

# **Pientalon puurakenteinen ristiinkantava välipohja**

**Arsi Tukio**

Opinnäytetyö

---



Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Arsi Tukio	
Työn nimi Pientalon puurakenteinen ristiinkantava välipohja	
Päiväys 16.12.2013	Sivumäärä/Liitteet 42 / 6
Ohjaaja(t) Lehtori Viljo Kuusela, lehtori Harry Dunkel	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia amk	
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia ristiinkantavan puurakenteisen välipohjan soveltuvuutta nykyaikaisen pientalon rakenneratkaisuksi. Tavoitteena oli löytää tapa, jolla ristiinkantava rakenne voidaan mitoittaa tietokoneohjelmia hyödyntäen. Vaikka rakenneratkaisu on tunnettu kauan, teoriatietoa rakenteen mitoittamisesta ei ole juuri saatavissa.</p> <p>Rakennetta tarkasteltiin tietokonemallinnusten avulla, ohjelmina käytettiin <i>Virtual Systemsin Jigiä</i> ja <i>Autodesk Robot Structural Analysis:a</i>. Mallinnusten avulla etsittiin mahdollisimman pitkää jänneväliä, jossa ristiinkantavaa puurakennetta voitaisiin hyödyntää käyttäen mitallistettua sahatavaa. Mallinnusohjelmista saatuja taipuma-arvoja arvioitiin vertaamalla niitä laboratorionkokeissa saatuihin tuloksiin.</p> <p>Tämän työn perusteella voitiin todeta, että ristiinkantava välipohjarakenne on käyttökelpoinen ja kustannustehokas ratkaisu, kun valitun rakenteen rajoitteet huomioidaan suunnitteluvaiheessa.</p>	
Avainsanat Ristiinkantava, puurakenteinen välipohja	
Luottamuksellisuus Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Management			
Author(s) Arsi Tukio			
Title of Thesis Two-way Spanning Timber Floor of a Single-Family House			
Date	16 December, 2013	Pages/Appendices	42 / 6
Supervisor(s) Mr Viljo Kuusela, Lecturer and Mr Harry Dunkel, Lecturer			
Client Organisation/Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this final year project was to study if the two-way spanning timber floor could be a suitable structure for a single-family house. The aim was to find a way to model the two-way spanning timber floor by computer. Even though this kind of structure is well-known, theoretical information of designing this structure was not available.</p> <p>The structure was examined by computer modelling. <i>Virtual Systems Jigi</i> and <i>Autodesk Robot Structural Analysis</i> were the programs used for modelling. Modelling was done to find out the maximum construction span where the two-way timber structure could be used when using dimensioned timber. The results of modelling were evaluated by comparing them to the results of the laboratory tests.</p> <p>As a result of this project it was proved that the two-way spanning timber floor is a suitable and cost-effective solution for a single-family house. However, in the designing process attention has to be paid to the limitations of the chosen structure.</p>			
Keywords two-way spanning, timber floor			
Confidentiality public			



## ALKUSANAT

Haluan kiittää työni aiheesta ja sinnikkäästä ohjauksesta lehtori Viljo Kuusela, lisäksi ammattitaitoisesta ohjauksesta toista ohjaajaani lehtori Harry Dunkelia. Työ on laittanut ajattelemaan rakentamista ja sen tekniikkaa eri näkökulmista. Laboratoriotestien onnistumisessa suuresti myötävaikutti Juha Lehtikanto.

Opiskeluni lienee vaatinut eniten venymistä kotijoukoiltani. Työni on ollut mahdollinen vain rakkaan perheeni tuella, kiitos.

Lapinlahdella

Arsi Tukio

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	9
2	RISTIINKANTAVA RAKENNE .....	11
	2.1 Rakenteen määrittely .....	11
	2.2 Käsineläskenta ja sen ongelmat .....	12
	2.3 Staattisen mallin laadinta .....	13
	2.4 Ristiinkantava puurakenne lähdekirjallisuudessa .....	14
3	RAKENTEEN MALLINTAMINEN JA OHJELMATYYPIT .....	15
	3.1 Rakenteen mallintamisen suunnittelu .....	15
	3.2 Statiikkaohjelmat .....	16
	3.3 FEM-ohjelmat .....	17
	3.4 Piirrepohjaiset 3D-mallinnusohjelmat.....	17
4	RAKENTEEN MALLINTAMISEEN SOVELTUVAN OHJELMAN VALINTA .....	18
	4.1 Mallinnusohjelman soveltuvuuden arviointi .....	18
	4.2 Jigi.....	18
	4.3 Autodesk Robot Structural Analysis .....	19
	4.4 Vertex G4.....	20
	4.5 Mallinnusohjelman valinta .....	22
5	RISTIINKANTAVAN VÄLIPOHJAN MALLINTAMINEN.....	23
	5.1 Tutkittavat ristiinkantavat lattiamallit .....	23
	5.2 Vertailtavat yhteen suuntaan kantavat lattiamallit .....	24
	5.3 Tuloksia rakennemalleista.....	25
6	TARKASTELU TALOUDELLISESTA NÄKÖKULMASTA .....	28
7	LABORATORIOTUTKIMUKSET .....	30
	7.1 Koejärjestelyt .....	30
	7.1.1 Materiaalin mittatarkkuus.....	30
	7.1.2 Materiaalin kosteus .....	30
	7.1.3 Testiolosuhteet .....	31
	7.2 Testeissä käytettyjen puiden kimmomoduuli .....	31
	7.2.1 Kimmomoduulin määrittäminen taivutuskokeella.....	31
	7.2.2 Tulosten esittäminen standardin mukaan .....	32
	7.2.3 Puiden kimmomoduulitestauksen tulokset .....	33
	7.3 Ristiinkantavan rakenteen testaus.....	34

7.3.1 Koejärjestelyt.....	34
7.3.2 Mittaustulokset ja tulosten arviointi.....	37
8 YHTEENVETO JA POHDINTAA.....	40
LÄHTEET.....	42

## LIITTEET

Liite 1 RT-kortti vuodelta 1943. Hirsitalon rakenteiden periaatekuva

Liite 2 Testitulokset, puutavaran kimmomoduulit

Liite 3 Testitulokset, ristiinkantavan rakenteen taipumat

## 1 JOHDANTO

Viime vuosikymmeninä puurakentaminen on muuttunut merkittävästi. Painetta muutokseen on lisännyt energiataloudellisuuden merkityksen ymmärtäminen, osaltaan muutosta on edesauttanut tekniikan kehittyminen niin itse rakentamisessa kuin puunjalostusteollisuudessakin. Kun vielä 1950-luvulla saatavissa olevan puutavaran mitoitus ja määrä ohjasivat rakentamista, on tänä päivänä rakentajalla valittavanaan laaja kirjo eri levyisiä ja korkuisia palkkeja, pilareita sekä muita rakennuskappaleita. Karkeasta sahapintaisesta lauta- ja lankkutavarasta on siirrytty mitallistettuun, lujuuslajitel- tuun sahatavaraan sekä erilaisiin liimapuu-, kertopuu- sekä uumapalkkiratkaisuihin. Nämä mahdollistavat pidemmät jännevälit, vapautta tilasuunnitteluun sekä vaihtoehtoja käytetylle materiaalille.

Lainsäädännöllä on kiristetty rakentamisen energiatehokkuusvaatimuksia. Tämä vaikuttaa kaikkeen rakentamiseen. Ulkoseinien, ala- ja yläpohjien paksuudet kasvavat tarvittavan eristemäärän lisääntyessä. Erilaisen taloteknisten varusteiden lisääntyminen vaatii järjestelmien ja rakenteiden yhteensovittamiselta entistä enemmän. Rakennuksen suunnittelun vaativuutta kasvattaa myös rakennusfysikaalisen toiminnan varmistaminen. Kun lämpövuodon rakenteita kuivattava vaikutus vähenee, käyttötavan tai ympäristön lämpö- ja kosteusmuutokset voivat aiheuttaa puulle eloperäisenä rakennusmateriaalina vaurioita.

Kehittyvä puunjalostusteollisuus pyrkii tuottamaan pidemmälle jalostettuja, paremman katteen tuovia tuotteita. Tuotekehitys on myös mahdollistanut ratkaisuja, jotka sahatavaralla toteutettuna olisivat mahdottomia. Käytettäessä palkkeina sahatavaraa, maksimi korkeusmitta on 9 tuumaa eli 225 millimetriä. Liima- ja kertopuulla palkkien korkeusvalikoima on huomattavasti laajempi. Siirtyminen sahatavarasta teollisesti pidemmälle jalostettuihin palkistoihin tulee esille myös tarkastellessa käytössä olevia puurakenteiden mitoittamista koskevia julkaisuja, kuten RIL:n julkaisemia euronormeihin perustuvia mitoitusohjeita. Kahteen suuntaan kantavaan rakenteeseen otetaan kantaa vain värähtelymitoituksen osalta. Kahteen suuntaan kantavalle rakenteelle ei ole mitoitusohjetta, joka ottaisi kantaa taipumaan, taivutuskestävyyteen tai leikkausvoimakestävyyteen. Syy mitoitusohjeen puuttumiselle voi olla yksinkertainen: mitoittaminen perinteisin laskentamenetelmin on erittäin vaikeaa.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia puurakenteisen ristiinkantavan rakenteen soveltuvuutta pientalon välipohjaratkaisuksi. Kun 1950-luvun rintamamiestalojen malliratkaisut perustuivat kokemusperäiseen tietoon rakenteiden kestävydestä, tämän päivän rakentamista ohjaavat tarkat määräykset mitoituskuormista, taipumasta, värähtelystä jne. Tutkitaan, voidaanko sahatavarasta tehdä nykyisten määräysten mukainen välipohjarakenne ja onko se taloudellisesti järkevää. Palomitoitukseen tässä työssä ei oteta kantaa.

Työ etenee kolmessa vaiheessa. Ensin verrataan yksinkertaisen puupalkin käsinlaskennalla saatuja taipuma-arvoja tietokonemallin taipuma-arvoihin. Taipuma on valittu seurattavaksi suureeksi siksi, että sen oletetaan olevan värähtelyn ohella määräävä mitoitusehto. Taipuma on myös helposti mitattavissa laboratoriokokein. Toisessa vaiheessa tutkitaan eri ohjelmistoilla ristiinkantavia rakenteita välipohjaksi soveltuvilla mitoilla sekä arvioidaan rakennetta taloudelliselta kannalta. Lopuksi suoritetaan laboratoriokokeet ja verrataan tuloksia mallintamalla saatuihin arvoihin.

## 2 RISTIINKANTAVA RAKENNE

### 2.1 Rakenteen määrittely

Ristiinkantava rakenne tarkoittaa sitä, että tasomainen rakenne on tuettu kaikilta neljältä sivultaan. Ristiinkantavasta rakenteesta voidaan käyttää myös nimitystä kahteen suuntaan kantava rakenne. Yhteen suuntaan kantava rakenne on kannateltu vain kahdelta sivulta. Tyypillisesti puinen ristiinkantava rakenne esiintyy vanhojen hirsirakennusten ala- ja välipohjissa, joissa alapohja on tuettu seiniin ja rakennuksen keskellä kiviperustuksiin, välipohjaa kantavat hirsiseinät.



Kuva 1: Ristiinkantava välipohja vanhassa hirsitalossa (Tukio2012-08-08)

Yllä olevan kuvan rakenne on 1800-luvulla rakennetusta hirsirakennuksesta Vesanolta (kuva 1). Siinä välipohja on kannatettu lyhyempään suuntaan vahvemmillä hirsillä ja päällä on mitoiltaan hieman pienemmät hirret pidempään suuntaan. Hirret on kiinnitetty risteämäkohdissaan toisiinsa nauloin. Ristiinkantavasta rakenteesta käy-

tään joissakin yhteyksissä myös termiä arina tai arinarakenne. On määrittelykysymys, tulisiko arina –termiä käytettäessä kantavat palkistot olla toisiinsa nähden samassa tasossa.

Tämän päivän ratkaisussa ristiinkantava rakenne toteutettaisiin mitallistetusta sahatavarasta tai muusta massiivisesta rakenneosasta, kuten liima- tai kertopuu. Ristiinkantavan rakenteen vahvuus on talotekniikan kuljettaminen rakenteen sisällä. Koska kaksi palkistolinjaa sijaitsevat eri tasoissa, esimerkiksi ilmanvaihtokanavien kuljettaminen rakenteen sisällä on mahdollista ilman kantavien rakenteiden rei'ittämistä. Ongelmallisena sen sijaan voidaan pitää vaatimusta neljästä kantavasta seinästä tai muusta kantavasta linjasta sekä mahdollista lattian paksuutta verrattuna yhteen suuntaan kantavaan rakenteeseen. Myös asennettavuus voi muodostua yksinkertais- ta palkkiratkaisua vaativammaksi.

## 2.2 Käsinlaskenta ja sen ongelmat

Rakenteiden mitoittaminen käsinlaskentana perustuu rakenteiden ja rakenteisiin vaikuttavien voimien yksinkertaistamiseen siten, että laskenta voidaan tehdä yleisesti tunnettuja laskentakaavoja noudattaen. Ristiinkantavassa puurakenteessa ongelmaksi muodostuvat palkistot, jotka ovat toisiinsa nähden poikkeavassa suunnassa. Yhteen suuntaan asetetulle palkistolle on olemassa laskentakaavoja, joilla mitoittaa riittävät palkkien mitat tarvittavien lujuuksien täyttämiseksi. Kahden ristiin asetetun ja toisiinsa liitetyn puupalkin vastaanottamaa kuorman osuutta on helppo tarkastella differentiaalilaskennalla, koska molempien palkkien taipuman on oltava sama. Tähän löytyy kuorman jakautumista palkeille jänneväliden suhteessa kuvaava taulukko kirjasta *Puurakenteet, Step 2* (taulukko 1)(Rakennustieto Oy, 1998, 317). Taulukosta saa havainnollisen kuvan siitä, miten toisen sivun pituuden kasvu heikentää pidempien palkkien kykyä ottaa vastaan kuormaa suhteessa lyhyempiin palkkeihin.

Taulukko 1. Kuorman jakautuminen jännevälien suhteessa jäykkyysominaisuuksiltaan yhtenevillä palkeilla (Rakennustieto Oy, 1998, 317)

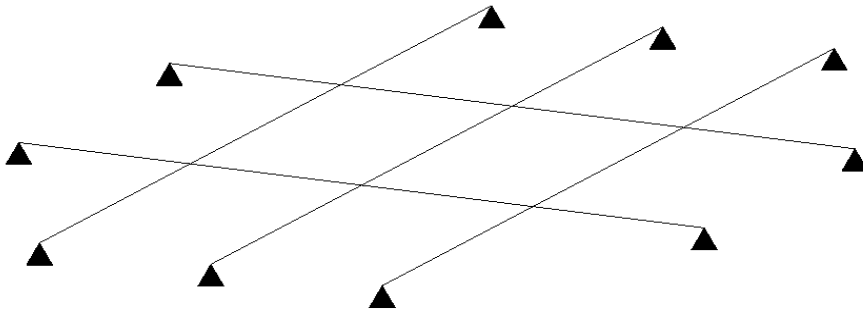
Jännevälien suhde ( $l_2/l_1$ )	1,0	1,5	2,0	3,0
Palkki 1 ( $F_1$ )	0,50 $F$	0,77 $F$	0,89 $F$	0,96 $F$
Palkki 1 ( $F_2$ )	0,50 $F$	0,23 $F$	0,11 $F$	0,04 $F$

( $E$  ja  $I$  pysyvät vakiona,  $l_2$  pidempi jänneväli ja  $l_1$  lyhyempi jänneväli)

Kahteen suuntaan kantavassa palkistossa risteävien palkkien solmupisteitä on paljon. Jokaisessa solmupisteessä alempi palkki toimii tukipisteinä ylemmälle palkille. Vastaavasti, koska palkit on kiinnitetty toisiinsa, myös ylempi palkki toimii alemman palkin tukipisteinä. Ero varsinaiseen tukeen on siinä, että solmupisteillä on mahdollista pystysuuntainen siirtymä. Palkistot solmupisteineen muodostavat eräänlaisen verkon, joka painuu kuormituksen vaikutuksesta. Se, miten määrittää solmupisteiden tukivaikutus kokonaisuuteen, on käsinlaskennalla erittäin vaikeaa. Solmupisteiden vaikutuksen laskentaan vaaditaan kehittyntä matriisilaskentaa ja tietokoneen apua.

### 2.3 Staattisen mallin laadinta

Ennen mallintamista on rakenteen olennaisista osista muodostettava yksinkertaistettu staattinen malli (kuvio 1). Se toimii perustana muodostettavalle tietokonemallille. Rakenteeseen vaikuttavat kuormat on osattava hahmottaa. Kantavat rakenneosat on pystyttävä muodostamaan niin yksinkertaisesti, että niiden mitoittaminen on riittävällä varmuudella mahdollista. Rakenteessa mukana olevat toissijaiset rakenneosat, kuten lautakoolaukset, paneloinnit ja levytykset, voidaan huomioida rakenteen jäykkyyttä arvioitaessa. Yleensä niiden vaikutusta ei huomioida, koska laskelmat monimutkaiset huomattavasti ja toissijaisten rakenneosien jäykkyyteen tuoma lisäkapasiteetti on rajallinen. Vain rakenneosien oma paino huomioidaan. Tällöin todellinen rakenne on arvioitua mallia jäykempi ja täten laskelmat ovat varmemmalla puolella.



Kuvio 1. Staattinen malli ristiinkantavasta rakenteesta (Tukio 2013-11-08)

#### 2.4 Ristiinkantava puurakenne lähdekirjallisuudessa

Aiheesta on erittäin niukasti kirjallista tietoa puurakenteiden yhteydessä. Viittauksia rakenteen käyttöön löytyi useista kirjallisista teoksista, mutta sisältö rajoittui mainintaan rakenteen kuormia hyvin jakavasta ominaisuudesta sekä käytöstä silloissa ja rakennuksissa. Englanninkielisten aineistojen hakemisessa ongelmaksi muodostuu englanninkielisen termin määrittäminen, lisäksi amerikanenglannissa ja brittienglannissa käytetään eri termejä. Betonirakentamisen sekä teräsrakenteiden yhteydessä ristiinkantavia rakenteita käsitellään useammin, mutta tiedon hyödyntäminen puurakenteiden yhteydessä on vaikeaa. Puurakenteet poikkeavat teräs- ja teräsbetonirakenteista oleellisen paljon.

Ainoa mitoitukseen liittyvä viittaus ristiinkantavasta rakenteesta löytyy RIL 205-1-2009 suunnitteluohjeista sivulta 92, jossa mainitaan laskentakaava alimman ominaisuuksien määrittämiseksi kahteen suuntaan kantavalle rakenteelle (Puurakenteiden suunnitteluohjeet: RIL 205-1-2009, 92).

Ristiinkantavaa rakennetta on käytetty vanhoissa rakennuksissa sekä alapohjissa että välipohjissa. Sen tiedetään olevan toimiva rakenne, vanhoissa hirsirakennuksissa parrujen mitat olivat 150...180 mm. Vanhassa, vuoden 1943 julkaistussa ja nytemmin mitätöidyssä RT-kortissa (Runko, hirsi-, asuinrakennuksen, sisämitat 620 x 495, 1:100. RT 822.11) on esitetty ristiinkantavat ala- ja välipohjat (liite 1). Rakenne on esitetty hyvin pelkistetysti, eikä se ota kantaa rakenteen kestävyteen. Huomionarvoista on, ettei tuona ajankohtana ollut käytössä vastaavia, tarkkoja euronormeihin perustuvia rakenteellisia vaatimuksia kuin nykyisin.

### 3 RAKENTEEN MALLINTAMINEN JA OHJELMATYYPIT

#### 3.1 Rakenteen mallintamisen suunnittelu

Ennen rakenteen mallintamista on arvioitava suunnitellun ohjelmiston soveltuvuus kyseisen rakenteen kuvaamiseen ja analysointiin. Tässä vaiheessa on tiedettävä mallinnuksessa käytettävän ohjelmiston tarjoamat mahdollisuudet, vahvuudet sekä heikkoudet. Tässä tarkastellaan rakenteen mallintamista ristiinkantavan vaakarakenteen yhteydessä.

Yleisesti mallintaminen aloitetaan sauvojen ja pisteiden muodostamisella. Lisäämällä koordinaatistoon pisteitä, voidaan helpottaa geometriaan kuuluvien sauvojen, palkkien ja pilareiden muodostamista. Pisteellä voidaan myös osoittaa ohjelmalle, että kaksi sauvaa on pisteen kohdalla kiinnittyneinä toisiinsa. Jos kaksi sauvaa risteää samassa tasossa ilman pistettä, niiden ei katsota olevan vaikutuksessa toisiinsa. Tämä voi vaikuttaa merkittävästi mallin oikeellisuuteen. Sauvoille annetaan poikkileikkaus ja materiaaliarvot, jotka ovat myöhemmin muutettavissa. Rakennetekniikkaan räätälöidyissä ohjelmissa on mahdollista valita kaksi- tai kolmiulotteisia näkymiä rakenteen hahmottamisen helpottamiseksi.

Sauva voi tukeutua varsinaisen tuen lisäksi myös toiseen sauvaan. Tuella määritellään, mihin suuntiin tuki kohdistuu. Tuki voi olla jokaiseen suuntaan kiinteä, jolloin sauva ei voi liukua mihinkään kolmesta suunnasta. Tässä on tärkeää huomata, että liukuminen sauvan pituussuunnassa on syytä lukita vain yhdellä tuella. Esimerkiksi kaksitukisen palkin yhteydessä molempien tukien estäessä liukuman pituussuuntaan, rakennemalli voi olla todellista rakennetta jäykempi. Tällöin ohjelma voi antaa liian pieniä taipuman arvoja ja voi syntyä ylimääräisiä momentteja, joita ei todellisuudessa muodostu. Tuella määritellään myös vapausasteet kiertymän suhteen. On ohjelmasta kiinni, tai se voidaan valita, käsitelläänkö kiertymää lokaalissa vai globaalissa koordinaatistossa. Myös kiertymien vapauttamisessa on oltava tarkkana, jäykäksi määritetty liitos antaa ylimääräistä jäykkyyttä rakennemalliin.

Mallissa käytettävä koordinaatisto voidaan jakaa lokaaliin ja globaaliin koordinaatistoon. Lokaali koordinaatisto kytkeytyy rakenneosaan, jolloin x-, y- ja z-suunnat määrittyvät rakenneosan mukaan. Globaali koordinaatisto on kytkeytynyt koko suunnitte-

lualueeseen, eikä se muutu rakenteiden suuntien mukaan. Tämän vuoksi on tärkeää huomioida, kumman koordinaatiston mukaan kuorma on määritelty vaikuttamaan.

Rakenteisiin voidaan määrittää vaikuttamaan pistekuormia, jatkuvaa kuormaa, suuruudeltaan vaihtuvaa jatkuvaa kuormaa sekä momentteja. Erilaisia kuormitustilanteita varten voidaan määritellä kuormitustapaukset, tämän lisäksi voidaan määritellä erilaisia kuormitusyhdistelmiä. Rakennesuunnitteluun räätälöidyissä ohjelmissa on yleensä mukana Euronormin mukainen laskenta.

Kun kaikki mallin toiminnan kannalta tarvittavat komponentit on mallinnettu, tehdään laskenta. Mikäli kaikki määrittelyt eivät ole mallissa oikein, laskentaa ei voi tehdä, tai ohjelma antaa virheilmoituksen. Laskennan tuloksia voi tarkastella näytöllä tai niistä voidaan tulostaa halutusti rajattu raportti. Yleensä tuloksia voi havainnollistaa ruudulla muuttamalla esimerkiksi muodonmuutosten skaalausta, jolloin pienetkin muutokset on helpompi havaita. Lisäksi voidaan valita, esitetäänkö ruudulla taipuman, momentin vai leikkausvoiman arvoja.

### 3.2 Statiikkaohjelmat

Statiikkaohjelmissa määritellään rakenteen geometria, joka sisältää tiedon rakennesien jäykkydestä ja dimensioista sekä mahdollisesti materiaalista. Rakenteeseen lisätään tuet ja kuormitukset. Oikeiden tulosten saamiseksi on kiinnitettävä huomiota rakennesien kiinnittymiseen toisiinsa sekä tukien vapausasteisiin. Mikäli esimerkiksi tuella on kiertyminen estetty, se voi antaa liian suuria jäykkyyksiä määritetyllä kuormituksella. Statiikkaohjelmistoissa on kaksi- ja kolmiulotteisella pohjalla toimivia sovelluksia. Geometrian valmistuttua suoritetaan laskenta, joka määrittää annettujen arvojen perusteella mm. momentit, leikkausvoimat, kiertymät ja taipumat. Ohjelmisto voi myös ilmoittaa valitun rakenteen käyttöasteen määrittelylle kuormalle.

Kolmiulotteisissa käyttöliittymissä mallia voidaan käänellä ja tarkastella eri suunnista. Rakenteen hahmo ruudulla voi olla havainnollistamisen vuoksi annettujen arvojen mukainen. Tällöin esimerkiksi I-palkin erottaa selkeästi RHS-pilarista. Eräs statiikkaohjelmien ominaisuus on se, että ohjelma käsittelee fyysiset mitat omaavaa kappaletta sen mittojen ja lujuusominaisuuksien määrittelemän jäykkyyden omaavana viivana. Tästä johtuen eri tasossa olevat kappaleet eivät välitä kuormia toiselle tasolle, vaikka ne ohjelmassa näkyvän hahmon mukaisesti olisivatkin toisiinsa kosketuksissa. Siksi näiden viivojen välille on luotava keinotekoinen yhteys. Tätä yhteyttä määritettäessä

on huomioitava, että tämä yhteys pystyy riittävällä luotettavuudella siirtämään kuormitukset toiselle tasolle vaikuttamatta vääristävästi rakenteen toimintaan. Esimerkiksi tämän työn rakenteessa puupalkistot sijaitsevat kahdessa eri tasossa, niiden väliin on jokaisen solmupisteen kohdalle luotava yhteys, joka pitää eri tason puut yhtä kaukana toisistaan.

### 3.3 FEM-ohjelmat

FEM-ohjelmat ovat kehittyneitä laskentaohjelmistoja, joilla pystytään verkottamaan elementti pienempiin tutkittaviin alueisiin. Laskennan tuloksista saadaan tarkkoja arvoja jännitysten jakautumisesta elementissä. Verkotusta tihentämällä voidaan saada tarkempia arvoja, mutta tällöin laskentamäärä kasvaa ja laskenta hidastuu. Useisiin ohjelmiin voidaan tuoda toisesta ohjelmasta valmiiksi muodostettu malli, jota voidaan tutkia FEM-ohjelman menetelmin. FEM-lisäosioita on saatavissa joihinkin piirrepohjaisiin 3D-mallinnusohjelmiin sekä statiikkaohjelmiin.

### 3.4 Piirrepohjaiset 3D-mallinnusohjelmat

Piirrepohjaisten 3D-mallinnusohjelmien perusajatus on kasvattaa kaksiulotteinen piirre kolmiulotteiseksi kappaleeksi, luotua hahmoa voidaan muokata työstöin tai kasvattaa lisättyjen piirteiden avulla uusia muotoja. Luotuja kappaleita voidaan yhdistää kokoonpanoiksi ja niistä voidaan tehdä yksityiskohtaisia piirustuksia. Luotaessa piirteiden mitoituksiin kaavoja tai muuttujia, voidaan kappaleen dimensioita muuttaa, tällöin puhutaan parametrisistä piirteistä.

Joihinkin ohjelmiin on liitetty FEM-laskentaan kehitettyjä lisäosia. Niiden avulla voidaan tehdä koekuormituksia määrittämällä analysoitavalle kappaleelle tuet ja kuormitukset. Vahvimmillaan tällaiset ominaisuudet ovat käytettäessä isotrooppisia materiaaleja, eli materiaaliominaisuudet ovat samanlaiset jokaisessa suunnassa. Koneensuunnittelu on tyypillinen tällaisen ohjelmiston käyttöala.

## 4 RAKENTEEN MALLINTAMISEEN SOVELTUVAN OHJELMAN VALINTA

### 4.1 Mallinnusohjelman soveltuvuuden arviointi

Tässä työssä haluttiin selvittää, millä ohjelmalla puurakenteinen välipohja olisi järkevää mallintaa ja arvioida ohjelman avulla sen kestävyyttä ja ominaisuuksia. Ennen suuremman mallin tekemistä haluttiin selvittää ohjelman soveltuvuutta vertaamalla yksinkertaisen puupalkin kuormitustuloksia käsinlaskennalla saatuihin tuloksiin. Käsin laskettiin pistemäisen, keskellä palkkia sijainneen yhden kilonewtonin piste kuorman aiheuttama taipuma sekä tasaisen, koko palkin pituudella vaikuttaneen yhden kilonewtonin metrikuorman aiheuttama taipuma. Puupalkiksi valittiin lujuusluokaltaan C30 ja mitoiltaan 48 mm x 123 mm x 3000 mm:n palkki, joka on tuettu päistään. Puupalkki mallinnettiin kolmella eri ohjelmalla, *Jigillä*, *Autodesk Robot Structural Analysis*:lla ja *Vertex G4*:llä.

### 4.2 Jigi

*Jigi* on suomalainen, *A&S Virtual Systems Oy*:n kehittämä statiikkaohjelma. Ohjelman kehityksessä on pyritty mahdollisimman helppoon käytettävyyteen (*A&S Virtual Systems*). Ohjelman käynnistysvaiheessa aloitussivuna avautuu aloitussivu *Jigibox*. Sivulta löytyy ohjelmaan liittyvät uutiset, päivityshistoria sekä käyttökoulutusilaisuudet. Ohjelma on vapaasti ladattavissa ja käytettävissä, lisenssin hankkimalla saa käyttöönsä ohjelman mitoitusominaisuudet. Peruskuormitukset voi ratkaista ilman ohjelman lisensointiakin.

Mallin luominen on *Jigissä* pyritty tekemään helpoksi. Rakenne määritellään kolmessa osassa: sauvojen asemointi, tukien määrittely, sekä voimien kohdistuminen rakenteeseen. Sauva voi olla teräsbetonirakenne, teräsprofiili tai puinen elementti. Mallin hahmottamisen avuksi voi asemoida pisteitä. Kun sauva on luotu aloitus- ja lopetus-pisteen välille, ohjelma hahmottaa kolmiulotteisen kuvan määritellyn poikkileikkauksen perusteella (kuva 2).



Kuva 2: Mallinnettu puusauva *Jigi*ssä (Tukio 2013-10-23)

Ristiinkantava rakenne on puurakenteen yhteydessä kahden eri tasossa olevan palkiston systeemi. Mallintaessa palkistoja todenmukaisesti omille tasoilleen, on ne yhdistettävä solmupisteistään voimien siirtymiseksi palkistolta toiselle. *Jigin* yhteydessä käytettiin halkaisijaltaan 10 millimetrin pyöröterästankoja, jotka liitettiin puihin solmukohtaan asetetun pisteen avulla. Tämän testin yhteydessä terässäuvan nurjahdusvaaraa ei ollut, koska voimasuureet olivat sen verran pieniä ja puupalkkien mataluuden takia tasoero, terässäuvan pituus, oli pieni. Useiden mallinnusvariaatioiden jälkeen todettiin, että palkistot voi yksinkertaisuuden vuoksi mallintaa samaan tasoon, voimat siirtyvät todenmukaisina ja taipumien, momenttien ja leikkausvoimien arvot säilyvät samoina. Palkkien solmukohtissa täytyy olla piste liitoksen merkiksi.

#### 4.3 Autodesk Robot Structural Analysis

*Robot Structural Analysis* on Autodeskin rakennesuunnitteluun kehitetty ohjelmisto, jossa voidaan analysoida ja mitoittaa tyypillisten metalli-, teräsbetoni- ja puurakenteiden lisäksi myös laattoja ja liittorakenteita. Tuet ja liitokset on mahdollista määrittellä erityisen tarkasti, jäykän ja nivelellisen tuen lisäksi voidaan määrittellä liukumaa ja kiertymävastetta. Eri tasossa sijaitsevien rakenteiden yhdistämiseen käytetään *Rigid link* -toimintoa, joka yhdistää rakenteet määritellyin vapausastein. Ohjelman monipuolisuus tulee esille jo käynnistysvaiheessa, valittavana on useita esivalintoja erilaisille rakennemalleille. Ohjelman käyttömahdollisuuksia laajentaa kyky analysoida dynaamisia kuormia sekä värähtelyjä.

Yhteensopivuuteen muiden Autodeskin -ohjelmien kanssa on kiinnitetty huomiota, esimerkiksi *Revit Structure* -malli on mahdollista tuoda *Robotiin*, analysoida ja palauttaa takaisin *Revitiin*.

Mallinnus on vaivatonta, kun alkuvaiheessa muodostaa koordinaatiston helpottamaan palkistojen sijaintia. *Jigin* yhteydessä opitun samaan tasoon mallintamisen vuoksi *Rigid linkiä* ei ollut tarve käyttää. Myös *Robot*-mallintaminen nopeutui. Tukien määrittelyissä oli oltava tarkkana niiden monipuolisuuden takia.

#### 4.4 Vertex G4

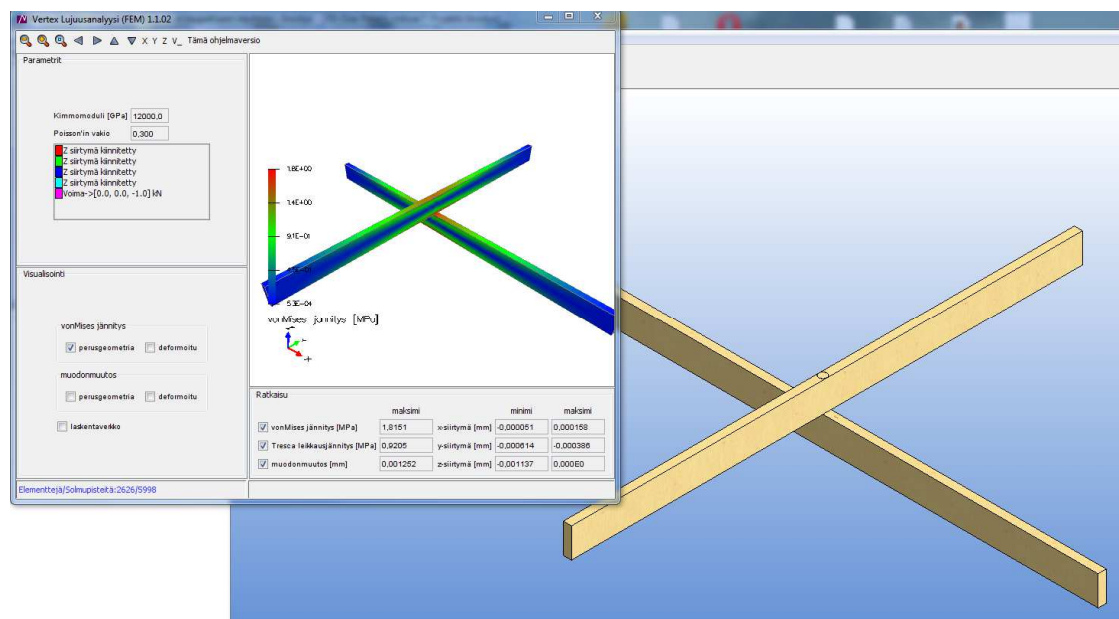
*Vertex* on suomalainen, piirteiden käyttöön perustuva parametrinen mekaniikkasuunnitteluohjelmisto, jota käytetään etenkin metallituotesuunnittelussa. *Vertexillä* on mekaniikkasuunnittelun lisäksi räätälöidyt ohjelmistot mm. prosessisuunnitteluun, rakennusten suunnitteluun, sähkö- ja automaatio-suunnitteluun (*Vertex Systems Oy*). Piirteen luominen tapahtuu 2D-tilassa, tässä tapauksessa piirretään puupalkin poikkileikkaus, joka pursotetaan haluttuun mittaan. Kun elementille on pursotettu pituus, siitä tulee 3D-kappale, jolle voidaan antaa materiaaliarvot. Kokoonpanossa voidaan yhdistää useita elementtejä toisiinsa 3D-malliksi. Ohjelmaan on liitetty oma *FEM-analyysi*, jossa käsitellään mallia yhtenä yhtenäisenä kappaleena.

*Vertexin* soveltuvuutta kokeiltiin tekemällä yksinkertaisen palkin lisäksi kahden ristikkäisen palkin malli. Palkit oli muunnettava yhdeksi yhtenäiseksi osaksi. Materiaaliominaisuuksien muuttaminen on hankalaa. Nimiketietojen materiaalitiedot –osiossa varsinaista materiaalivalikkoa ei ole, vaan se on haettava erillisen taulukon kautta. Vaikka tietokannasta löytyy C24-puutavara, sitä ei löydy haku- tai suodatustoiminnoilla. Tässä näkynee ohjelman suuntautuminen koneensuunnitteluun. Vasta satunnaisen materiaalivalinnan jälkeen pääsee muokkaamalla materiaalia valitsemaan puun ja sieltä halutun lujuusluokan. Materiaalitietokannassa rivejä voi muokata, joten eri lujuusluokkia voi lisätä C24:n lisäksi, mutta vain kimmomoduulin arvoa voi muuttaa.

FEM-analyysiä varten lisättiin materiaali '*Sahatavara C30*'. Analyysin suorittamiseksi on tutkittavalle osalle määritettävä tuet ja osaan vaikuttavat voimat. Sekä tukien että voimien määrittäminen tapahtuu kuormitustapaukset –ikkunassa, johon voi määrittellä samalle osalle useita eri kuormitustapauksia. *Vertexin* mallinnustoiminnoissa on yleisesti valittavissa komponentin pinta, piste tai viiva, joihin toiminto kohdennetaan. FEM-analyysin kohdalla tuen määrittämiseksi on vaihtoehtona pelkästään pinta. Viiva –toiminto ei ole aktiivinen, ja heräsikin kysymys, voisiko tämä olla vain opiskelijaversiosta aiheuttama rajoite. Pelkän pinnan valintamahdollisuus rajoittaa siten, että esimerkiksi palkin pään ollessa tukena, ei kiertymää pääse tapahtumaan. Tämä ai-

heuttaa ylimääräisiä jännityksiä tuen lähelle ja liian pieniä siirtymäarvoja kuormituskohtaan. Sama ongelma esiintyy kuormituksen määrittelyssä. Kuormitukseksi ei voi asettaa pistekuormaa mielivaltaiseen kohtaan, vaan sitä varten on luotava analysoitavaan osaan muusta pinnasta poikkeava pinta. Tässä tapauksessa mallinnettiin yläpintaan, puiden risteämäkohtaan, yhden millimetrin korkuinen ympyrä, jonka halkaisija on viisi senttimetriä. Tällöin kuorman vaikutus voitiin kohdistaa tähän pyöreään pintaan. Myös tukipisteille muodostettiin vastaavalla tavoin pieni muusta pinnasta ulkoneva alue. Tällä pyrittiin minimoimaan tukipinnan aiheuttama tuloksen vääristymä.

Analyyysin tuloksesta voidaan lukea jännitysarvojen maksimiarvoja sekä siirtymiä (kuva 3). Ohjelma verkottaa analysoitavat alueet automaattisesti.



Kuva 3: Vertex FEM-analyysi (Tukio 2013-10-15)

Jo näin yksinkertaisilla tapauksilla mallintamisen analysointi oli vaivalloista. Myöskään tulokset eivät olleet muiden mallinnustulosten ja käsinlaskennan kanssa yhteneviä, ja heräsikin epäily systemaattisen virheen mahdollisuudesta FEM-mallia luotaessa. Voitanee kuitenkin todeta, ettei Vertex G4 sovellu tämän tyyppisen puurakenteen ominaisuuksien tarkasteluun.

#### 4.5 Mallinnusohjelman valinta

Mallinnusohjelmiksi valittiin *Robot Structural Analysis* ja *Jigi*. *Vertex* todettiin niin kankaaksi käyttää, ettei isomman mallin tekeminen *Vertexillä* ole mielekäästä. Tuloksia on pystyttävä tutkimaan FEM-mallin pohjalta ja tarkempi solmupistekohtainen tarkastelu ei olisi mahdollista.

*Robot* ja *Jigi* ovat selkeästi rakennesuunnittelijaa varten kehitettyjä työkaluja. Rakenteiden mallintamisen eteneminen on hyvin samantyyppistä. *Jigi* on tällaisen rakenteen mallintamisessa hieman nopeampi, tähän lienee ohjelman suunnittelussa pyrittykin. Käyttöliittymä on yksinkertainen ja monimutkaisempien rakenteiden, kuten levy- ja palkin yhteisvaikutuksen mallintaminen ei onnistu. *Robot* on huomattavasti monipuolisempi ohjelma ja varmasti tästä syystä myös mallintaminen on hieman hitaampaa. Esimerkiksi tukien määrittelyssä on enemmän vaihtoehtoja, ei pelkkää kiertymän ja aksiaalisen liukuman vapautusta.

Käsin lasketut tulokset täsmäsivät *Jigin* ja *Robotin* tuloksiin tasaisen kuorman osalta hyvin. Pistekuorman laskennassa *Robot* antaa noin 4 % suuremman taipuman kuin käsinlaskenta ja *Jigi*. *Vertexissä* ei kummankaan taivutustapauksen yhteydessä saatu järkevää tulosta. Tulokset löytyvät taulukosta 2.

Taulukko 2: Taipuma; käsinlaskennan ja mallinnusten tuloksien vertailu

48 mm x 123 mm L 3000 mm C30	Tasainen kuorma 1kN/m	Pistekuorma 1kN keskellä
Käsinlaskenta	11,8078	6,2975
Jigi	11,8077	6,2975
Robot	11,8078	6,5573
Vertex G4	0,0041	0,0023

## 5 RISTIINKANTAVAN VÄLIPOHJAN MALLINTAMINEN

### 5.1 Tutkittavat ristiinkantavat lattiamallit

Tämän tutkimuksen lähtökohdaksi otettiin se, ettei toissijaisten rakenneosien vaikutusta huomioida. Esimerkiksi pintalevyn kiinnityksellä voitaisiin saavuttaa lisäkapasiteettia, mutta se veisi huomiota itse rakenteelliselta ratkaisulta. Käytännön tilanteessa voi olla hyödyllistä huomioida myös pintalevytys.

Mallinnettaviksi valittiin kolme erikokoista lattiaa, joissa oli kaikissa toisistaan poikkeavat lyhyemmän ja pidemmän sivun suhteet. Lattioiden pinta-alat vaihtelivat 16 ... 24 m<sup>2</sup> välillä, joten ne voisivat hyvin olla nykyaikaisen pientalon huonekoon mukaisia. Ensimmäinen lattia oli neliön muotoinen, sivumitaltaan neljä metriä. Tällöin sivujen suhde oli 1:1. Toisessa lattiassa lyhyemmän sivun mitaksi valittiin neljä metriä ja pidemmän viisi metriä, sivusuhteeksi 1:1,25. Kolmannen lattian lyhyemmän sivun mitta oli edelleen neljä metriä, mutta pitkän sivun pituus oli nyt kuusi metriä, jotta sivusuhteeksi saatiin 1:1,5. Rakenteessa haluttiin käyttää mitallistettua, rautakaupasta löytyvää puutavaraa. Taipuma ei saanut ylittää  $l / 400$  -arvoa, keskeltä keskelle -jakona käytettiin 500 mm. Lattiaan kohdistuvaksi kuormaksi määritettiin asuintilan mitoituskuorma 2,0 kN/m<sup>2</sup>, joka muutettiin 1,0 kN/m palkkia kohden. Rakenteen oma paino oli mukana mallissa, mutta vain palkiston osalta. Toissijaisien rakennusosien painoa ei arvioitu.

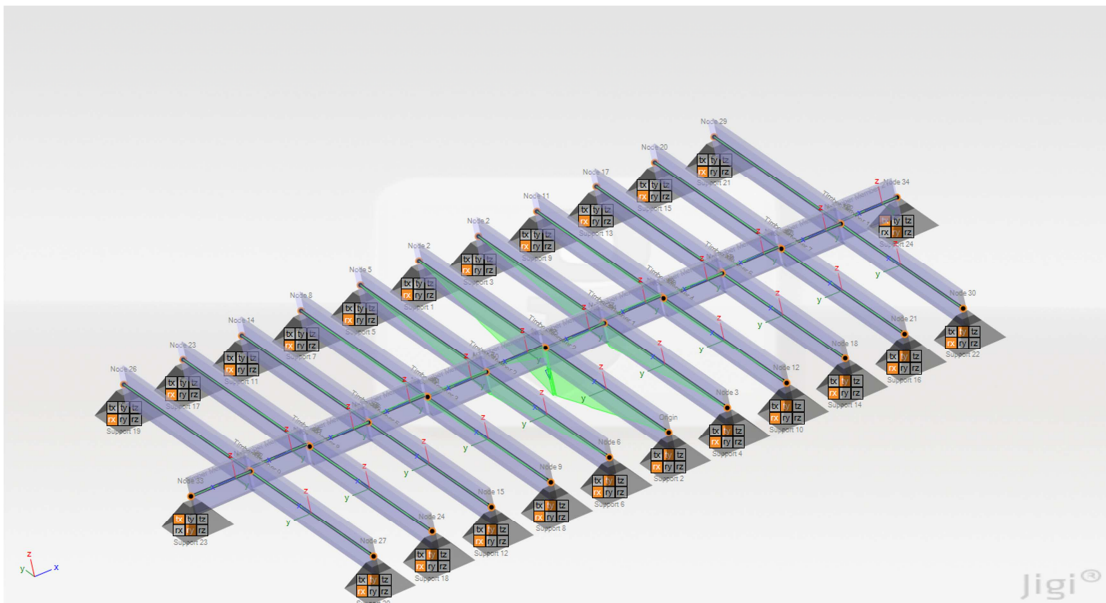
Puurakenteiden suunnitteluohjeesta löytyy kaava kahteen suuntaan kantavan puurakenteen värähtelymitoitukseen (Puurakenteiden suunnitteluohjeet: RIL 205-1-2009, 92). Rakenteen alin ominaistaajuus ei saa alittaa 9 Hz raja-arvoa. Lisäksi kantavan palkin keskellä 1 kN pistekuormalla taipuma ei saa ylittää 0,5 mm. Taipumaa piste-kuorman vaikutuksesta laskettaessa rakenteen omaa painoa ei huomioida. Taipumalle on määritetty korotuskerroin, jota voi hyödyntää pienien huoneiden yhteydessä. Määräävä tekijä on huoneen suurin sivumitta. Taipuma saa kasvaa 0,5 mm raja-arvosta, kun suurin sivumitta on alle kuusi metriä. Taipuma saa kasvaa siten, että viiden metrin suurimmalla sivumitalla taipuma saa olla 0,56 mm ja neljän metrin suurimmalla sivumitalla 1,29 mm. Kaavio ja laskentakaava löytyy Puurakenteiden suunnitteluohjeesta (Puurakenteiden suunnitteluohjeet: RIL 205-1-2009, 91).

Selkeyden ja vertailtavuuden vuoksi kaikkiin ristiinkantaviin lattioihin käytettiin samaa 48 mm x 220 mm C24-puuta. Puun valinta perustuu siihen, että suurimman 4 m x 6

m lattian värähtelymitoituksen vaadittu alle 0,5 mm taipuma pysyy tällä dimensiolla hallinnassa. Tämä on myös suurin mitallistettu puutavara, jota rautakaupasta on saatavissa. Taivutuskestävyys ja leikkauskestävyys tarkistettiin, vaikka se ei yleensä määrääväksi mitoitukseksi muodostukaan.

## 5.2 Vertailtavat yhteen suuntaan kantavat lattiamallit

Vertailukohtaa ristiinkantavalle välipohjalle haettiin yhteen suuntaan kantavista välipohjarakenteista. Yhteen suuntaan kantava palkisto kannattaa, jos mahdollista, sijoittaa lyhyemmän jännevälin suuntaisesti. Tässä mallissa tarkastellaan neljän metrin jännevälille soveltuvaa palkistoa, joka täyttää värähtelymitoituksen 1 kN pistekuorman keskellä palkkia sekä  $2,0 \text{ kN/m}^2$  taipumarajoituksen  $l / 400$ . Vertailukohdaksi valittiin kertopuinen palkisto sekä liimapuulla toteutettu palkisto. Kertopuupalkistoon lisätään yksi jäykistelinja jännevälin keskelle (kuva 4), liimapuupalkistossa jäykistelinjaa ei ole.



Kuva 4: Kertopuupalkisto jäykistelinjalla mallinnettuna Jigissä (Tukio 2013-11-22)

Ensimmäinen värähtelytarkastelun pistekuorman läpäisevä kertopuudimensio on 45 mm x 300 mm Kerto-S. Mikäli jäykistelinjaa ei rakennettaisi tai huomioitaisi laskelmissa, ensimmäinen mitoitusehdon täyttävä dimensio olisi 45 mm x 400 mm Kerto-S. Palkkijaolla  $k$  500 mm jäykistelinjan kanssa pistekuormituksen aiheuttaman taipuman arvo putoaa alle puoleen. Tasaisen kuorman taipuma on merkittävästi pienempi kuin samankokoisessa ristiinkantavassa rakenteessa.

Liimapuuta valittaessa ei huomioitu jäykistelinjaa keskelle. Tällöin ensimmäinen värähtelytarkastelun pistekuormamitoituksen läpäisevä palkkikoko on 90 mm x 315 mm GL28.

### 5.3 Tuloksia rakennemalleista

Värähtelymitoituksen puolen millimetrin taipumaraja on vaativa ja usein se muodostuu välipohjapalkistoa mitoitettaessa määrääväksi tekijäksi. Ristiinkantava rakenne jakaa kuormitusta tehokkaasti viereisille palkeille. Paras sivumittojen suhde on 1:1 eli neliö. Kun sivumittoja muutetaan neliömuodosta, alkavat toisen sivun pituuden kasvaessa taipumat kasvaa voimakkaasti. Sekä taulukossa että tekstissä on käytetty tarkoituksella liian tarkkoja taipuman ja alimman ominaistajuuden arvoja. Hertsit olisi mielekästä pyöristää täysiin kokonaislukuihin ja taipumissakin kymmenesosamillin esitystarkkuus olisi riittävä. Kuitenkin, koska tässä työssä on haettu mahdollisimman tarkalle mitoitettuja rakenteita ja rakenteiden vertailtavuutta, on ylitarkka esitystapa perusteltua.

Käytettäessä lapemitaltaan suurinta rautakauppatavarana saatavilla olevaa mitallistettua sahatavaraa, neljä kertaa kuuden metrin välipohjan 1 kN pistekuormasta aiheutuva taipuma on 0,44 mm. Myös rakenteen alin ominaistajuus on hyväksyttävissä oleva 9,7 Hz. Tasaisen 2,0 kN/m<sup>2</sup> aiheuttama taipuma on 7,85 mm. Taipuman raja-arvo  $l / 400$  on lyhyemmän sivun määrittäessä 10 mm, joten tämäkin taipuma-arvo on hyväksyttävä,  $l / 530$ .

Pidempää sivumittaa lyhennettäessä kaikki mitoittavat arvot paranevat. Tässä osiossa on käsitelty vertailtavuuden vuoksi vain lyhyemmältä sivumitaltaan neljän metrin välipohjarakenteita. Olennaiset tulokset on koottu helposti vertailtavaan taulukkoon sekä ristiinkantavista että yhteen suuntaan kantavista rakennevaihtoehdoista (taulukko 3).

Kertopuurakenteisessa välipohjassa poikittaisjäykistelinjan vaikutus on erittäin suuri. Jäykistyslinjan voidaan arvioida toimivan ristiinkantavan rakenteen tavoin, koska sen vaikutus on samansuuntainen. Osa kuormasta jakautuu viereisille palkeille. Tämä lisää kapasiteettia etenkin pistekuormitustapauksessa. Pistekuormituksen aiheuttama taipuma on 0,44 mm ja tasaisen kuorman taipuma 2,39 mm. Verrattaessa vastaavan kokoiseen ristiinkantavaan rakenteeseen, tasaisen kuorman aiheuttama taipuma jää

alle kolmasosaan. Alin ominaistajuus ylittää vaaditun raja-arvon 9 Hz, kertopuupalkistolla se on 11,6 Hz.

Taulukko 3: Taipumien ja alimman ominaistajuuden vertailutaulukko

	Pistek. 1kN taipuma [mm]	Tas. 2,0kN/m <sup>2</sup> taipuma [mm]	[ l / xxx ]	[Hz]
1.	0,44	7,85	L/530	9,7
2.	0,43	6,70	L/621	11,0
3.	0,38	4,71	L/883	13,4
4.	0,44	2,39	L/1676	11,6
5.	0,46	1,26	L/3180	16,9

1. Ristiinkantava, C24 48 mm x 220 mm, 4 m x 6 m
2. Ristiinkantava, C24 48 mm x 220 mm, 4 m x 5 m
3. Ristiinkantava, C24 48 mm x 220 mm, 4 m x 4 m
4. Yhteen suuntaan kantava, Kerto-S 45 mm x 300 mm, 4 m x 6 m
5. Yhteen suuntaan kantava, GL28 90 mm x 315 mm, 4 m x 6 m

GL28 Liimapuulla pistekuorman aiheuttama taipuma on 0,46 mm ja tasaisen kuorman taipuma 1,26 mm. Taipumaraja  $l / 400$  täyttyy helposti, käyttöaste on vain 13 %. Liimapuupalkille kasinlaskennalla saadut vastaavat taipuma-arvot ovat pistekuormalle 0,45 mm ja tasaiselle kuormalle 1,13 mm. Alin ominaistajuus on 16,9 Hz. Huomattavaa on liimapuupalkiston pieni taipuma tasaisen kuorman vaikutuksesta, niin verrattaessa ristiinkantavaan rakenteeseen kuin kertopuupalkkiratkaisuunkin.

Värähtelyyn olennaisesti vaikuttava tekijä on välipohjarakenteen oma paino sekä hyötykuorma. Tämän työn yhteydessä on käytetty lattian oman painon ja pitkäaikaisen hyötykuorman yhteisenä massana arvoa  $200 \text{ kg/m}^2$ . Tämä arvo on tarkoituksella suuri, sillä massan kasvaessa alin ominaistajuus pienenee. Painavampi rakenne on siis vaikeampi saada täyttämään värähtelyvaatimukset. Tällöin suurempi kokonaisuus on varmalla puolella. Lattiarakenteen oma paino esimerkiksi ristiinkantavan välipoh-

jan yhteydessä jää alle  $100 \text{ kg/m}^2$ . Huomioimalla palkiston paino, pintalevytys, alapinnan koolaus ja panelointi, mahdollinen villaeristys sekä välipohjalle kohdistuva väliseinistä johtuva kuorma, on välipohjan kokonaispaino noin  $80 \text{ kg/m}^2$ . Esimerkin vuoksi, ristiinkantavan neljä kertaa kuuden metrin välipohjan alin ominaisvärähtelytaajuus on  $200 \text{ kg/m}^2$  kokonaismassalla  $9,7 \text{ Hz}$ , kun  $80 \text{ kg/m}^2$  massalla se on  $15,3 \text{ Hz}$ .

Käytännön suunnittelussa tulee huomioida huoneen pisimmän sivun mitan mahdollistama taipuman korotuskerroin värähtelymitoituksessa, eli pistekuorman aiheuttamassa  $0,5 \text{ mm}$  taipumassa. Tällöin esimerkiksi tässä työssä tutkitulla  $48 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$  mitallistetulla sahatavaralla voitaisiin tehdä  $4,9 \text{ m} \times 4,9 \text{ m}$  lattia, taipuman ollessa sallittu  $0,57 \text{ mm}$ . Myös pintalevytyksen tuoma lisäkapasiteetti on syytä huomioida.

## 6 TARKASTELU TALOUDELLISESTA NÄKÖKULMASTA

Arvioitaessa rakenteen soveltuvuutta välipohjaksi, rakenteellisten vaatimusten täytyttyä ei voida jättää huomiotta taloudellista näkökulmaa. Pienien sahayrittäjien määrä tulee pieneneään reilusti vaatimuksen CE -merkinnästä tultua voimaan. Rautakaupasta on kuitenkin saatavissa mitallistettua sahatavaraa, ja nykyinen internetin mukanaan tuoma mahdollisuus vertailla hintoja ja tilata tavaraa kauempaakin asettaa rautakaupoille painetta pitää hinnat kilpailukykyisenä.

Tässä työssä tutkittujen välipohjien kantavien palkistojen hintavertailua varten etsittiin internetin puutavaraa tarjoavien kauppojen hintatietoja keväällä 2013. Hinnat on päivitetty 19.11.2013. Hintoja on etsitty Puukeskuksen internetsivuilta, taloon.com:sta sekä talotarvike.com:sta. Lisäksi käytiin 21.11.2013 kahdessa Kuopion seudun rautakaupassa kysymässä hintatietoja. Hintatiedot pyydettiin mitallistetulle C24 lujuusluokan 48 mm x 220 mm sahatavaralle, kertopuu Kerto-S 45 mm x 300 mm sekä liimapuulle GL28 90 mm x 315 mm. Kerto- ja liimapuun hinta ei juuri riipu dimensiosta, hinta määräytyy kuutioperusteisesti. Mitallistettu sahatavara on harvinaisesta dimensiostaan huolimatta huomattavan edullista kerto- ja liimapuuhun verrattuna. Rautakaupoista, joista hintatietoja kysyttiin, ei näitä puutavaroita löytynyt varastotavarana, kaikki olisivat olleet tilaustavaraa.

Kaikki hinnat on laskettu neljä kertaa kuuden metrin välipohjaa varten. Mitallistetun sahatavaran menekki on 106 m, kertopuun menekki jäykistyslinja huomioiden 58 m ja liimapuun menekki 52 m. Kiinnitystarvikkeita, palkkikenkiä tai muita oheistarvikkeita ei hinnassa ole huomioitu. Myöskään rahtia ei hintoihin ole huomioitu, mutta kaikkien ollessa tilaustavaraa, rahdin osuus lienee tasapuolinen kaikille vaihtoehdoille.

Halvin hinta mitallistetulle sahatavaralle löytyi internetistä, 3,90 euroa metriltä. Keskiarvohinta oli 4,50 euroa metriltä. Kerto- ja liimapuuta saa halvimminkin *kaupasta 1* Kuopion alueelta. Internet -kaupan hinta oli kallein molemmissa, kerto- ja liimapuun hinnassa. Kertopuuta saa halvimmillaan 14,30 eurolla per metri, keskiarvon ollessa 14,70 euroa sekä liimapuuta 21,30 euroa metriltä, keskiarvohinta 23,20 euroa metriltä. Hintojen hajonta ei ollut kovin suurta, hinnat ovat esillä taulukossa 4.

Taulukko 4: Palkistojen materiaalihintoja (Tukio 2013-11-21)

Hinnasto 2013-11-21	Netistä	Kauppa 1	Kauppa 2	Keskiarvo
Mitallistettu C24 48 x 220	3,9	5,2	4,5	4,5
Kerto 45 x 300	14,7	14,3	14,5	14,5
Liimapuu GL28 90 x 315	24,9	21,3	23,3	23,2

Tarkasteltaessa koko kantavan rakenteen hintaa, erot muodostuvat melko suuriksi. Vaikka mitallistetun sahatavaran menekki on suuri, halpa metrihintaa korvaa suuren menekin. Vertailun välipohjan materiaalikustannukset ristiinkantavalla rakenteella ovat 480 euroa, kertopuulla 850 euroa ja liimapuulla 1200 euroa. Ristiinkantavana rakenne tulisi maksamaan 40 % kalleimman, liimapuusta rakennetun välipohjan hinnasta. Kertopuuhunkin verrattuna hinta on vain hieman yli puolet kertopuuvälipohjan hinnasta. Hinnat ovat verrattavissa taulukossa 5. Vertailtaessa keskiarvohinnasta laskettuja kuutiointihintoja, mitallistettu sahatavara 426 euroa kuutiometri, kertopuu 1074 euroa kuutiometri ja liimapuu 818 euroa kuutiometri havaitaan, kuinka tuotteen jalostusaste nostaa tuotteen loppuhintaa.

Taulukko 5: Palkiston kokonaishinta (Tukio 2013-11-21)

Kantavien palkkien hinta			Hinta
Ristiinkantava	C 24 48 x 220	4 m x 6 m	<b>480</b>
Yhteen suuntaan kantava	Kerto-S 45 x 300	4 m x 6 m	<b>850</b>
Yhteen suuntaan kantava	GL 28 90 x 315	4 m x 6 m	<b>1200</b>

Materiaalin lisäksi rakenteen kokonaiskustannuksiin vaikuttaa työmäärä ja työn hinta. Työmäärän eroa ristiinkantavan ja yhteen suuntaan kantavan rakenteen välillä on mahdoton arvioida, mutta materiaalikustannuksissa säästää huomattavasti. Mahdollinen pieni työmäärän kasvu ei tätä säästöä kuluta.

## 7 LABORATORIOTUTKIMUKSET

Laboratoriotutkimuksilla oli tarkoituksena tutkia ristiinkantavan puurakenteen toimintaa mittaamalla taipumia ja verrata sitä tietokonemallinnuksella saatuihin tuloksiin. Tutkimukset tehtiin Savonia ammattikorkeakoulun Tekniikan yksikössä, puutekniikan laboratoriossa Opistotie 2:ssa. Tätä varten oli tilattu 40 kappaletta 48 mm x 123 mm L4200 mm C30-lujuusluokiteltua, mitallistettua sahatavaraa. Sahatavara oli siirretty laboratoriotiloihin tasaisiin ja kontrolloituihin olosuhteisiin kolmea viikkoa aiemmin, jotta materiaalin kosteus ehti tasaantumaan testausta varten. Kosteuden tasaantumista seurattiin mittaamalla puita Maxi Ligno piikkikosteusmittarilla ja Merlin HM8-WS25 pintakosteusmittarilla 1 ... 3 päivän välein, kunnes puut olivat saavuttaneet 12 ... 10 % kosteuden. Merlin HM8-WS25 on rikkomaton pintakosteusmittari, jolla tutkittava materiaali ei vahingoitu testitulosta otettaessa. Maxi Ligno on piikkikosteusmittari, joka on varustettu eristetyillä piikeillä. Tällöin voidaan määrittää syvyys, jolta mittaus tapahtuu.

Tutkimus tehtiin kaksiosaisena. Ensin testattiin puiden kimmomoduulit syrjästä taivuttamalla. Toisessa osassa testattiin ristiinkantavaa rakennetta teräsrakenteisen testipenkin avulla, jossa pidempi sivu oli 4,45 m ja lyhyempi sivu 3,07 m. Testipenkin koossa pyrittiin sivusuhteeseen 1:1,5. Kokeessa tutkittiin vain puurakenteiden ristiinkantavuuden vaikutusta, välipohjarakenteessa olevien toissijaisten rakenneosien, kuten levyjen, koolauspuiden ym. rakenteiden vaikutusta ei huomioitu. Laboratorioko-keet suoritettiin toukokuun 2013 lopussa.

### 7.1 Koejärjestelyt

*Standardin SFS-EN 408 + A1* mukaan testattavan materiaalin tulee täyttää seuraavat ominaisuudet.

#### 7.1.1 Materiaalin mittatarkkuus

Tutkittavan materiaalin mittojen täytyy olla 1% sisällä nimellismitasta. Mittaukset on tehtävä testiolosuhteissa ja mittaustuloksia ei tule ottaa 150 mm lähempää testikapaleen päätä. Mitta tulee ottaa kolmesta eri kohdasta. (SFS-EN 408 + A1, 8)

#### 7.1.2 Materiaalin kosteus

Materiaalin kosteusarvot on määritelty *standardissa EN 13183-1 + AC*. Näytteet otetaan kappaleesta mahdollisimman läheltä kuormituksen vaikutuskohtaa. Kosteuden määrittäminen oli jätettävä tämän testauksen yhteydessä tekemättä, koska testissä käytettyä puumateriaalia tarvittiin myöhemmässä vaiheessa tehtävissä lisätutkimuksissa.

### 7.1.3 Testiolosuhteet

Lämpötilan tulee olla testausajankohtana ( $20 \pm 2$ ) °C ja suhteellisen kosteuden ( $65 \pm 5$ ) %. Testattavan materiaalin tulee olla tasaantunut em. arvoihin. Tasaantumisen katsotaan tapahtuneen, kun kuuden tunnin mittausjaksolla painon muutos on alle 0,1%. (SFS-EN 408 + A1, 8).

Käytännössä normaali, ulkosäilytyksessä oleva kuiva mitallistettu sahatavara saavuttaa tasapainotilan kahdessa – kolmessa viikossa (Lehtikanto 2013-04-24). Testaus suoritettiin puolaboratoriossa 27. - 30.5.2013 edellä mainituissa olosuhteissa.

## 7.2 Testeissä käytettyjen puiden kimmomoduuli

Kaikki testauksissa käytetyt puut olivat koneellisesti lujuuslajiteltuja, lujuusluokkaa C30. Käytettävien puiden kimmomoduulit päätettiin testata, jotta voitaisiin arvioida mahdollisia eroja tietokonelaskennan tulosten ja testitulosten välillä.

### 7.2.1 Kimmomoduulin määrittäminen taivutuskokeella

Testikappaleen pituus on oltava vähintään 19 kertaa kappaleen korkeusmitta. Tässä tapauksessa käytetään 48 mm x 123 mm mitallistettua puuta, jota taivutetaan syrjästä. Tällöin taivutuskoe on tehtävä vähintään 2 337 mm pitkällä koekappaleella. Koekappaletta on kuormitettava kahden pisteen kuormituksena symmetrisesti vähintään 18 kertaa korkeusmitan tukiväliltä, eli 2 214 mm. Tukien ollessa alapuolella, yläpuolen kuormituspisteet sijaitsevat 738 mm tuelta, jos käytetään minimimittoja (kuvio 2). Kuormituspisteisiin asetetaan teräspalat, joiden koko ei saa olla enempää kuin puolet mittakappaleen korkeudesta. Kuormitus tehdään *nopeusohjauksella*, nopeuden tulee olla alle (0,003 h) mm/s, tässä noin 0,3 mm/s ja kuormituksen tulee katketa ennen kuin se saavuttaa arvon  $0,4 F_{\max,est}$ . Termi  $F_{\max,est}$  on laskennallinen taivutusmurtoarvo.

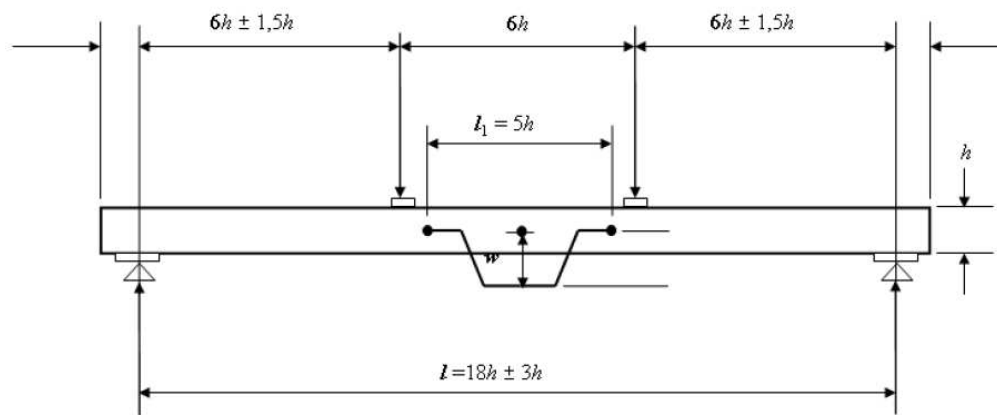


Figure 1 — Test arrangement for measuring local modulus of elasticity in bending

Kuvio 2: Testausjärjestely (SFS-EN 408, 8)

Kuormituslaitteen mittaustarkkuus tulee olla 99 %. Taipuma määritetään testikappaleen molemmiin puolin neutraaliakselin kohdasta mitattujen arvojen keskiarvona. Taipumaa mittaavan mittalaitteen tarkkuus tulee olla 1 %.

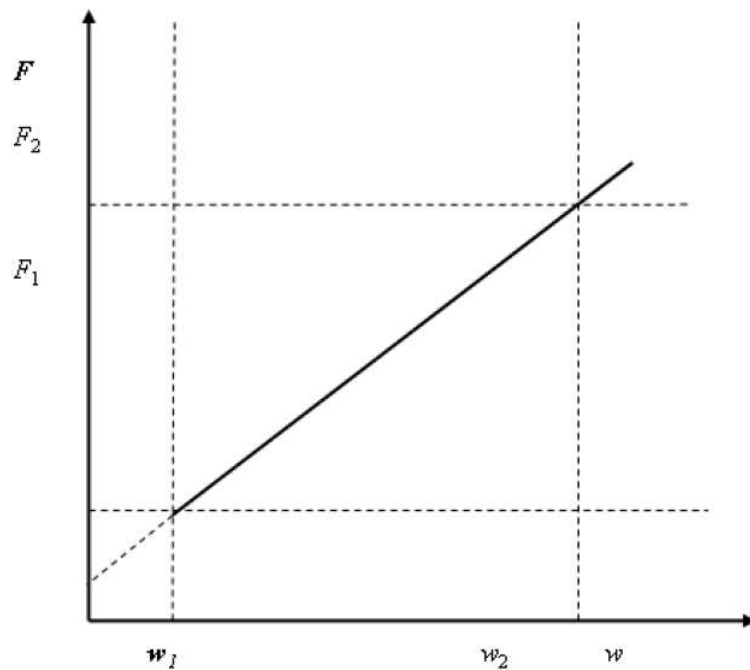
### 7.2.2 Tulosten esittäminen standardin mukaan

Tulokset taulukoidaan, ja niistä muodostetaan regressiokäyrä (kuvio 3). Tarkasteluväliksi valitaan  $0,1 F_{\max, \text{est}} - 0,4 F_{\max, \text{est}}$  (laskennallinen maksimitaivutusvoima). Kimmomoduuli lasketaan kaavalla 1:

$$\text{jossa } E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)} \quad (\text{kaava } )$$

$F_2 - F_1$  on voiman kasvu regressiokäyrällä 99 % tarkkuudella, ja  $w_2 - w_1$  on taipuman lisäys voimaa  $F_2 - F_1$  vastaavalla alueella.

Kimmomoduulin esitystarkkuus on 1 %.



#### Key

$F$  load

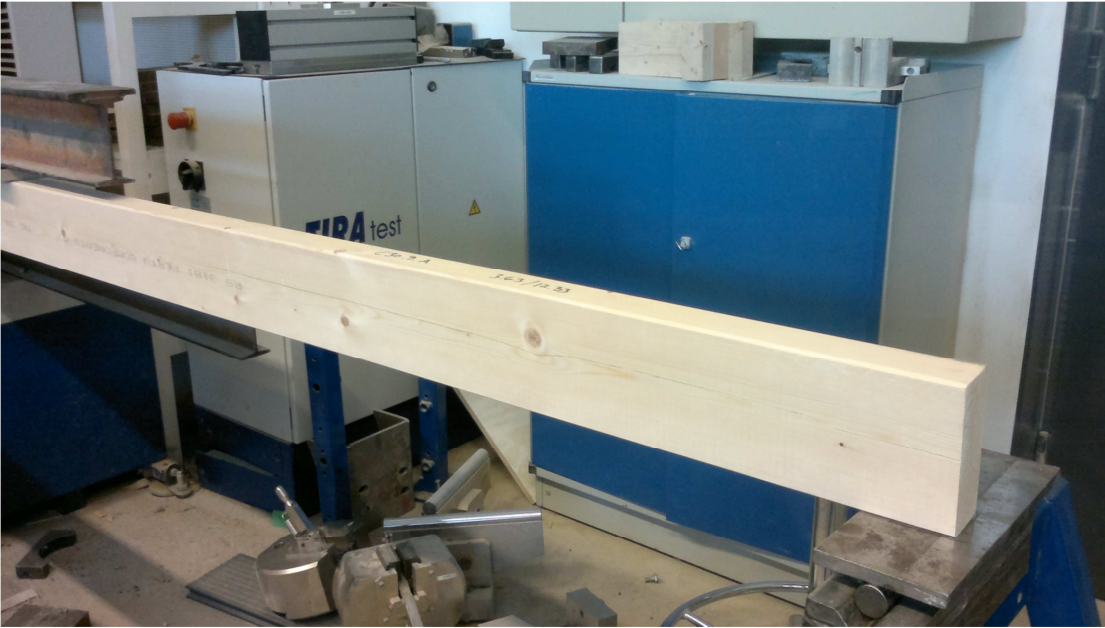
$w$  deformation

Figure 2 — Load-deformation graph within the range of elastic deformation

Kuvio 3: regressiolinja taipuman ja voiman suhde. (SFS-EN 408, 11)

#### 7.2.3 Puiden kimmomoduulitestauksen tulokset

Testauksessa käytettiin *TIRA test 28100* -koestuslaitetta. Testipuilla 2 ... 11 jänneväli oli 4 450 mm ja testipuilla 12 ... 23 jänneväli oli 3 070 mm. Kuormituspisteiden väli 1 233 mm, tuella puun pituussuuntainen kiertyminen oli mahdollista (kuva 5). Syöttönopeutena käytettiin 0,369 mm/s. Kuormitus lopetettiin, kun kuormitusvoima saavutti 2000 N tai taipuma 22 mm. Taipuman ala-arvo mitattiin testipuilla 2 ... 11 kuormitusvoiman 300 N kohdalla ja yläarvo kuormitusvoiman 1000 N kohdalla, sekä testipuiden 12 ... 23 ala-arvo 600 N ja yläarvo 2000 N kohdalla. Taipuma mitattiin Haidenheim -ekstensiometrillä. Standardista poiketen, taipuma mitattiin vain kuormituskohdasta, ei molemmin puolin kuormituskohdasta. Kimmomoduulitestaukset suoritettiin 27.5.2013, paikalla Juha Lehtikanto ja Arsi Tukio.



Kuva 5: Kimmomoduulin testijärjestely (Tukio 2013-05-27)

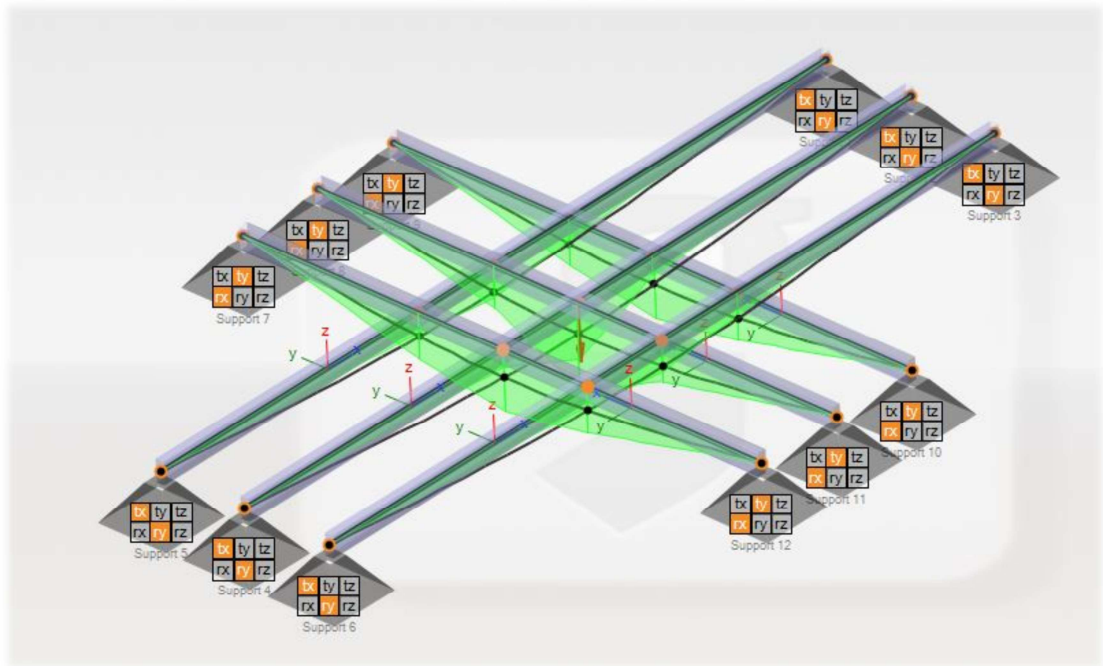
Puut yksilöitiin merkinnöin, syrjään merkittiin taivutuspuoli, taipuma-arvot ja saatu kimmomoduulin arvo. Kimmomoduulit vaihtelivat suuresti, vaikka kaikki puut oli ko-neellisesti lujuusluokiteltua C30-materiaalia. Heikoin testitulos löytyi 3 070 mm pit-kässä puussa numero 21, puolella A  $9\,144\text{ N/mm}^2$  ja puolella B  $8\,820\text{ N/mm}^2$ . Puolen B kimmomoduulin arvo ei täytä edes luokituksen C18 raja-arvoa  $9\,000\text{ N/mm}^2$ . Jäyk-kyydeltään vahvin testikappale saavutti kimmomoduulien arvot  $18\,533\text{ N/mm}^2$  puolel-la A ja  $18\,223\text{ N/mm}^2$  puolella B. Kaikkien testatun 23 puun kimmomoduulien kes-kiarvo oli  $13\,067\text{ N/mm}^2$ , joka ylittää C30-luokituksen rajan,  $12\,000\text{ N/mm}^2$ . Testattu-jen puiden kimmomoduulit on taulukoitu liitteeseen 2.

### 7.3 Ristiinkantavan rakenteen testaus

#### 7.3.1 Koejärjestelyt

Ristiinkantavaa rakennetta tutkittiin asettamalla teräksestä hitsatun  $4,45\text{ m} \times 3,07\text{ m}$  testipenkin päälle keskeisesti kolme puuta syrjälleen sekä pidempään että lyhyem-pään suuntaan (kuva 6). Teräspenkki asetoitiin siten, että yläpinta oli suorassa ja vaakatasossa. Eri tasoissa olevat puut kiinnitettiin toisiinsa kulmaveylin ja ruuvein siten, että  $3,07\text{ m}$  puuhun kulmavevy kiinnitettiin syrjään ja  $4,45\text{ m}$  puuhun lappee-seen (kuva 7). Kuhunkin liitokseen kiinnitettiin kaksi kulmavevyä. Jos asetteluvaihees-sa puut eivät koskettaneet liitoksen kohdalla toisiaan, väliin asetettiin ohuita viiluja

ennen kulmavevykiinnityksen tekemistä. Tällä pyrittiin siihen, ettei puihin tulisi esijännitystä. Koska ylemmässä tasossa olevat puut eivät tukeutuneet suoraan teräspankin päälle, asetettiin puiden ja teräspankin väliin vastaavan korkuinen tukipuu. Tukipuuta ei kiinnitetty kulmavevyllä testattaviin puihin, testipuut lepäsivät kannatinpuun päällä eikä kiertymistä tuella puun pituussuunnassa rajoitettu. Puut oli asetettu keskeltä keskelle –mitoituksella 500 mm välein.



Kuva 6: Ristiinkantavan rakenteen koejärjestely (Tukio 2013-04-29)

Erillisiä testattavia koerakenteita koottiin kolme kappaletta, jotka kuormituskokeen jälkeen käännettiin ja kuormitettiin toiselta puolelta. Tällä pyrittiin selvittämään, onko saman rakenteen kuormituksessa hajontaa puun sisäisestä rakenteesta johtuen. Kolmen testattavan rakenteen sarja ei ole tilastollisesti kovin luotettava, mutta sillä todettiin saatavan suuntaa tietokonemallin ja todellisen koetilanteen tulosten yhtenevyydestä.

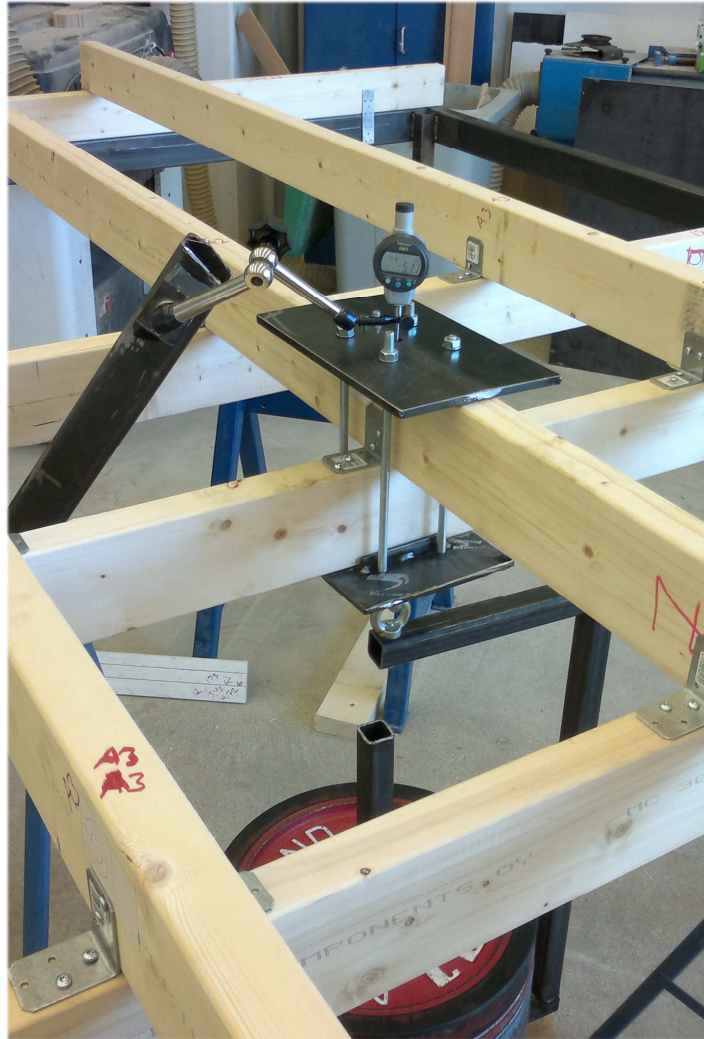
Kuormitus toteutettiin pistekuormituksena keskimmäisten puiden risteyskohdassa (kuva 7). Tätä varten hitsattiin teräksestä kuormituslaite, joka tukeutuu ylempään puuhun ja keskittää alla roikkuvan kuorman risteyskohtaan. Kuormituslaite kiinnitettiin palkistoon siten, ettei se kiristänyt liitosta ja siten aiheuttanut ylimääräistä jäykkyyttä. Kuormaksi asetettiin painonnostossa käytettäviä teräspainoja, joiden paino mitattiin

ennen kuormituskoetta. Painot punnittiin *Jadever JWA-30K* –mittalaitteella. Piste-kuormaksi muodostui 238,98 kg eli 2,35 kN mukaan lukien teräspainot ja ripustinlaitteisto. Kuormitus voitiin nostaa pumppukärryn avulla siten, että mittakellojen säätö, mittapisteiden vaihtaminen ja koekuormituksen toistaminen mahdollistui. Rakenteen kokoamisen jälkeen tehdyn ensimmäisen kuormituksen jälkeen todettiin poikkeuksetta, ettei rakenne palautunut täysin alkuperäiseen asemaansa. Tämä todettiin kuormituspisteessä tehtyjen mittausten perusteella. Tämän pääteltiin johtuvan puiden liitoksissa tapahtuvista siirtymistä eli löysyydet kiristyivät ensimmäisen kuormituksen vaikutuksesta. Varsinaisten mittausten yhteydessä rakenne palautui lähtöasemaan kuormituksen poistuessa.



Kuva 7: Koejärjestely (Tukio 2013-05-31)

Taipumien mittauksessa käytettiin seuraavia mittalaitteita: keskellä, kuormituspisteessä *M1 Mitutoyo* elektroninen mittakello (kuva 8) sekä muissa solmukohdissa mittapisteitä vaihdellen: *M2 Mitutoyo* analoginen mittakello, mittausalue 0...5 mm, *M3 Mitutoyo 3060* analoginen mittakello mittausalue 0...80 mm sekä merkittömät mittakellot *P1* ja *U1* mittausalue 0...50 mm. Mittakellojen alkulukema ennen kuormitusta sekä kuormituksen alainen loppulukema kirjattiin ylös paperille ja siirrettiin myöhemmin taulukkolaskentaohjelmaan.

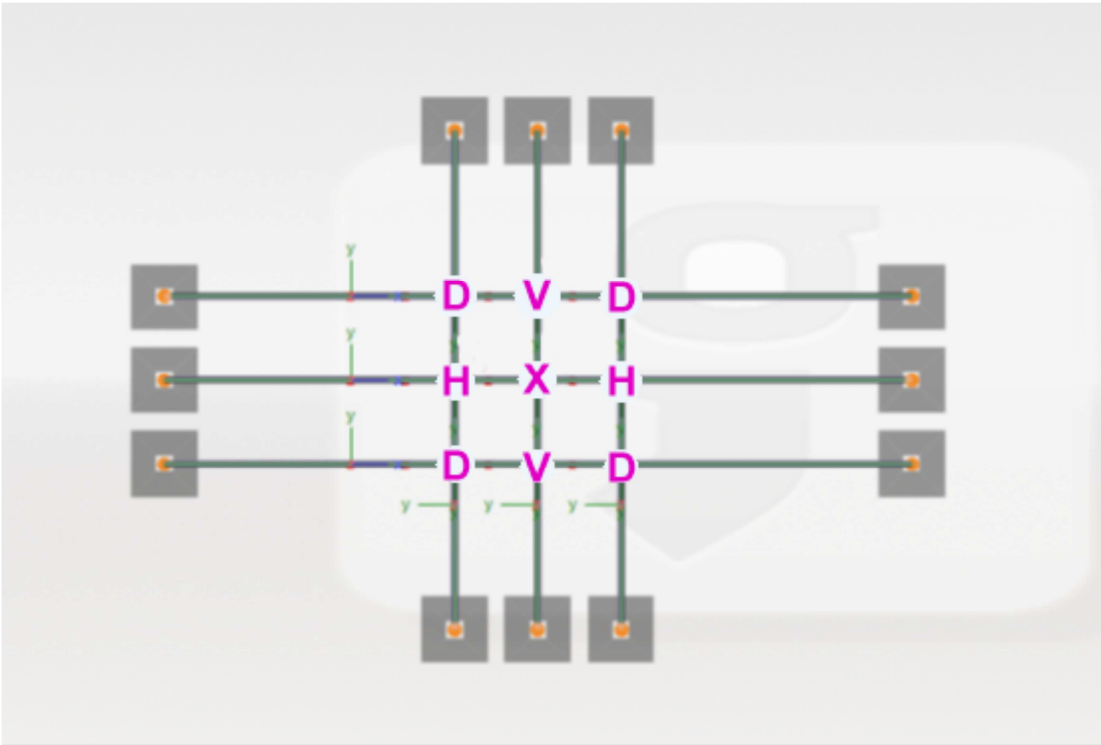


Kuva 8: elektroninen mittakello kuormituspisteessä (Tukio 2013-05-30)

### 7.3.2 Mittaustulokset ja tulosten arviointi

Testikokoonpanoja tehtiin kaikkiaan kolme kappaletta, ja ne kuormitettiin molemmin puolin. Näin saatiin kuusi testitilannetta. Määrä ei ole tilastollisesti kovin luotettava, mutta kuitenkin suuntaa antava. Tuloksista laskettiin keskiarvo kaikkien keskenään samoissa kohdissa sijainneiden pisteiden taipuma-arvoista. Lisäksi laskettiin keskihajonta, joka vaihteli 0,34 ... 0,44 välillä. Kaikkiaan mittaustuloksia oli 67 kappaletta. Mittaustulokset olivat hyvin yhteneviä. Ensimmäinen testiosio oli koekuormitus, jossa tarkennettiin mittausmenetelmää. Sen vuoksi kirjatut testitulokset ovat testi 2:sta testi 7:ään (liite 3). Testi 2:n tuloksissa havaittiin laskentataulukon syöttämisen yhteydessä, että mittapisteen A2 ja B1 tulokset ovat selvästi muista poikkeavia. Tuloksen kirjaamisessa todennäköisesti tapahtuneen virheen vuoksi tulokset jätettiin huomiomatta. Tukena toimineen teräskehikon taipumaa seurattiin yhden kuormituksen aika-

na, tällöin taipuma oli 0,03 mm. Tämän ei katsottu vaikuttavan tuloksiin merkittävästi. Mittaustuloksia arvioitiin neljän (4) eri asemassa olevan mittauspisteen avulla. Huomattavaa on, että esimerkiksi mittauspisteitä D on neljä kappaletta, jokaisessa kulmassa. Oheisessa kuvassa (kuva 9) on esitetty mittapisteiden sijainnit.



Kuva 9: Mittapisteiden sijainti testikokoonpanossa (Tukio 2013-06-05)

Kuormituspisteessä X tehtyjen mittausten taipuman keskiarvo oli 4,83 mm. *Jigin* mallin taipuma-arvo oli 4,94 mm ja *Robotin* mallin taipuma-arvo 5,10 mm. *Jigin* antama taipuma poikkesi mittaustuloksista vain 2%. Tätä voidaan pitää erinomaisena arvona, lisäksi muissa mittauspisteissä H, V ja D erot *Jigin* ja laboratoriomittausten välillä olivat 5%. *Robotin* antamat taipuma-arvot olivat hieman suurempia kuin *Jigin* taipuma-arvot, siten ne poikkesivat enemmän toteutuneista taipumista. *Robotin* taipuma-arvojen ja mittaustulosten ero vaihteli 6 ... 10 % välillä. Voidaan arvioida *Robotin* antavan hieman varmemmalla puolella olevia tuloksia, *Jigin* tulokset ovat tarkempia. Tuloksia on vertailtu taulukossa 6.

Näiden tutkimusten perusteella tietokonemallin ja käytännön kuormituskokeen yhtenevyys on hyvä, huomioiden puun ominaisuudet luonnon materiaalina. Tulosten tarkkuuden arviointia voisi lisätä syöttämällä ohjelmaan jokaisen puun kimmomoduulit

sekä määrittämällä ne tarkasti oikealle paikalleen, mutta tätä ei katsottu tarpeelliseksi.

Taulukko 6: Mittaus- ja mallinnustulosten vertailu

	X	D	V	H
Jigi	-4,94	-3,85	-4,16	-4,46
Robot	-5,10	-4,00	-4,32	-4,66
Mittaus	-4,83	-3,66	-3,96	-4,25
Jigi	102 %	105 %	105 %	105 %
Robot	106 %	109 %	109 %	110 %
Mittaus	100 %	100 %	100 %	100 %

## 8 YHTEENVETO JA POHDINTAA

Sahatavarasta rakennetun ristiinkantavan välipohjan tehokkaana jännevälinä voidaan pitää neljää metriä. Jos sivujen mitat ovat lähelle yhtenevät, voidaan päästä jopa viiden metrin jänneväliin. Tällöin tulee mahdollisesti tarpeelliseksi hyödyntää pintalevyn tuomaa lisäkapasiteettia. Myös alapintaa voisi hyödyntää, oikeanlainen alapinnan levytys ottaisi vastaan vetoa. Työmaalla tehtävä liimaus tosin antaa vain rajallisen lisähyödyn, koska kapasiteetista voidaan huomioida vain 50 % työmaaolosuhteissa tehdylle liimaukselle (Puurakenteiden suunnitteluohjeet: RIL 205-1-2009, 206).

Optimoitaessa puutavaran menekkiä ja puiden jäykkyysominaisuuksia, voisi kyseen tulla eri dimensioin toteutettava välipohjarakenne. Lyhyemmän jännevälin suuntaan olisi edullisempaa käyttää korkeampia palkkeja, pidempään suuntaan voisi käyttää matalampia palkkeja. Matala palkki jakaa rajallisesta jäykkyydestään huolimatta kuormaa vahvempien palkkien kesken. Myös lyhyemmän suunnan palkkien k-jaon tihentäminen voisi olla käyttökelpoinen ratkaisu. Kuitenkin vahvemmat ja tiheämmin asetetut palkit kannattaa aina asettaa lyhyemmän jännevälin suuntaan. Pidemmän suunnan palkkien sijainnilla toisen palkiston alla tai päällä ei näyttäisi olevan merkitystä, kuten ei myöskään solmupisteen kiinnitystavalla. Tärkeintä on, että liitokset eivät jousta pystysuunnassa, vaan palkit pysyvät kiinni toisissaan.

Kun ala on liian suuri toteutettavaksi ristiinkantavana pelkällä sahatavaralla, voi alan jakaa liimapuulla kahteen lohkokoon. Tällöin yhden kalliimman liimapuun hankinnalla voi mahdollistaa ristiinkantavan rakenteen käytön. Myös toteuttamiskelpoisen alan jakaminen liimapuupalkilla voi tulla kyseeseen, välipohjan paksuus pienenee ja käytettävä materiaali voi olla lapemitaltaan matalampaa.

Ristiinkantava rakenne on tässä tutkimuksessa käytettyjen mallien perusteella pienillä jänneväleillä toimiva ratkaisu. Parhaimmillaan se on sivumitoiltaan mahdollisimman yhtenevillä mitoilla, neliömäisissä pohjaratkaisuissa. Kun toisen suunnan jänneväli kasvaa, pidemmän sivun palkkien kyky kantaa kuormaa heikkenee nopeasti.

Nykyaikaisessa uudisrakentamisessa ristiinkantavan puurakenteen vahvuudet ovat lyhyehköillä, alle neljän metrin jänneväleillä. Materiaalikulussa voi säästää huomattavastikin, kun rakennetta verrataan vaihtoehtoiseen kerto- tai liimapuuratkaisuun. Markkinoilla on runsaasti vaihtoehtoja yhteen suuntaan kantavan välipohjan toteuttamiseksi. Liima- ja kertopuuta sekä uumapalkkeja on saatavissa laaja valikoima eri

dimensioita. Näistä on helppo valikoida omaan käyttötarpeeseen sopiva materiaali, mutta korkeammin jalostetulle tuotteelle tulee myös 2 ... 3 kertaa enemmän hintaa.

Korjauskohteessa ristiinkantava rakenne on käyttökelpoinen. Saneerauskohteessa olemassa olevia rakenteita kannattaa pyrkiä hyödyntämään. Rakentamalla olemassa olevien kannattimien lisäksi oikein mitoitettu ristiinkantava kenttä, se jakaa tehokkaasti kuormaa ja parantaa välipohjan rakenteellisia ominaisuuksia.

Jokaisessa rakennuskohteessa on omat erityispiirteensä, eikä tällaisella yksinkertaistetulla muutaman sivumitan sisältävän arvion perusteella voida saada yleispätevää ratkaisua määritellyksi. Esimerkiksi aukotus ristiinkantavan rakenteen yhteydessä voi tuoda odottamattomia vaikeuksia suunnitteluun. Lisätutkimuksen aiheita ristiinkantavasta rakenteesta varmasti löytyy, esimerkiksi suurempia, todellisia kohteita.

Ristiinkantavan rakenteen mitoittamiseen tarvitaan analyysiohjelmiä. Värähtelymitoitus voidaan suorittaa perinteisellä käsinlaskennalla. Lisäämällä merkittävästi laboratoriomittauksia, olisi taipumien suhteista ja etäisyyksistä suurimman taipuman kohtaan voinut saada yhtenevyyttä. Tätä kautta olisi voitu päästä käsiksi dimension ja jännevälin suhdetaulukointiin, mutta siitä saatavat hyödyt olisivat kyseenalaisia. Voidaan todeta, että nykyaikaisten mitoitusohjelmien avulla on helppo vertailla tämän tyyppisen rakenteen toimintaa. Materiaaleja, niiden lujuuksia ja mittasuhteita on helppo muuttaa. Tällöin sopivan ja kustannustehokkaan ratkaisun hakeminen on vaivatonta. Myös internetin mahdollistama hintojen haku ja vertailu helpottaa kokonaisuudessaan ratkaisun valintaa.

## LÄHTEET

A&S Virtual Systems Oy:n www-sivu [viitattu 2013-10-17.] Saatavissa <http://www.iigi-soft.fi/fi/etusivu/>

LEHTIKANTO, Juha 2013-4-24. Laboratorioinsinööri. [Suullinen tiedonanto.] Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELUOHJE: RIL 205-1-2009. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry

RAKENNUSTIETO OY. 1998. Puurakenteet Step2, rakennedetaljit. Tampere. Tammer-Paino Oy.

RUNKO, HIRSI-, ASUINRAKENNUKSEN, SISÄMITAT 620 X 495, 1:100. RT 822.11. Rakennustieto Oy. Heinäkuu 1943. [viitattu 2013-05-14]. Saatavissa: [https://www-rakennustieto-fi.ezproxy.savonia-amk.fi:2443/kortistot/tuotteet/RT\\_7125.html.stx](https://www-rakennustieto-fi.ezproxy.savonia-amk.fi:2443/kortistot/tuotteet/RT_7125.html.stx)

SFS-EN 408, 2007. Suomen standardisoimisliitto SFS.

TUKIO, Arsi 2012-2013. Kaikki tässä työssä esiintyvät digikuvat. [digikuva]. Sijainti: Lapinlahti: Tekijän sähköiset kokoelmat.

Vertex systems Oy:n www-sivu [viitattu 2013-10-23.] Saatavissa: [http://www2.vertex.fi/web/fi/toimialat\\_ja\\_tuotteet](http://www2.vertex.fi/web/fi/toimialat_ja_tuotteet)

**Liite 1: RT-kortti vuodelta 1943. Hirsitalon rakenteiden periaatekuva.**

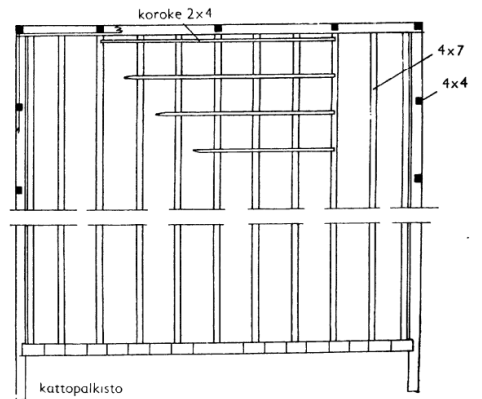
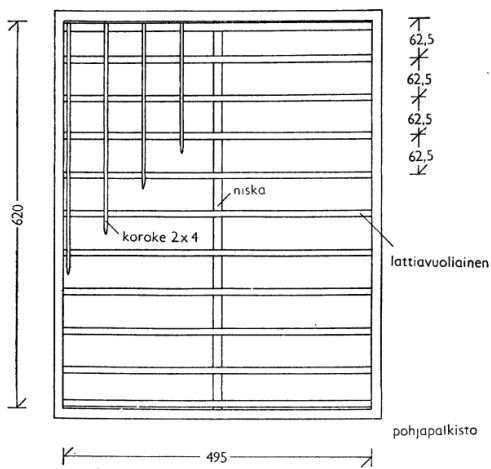
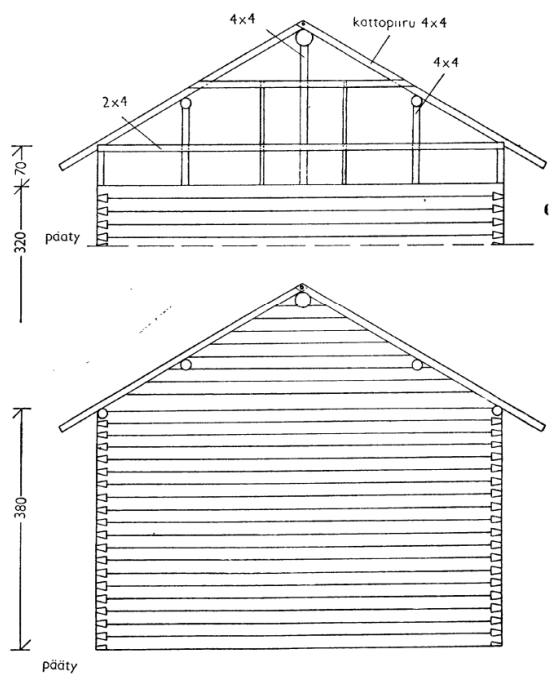
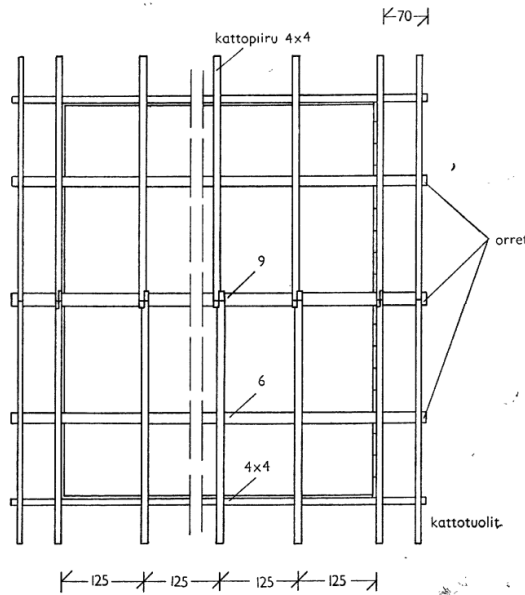
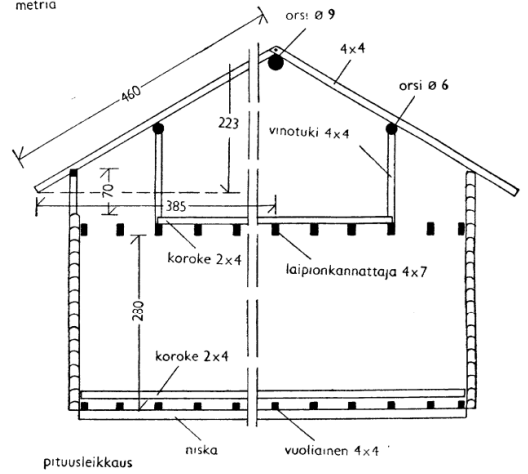
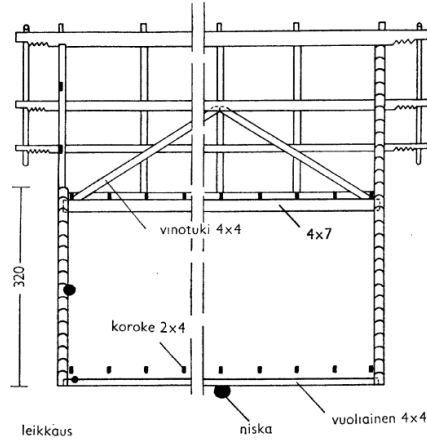
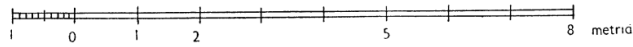
DK 624.02

**RUNKO, HIRSI-, asuinrakennuksen, sisämitat 620 X 495, 1 : 100**

Heinäkuu 1943  
**RT 822.11**

Soveltuu asevelitaloon 43 S, RT 962.11

mittakaava 1: 100



**Puutavaramitat tuumina**

Jälkipainos kielletään

Suomen Arkkitehtiliitto Finlands Arkitektförbund  
Helsinki K, Bulevardi 1 puh. 65 758 65 158





## Liite 3: Testitulokset, ristiinkantavan rakenteen taipumat

Taipumamittaukset, 31.5.2013

s. 1

Testi 2				
M1	B2	0,00	-4,97	-4,97
M2	B1	4,92	0,35	-4,57
M3	C1	44,00	40,00	-4,00
U1	A2	12,00	16,34	-4,34
P1	C3	8,78	4,93	-3,85
M1	B2	0,00	-5,05	-5,05
P1	A3	4,50	0,72	-3,78
U1	B3	12,00	16,50	-4,50
M3	C1	42,40	38,50	-3,90
M2	B1			
M1	B2	0,10	-5,07	-5,17
P1	A2			
U1	A1	12,06	16,98	-4,92
M3	C1	42,26	38,60	-3,66
Testi 3				
M1	B2T	0,00	-5,06	-5,06
M3	A1T	30,50	26,82	-3,68
P1	B1T	6,63	2,60	-4,03
U1	C2T	12,00	16,15	-4,15
M1	B2T	0,00	-4,92	-4,92
U1	C3T	12,00	15,87	-3,87
P1	A2T	6,00	2,80	-3,20
M3	A3T	80,50	77,78	-2,72
M2	teräsp.	1,80	1,77	-0,03
M1	B2T	0,00	-4,91	-4,91
U1	B3T	12,00	16,25	-4,25
P1	C1T	6,60	3,84	-2,76
M3	B1T	80,00	75,67	-4,33

Taipumamittaukset, 31.5.2013

s. 2

Mittakello	Solmu	Mittauksen alussa	Mittauksen lopussa	Muutos
Testi 4				
M1	E2	0,00	-4,60	-4,60
P1	F1	5,00	1,44	-3,56
M3	E1	80,00	75,90	-4,10
U1	E3	15,00	19,10	-4,10
P1	F2	5,00	1,29	-3,71
M3	F3	17,00	13,52	-3,48
M1	E2	0,00	-4,61	-4,61
U1	D3	10,00	13,59	-3,59
M1	E2	0,00	-4,65	-4,65
M3	D1	70,00	66,46	-3,54
U1	D2	5,00	8,96	-3,96
P1	F2	5,00	1,19	-3,81
Testi 5				
M1	E2K	0,00	-4,32	-4,32
U1	F1K	12,00	15,40	-3,40
P1	D3K	7,69	4,45	-3,24
M3	D2K	37,00	33,45	-3,55
M1	E2K	0,00	-4,27	-4,27
U1	F2K	6,00	9,55	-3,55
M3	E1K	42,00	38,15	-3,85
P1	D1K	4,00	0,77	-3,23
M1	E2K	0,00	-4,27	-4,27
U1	E3K	10,00	13,72	-3,72
U1	F3K	12,00	15,23	-3,23

Taipumamittaukset, 31.5.2013

s. 3

Mittakello	Solmu	Mittauksen alussa	Mittauksen lopussa	Muutos
Testi 6				
M1	H2	0,00	-4,97	-4,97
M3	J1	48,00	44,50	-3,50
P1	H1	10,20	6,40	-3,80
U1	G2	4,00	8,00	-4,00
P2	G3	5,00	8,95	-3,95
M1	H2	0,00	-4,90	-4,90
P2	H3	5,00	9,69	-4,69
U1	G1	15,00	18,50	-3,50
M3	J3	35,00	31,09	-3,91
P1	J2	10,18	5,75	-4,43
Testi 7				
M1	H2T	0,00	-5,30	-5,30
P1	G3T	8,00	4,17	-3,83
M3	G2T	13,00	8,67	-4,33
U1	H3T	11,00	15,78	-4,78
P2	J3T	5,00	9,12	-4,12
M1	H2T	0,00	-5,25	-5,25
U1	J2T	10,00	14,46	-4,46
P2	J1T	3,00	6,97	-3,97
M3	H1T	22,00	17,60	-4,40
P1	G1T	7,00	3,15	-3,85