin laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|--------------------------------------|
| 5700 x 300 | -6 | -38 |
| 6600 x 400 | -5 | -45 |
| 7000 x 500 | -4 | -47 |

Taulukossa 19 on diagonaalin leikkausvoiman käyttöaste-erot verrattuna suunnittelutoimiston arvoihin.

TAULUKKO 19. Uloimman diagonaalin leikkausvoiman käyttöaste-erot, kun tuet ovat 50 mm yläpaarten päistä FEM-Designissa.

| Ristikko (mm) | Ero suunnittelutoimiston laskelmiin (%-yksikkö) |
|---------------|---|
| 5700 x 300 | +36 |
| 6600 x 400 | +35 |
| 7000 x 500 | +31 |

Taulukkoon 20 on koottu vielä FEM-Designissa määritettyjen jännitysten erot jäykän ja nivelellisen liitoksen välillä prosenttiyksikköinä. Mikäli luku taulukossa on positiivinen, on nivelellisen liitoksen käyttöaste suurempi kuin jäykän liitoksen. Päinvastoin, jos luku on negatiivinen, on nivelellisen liitoksen käyttöaste pienempi.

| Ristikko | Erotus (%-yksikkö) |
|---|--------------------|
| Yläpaarten normaali- + taivutusvoima (tuet 50 mm yläpaarten päistä) | |
| 5700 x 300 | +1 |
| 6600 x 400 | +1 |
| 7000 x 500 | +0 |
| Uloimman diagonaalin normaali- + taivutusvoima (tuet 50 mm yläpaarten päistä) | |
| 5700 x 300 | -60 |
| 6600 x 400 | -17 |
| 7000 x 500 | -66 |
| Yläpaarten leikkausvoima (tuet 50 mm yläpaarten päistä) | |
| 5700 x 300 | +0 |
| 6600 x 400 | +0 |
| 7000 x 500 | +0 |
| Uloimman diagonaalin leikkausvoima (tuet 50 mm yläpaarten päistä) | |
| 5700 x 300 | -44 |
| 6600 x 400 | -42 |
| 7000 x 500 | -38 |

5.6 Lovetun diagonaalin momentti ja normaalivoima

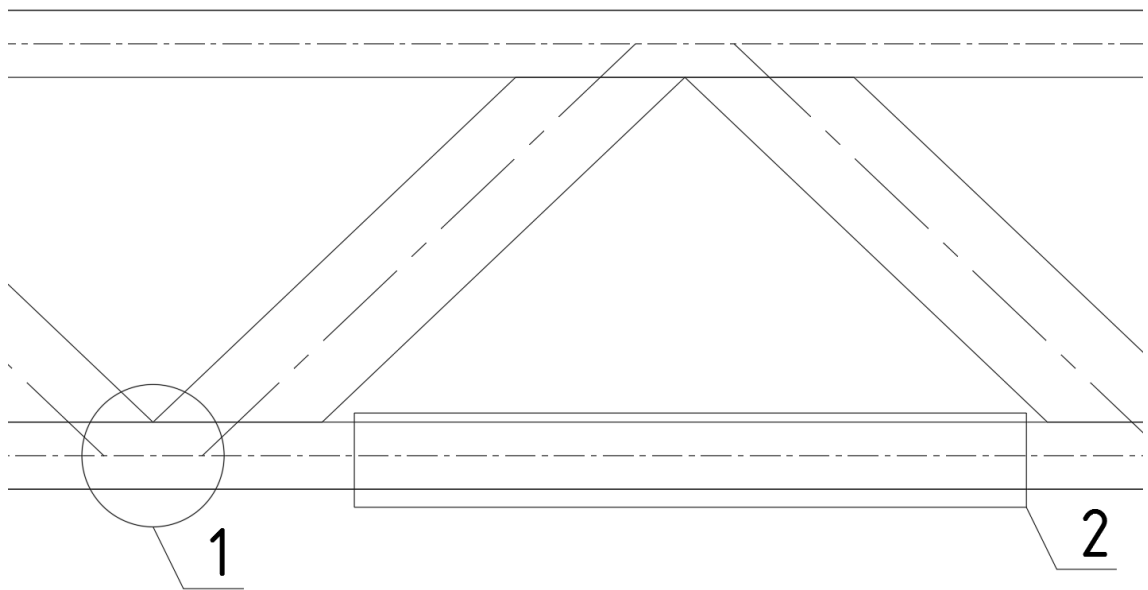
Diagonaalin lovetussa nurkassa jännitykset olivat yleensä suurempia kuin tapauksessa, jossa tuet olivat 90 mm yläpaarten päistä ja diagonaalia ei ollut lovettu. Tapauksessa, jossa tuet olivat 50 mm yläpaarten päistä ja diagonaalia ei ollut lovettu jännitykset olivat suurempia kuin lovetussa diagonaalissa.

5.7 Uloimman diagonaalin jännitykset neljällä diagonaalilla

Lopuksi ristikoiden uloimmasta diagonaalista tehtiin vielä vertailun vuoksi jännitysten laskenta tapauksessa, jossa diagonaaleja on neljä kappaletta (kolmen sijasta) uloimman diagonaalin kohdalla rinnakkain. Diagonaalien jännitykset pienenevät ristikon koosta, laskentapisteestä ja tukien sijainnista riippuen noin $0,1 \text{ MPa} - 2,7 \text{ MPa}$. Suurin jännitysten pieneneminen tapahtui kuvasta 7 katsottuna kohdassa σ_5 eli diagonaalin vasemmassa ylänurkassa, jossa jännitykset olivat suurimmat jokaisessa tapauksessa.

6 POHDINTA

Erot eri ohjelmien välillä saattoivat olla useita kymmeniä prosenttiyksiköitä. Pienet erot (noin kymmenen prosenttiyksikköä) ovat yleensä normaaleja eri mitoitusmenetelmiä vertailtaessa. Pienet erot selittyvät osittain sillä, että FEM-Design ottaa mitoituksessa huomioon rakenteen oman painon, kun taas muut menetelmät eivät huomioi sitä. Suurimmat erot olivat leikkausjännityksissä alapaarteella. Nämä erot saattoivat olla yli sata prosenttiyksikköä. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että FEM-Design mitoitti leikkausjännityksen kohdassa, jossa kaksi diagonaalia kohtaa lähes samassa pisteessä alapaarteella. Näiden diagonaalien keskiviivojen väliin jää kapea alue, jossa leikkausvoima on huomattavasti suurempi kuin muualla alapaarteessa. Tämä alue on merkitty kuvassa 13 numerolla yksi. Suunnittelutoimiston laskelmissa leikkausjännityksen käyttöaste oli todennäköisesti mitoitettu kuvassa 13 numerolla kaksi merkityllä kohtaa.



KUVA 13. Leikkausjännitysten laskentakohdat

Mikäli FEM-Designin antaman leikkausvoiman perusteella mitoitettaisiin kohta kaksi kuvasta 13, olisi käyttöaste lähestulkoon sama kuin suunnittelutoimiston laskelmissa. Liitosten muuttaminen nivelellisiksi kasvatti käyttöaste-eroa jopa usealla kymmenellä prosenttiyksiköllä alapaarteella, joten ero ei voinut johtua väärästä liitostyyppistä. Taulukoissa 16-19 esitetyt käyttöaste-erot olivat lähestulkoon samat tai suuremmat kuin jäykkien liitosten tapauksissa.

Ristikossa 6600 mm x 400 mm oli useammissa kohdissa muista ristikoista huomattavasti poikkeavia käyttöaste-eroja. Tämä todennäköisesti johtuu ristikon keskellä epäsymmetrisesti asetetuista diagonaaleista. Elementtimenetelmä huomioi tämän epäsymmetrisyyden tarkemmin kuin muut laskentamenetelmät, joten erot todennäköisesti johtuvat ainakin osittain siitä.

Käytettävä soveltava tutkimusmenetelmä oli pääasiassa onnistunut joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta. Esimerkiksi alapaarten leikkausjännityksissä oli suuria eroja, kun taas yläpaarteella käyttöaste-erot olivat hyvin pieniä. Jatkotutkimuksina voisi esimerkiksi laskea tässä työssä laskettuja jännityksiä jollakin toisella ohjelmalla ja verrata tuloksia muihin laskentamenetelmiin.

Jotta käyttöasteita saataisiin pienemmiksi, tulisi paarteiden profiilikokoa kasvattaa ja diagonaalien määrää lisätä. Myös diagonaalien profiilikoon kasvattaminen olisi mahdollinen vaihtoehto. Nämä toimenpiteet tosin lisäävät hieman materiaalikustannuksia.

Köysivaikutus voi tällaisissä vaakarakenteissa aiheuttaa suuriakin lisäjännityksiä eri osissa ristikkoo. Köysivaikutus syntyy, kun rakenne pääsee riippumaan kahden tuen välillä vapaasti. Tämä voidaan ajatella esimerkiksi käänteisenä teräsbetonipalkin puristuskaarena. Tässä työssä käsitellyissä ristikoissa taipuman aiheuttama muodonmuutos synnyttää paarteiden yläpintaan puristusta ja alapintaa vetoa. Köysivaikutuksen aiheuttamia jännityksiä esimerkiksi liitosten alueella voisi arvioida siten, että pyritään eliminoimaan taipuma ristikosta kokonaan koekuormitustilanteessa. Täten saataisiin ainakin teoriassa selville jännitykset ilman köysivaikutusta.

Tukien asennustoleranssit tulee ottaa huomioon asennusvaiheessa, sillä jo 10 mm:n poikkeama tukien sijainnissa saattaa kasvattaa jännityksiä yläpaarteella melkein 2,0 MPa. Tästä voi seurata se, että yläpaarten pää taittuu katki uloimman diagonaalinvierestä ja ristikko putoaa alas.

LÄHTEET

Kevarinmäki, A. 2011. Puurakenteiden suunnittelu. Lyhennetty suunnitteluohje. Luettu 21.3.2018. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi5lyhennettysuunnitteluohjeweekolmaspainos10913rilinkorjauksin.pdf>

Puuinfo. 2010. Asuinhuoneen välipohjapalkki. Luettu 9.5.2018. <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit-ja-standardit/ec5-sovelluslaskelmat-asuinrakennus/2%20Asuinhuoneen%20v%C3%A4lipohjapalkki%281%29.pdf>

PTC. 2018. Luettu 12.3.2018. <https://www.ptc.com/en/about>

Strusoft. 2018. Luettu 12.3.2018. <http://www.strusoft.com/about-us>