

Jarno Kolehmainen

# Jäykistävänä rakenteena toimivien CLT-levyjen välisten liitosten laskenta- ja tietomallinnus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

19.4.2013

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Jarno Kolehmainen Jäykistävänä rakenteena toimivien CLT-levyjen välisten liitosten laskenta- ja tietomallinnus 46 sivua + 3 liitettä 19.4.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Osastonjohtaja Juha Jääskeläinen Lehtori Mervi Toivonen
<p>Tämä insinöörytyö tehtiin konsultointi- ja suunnittelutoimisto Pöry Finland Oy:lle. Työ toteutettiin alkuvuodesta 2013 yrityksen julkisten rakennusten rakennesuunnittelun osastolla Espoon Otaniemessä.</p> <p>Monikerrosrakentamisen ja muuntojoustavuuden vaatimusten lisääntyessä tuulikuormien ja jännevälien kasvaminen tulee entistä merkitsevämmäksi tekijäksi rakennuksen suunnittelussa. Pitkiä jännevälejä voidaan käytännössä puurakenteissa toteuttaa vain esivalmistettuja puuelementtejä käyttämällä eikä levyjäykisteiseen puurakennukseen kohdistuvien vaakakuormien hallintaa voida mitoittaa tarkasti ilman liitossiirtymien huomioon ottamista. Tällaisia puuelementtejä voidaan valmistaa mm. ristiinlaminoiduista massiivipuulevyistä (CLT).</p> <p>Työn tavoitteena oli luoda ohjeistus Robot Structural Analysis 2012 -laskentamalliohjelmiston lineaaristen vapausasteiden käyttöön ja näiden soveltamiseen vastaamaan 2D-kuorielementeissä jäykkydeltään erilaisia liitosjärjestelmiä ja -tyyppejä, joita CLT-levyistä koostuvien pysty- ja vaakarakenteiden välillä käytetään. Lisäksi tavoitteena oli luoda vastaavista liitostyypeistä Tekla Structures 18.1 -tietomallinnusohjelmiston kanssa toimivat komponentit.</p> <p>Kuorielementtien käyttäytymistä testilaskentamallissa verrattiin käsin laskennasta saatuihin tuloksiin. Robot-ohje kirjoitettiin huomioiden vertailusta tehdyt johtopäätelmät ja mahdolliset ongelmakohdat mallintamisessa ratkaistiin mahdollisimman käyttäjäystävällisin menetelmin. Tekla-komponenttien ohjelmoinnin tukemiseksi tutustuttiin <i>Tekla Custom Components</i> -koulutusmateriaaliin sekä luotiin testitietomalli, jolla varmistettiin komponenttien toimivuus.</p> <p>Tuloksista pääteltiin laskentamallin toteuttamisen kuorimallina soveltuvan CLT-rakenteiden mallintamiseen. Laskentamallista saatuihin tuloksiin tulisi suhtautua kuitenkin varauksella sillä eri kuorielementtien jakamat yhteiset solmupisteet elementtien saumoissa aiheuttivat epä johdonmukaisia sivusiirtymiä levykentissä. Työssä esitellyn mallinnusmenetelmän sijaan pohdittiin lyhyesti vaihtoehtoista menetelmää, jonka käytännöllisyydestä tulisi kuitenkin tehdä jatkotutkimusta.</p>	
Avainsanat	clt, puuelementti, custom component, robot, lineaarinen vapausaste, platform, balloon, laskentamalli, tietomalli, bim

Author(s) Title Number of Pages Date	Jarno Kolehmainen BIM and FEM modelling connections between CLT panels which work as diaphragms of a structure 46 pages + 3 appendices 19 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Juha Jääskeläinen, Division Manager Mervi Toivonen, Senior Lecturer
<p>This thesis was made for Pöyry Finland Oy, a company specializing in consulting and structural engineering. This thesis was written in the spring of 2013 at the structural engineering section of the public buildings division of said company.</p> <p>As buildings are being built taller and more flexibility is required from the arrangement of spaces, also the wind loads and construction spans grow ever larger. To reach these larger spans in wooden buildings the only solution is to use prefabricated wood elements such as the ones made from CLT panels. Also when designing structures intended to bear the increasing lateral loads the deflections generated by the flexible mechanical connection between panels can no longer be ignored.</p> <p>The objective of this thesis is to give tools for structural engineers to take these deflections into account when using Robot Structural Analysis 2012 calculation modelling in the form of a directive. This directive or a so-called help file instructs the user in the utilization of elastic linear releases representing connections between vertical and horizontal CLT structures which are created using 2D elements in Robot. Also some of these connections were programmed into components or connection macros which are to be used in Tekla Structures 18.1.</p> <p>The behaviour of 2D elements in a FEM model was compared to results acquired by manual calculations. The help file was compiled taking into account the conclusions made from this comparison, and so that the potential problems with modelling process could be bypassed in a user friendly way. The components for TS were created with Tekla Custom Components and their functionality was tested using an arbitrary information model as a test bench.</p> <p>As a conclusion, it was gathered that analysing CLT structures using 2D elements in calculation modelling is a viable option. Still, the results derived from such a FEM model should be analysed with some criticism, since the single nodes that some elements share between them tend to cause discrepancies in the deflections of structures. It is advisable that future studies would take into account a method differing from usual practises when creating a calculation model with a lot of elastic releases.</p>	
Keywords	clt, massive wood, custom component, robot, linear release, platform, balloon, calculation model, information model, bim

# Sisällys

## Selitteet

1	Johdanto	1
2	Rungon jäykistäminen ristiinliimatuilla massiivipuulevyillä	2
2.1	Puurakennuksen rungon jäykistyksen suunnittelu yleisesti	3
2.2	Ristiinliimatun rakenteen ja liitossiirtymien vaikutus levykentän tasosuuntaiseen jäykkyyteen	5
3	Jäykistävien CLT-rakenteiden liitostyyppit	6
3.1	Leikkausrasitetut liitokset	7
3.1.1	Levyjen väliset liitokset kentässä	7
3.1.2	Vaakatason liittyminen pystyrunkoon	8
3.2	Momenttijatkokset	11
4	CLT-levyjen väliset liitokset tietomallintamisessa	11
4.1	TS-komponentin valmistaminen	12
4.2	Komponentin toiminta ja käyttö	14
5	Jäykistävien rakenteiden ja näiden välisten liitosten jäykkyyden määrittäminen laskentamallia varten	18
5.1	Levyn jäykkyys	19
5.2	Liitoksen jäykkyys	21
5.3	Siirtymien vertailu liitoksiltaan jäykkään rakenteeseen	22
6	CLT-levyt ja jäykistävien rakenteiden väliset liitokset laskentamallintamisessa Robotilla	24
6.1	Suunnittelun kulku	24
6.2	Robot-laskentamallin määrittäminen	25
6.2.1	Ristiinliimatun rakenteen huomiointi laskentamallissa	26
6.2.2	Liitosjäykkyyden huomiointi laskentamallissa	28
6.2.3	Liitosjäykkyydet testimallin tapauksissa	32
6.3	Vaihtoehtoinen mallinnusmenetelmä	43
7	Yhteenveto	44
	Lähteet	46

## Liitteet

Liite 1. Puuinfon tekninen tiedote – CLT Cross Laminated Timber

Liite 2. Tiivistetty ohje liitosten Robot-mallintamiseen

Liite 3. Ote A&S Virtual Systems Oy:n tuottamasta taulukkolaskentapohjasta

## Selitteet

CLT-levy	sahatavarasta koostuvista kerroksista valmistettu ristiinliimattu massiivipuulevy
Erkanema	liitossiirtymä liitettyä saumaa kohtisuorassa suunnassa
FEM-malli	Finite Element Method -tekniikkaa laskentaan käytävä laskentamalli
Kuorielementti	kaksiulotteinen elementti laskentamallinnuksessa
Kuorimalli	kuorielementeistä koostuva laskentamalli
Levykenttä	erillisistä, toisiinsa mekaanisesti liitetyistä, levyistä koostuva pysty- tai vaakataso
Liitospinta	CLT-levyn koostavien lautojen väliset pinnat
Liitossiirtymä	liitettävien rakenteiden liitossauman suuntainen siirtymä, joka aiheutuu mekaanisten liitosten tai liitettävän materiaalin joustamisesta
Liitosjäykkyys	mekaanisten liitososien liitossiirtymää vastustava jäykkyys
Momenttijatkos	tason normaalin ympäri vaikuttavaa momenttia levyltä toiselle siirtävä liitos
Solidielementti	kolmiulotteinen elementti laskentamallinnuksessa

## 1 Johdanto

Pöyry on kansainvälinen konsultointi- ja suunnittelutoimisto. Palveluntarjonta Suomessa kattaa kaikki konsernin ydinosaamisalueet, joihin kuuluu muun muassa rakentamisen palvelut. Pöyry on myös yksi Finnish Green Building Councilin perustajajäsenistä ja kiinnostunut edistämään kestävästä kehitystä keskittyen muun muassa energia- ja tilatehokkuuden synergioihin ja nykyisen rakennuskannan ympäristötehokkaaseen hyödyntämiseen. Puurakentaminen on aina koettu ”vihreänä” vaihtoehtona ja Pöyry haluaisikin parantaa osaamistaan puurakentamisen alalla ja samalla saada jalansijaa keskisuurten rakennusten suunnittelun markkinoilla.

Monikerrosrakentamisen lisääntyessä tuulikuormien kasvaminen tulee entistä merkittävämmäksi tekijäksi rakennuksen suunnittelussa. Lisäksi toimitilarakentamisen muuntojoustavuuden vaatimusten lisääntyessä rakenteiden jännevälit kasvavat. Pitkiä jännevälejä voidaan käytännössä puurakenteissa toteuttaa vain esivalmistettuja puuelementtejä käyttämällä eikä levyjäykisteiseen puurakennukseen kohdistuvien vaakakuormien hallintaa voida mitoittaa tarkasti ilman liitossiirtymien huomioon ottamista. Pöyryn toimesta näitä puurakentamisen näkökulmia ja toimintamalleja on jo aikaisemmin tutkittu. Tutkimusten perusteella on muun muassa päädytty muutamiin erilaisiin, ristiinliimattujen massiivipuulevyjen (engl. Cross Laminated Timber, CLT) välisiin liitosratkaisuihin käyttökelpoisina jäykistävän rakenteen osina. Näiden liitosten käyttäytymistä tai soveltamista 2D-laskentamallissa ole kuitenkin vielä tutkittu eikä jäykistävien CLT-rakenteiden välisiä liitoskomponentteja ole saatavilla Tekla Structures - tietomallinnusohjelmistolle.

Esitutkimuksessa tutustutaan muun muassa Jarkko Luntan, Pöyrylle tuottamaan, diplomityöhön Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena [4]. Diplomityössä määritellään osittain tässä työssä käsiteltävät CLT-levyjen liitostyypit ja liitosten jäykkyydet sekä 3D-laskentamallin reunaehdot, joita imitoimalla voidaan tuottaa vertailukelpoisia tuloksia 2D-laskentamallista.

Esitutkimusten jälkeen tuotetaan yksinkertainen testilaskentamalli Robot Structural Analysis 2012 -ohjelmistolla, jonka elementeille sovelletaan CLT-levyille sekä levyjen välisille liitoksille määritettyjä jäykkyyksiä, ja todennetaan tulokset vertaamalla niitä

käsin laskennalla saatuihin tuloksiin. Näin voidaan monimutkaisemmistakin, yhteisillä parametreilla luoduista laskentamalleista saadut tulokset olettaa oikeiksi.

Jotta halutut liitoskomponentit Tekla Structures 18.1 -ohjelmistolle saadaan luotua, tutustuu opinnäytetyön tekijä Tekla Custom Components -ohjelmointiin. Komponenttien valmistuttua todennetaan niiden toimivuus soveltamalla niitä erilaisiin rakenteisiin testitietomallissa.

Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa ohjeistus CLT-levyjen mallintamisesta Robot Structural Analysis -ohjelmistolla, kun levyjen väliset liitossiirtymät otetaan CLT-levyn ristiinliimatun rakenteen ohella huomioon. Lisäksi tavoitteena on tuottaa käytännöllisimmistä liitostyypeistä Tekla Structures -tietomallinnusohjelmiston kanssa yhteensopivat liitoskomponentit.

Tutkimus ja ohjeet pyritään toteuttamaan rakennesuunnittelijan, joka työssään käyttää Robot-laskentamalliohjelmistoa, näkökulmasta. Rakennesuunnittelijan tulisi tuotetun ohjeen avulla kyetä luomaan laskentamalli, joka ottaa huomioon rakennusosien siirtymät määrittäessä jäykistyksestä aiheutuvia rasituksia liitoksille ja rakenteille. Lisäksi rakennesuunnittelijan on mielekkäämpi mallintaa oikeanlaisia liitoksia CLT-levyjen välille – Tekla-tietomallinnusohjelmistoa käytettäessä – lopputyön aikana tuotettujen, lähes automaattisesti toimivien komponenttien avulla.

Työssä paneudutaan pääsääntöisesti vaakarakenteisiin ja vaaka- ja pystyrakenteiden välisiin liitoksiin rungon jäykistävinä osina ja siitä rajataan pois liitostyypit, joiden todetaan olevan rakentamisessa vähemmän käytettyjä. Työssä viitataan jatkossa Robot Structural Analysis 2012 -ohjelmistoon termillä Robot ja Tekla Structures 18.1 -ohjelmistoon termillä TS.

## **2 Rungon jäykistäminen ristiinliimatuilla massiivipuulevyillä**

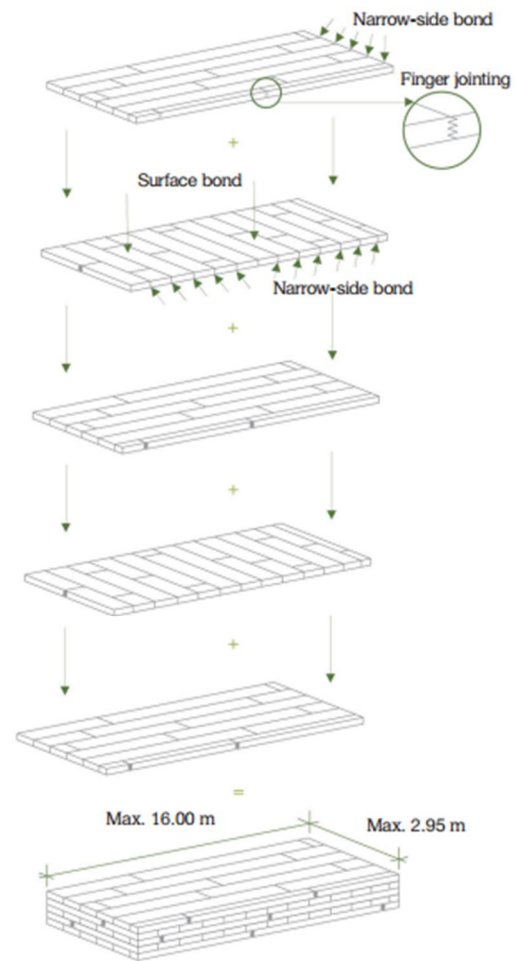
Jäykistykseen suunnittelu on tärkeä osa rakenteiden suunnittelua. Jäykistävän rungon tehtävänä on siirtää pystykuormien lisäksi esimerkiksi tuulesta syntyvät ulkoiset vaakakuormat hallitusti perustuksille. Jäykistys käsittää myös yksittäisten rakenneosien muodostaman kokonaisuuden sisäisen jäykistykseen eli rakenneosakohtaisen kestävyys sisäisiä, kuten mittaepätarkkuuksista syntyviä vaakakuormia vastaan. Jäykistysjärjes-



telmän tulee täyttää sekä murto- että käyttörajatilan vaatimukset turvallisuudessa, ihmisten mukavuudessa ja rakennuksen ulkonäön säilymisessä. [1, s. 9 – 10.]

### CLT

CLT-levy (engl. Cross Laminated Timber) eli ristiinliimattu massiivipuulevy on ristikkin liimatuista lamelli- eli puulevykerroksista koostuva rakennuslevy. Sijoittelemalla puulevykerrokset ristiin eli muuttamalla puun syysuuntaa kerroksittain luodaan normaalia rakennepuuta lujempi materiaali, joka osittain vastustaa puulle luonnollisia muodonmuutoksia, kuten kutistumia. Kerrosten paksuudet vaihtelevat ja kerrosten lukumäärä on yleisimmin kolme, viisi tai seitsemän. Levykerrosten materiaalina käytetään höylättyjä mänty- tai kuusilautoja, joiden lujuusluokka on vähintään C16. Levyjen maksimimitat ovat pituudeltaan 16,5 m ja leveydeltään 2,95 – 3 m. Maksimipaksuus vaihtelee valmistajakohtaisesti 350 – 500 mm välillä. [2.]



Tässä työssä on pääasiallisesti käytetty Stora Enson valmistamien CLT-levyjen ja Puuinfon teknisen hyväksynnän (liite 1) ilmoittamia parametreja.



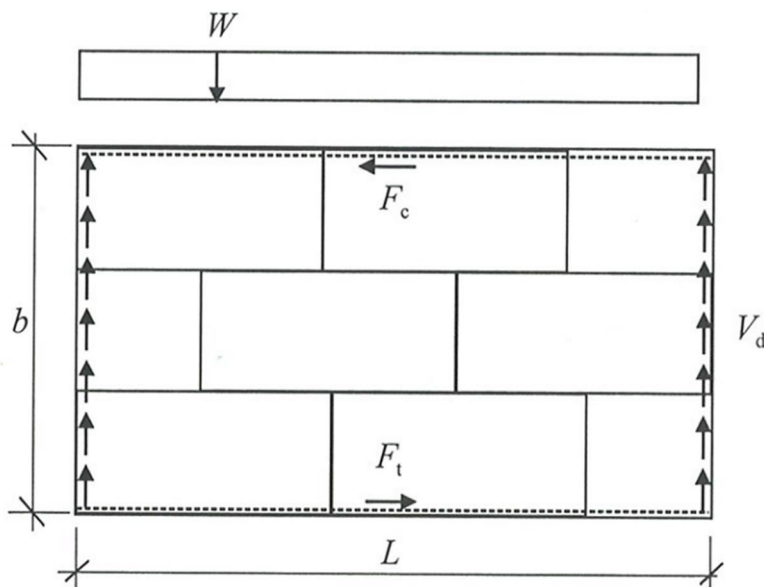
Kuva 1. CLT-levyn rakenne [3].

#### 2.1 Puurakennuksen rungon jäykistyksen suunnittelu yleisesti

Pystyrakenteiden levyjäykistys muodostuu kantavan puurungon yhteyteen asennettavista puu- tai kipsilevyistä tai myös pystykuormat kantavista puulevyistä, kuten ristiinliimatuista massiivipuulevyistä tai muista elementeistä. Vaakatason aiheuttamat leikka-

usvoimat siirretään pystyrakenteelle liittimien, kuten naulojen ja ruuvien avulla, ja pystyrakenne ankkuroidaan perustuksiin nousun estämiseksi. [1, s. 20.]

Rakennuksen jokainen kerros tulee olla myös vaakajäykistetty. Väli- ja yläpohjien levykenttä toimii rakennuksen vaakajäykisteenä, joka ottaa vastaan ulkoisista ja sisäisistä kuormista aiheutuvat leikkausvoimat. Vähintään levykentän reunat varustetaan reunapalkein, jotka taasen ottavat vastaan kuormista syntyvät taivutusvoimat. Väli- ja yläpohja mielletään yksinkertaisimmillaan siis yksiaukkoisena vaakapalkkina, joka siirtää siihen kohdistuvat vaakakuormat pystyrakenteiden kautta perustuksille. Tätä periaatetta on havainnointu kuvassa 2, jossa rakennuksen syvyys mielletään vaakapalkin korkeudeksi  $b$ , ja pituus palkin jänneväliksi  $L$ . Jänneväli määrittyy siis jäykistävien pystyrakenteiden välille. Pystyrakenteisiin aiheutuu tasaisesta kuormasta  $W$  leikkausvoima  $V_d$ , ja levykentän pitkien sivujen reunapalkit eli rivat ottavat vastaan puristus- ja vetorasitukset  $F_c$  sekä  $F_t$ . Myös levysaumot tulee mitoittaa niihin kohdistuville leikkausvoimille, jotka voivat olla sekä sauman suuntaisia että rakennuksen muodon tai tuulen imukuorman aiheuttamana saumaa kohtisuoraan rasittavia [1, s. 20–21.]



Kuva 2. Vaakajäykisteen mitoitusperiaate [1, s. 21].

Betonirakenteissa mielletään levykentän tasonsuuntainen jäykkyys erittäin suureksi, jolloin esimerkiksi välipohjalaatta siirtää vaakakuormia pääasiassa seinien jäykkyys-suhteiden perusteella. Koska puurakenteisen levykentän levyjen väliset saumat koostuvat mekaanisista liitososista, ja eivät näin ollen ole täysin jäykkiä, tulisi se mieltää joustavana rakenteena. Jos levykenttä on jatkuva jäykistävän seinärakenteen yli, vai-

kuttavat seinien jäykkyyssuhteet näiltä osin kuormien siirtymiseen tosin myös joustavassa rakenteessa [4, s. 13].

## 2.2 Ristiinliimatun rakenteen ja liitossiirtymien vaikutus levykentän tasonsuuntaiseen jäykkyyteen

CLT-levyn ristiinliimattu rakenne estää puun syynsuuntaan nähden poikittaista kutistumaa ja näin aiheuttaa levyn sisäisiä jännityksiä. Leikkausvoima ei luonnollisesti vaikuta haljenneessa pinnassa, joten tason suunnassa vaikuttava leikkausvoima aiheuttaa lamellien väliseen liitospintaan vääntöjännitystä, joka syntyy kutistumajännitysten aiheuttaman puun halkeilun seurauksena. Halkeilleen poikkileikkauksen seurauksena levyn tasonsuuntainen liukumoduuli pienenee. Liukumoduulin redusoituminen voidaan kuitenkin jättää huomiotta leikkausjäykkyyttä laskiessa, kun oletetaan poikkileikkaus halkeilemattomaksi ja CLT-levyn lautojen kaikkien pintojen olevan liimattu toisiinsa. Leikkausjäykkyys tason suuntaisesti kuormitetulle CLT-levylle määritetään siis kertomalla liukukerroin  $G_{mean}$  leikkausvoiman kuormittamalla bruttopinta-alalla. Bruttoleikkaus pinta-ala on yksinkertaisesti levyn profiilin pinta-ala riippumatta lamellikerrosten suunnista. [4, s. 15, 56, 60–61].

Tehollinen taivutusjäykkyys  $EI_{ef}$  tason suuntaiselle kuormitukselle voidaan yksinkertaistaessa myös määrittää bruttoleikkaussuureiden avulla. Tällöin kimmokerroin määritetään erisuuntaisten lamellikerrosten kimmokertoimien suhteessa, eli poikkileikkaus homogenisoidaan. Nettoleikkausta käytettäessä huomioidaan vain ne lamellikerrokset, joiden syyn suunta on samansuuntainen ulkoisten kuormien aiheuttamien jännitysten kanssa. [4, s. 61.]

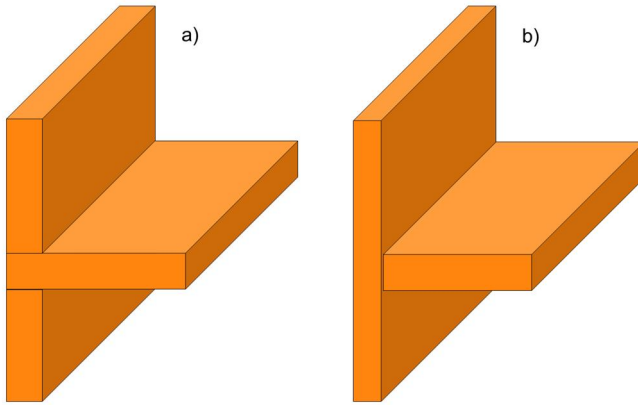
Levyt liitetään toisiinsa mekaanisesti, jolloin liitossiirtymät syntyvät puun huokoisen materiaalin ja liittimien taipumisen johdosta. Puu antaa liittimille periksi ja liittimet antavat osaltaan puulle periksi. Näin ollen välipohjalevykentän tasonsuuntaiset kuormitukset jakautuvat vertikaalijäykisteille suurilta osin liitosjäykkyyksien suhteen eikä levykenttää voida tarkastella täysin jäykkänä.

### 3 Jäykistävien CLT-rakenteiden liitostyyppit

Tässä luvussa käsitellään joitain CLT-levyistä koostuvan rakennuksen jäykistykseen käytettäviä liitostyypppejä. Käsiteltävät liitokset valittiin, Robot Structural Analysis -laskentaohjelmiston ja kuorielementtimallintamisen asettamat rajoitukset huomioiden, kanadalaisesta CLT-rakentamisen käsikirjasta. Esiteltäviä liitostyypppejä on rajattu myös käytettävien liitososien perusteella. Työn mallintamisosioissa luvussa 4 käsiteltävät liitokset perustuvat itseporautuvien ruuvien ja kulmalevyjen käyttöön. Muut mahdolliset liitososaratkaisut on näin ollen jätetty esittämättä.

Useimmin käytettävät rakenneratkaisut CLT-rakentamisessa ovat Platform- sekä Balloon-järjestelmät. Platform-järjestelmässä lattialevyt lepäävät seinälevyjen päällä, jolloin seinät toteutetaan kerroskorkuisin levyin, kuten kuvassa 3 (a) on havainnoitu. Seinälevyt voidaan asentaa joko ”kyljelleen” eli pintalamellin syysuunta vaakatasossa tai ”pystyyn” eli pintalamellin syysuunta pystysuorassa. Molempia ratkaisuja rajoittaa CLT-levyjen valmistustekniikka, jolloin seinälinjoista saadaan yhdellä levyllä jopa 16 m pitkiä mutta vain 2,95 m korkeita. Kerroskorkeus on rajoitettu näin ollen alle kolmeen metriin, ja Platform-järjestelmä soveltuukin huonosti toimitilarakentamiseen. Tämä järjestelmä on kuitenkin asuinrakentamisessa käytetympi, sillä se helpottaa ylempien kerrosten rakentamista sekä yksinkertaistaa liitostekniikkaa ja kuormien siirtymisen tarkastelua. [5, s. 2; 2.]

Balloon-järjestelmässä CLT-seinät asennetaan paikalleen pintalamellit pystysuunnassa, jolloin kerroskorkeus voidaan määrittää vapaammin. Toisaalta välipohjalevyjen liityessä seinärakenteen kylkeen kuvan 3 mukaisesti vaaditaan liitostekniikalta kestävämpiä ja monimutkaisempia ratkaisuja kuin Platform-järjestelmässä. Lisäksi CLT-levyjen maksimipituudet rajoittavat rakennuksen korkeutta. Toimitilarakentamisessa Balloon-järjestelmä on taasen varteenotettava vaihtoehto kerroskorkeusmuunneltavuutensa ansiosta. [5, s. 2.]



Kuva 3. Periaatteellinen ero Platform- (a) ja Balloon-järjestelmän (b) välillä.

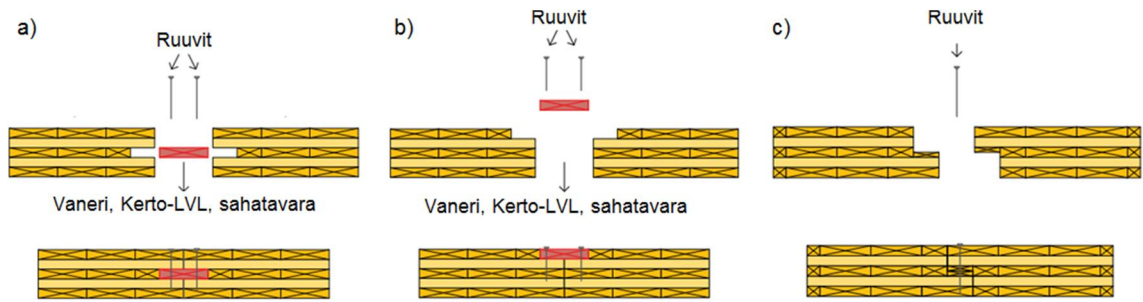
Molemmat järjestelmät on kuitenkin työssä huomioitu sekä laskenta- että tietomallintamisen osalta.

Jäykistävien rakenteiden väliset liitokset voidaan jaotella tasosuuntaisiin leikkaus- ja normaalivoimia siirtäviin liitoksiin. Vaakakuormista syntyy leikkausrasituksia sekä jäykistävän välipohjan levykentän erillisten levyjen että levykentän ja pystyjäykisteiden välisiin saumoihin. Normaalivoimat johtuvat välipohjan tason normaalin ympäri vaikuttavasta momentista; näitä rasituksia välittäviä liitoksia kutsutaankin tässä yhteydessä momenttijatkoksiksi.

### 3.1 Leikkausrasitetut liitokset

#### 3.1.1 Levyjen väliset liitokset kentässä

Vaakarakenteina toimivat CLT-levyt kiinnitetään ei-kantavilla sivuilla aina toisiinsa, jotta saadaan luotua mahdollisimman jäykkä levykenttä. Ei-kantavat sivut kiinnitetään toisiinsa esimerkiksi ruuvien välityksellä joko erillisen kappaleen (puusoiro) tai ponttauksen avulla. Ripalaatoista koostuvan kentän ei-kantavat sivut kohtaavat sen sijaan palkein eli rivan päällä. Molemmissa tapauksissa voidaan käyttää kuvan 4 mukaisia liitostyyppejä. Kiinnittäessä levyjä ripaan tulee luonnollisesti käyttää pidempiä kiinnittimiä, joilla saavutetaan vaadittu asennussyvyys myös rivan osalta.



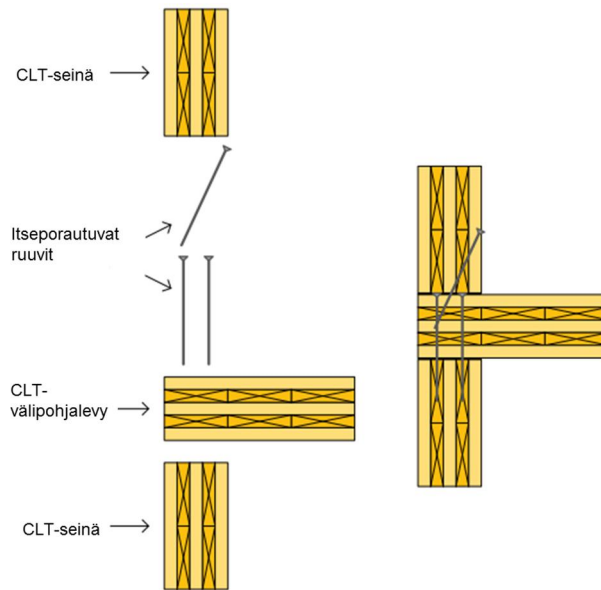
**Kuva 4. CLT-levyentän levyjen väliset leikkausliitokset: a) Kaksileikkeinen soiro-, b) yksileikkeinen soiro- ja c) puoliponttiliitos [5, s. 7-9].**

Kuvaa 4 vastaavia liitoksia voidaan käyttää levyjen välillä myös pystyrakenteiden välisissä vaaka- ja pystysaumoissa. Kukin liitostyyppi koostuu yhdestä tai useammasta levysauman pituussuuntaisesta ruuvirivistä. Käytettäessä puusoiroa mahdollistetaan useamman ruuvirivin käyttö, kuten kuvan 4 tapauksissa a) ja b), joissa rinnakkain (tai limitettynä) kaksi ruuvia. Puoliponttiliitos (c) on myös varteenotettava vaihtoehto, sillä sen jäykkyysominaisuudet ovat verrattavissa kaksileikkeiseen soiroliitokseen (a). Yksileikkeinen soiroliitos (b) on puolestaan liittosjäykkyydeltään kolmikon heikoin, mikäli ruuvikoot ja ruuvien asennusväli ovat liitostyyppien kesken identtiset. Mahdollinen ripa voidaan mieltää paksuna puusoirona leikkausvoimien suhteen, mutta sen jäykkyysominaisuudet eroavat yksileikkisestä liitoksesta. [4, s. 32.] Liitosjäykkyyden laskentaa käsitellään luvussa 5.2.

Myös saumaa kohtisuoraan rasittavat, esimerkiksi tuulen imupaineesta syntyvät, voimat ovat siirrettävissä levyltä toiselle soveltaen vastaavia puolipontti- tai soiroliitoksia. Jotta ruuvien reunaetäisyydet tällaisessa vedetyssä liitoksessa saadaan riittäviksi, voidaan sauman ylittävänä kappaleena käyttää esimerkiksi lattaterästä, joka kiinnitetään molempiin levyihin sekä liitoskohdan ripaan.

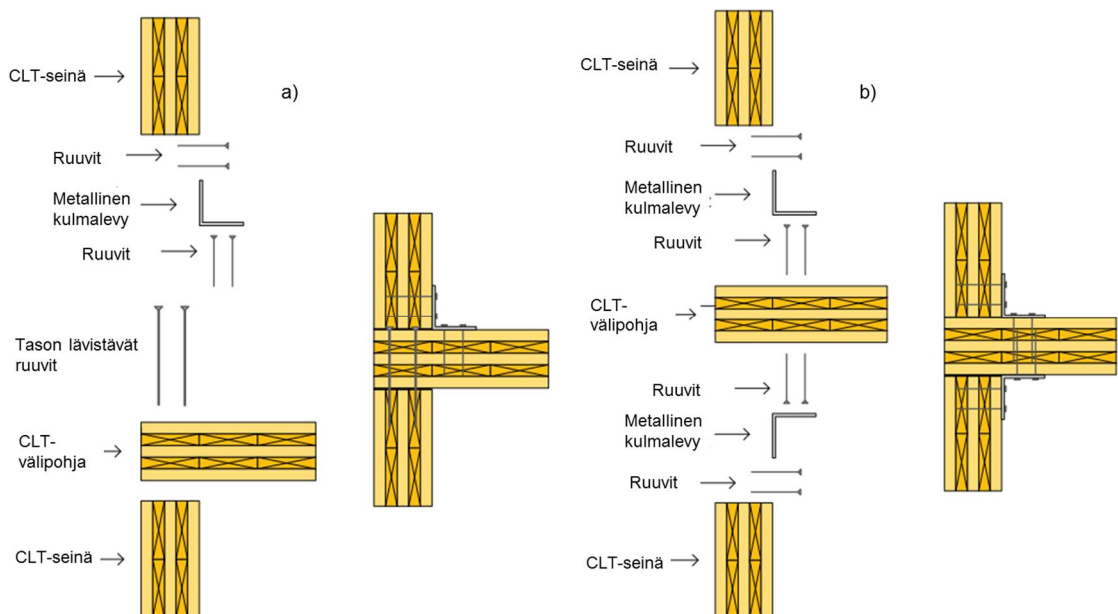
### 3.1.2 Vaakatason liittyminen pystyrunkoon

Yksinkertaisimmillaan vaakatason levyt voidaan Platform-järjestelmässä liittää pystyrakenteisiin käyttämällä pitkiä tason lävistäviä itseporautuvia ruuveja, kuten kuvassa 5 on esitetty. Levyn pään tukeutuessa seinälevyn päälle, ei tilaa vierekkäisille ruuveille kuitenkaan ole loputtomasti. Ruuvien vaadittavat reunaetäisyydet (ks. kuva 13) ovat suhteellisen suuria ruuveja levyn tason suuntaan asennettaessa, verrattuna esimerkiksi vaarna- ja pulttikiinnityksiin, jolloin vierekkäisten ruuvien määrä voidaan rajata kahteen [5, s. 33].



**Kuva 5. Yksinkertainen, Platform-järjestelmän mukainen vaaka- ja pystyrakenteen liitos, jossa lisäjäykkyyttä on haettu lisäämällä tason lävistävien ruuvien yhteyteen ruuveja myös vinoon [5, s. 15].**

Lisäjäykkyyttä kuvan 5 esittämän, jäykkyydeltään heikon, tasoon nähden kulmassa asennetun ruuvin sijaan voidaan hakea käyttämällä liitoksissa kulmalevyjä kuvan 6 vasemman esimerkin mukaisesti. Kulmalevyinä voidaan käyttää valmistavaraa tai tarvittaessa valmistuttua levyä halutuin dimensioin ja rei'ityksin.



**Kuva 6. Kaksi erilaista tapaa pysty- ja vaakarakon kiinnittämiseksi toisiinsa käyttäen kulmalevyjä [5, s. 16].**

Pysty- ja vaakarakenteen liittymä voidaan toteuttaa myös ilman pitkiä tason lävistäviä ruuveja, kuten kuvan 6 tapauksessa b, jolloin kulmalevyt tulevat kiinnittää vaakarakon-

teen ylä- sekä alapintaan. Tällöin lisäjäykkyyttä voidaan edelleen hakea käyttämällä kulmalevyjen lisäksi myös tason lävistäviä ruuveja.

Liitosjäykkyyteen voidaan vaikuttaa paitsi ruuvien paksuudella myös niiden lukumäärällä per kulmalevy sekä kulmalevyjen asennustiheydellä. Ottaen huomioon kuvan 13 mukaiset vähimmäisetäisyysvaatimukset ruuvien kesken voidaan kulmalevyjen pienimmäksi asennustiheydeksi teoreettisesti arvioida 50 mm, kun ruuvit tavanomaisesti ovat 6 tai 8 mm paksuja. Kulmalevyjä, jotka olisivat mitoiltaan niin pieniä, että mahtuisivat vierekkäin näinkin tiheästi, ei voida ajatella rakentamisessa käytettävän, joten käytännössä minimiasennustiheys voitaisiin varovasti arvioida olevan 100 mm luokkaa. Toisaalta voidaan käyttää myös L-palkin tapaista jatkuvaa kulmaterästä, jolloin liitinväliä on mahdollista tihentää. Tason lävistävät pitkät ruuvit ovat tavallisesti 10, 12 ja 14 mm paksuja, jolloin liittimen halkaisijasta riippuvalaiset vähimmäisreunaetäisyydet sekä ruuvien keskeiset vähimmäisetäisyydet ovat myös suurempia. Lisäksi, kuten kuvasta 13 voidaan edelleen havaita, vähimmäisreuna- ja keskiöetäisyydet levyn päähän eli tason suunnassa asennetuille ruuveille ovat huomattavasti suuremmat, kuin levyn päätyyn eli tasoa kohtisuorassa suunnassa asennetuille. Näin ollen voidaan tason lävistävien ruuvien pienimmäksi asennustiheydeksi arvioida noin 100... 140 mm levyn pään vaatimusten mukaisesti. [5, s. 4; 6, s. 15 – 16.]

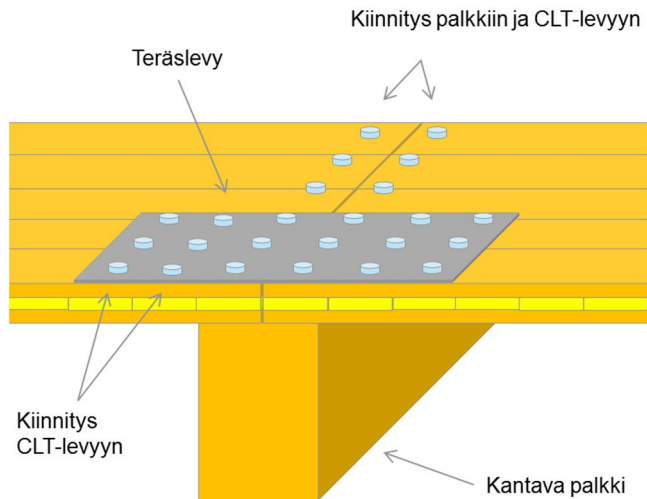
Sekä kulmalevyjä että tason lävistäviä ruuveja käytettäviä ratkaisuja voidaan soveltaa myös tilanteissa, joissa vaakatason levykentän levyjen jatkos on seinän kohdalla. Eli kahden välipohjalevyn päiden kohdatessa seinän päällä rajoittaa vierekkäisten tason lävistävien ruuvien lukumäärää sekä reunaehto- että tukipintavaatimukset. Tällöin voidaan levyjen päätyihin arvioida mahtuvaksi levyä kohden vain yksi rivi tason lävistäviä ruuveja.

Balloon-järjestelmän vaaka- ja pystyrakenteiden väliset liitostekniikat eivät juuri eroa Platform-järjestelmästä: itseporautuvia ruuveja ja kulmalevyjä käytetään edelleen. Kuten aikaisemmin mainittiin, levyjen asettelu on erilainen järjestelmien välillä, jolloin Balloon-järjestelmän vaakarakenteet eivät tukeudu pystyrakenteet muodostavien levyjen päälle. Näin ollen vaakatason levyt kiinnitetään pystyrakenteiden kylkeen käyttäen kulmalevyjä. Koska liitosten tulee ottaa vastaan myös pystykuormia, käytetään usein järeämpiä jatkuvia L-palkin tapaisia teräksiä erillisten kulmalevyjen sijaan, kuten kuvassa 24. L-palkin sijaan voidaan seinään ruuvata myös puinen konsolipalkki, johon vaakatason levyt tukeutuvat.



### 3.2 Momenttijatkokset

Välipohjan levykentässä levysaumoihin syntyy vaakakuormista veto- ja puristusjännityksiä. Käytännössä vetorasitusten välittyminen levyiltä toiselle voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 7 esittämää teräslevyliitosta soveltaen.



**Kuva 7. Havainnekuva teräslevyllä momenttijatketusta saumasta.**

Vaakatason normaalin ympäri vaikuttavaa momenttia levyiltä toiselle jatkava teräslevyliitos ei suuresti eroa laskennallisilta liitosjäykkyyksiltään muista tasolevyjen välisistä liitostyypeistä, kun kantava palkki on puuta. Ruuvit, teräslevy ja palkki rajoittavat CLT-levyjen välistä erkanemaa, joka aiheuttaa liittimiin leikkausrasituksia sauman suuntaa kohtisuorassa. Leikkausjäykkyyden määrittävinä tekijöinä ovat edelleen liittinten lukumäärä, niiden paksuudet ja asennustiheys; liitostyyppi onkin verrattavissa kuvassa 4 esitettyyn yksileikkeiseen soiroliitokseen. Jos kuvan 7 esittämä palkki olisi esimerkiksi teräksinen WQ-palkki, olisi liitosjäykkyys huomattavasti suurempi, ruuvien ennemmin jousaessa kuin teräspalkin pinnan myötäessä [4, s. 36]. Käytettäessä puupalkkia, deformaatio tapahtuu siis myös palkin yläpinnassa.

## 4 CLT-levyjen väliset liitokset tietomallintamisessa

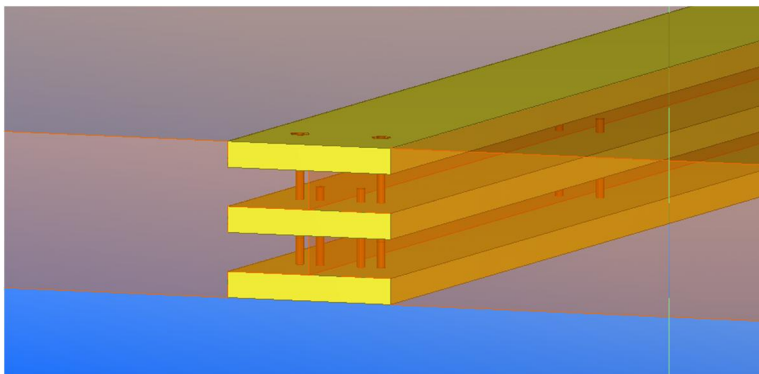
Tietomallinnusohjelmisto, jolle liitoskomponentit luodaan, on Tekla Structures. Jotta puuelementtien ja varsinkin CLT-levyjen mallintaminen TS:lla olisi mielekäästä, tulee elementtien lisäksi myös rakenteiden väliset liitokset mallintaa piirustuksia ja materiaaliuutteloita varten. Pöyryllä ei ole tällä hetkellä käytössään vain puuelementtejä varten

koostettuja liitoskomponentteja. Edellisessä luvussa määriteltiin yleisimmät liitostyypit jäykistäville levyrakenteille. Tässä luvussa esitellään näiden määritysten perusteella työn kirjoittajan luomaa uutta liitoskomponenttia sekä havainnoidaan sen toiminnallisuutta ja käyttöä.

Liitoskomponentit luodaan Tekla Custom Componentsilla, joka on Tekla Oyj:n kehittämä työkalu TS:lle. Komponentit luodaan käyttämällä ohjelmiston eri malliobjekteja ja muuttamalla niiden rakennetta. Liitoskomponentit luotiin luvussa 3 esitetyistä Platform- ja Balloon-järjestelmän mukaisista pysty- ja vaakarakenteen yhdistävistä liitoksista, momenttijatkoksista sekä tähän lukuun esiteltäväksi valituista kuvan 4 mukaisista levykentän levyjen ei-kantavien saumojen välisistä liitoksista puoliponttiliitosta lukuun ottamatta. Kuvan 4 mukaisten yksi- ja kaksileikkeisen soiroliitoksen lisäksi voidaan luodulla komponentilla mallintaa myös liitos, jossa soivot sijaitsevat sekä levyjen ylä- että alapinnassa. Puoliponttiliitos päätettiin jättää valikoimasta pois, sillä sen toteuttamien mallissa on todennäköisesti mielekkäämpää puolipontin muotoista palkkiprofiilia käyttämällä.

#### 4.1 TS-komponentin valmistaminen

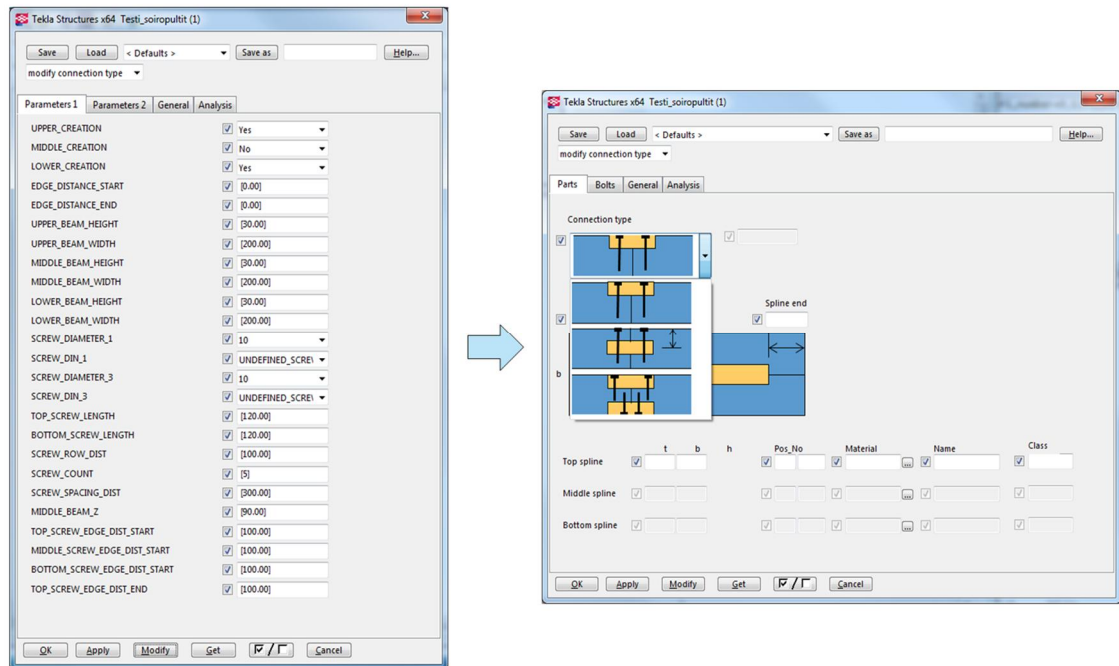
Uuden komponentin voi TS:ssä valmistaa joko ottamalla pohjaksi jonkin toisen komponentin parametrit tai aloittamalla niin sanotusti puhtaalta pöydältä mallintamalla liitettävät ja liittävät objektit. *Custom components* -työkalua käyttäen valitaan mallista komponentin muodostavat osat. Kuvan 8 mukaisessa tilanteessa valitaan toinen vaakarakenteita esittävistä objekteista pääosaksi (*Main Part*) ja toinen toissijaiseksi osaksi (*Secondary Part*), ja lopuksi ruuvi- ja soiro-objektit itse liitinosiksi.



Kuva 8. Lähtöasetelma valmistaessa kahden levyn välisen liitoksen luovaa komponenttia. Haalean oranssit osat ovat liitettävät taso-objektit, keltaiset objektit esittävät puusoiroja ja ruskeat ruuveja.

Soiroja esittävien objektien tulee leikata tasoveyistä eli taso-objekteista pois soiro-objektin itsensä kokoiset palat, jolloin näkyvillä olevien liitinobjektien lisäksi, tulee myös tästä leikkauksesta syntyvät leikkausobjektit valita mukaan komponentin liitososiksi.

Määrittämällä parametreja objekteille voidaan vaikuttaa mm. soirojen pituuteen ja profiiliin sekä ruuvien ominaisuuksiin suoraan kuvan 9 vasemman puoleisesta dialogista. Tiedot dialogiin syntyvät automaattisesti parametreja määrittäessä ja nimettäessä. Dialogin esittämään sisältöön voidaan vaikuttaa muokkaamalla *.inp*-päätteistä tiedostoa, joka oletuksena löytyy mallin *CustomComponentDialogFiles*-kansion alta. Kyseisen tiedoston muokkaaminen vaatii jo huomattavasti enemmän osaamista ja koodauksen opettelua. Tätä varten onkin TS:lle saatavilla liitännäinen, joka helpottaa dialogin ulkoasun muokkaamista merkittävästi.



Kuva 9. Soiroja hallinnoiva dialogi muokattuna (oik.) *Custom Component Dialog Editor* -liitännäisellä.

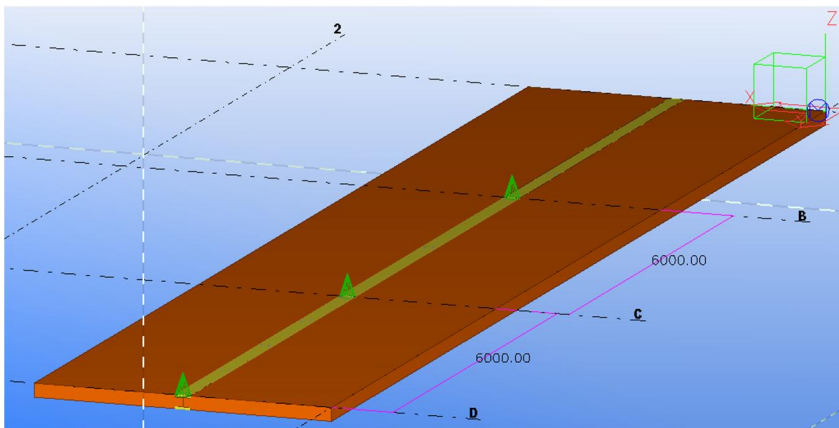
Kuvan 9 oikean puoleinen dialogi on muokattu näköisekseen *Custom Component Dialog Editor* -liitännäisen avulla. Kuvassa esiteltävä ensimmäinen *Parts*-välilehti antaa mahdollisuuden muokata komponentin liitostyyppiä kuvassa avatun alasvetovalikon avulla, vaikuttaa soiron alku- ja loppupään reunaetäisyyksiin ja määrittää kaikille kolmelle eri soiroille halutut dimensiot sekä muut parametrit. Ruuvien muuttujien määritys on siirretty kokonaan omalle *Bolts*-välilehdelle.

Koska samalla komponentilla halutaan antaa mahdollisuus luoda kolme erilaista liitosta, joudutaan lähtötilanteessa mallintamaan kaikki liitososat kerralla, kuten kuvassa 8. Kullekin objektille voidaan kuitenkin määrittää nk. *Creation*-ehto, jonka avulla voidaan ohjata milloin mikin soiro-objekti luodaan malliin ja milloin ei. Kuvan 9 oikean puoleisen dialogin alavetovalikko ohjaa siis kyseisiä ehtoja, jolloin voidaan luoda järjestyksessä joko yksileikkeinen-, kaksileikkeinen- tai ylä- ja alapinnan soiroliitos. Kyseiset ehdot hallinnoivat myös soiro-objekteihin liittyviä leikkausobjekteja, jolloin liitettävät objektit leikataan vain käytettävän soiron alueelta.

On huomioitava, että muokattaessa valmista komponenttia tulee varmistua, ettei *.inp*-tiedostoa enää ylikirjoiteta. Muutoksia Teklan puolella tallentaessa kaikki *Dialog Editorissa* tehdyt ulkoasumuutokset korvaantuvat alkuperäisasetuksilla. Tarvittaessa voidaan ulkoasua muokata sekä suoraan *.inp*-tiedoston kautta ja *Dialog Editorilla*. Tällä tavalla voidaan ohittaa joitain editorin puutteita muokkaamalla valmista koodia käsin.

#### 4.2 Komponentin toiminta ja käyttö

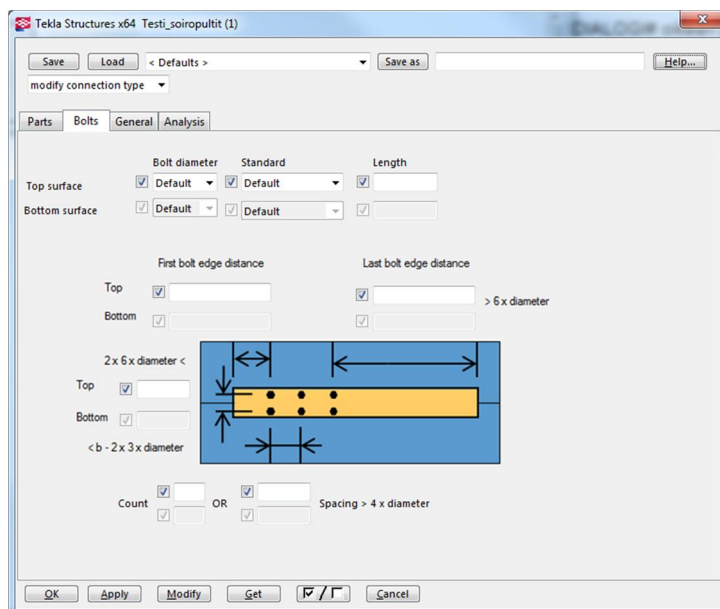
Tässä luvussa esitellään komponentin toimintaperiaatteita ja ohjeistetaan komponentin käyttöä. Ohjeiden seuraaminen helpottuu, kun komponentti ensin mallinnetaan ja sen dialogi avataan. Kyseessä nk. saumakomponentti, joten sen mallintamiseksi valitaan ensin yksi liitettävistä objekteista ja sitten toinen, jonka jälkeen määritetään haluttu komponentin alku- ja loppupiste kohdistamalla pisteet objektien välisen sauman ylänurkkiin. Kuvassa 10 on havainnollistettu mahdollisuutta mallintaa komponentti samojen taso-objektien välillä useammassa osassa. Myös tällöin tulee valita alku- ja loppupisteet joko taso-objektin tai luodun soiro-objektin yläpinnan tasosta.



Kuva 10. Liitos mallinnettuna kahden taso-objektin välille komponenttia kolmesti käyttäen.

Vaihtamalla liitostyyppiä kuvan 9 *Connection type*-alasvetovalikossa, osa kentistä muuttuu dialogissa harmaaksi, jolloin niitä ei voida käyttää. Tästä voidaan esimerkkinä mainita tilanne, jossa mallinnetaan kaksileikkeinen soiroliitos. Tällöin kaikki ylä- ja alapinnan soiroihin vaikuttavat kentät muuttuvat harmaiksi eli epäaktiivisiksi ja alasvetovalikon vieressä sijaitseva, keskimmäisen soiron sijaintia hallinnoiva kenttä, taasen aktivoituu. Soiro-objektin profiiliin voidaan vaikuttaa muuttujilla  $t$  (soiron paksuus) ja  $b$  (soiron leveys). Muita TS:n käyttämiä parametreja, joita komponentilla voidaan muokata, ovat objektien materiaali, nimi, positionumero ja *prefix* sekä *class*-arvo.

Kuvan 11 esittämän dialogin *Bolts*-välilehdeltä voidaan hallinnoida pulttien tai ruuvien ominaisuuksia. Kuten kuvasta 11 voidaan havaita, osa kentistä on jälleen epäaktiivisena mukautuen *Parts*-välilehdellä tehtyyn liitostyyppin valintaan.



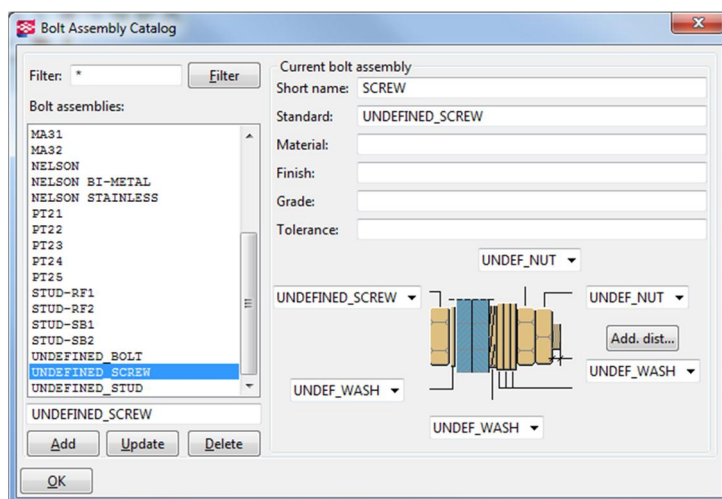
Kuva 11. Pulttien ja ruuvien ominaisuuksia hallinnoiva välilehti.

Otsikoiden *Top surface* ja *Bottom surface* viereiset kentät ohjaavat käytettävien pulttien tai ruuvien paksuutta, pituutta ja standardia, jota liittimet noudattavat. Otsikkonsa mukaisesti kentät hallinnoivat siis levyjen ylä- ja alapintaan asennettavia ruuveja. Vastavasti voidaan määrittää myös ruuvien k-jako tai ruuvien lukumäärä (toisensa poissulki- en), reunaetäisyydet sekä ruuviparin ruuvien keskeinen etäisyys levyjen ylä- ja alapin- nassa.

On huomioitava, että TS:n asettama rajoitus vierekkäisten pulttien lukumäärälle saattaa tulla varsinkin pitkillä jänneväleillä määrääväksi. TS rajoittaa pulttirivin 50 pulttiin, jolloin

teoreettinen minimijako 50 mm rajoittaisi komponentin käytettävyyden vaadittavat reunaetäisyydet huomioiden vain noin 2,5 m pituiseen CLT-levyyn. Tämän takia komponenttia voidaankin pitkissä saumoissa kuvan 10 mukaisesti käyttää samojen levyjen välillä useamman kerran, jolloin käyttäjän vastuulle jää määrittää itse komponentin mallinnusväli. Esimerkiksi 12 m pitkän saumaan voi komponentin halutessa mallintaa vaikka 12 kertaa metrin välein. Tällöin tulee kuitenkin määrittää dialogin *Parts*-välilehdeltä soiro päättyväksi siinä kohdassa, josta seuraavan komponentin soiro alkaa, ja alkavaksi siitä, mihin edellisen komponentin soiro loppuu. 12 m pitkän levyn ensimmäisen saumakomponentin *Spline end* -arvoksi tulisi siis 11 m, jos liitos halutaan mallintaa metrin pätkissä. Seuraavan komponentti voidaan mallintaa edellisen soiro-objektin loppupäästä taso-objektin loppupäähän sekä antaa *Spline end* -arvoksi 10 m ja niin edelleen. Soiro-objektien alku- ja loppupäät ovat siis sidottu koko taso-objektin alku- ja loppupäihin. Ruuvijako muokkautuu automaattisesti soiro-objektin mittoja noudattaen.

Komponentin toimivuuden testausta varten on luotu uusi pulttistandardi nimeltä *UNDEFINED\_SCREW*, jonka yhteyteen on määritetty ruuvipaksuuksille 10 ja 12 eripituisia uppokantaruuveja 100 mm:stä 300 mm:iin asti. Käyttämällä pulttistandardina *UNDEFINED*-termin sisältävää merkintää halutaan kiinnittää mallintajan huomio ruuvitietokannan puuttumiseen. Kyseisen ruuvistandardin käyttö edellyttää *Bolt Catalogin* tuomista malliin *import*-toiminnon avulla sekä uuden standardin, nimeltä *UNDEFINED\_SCREW* luomista *Bolt Assembly Catalogiin* kuvan 12 mukaisesti.



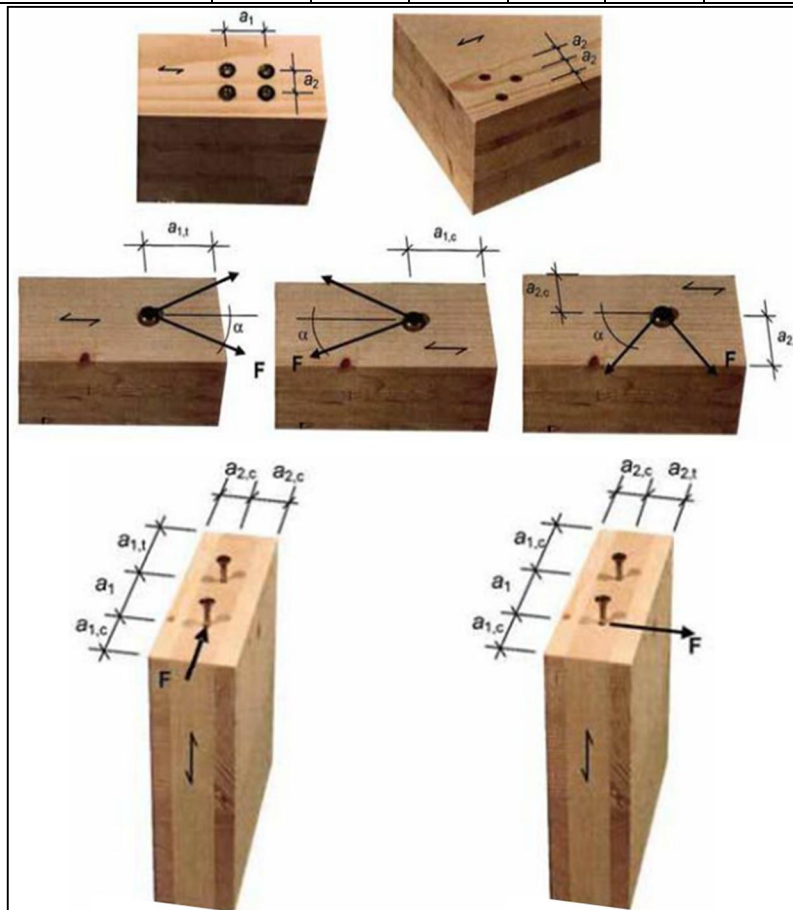
Kuva 12. *Bolt Assembly Catalogiin* syötettävät tiedot.

Useat muut pulttistandardit sisältävät valmiiksi tietoa asennussyvyydestä ja reunaetäisyyksistä. Jotta pulttityökalua voitaisiin TS:ssa soveltaa ja samalla noudattaa CLT-

levyille ominaisia reunaetäisyyksiä, täytyy täysin uusi katalogi luoda. Lisäksi katalogi määrittää mahdolliset ruuvien pituudet, jotka nykyisten TS:sta löytyvien standardien ruuvivalikoimissa eivät ole tarpeeksi pitkiä CLT-rakentamisen kannalta. Komponentin käyttäjän tuleekin siis itse varmistua tarvittavista ruuvien reunaetäisyyksistä esimerkiksi kuvan 13 ja taulukon 1 avulla.

**Taulukko 1. Arvot kuvan 13 määreille,  $d$  = ruuvin halkaisija [mm].**

Liittinten sijainti	$a_1$	$a_{1,t}$	$a_{1,c}$	$a_2$	$a_{2,t}$	$a_{2,c}$
Levyn tasossa	$4 \cdot d$	$6 \cdot d$ <td><math>6 \cdot d</math> <td><math>2,5 \cdot d</math></td> <td><math>6 \cdot d</math> <td><math>2,5 \cdot d</math> </td></td></td>	$6 \cdot d$ <td><math>2,5 \cdot d</math></td> <td><math>6 \cdot d</math> <td><math>2,5 \cdot d</math> </td></td>	$2,5 \cdot d$	$6 \cdot d$ <td><math>2,5 \cdot d</math> </td>	$2,5 \cdot d$
Levyn päässä	$10 \cdot d$	$12 \cdot d$ <td><math>7 \cdot d</math></td> <td><math>4 \cdot d</math> <td><math>6 \cdot d</math> <td><math>3 \cdot d</math> </td></td></td>	$7 \cdot d$	$4 \cdot d$ <td><math>6 \cdot d</math> <td><math>3 \cdot d</math> </td></td>	$6 \cdot d$ <td><math>3 \cdot d</math> </td>	$3 \cdot d$



**Kuva 13. Liittimien välisten vähimmäisetäisyyksien määrittely sekä liittimien vähimmäisreunaetäisyyksien määrittely voiman  $F$  suunnan perusteella [6, s. 15–16.]**

On mahdollista, että jokin TS:n valmiista pulttistandardeista soveltuisi ominaisuuksiltaan käytettäväksi myös puuelementtejä mallintaessa, mutta tätä mahdollisuutta ei tässä yhteydessä tutkittu. Todennäköisempää kuitenkin on, että malliin tulisi luoda uusi pulttistandardi, jonka pultit vastaisivat ominaisuuksiltaan todellisuutta.

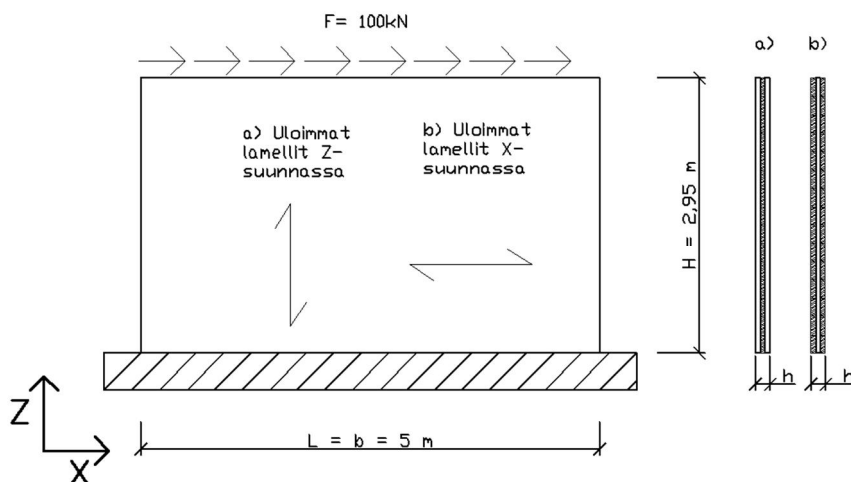


## 5 Jäykistävien rakenteiden ja näiden välisten liitosten jäykkyyden määrittäminen laskentamallia varten

Jotta laskentamallin esittämät vaakatasolta pystyrakenteille siirtyvät rasitukset voidaan olettaa edes lähes todellisuutta vastaaviksi, täytyy kuorielementtien käyttäytyminen mallissa olla tietynlaista. Tämän todentamiseksi vertailtiin levyjen ja liitosten siirtymiä laskentamallin ja käsin laskennan välillä. Käsin laskennassa jäykkyydet levyille määritettiin soveltamalla Timoshenko-palkkiteoriaa yksinkertaiseen sauvamalliin. Liitosjäykkyydet laskettiin EN-1995 mukaan. Laskennasta lisää luvuissa 5.1 ja 5.2.

CLT-levyt mallinnettiin kuorielementteinä Robot Structural Analysis -ohjelmistolla käyttäen ortotrooppisia materiaaliparametreja. Laskentamallissa käytetyt parametrit vastaavat lujuusluokan C24 sahatavaraa, jonka puulajikkeen määrääminä Poissonin lukuna käytettiin arvoja 0,44 ja 0,0148, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia Luntan diplomityössään tehtyjen tutkimusten kanssa [4, s. 64; 7, s. 8]. Elementtiverkko mallinnettiin samalla perusteella 200 mm jaolla, joka todettiin riittävän tiheäksi myös kuorimallissa siirtymien muutosten ollessa, jopa 4 kertaa tiheämmällä verkotuksella, marginaaliset (alle 0,0022 promillea).

Tarkasteluun valittiin kolme-, viisi-, seitsemän- ja yhdeksänkerroksiset CLT-levyt. Levyt tuettiin laskentamallissa jäykästi alareunastaan sekä mahdollinen nurjahdus heikompaan suuntaan estettiin tukemalla myös levyn sivut. Uloimpien lamellien syysuunta mallinnettiin sekä vaakakuorman suuntaisesti että sitä kohtisuoraan. Levyjen reunaehdot on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. CLT-levyn reunaehdot ja lamellien suunta.



Vastaavasti kahden levyn välistä liitospinnan jäykkyyttä tarkasteltiin puoliponttiliitokse-  
na, joka toteutetaan itseporautuvilla 6 mm ruuveilla ja 200 mm liitinvälillä.

### 5.1 Levyn jäykkyys

Timoshenko-palkkiteoria huomioi sekä tehollisen taivutus- että leikkausjäykkyyden. Levyn taivutusjäykkyyttä laskettaessa voidaan käyttää levyn bruttopoikkileikkausta, kunhan lamellikerrosten suunnasta riippuvainen kimmokerroin huomioidaan lasken-  
nassa. Kimmokertoimenä voidaan käyttää levyn jäykkyydsmatriisin luovan A&S Virtual  
Systems Oy:n tuottaman laskentataulukkopohjan (liite 3) mukaista arvoa  $E_x$  kentässä  
 $D21$ , joka määrittää kimmokertoimen lamellipaksuuden ja kimmokertoimen painotetun  
keskiarvon avulla. Tehollinen jäyhyysmomentti voidaan laskea, kuten homogeenisessa  
suorakaidepoikkileikkauksessa. Leikkausjäykkyys saadaan määritettyä poikkileik-  
kausalan ja liukumoduulin avulla. Rakenteen kokonaisjäykkyys voidaan johtaa kaavas-  
ta:

$$\frac{1}{k} = \frac{H^3}{3 \cdot E_{ef} \cdot I} + \frac{6}{5} \frac{H}{G_{mean} \cdot A} \quad (1)$$

missä,	$k$	rakenteen kokonaisjäykkyys [N/mm]
	$H$	rakenteen korkeus [mm]
	$E_{ef}$	tehollinen kimmomoduuli [N/mm <sup>2</sup> ]
	$G_{mean}$	liukumoduuli [N/mm <sup>2</sup> ]
	$A$	bruttopoikkileikkausala [mm <sup>2</sup> ]

Kaavan 1 ensimmäinen termi huomioi jäykästi tuetun levyn taivutusjäykkyyden ja toi-  
nen termi leikkausjäykkyyden. Sivusiirtymä levyille saadaan kaavasta  $u=F/k$ , jossa  $F$  on  
ulokkeen vapaaseen päähän kohdistuva kuorma ja  $k$  kaavasta 1 laskettu kokonaisjäyk-  
kyys. Kun luvussa 2.2 esitetyt ehdot täyttyvät eli poikkileikkausta tarkastellaan halkei-  
lemattomana ja laudat oletetaan myös lyhyemmiltä sivuiltaan liimatuksi, liukumoduulia  
 $G_{mean}$  ei tarvitse redusoida vaan siihen voidaan sijoittaa valitun lujusluokan vastaava  
arvo sellaisenaan.

Taulukkoon 2 on koottu tulokset käsin ja FEM-laskennasta. Merkinnät  $u_M$  ja  $u_Q$  vastaavat kaavan 1 termien mukaan laskettuja sivusiirtymiä. Merkintä  $u$  on näiden sivusiirtymien summa eli kokonaissiirtymä. Merkintä  $u_{FEM}$  on Robotista saatu kokonaissiirtymä.

**Taulukko 2. Kuvan 14 mukaisen jäykästi kiinnitetyn CLT-levyn siirtymien vertailu lamellikerrosten lukumäärän (n) ja pintalamellin suunnan perusteella.**

n	Paksuus [mm]	Rakenne [mm]	Suunta	$u_{FEM}$ [mm]	$u_M+u_Q=u$ [mm]	%-ero $\frac{u_{FEM}-u}{u_{FEM}}$
3	80	30/20/30	X	1,81	0,34+1,28=1,62	10,50
3	80	30/20/30	Z	1,51	0,12+1,28=1,41	6,62
5	130	30/20/30/20/30	X	1,06	0,17+0,79=0,96	9,43
5	130	30/20/30/20/30	Z	0,93	0,08+0,79=0,87	6,45
7	180	30/20/30/20/30/20/30	X	0,75	0,12+0,57=0,69	8,00
7	180	30/20/30/20/30/20/30	Z	0,67	0,06+0,57=0,63	5,97
9	230	30/20/30/20/30/20/30/20/30	X	0,58	0,09+0,45=0,54	6,90
9	230	30/20/30/20/30/20/30/20/30	Z	0,53	0,05+0,45=0,50	5,66

FEM-mallin siirtymät ovat tulosten perusteella noin 5,7 – 10,5 % prosenttia suuremmat sauvamallilla laskettuihin siirtymiin verrattuna. Tuloksista voidaan myös havaita eron pienentyvän (10 – 15 %) jäykempiin elementteihin siirryttäessä pintalamellien ollessa vaakasuunnassa. Leikkausjäykkyys pysyy samana lamellisuunnasta riippumatta, joka osaltaan selittää siirtymien eron verrattain pienemmän muuttumisen (2 – 7 %) tarkasteltaessa levyä, jonka pintalamellit ovat pystysuunnassa. Tällöin taivutuksesta aiheutuva siirtymä vähintäänkin puolittuu, mutta leikkauksesta aiheutuva siirtymä säilyy yhtä suurena. Tuloksista voidaan päätellä, että FEM-mallin ja sauvamallin siirtymien ero pienenee edelleen ja sauvamallin laskentatarkkuus paranee levyn kokonaisjäykkyyden kasvaessa.

Verrattaessa tuloksia Luntan Comsol Multiphysics -ohjelmistolla ja 3D-solidielementeillä tekemän tutkimuksen tuloksiin [4, s. 10], havaittiin joitain eroavaisuuksia. Tuloksista pääteltiin sauvamallin laskentatarkkuuden paranevan levyn taivutusjäykkyyden pienentyessä, mikä on ristiriidassa tässä työssä esitettyjen tulosten kanssa. Tulokset poikkeavat toisistaan myös siltä osin, että 3D-solidielementeillä havaitut siirtymät olivat pienempiä kuin käsin lasketut, kun taas tämän työn tuloksista on havaittavissa FEM-mallin siirtymien olevan poikkeuksetta suurempia käsin laskentaan verrattaessa. Solidielementtien jäykkyydsmatriisin luoma kokonaisjäykkyys on suurempi, ja tutkimusten keskinäiset erot ovatkin selitettävissä sekä eri ohjelmistojen käytön että taulukkolaskentapohjasta saadun kuorielementin jäykkyydsmatriisin verrattain konservatiivisempien arvojen perusteella.

## 5.2 Liitoksen jäykkyys

EN-1995 määrittää liitospinnan jäykkyyden puun tiheyden ja liittimen halkaisijan perusteella. Leikkaustasoa kohti laskettu jäykkyys saadaan kaavasta 2, jota normissa käsitellään siirtymäkertoimenä esiporaamattomille nauiloille. Saksalainen puurakentamisen standardi DIN 1052:2004–08 määrittelee hyväksyttäväksi kaavan 2 soveltamisen myös esiporaamattomille ruuveille, joiden käyttö on yleisempää CLT- rakentamisessa. [8, s. 89; 4, s. 49.]

$$K_{ser,2} = \frac{\rho_m^{1,5}}{30} \cdot d^{0,8} \quad (2)$$

missä,  $\rho_m$  Liitettävän puuosan keskimääräinen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]  
 $d$  Liittimen halkaisija [mm]

Kaavalla 2 voidaan laskea myös luvussa 3 esitetyille tasonlävistävien ruuvien leikkausjäykkyyden. Leikkausliitoksen kokonaisjäykkyyden voi määrittää kaavasta 3, joka ottaa huomioon myös liitostyyppin vaikutuksen:

$$K_{tot} = K_{ser,2} \cdot \frac{n_{leik}}{l} \cdot \frac{L}{s} \quad (3)$$

$K_{ser,2}$  liittimen siirtymäkerroin [N/mm]  
 $n_{leik}$  leikkaustasojen lukumäärä liitoksessa  
 $l$  liitostyyppin mukainen kerroin:  

- puoliponttiliitos  $l = 1$
- soiroliitos  $l = 2$

 $L$  liitospinnan pituus [mm]  
 $s$  liittimien k-jako [mm]

Jäykkyyttä  $K_{tot}$  voidaan soveltaa laskentamallissa kuorielementtien saumoissa sekä vaakajäykisteiden välillä että vaaka- ja vertikaalijäykisteiden välillä. Laskettu jäykkyys saumassa mallinnetaan käyttämällä lineaariselastisia vapausasteita, jolloin liitospinnan pituus määräytyy automaattisesti sauman pituuden mukaan ja voidaan jättää sijoittamatta kaavaan 3. Sekä erkanemalle että sivusiirtymälle saadaan lähes sama tulos (pyöristysvara) laskentamallista, kuin käsin laskennasta. Saumojen toiminta laskenta-

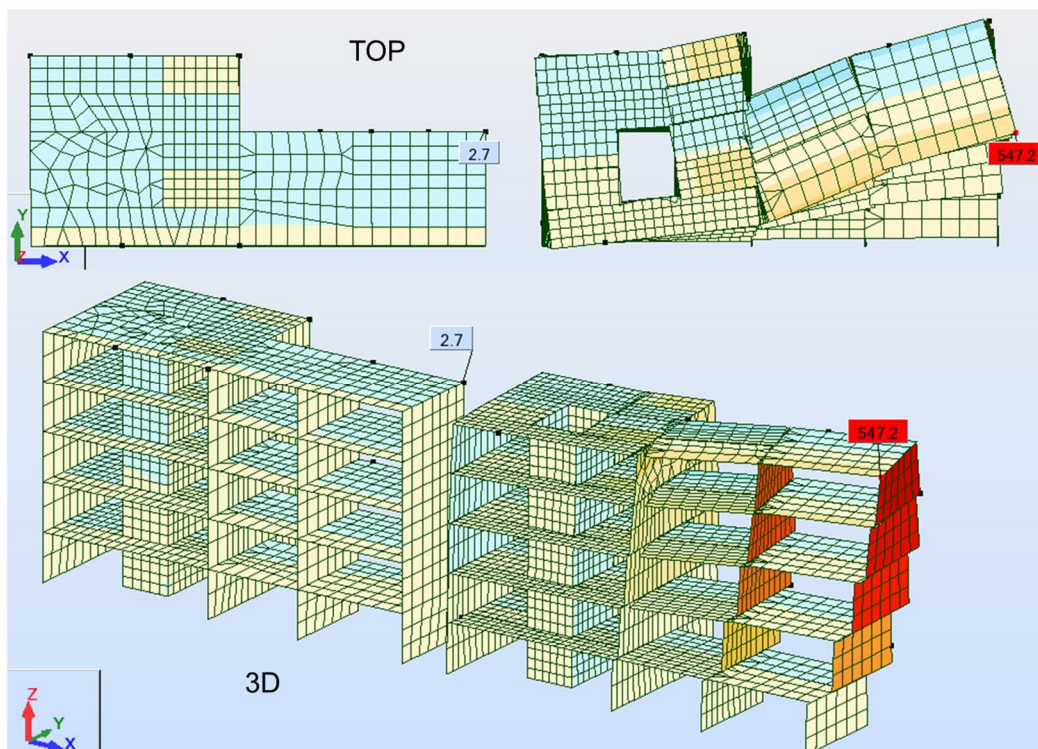
mallissa tulisikin olla täysin riippumatonta levyjen jäykkyysominaisuuksista määrittäessä liitosjäykkyyksiä eli elastisia vapausasteita manuaalisesti.

### 5.3 Siirtymien vertailu liitoksiltaan jäykkään rakenteeseen

Havainnollisuuden vuoksi voidaan liitoksiltaan jäykän rakennuksen vaakasiirtymää verrata liitoksiltaan elastisen rakennuksen vaakasiirtymään. Vertailumallin molemmat rakennukset kuvassa 15 on toteutettu kuorielementein, joiden jäykkyydet mukailevat CLT-levyjen jäykkyyttä. Vaakarakenteet on ajateltu toteutettavan 5-kerroksisilla CLT-levyillä ja pystyrakenteet kolmessa ensimmäisessä kerroksessa 7-kerroksisilla ja kahdessa seuraavassa kerroksessa 3-kerroksisilla CLT-elementeillä.

Molemmissa rakennuksissa on ajateltu käytettävän Platform-järjestelmää. Liitoksiltaan joustavan rakennuksen pysty- ja vaakarakenteiden liitokset ovat toteutettu tason lävistävin ruuvein ja seinän jatkuessa välipohjasta on se kiinnitetty välipohjalevyn yläpintaan kulmalevyin. Välipohjien levyt ovat ei-kantavilta sivuilta toisistaan kiinni kaksileikkeisellä soiroliitoksilla, joissa ruuvipaksuus 8 mm ja k-jako 100 mm. Tason lävistävät ruuvit ovat 12 mm paksuja ja niiden k-jako on 150 mm. Kulmalevyt oletetaan 5 ruuvilla kiinnitetyksi per laippa ja niiden k-jako on 200 mm. Ruuvien paksuus kulmalevyissä 8 mm. Myös 5-kerroksinen kattolevy on kiinnitetty tason lävistävin ruuvein sekä kulmalevyin samoin parametrein, kuin välipohjissa. Alimman kerroksen seinät ovat jäykästi kiinni perustuksissa.

Rakennusten pitkien sivujen, vaakatasoille voimat siirtäviä, kuormapintoja kuormittaa  $1,2 \text{ kN/m}^2$  (KRT) suuruinen tuulikuorma suunnasta Y. Rakenteiden omat painot on jätetty mallissa huomioimatta. Kuorielementtien verkotus on luotu oletusasetuksin (*Automatic, Automatic, Division 1: 5*).



Kuva 15. 5-kerroksisen CLT-elementeistä koostuvan rakennuksen vaakasiirtymät [mm] jäykin (vas.) ja elastisin liitossaumoin.

Yllä mainituilla muuttujilla mallinnetun kuorimallin vaakasiirtymä täysin jäykin liitossaumoin on noin 2,7 mm. Vastaava rakenne mallinnettuna lineaariselastisin liitossaumoin siirtyy ylimmissä kerroksissa vastaavalla kuormituksella yli puoli metriä, jota havainnoitu kuvassa 15 punaisella pohjalla olevalla luvulla. Lisäksi rakennus kiertyy suhteessa huomattavasti liitoksilta jäykkää rakennusta enemmän johtuen vaihtelevista liitosjäykkyyksien arvoista erilaisten rakenteiden kesken. Molempien rakennusten vasemmassa lohossa sijaitseva hissikuilu jäykistää rakennuksia huomattavasti ja näin ollen siirtymät kyseisessä lohossa ovat suhteellisen pieniä myös joustavammassa rakennuksessa. Rakennuksen korkeus  $H$  on  $5 \times 2,95 \text{ m} = 14,75 \text{ m}$ , joten jo pelkästään tällä yksikertaisella tarkastelulla voidaan todeta, että rakennuksen vaakasiirtymä ylittää RIL 205-1 asettaman rajan  $H/300$ , joka tämän korkuisella rakennuksen rajoittaisi siirtymän noin 50 mm:iin.

Todellisuudessa rakennuksen kokonaisjäykkyys vaakakuormia vastaan olisi suurempi, kun otetaan huomioon muun muassa – tässä tarkastelussa pois jätetyt – seinien vaakasaumojen väliset liitostekniikat. Vaaka- ja pystyrakenteiden liitosjäykkyyttä voitaisiin lisäksi kasvattaa käyttämällä esimerkiksi paksumpia ja useampi ruuveja liitoksissa tai luvussa 6.2.2 esitetyin lisäjäykistekulmalevyin. Muihin rakennuksen jäykistystekniikoihin ei tässä työssä paneuduta.

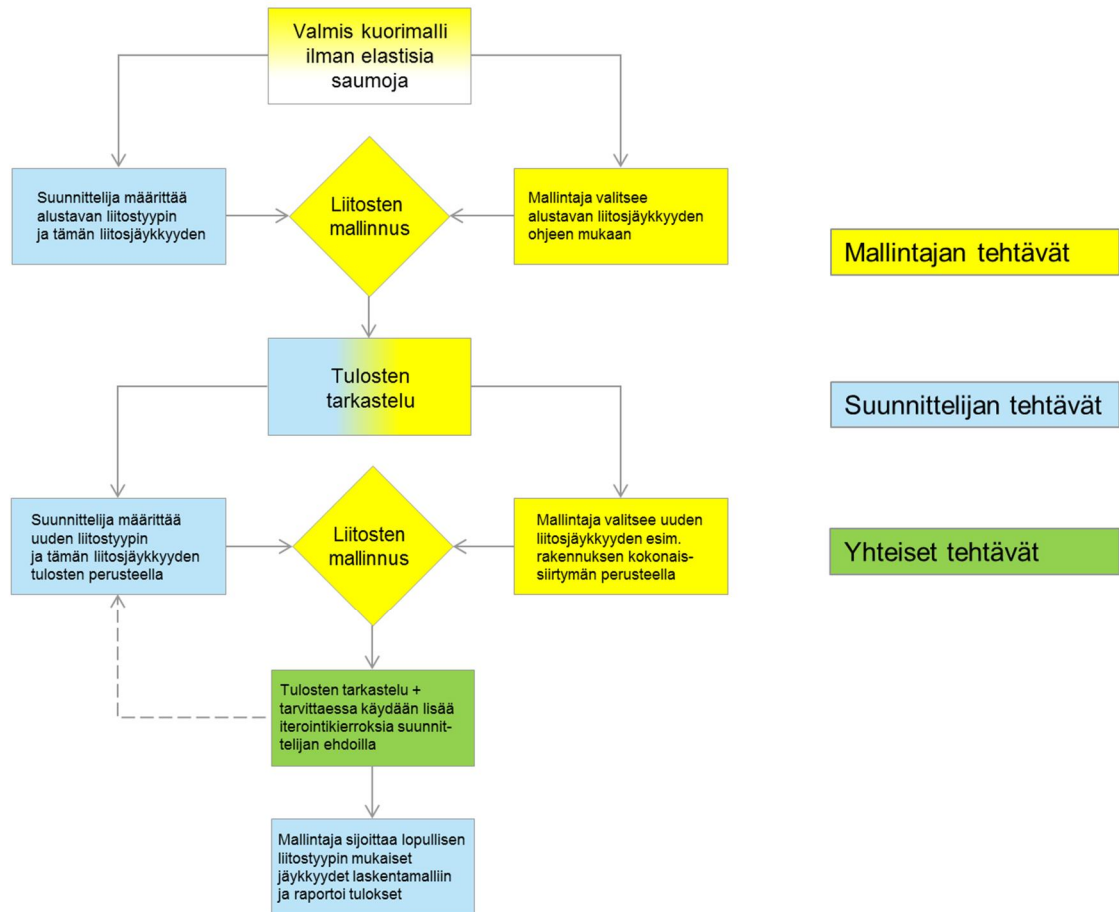
## 6 CLT-levyt ja jäykistävien rakenteiden väliset liitokset laskentamallintamisessa Robotilla

Mallinnustyökaluksi valittiin Robotissa kaksiuotteiset kuorielementit. Kuorielementeillä mallintaminen mielletään usein käytännöllisimmäksi mallinnustavaksi ja haluttiinkin tutkia onko CLT-levyjen ja näiden välisten liitosten jäykkyysominaisuuksien huomioon ottaminen saavutettavissa kohtuullisella määrällä työtä.

### 6.1 Suunnittelun kulku

Vertikaalijäykisteille ja näiden liitoksille siirtyvät rasitukset lähtökohtaisesti määrittävät tarvittavan liitoskapasiteetin. Rasitukset ja tarvittavat liitokset voi suunnittelutoimistossa hyvinkin määrittää jopa useampi eri ihminen. Laskentamalli, jossa liitosjäykkyyksien suhteilla on suuri merkitys lopullisten rasitusten jakautumiseen, saattaa johtaa uudelleenlaiseen roolijakoon. Jos laskentamalli päätetään kohteesta luoda, sen saattaa tehdä henkilö, jolla ei ole mitään muuta roolia samassa hankkeessa. Robot-laskentamallista saatavat tulokset, rakennuksen jäykistyksen osalta, ovat siis riippuvaisia esimerkiksi käytetyistä liitostyypeistä. Tällöin mallintaja joutuu itse alustavasti valitsemaan mallissa käytettävät liitostyypit, ennen kuin mallista saadaan käyttökelpoisia tuloksia. Eli laskentamallin tuottaja joutuu suunnittelemaan alustavan liitoksen epätietoisena siihen vaikuttavista voimista. Tällainen menettely on epätavallista suunnittelutoimistossa, mutta välttämätöntä, jotta laskentamallin voidaan olettaa toimivan oikein.

Kyse on siis iterointimenettelystä. Laskentamallissa käytettävän alustavan liitoksen voi, mallin tuottajan sijaan, määrittää rakennesuunnittelija joka suunnittelee myös lopullisen liitoksen. Mallintaja syöttää valitun liitoksen mukaisen jäykkyyden laskentamalliin, jolloin alustavat tulokset ovat havainnoitavissa. Liitoksen suunnittelija voi näiden tulosten perusteella joko todeta alustavan liitoksen kapasiteetin riittäväksi tai määrätä käytettävän erilaista liitosta. Tällä ensimmäisellä iterointikierröksellä myös mallintaja itse voisi vaikuttaa liitosjäykkyyteen tarkastelemalla esimerkiksi koko rakennuksen siirtymää. Jos siirtymä on liian suuri, voi hän omatoimisesti vaihtaa liitostyyppiä jäykempään, toimittaa uudet tulokset suunnittelijalle ja mainita muuttaneensa liitostyyppiä itse. Iterointi päättyy, kun suunnittelija toteaa liitosten kapasiteetin riittäväksi. Tätä menetelmää selvennetään kuviossa 1, ja on tietysti vain yksi esimerkki, kuinka uuden roolijaon kanssa voisi toimia.



Kuvio 1. Vuokaavio liitosjäykkyyksien laskentamallintamiseen vaadittavasta iterointimenettelystä.

## 6.2 Robot-laskentamallin määrittäminen

Tässä ohjeessa perehdytään kuvan 16 testimallin avulla sekä rakenneosien että näiden välisten liitosten jäykkyyksien soveltamiseen laskentamallissa. Ellei toisin mainita, ohjeessa esitettävät jäykkyyksien arvot sekä niiden käyttö laskentamallissa koskevat ainoastaan CLT- rakenteita tilanteissa, jotka testimallissa on otettu huomioon. Jotta kuorimalli CLT-rakenteesta olisi mielekästä toteuttaa, on saumojen liitoskohdissa tehty yksinkertaistuksia, joiden johdosta ohjeen käyttäjän tulee olla tarkkana mm. soveltaessa ohjeen taulukoimia liitosjäykkyyksiä kuorielementtien saumoissa.

Ohjeessa ei käsitellä seinien pystysaumojen välisiä jäykkyyksiä vaan niiden oletetaan olevan vapaita toisistaan, jolloin seinien väliset nurkat täytyy vapauttaa toisistaan seinän tasoa kohtisuorassa suunnassa ( $U_z$ ). Jos päätetään käyttää kuormapintoja (*One Way Cladding*) kuorielementtien sijaan vaakakuormitettavina pystyrakenteina, ei *claddingin* nurkan ja kantavan seinän nurkan kohdatessa määritetä vapautuksia pystypinto-

jen välille. *Claddingin* kantava suunta tulisi valita niin, että kuormat siirtyvät vain vaakatason levykentille. Ohje on kirjoitettu sen oletuksen pohjalta, että pystykuormia kantamattomat rakenteet on mallinnettu kuorielementein, mutta sitä voidaan soveltaa myös *Cladding*-pintoja käytettäessä.

Ohjeen testimallin oma paino, ulkoiset pystykuormat ja näistä aiheutuvat mahdolliset muodonmuutokset sekä niiden vaikutukset tuloksiin on jätetty huomiotta. Ohjeet koskevat siis vain kuvan 16 kuorielementtien ja saumojen jäykkyyden mallintamista niin, että sen toiminta kuormitustilanteessa vastaisi CLT-levyistä kootun rakennuksen toimintaa. Ohjeiden mukaan luotu laskentamalli on tarkoitettu vain rakennuksen ja rakenteiden jäykistysominaisuuksien ja vaakakuormista aiheutuvien rasiusten tarkastelua varten.

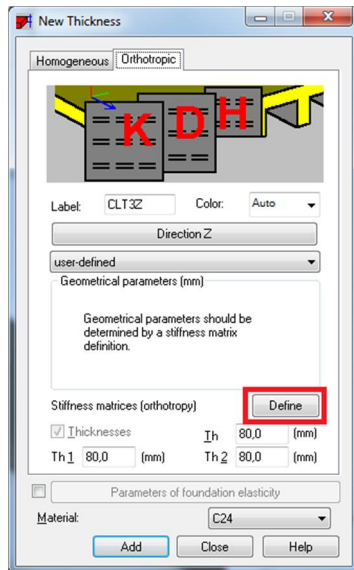
Liitosjäykkyyksiä määritettäessä esimerkiksi kitkan vaikutus on jätetty huomiotta ja esitetyt liitosjäykkyyksien arvot perustuvat ainoastaan itse liitosten mekaanisten osien ominaisuuksiin.

#### 6.2.1 Ristiinliimatun rakenteen huomiointi laskentamallissa

Elementtimenetelmän mukaisesti tulee CLT-levylle luoda jäykkyydsmatriisi, joka huomioi ristiinliimatun rakenteen lautojen syysuunnasta riippuvaisen jäykkyyden. A&S Virtual Systems Oy on tätä varten luonut Pöyryn käyttöön valmiin *Excel*-pohjan, josta lähtöarvot syöttämällä saadaan Robottiin soveltuva matriisi. Mallinnettaessa CLT-rakenteita Robotilla, tämän ohjeen avulla, tulee kyseistä *Excel*-pohjaa käyttää tulosten paikkansapitävyyden varmistamiseksi.

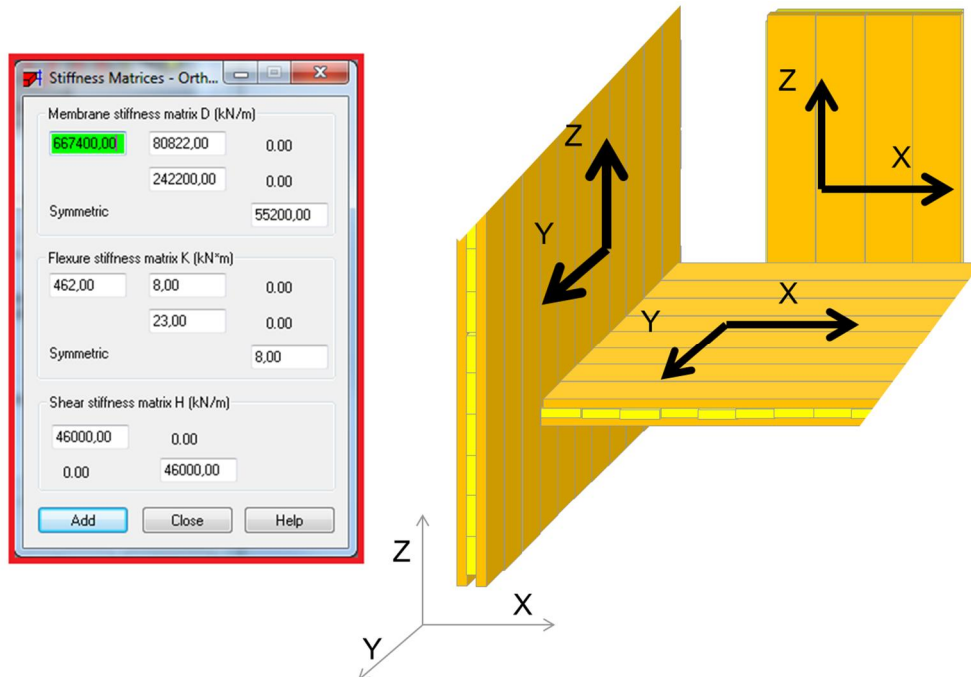
Testimallissa on pysty- sekä vaakarakenteina käytetty taulukossa 2 esitetyn rakenteen mukaisia kolmikerroksisia CLT-levyjä. Matriisimuotoon kyseinen levy kääntyy, pintalamellien olleessa kantavaan suuntaan, kuvan 17 dialogin mukaisesti. Arvoja ei saa tuottaa *Excel*-taulukosta suoraan dialogiin vaan ne täytyy syöttää siihen käsin. Kantava suunta ortotrooppiselle levylle määritetään kuvan 16 dialogin Orthotropic-välilehdeltä, joka löytyy valikosta Geometry -> Properties -> Thickness.





Kuva 16. Dialogi ortotrooppista seinää määrittäessä.

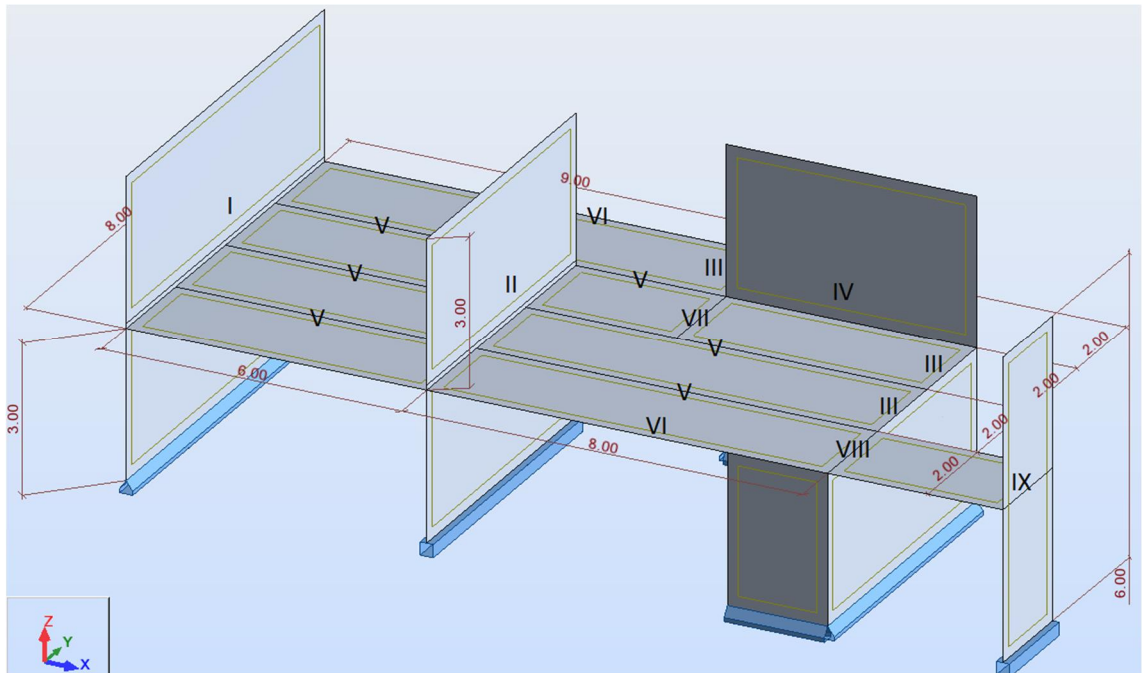
Kuvan 16 dialogin ensimmäisen painikkeen Direction Z termi ilmoittaa pintalamellien olevan samansuuntaiset globaalin Z-akselin kanssa. Tätä voidaan muuttaa painikkeen avaamasta dialogista. Alasvetovalikon *user-defined* -valinta mahdollistaa käyttäjän haluaman ortotrooppisen materiaalin luomisen, joka onnistuu *Define*-painikkeen avaamassa kuvan 17 mukaisessa dialogissa. Ensimmäiseksi paksuudeksi (Th) tulisi syöttää levyn kokonaispaksuus; kaksi muuta kenttää (Th1 ja Th2) voidaan tässä tarkastelussa jättää tyhjiksi.



Kuva 17. 30/20/30 mm paksun, kolmikerroksisen CLT-levyn jäykkyydsmatriisi Robotissa (vas.) sekä vaaka- ja pystyrakenteen sallitut ortotrooppiset (pintalamellin syiden) suunnat.

Kun uusi materiaali on luotu, voidaan CLT-levyt mallintaa, kuten kuorielementit normaalistikin mallinnettaisiin. Ortotrooppista suunta määrittäessä tulee olla selvillä mihin suuntaan levyjen halutaan kantavan. Esimerkiksi määrittäessä seinälle Z-suunnan sijaan X tai Y, tulee ensinnäkin varmistua että valittu suunta on tasonsuuntainen, ja olla tietoinen että näin toimittaessa pintalamellien syysuunta muuttuu valitun ortotrooppisen suunnan mukaiseksi. Seinän tapauksessa tämä toimenpide heikentäisi sen jäykkyyttä sekä pysty- että vaakakuormia vastaan, sillä se olisi asennettu ”kyljelleen”. Lattioille voidaan määrittää vain suunnat X tai Y, sillä pintalamellit eivät voi olla globaalin pysty-akselin suuntaisia. Sallittuja ortotrooppisia suuntia eri rakenteille on havainnointi kuvassa 17. Kuorielementtien lokaalin akseliston suunta ei vaikuta tuloksiin millään tavalla.

### 6.2.2 Liitosjäykkyyden huomiointi laskentamallissa



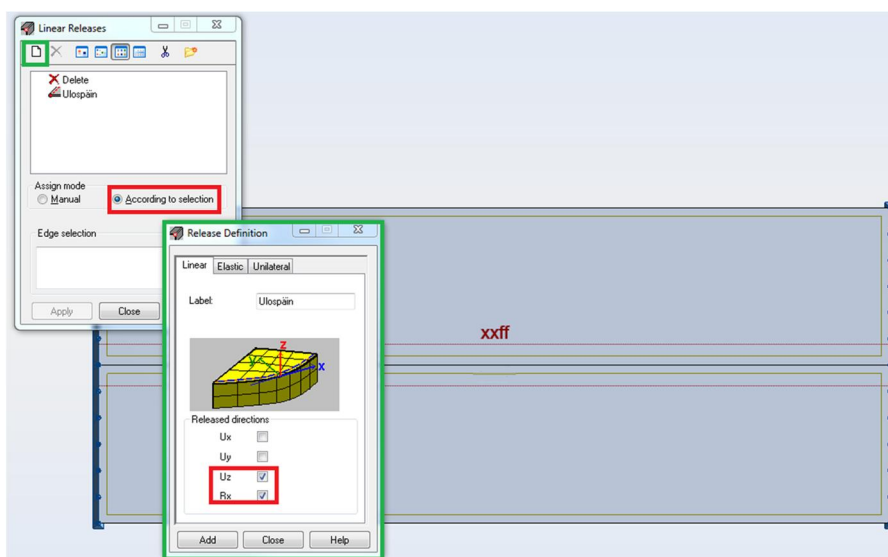
Kuva 18. Ohjeessa havainnoitava testimalli.

Kuvan 18 liitosnumeroinnin selite kuorielementtien saumoille:

I	Platform-liitos jatkuvaan seinään, kun vaakataso ei jatku seinän molemmin puolin
II	Platform-liitos jatkuvaan seinään, kun vaakataso jatkuu seinän molemmin puolin
III	Liitos ei-jatkuvaan seinään (pätee myös palkille), kun vaakataso ei jatku seinän molemmin puolin
IV	Liitos jatkuvaan seinään vaakatason ei-kantavalla sivulla
V	Liitos toiseen vaakatason levyyn näiden ei-kantavilla sivuilla
VI	Liitos ei-jatkuvaan seinään vaakatason ei-kantavalla sivulla
VII	Yhtenäinen vaakatason levy mallinnettuna kahdessa osassa, sillä tämän ei-kantavien sivujen jäykkyysominaisuudet ovat sekä liitoksen V että IV mukaiset
VIII	Liitos toiseen vaakatason levyyn näiden kantavilla sivuilla, seinän tai palkin yllä
IX	Balloon-liitos jatkuvaan seinään

Tässä luvussa esitetään kunkin liitostapauksen toteuttaminen Robotissa, liitosnumeron mainitsevien, ohjaavien otsikoiden yhteydessä. Mahdolliset tapaukset, joita kuvan 18 mukaan ei olisi huomioitu, ovat yleensä yhteensopivia kuvan jonkin muun tapauksen kanssa ja käsitellään samassa yhteydessä.

Rasitusten siirtymiseen kuorielementtien välillä voidaan Robotissa vaikuttaa elementtien saumoihin lisättävillä lineaarisilla vapausasteilla (*Linear Releases*). Näitä käyttämällä voidaan kuormien siirtyminen levyn reunassa, joko vapauttaa kokonaan johonkin suuntaan tai antaa saumalle elastinen arvo, joka vastaa haluttua liitosjäykkyyttä. Jos kahden tai useamman kuorielementin yhteiselle saumalle ei ole määritetty vapautusta, toimivat kuorielementit yhtenä levynä. Esimerkkinä kokonaisvaltaisesta vapauttamisesta voidaan antaa vaikka ontelolaatan pitkän eli ei-kantavan sivun saumalle syötettävä vapausaste, joka sallii vierekkäisten laattojen taipumisen tai viereisen seinän puristumisen globaalin Z-akselin suunnassa riippumatta viereisen laatan taipumasta tai seinän puristumasta. Vastaavasti CLT-levyistä kootun vaakatason levyjen ei-kantavat sivut tulee vapauttaa ympäröivistä rakenteista, jotta toiminta mallissa vastaisi laskennallista toimintaa. Käytännössä tämä tarkoittaa kuvan 19 mukaista tilannetta, jossa vierekkäisten vaakatason levyjen taipumat ja siirtymät globaalin Z-akselin suunnasta ovat naapuristaan riippumattomia.

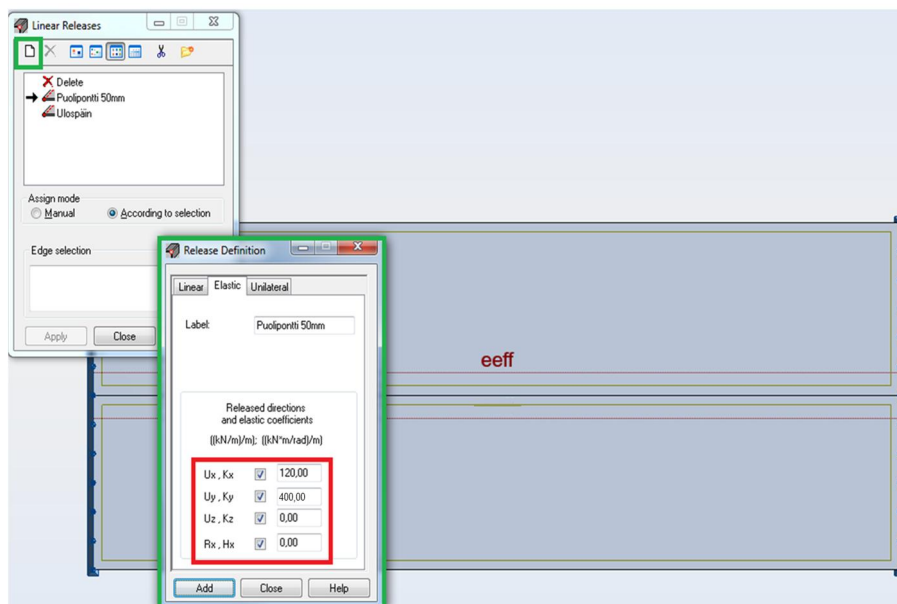


Kuva 19. Tasossa vierekkäisten kuorielementtien yhteisen sauman vapautus pystykuormien suhteen.

Kuvan 19 *Linear Releases* -dialogi löytyy valikosta *Geometry* -> *Additional Attributes* -> *Linear Releases*. Vihreällä merkitystä painikkeesta aukeaa *Release Definition* -dialogi, jonka avulla määritetään vapautettavat suunnat. Dialogissa esitetystä koordinaatistosta

voidaan havaita, että haluttu vapautussuunta eli saumasta ”ulospäin” (tasoa koh-  
tisuoraan) on  $U_z$ . Määritetään sauma myös momenttivapaaksi, jolloin valinnat  $U_z$  ja  $R_x$   
tulee aktivoida. Vapausasteiden määrittämisen jälkeen tulee alkuperäisestä dialogista  
aktivoida luotu *release*, valita *According to selection* -vaihtoehto, valita vapautettava  
sauma (*Edge*) ja käyttää vielä dialogin Apply-painiketta. Tuloksena malliin ilmestyy  
kuvan 19 mukainen merkintä ”xxff”, jossa x tarkoittaa ei-vapaata ja f (*free*) vapaata  
suuntaa *Release Definition* -dialogissa olevan järjestyksen mukaisesti. Nyt yhteen le-  
vyyn vaikuttavat pystykuormat eivät taivuta naapurilevyä vaikka nämä jakavat yhteisen  
sauman.

Jos *Release Definition* -dialogiin määritettäisiin suunta  $U_x$  vapaaksi, eivät vaakakuor-  
mista syntyvät tasonsuuntaiset leikkausrasitukset siirtyisi levyjen välisessä saumassa  
ollenkaan. Vastaavasti vapauttamalla  $U_y$  eivät tasonsuuntaiset rasitukset siirtyisi levyltä  
toiselle poikittaissuunnassa saumaan nähden. Jotta liitossiirtymien vaikutukset saa-  
daan huomioitua, tulee kuitenkin juuri nämä suunnat vapauttaa. Tällöin tuleekin käyttää  
elastislineaarista vapausasteita, joilla voidaan kyseiset suunnat vapauttaa vain osittain.  
Nämä voidaan määrittää kuvan 20 *Release Definition* -dialogin *Elastic*-välilehdeltä,  
johon tässä tapauksessa on levyjen väliseksi liitokseksi valittu puoliponttiliitos 50 mm  
liitinvälillä ja 8 mm liitinpaksuudella. Arvojen keskeinen poikkeavuus dialogissa on seli-  
tetty luvun 6.2.3 reunaehdoissa. Jäykkyyden yksikkö Robotissa on  $[kN/m/m]$ , joten an-  
nettu jäykkyys jakautuu koko saumalle tasaisesti.



Kuva 20. Vaakatason vierekkäisten kuorielementtien yhteisen sauman vapautus pystykuormien ja momentin suhteen sekä liitosjäykkyyden huomiointi.

Tässä ohjeessa liitosjäykkyydet on esitetty muuttujana  $K_s$ . Muuttujan arvo vastaa yksileikkeisen soiroliitoksen jäykkyyttä ja siihen vaikuttaa liittimien paksuus ja liitinvälin tiheys. Taulukon 4 arvot siis vastaavat suoraan arvoa  $K_s$  ja taulukon 3 arvot ovat yhtä kuin  $2 \cdot K_s$  pienin eroin, jotka johtuvat pyöristyksistä. Muuttujaa  $K_s$  on sovellettu myös pysty- ja vaakarakenteiden välisten liitosjäykkyyksien määrittämisessä. Tämän takia onkin huomattava, että  $K_s$  vastaa liitoksissa, joissa käytetään kulmaterästä, kahdesta ruuvista aiheutuvaa jäykkyyttä. Eli oletetaan, että vaakarakenteen ja kulmateräksen kiinnittää toisiinsa vain yksi ruuvi, ja että pystyrakenteen ja kulmateräksen kiinnittää toisiinsa vain yksi ruuvi. Kulmateräksessä on siis yhteensä vain kaksi ruuvia. Ruuvien lukumäärään ollessa todellisuudessa suurempi, ohjeen taulukoimat arvot ovat kerrottavissa todellisen ruuvien lukumäärän puolikkaalla. Esimerkiksi, jos kulmateräksessä on sekä pystyrakenteeseen että vaakarakenteeseen kiinnitettynä kolme ruuvia per rakenne tulee arvo  $K_s$  taulukosta 4 kertoa  $\frac{6}{2}$ :lla, jolloin saadaan saumalle syötettävä kokonaisjäykkyys. Myös kulmateräs oletetaan siis toimivaksi kuten yksileikkeinen soiroliitos, jossa tässä tapauksessa onkin yhteensä 6 ruuvia vierekkäin.

**HUOM! Tätä kerroinmenettelyä tulee soveltaa kaikissa niissä tilanteissa, joissa jäykkyyttä  $K_s$  käytetään, vaikka tätä ei olisi erikseen mainittu eri liitostapausten yhteydessä.**

**Taulukko 3. Kaksileikkeisen soiroliitoksen ruuviparin sekä puoliponttiliitoksen jäykkyyden ( $2 \cdot K_s$ ) Robot-arvoja puun lujuusluokan ollessa C24.**

Liitinväli / s [mm]	Liittimen paksuus / d [mm]	Liitosjäykkyys / $K_{tot}$ [kN/m/m]
50	6	96
50	8	120
100	6	48
100	8	60
150	6	32
150	8	40
200	6	24
200	8	30
250	6	19
250	8	24
300	6	16
300	8	20

Taulukko 4. Yksileikkeisen soiroliitoksen jäykkyyden ( $K_s$ ) Robot-arvoja ruuviparille puun lujuusluokan ollessa C24.

Liitinväli / s [mm]	Liittimen paksuus / d [mm]	Liitosjäykkyys / $K_{tot}$ [kN/m/m]
50	6	48
50	8	60
100	6	24
100	8	30
150	6	16
150	8	20
200	6	12
200	8	15
250	6	10
250	8	12
300	6	8
300	8	10

### 6.2.3 Liitosjäykkyydet testimallin tapauksissa

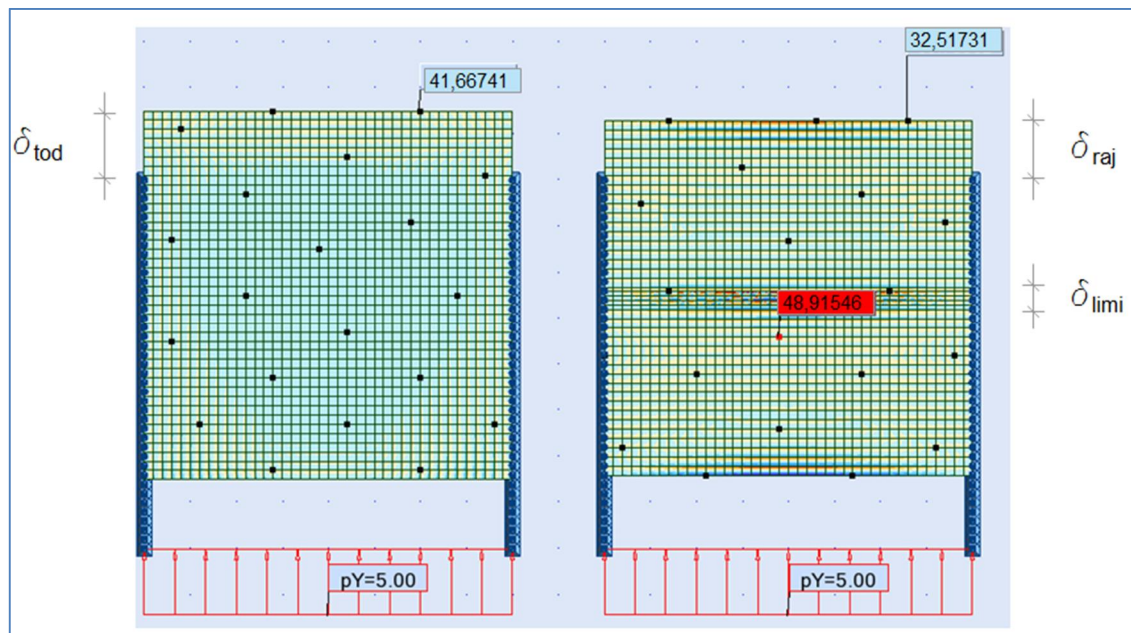
#### *Reunaehdot ja perustelut yksinkertaistuksille*

Suurimmat ongelmat laskentamallin luomisessa kuorielementein aiheutuvat eri elementtien jakamista yhteisistä saumoista. Kun toisiinsa liittyville pysty- ja vaakaelementeille luodaan elementtiverkko (*Mesh*), syntyy näiden välisiin yhteisiin saumoihin yhteisiä solmupisteitä. Solmupiste syntyy poikkeuksetta vähintään kunkin kuorielementin nurkkaan, jolloin kyseisen kuorielementin kahden sivun ominaisuudet vaikuttavat solmupisteen käyttäytymiseen. Tätä voidaan havainnoida helpoiten liitostapauksen V yhteydessä, jossa halutaan määrittää elastisuus kahden vaakatason levyn ei-kantavan sivun välille. Elastisuus määritetään sekä sauman suunnassa että sitä kohtisuoraan, jotta sekä levyjen sivusiirtymä että erkanema huomioidaan. Nämä jäykkyyden arvot olisivat laskennallisesti keskenään yhtä suuret. Tästä aiheutuu useampi ongelma:

1. Tason suunnassa kuormitettu vaakaelementti tahtoo limittyä viereisen vaakaelementin kanssa kyseiseen suuntaan annetun jäykkyyden salliman siirtymän verran. Todellisuudessa vaakatason levyt eivät pääsisi liittymään keskenään, kuin enintään puumateriaalin maksimipuristuman verran.
2. Jotta limitystä saataisiin kontrolloitua, voisi kyseisen suunnan jäykkyyden määrittää äärimmäisen jäykäksi vaakaelementtien välisessä yhteisessä saumassa. Tästä taas aiheutuu, että

- myös erkanema vaakaelementtien välillä estetään kokonaan. Muun muassa tuulen imukuormat, kuitenkin vaatisivat, että erkaneman sallittaisiin tapahtua.
- vaakaelementin nurkan solmupiste, joka on yhteinen pystyelementin kanssa, määrittäyty myös kyseiseen suuntaan äärimmäisen jäykäksi. Näin ollen vaaka- ja pystyelementin jakamalle saumalle määritetty sauman suuntainen elastisuus ei enää vaikuta vaakaelementin siirtymään lähes ollenkaan ja levykentän kokonaissiirtymä laskee lähelle nollaa.

Ongelmiin on haettu ratkaisua määrittämällä vaakaelementtien väliselle saumalle sauman suuntaan kohtisuoraksi jäykkyydeksi jokin väliarvo. Erkanemaa rajoittava jäykkyyden arvo esimerkkitilanteessa, jossa sauman suuntainen liitosjäykkyys olisi 120 [kN/m/m], tulisi olla myös 120 [kN/m/m]. Tällöin levyt pääsevät kuitenkin liittyneeseen ja elementtien siirtymät poikkeavat laskennallisista siirtymistä huomattavasti. Kuvan 21 tilanteessa tämä ero oikeanpuoleisen rakenteen ylemmässä elementissä on noin 28 % ja alemmassa elementissä noin 14 %.



Kuva 21. Limittymisen vaikutus levykentän siirtymään. Yksiköt [mm] ja [kN/m].

Kuvan vasemmanpuoleisen levykentän tuettujen saumojen jäykkyys on 60 [kN/m/m] ja siirtymän  $\delta_{tod}$  arvo on hyvin lähellä laskennallista arvoa. Oikeanpuoleisen kahdesta elementistä koostuvan levykentän tuettujen sivujen jäykkyys on sama, kuin vasemmalla, mutta levyjen väliseen saumaan on määritetty saumaa kohtisuora (kuormituksen



suuntainen) jäykkyys 120 [kN/m/m]. Kuten kuvasta voidaan havaita, toteutuu  $\delta_{raj} < \delta_{tod}$  vaikka siirtymien tulisi olla yhtä suuret. Pieneneminen johtuu limittymisestä, jota on kuvattu suureella  $\delta_{limi} = 48,91546 - 32,51731 \approx 16,4 \text{ mm}$ , ja joka todellisuudessa olisi nolla, jos puun puristumista ei oteta huomioon.

Jotta haluttu väliarvo saatiin määritettyä, syötettiin levyn välisen sauman saumaa kohdittuoraksi jäykkyydeksi eri arvoja ja haettiin mallista tilannetta, jossa loppusiirtymän ja todellisen siirtymän ero sekä limittymän suuruus olisivat mahdollisimman pienet. Lisäksi varmistuttiin ettei erkanemaa rajoiteta liikaa tilanteessa, jossa sen laskennallinen arvo on yhtä suuri siirtymän  $d_{tod}$  kanssa. Sopivaksi väliarvoksi saatiin kyseisellä koejärjestelyllä jäykkyys 400 [kN/m/m]. Tämä tulos perustuu siis vain kuvan 21 koejärjestelyn mukaisten rakenteiden toimintaa ja on todellisuudessa riippuvainen jänneväleistä, kuormista ja rakenteiden muodoista. Tulosta voidaankin pitää lähinnä vain nyrkkisääntönä.

Lisäksi suositellaan elementtiverkon luomista elementtikohtaisesti. Jos *meshin* luominen kullekin elementille erikseen osoittautuu liian työlääksi, suositellaan se luomaan elementtiryhmillä, joiden jäsenet ovat dimensioiltaan samaa luokkaa. Etenkin jänneväliltään parilliset ja parittomat elementit kannattaisi verkottaa erikseen, tiheydellä, joka on jaollinen kyseisen elementin jännevälillä. Näin etenkin tuilla saadaan liitosjäykkyydet jakautumaan tasaisemmin elementtien saumoissa. Verkotuksella voi olla suurikin vaikutus esimerkiksi levykentän siirtymään, jos levyn verkotuksen tiheys eroaa levyn tuetuissa päissä toisistaan. Välillä tätä vaikutusta ei esiinny lainkaan vaikka lähtötilanteen reunaehdot olisivat samat, johtuen Robotin oikuisista. Tämä ohje verkotukselle on vain suositus varsinkin, jos jokin toinen menettelytapa on jo käyttäjälle vakiintunut.

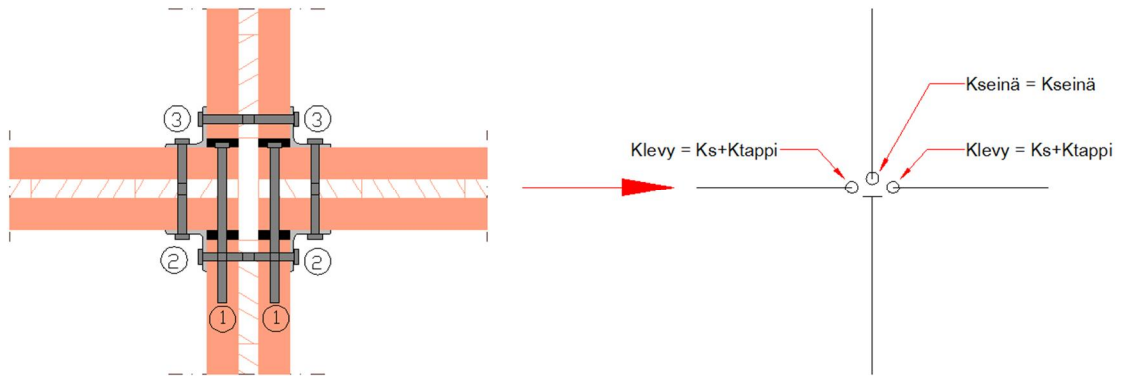
#### *Kahden laatan ei-kantavan sivun välisen sauman leikkausjäykkyys (liitosnumero V)*

Kuvan 20 esittämään dialogiin syötetään taulukosta 3 tai 4 haluttu liitosjäykkyys riippuen liitostyypistä ja -välistä sekä liitinpaksuudesta. Tämä sivusiirtymää vastustava liitosjäykkyys  $K_s$  syötetään kenttään  $U_x, K_x$ . Erkanemaa vastustava liitosjäykkyys suunnalle  $U_z, K_z$  tulisi koetulosten perusteella olla 400 [kN/m/m]. Huomaa, että *release* annetaan vain yhden levyn saumalle. Sauman vapauttaminen molemmiin puolin ei-kantavalla sivulla johtaa usein epästabiliuteen ja aina siirtymien kaksinkertaistumiseen.



*Platform-liitos jatkuvaan seinään (liitosnumero I ja II)*

Vaakatason eli välipohjalevyn jatkuessa molemmin puolin jatkuvaa seinää, voidaan Platform-liitosta käytettäessä huomioida liitosjäykkyys kuvassa 22 esitetyn sauva-analogian mukaisesti.



**Kuva 22. Leikkauskuva liitoksesta Platform-järjestelmässä, kun vaaka- ja pystyrakenne ovat jatkuvia (vas.) sekä liitosta vastaava sauva-analogia.**

Sekä molempien välipohjalevyjen seinän viereisiin saumoihin että välipohjasta ylemmän seinän alareunan saumaan sijoitetaan elastislineaarinen vapausaste, kuten sauva-analogiassa on esitetty. Jäykkyyksiä  $K_{seinä}$  ja  $K_s + K_{tappi}$  on havainnoitu kuvan 23 dialogeissa. Huomaa, että vaakatason alapuolisen seinän alareunan saumaa ei vapauteta.

Kuvan 22 vaakarakenteen saumaan syötettävä arvo  $K_s$  vastaa vaakarakenteen alapinnassa olevien kulmateräsliitoksen (leikkauskuvassa nro 2) jäykkyyttä  $K_{s_{ala}}$ . Tähän summataan tason lävistävien ruuvien (nro 1) jäykkyys  $K_{tappi}$ , jolloin saadaan välipohjalevyn saumalle syötettävä kokonaisjäykkyys. Vaakarakenteen yläpinnassa sijaitsevien kulmaterästen (nro 3) tuoma jäykkyys huomioidaan vasta seinän sauman jäykkyydessä. Tason lävistävät ruuvit sekä molempien pintojen kulmaraudat huomioidaan seinän reunalle syötettävässä jäykkyydessä sarjaan kytkemällä näiden osakohtaiset jäykkyydet:

$$K_{seinä} = \frac{1}{\frac{1}{x_{ylä} \cdot K_{s_{ylä}}} + \frac{1}{x_{ala} \cdot K_{s_{ala}} + x_{tappi} \cdot K_{tappi}}} \quad (4)$$

missä,  $K_{s_{ylä}}$  Vaakatason yläpinnan kulmaterästen jäykkyys  $K_s$   
 $K_{s_{ala}}$  Vaakatason alapinnan kulmaterästen jäykkyys  $K_s$

$X_{ylä}$  ja  $X_{ala}$  Ylä- ja alapinnan kulmaterästen lukumäärä leikkauksessa eli 1 tai 2;

- pystyrakenteen molemmin puolin  $X = 2$
- pystyrakenteen yhdellä puolen  $X = 1$

$X_{tappi}$  Tason lävistävien vierekkäisten ruuvien lukumäärä  $\geq 0$

Platform-järjestelmän mukaisessa liitoksessa kulmateräksset saattavat olla myös korvattu vinoon asennetuilla ruuveilla, jotka ruuvataan yläpuolisen seinän läpi välipohjalevyyn kiinni kuvan 5 mukaisesti. Tällöin  $K_{S_{ylä}}$  saa arvokseen  $K_{S_{tappi}}$  mukaisen jäykkyyden, joka vastaa vinoon ruuvatun ruuvien jäykkyyttä, ja  $X_{ylä}$  vastaa yläpinnan vinojen ruuvien lukumäärää leikkauksessa.

Esimerkkinä arvojen sijoittelusta voisi kuvaan 22 mukailevassa tapauksessa arvoiksi antaa:

$$\begin{array}{lll} K_{S_{ylä}} = \frac{6}{2} \cdot 60 \frac{kN/m}{m} & K_{S_{ala}} = \frac{6}{2} \cdot 30 \frac{kN/m}{m} & K_{tappi} = 83 \frac{kN/m}{m} \\ X_{ylä} = 2 & X_{ala} = 2 & X_{tappi} = 2 \end{array}$$

Liitokseen on valittu siis kulmateräksiin 8 mm paksut ruuvit, joita yhdessä kulmateräksessä on yhteensä 6 eli 3 per laippa. Alapinnan kulmaterästen tiheys on 100 mm ja yläpinnan 50 mm. Tason lävistävinä ruuveina eli "tappeina" on käytetty paksuudeltaan 12 mm itseporautuvia ruuveja 100 mm välein. Arvot kaavaan syötettynä saadaan ylemmän seinän alareunan saumalle Robotissa syötettävä jäykkyys:

$$K_{seinä} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 60 \frac{kN/m}{m}} + \frac{1}{2 \cdot 3 \cdot 30 \frac{kN/m}{m} + 2 \cdot 83 \frac{kN/m}{m}}} \approx 352 \frac{kN/m}{m}$$

Välipohjalevyjen seinien viereisten saumojen jäykkyyksiksi näin ollen saadaan:

$$K_S + K_{tappi} = K_{S_{ala}} + K_{tappi} = \frac{6}{2} \cdot 30 \frac{kN/m}{m} + 83 \frac{kN/m}{m} = 173 \frac{kN/m}{m}$$

Yhden tason lävistävän liittimen jäykkyyden  $K_{tappi}$  voi määrittää taulukosta 5. Liittimiä voi liitoskohdassa olla useampia vierekkäin. On kuitenkin huomioitava, että kaava  $K_{seinä}$

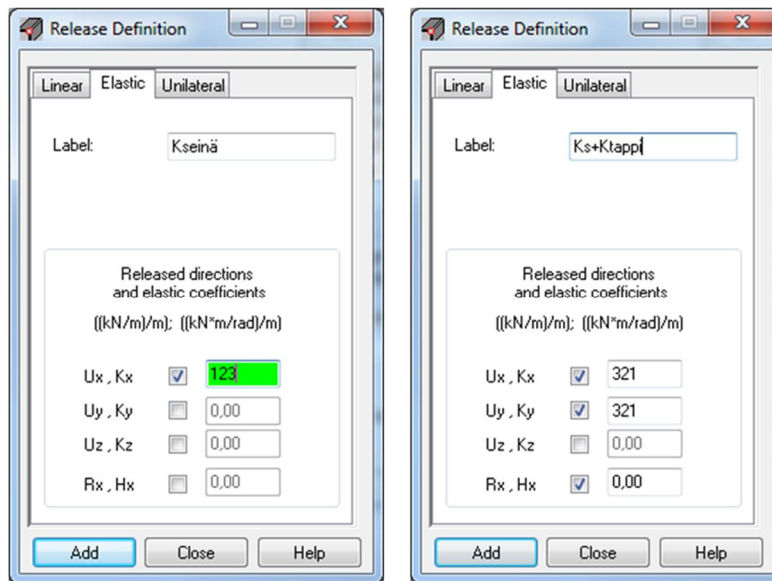
sisältää muuttujan tappien lukumäärälle poikkileikkauksessa, joten muuttuja  $K_{tappi}$  valitaan taulukosta sellaisenaan.

**Taulukko 5. Platform-järjestelmässä käytettävän yhden ruuvin jäykkyyden ( $K_{tappi}$ ) Robot- arvoja puun lujuusluokan ollessa C24.**

Liitinväli / s [mm]	Liittimen paksuus / d [mm]	Liitosjäykkyys / $K_{tot}$ [kN/m/m]
50	10	144
50	12	166
100	10	72
100	12	83
150	10	48
150	12	55
200	10	36
200	12	41
250	10	28
250	12	33
300	10	24
300	12	27

Kaava 4 pätee myös liitoksille, joissa vastaavan kulmateräsasettelun lisäksi liitoksessa ei ole kulmaterästen ruuvien lisäksi muita kiinnitysosia. Tällöin muuttuja  $K_{tappi}$  saa arvon nolla muuttujan  $X_{tappi}$  ollessa nolla, ja kaava huomioi vain kulmaterästen liitosjäykkyyden vaikutuksen seinän sauman jäykkyyteen. Vastaavasti välipohjalevyn sauma saa jäykkyyden  $K_s + 0$ .

On huomattava, että liitosjäykkyyksiä voidaan kytkeä sarjaan jäykkyyden  $K_{seinä}$  tapaan vain silloin, kun kulmateräслиitokset ovat jäykkyydeltään samanarvoiset pystyrakenteen molemmin puolin. Voimien jakautumista eri jäykkyyden omaaville liitososille on erittäin vaikea arvioida, jos esimerkiksi kuvan 22 tapauksessa seinän vasemman puolen liitokset olisivat jäykempiä kuin oikean puolen. Toisaalta annettaessa jäykkyys välipohjalevyn saumalle tämä ero voidaan helposti ottaa huomioon muutamalla arvo  $K_s$  erisuuruiseksi puolin ja toisin pystyrakennetta. Tällöin tulisi jäykkyyttä  $K_{seinä}$  määrittäessä käyttää muuttujissa  $K_{sala}$  ja  $K_{syla}$  liitinkerroksen pienempää – varmalla puolella olevaa – arvoa.



Kuva 23. Esimerkki vapausasteiden määrittämisestä seinien ja laattojen saumoille.

Tässä ohjeessa ei ole huomioitu rakenteeseen vaikuttavien pystykuormien vaikutuksia, joten oletetaan, että pystykuormista aiheutuva puristava normaalivoima on suurempi tai yhtä suuri kuin vaakakuormista aiheutuva pystyrakenteen vetävä normaalivoima. Näin ollen oletetaan pystyrakenteen olevan ankkuroitu jäykästi alla olevaan rakenteeseen. Tämän huomioimiseksi tulee vaakatason yläpuolisen seinän ja välipohjalevyjen saumoihin syötettävät vapautukset toteuttaa kuvan 23 mukaisesti jäykkyyksien arvojen ollessa vapaasti valittavissa. Jos seinän sauman  $U_y$ ,  $K_y$ -suunta vapautettaisiin, oletettaisiin ainoastaan leikkausliitosten ankkuroivan seinän ympäröiviin rakenteisiin. Jos vapautus kuitenkin tehdään, voidaan saatujen siirtymien avulla määrittää seinän ankkurointitarve; tällöin suunta  $U_y$ ,  $K_y$  tulisi kuitenkin vapauttaa kokonaan, jotta leikkausliitoksen ankkurointikapasiteetti jäisi huomiotta. Tässä yhteydessä on myös mainittava, että suuntaa  $U_z$ ,  $K_z$  ei myöskään vapauteta seinien saumoissa, sillä yläpuolisen seinän oletetaan olevan jäykästi kiinni alapuolisessa rakenteessa myös kuormitettaessa seinää sen tasoa kohtisuorasta suunnasta.

Kuvan 22 analogiaa voidaan edelleen soveltaa Platform-järjestelmän mukaisessa seinässä, johon välipohjalevy päättyy (I); levy sijaitsee siis vain seinän yhdellä puolella. Kun kulmateräkset on asennettu vaakarakenteen molempiin pintoihin, tulee välipohjalevyn sauman jäykkyydeksi antaa  $K_{s_{ala}} + X_{tappi} \cdot K_{tappi}$  ja ylemmän seinän alareunan sauman jäykkyydeksi  $K_{seinä}$ , joissa  $X_{ala}=1$  tai  $0$ ,  $X_{ylä}=1$  ja  $X_{tappi}=0 \dots 2$ . Yläpinnassa oletetaan siis aina olevan kulmateräs, alapinnassa se joko on tai ei ja tason lävistäviä ruuveja tai "tappeja" oletetaan mahtuvan vierekkäin enintään kaksi.

Vaakarakenteiden päätysauman erkanemaa eli suuntaa  $U_y$ ,  $K_y$  ei saa kuitenkaan missään tapauksessa rajoittaa muuten kuin liitosjäykkyyden mukaisesti. Valitsemalla suunta  $R_x$ ,  $H_x$  aktiiviseksi ja antamalla sille arvoksi nolla kuvan 23 oikean puolen dialogin mukaisesti, tehdään sauma momenttivapaaksi vain pystyrakenteen suhteen eli laatta käyttäytyy yksiaukkoisena.

*Välipohjalevyn kantavan sivun liittyminen seinään ja/tai toiseen laattaan (liitosnumero III, VIII ja IX)*

Vaakarakenteen oletetaan tässä ohjeessa tukeutuvan aina seinän tai rivan päälle, kun seinä ei jatku vaakatason molemmin puolin (III). Liitoksen jäykkyys voidaan siis toteuttaa Platform-järjestelmän mukaisesti antamalla vaakalevyn päädyn jäykkyydeksi ( $K_s +$

$X_{tappi} \cdot K_{tappi}$ ). Dialogi tulisi täyttää seuraavasti:

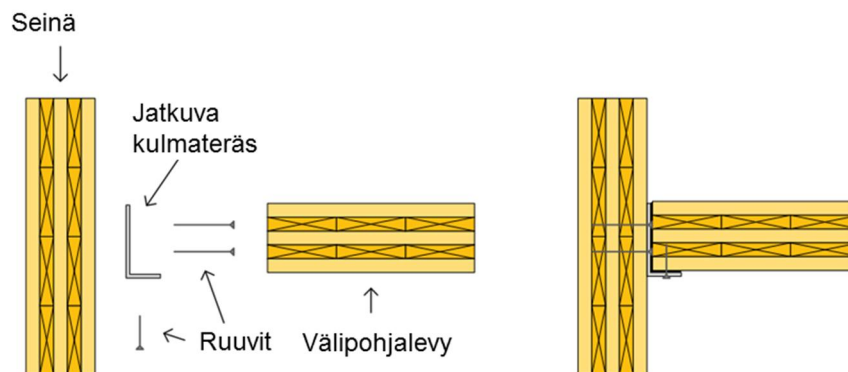
<b>Ux, Kx: aktiivinen</b>	<b>(Ks +)X<sub>tappi</sub> · K<sub>tappi</sub></b>
<b>Uy, Ky: aktiivinen</b>	<b>(Ks +)X<sub>tappi</sub> · K<sub>tappi</sub></b>
<b>Uz, Kz: pois</b>	<b>---</b>
<b>Rx, Hx: aktiivinen</b>	<b>0</b>

Lisäjäykkyyttä liitokselle voidaan tuoda asentamalla kulmateräksset vaakarakenteen alapintaan, jolloin jäykkyys  $K_s$  sisällytetään edellisten esimerkkien mukaisesti kokonaisjäykkyyteen. Samaa jäykkyyttä voidaan soveltaa myös vinojen CLT-kattoelementtien liittyessä pystyrakenteisiin.

Jos levykenttä jatkuu seinän toisella puolella (VIII), tulee taulukon mukainen vapautus antaa molemmille levyille täysimääräisenä yhteisessä saumassa. Tämä poikkeaa tilanteesta, jossa välipohjalevyt kohtaavat palkin tai rivan päällä; tästä lisää kohdassa momenttijatkos.

Balloon-järjestelmän mukainen välipohjalevyn kantavan sivun ja ehjänä vaakatason molemmin puolin jatkuva seinälevyn välisen liitoksen (IX) vaakarakenteen sauman jäykkyyden arvo kuvan 24 tapauksessa on  $\frac{3}{2} \cdot K_s$ , joka syötetään suunnille  $U_x$ ,  $K_x$  ja  $U_y$ ,  $K_y$ . Suunta  $R_x$ ,  $H_x$  määrätään vapaaksi (nolla). Lisäjäykkyyttä liitokselle saadaan lisäämällä kulmateräksiä myös välipohjalevyn yläpintaan, jolloin kuvan levyn päädyn jäykkyydeksi saataisiin  $\frac{3}{2} \cdot K_{s_{ala}} + \frac{l_{km}}{2} \cdot K_{s_{ylä}}$ , jossa  $K_{s_{ylä}}$  kerrotaan edelleen välipohjalevyn yläpuolisen kulmateräksen liittimien lukumäärän puolikkaalla. On erittäin suositeltavaa mallintaa myös jatkuva seinä, jonka pintalamellit ovat pystysuunnassa, kerros-

korkeissa osissa; seinien välisille vaakasaumoille ei tällöin anneta mitään vapautuksia.



Kuva 24. Välipohjalevyn liittäminen seinään kulmateräksellä Balloon-järjestelmässä [5, s. 18].

*Välipohjalevyn ei-kantavan sivun ja pystyrakenteen kohtaaminen (liitosnumero VI ja IV)*

Vaikka puhutaan ei-kantavasta sivusta, myös CLT-levyn pitkä sivu tuetaan poikkeuksetta seinän päälle tai sen kylkeen. Vaakarakenteiden ei-kantavat sivut tulisi silti vapauttaa pystyrakenteista momentin suhteen. Tämä onnistuu määrittämällä ei-kantavalle saumalle *release*, jossa suunta  $R_x$  on vapautettu. Näin pystykuormien aiheuttamat momentit eivät siirry rakenteelta toiselle. Suunnalle  $U_x$ ,  $K_x$  määrätään elastiseksi, sillä levyn ei-kantava reuna on usein kiinnitetty seinään myös leikkausliitoksin. Jos kulmateräs on asennettu vain toiseen välipohjalevyn pinoista, annetaan levyn sauman jäykkyydeksi  $K_s$ . Molempiin pintoihin asennetut kulmalevyt antavat jäykkyyden  $K_{S_{ylä}} + K_{S_{ala}}$ .

Dialogi näyttää siis seuraavalta:

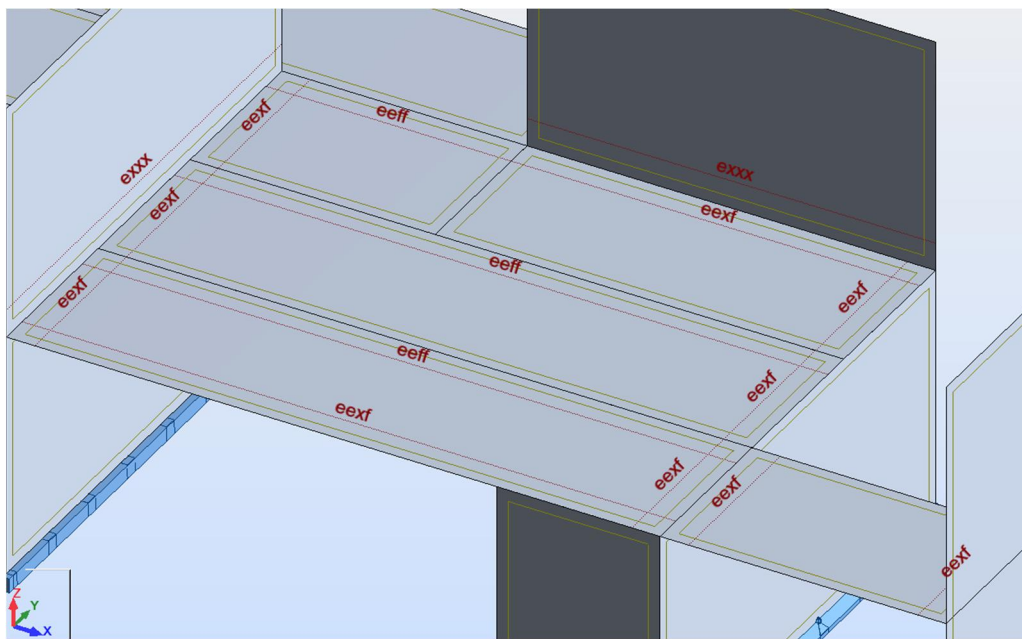
$U_x, K_x$ : aktiivinen	lkm/2- $K_s$
$U_y, K_y$ : aktiivinen	400
$U_z, K_z$ : pois	---
$R_x, H_x$ : aktiivinen	0

Liitostapauksessa IV tulee myös vaakatason yläpuolisen seinän alasaumalle antaa vapautus  $K_{seinä}$  suuntaan  $U_x, K_x$  ja jättää muut suunnat jäykäksi.

*Useiden eri tapauksien yhdistely vaakarakenteen saumoissa (liitosnumero VII)*

Kuvan 18 mukaiseen saumaan VII ei laiteta vapautusta, jolloin laatan lyhyempi ja pidempi osa ovat monoliittisesti toisissaan kiinni. Käytännössä onkin kyseessä yksi levy, joka on täytynyt laskentamallissa jakaa kahteen osaan, sillä kuten kuvasta 25 on havaittavissa, laatan ei-kantavaan sivuun kohdistuvat vapautukset ovat erilaisia. Laatan

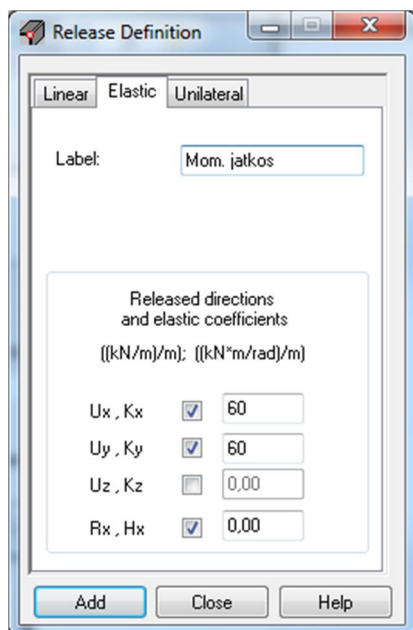
pidemmän osan ei-kantava sivu kohtaa seinän ja lyhyemmän osan ei-kantava sivu toisen laatan kanssa. Tällöin osa laatan saumasta tulisi vapauttaa seinästä tapauksen IV mukaisesti (*eexf*) ja osa tapauksen V mukaisesti (*eeff*). Saumojen pilkkomisen sijaan voidaankin levyt, joiden saumoissa on epäjatkuvuuskohtia toteuttaa useammassa osassa, kunhan levyjen kesken ei määritetä vapautuksia.



Kuva 25. Osa testimallista ohjeen mukaisten lineaaristen vapausastemerkinneiden näkyessä.

### Momenttijatkos

Levyn jatkaminen jäykän sauman avulla eroaa siis merkittävästi tilanteesta, jossa levyt ovat todellisuudessa erillisiä ja tukeutuvat päistään palkille. Ei-kantavien reunojen rivat ottavat vastaan osan vaakatasossa olevan levykentän tason normaalin ympäri vaikuttavasta momentista, jolloin palkkiin tukeutuvien levyjen kantavat sivut tulee määrittää momenttijatketuksi kuvan 26 dialogin mukaisesti. Ei-kantavan sivun ripoja ei tarvitse kuitenkaan mallintaa ellei niihin tukeudu kantavan sivun ripoja; tällaisen risteyskohdan tukena voi olla myös pilari, johon kantava palkki voidaan mallissa tukea. Kuten kuvasta 26 voidaan havaita, dialogin sisältö ei eroa mitenkään seinälle tukeutuvan reunan dialogista; vapautettava suunta  $R_x$ ,  $H_x$  estää – alaindeksinsä mukaisesti – vain sauman suuntaiseen akseliin vaikuttavan momentin siirtymisen ja näin ollen ei vaikuta, momenttijatkokselta vaadittavan, momentin siirtymiseen  $U_z$  akselin eli tason normaalin ympäri.



Kuva 26. Levyn päädyn momenttijatkoksen dialogi.

Momenttijatkoksen jäykkyytenä voidaan käyttää muuttujaa  $K_s$ , sillä useat momenttijatkoksina käytetyt liitostyyppin vastaavat laskennalliselta jäykkyydeltään yksileikkeistä soiroliitosta. Tämä kuitenkin tulisi kertoa edelleen liitinten lukumäärän puolikkaalla sekä 0,5:llä, jotta sauman jäykkyys ei kaksinkertaistuisi. Kuvassa 26 – esimerkiksi taulukon 4 mukainen – jäykkyys suuntiin  $U_x$ ,  $K_x$  ja  $U_y$ ,  $K_y$  rajoittaa sivusiirtymää, mutta myös taivutusmomentin aiheuttamasta vedosta johtuvaa erkanemaa. Vapautus annetaan molemmille levyille yhteisessä saumassa.

Todellisuudessa momenttijatkokset levyjen välillä ovat paikallisia, mutta käytännöllisyyden vuoksi saman jäykkyyden on oletettu vaikuttavan tasaisesti koko saumassa. Tässä työssä ei tutkittu esimerkiksi mahdollisuutta korvata lineaarinen vapautus saumassa solmupisteiden välille mallinnettavilla paikallisilla sauvaelementeillä, joiden vetojäykkyys vastaisi momenttijatkoksen todellista jäykkyyttä.

### *Tiivistetty ohje*

Oikeiden liitosjäykkyyksien valintaa on helpotettu edelleen liitteestä 2 löytyvällä tiivistetyllä ohjeella. Ohjeessa on esitetty kuvin muun muassa luvussa 6.2.2 esitetyt vapausasteiden määritykset kullekin liitostapaukselle.



### 6.3 Vaihtoehtoinen mallinnusmenetelmä

Vaihtoehtoisesti voitaisiin harkita menettelyä, jossa laskentamalli luodaan aluksi ilman seiiniä. Vaakarakenteita esittävät kuorielementit tuettaisiin kussakin kerroksessa erillisillä tuilla (*Supports*), joiden jousivakioita muokattaisiin tukien *Elastic*-välilehdeltä vastaamaan tuettavan laatan liitossauman elastisuutta. Tällöin tulisi kyseiseen arvoon laskea mukaan myös seinänä toimivan CLT-levyn jäykkyys. Näin saataisiin mahdollisesti kierrettyä vaaka- ja pystyrakenteiden yhteisten solmupisteiden ongelma, jota luvun 6.2.3 reunaehdoissa kuvailtiin. Menetelmä toimisikin vain sillä oletuksella, että *supportin* elastisuus tulisi määrääväksi kuorielementin ei-kantavan sauman nurkkasolmupisteen elastisuuden suhteen. Tällöin voitaisiin ei-kantavan sauman *release* jättää jäykäksi saumaa kohtisuorassa- eli *Uy*-suunnassa. Näin ollen menetelmä estäisi vierekkäisiä levyjä limittymästä keskenään vaikuttamatta koko levykentän siirtymään tuella. Toisaalta levyjen erkanema, jonka kuitenkin halutaan tapahtuvan, tulisi tällöin myös estetyksi. Menetelmällä saataisiin kuitenkin määritettyä tukiin kohdistuvat saumansuuntaiset leikkausvoimat suhteellisen helposti, jonka jälkeen kyseiset leikkausvoimat voitaisiin ottaa mahdollisesti huomioon uudessa laskentamallissa, jossa myös seinät ovat mallinnettu. Tässä uudessa mallissa ei todennäköisesti tarvitsisi enää lineaariselastisia vapausasteita soveltaa elementtien saumoissa.

Tätä vaihtoehtoista menetelmää ei tässä työssä tutkittu ja ehdotetaankin lisätutkimuksia menetelmän käytettävyydestä ainakin erkaneman sallimisessa ja seinän jäykkyyden huomioimisessa tuen elastisuudessa. Lisäksi tulisi määrittää leikkausvoimilla kuormitettuja seiiniä sisältävän mallin reunaehdot.

## 7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa ohjeistus CLT-levyjen mallintamisesta Robot Structural Analysis -ohjelmistolla, kun levyjen väliset liitossiirtymät otetaan CLT-levyn ristiinliimatun rakenteen ohella huomioon. Lisäksi tavoitteena oli tuottaa käytännöllisimmistä liitostyypeistä Tekla Structures -tietomallinnusohjelmiston kanssa yhteensopivat liitoskomponentit.

Tutkittavaa CLT-levyrakenteiden välisten liitosten joukkoa rajattiin aikaisempien tutkimusten sekä työn edetessä vastaan tulleiden ongelmien perusteella. Jotta erilaisia liitostyyppisiä voitiin Robot-laskentamallissa soveltaa, tuli kyseisten liitosten jäykkyysominaisuudet olla tiedossa. Tällä periaatteella liitosjoukko supistettiin koskemaan niitä liitostyyppisiä, joille Jarkko Luntta, Pöyrylle tuottamassaan diplomityössä, oli määrittänyt laskentamenetelmät jäykkyyksien selvittämiseksi. Robotin ja kuorimallintamisen asettamat reunaehdot rajasivat joukkoa edelleen, jättäen esimerkiksi momenttijatkosten tarkemman toimivuuden analysoinnin kuorimallissa jatkotutkimusten varaan.

Robotilla tuotettiin yksinkertainen, yhden kuorielementin käsittävä, testilaskentamalli, jossa elementin jäykkyysominaisuudet oli määritetty jäykkyysoinmatriisin avulla. Testiasetelmassa elementti oli jäykästi toisesta reunastaan kiinni, kun toiseen reunaan kohdistettiin elementin reunan suuntainen voima. Testausasetelmasta saatuja elementin sivusiirtymiä verrattiin käsin laskennasta saatuihin eli yksinkertaiseen sauvamalliin perustuvan Timoshenko-palkkiteorian mukaisesti siirtymiin. Kuorimallissa siirtymät olivat enimmillään noin 10 % käsin laskennan tuloksia suuremmat. Vastaava koejärjestely tehtiin myös liitossiirtymien tarkastelua varten, jolloin tulokset olivat lähestulkoon vastaavat käsin laskennan kanssa. Laskennallisesti liitossiirtymät ovat huomattavasti CLT-levyjen taipumisesta aiheutuvia siirtymiä suurempia, jolloin kyseisen 10 % eron ei pitäisi tulla merkitseväksi tekijäksi kuorimallista saatuja tuloksia tarkastellessa.

Tutkimuksen edetessä huomattiin kuitenkin tekijöitä, jotka heikentävät Robot-mallista saatujen tulosten luotettavuutta. Suurimpana ongelmana olivat mallin eri kuorielementtien jakamat yhteiset solmupisteet elementtien välisissä saumoissa. Koska kuorielementti jaetaan verkotuksella pienempiin osiin, syntyy verkkojen risteyspisteisiin kullekin verkon säikeelle yhteinen solmupiste. Kun tämä solmupiste esiintyy esimerkiksi vaakarakenteen nurkassa, joka tukeutuu pystyrakenteeseen, ovat kyseisten rakenteiden ominaisuudet identtiset tuossa yhdessä kohtaa. Tällöin vaakarakenteen saumoihin

mallinnettavat elastisuudet vaikuttavat myös pystyrakenteen elastisuuteen tuossa pisteessä ja tämä pahimmillaan sitoo koko vaakarakenteen pystyrakenteeseen jäykkyyden arvolla, jota on lähes mahdoton arvioida tai laskea. Ratkaisuna esitettiin lisäkoekoiden perusteella saatua ns. väliarvomenettelyä.

Ohje Robot-mallintamiseen koottiin tekstimuodossa itse opinnäytetyön sisältöön integroiden, sillä teoriaa, tuloksia ja ongelmia oli havainnollisempi käsitellä samassa yhteydessä. Tämän lisäksi liitteestä 2 löytyy kuvamuotoon yksinkertaistettu ohje liitosjäykkyyksien huomioimisesta laskentamallissa tukien kirjoitettua ohjetta, mutta jota ei voida käyttää itsenäisenä ohjeena.

Työssä valittiin esiteltäväksi vain yksi *Tekla Custom Components* -työkalulla luotu komponentti, sillä prosessin kuvaaminen jokaisen luodun komponentin kohdalla todettiin tarpeettomaksi. Esitellyn komponentin lisäksi työn yhteydessä luotiin komponentti vaaka- ja pystyrakenteiden välisten liitosten mallinnukseen. Opinnäytetyön kirjoittaja on sitoutunut tarvittaessa tuottamaan lisää CLT-levyjen välisiä komponentteja Pöyryn käyttöön myös tulevaisuudessa. TS:sta löytyvien valmiiden pulttistandardien yhteensopivuutta CLT-liitosten kanssa tulisi vielä tutkia.

Mahdollisissa jatkotutkimuksissa tulisi myös perehtyä työssä esitellyn vaihtoehdoisen mallinnusmenetelmän käytännöllisyyden kartoitukseen. Menettely yrittää ratkaista yllä mainittua ”yhteisen solmupisteen” -ongelmaa, mutta on tässä vaiheessa esitetty vain ajatuksen tasolla. Lisäksi tässä työssä päädyttiin levyjen välisten momenttijatkosten toteuttamiseen vaikuttamalla levysauman jäykkyyteen koko pituudeltaan. Tämän käytännön sijaan voitaisiin tutkia onko kuorielementtimallintamisessa mahdollista toteuttaa todennäköisempiä momenttijatkoksia esimerkiksi solmupisteiden välisillä sauvoilla.

## Lähteet

- 1 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 2007. RIL-244-2007. Helsinki: RIL ry.
- 2 CLT-elementit. 2012. Verkkodokumentti.  
<<http://www.storaenso.com/products/wood-products/products/elements/CLT-elementit/Pages/default.aspx>>. Luettu 1.2.2013.
- 3 CLT-tuotekortti. 2012. Verkkodokumentti.  
<<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/products/626/clt-tuotekortti.pdf>>. Luettu 1.2.2013.
- 4 Lunta, Jarkko. 2013. Diplomityö: Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena. Espoo: Aalto-yliopisto.
- 5 Karacbeyli, Erol & Doulgas, Brad. 2013. The U.S. Edition of the CLT Handbook: cross-laminated timber. Pointe-Claire, Quebec, Kanada: FBInnovations.
- 6 European Technical Approval ETA-11/0190: Würth self-tapping screws. 2011. Verkkodokumentti.  
<[http://www.wurth.fi/site/media/pdf/pdf/eta/ETA\\_110190\\_ASSY-\\_ruuvit.pdf](http://www.wurth.fi/site/media/pdf/pdf/eta/ETA_110190_ASSY-_ruuvit.pdf)>. Luettu 14.3.2013.
- 7 Pousette, Anna. 2001. Nordic timber bridge project, design values. Tukholma, Ruotsi: TRÄTEK.
- 8 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 2009. RIL-205-1-2009. Helsinki: RIL ry.

## Puufon tekninen tiedote

**PUUINFO**

TEKNINEN TIEDOTE  
18.04.2011

CLT Cross Laminated Timber

### CLT - ristiinliimattu massiivipuulevy

(Cross Laminated Timber)

Cross Laminated Timber (CLT) koostuu nimensä mukaisesti ristiin liimatuista lautakerroksista. Kerroksia voi olla useita. Tavallisimmin kerroksia on kolme tai viisi. Näin muodostuu hyvin paloa kestävä, erittäin luja ja jäykkä sekä ominaisuuksiinsa nähden kevyt levymäinen elementti.

Levyjä voidaan käyttää kantavina ja jäykistävinä rakenteina sekä seinissä että väli- ja yläpohjarakenteissa. Sisätiloissa levyt voidaan pinnoittaa tai palomääräysten niin salliessa jättää sellaisenaan näkyville tavoitellusta ilmeestä riippuen. Keveistä ja jäykistä levyistä voidaan työstää mittatarkasti erimuotoisia rakennuselementtejä. Julkisissa ikkunat ja ovet voidaan sijoittaa hyvin vapaasti ja myös kulmaikkunat onnistuvat, koska levymäiset rakenteet toimivat tarvittaessa ulokkeina.

Ulkoseinissä levyt eristetään normaaliin tapaan. Eriste sijoitetaan levyn ulkopuolelle. Väli pohjissa levyjä voidaan käyttää myös liittorakenteena yhdessä betonivalun kanssa. Liittorakenteen ansiosta saadaan pidempi jänneväli kuin pelkällä CLT-levyllä. Betonilaattaa voidaan asentaa lattialämmitys ja betonin tuoma lisämassa auttaa myös välipohjan ääneneristävyydessä. Kohteissa, joissa välipohjan ääneneristävyydelle ei ole asetettu kovia vaatimuksia, levyjä voidaan käyttää ilman betonivalua. Liittorakenne myös voidaan korvata uivilla lattiakerroksilla ja levyä jäykistää palkeilla.

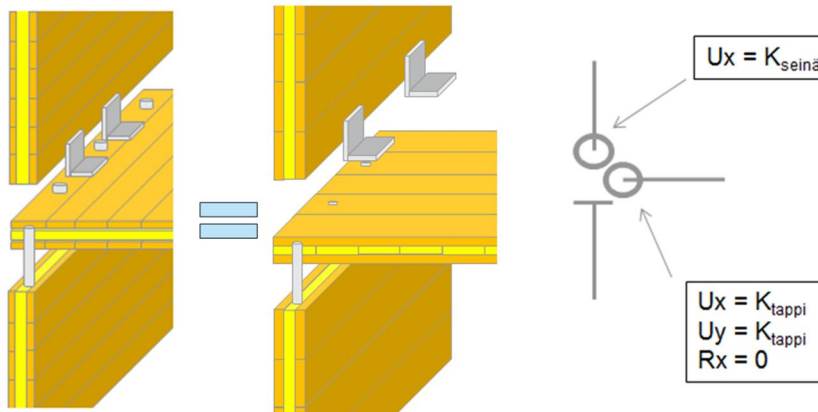
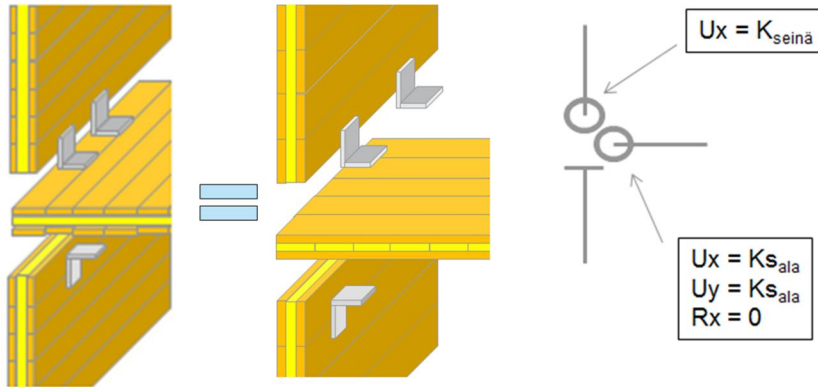
CLT elementtien käyttö on hyvin suosittua Keski-Euroopassa, missä käyttäjät ovat tottuneet massiivisiin rakenteisiin. Seuraavassa taulukko on kuvattu CLT -levyn keskeiset rakenteelliset ominaisuudet

Ominaisuus	Arvot	Mittausperuste
<b>Pääasiallinen käyttötarkoitus</b>	Seinä-, lattia- ja kattorakenteet eri käyttötarkoituksissa rakennuksissa (asuin- ja työpaikkarakennukset, julkiset rakennukset yms.)	
<b>Enimmäisleveys</b>	2,95 m	
<b>Enimmäispituus</b>	16,00 m	
<b>Enimmäispaksuus</b>	400 mm	
<b>Vakiopaksumudet</b>	Tarkistettava valmistajalta	
<b>Kerrosrakenne</b>	Ristiin laminoitu, liimattu	
<b>Puulaatu</b>	Kuusi (muiden puulajien saatavuus varmistettava valmistajalta)	
<b>Lujuusluokka</b>	C24	Rakenteellisen mitoituksen las- kenta-arvo
<b>Kosteuspitoisuus</b>	12 % +/- 2 %	
<b>Liimatyyppi</b>	Formaldehydivapaa PUR liima	
<b>Pintalaatu</b>	Teollisesti hiottu	
<b>Visuaalinen laatuluokka</b>	C tai A/B	EN 13701-1, taulukko 1
<b>Paino</b>	5,0 kN/m <sup>3</sup>	Rakenteellisen mitoituksen las- kenta-arvo
<b>Kosteuden vaihtelun aiheuttamat muodonmuutokset levyn suunnassa</b>	0,02 % jokaista kosteusprosentin muutosta kohden	
<b>Kosteuden vaihtelun aiheuttamat muodonmuutokset levyn paksuudessa</b>	0,24 % jokaista kosteusprosentin muutosta kohden	
<b>Paloluokka (reaction to fire)</b>	D-s2, d0	Komission päätös 2003/43/EC
<b>Palonkesto (resistance to fire)</b>	Hiiltymisnopeus 0,65 mm/min	EN 1995-1-2
<b>Kosteuden läpäisevyys</b>	20...50	EN 12524
<b>Lämmönjohtavuus (lambda)</b>	0,11 W/(mK)	EN 12524
<b>Lämpökapasiteetti</b>	1600 J/(kgK)	EN 12524
<b>Ilmatiiviyys</b>	Käytännössä tiivis (Effectively airtight)	EN 12114
<b>Käyttöluokka (Service class)</b>	1 ja 2	EN 1995-1-1

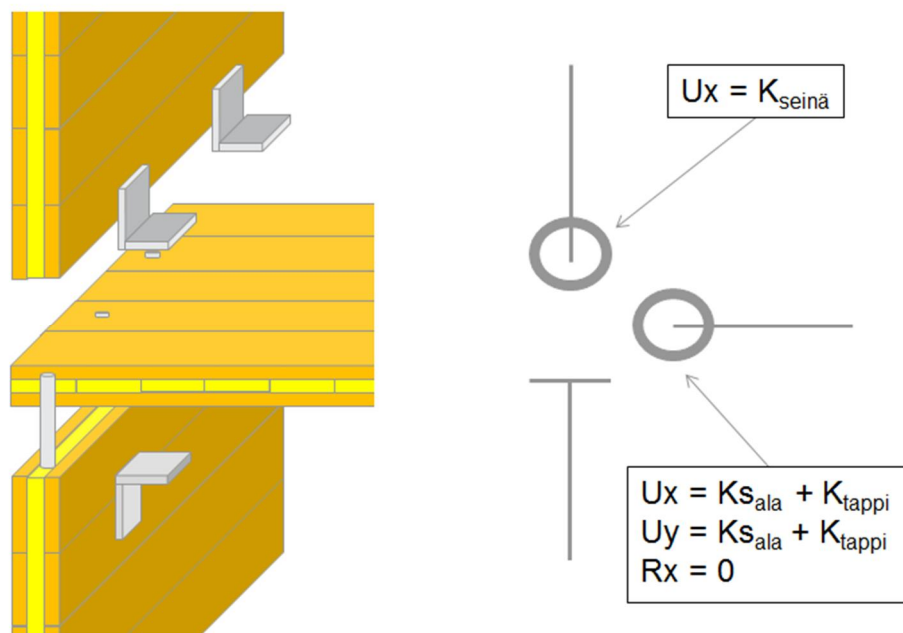
## Tiivistetty ohje liitosten Robot-mallintamiseen

### Platform-järjestelmän liitokset

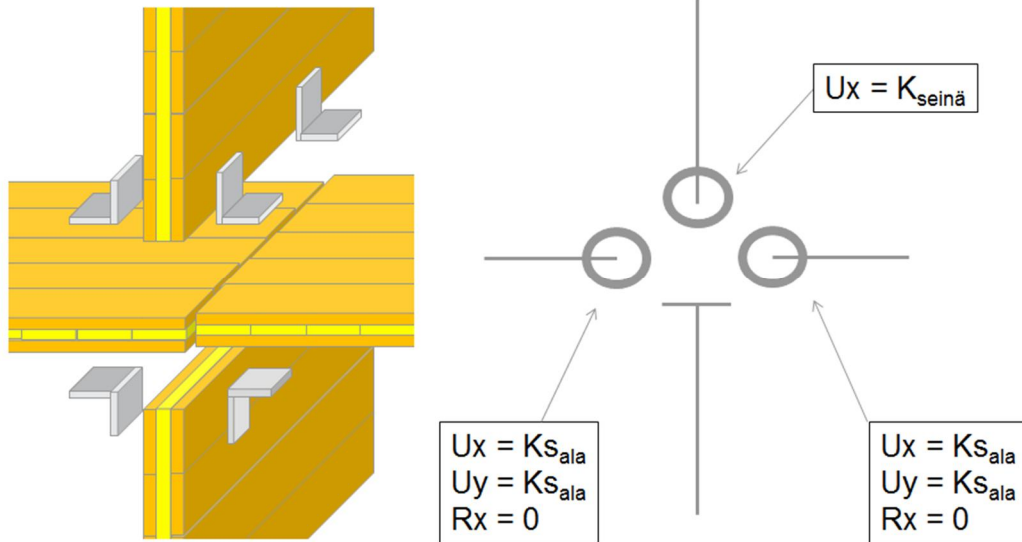
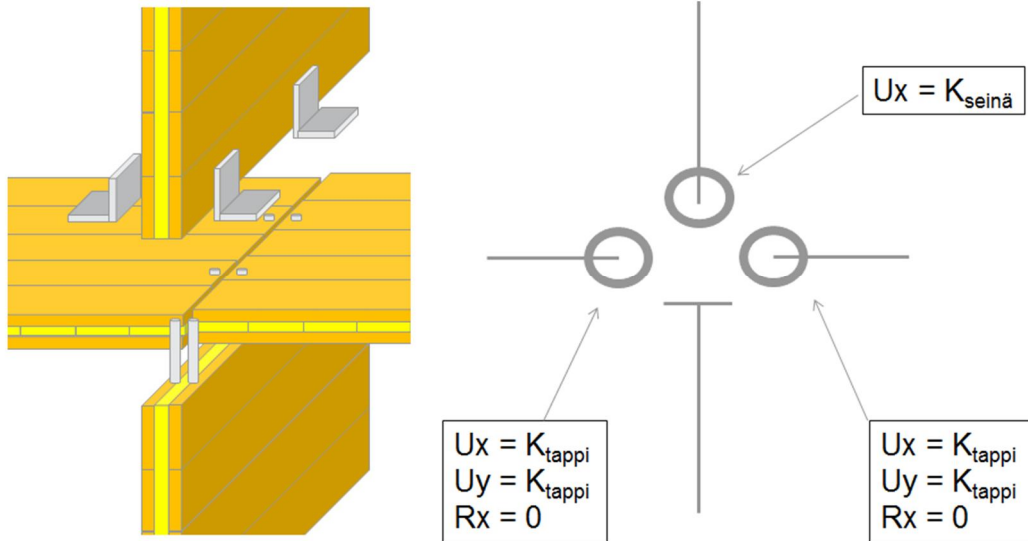
Ei-kantavan tai kantavan sivun liitos tason molemmin puolin jatkuvaan seinään:



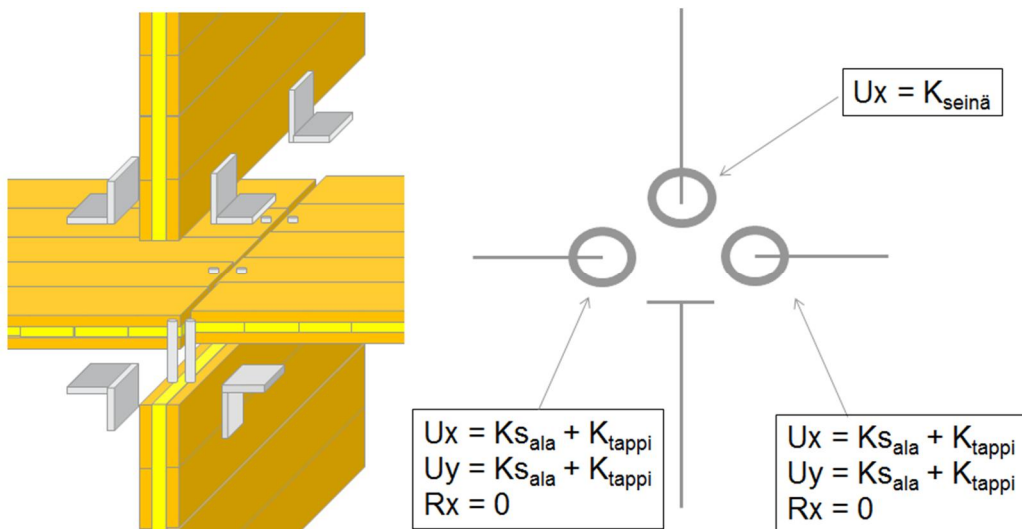
- lisäjäykisteellä:



Kantavien sivujen liitos tason molemmin puolin jatkuvaan seinään:

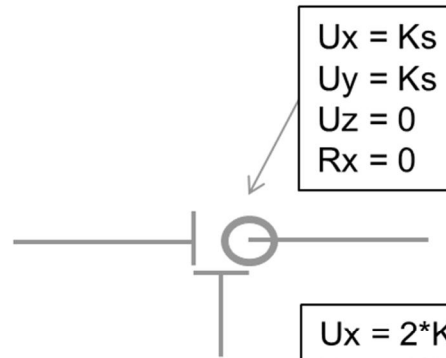
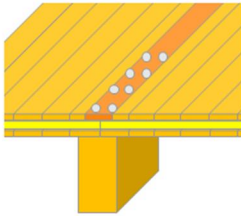


- lisäjäykisteellä:

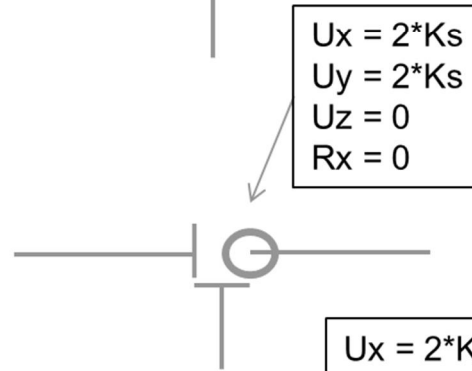
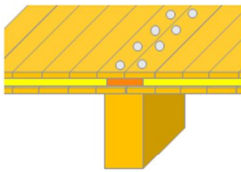


Ei-kantavien sivujen liitos levyjen välillä, alla ripa tai ilman ripaa:

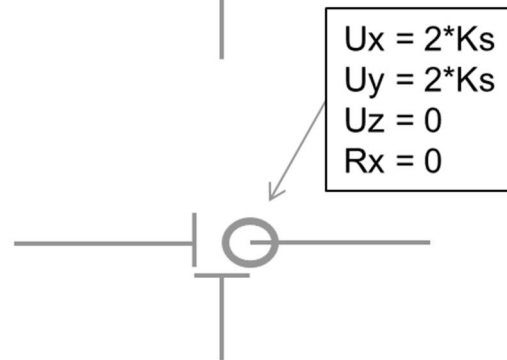
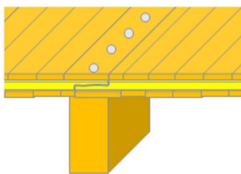
Yksileikkeinen  
soiroliitos



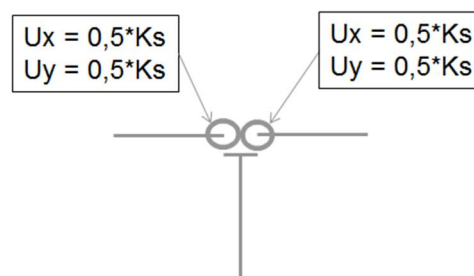
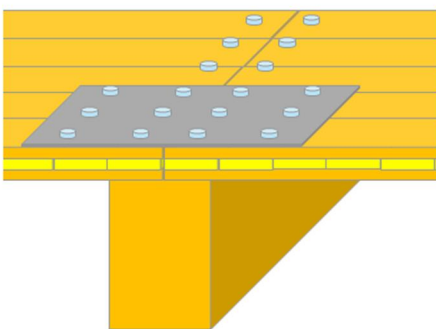
Kaksileikkeinen  
soiroliitos



Puoliponttiliitos

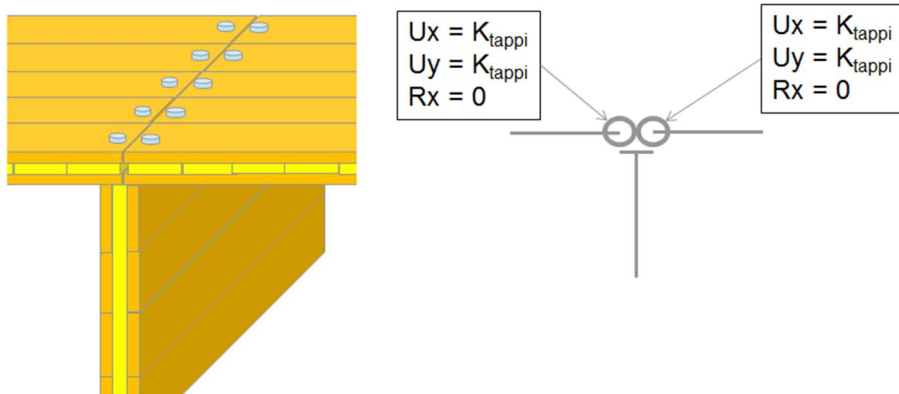


Kantavan sivun momenttijatkos, alla ripa:

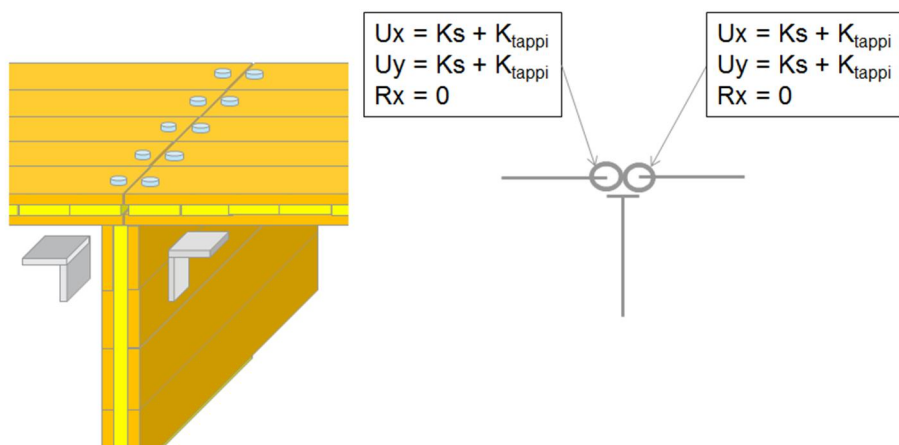




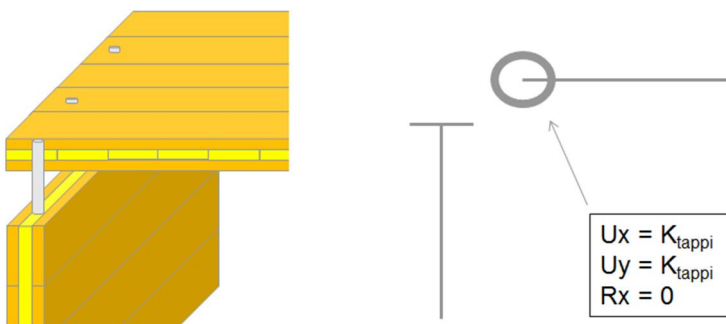
Kantavien sivujen liitos tasoon päättyvään seinään:



- lisäjäykisteellä:



Kantavan sivun liitos tasoon päättyvään seinään:

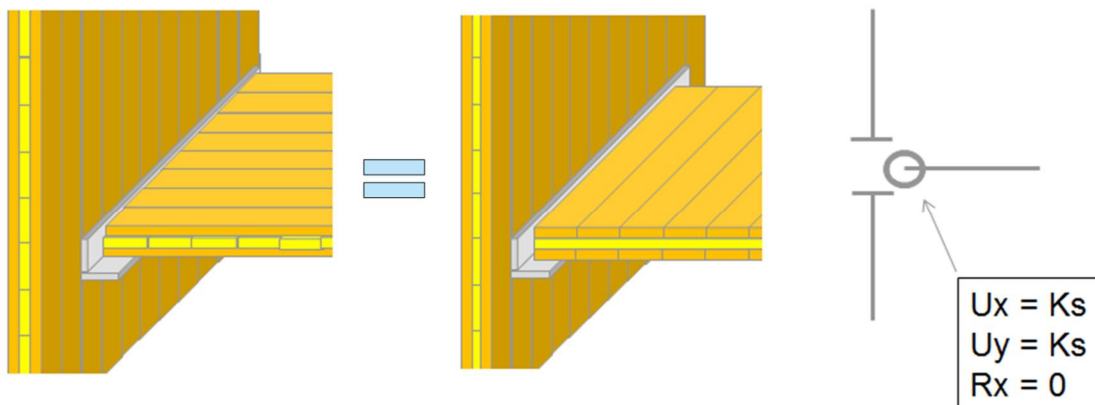


- lisäjäykisteellä:

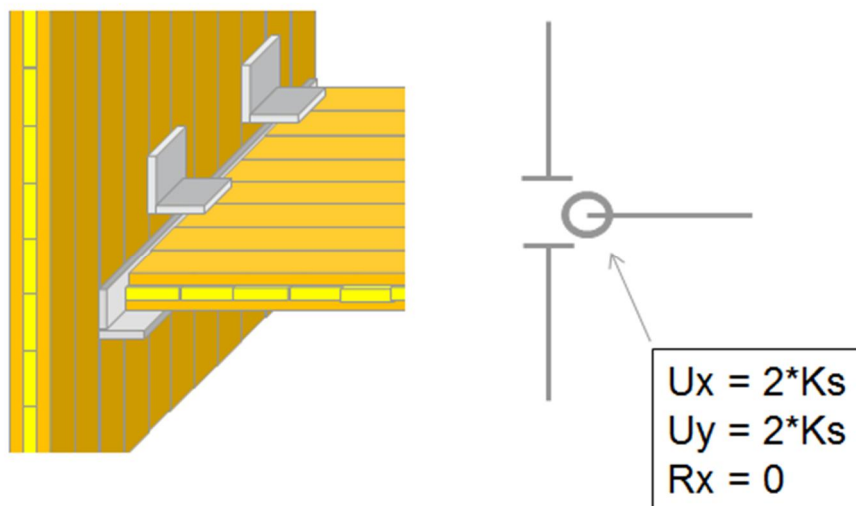


### Balloon-järjestelmän liitokset

Ei-kantavan tai kantavan sivun liitos tason molemmin puolin jatkuvaan seinään:



- lisäjäykisteellä:



## Ote A&S Virtual Systems Oy:n tuottamasta taulukkolaskentapohjasta

Esimerkinäkymä Excel-pohjasta, jolla tässä määritetään 7-kerroksisen CLT-levyn jäykkyydsmatriisi.

Layer	Ex (Gpa)	Ey (Gpa)	t (mm)	z (mm)	z'X (mm)	z'Y (mm)
1	11	0,37	30	15,0	75,0	75,0
2	0,37	11	20	40,0	50,0	50,0
3	11	0,37	30	65,0	25,0	25,0
4	0,37	11	20	90,0	0,0	0,0
5	11	0,37	30	115,0	-25,0	-25,0
6	0,37	11	20	140,0	-50,0	-50,0
7	11	0,37	30	165,0	-75,0	-75,0
8				180,0	-90,0	-90,0
9				180,0	-90,0	-90,0

vxy	0,44	Gxy	0,69	INPUT DATA:
vyy	0,0148			Layer table (Ex, Ey, t), vxy, vyy,


Thickness	180 mm	Ex / Ey	
Number of lam.	7 pcs	Fir	0,039
Elast. Neutral axis	90,0 mm	Pine	7 - 0,03
Elast. Neutral axis Y	90,0 mm	Birch	0,05
Ex	7,4567 Gpa	vxy	vyy
Ey	3,91 GPa	Fir	0,5 0,029
Dxxxx (EA)	1342200000 N/m	Pine	0,34 0,025
Dyyyy (EA)	704400000 N/m	Birch	0,43 0,024
Dxxyy	210099040 N/m	Gxy	
Dxyxy	124200000 N/m	Fir	0,609 Gpa
Kxxxx (Eix)	4261740 Nm	Pine	0,72 Gpa
Kyyyy (Eiy)	1264080 Nm	Birch	0,952 Gpa
Kxxyy	377033 Nm	Ex	
Kxyxy	443524 Nm	Fir	10,5 Gpa
Hxx	103500000 N/m	Pine	9 GPa
Hyy	103500000 N/m	Birch	14 GPa

$$D_m = \begin{bmatrix} D_{xxxx} & D_{xyxy} & 0 \\ D_{xyxy} & D_{yyyy} & 0 \\ 0 & 0 & D_{xyxy} \end{bmatrix}; \text{ dimensions: [Nm]}$$

$$K_m = \begin{bmatrix} K_{xxxx} & K_{xyxy} & 0 \\ K_{xyxy} & K_{yyyy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{xyxy} \end{bmatrix}; \text{ dimensions: [Nm]}$$

$$H_m = \begin{bmatrix} H_{xx} & 0 \\ 0 & H_{yy} \end{bmatrix}; \text{ dimensions: [Nm]}$$



D=	1342200	210099	0	kN/m
		704400	0	
			124200	
K=	4262	377	0	kNm
		1264	0	
			444	
H=	103500	0		kN/m
	0	103500		

