



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PEKKA LAAKKONEN
4-KERROKSISEN CLT-TILAELEMENTTITORNIN
JÄYKISTYSKAPASITEETTI

Diplomityö

Tarkastaja: professori Mikko Malaska
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
8.6.2016

TIIVISTELMÄ

PEKKA LAAKKONEN: 4-kerroksisen CLT-tilaelementtitornin jäykistyskapasiteetti

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 49 sivua, 48 liitesivua

Marraskuu 2016

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Rakennetekniikka

Tarkastaja: professori Mikko Malaska

Avainsanat: Puukerrostalo, CLT, tilaelementti, jäykistysjärjestelmä

Tilaelementti on seinien, katon ja lattian muodostama yhtenäinen rakenne. Puurakenteisissa tilaelementtikerrostaloissa on muita puukerrostalotyyppejä enemmän seinälinjoja. Vaikka tilaelementtirakenteiden jäykistyslaskelmissa olisi mahdollisuus käyttää tehokkaammin tilaelementtien kotelomainen rakenne ja tihempi seinäjako, toteutetaan jäykistys usein vanhoilla totutuilla menetelmillä. Kun jäykistyksessä ja ankkuroinnissa otetaan huomioon vain vaakakuorman suuntaiset seinät, jää kuormaa vastaan kohtisuorassa suunnassa olevien seinien kapasiteetti käyttämättä ja rakenteista tulee mahdollisesti ylimitoitettuja.

Diplomityössä on selvitetty mahdollisuuksia hyödyntää tilaelementtejä tehokkaammin kerrostalon jäykistyksessä ja jäykistävien rakenteiden mitoituksessa. Erityisesti on tutkittu millä edellytyksillä tilaelementtitorni toimisi kotelomaisena rakenteena. Työ on jaettu kolmeen eri osaan: kirjallisuustutkimukseen, käsinlaskentamenetelmien määrittämiseen ja lopuksi vertailulaskelmien tekemiseen esimerkkirakenteelle. Työn alkuosassa selvitetään kirjallisuuden ja aikaisempien tutkimusten kautta suunnitteluun vaikuttavat määräykset, laskentaohjeet ja lähtötiedot. Rakenneanalyysin avulla selvitetään tarkemmin niitä edellytyksiä, joilla tilaelementin jokaista seinää voidaan hyödyntää jäykistyksessä ja määritetään tyypillisen tilaelementtirakenteen jäykkyys käsinlaskentamenetelmillä. Menetelmien luotettavuutta arvioidaan vertaamalla tuloksia FEM-laskentamallin tuloksiin.

Liitokset vaikuttavat oleellisesti CLT-rungon jäykkyyteen. Pystysaumojen jäykkyys vaikuttaa siihen, kuinka rakenne pystyy toimimaan kotelomaisena rakenteena ja siirtämään kuormia jäykistävältä pystyrakenteelta toiselle. Vaakaliitoksen jäykkyys vaikuttaa pystyjäykisteen eli seinän tai kotelon vaakasuuntaiseen kokonaisjäykkyyteen. Käsinlaskennassa on määritetty yleisten liitostapojen jäykkyyksiä ja laskettu esimerkkirakenteen avulla tilaelementtitornin kokonaisjäykkyyksiä ja sivusiirtymiä.

ABSTRACT

PEKKA LAAKKONEN: Horizontal stability of four-storey high CLT-based modular buildingsystem

Tampere University of Technology

Master of Science thesis, 49 pages, 48 appendix pages

November 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Mikko Malaska

Keywords: Multi-storey timber building, CLT, modular element, bracing system

Modular element is a structure that consists of four walls, a roof and a floor. A building consisting of modular elements have more bracing wall lines than other timber element based buildings. Even if it would be efficient to consider all the walls of a modular element in the horizontal stability of the building, it is still a typical practice to include only the walls parallel to the horizontal loading in the stability design. When only the walls that run parallel to lateral forces are considered in bracing and anchoring the building, the capacity of perpendicular walls is not used and the structures may become over-designed.

Thesis focuses on the more effective utilisation of modular elements in bracing design with main interest in the possibilities of including the walls of the modular element in the lateral stiffness of the modular frame system. First, a literature review is conducted on the issues affecting the design i.e. standards, calculation instructions and initial data. Next analysis and design methods are applied to a modular CLT-structure aiming at calculating the horizontal stiffnesses of individual wall elements and the entire modular element system. Lastly a numerical study of the example structure is conducted where horizontal stiffness is calculated using manual calculation methods and the results are compared against numerical FEM-analysis results.

Connections between CLT-elements have a significant effect on the CLT-frame's stiffness. Vertical joints and connectors transfer loads from one vertical element to another, and the horizontal stiffness of the vertical modular system depends on the stiffness of these connectors. Horizontal joints and connectors at floor levels also affect the overall lateral stiffness of the structure which can be a CLT wall element or entire modular CLT-element system. Joint stiffnesses are manually calculated for typical connection types, and the joint stiffnesses are used to determine the overall horizontal stiffness and lateral drift of the example structure.

ALKUSANAT

Viimeisen vuoden aikana olen tehnyt kandidaatintyön ja diplomityön CLT-rakenteisiin puukerrostaloihin liittyen. Kumpaankin työhön olen saanut aiheen ja opastusta oman maakunnan eli Pohjois-Karjalan puurakentamisen osajilta. Diplomityön aihekin löytyi naapuripitäjän puolelta Joensuusta. Suunnittelutoimisto Timber Bros Oy:n Antti Matikaista on kiittäminen hyvästä työn aiheesta sekä neuvoista työn aikana.

Professori Mikko Malaskalle esitän kiitokset työhön liittyvästä ohjauksesta ja palautteesta. Kannustava ja asiantunteva kritiikki auttoi keskittymään työn kannalta oleellisiin asioihin ja pysymään ennalta sovitussa rajoissa.

Eriyisesti haluan kiittää lähipiiriä eli vaimoa, perhettä ja kavereita, jotka ovat jaksaneet kannustaa ja potkia eteen päin hiukan tavoiteajan yli lipsahaneiden opintojen aikana. Niin ja sukulaisille erityisaininta diplomityön aikaisista lisäkannustimista. Ihan en ole varma tuliko porkkanaa vai keppiä, mutta ei mennyt kannustus hukkaan.

Vaiviossa 14.11.2016

Pekka Laakkonen

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| 1. Johdanto | 1 |
| 1.1 Tausta | 1 |
| 1.2 Aihe ja tavoitteet | 1 |
| 1.3 Tutkimusongelma ja -menetelmät | 2 |
| 1.4 Rajaukset ja rakenne | 2 |
| 2. CLT-rakenteinen tilaelementtikerrostalo | 3 |
| 2.1 CLT | 3 |
| 2.2 Tilaelementtitekniikka | 4 |
| 2.3 Tilaelementit | 5 |
| 2.4 Rakennejärjestelmä | 6 |
| 3. Jäykistys CLT-runkoisessa tilaelementtikerrostalossa | 7 |
| 3.1 Jäykistysjärjestelmä | 7 |
| 3.2 Jäykistys mastoseiniä avulla - perinteinen jäykistystapa | 8 |
| 3.2.1 Välipohjan toiminta | 8 |
| 3.2.2 Jäykistävät seinät | 9 |
| 3.3 Tilaelementtien tehokkaampi hyödyntäminen jäykistyksessä | 9 |
| 3.4 Jäykistysmitoitus | 11 |
| 3.4.1 Mitoituksen perusteet ja kuormat | 11 |
| 3.4.2 Siirtymät | 12 |
| 3.4.3 Stabiliateetti | 13 |
| 4. Liitokset | 15 |
| 4.1 Liitoskohdat tilaelementtirungossa | 15 |
| 4.1.1 Levyjen väliset liitokset välipohjassa | 16 |
| 4.1.2 Välipohjan ja seinien väliset liitokset | 17 |
| 4.1.3 Elementtien välinen vaakaliitos | 18 |
| 4.1.4 Seinien väliset pystyliitokset | 19 |
| 4.2 Leikkausliitos | 19 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.1 | Puolipontti-, pusku- ja soiroliitos | 20 |
| 4.2.2 | Ruuvattavat latta- ja kulmateräsiitososat | 21 |
| 4.2.3 | Levyn reunan hammastus | 22 |
| 4.2.4 | Kitkaliitos | 23 |
| 4.3 | Leikkaus- ja vetorasitettu liitos | 23 |
| 4.4 | Ankkurointiliitos | 24 |
| 5. | Rakenteiden jäykkyydet | 27 |
| 5.1 | CLT-levyn tasonsuuntainen jäykkyys | 27 |
| 5.2 | Kuormaa vastaan kohtisuoran liitoksen vaikutus seinän jäykkyyteen . | 28 |
| 5.3 | Kuorman suuntaisen liitoksen vaikutus seinän jäykkyyteen | 30 |
| 6. | FEM-laskenta | 31 |
| 6.1 | FEM | 31 |
| 6.2 | RFEM-ohjelma | 32 |
| 7. | Vertailulaskelmat | 35 |
| 7.1 | Tarkasteltava rakenne | 35 |
| 7.2 | Käsinlaskenta | 36 |
| 7.2.1 | Liitosten jäykkyydet | 37 |
| 7.2.2 | Seinien ja koteloiden jäykkyydet | 38 |
| 7.2.3 | Ankkurointi | 40 |
| 7.3 | RFEM | 40 |
| 7.3.1 | Lähtötiedot | 40 |
| 7.3.2 | Tulokset | 42 |
| 7.4 | Tulosten vertailu | 44 |
| 8. | Yhteenveto | 45 |
| | Lähteet | 47 |

| | |
|---------|------------------------------------|
| LIITE 1 | Rakenteiden jäykkyydet |
| LIITE 2 | Kuormien jakautuminen ja siirtymät |
| LIITE 3 | Jäykistävän rakenteen ankkurointi |
| LIITE 4 | RFEM-laskenta |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|------------------------|---|
| CLT | Cross Laminated Timber, ristiinliimattu massiivipuulevy |
| FEM | Finite Element Method, elementtimenetelmä |
| Kotelomasto | Poikkileikkaukseltaan umpinainen ja ohutseinäinen putkimainen mastorakenne. Esimerkiksi hissikuilu. |
| Levykenttä | Useista erillisistä levyistä koostuva tasorakenne. |
| Puikkoliitin | Puikkomainen metallinen liitin. Esimerkiksi ruuvit, naulat ja vaarnatapit. |
| Tilaelementti | Tilaelementti on valmisosa, joka muodostuu seinistä, lattias- ta ja katosta, eli on nimensä mukaisesti rajaavien pintojen muodostama tila |
| Tilaelementtitekniikka | Rakentamistapa, jossa rakennus kootaan esivalmistetuista ti- laelementeistä. |

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

CLT-rakenteiden käyttö rakentamisessa on yleistynyt Suomessa ja maailmalla. CLT-levyjen rakenteelliset ominaisuudet, kuten lujuus ja jäykkyys, tekevät CLT:sta erinomaisen materiaalin suuren mittaluokan puurakentamiseen. CLT-levyt toimivat rakennuksen kantavina ja jäykistävinä rakenteina.

Puurakenteet ovat huomattavan kevyitä, mikä täytyy ottaa huomioon esimerkiksi askeläänieristyksessä ja rakennuksen jäykistyksessä. Askeläänivaatimusten johdosta välipohjarakenne täytyy katkaista huoneistojen välillä, joten rakennukseen kohdistuvia vaakakuormia ei voida siirtää jäykistäville rakenteille yhtenäisenä laattana samaan tapaan kuin betonirakenteisissa rakennuksissa. Koska välipohjat on jaettu rakennusosakohtaisesti lohkoihin, on jäykistäviä seinälinjoja oltava tasaisesti koko kerroksen alalla. Välipohjat ja seinät muodostavat rakennuksen sisälle itsenäisiä jäykistetorneja.

Tilaelementtirakenteissa seinälinjoja on verrattain tiheässä esimerkiksi kantavilla suurelementeillä tehtyyn rakennukseen verrattuna. Vaikka tilaelementti on neljän seinän, katon ja lattian muodostama yhtenäinen rakenne, moduulirakentamisen erityispiirteistä johtuen seinälinjoista voidaan hyödyntää rakennuksen jäykistämässä vain osa. Rakennesuunnittelijan tehtävä on määrittää nämä linjat. Kun jäykistyksessä ja ankkuroinnissa otetaan huomioon vain vaakakuorman suuntaiset seinät, jää kuormaa vastaan kohtisuorassa suunnassa olevien seinien kapasiteetti käyttämättä ja rakenteista tulee mahdollisesti ylimitoitettuja. Varsinkin CLT-rakenteisilla tilaelementeillä jäykistysmitoitus yhtenäisenä jäykistystornina voisi tuoda huomattavia materiaalisäästöjä.

1.2 Aihe ja tavoitteet

Diplomityön aihe on tutkia 4-kerroksisen CLT-rakenteisen tilaelementti- tai huoneistotornin käyttämistä kotelomaisena jäykistävänä rakenteena. Työssä selvitetään,

millä edellytyksillä neljä päällekkäin asennettua tilaelementtiä toimisi yhtenäisenä jäykistävänä tornina. Työssä tutkitaan myös seinien ja seinäyhdistelmien vaikutusta tornin jäykkyyteen sekä tarkastellaan kuormien siirtymistä rakenteessa.

Työn tavoitteena on etsiä laskentamenetelmiä, joilla CLT-levyjen välisten liitoskohtien joustaminen voidaan ottaa huomioon ja, joiden avulla voidaan määrittää jäykistävän CLT-kotelorakenteen jäykistyskapasiteetti. Yksittäisen jäykistetornin jäykkyyden lisäksi on tutkittava miten jäykistystorneja voitaisiin hyödyntää koko rakennuksen jäykistyksessä? Tutkimuksella haetaan menetelmää, jonka avulla voidaan arvioida tehdäänkö kaikki huoneistot jäykiksi vai valitaanko kokonaisuuden kannalta järkevimmit tilaelementit tai huoneistot jäykistäviksi rakenteiksi.

1.3 Tutkimusongelma ja -menetelmät

Jäykistyksen toteuttaminen massiivipuiseen tornirakenteen avulla on haastavaa. Työssä on tutkittava millä edellytyksillä rakenne pystyy toimimaan kotelomaisena rakenteena. Kotelorakenteen toimintaa voidaan arvioida pilkkomalla rakenne pienempiin osiin ja tutkimalla miten yksittäinen kotelorakenteeseen kuuluva osa vaikuttaa kokonaisuuteen. Oleellinen kysymys liittyy siihen, miten CLT-levyjen väliset liitokset vaikuttavat kuormien jakautumiseen ja kotelon jäykkyyteen.

Työn suorittaminen jakautuu kolmeen osaan. Työn alkuosassa selvitetään kirjallisuuden ja aikaisempien tutkimusten kautta suunnitteluun vaikuttavat määräykset, laskentaohjeet ja lähtötiedot. Kirjallisuusselvityksen avulla luodaan mahdollisimman kattava teoriapohja työn seuraavalle, eli rakenteiden toimintaa koskevalle osalle. CLT-tilaelementtitornin rakenneanalyysissä selvitetään tarkemmin se, millä edellytyksillä tilaelementin jokaista seinää voidaan hyödyntää jäykistyksessä ja määritetään tyypilliselle tilaelementtirakenteelle jäykkyys. Jäykistyskapasiteetti määritetään käsinlaskentamenetelmien avulla ja menetelmien luotettavuutta arvioidaan vertaamalla FEM-mallien avulla saatuihin analyysituloksiin. Työn lopussa tuloksista tehdään yhteenveto ja pohdinta mahdollisista jatkotutkimustarpeista.

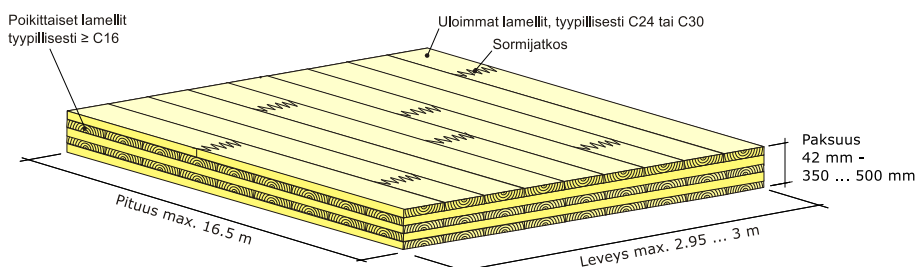
1.4 Rajaukset ja rakenne

CLT-runkoisen tilaelementtitornin jäykistyskapasiteetin määrittäminen on erittäin laaja aihekokonaisuus. Tässä työssä keskitytään rakennuksen ja rakenneosien staattisen tasapainon sekä käyttörajatilan siirtymien tarkasteluun. Rakenneosien kestävyyskykyjen määrittäminen ja rakenteiden värähtely rajataan tämän työn ulkopuolelle.

2. CLT-RAKENTEINEN TILAELEMENTTIKERROSTALO

2.1 CLT

Cross Laminated Timber (CLT) on ristiin liimatuista puutavarakerroksista liimamalla ja puristamalla valmistettu massiivipuulevy. CLT-levyssä on yleensä kolme, viisi tai seitsemän ristiin ladottua ja yhteen liimattua lamellikerrosta. Materiaalina käytetään lujuusluokiteltua ja höylättyä mänty- ja kuusilautaa. Lamellien paksuus ja leveys vaihtelee tuotteesta ja valmistajasta riippuen. Lamellien paksuudet voivat vaihdella 20 - 75 mm ja leveydet 95 - 250 mm välillä [13, s. 48-49]. Lamellit voivat olla valmistustavasta riippuen syrjä- ja lapeliimattuja tai ainoastaan lappeelta liimattuja. Lamellien liimaaminen syrjältä ja lappeelta parantaa levyn leikkauslujuutta ja ilmanpitävyyttä. CLT levyjen maksimimitat riippuvat valmistajasta ja tuotantolinjasta. Kuvassa 1 on esitetty CLT-levyjen mahdollisia mittoja.



Kuva 1 CLT-levyjen mittoja [3, s. 76] [15, s. 14]

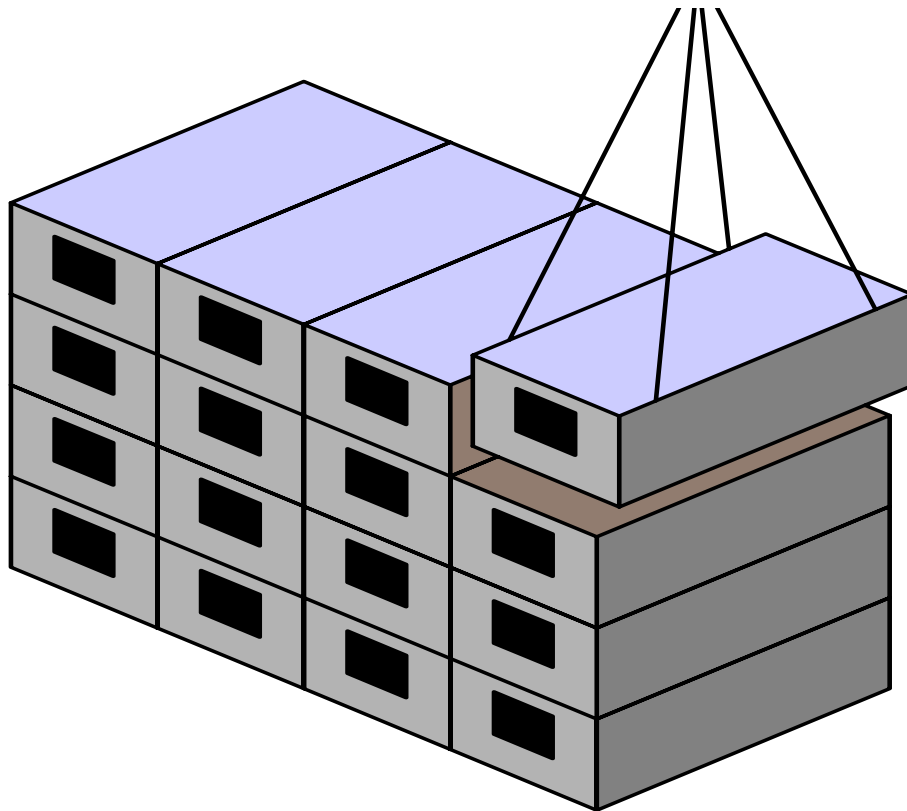
CLT-levyt ovat painoonsa nähden erittäin lujia ja jäykkiä. Levyjä ei myöskään tarvitse aina suojata palolta esimerkiksi kipsilevyillä vaan puupinta voidaan jättää näkyviin. Massiivipuurakenne toimii palotilanteessa passiivisena palosuojana. Levyn ominaisuudet tekevät siitä erinomaisen materiaalin puukerrostalorakentamiseen.

CLT-rakenteet sisältävät massiivipuisina huomattavan määrän puumateriaalia ja ovat raaka-ainekustannuksiltaan hintavampia kuin esimerkiksi rankarakenteet. Lisäksi CLT-levyihin työstetään ovi- ja ikkuna-aukot sekä LVIS-tekniikan vaatimat

aukotukset tehtaalla, joten elementtien suunnitelmien on oltava valmiina aiemmin kuin esimerkiksi betonielementtirakenteilla.

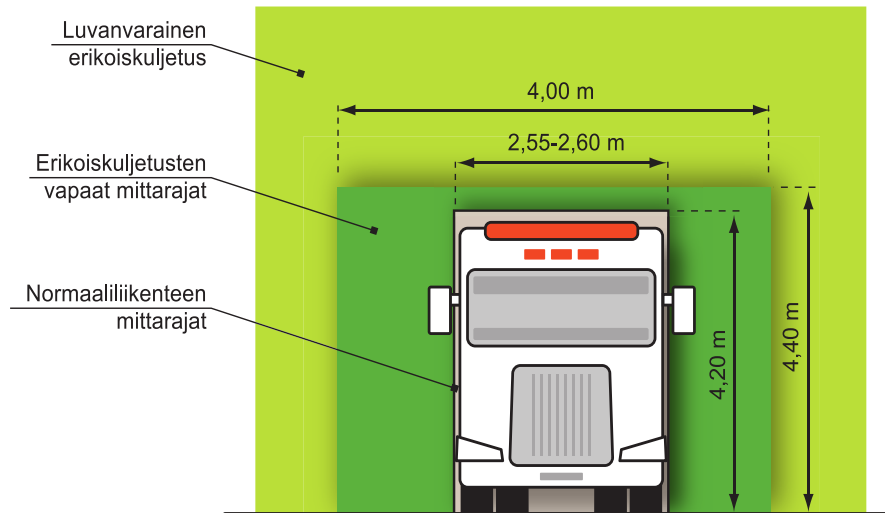
2.2 Tilaelementtitekniikka

Rakentamistapaa, jossa kuvan 2 mukaisesti rakennus muodostuu esivalmistetuista tilayksiköistä, kutsutaan tilaelementtitekniikaksi [19]. Tilaelementit ovat tehdasolosuhteissa pitkälle esivalmistettuja eli niissä on seinä-, välipohja- ja kattorakenteen lisäksi eristeet, pintarakenteet, LVIS-tekniikka, kalusteet, ikkunat ja ovet. Esivalmistusasteen ollessa suuri, työmaalla tehtävä työmäärä pienenee ja rakennusaika lyhenee. Työmaa-ajan lyheneminen vähentää myös elementtien altistumista kosteudelle ja lämpötilanvaihteluille.



Kuva 2 Havainnekuva tilaelementtikerrostalosta

Tilaelementtien käyttö rajoittaa tilasuunnittelua muita puukerrostalorakentamisen tekniikoita enemmän. Tilaelementtejä käytettäessä huoneistojen kokoa ja seinien sijaintia ohjaavat tilaelementin maksimimitat, jotka määräytyvät kuvassa 3 esitettyjen Suomen tieverkostossa sallittujen maksimimittojen, välipohjan jännevälin ja nostokaluston kapasiteetin mukaan. [13, s. 68] Tilaelementtien tyypilliset enimmäismitat ovat $12 \times 4,2 \times 3,2$ metriä [19].



Kuva 3 Suomen tieverkossa sallitut maksimitat [8].

CLT-rakenteisen tilaelementtikerrostalon perustukset tehdään yleensä jatkuvina kantavien seinälinjojen alle. Tilaelementeistä johtuvat mittarajoitukset näkyvät myös perustuksissa eli perustuslinjojen välinen etäisyys on sama kuin tilaelementin leveys. [13, s. 66] Puurakenteinen rakennus on vain noin viidesosan kivirakenteisen rakennuksen painosta, mistä syystä perustusten ei tarvitse olla yhtä järeät.

2.3 Tilaelementit

Tilaelementeissä kantavat rakenteet voidaan toteuttaa pilari-palkkitekniikalla, kehärakenteena tai laattamaisilla suurelementeillä, jotka voivat olla rankarunkoisia tai massiivirakenteisia. Tilaelementit voidaan myös toteuttaa yhdistämällä erilaisia menetelmiä. Esimerkiksi CLT-rakenteita ja rankarakenteita. Tässä työssä käsitellään yhtenäisten CLT-levykenttien muodostamia rakenteita eli massiivipuisia rakenteita.

Tilaelementtikerrostalon jokaisessa elementissä on seinät, lattia ja katto, joten tilaelementtien välisistä rakenteista tulee kaksoisrakenteita. Huoneistokohtaisesti ulko- ja väliseinärakenteet ovat samanlaiset kuin muillakin puukerrostalon toteutustavoilla eli ulkoseinät ovat yksirunkoisia ja huoneistojen väliset seinät kaksoisrakenteisia. Huoneistoissa, jotka muodostuvat useammasta tilaelementistä, tilaelementtien huoneistojen sisäiset sivut pyritään toteuttamaan mahdollisimman avoimena, jolloin huoneiston muunneltavuus ja tilasuunnittelu on helpompaa. Tilaelementin huoneiston sisäisen sivun voi toteuttaa esimerkiksi kehä- tai pilaripalkkirakenteena. [11, s. 47] [13, s. 68]

2.4 Rakennejärjestelmä

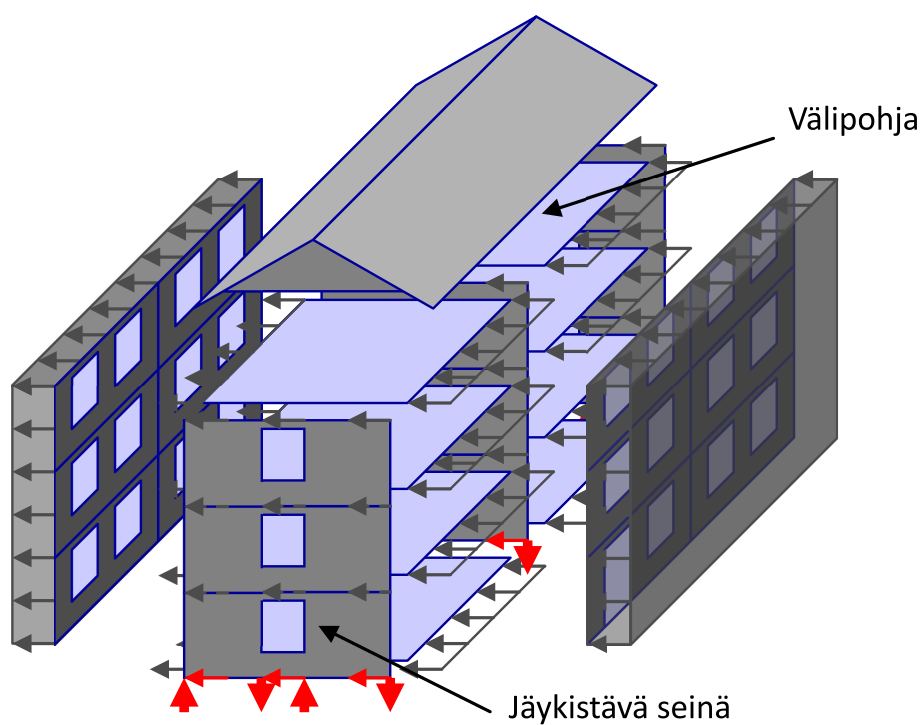
Rakennejärjestelmällä tarkoitetaan tapaa, jolla rakennukseen kohdistuvat pysty- ja vaakakuormat siirretään perustuksille [13]. Tilaelementtirakenteisissa puukerrostoissa rakennejärjestelmä on yleensä kantavat seinät -järjestelmä, jossa vaakarakenteiden kuormat välitetään kantavien seinien välityksellä perustuksille.

3. JÄYKISTYS CLT-RUNKOISESSA TILAELEMENTTIKERROSTALOSSA

3.1 Jäykistysjärjestelmä

CLT-runkoisessa tilaelementtikerrostalossa rakenteiden jäykistys toteutetaan jäykistävien levykenttien avulla. Levykenttinä toimivat välipohjat ja osa seinistä, joita ovat yleensä ulkoseinät ja huoneistojen väliset seinät. Jäykistysmitoituksen avulla varmistetaan, että rakennuksen vaakakuormat eivät aiheuta rakenteiden pettämistä tai liiallisia muodonmuutoksia.

Rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat johdetaan vaakajäykisteinä toimivien välipohjien kautta jäykistäville seinälinjoille ja niiden kautta perustuksille. Jäykistäviä rakenteita ja kuormien jakautumista on havainnollistettu kuvassa 4.



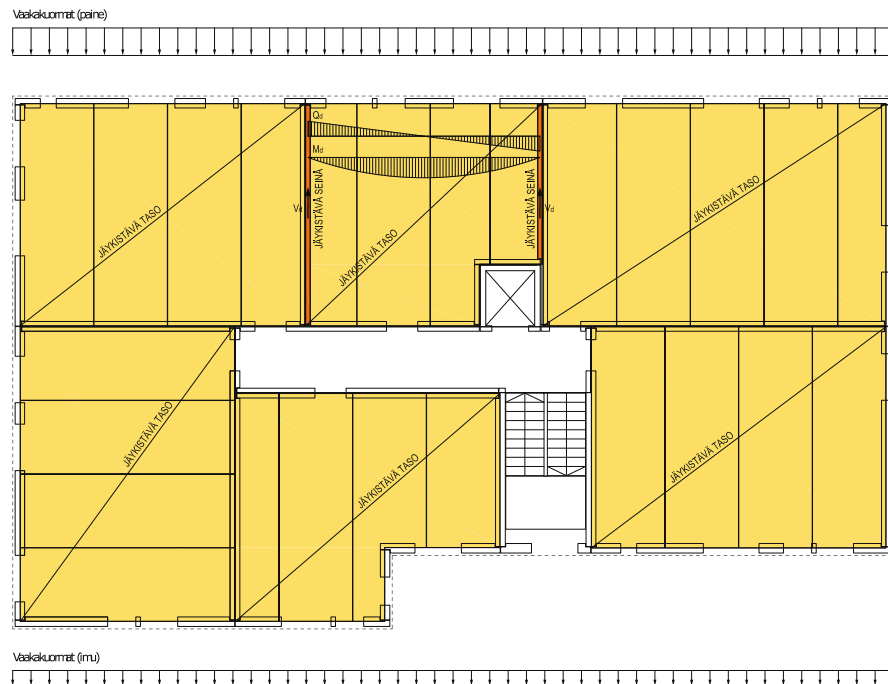
Kuva 4 Jäykistävät rakenteet ja kuormien jako [23].

3.2 Jäykistys mastoseinien avulla - perinteinen jäykistystapa

3.2.1 Välipohjan toiminta

Välipohjarakenteella on suuri merkitys siihen, miten vaakakuormat välittyvät jäykistävälle pystyrakenteille. Välipohjan levykenttä voi toimia täysin jäykkänä koko kerroksen kokoisena rakenteena, tukien yli jatkuvana joustavana rakenteena tai tukien kohdalla katkaistuna joustavana rakenteena. Täysin jäykällä rakenteella välipohja välittää vaakakuorman pystyjäykisteille niiden jäykkyysien mukaan. Puurakenteilla levyjen ja levyjen välisen joustamisen johdosta välipohjia ei voida pitää täysin jäykkänä rakenteena vaan käytännössä täysin jäykkä yhtenäinen välipohja täytyy toteuttaa betonirakenteisena. [15, s. 19-20] Puurakenteisissa välipohjissa jäykistys tapahtuu joko rankarunkoon mekaanisilla liitososilla kiinnitetyillä levyillä tai massiivilevyrakenteella, esimerkiksi CLT-levyillä.

Puurakenteinen välipohja on siis aina joustava ja rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen se voidaan toteuttaa tukien yli jatkuvana tai niiden kohdalta katkaistuna rakenteena. Esimerkiksi puurakenteisissa asuinrakennuksissa välipohjat jaetaan ääniteknisistä syistä kuvan 5 mukaisiin huoneistokohtaisiin lohkoihin. Lohkoihin jaetut välipohjat ja jäykistävät seinät muodostavat rakennuksen sisään torneja, jotka välittävät vaaka- ja pystykuormat perustuksille. [13, s. 58 - 59] [15]



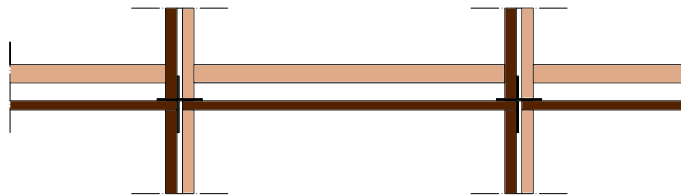
Kuva 5 Puukerrostalon välipohjan jako jäykistäviin lohkoihin [20].

Tilaelementtien välisten liitosten johdosta välipohjarakenteesta ainoastaan alempi levykenttä eli alemman elementin katto ajatellaan jäykistäväksi rakenteeksi. Vierekkäin olevien tilaelementtien välistä liitosta ja jäykistäviä välipohjan osia on havainnollistettu kuvassa 6. Todellisuudessa jokainen välipohjaan kuuluva rakenne lisää välipohjan jäykkyyttä.

3.2.2 Jäykistävät seinät

Massiivipuuleveyillä toteutetussa tilaelementtikerrostalossa jäykistävinä seininä toimivat huoneistojen väliset seinät ja ulkoseinät. Yleensä tilaelementtirakenteilla jäykistyksessä voidaan käyttää vain toista huoneistojen välisistä seinistä, mikä johtuu siitä, että vierekkäin asennetuista tilaelementeistä ainoastaan ensin asennettuun pystytään tekemään leikkaus- ja normaalivoimia välittävä liitos. Jäykistävät rakenteet on esitetty kuvassa 6 tummennettuna. [12, s. 35]

Jäykistävien seinien epäsymmetrinen sijainti tai jäykkyysuhteet johtavat rakennuksen tai jonkun sen osan kiertymiseen. Tilaelementtirakenteilla vaakakuorman suhteen epäsymmetrinen jäykistys voi syntyä esimerkiksi silloin, kun ulkoseinässä on suuria aukotuksia ja muut seinät ovat ehjiä. Jäykistysjärjestelmän symmetrisyys tulisi varmistaa myös koko kerroksen alalla eli eri lohkojen muodostamien jäykistystornien välillä vaakakuormista syntyvät siirtymät tulisivat olla samaa suuruusluokkaa. Kuvassa 7 on havainnollistettu perinteistä jäykistystä. Jäykistävät seinät on merkitty tasopiirustukseen punaisella.



Kuva 6 Jäykistykseen osallistuvat tilaelementin rakenteet.

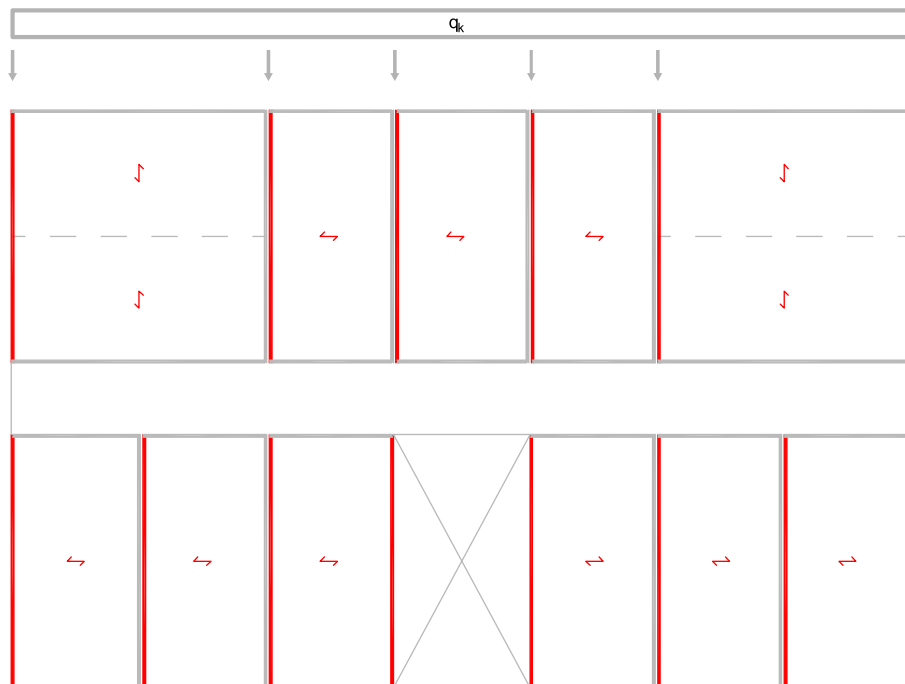
3.3 Tilaelementtien tehokkaampi hyödyntäminen jäykistyksessä

Päällekkäisten tilaelementtien muodostamat tornit muistuttavat betonirakenteisten kerrostalojen jäykistyksessä käytettäviä kotelomastoja, joita ovat esimerkiksi hissi-kuilut. Tilaelementtitorneja ei voida kuitenkaan käyttää hissi-kuilun tavoin yhtenäisenä putkimaisena rakenteena, koska CLT-levyjen välisiä liitoksia ei pystytä tekemään tarpeeksi jäykiksi. Tilaelementtirakenteita pystytään kuitenkin hyödyntämään

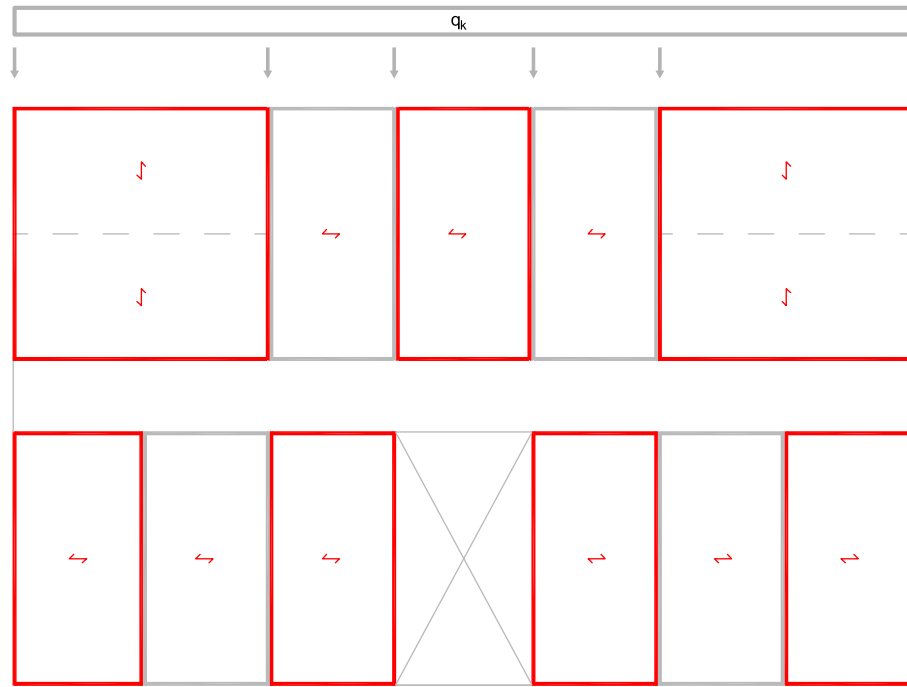
nykyistä enemmän rakennuksen jäykistyksessä.

Kuten luvussa 3.2 tuotiin esille, elementtien pystytysvaiheessa ainoastaan osaan niiden välisistä vaakasaumoista pystytään tekemään leikkausta ja vetoa välittävät ankkurointiliitokset, minkä johdosta vain osa potentiaalisista jäykistävästä rakenteesta pystytään käyttämään jäykistyksessä hyödyksi. Jotta jokainen jäykistävä lohko toimisi myös jäykistävien seinien osalta itsenäisesti, on vaaka- ja pystyankkurointi oltava jokaisessa jäykistävän lohkon vaakaliitoksessa.

Vierekkäin asennettavien elementtien ulkopintaan pystytään kiinnittämään liitososia vain ensin asennettuun elementtiin. Jos elementtien välisen kaksoisrakenteen kumpaakin seinää aiotaan käyttää jäykistyksessä on liitostapa ja käytettyjen liitososien oltava sellaisia, että liitos pystytään toteuttamaan vierekkäin asennettujen tilaelementtien vapailta sivuilta tai sisäpuolelta. Erilaisia liitostapoja käydään läpi luvussa 4. Toisaalta tilaelementtitornin jäykkyys on yksittäiseen mastoseinään nähden suurempi, jolloin jäykistys voitaisiin toteuttaa kuvan 8 mukaisesti eli valitaan jäykistyksen kannalta sopivimmat tilaelementtitornit jäykistäviksi rakenteiksi.



Kuva 7 Jäykistävät seinät.



Kuva 8 Jäykistävät tilaelementtitornit.

3.4 Jäykistysmitoitus

3.4.1 Mitoituksen perusteet ja kuormat

Rakenteet tulee mitoittaa niin, että rakenteeseen kohdistuvat kuormat eivät ylitä niiden kestävyyttä tai tasapainottavia kuormia tai kuormien vaikutukset eivät ylitä käyttökelpoisuudelle määritettyä arvoa, kuten taipumalle asetettua ylärajaa. Suurissa rakennuksissa, kuten yli 8-kerroksissa kerrostaloissa ja urheiluhalleissa seuraamukset ihmisten turvallisuudelle ja taloudellisille seikoilla ovat suuremmat kuin esimerkiksi autotalissa. Seuraukset otetaan suunnittelussa huomioon seuraamus- ja luotettavuusluokan mukaisilla kuormakertoimilla. [2]

Menetelmää, jossa kuormista johtuvia arvoja verrataan sallittuihin arvoihin, kutsutaan rajatilamitoitukseksi. Kun tutkitaan rakenteen kestävyyttä tai tasapainoa, puhutaan murtorajatilasta ja kun tarkastellaan rakenteen tai rakennuksen käytettävyyttä puhutaan käyttörajatilasta. [2]

Eurokoodeissa murtorajatilaa käsittelee neljä sarjaa. Sarja A (EQU) antaa rakennuksen tai jäykän kappaleen staattisen tasapainon määrittämisessä tarvittavan kuormitusyhdistelmän, sarjan B (STR) mukaisella kuormitusyhdistelmällä voidaan mitoittaa rakenteiden ja rakennusosien kestävyudet, sarja C (GEO) käsittelee geoteknistä

kantavuutta ja sarja D (FAT) rakenneosien ja rakenteen väsymismurtoa. Jäykistyslaskelmissa kuormitukset saadaan määritettyä sarjan A ja B sekä käyttörajatilan kuormitusyhdistelmillä. [2]

Kuormilla on ominaisarvot, jotka ovat niiden pääasiallisia edustavia arvoja. Ominaisarvona käytetään tilastojen mukaista keskiarvoa, yläraja- tai alaraja-arvoa tai nimellisarvoa. Talonrakentamisessa yleisesti käytettyjä ominaisarvoja on esitetty RIL201 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat -oppaassa ja standardissa EN 1991. [2]

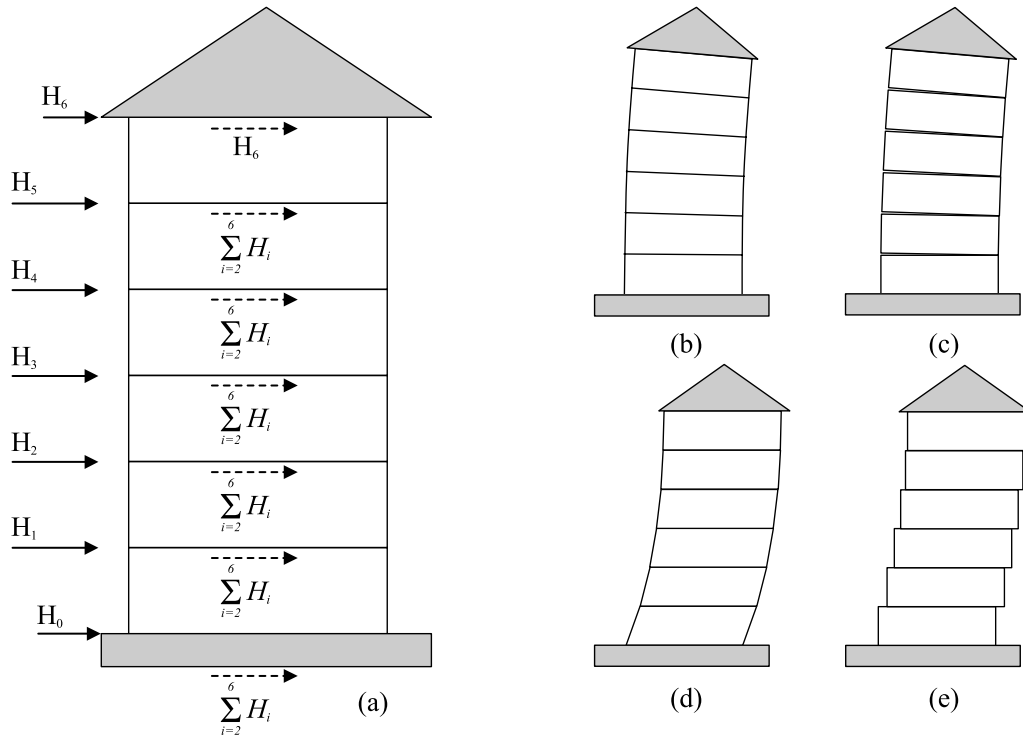
Mitotustilanteissa kuormissa ja materiaaliominaisuuksissa käytetään mitoitusarvoja, jotka saadaan käyttämällä ominaisarvoja tai edustavia arvoja yhdessä osavarmuuskertoimien kanssa. Mitoitusarvojen teoreettinen määrittely on käsitelty standardin EN 1990 kohdassa 6.3 ja rakennusmateriaalien tarkemmat mitoitusarvot löytyvät materiaaliakohtaisista standardeista (EN 1992...EN 1999). [2]

Jäykistäville rakenneosille tulevia kuormia laskettaessa kuormat jaetaan pysty- ja vaakakuormiin. Pystykuorma muodostuu rakenteiden omasta painosta, hyötykuormasta ja lumikuormasta. Vaakakuormat muodostuvat ulkoisista vaakakuormista, kuten tuulikuormasta, ja rakenteiden asennusvinoudesta johtuvista pystykuormien aiheuttamista lisävaakakuormista. [1]

3.4.2 Siirtymät

Kuormat aiheuttavat rakenteissa ja liitoksissa muodonmuutoksia, joiden suuruus ei saa ylittää niiden käytettävyydelle asetettuja ehtoja. Jäykistykseen liittyvissä käyttörajatilan mitoituksissa keskitytään rakennuksen ja sen osien vaakasiirtymiin. Kuvassa 9 on kuvattu jäykistävien seinien taivutuksesta (b) ja leikkauksesta (d) syntyviä siirtymiä sekä seinien välisessä vaakaliitoksessa leikkauksesta (e) ja liitokseen vaikuttavien normaalivoimien (c) aiheuttamia muodonmuutoksia.

Rakennusinsinööriliiton puurakenteiden suunnitteluohjeessa RIL205-1-2009 on määritetty rakennuksen tai sen osan vaakasuuntaiselle siirtymälle suurimmaksi mahdolliseksi arvoksi $H/300$, jossa H on tarkasteltava korkeus [4, s. 90]. RIL 205-1-2016 mukaan siirtymän maksimiarvo ylimmän kerroksen lattian tasolla on $H/500$ [7, s. 39]. Välipohjalle annettu suurin mahdollinen vaakasiirtymä tukien välillä on 5 mm [18].

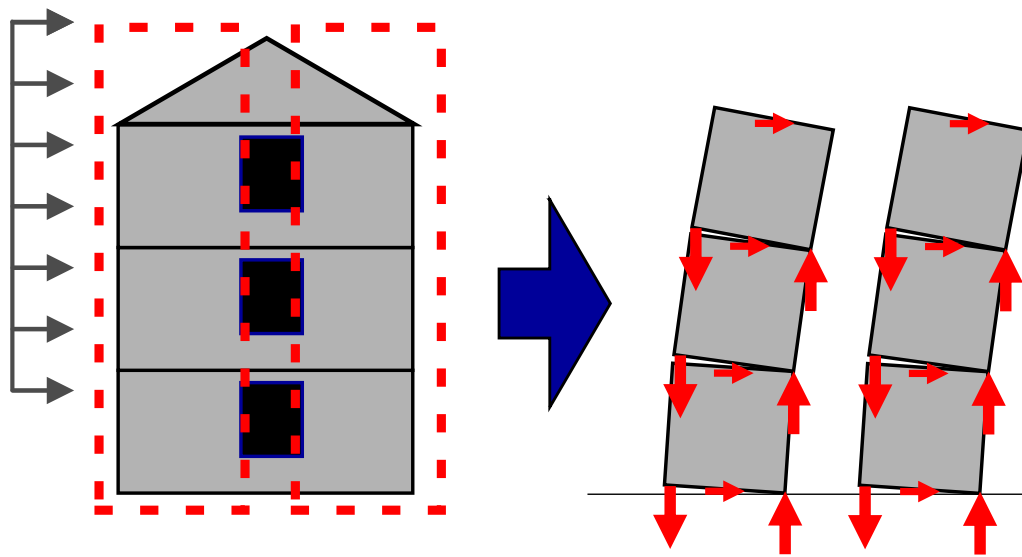


Kuva 9 Vaakakuormista aiheutuvat siirtymät [25].

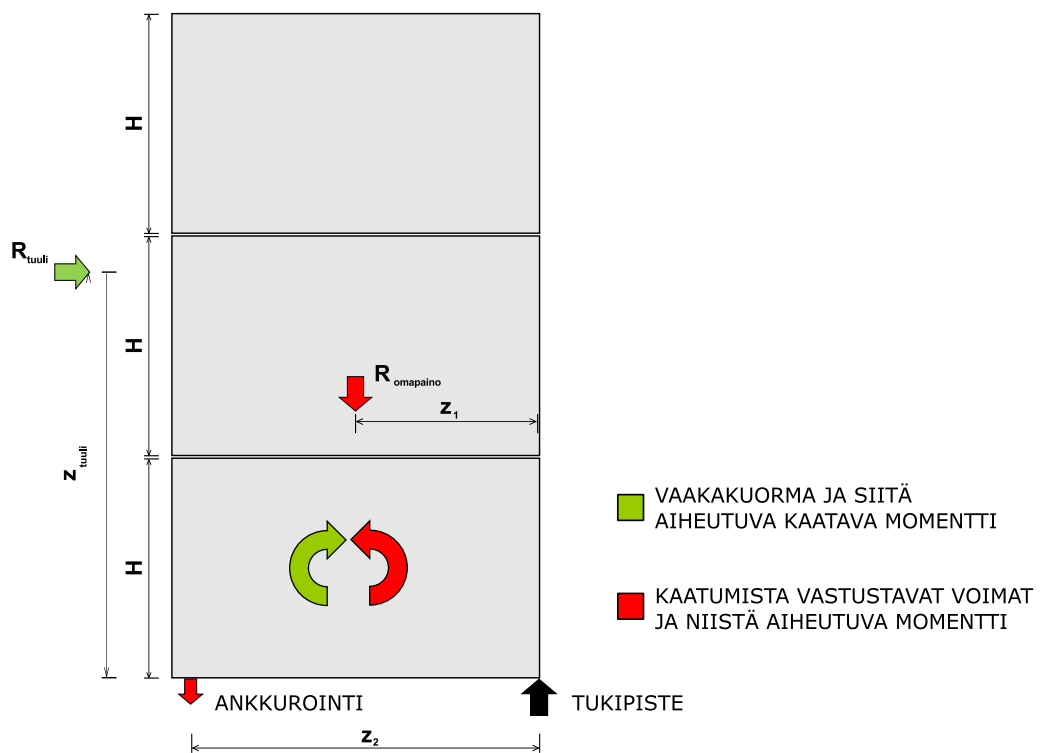
3.4.3 Stabiliateetti

Vaakakuormat aiheuttavat rakennukseen ja jäykistäville pystyrakenteille kaatavan momentin, josta kantaviin seiniin syntyy kuvan 10 mukaisesti vetoa ja puristusta. Mikäli jäykistävässä seinään vaikuttavat pystykuormat ovat pienempiä kuin vaakakuorman aiheuttama nostava voima, täytyy päällekkäisten seinien välille tehdä vetovoimia välittävä liitos. Jokainen jäykistävän seinälinjan seinä täytyy ankkuroida alapuolella olevaan rakenteeseen ja alin seinä perustuksiin.

Kuvaan 11 on merkattu jäykistävälle seinälle tulevat kuormat ja niiden aiheuttamat momentit. Vaakakuorman vaikutuksesta seinä pyrkii kiertymään tukipisteen, eli tässä oikean alanurkan ympäri. Jäykistäväksi seinäksi kannattaa valita mahdollisimman paljon pystykuormaa kantava ja korkeuteen nähden pitkä seinä, jolloin kaatavaa momenttia vastustava momentti olisi mahdollisimman suuri.



Kuva 10 Vaakakuorman aiheuttama veto ja puristus jäykistävissä seinissä.



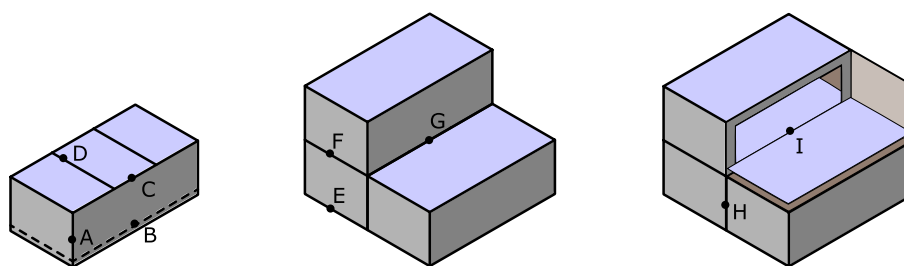
Kuva 11 Jäykistävän seinän tasapaino.

4. LIITOKSET

4.1 Liitoskohdat tilaelementtirungossa

Tilaelementtirungon liitokset voidaan jakaa kuvan 12 mukaisesti elementin sisäisiin ja elementtien välisiin liitoksiin. Tilaelementin sisäiset liitokset tehdään tehdasolosuhteissa, joten liitoksia varten tehdyt työstöt ja asennukset voidaan tehdä mittatarkasti. Tilaelementtien väliset liitokset tehdään työmaalla rakennusta pystyttäessä, joten niiden tulisi olla mahdollisimman helposti toteutettavissa. Esimerkiksi kuvan 12 liitoksien E ja F sijainti tulisi suunnitella niin, että ne voidaan tehdä jokaiseen elementtiin. Näin vältettäisiin kuvan 6 mukainen tilanne, jossa ainoastaan toinen huoneistojen välisistä seinistä voidaan ottaa huomioon jäykistyksessä.

Huoneistojen välisissä liitoksissa on myös huomioitava rakennusakustiikka, mikä tarkoittaa elastisten tärinäeristimien käyttöä vaakaliitoksissa ja liitoksissa vaikuttavien normaali- ja leikkausvoimien siirtämistä pistemäisillä ja joustavilla teräsosilla. Huoneistojen sisällä seinät ja välipohjan osat voidaan kiinnittää toisiinsa rakennetta katkaisematta.



Tilaelementin sisäiset liitokset:
 A: Seinien välinen nurkkaliitos
 B: Lattian ja seinän välinen liitos
 C: Katon ja seinän välinen liitos
 D: Katto/lattialevyjen väliset liitokset

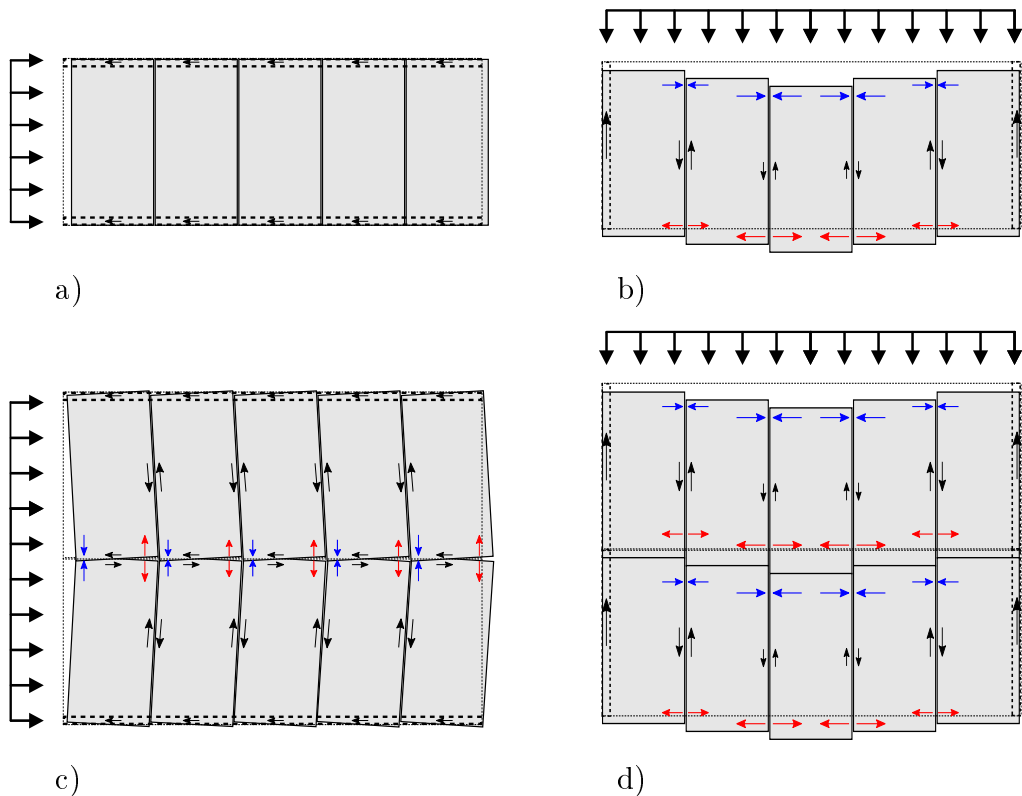
Elementtien väliset liitokset:
 E: Tilaelementin ankkurointi perustuksiin
 F: Päälekkäisten elementtien vaakaliitos
 G: Eri huoneistoja olevien elementtien välinen välipohjaliitos
 H: Huoneiston sisäinen elementtien välinen seinäliitos
 I: Huoneiston sisäinen elementtien välinen välipohjaliitos

Kuva 12 Tilaelementtien liitoskohdat.

4.1.1 Levyjen väliset liitokset välipohjassa

Tilaelementin välipohjan levykentässä voi olla yksi tai useampi CLT-levy riippuen elementin mitoista ja levykentän tarvittavasta pystysuuntaisen kuorman kantokyvystä. Tilaelementin lattiarakenne toimii kantavana rakenteena, joten CLT-levy asennetaan lattian lyhyemmän jännemitan suuntaan. Tilaelementin kattoon ei kohdistu pystykuormia, joten levyjen määrä riippuu elementin leveydestä. Mikäli elementin leveys on pienempi tai yhtäsuuri kuin CLT-levyn maksimileveys, voidaan katto toteuttaa yhdellä levyllä. Muussa tapauksessa myös katossa käytetään useampaa levyä.

Usean levyn muodostaman levykentän saumoihin syntyy vaakakuormista rasituksia, jotka riippuvat kuorman suunnasta levyihin nähden. Yhden tilaelementin muodostaman huoneiston välipohjassa levysaumoja on ainoastaan levyjen pitkällä sivuilla. Jos huoneisto muodostetaan useammasta tilaelementistä on välipohjan laatastossa saumakohtat myös elementtien välillä. Kuvassa 13 on havainnollistettu yhden tilaelementin tai kahden yhteen liitetyn tilaelementin välipohjien liitoskohtia ja niihin kohdistuvia rasituksia.



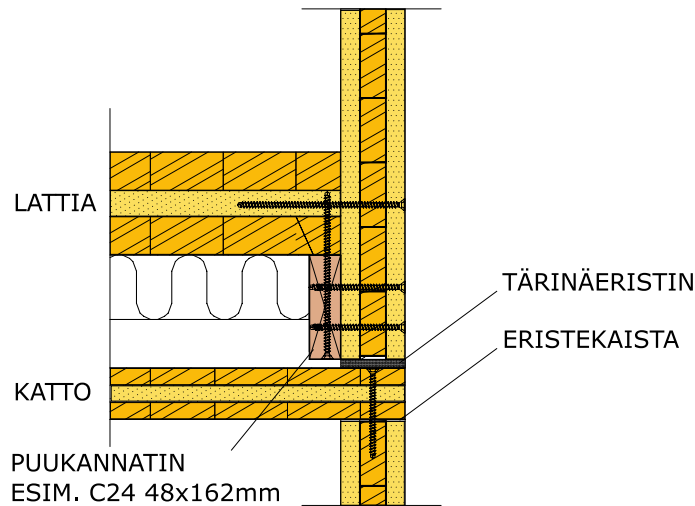
Kuva 13 Kuormitukset välipohjan levysaumoissa [15, kuva 16].

Yhden tilaelementin muodostamassa huoneistossa välipohjan siirtymään tukien välillä vaikuttavat levyjen jäykkyydet ja levyjen ja pystytukien väliset liitosjäykkyydet, kun vaakakuorma kohdistuu levyjen pitkälle sivulle (kuva 13 a). Kuorman vaikuttaessa levyjen suuntaisesti (kuva 13 b) levykentän siirtymät voidaan katsoa riippuvan ainoastaan levysaumojen leikkausliukumista, koska levyjen muodonmuutokset ovat mitättömän pieniä levykentän muodonmuutokseen verrattuna. Levysaumoissa vaikuttava leikkausvoima määräytyy kaksitukisen palkin leikkausjakauman mukaan ja liukuma leikkausvoiman ja levyliitoksen jäykkyyden perusteella. [15, s. 28] Levykentän reunoille muodostuvat veto- ja puristusvoimat saadaan sidottua alla oleviin seiniin.

Kahden tilaelementin muodostamassa huoneistossa kummankin elementin välipohjat liitetään yhtenäiseksi levykentäksi, jolloin pituussuuntaisten levysaumojen lisäksi levyjen päädyt on kiinnitettävä toisiinsa. Vaakakuorman vaikuttaessa kohtisuoraan levyihin nähden (kuva 13 c) levykentän jäykkyyteen vaikuttaa levyjen jäykkyyksien lisäksi päätysaumojen liitosten jäykkyys. Mitä joustavampi päädyn liitos on, sitä enemmän levyt pääsevät kiertymään levykentän sisällä. Tästä syystä päätysaumoissa liitoksen jäykkyyttä kannattaa lisätä käyttämällä tiheämpää liitinväliä tai teräksisiä liitososia. [15, s. 28] Levyjen suuntainen vaakakuorma jakautuu levyille samalla tavalla kuin yhden tilaelementin tapauksessa (kuva 13 d). Elementtien saumakohdassa olevat levyjen päädyt tukeutuvat alla olevaan kantavaan rakenteeseen.

4.1.2 Välipohjan ja seinien väliset liitokset

Välipohjarakenteeseen kuuluvat tilaelementtien katto- ja lattiarakenteet. Tilaelementin lattia asennetaan ruuveilla seinälevyjen sisäpuolelle teräsosien tai puisen kannattimen varaan. Katon levyt asennetaan yleensä seinien päälle ruuveilla. Kuvassa 14 on esitetty välipohjan liitoksista esimerkki, jossa lattian kantavana rakenteena on CLT-levy ja liitos seiniin on tehty puisen kannattimen avulla ja kattorakenne tukeutuu seinien päälle.



Kuva 14 Välipohjalevyjen liitokset seiniin [6].

4.1.3 Elementtien välinen vaakaliitos

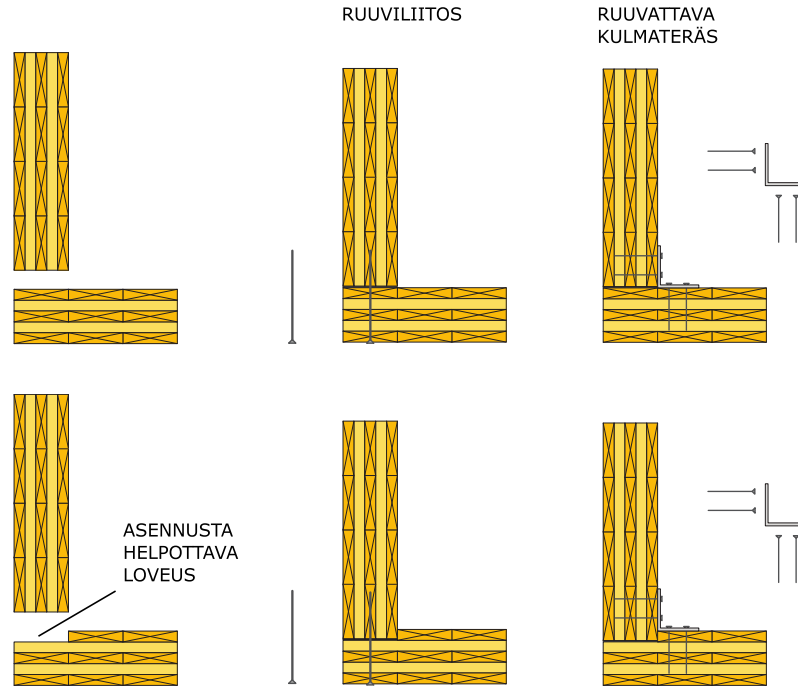
Elementtien välisessä vaakaliitoksessa täytyy huomioida leikkausrasitus sekä puristus- ja vetorasitus. Perinteinen tapa vaaka- ja pystykuormien ankkuroinnille on käyttää kuvan 19 mukaisia ruuvattavia teräslevyjä leikkaus- ja ankkurointiliitoksissa, mutta tässä tavassa ongelmana on se, että vierekkäisistä elementeistä liitokset voidaan asentaa ainoastaan ensin asennettuun elementtiin. Kuten luvussa 3.2.2 on mainittu tämän kaltaisesta liitostavasta seurauksena on rakenne, jossa elementtien välisestä kaksoisrakenteisesta seinästä ainoastaan toisen elementin seinät voivat toimia rakennuksen jäykistyksessä.

Leikkausliitoksen voi myös toteuttaa teräksisten vaarnatappien tai loviliitoksen avulla, jolloin vierekkäisistä seinistä kumpikin ottaisi leikkausvoimia vastaan ja toimisi jäykistävinä rakenteina. Elementtien ankkurointi voidaan tehdä elementtitornien vapaille ulkosivuille. Lovetussa vaakaliitoksessa elementtien kattorakenne on järkevää asentaa seinien sisäpuolelle eikä päälle kuten kuvan 14 rakenteessa.

Elementtien välisen vaakaliitoksen toteutuksella on suuri merkitys jäykistävän rakenteen kokonaisjäykkyyteen. Liitosjäykkyyden vaikutusta kokonaisjäykkyyteen käsitellään tarkemmin luvussa 5.3.

4.1.4 Seinien väliset pystyliitokset

Tilaelementtitornissa seinien välisiä pystysaumoja on elementtien nurkissa ja tilaelementtien välisissä pystysaumoissa. Nurkkien liitokset toteutetaan yleensä suoraan ruuvaamalla tai käyttämällä teräksisiä liitososia. Yleisimmät liitostavat on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15 Nurkkaliitokset ruuvaamalla ja ruuvattavalla kulmateräksellä [9].

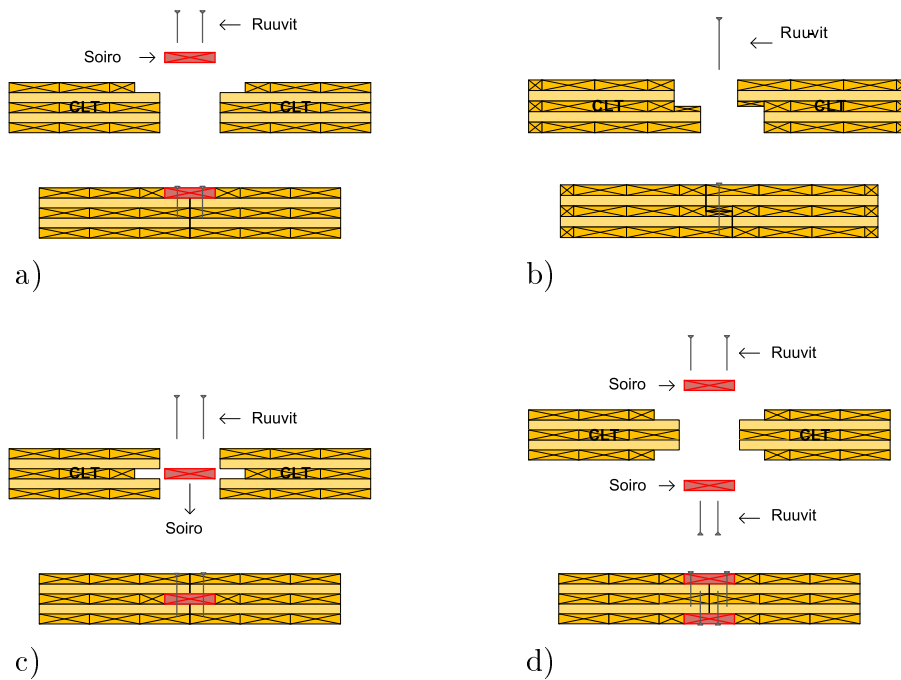
Usean tilaelementin muodostamissa huoneistoissa seinälevyjen välillä on pystysauma elementtien liitoskohdassa. Seinäliitoksessa voi vaikuttaa leikkausrasituksen lisäksi myös levyn suuntaisia kuormia. Yleisesti seinärakenteissa käytettyjä leikkausliitoksia on esitetty kuvassa 16 ja leikkaus- ja vetorasitettuja liitostapoja on käsitelty luvussa 4.3.

4.2 Leikkausliitos

Tilaelementtikerrostalossa leikkausrasitettuja liitoksia ovat välipohjien liitokset jäykistäviin seiniin, tilaelementtien väliset vaakaliitokset ja välipohjissa ja seinissä CLT-levyjen väliset liitokset. Leikkausvoimia välittävät myös seinien väliset nurkkaliitokset silloin, kun vaakakuormista aiheutuvat pystykuormat ankkuroidaan jäykistäviin seiniin nähden poikittaisilla seinillä.

4.2.1 Puolipontti-, pusku- ja soiroliitos

Vierekkäisten samassa tasossa olevien CLT-levyjen väliset leikkausrasitetut liitokset toteutetaan yleensä kuvan 16 mukaisesti pontti- tai soiroliitoksena puikkoliittimien avulla. Puikkoliittimet ovat yleensä itseporautuvia 6-8 mm ruuveja ja liittimien välinen etäisyys vaihtelee 200-300 mm välillä. Liitoksissa a, c ja d on käytetty erillisiä vaneri-, LVL- tai sahatavarasoiroja. Sahatavaran käyttöä liitoksessa kannattaa välttää, koska sahatavarasoiro voi haljeta esimerkiksi CLT-levyn kuivumisesta johtuvien pakkovoimien vaikutuksesta.



Kuva 16 CLT-levyjen väliset soiro- ja puoliponttiliitokset [9].

Kohtisuorassa toisiaan vastaan olevat CLT-levyt voidaan kiinnittää puikkoliittimien avulla. Puikkoliittiminä käytetään yleensä itseporautuvia ruuveja. Puikkoliittimin tehtyjä nurkkaliitoksia on esitetty kuvassa 15.

Liitosten jäykkyys vaikuttaa oleellisesti levykentän jäykkyyteen ja kuormien siirtymiseen rakenteelta toiselle. Levykentän muodonmuutosten ja rakenteiden värähtelemisen vähentämiseksi liitokset olisi hyvä tehdä mahdollisimman jäykiksi. Liitoksen jäykkyys riippuu monesta tekijästä, kuten liitoksen rakenteesta, liitososien lujuusominaisuuksista ja liitospintojen välisestä kitkasta. Puikkoliittimillä toteutettujen liitosten jäykkyyksien laskentaan on esitetty kaavat standardissa SFS-EN 1995-1-1.

Standardin mukainen tarkastelu on hyvin pelkistetty eli liitoksen jäykkyys perustuu pelkästään puuosien tiheyteen ja liitinten halkaisijaan.

Yksittäisen leikkaustasoa vastaan kuormitetun puikkoliittimen jäykkyys lasketaan taulukossa 1 esitettyjen kaavojen avulla. Merkinnällä ρ_m tarkoitetaan puuosan keskimääräistä tiheyttä ja merkinnällä d liittimen paksuutta. Jos liitoksen puuosien tiheydet eivät ole samansuuruiset, niin suurena ρ_m käytetään yhtälön 1 mukaista arvoa.

Taulukko 1 Siirtymäkertoimen K_{ser} arvot puikkoliittimille [N/mm]. [4, s. 89]

| Liitintyyppi | K_{ser} |
|--|---------------------------------------|
| Tappivaarnat Pultit Ruuvit Naulat, kun puuhun esiporataan reikä | $K_{ser} = \rho_m^{1,5} d / 23$ |
| Naulat ilman esiporausta | $K_{ser} = \rho_m^{1,5} d^{0,8} / 30$ |

$$\rho_m = \sqrt{\rho_{m,1} \rho_{m,2}} \quad (1)$$

Liitoksen kokonaisjäykkyys lasketaan edellä laskettujen puikkoliittimien jäykkyyskertoimien ja liitoksen leikkauspintojen ja liitinrivien avulla. Liitoksen kokonaisjäykkyyden laskemiseen käytetään kaavaa 2, joka on johdettu Luntan diplomityössä esitetystä kaavasta. [15, s. 49]

$$K_{tot} = K_{ser} * \frac{n}{l} * \frac{L}{s} \quad (2)$$

| | |
|-----|---|
| n | Leikkaustasojen määrä |
| l | Liitostyyppin mukainen kerroin, $l=1$ puoliponttiliitoksella, $l=2$ soiroliitoksella. |
| L | Liitospinnan pituus |
| s | Liitinväli |

4.2.2 Ruuvattavat latta- ja kulmateräslitosisat

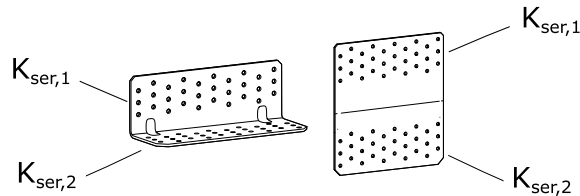
Leikkauskuormia voidaan siirtää levyltä toiselle kuvan 17 mukaisilla ruuvattavilla latta- tai kulmateräslitosisilla. Teräksisten liitosisien avulla voidaan myös lisätä puikko- tai soiroliitoksen lujuutta ja jäykkyyttä.

Liitoksessa teräsosa on liitettäviä puuosia huomattavasti lujempi, joten liitoksen jäykkyyteen vaikuttaa puikkoliittimien määrä ja niiden jäykkyys K_{ser} . Puikkoliittimien jäykkyydet voidaan määrittää taulukon 1 kaavoilla. Liitoksen kokonaisjäykkyys saadaan laskettua kaavalla 3. [10]

$$K_{liitos} = \frac{1}{\frac{1}{K_{ser,1}} + \frac{1}{K_{ser,2}}} \quad (3)$$

$K_{ser,1}$ Levyliitoksen ruuviryhmän jäykkyys osassa 1

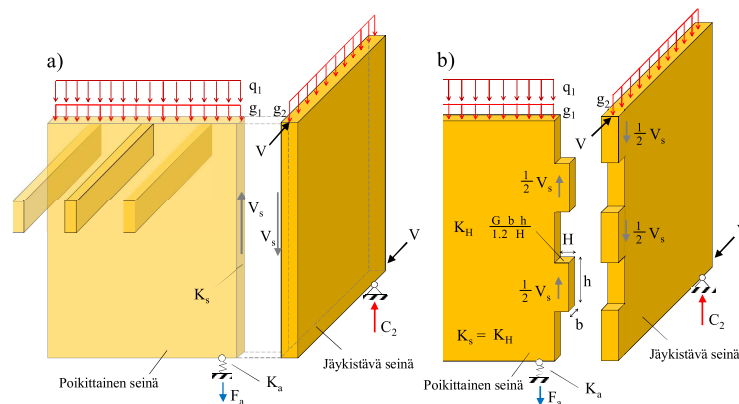
$K_{ser,2}$ Levyliitoksen ruuviryhmän jäykkyys osassa 2



Kuva 17 Ruuvattavat latta- ja kulmateräслиitososat.

4.2.3 Levyn reunan hammastus

Leikkausrasitus voidaan siirtää levyiltä toiselle puristuspintojen kautta eli levyjen reunojen hammastuksen avulla. Kuvassa 18 on esitetty nurkkaliitoksen hammastus, jonka leikkausjäykkyyden suuruudeksi Luntta on diplomityössään laskenut 414 MN/m, joka on ruuviliitokseen nähden yli 15-kertainen arvo. [15, s. 47]



Kuva 18 Nurkkaliitoksen hammastus [15, s. 47].

Loviliitoksessa vaikuttava leikkausvoima jaetaan hammastuksen mukaisella puristuspintojen määrällä. Kuvan 18 esimerkissä leikkausta ottavia ulokkeita on kaksi kappaletta, joten yhdelle ulokkeelle tulee puolet liitoksessa vaikuttavasta voimasta. Yhden hammastuksen jäykkyys lasketaan jäykästi tuettuna ulokkeena. Ulokkeen jäykkyydessä huomioidaan ainoastaan leikkausmuodonmuutos, joten jäykkyys voidaan laskea kaavalla 4. [15, s. 47]

$$K_{hammastus} = \frac{G_{mean}bh}{1.2H} \quad (4)$$

| | |
|-----------------|-------------------|
| $K_{hammastus}$ | Ulokkeen jäykkyys |
| H | Ulokkeen korkeus |
| h | Ulokkeen leveys |
| b | Ulokkeen paksuus |

4.2.4 Kitkaliitos

Puristetuissa liitospinnoissa myös rakenteiden välinen kitka siirtää leikkausvoimia rakenteelta toiselle. Kitkan huomiointi mitoituksessa lisäisi liitoksen jäykkyyttä ja vähentäisi leikkausliittimien tarvetta. Kitkaliitoksen käytön ongelmakohtia ovat liitospinnan puristusrasituksen varmistaminen ja liitoksen hauras toimintatapa. Hauraalla toimintatavalla tarkoitetaan sitä, että kitkavoiman ylittyessä liitos pettää välittömästi. [12] Puurakenteen ja tärinäeristimien välisen kitkaliitoksen toimintaa on tutkittu vähän, vaikka tärinäeristimien käyttö puurakenteisissa asuinrakennuksissa on ääniteknisistä syistä yleistä. Sylodyn ja Sylomer tärinäeristimien maahantuojaalta saadun tiedon perusteella eristimiä valmistava Getzner on mitannut CLT-levyn ja eristimen välille kitkakertoimen 0,5 [24]. Kattavammin puun ja tärinäeristimien välisestä kitkaliitosta on käsitelty Jussi Junttilan diplomityössä Kitkaliitos puun ja tärinäeristimen välillä [12].

4.3 Leikkaus- ja vetorasitettu liitos

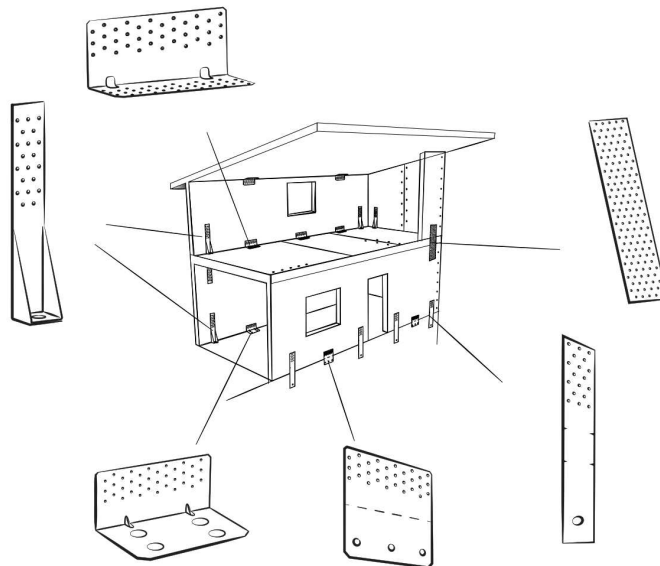
Levyjen välisissä saumoissa voi leikkausvoimien lisäksi vaikuttaa vetoa ja puristusta (kts. kuva 13). Puristusrasitus ajatellaan siirtyvän levyltä toiselle puristuspinnan kautta, mutta erilleen pyrkivät levyjen päät tulisi liittää vetoa välittävällä liitoksella.

Tilaelementeissä levyjen päät on tuettu kantaviin rakenteisiin, joiden kautta levyjen väliset vetovoimat siirtyvät levyltä toiselle. Kahden tilaelementin välisessä liitoksessa levyjen päät tukeutuvat kantaviin rakenteisiin, kuten liimapuupalkkeihin ja palakit kytketään puikkoliitoksin toisiinsa. Tarvittaessa liitosta voidaan vahvistaa yläpintaan lisätyillä ruuvattavilla teräслиitososilla. Teräslevyliitoksessa tulee liittimien kapasiteetin lisäksi muistaa palalohkeamismurto.

4.4 Ankkurointiliitos

Puurakenteiden keveydestä johtuen jäykistäville seinille tuleva pystykuorma jää usein liian pieneksi verrattuna vaakakuormasta johtuvaan nostavaan voimaan. Jäykistävien pystyrakenteiden välinen veto joudutaan sitomaan ankkurointiliitoksella. Ankkurointivoima syntyy kuvan 11 mukaisesta tilanteesta.

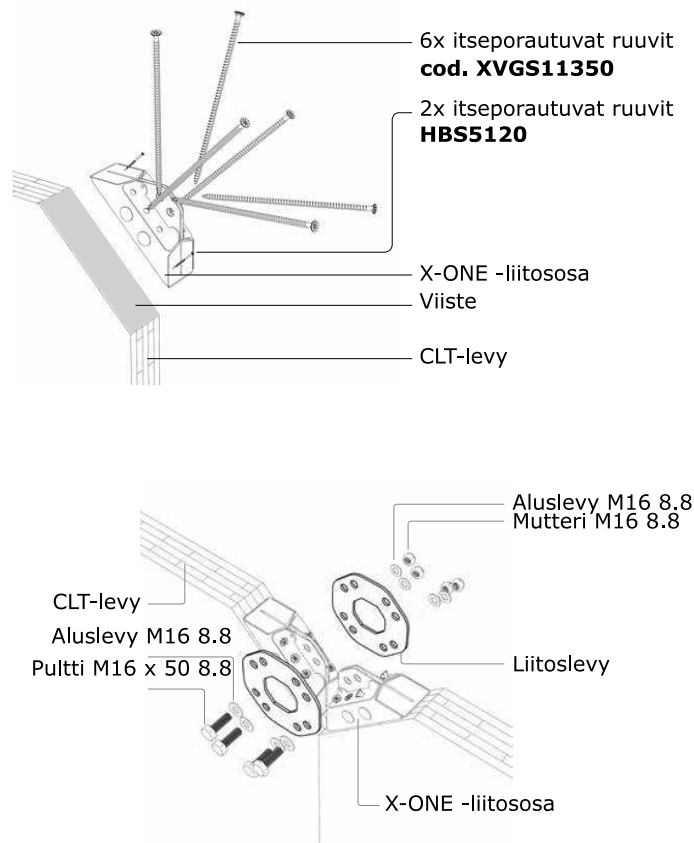
Tilaelementtirakenteilla pystysuuntaisten vetovoimien ankkuroinnissa käytetään yleensä teräksisiä reikälevyjä ja kulmakiinnikkeitä, jotka kiinnitetään CLT-levyihin ankkurinauloilla tai itseporautuvilla ruuveilla. Ankkurointiliitokset tehdään mahdollisimman lähelle levyjen reunoja, jolloin liitoksen ja levyn tukipinnan välinen etäisyys eli ankkurointivoiman momenttivarsi (z_2 kuvassa 11) olisi mahdollisimman pitkä ja ankkuroitava voima mahdollisimman pieni. Kuvassa 19 on esitetty veto- ja leikkausvoimien ankkurointiin tarkoitettuja teräsosia ja niiden sijainnit rakenteissa. Riittävän kestävät liitososat valitaan valmistajan ilmoittamien taulukkoarvojen avulla.



Kuva 19 Ankkuroinnin liitososat [21].

Puikkoliittimin kiinnitettyjen teräsosien käytön ongelmana suurilla ja muuttuvilla kuormituksilla on liitoksen löystyminen. Liitoksen pitäisi kuitenkin toimia suunnitellusti koko rakennuksen käyttöiän ajan, joten liitoksissa kannattaisi käyttää liitososia, joita voi tarvittaessa kiristää. Jälkikäteen kiristettäviä liitoksia pystytään toteuttamaan esimerkiksi kierretankojen avulla kerroskohtaisesti tai kerrostasojen yli jatkuvana. [15, s. 39]

Perinteisten liitososien lisäksi markkinoilla on myös CLT-rakenteille suunniteltuja liitosjärjestelmiä, joista esimerkkinä mainittakoon Rothoblaas nimisen yrityksen X-RAD järjestelmä. X-RAD -järjestelmässä seinien nurkkiin asennetaan kuvassa 20 esitetty X-ONE-liitososa, jotka voidaan liittää toisiinsa niihin sopivien erillisten levyosien avulla. Sopivat liitoslevyt (kts. kuva 21) valitaan tarvittavan liitostyyppin mukaan. X-RAD liitosta voidaan käyttää seinien liittämisen lisäksi myös tilaelementtien välisiin liitoksiin ja elementtien nostoihin. Menetelmän suurimpana etuna ovat liitososien määrän vähyys ja liitosten helppo toteutus työmaalla.



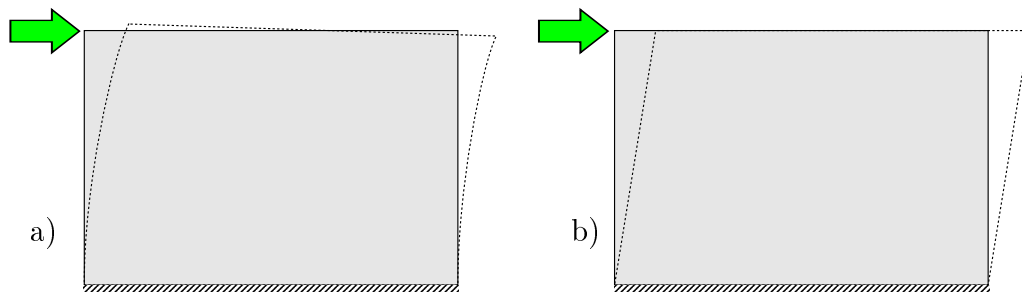
Kuva 20 Rothoblaas X-RAD-järjestelmä [22].

| | | | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| TX 4 XONE 24 XVGS1.1350 | TT 3 XONE 18 XVGS1.1350 | TJ 2 XONE 12 XVGS1.1350 | TG 2 XONE 12 XVGS1.1350 | TI 2 XONE 12 XVGS1.1350 | TO 1 XONE 6 XVGS1.1350 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| MX 8 XONE 48 XVGS1.1350 | MT 6 XONE 36 XVGS1.1350 | MJ 4 XONE 24 XVGS1.1350 | MG 4 XONE 24 XVGS1.1350 | MI 4 XONE 24 XVGS1.1350 | MO 2 XONE 12 XVGS1.1350 |
| | | | | | |
| | | | | | |
| BX 4 XONE 24 XVGS1.1350 | BT 3 XONE 18 XVGS1.1350 | BJ 2 XONE 12 XVGS1.1350 | BG 2 XONE 12 XVGS1.1350 | BI 2 XONE 12 XVGS1.1350 | BO 1 XONE 6 XVGS1.1350 |

Kuva 21 Rothoblaas X-RAD-järjestelmän [22].

5. RAKENTEIDEN JÄYKKYYDET

5.1 CLT-levyn tasonsuuntainen jäykkyys



Kuva 22 CLT-levyn sivusiirtymän muodot a) taivutuksesta b) leikkauksesta

Yksittäisen levyn siirtymät muodostuvat taipumasta ja leikkausmuodomuutoksesta kuvan 22 mukaisesti. Molemmat sivusiirtymän muodot voidaan jäykkyyttä määrittäessä huomioida Timoshenko-palkkiteorian avulla.

$$\frac{1}{k} = \frac{H^3}{3(EI)_{ef}} + \frac{6}{5} \frac{H}{(GA)_{ef}} \quad (5)$$

| | |
|-------------|--|
| k | Levyn kokonaisjäykkyyttä kuvaava jäykkyyysluku |
| $(EI)_{ef}$ | Tehollinen taivutusjäykkyys |
| $(GA)_{ef}$ | Tehollinen leikkausjäykkyys |
| H | Levyn korkeus |

Kaavassa 5 on jäykästi tuetun levyn taivutuksesta (kaavan ensimmäinen termi) ja leikkauksesta (jälkimmäinen termi) johtuvat siirtymätermit. Kokonaissiirtymä saadaan kertomalla termit levyn päähän vaikuttavalla kuormalla F eli siirtymä $u = F/k$.

Tehollinen taivutusjäykkyys voidaan määrittää levyn netto- tai bruttopoikkileikkaussuureiden avulla. Nettopoikkileikkauksessa huomioidaan ne kerrokset, jotka ovat

samansuuntaisia kuin ulkoisista kuormista aiheutuvat jännitykset eli tässä tapauksessa ulkoista kuormaa vastaan kohtisuorat lamellikerrokset. Brutto poikkileikkausta käytettäessä rakenteesta tehdään homogeeninen ja kuormituksen suunta sekä eri suuntaisten kerrosten vaikutus huomioidaan komposiittikertoimilla. [15, s. 61]

Leikkausjäykkyyden määrittämisessä voidaan käyttää liukukerrointa G_{mean} ja pinta-alana kuorman suuntaisen poikkileikkauksen pinta-alaa eli $A = L * t$ kun L on levyn pituus ja t paksuus.

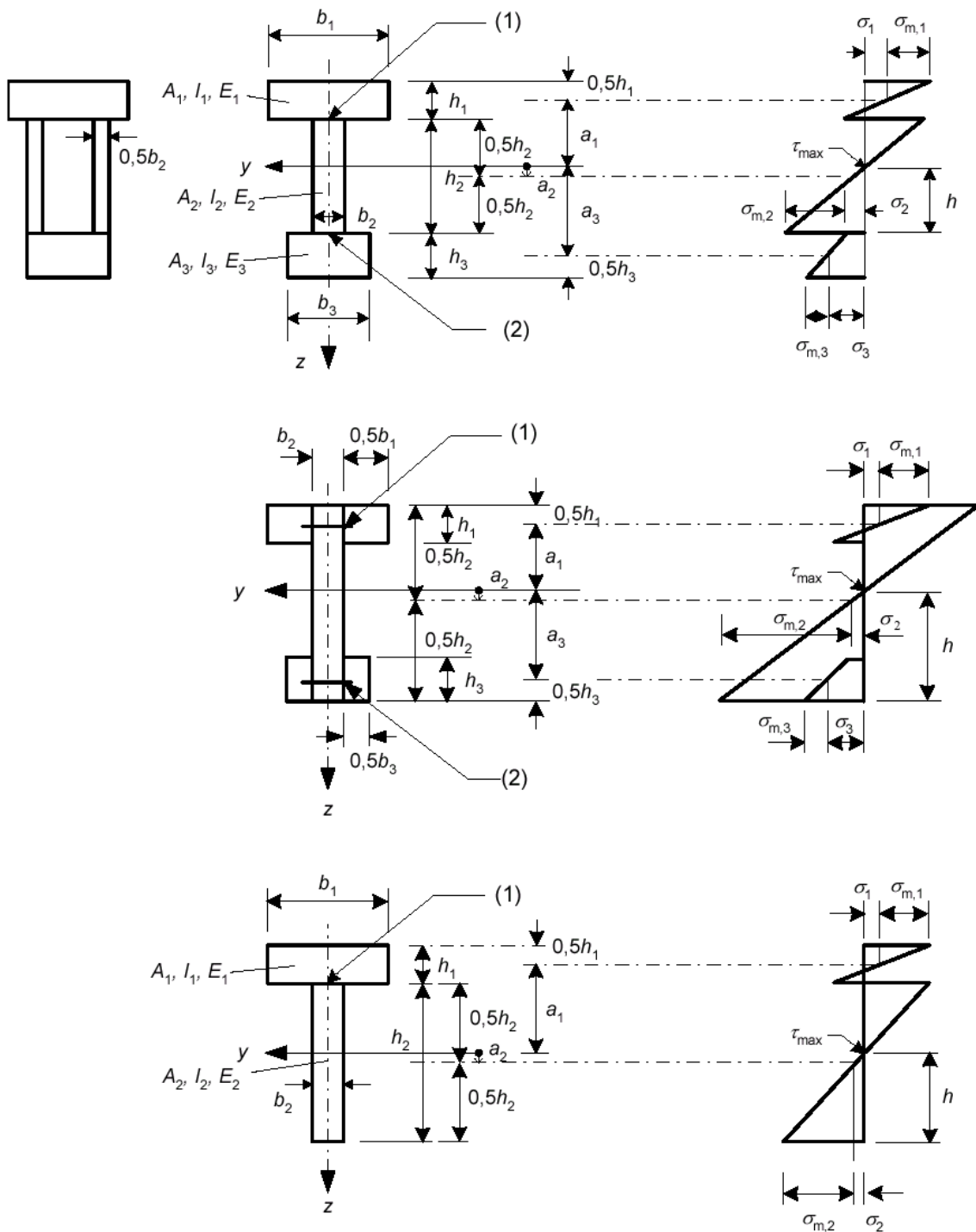
Leikkausjäykkyyden osuus Timoshenko-palkkiteoriassa poikkeaa esimerkiksi yleisesti käytetystä jäykkyyden laskentatavasta, jossa levyn jäykkyys lasketaan kaavan 6 mukaisesti [17]. Timoshenko-palkkiteorian mukaiseen termiin verrattuna, puuinfon ohjeessa levyn jäykkyys on suurempi.

$$C_v = \frac{1}{\frac{H}{L * G_{mean} * t}} \quad (6)$$

| | |
|------------|------------------------|
| C_v | Levyn leikkausjäykkyys |
| G_{mean} | CLT-levyn liukumoduuli |
| L | Levyn pituus |
| t | Levyn paksuus |
| H | Levyn korkeus |

5.2 Kuormaa vastaan kohtisuoran liitoksen vaikutus seinän jäykkyyteen

Useista levyistä kootut levykentät eivät toimi yhtenäisen ehjän levyn tavoin, vaan vaakakuormitetussa levykentässä olevat levyt pääsevät liikkumaan saumakohtien joustavuuden mukaan. Liitosten joustamista on kuvattu esimerkiksi kuvan 9 kohdissa c ja e sekä kuvassa 13. Liitoskohtien joustamisesta johtuen useasta levyistä kootun levykentän jäykkyys on huomattavasti pienempi kuin ehjällä rakenteella. Leikkausliukuman vaikutus voidaan ottaa huomioon soveltamalla EN 1995 standardissa esitettyä mekaanisin liittimin koottujen palkkien menetelmää. [15, s. 61]



Kuva 23 Mekaanisin liittimin koottujen palkkien menetelmässä esitetyt poikkileikkaukset

Mekaanisin liittimin koottujen palkkien menetelmässä on laskentakaavat kolmelle erilaiselle poikkileikkaukselle, jotka on esitetty kuvassa 23. Kuvan poikkileikkauksista ylin sopii tilaelementtikotelolle ja alin yksittäiselle kootulle seinärakenteelle. Menetelmässä rakenteelle lasketaan tehollinen taivutusvastus $(EI)_{ef}$, joka saadaan laskettua kaavalla 7. [5]

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (7)$$

$$A_i = b_i h_i$$

$$I_i = \frac{b_i h_i^3}{12}$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_i = [1 + \pi^2 E_i A_i s_i / (K_i l^2)]^{-1} \text{ arvoilla } i = 1 \text{ ja } i = 3$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 (h_1 + h_2) - \gamma_3 E_3 A_3 (h_2 + h_3)}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i E_i A_i}$$

Koska tarkasteltua rakennetta pidetään jäykästi tuettuna ulokkeena, käytetään rakenteen pituutena l seinän tai tilaelementtikotelon kaksinkertaista korkeutta. Käyttörajatilan tarkasteluissa liitosjäykkyys $K_i = K_{ser}$. [5]

5.3 Kuorman suuntaisen liitoksen vaikutus seinän jäykkyyteen

Kuorman suuntaisen liitoksen vaikutus seinän kokonaisjäykkyyteen voidaan määrittää siirtymien kautta. Kokonaissiirtymässä huomioidaan voiman aiheuttama siirtymä seinärakenteessa ja vaakaliitoksessa eli yhtälömuodossa $u_{kok} = u_s + u_l$. Siirtymä voidaan kirjoittaa muotoon $u = F/k$, jolloin kokonaissiirtymän kaava saadaan muotoon $F/K_{kok} = F/K_s + F/K_l$. Voima F voidaan tiputtaa yhtälöstä pois, jolloin jäljelle jää enää jäykkyyden termit ja kokonaisjäykkyyden kaavaksi saadaan kaava 8.

$$K_{kok} = \frac{1}{\frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_l}} \quad (8)$$

K_s Seinän jäykkyys

K_l Liitoksen jäykkyys

6. FEM-LASKENTA

6.1 FEM

Elementtimenetelmä eli Finite Element Method (FEM) on numeerinen ratkaisumenetelmä, jota käytetään yleisesti eri tekniikan osa-alueilla. Elementtimenetelmässä vaikeasti laskettavissa oleva kokonaisuus jaetaan pienempiin osiin eli elementteihin, jotka ovat toisiinsa yhteydessä solmupisteiden kautta. Rakennelaskelmissa käytetään yleensä siirtymämenetelmää eli tuntemattomat solmupisteiden siirtymät saadaan laskettua rakenteesta luodun jäykkyyismatriisin ja rakenteeseen vaikuttavien voimien mukaisen voimavektorin avulla.

Yksinkertaisimmillaan rakenne voi olla viivarakenne eli ristikko tai kehä, jolloin elementtimenetelmän perusyhtälöt voidaan muodostaa sauva- tai palkkiteorian avulla ja saadut tulokset ovat tarkkoja. Monimutkaisemmilla rakenteilla, kuten pintarakenteilla (tasot, laatat ja kuoret) sekä kolmiulotteisilla solidirakenteilla perusyhtälöt muodostetaan interpoloimalla ja tulokset ovat likiarvoja. [16]

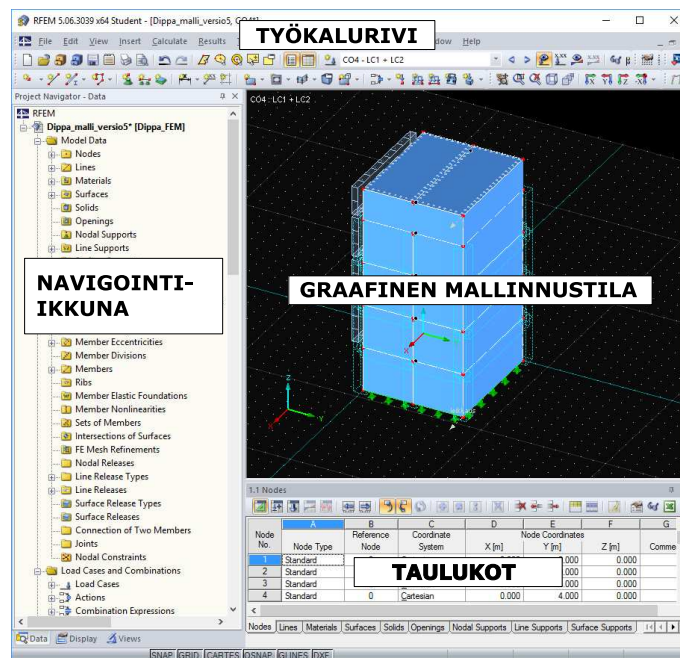
***Taulukko 2** FEM-mallinnuksen työjärjestys. [14]*

- 1 Geometrian mallinnus
- 2 Elementtiverkon luonti (ohjelmissa yleensä automaattinen)
- 3 Materiaaliominaisuuksien ja reunaehtojen määrittäminen
- 4 Kuormien määrittäminen

Laskenta FEM-ohjelmilla noudattaa yleensä taulukossa 2 esitettyä työjärjestystä. Geometrian mallinnuksessa pyritään luomaan rakennuksen kantavasta rungosta mahdollisimman yksinkertainen, mutta todellista rakennetta kuvaava malli. Ohjelmat luovat yleensä automaattisesti sopivan elementtiverkon, mutta suunnittelijan on hyvä tarkastaa verkko ja tarvittaessa lisätä tai pienentää sen tiheyttä alueittain. Verkon tihentäminen lisää laskettavien yhtälöiden määrää, mutta lisää samalla laskennan tarkkuutta. Laskentaa varten täytyy vielä määrittää rakenteille tulevat kuormat ja kuormitusyhdistelmät. Useat FEM-ohjelmat osaavat luoda annetuista kuormista eri normien mukaisia kuormitusyhdistelmiä.

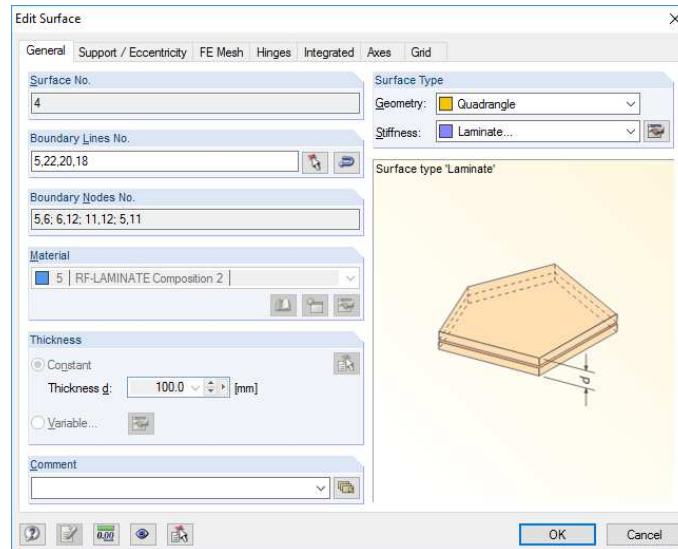
6.2 RFEM-ohjelma

Työssä käytetään Dlubal -ohjelmistoyrityksen kehittämää RFEM -ohjelmaa (versio 5.06 opiskelijalisenssi). RFEM on toinen yrityksen kehittämistä pääohjelmista ja se on tarkoitettu malleille, joissa on viivaelementtien lisäksi 2d- ja 3d-elementtejä. Toinen pääohjelmista eli RSTAB on tarkoitettu kehä- ja ristikkorakenteille. Pääohjelmien lisäksi rakenteiden tarkempaan analysointiin on saatavilla lisämoduuleja, joiden avulla pystytään huomioimaan eri materiaalien ja rakenteiden erityispiirteitä. Lisämoduuleista esimerkkinä RF-Laminate, joka on tarkoitettu kerroksellisten rakenteiden, kuten CLT-levyjen mitoittamiseen. RFEM-ohjelman käyttöliittymä koostuu kuvan 24 mukaisesti graafisesta mallinnustilasta, työkalurivistä, navigointi-ikkunasta ja taulukkotilasta.



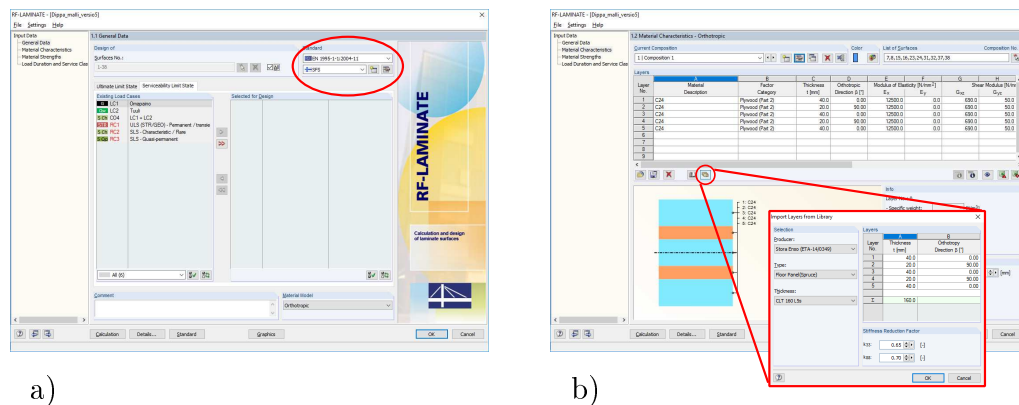
Kuva 24 RFEM-ohjelman käyttöliittymä.

Työskentely RFEM-ohjelmalla noudattaa pääpiirteissään taulukon 2 mukaista työjärjestystä, tosin ohjelma luo elementtiverkon vasta laskentavaiheessa. Rakennuksen tai rakenteen geometria määritetään solmupisteiden, viivojen ja tasojen avulla. Ohjelmassa on myös työkalut solidikappaleiden mallintamiseen. Geometrian luonti on mallinnusohjelmia tunteville helppoa ja suoraviivaista. Rakennemallin luonnin aikana tai luonnin jälkeen voidaan jokaiselle rakennusosalle määrittää materiaalitiedot, tuennat ja vapautukset, joihin pääsee kätevimmin kuvan 25 mukaisen edit-ikkunan kautta.



Kuva 25 RFEM-ohjelman tason edit-ikkuna.

Kuvassa 25 näkyvä materiaali täytyy määrittää erikseen RF-Laminate lisämoduulilla. Moduulin saa avattua työkalurivin tai navigointi-ikkunan kautta. Moduulin aloitusnäkyssä (General Data) valitaan käytettävä standardi ja kuormitukset rakenteen mitoitusta varten (kts. kuva 26 a)). Näkyssä Material Characteristics (kts. kuva 26 b)) voidaan määrittää erilaisia kerroksellisia rakenteita (Composition) ja tasot, joissa näitä rakenteita käytetään. Painikkeen Import Layers from Library kautta voidaan valita valmiita rakenteita, kuten kuvassa näkyvä Stora Enson viisikerroksinen CLT-välipohjalevy.



a)

b)

Kuva 26 RF-laminate lisämoduuli.

Geometrian ja materiaalitietojen määrittämisen jälkeen määritetään rakenteen tuennat ja saumakohtien vapautukset. Tuennat voidaan tehdä piste-, viiva- tai tasotuen- tana ja niille voidaan määrittää erilaisia vapausasteita. Viivaelementtien välisiin

pisteisiin ja tasoelementtien välisiin saumoihin voidaan määrittää vapautuksia eli määrittää onko saumakohta jäykkä, niveellinen tai mihin suuntaan se pystyy siirtämään kuormia. Levyjen väliset vapautukset voidaan määrittää kahdella eri tavalla. Yksinkertaisempi tapa on tehdä määrittäykset edit surface-ikkunan hinge -välilehden kautta ja hiukan monimutkaisempi, mutta samalla monipuolisempi tapa on määrittää saumakohdan toiminta Line Release -toiminnolla. Line Release -toiminnolla pystytään määrittämään levysaumalle epälineaarinen tuenta, eli vapauttamaan sauma esimerkiksi vedon suuntaan.

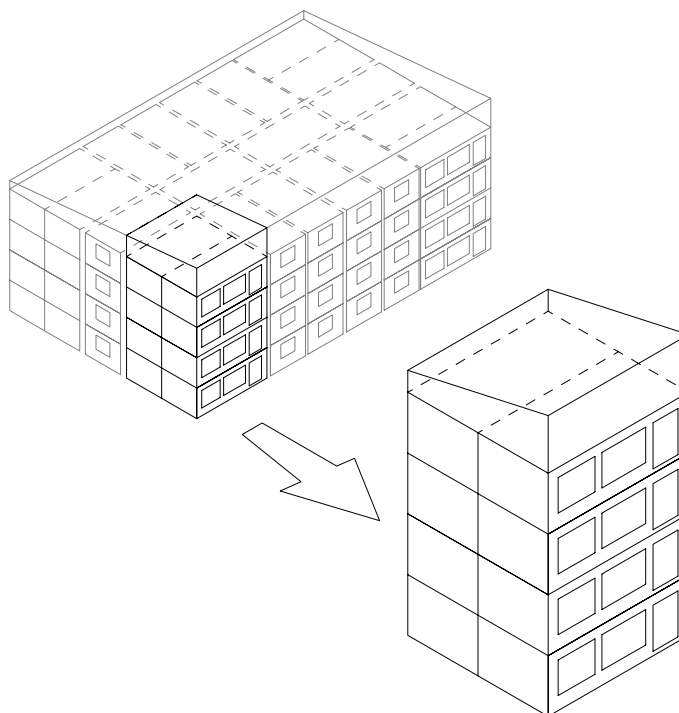
Viimeisenä työvaiheena ennen laskentaa asetetaan rakenteille kuormat. Kuormat määritetään niiden standardien mukaan, mitkä on asetettu mallin luomisen yhteydessä. Suomalaisten määräysten mukaiset kuormat määritetään standardien EN 1991-1-1 – EN 1991-1-7 mukaisesti. Ohjelma luo annetuista kuormista valitun standardin mukaiset kuormitusyhdistelmät osavarmuuskertoimiseen.

Malli voidaan mitoitaa kun rakenteet, tuet, vapautukset ja kuormat on määritetty. Ohjelma luo tässä vaiheessa elementtiverkon laskentaparametreissa asetetulla tarkkuudella, tarkistaa mahdolliset virheet ja määrittää likiarvot annettujen laskentatarkkuuksien mukaan.

7. VERTAILULASKELMAT

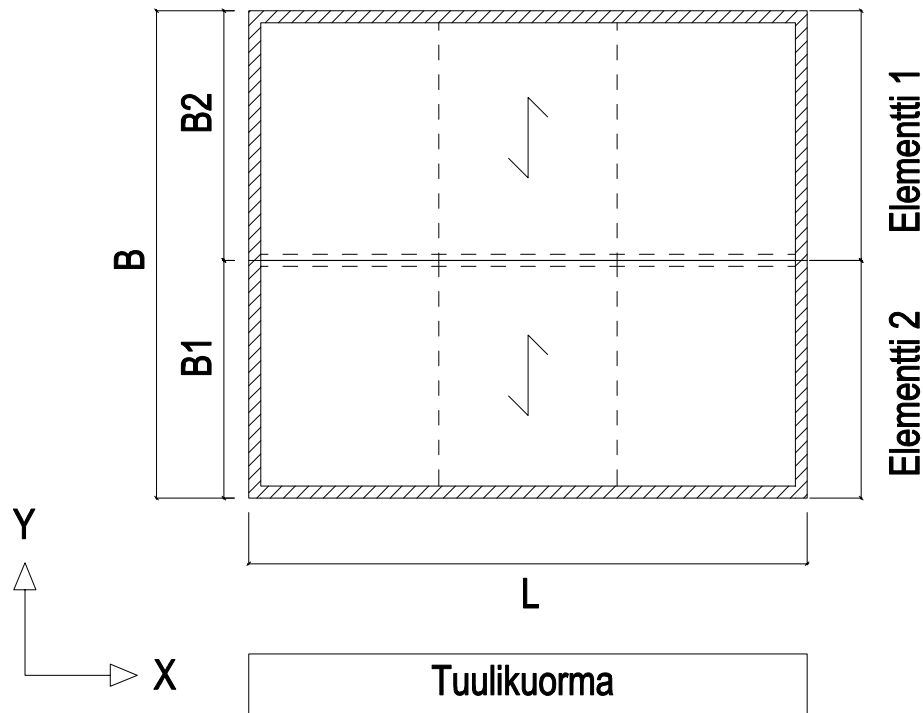
7.1 Tarkasteltava rakenne

Tässä työssä tutkitaan yksittäisen tilaelementtitornin siirtymiä. Tarkasteltavan tilaelementtitornin mitat ja rakenne on esitetty kuvassa 27. Torni on nelikerroksinen ja yhdessä kerroksessa on yksi kahden tilaelementin muodostama huoneisto, jonka ehjät ulkoseinät toimivat jäykistävinä rakenteina. Huoneiston välipohja siirtää pystykuormia tilaelementin lyhyen sivun suuntaan ja kantavat pystyrakenteet sijaitsevat elementtien pitkällä sivuilla. Tornin rakenne on jäykistyksen esimerkkilaskentaan sopiva, koska jäykistyksessä on otettava huomioon tilaelementin rakenteiden ja liitosten lisäksi elementtien väliset liitokset.



Kuva 27 4-kerroksinen tilaelementtitorni

Rakenteisiin vaikuttavat vaakakuormat, välipohjien kantava suunta sekä kantavat ja jäykistävät pystyrakenteet on esitetty kuvassa 28. Jäykistävät rakenteet on rasteroitu vinoviivalla ja kantavien rakenteiden merkintänä on katkoviiva.



Kuva 28 Tilaelementtitornin vaakaleikkaus

Tilaelementtien seinät, katto ja lattia ovat CLT-rakenteisia. CLT-rakenteiden paksuudet ovat seinissä 100 mm, lattiassa 160 mm ja katossa 80 mm. Levyjen väliset liitokset ovat puikkoliittimin tehtäviä puolipontti-, soiro- ja puskuliitoksia. Elementtien välisessä liitoksessa pysty- ja vaaka-ankkurointi on toteutettu naulauslevyillä. Tornissa olevien elementtien mitat ovat $4 * 9 * 3,5$ metriä ($B * L * H$). Tuulikuorma rasittaa rakennetta Y-suunnassa ja on suuruudeltaan $1kN/m^2$.

Rakenteen jäykistysmitoitus tehdään yksinkertaisilla käsinlaskentamenetelmillä ja tarkemmin FEM-laskentana. Lopuksi käsinlaskennalla saatuja tuloksia verrataan FEM-laskennasta saatuihin tuloksiin ja arvioidaan käsinlaskennan tarkkuutta ja sopevuutta monimutkaisen jousikokonaisuuden mitoittamiseen.

7.2 Käsinlaskenta

Tilaelementtitornin jäykistyskapasiteettia arvioidaan kolmessa osassa. Käsinlaskennan ensimmäinen osa käsittelee rakenteiden ja liitosten jäykkyyksiä. Toisessa osassa käydään läpi kuormien jakautuminen ja siirtymien raja-arvon mukaiset minimijäykkyydet rakenteille. Kolmannessa osassa määritetään tarkasteltavan rakenteen ankkurointi ja pystysaumojen liitosvoimat.

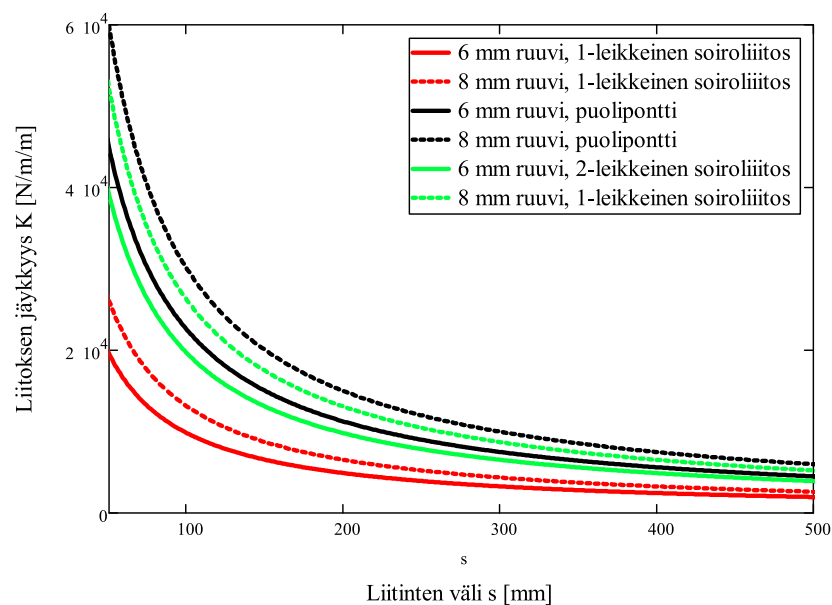
7.2.1 Liitosten jäykkyydet

Puurakenteiden liitosten jäykkyyden määrittämiseksi täytyy tietää puikkoliittimien jäykkyydet. Koska laskennassa on otettu mukaan CLT -levyjen välisiä ja C24 -lujuusluokan puutavaralla tehtäviä soiroliitoksia, määritettiin puikkoliittimien jäykkyydet kyseisissä materiaaleissa. Taulukossa 3 on 6, 8, 10 ja 12 mm itseporautuvien ruuvien liitosjäykkyyksiä CLT-levyssä ja C24-puutavarassa.

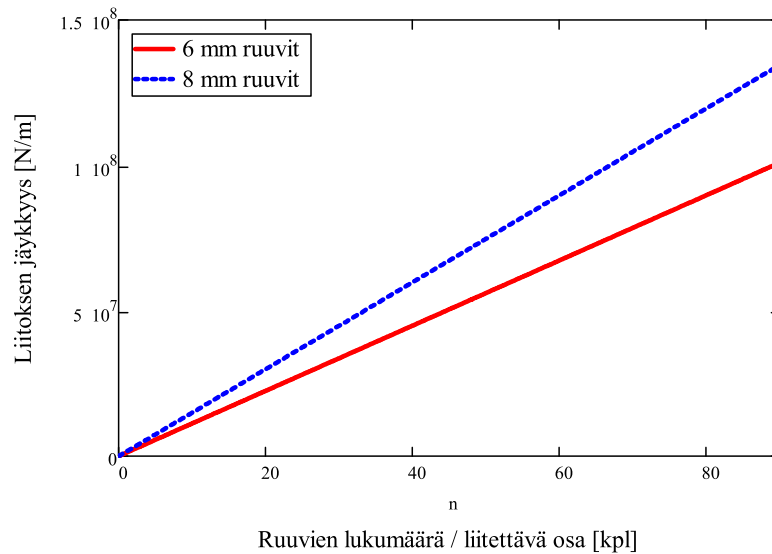
Taulukko 3 Itseporautuvien ruuvien jäykkyydet

| Ruuvien halkaisija | C24 [N/mm] | CLT [N/mm] |
|--------------------|------------|------------|
| 6 mm | 1958 | 2245 |
| 8 mm | 2611 | 2994 |
| 10 mm | 3264 | 3742 |
| 12 mm | 3917 | 4491 |

Tarkasteltavan tornirakenteen liitoksien vaikutusta jäykkyyteen on arvioitu soiro- ja puoliponttiliitosten, ruuvattavan teräsosaliitoksen ja loviliitoksen avulla. Puolipontti-, pusku- tai soiroliitoksien jäykkyydet on määritetty kaavan 2 avulla. Ruuvattavien teräsosaliitosten jäykkyydet saadaan kaavalla 3 ja loviliitoksen jäykkyyden kaavalla 4. Kuvassa 29 näkyy puolipontti- ja puutavarasoiroliitoksen liitosjäykkyyksiä eri liitinväleillä ja kuvassa 30 ruuvattavien teräsosaliitosten jäykkyyksiä eri ruuvimäärillä. Teräsosaliitoksen kuvaajassa ruuvimäärä on yhden puolen ruuvimäärä eli puolet kokonaismäärästä.



Kuva 29 Soiro- ja puoliponttiliitosten jäykkyyksiä 6 ja 8 mm ruuveilla eri liitinväleillä.



Kuva 30 Ruuvattavien latta- ja kulmateräslitosten jäykkyyksiä eri ruuvimäärillä.

Jäykistävien rakenteiden kokonaisjäykkyyksien laskemista varten edellä mainituista liitostavoista valittiin neljä liitostapaa. Taulukossa 4 on liitostyypit ja liitosten jäykkyydet.

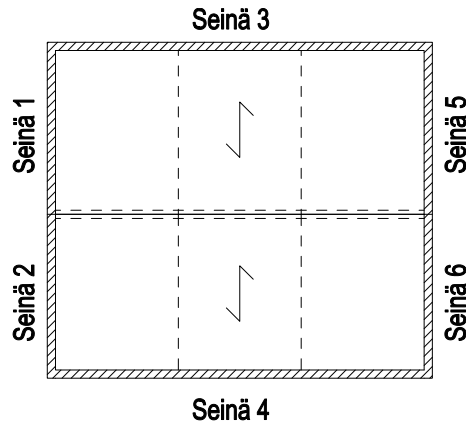
Taulukko 4 Esimerkkilaskelmissa käytettävät liitosjäykkyydet

| Liitostapa | [N/m ²] |
|---|---------------------|
| Soiroliitos, C24-puutavara, 6 mm ruuvit k300 | $3,264 * 10^3$ |
| Puoliponttiliitos, 8 mm ruuvit k50 | $5,988 * 10^4$ |
| Teräslevyliitos, 30+30 ruuvia ja levyjen välinen jako k1000 | $3,36810^7$ |
| Loviliitos, (kts. Liite 1, sivu 4) | $4,025 * 10^8$ |

7.2.2 Seinien ja koteloiden jäykkyydet

Yksittäisen CLT-levyn jäykkyys määritettiin Timoshenko-palkkiteorian mukaisesti, jolloin leikkausjäykkyyden lisäksi kokonaisjäykkyydessä huomioidaan myös taivutusjäykkyys. Laskelmissa kuvassa 31 numeroiduille seinille S1-S6 saatiin seuraavanlaiset jäykkyydet: $k_s = 5,235 * 10^7 N/m$ seinillä S1, S2, S5 ja S6 ja $k_s = 1,408 * 10^8 N/m$ seinillä S3 ja S4.

Kootuissa seinissä ja koteloidissa pystyliitoksen merkitys rakenteen taivutusjäykkyydelle otettiin huomioon Eurokoodin SFS EN1995-1-1 liitteen B mukaisella mekaanisin liittimin koottujen palkkien menetelmällä ja kokonaisjäykkyys laskettiin Timoshenko -palkkiteorian avulla. Pystyliitoksissa käytettiin taulukossa 4 esitettyjä jäykkyyksiä. Koottujen seinien jäykkyydet eivät juurikaan poikenneet ehjän seinän



Kuva 31 Jäykistystornin seinien numerointi.

jäykkyyksistä. Jäykkyyseron pienuus selittyy sillä, että seinät ovat melko leveitä korkeuteen nähden ja tästä syystä seinän siirtymissä taipuman osuus ja näin ollen seinän liitoksessa tapahtuva leikkausliukuma jää pieneksi. Kotelopoikkileikkauksilla liitosjäykkyydellä oli suurempi merkitys, mikä selittyy sillä, että liitoskohdat sijaitsivat kotelopoikkileikkauksen nurkissa. Taulukossa 5 on esitetty jäykistävien rakenteiden kokonaisjäykkyyksiä eri liitosjäykkyyksillä ja ehjänä rakenteena.

Taulukko 5 Jäykistysseinien ja koteloiden jäykkyyksiä

| Liitostapa | Seinien jäykkyys [N/m] | Koteloiden jäykkyys [N/m] |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Soiroliitos | $1.195 \cdot 10^8$ | $1.766 \cdot 10^8$ |
| Puoliponttiliitos | $1.195 \cdot 10^8$ | $1.771 \cdot 10^8$ |
| Teräslevyliitos | $1.196 \cdot 10^8$ | $3.419 \cdot 10^8$ |
| Loviliitos | $1.214 \cdot 10^8$ | $5.113 \cdot 10^8$ |
| Ehjä rakenne | $1.235 \cdot 10^8$ | $5.379 \cdot 10^8$ |

Vaakaliitoksen vaikutus seinien ja koteloiden kokonaisjäykkyyteen on pystyliitosta merkittävämpi. Liitteessä kaksi on laskettu vaakaliitoksen minimijäykkyys jäykistysseinälle ja kotelopoikkileikkaukselle, kun rakennetta rasittaa $1kN/m^2$ suuruinen tuulikuorma. Seinien avulla tehtävässä jäykistyksessä vaakaliitoksen jäykkyyden täytyy olla vähintään $9.15 \cdot 10^5 N/m^2$ ja kotelopoikkileikkauksella $4.4N/m^2$, jos koko kotelon piiri otetaan vaakaliitokseen mukaan. Jos kotelon vaakaliitoksessa huomioidaan vain kuorman suuntaiset seinät saadaan minimijäykkyydeksi $9.35 \cdot 10^5 N/m^2$. 6 mm ja 8 mm puikkoliittimillä tehtävät liitokset eivät ole riittävän jäykkiä, mikä voidaan todeta myös kuvasta 29. Minimijäykkyyden saavuttamiseksi liitokset on toteutettava ruuvattavilla teräslevyillä tai levyjen hammastuksella.

7.2.3 Ankkurointi

Tornin ankkurointivoiman suuruus on laskettu rakenteelle, jossa ankkurointi on toteutettu seinien 3 ja 4 kautta. Ankkurointivoiman lisäksi määritettiin nurkkaliitoksiin ja seinien 1 ja 2 sekä 5 ja 6 välisiin pystyliitoksiin vaikuttavat voimat. Rakenteisiin vaikuttavat voimat on merkitty taulukkoon 6. Taulukossa ensimmäisenä on vaakakuormasta aiheutuvan ankkurointivoiman $F_{ankkuri}$ suuruus. Voimat V1-V3 ovat leikkausvoimat pystysaumoissa, joista V1 on tuulikuorman puoleisen nurkkaliitoksen arvo, V2 vaakakuorman suuntaisten seinien pystysauman leikkausvoima ja V3 tukipisteen puoleisen nurkkasauman leikkausvoima. N on tuulikuorman suuntaisten seinien välisen pystysauman veto- ja puristusrasituksen suuruus ja $N_{tukipiste}$ tukipisteen puristusvoiman suuruus. Negatiivinen arvo ankkurointivoimalla tarkoittaa sitä, että ankkuroinnille ei ole tarvetta. Voimat on laskettu koko tornirakenteelle, joten yhdelle seinälle tulevat kuormat ovat puolet taulukon arvoista.

Taulukko 6 Kotelopoikkileikkauksen ankkurointi

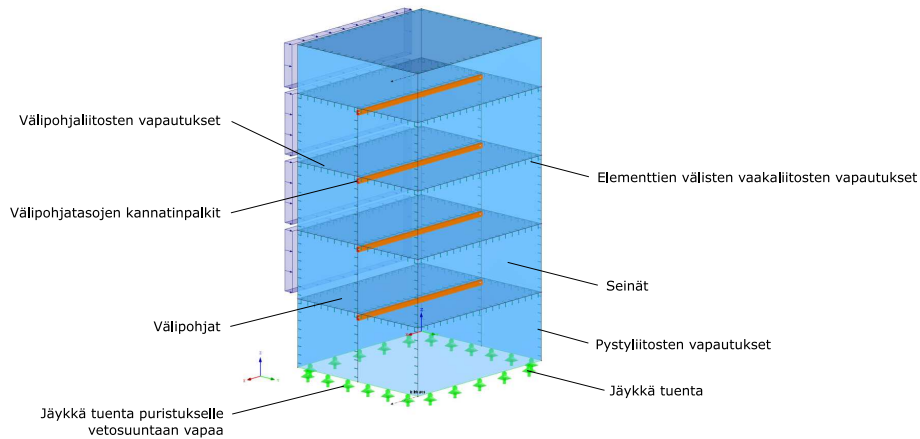
| | $F_{ankkuri}$ | V1 | V2 | V3 | N | $N_{tukipiste}$ |
|------------|---------------|---------|--------|--------|----------|-----------------|
| Voima [kN] | -185, 475 | -21, 45 | 37, 95 | 425, 4 | 494, 625 | 589, 425 |

7.3 RFEM

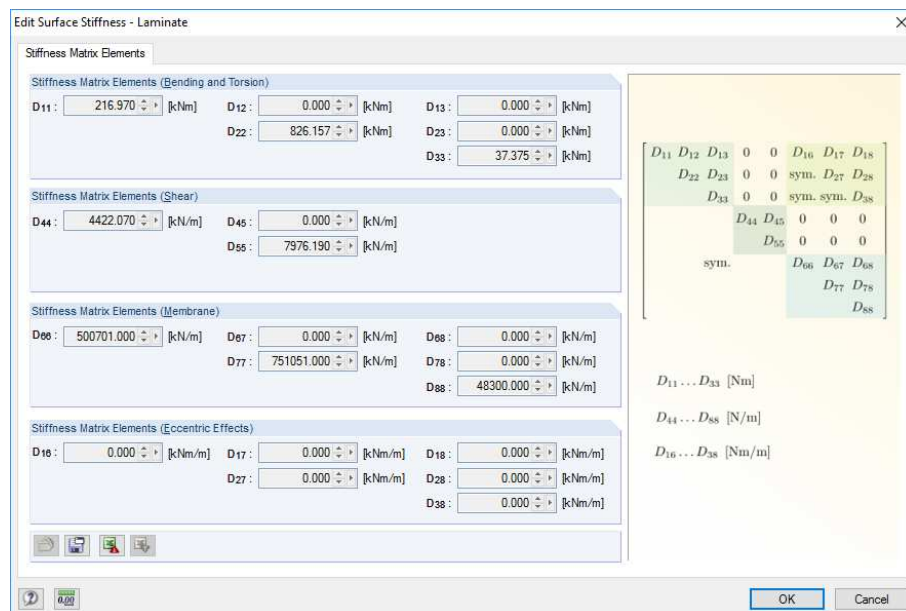
7.3.1 Lähtötiedot

Laskentamallin seinät ja välipohjat on mallinnettu tasoelementteinä, joille on määritetty materiaaliarvot RF-Laminate lisämoduulilla. Elementtien saumakohdassa välipohjat on kannateltu liimapuupalkkien varaan. Välipohjat on tehty yhdellä rakennekerroksella, jonka paksuus on 240 mm (tilaelementin lattia+katto) ja tornin kattorakenteet on mallinnettu samoilla rakenteilla kuin seinät ja välipohjat mallin yksinkertaistamiseksi. Laskentamallin rakenne on esitetty kuvassa 32.

Välipohjan kannatinpalkeiksi on valittu RFEM-ohjelman kirjastosta kaksi vierekkäistä 240x90 mm GL32c liimapuupalkkia. Välipohjarakenne on RF-Laminate lisämoduulin kirjastosta valittu 240 mm paksu Stora Enson lattia CLT-levy. Seinissä on käytetty saman valmistajan 100 mm paksua C5s CLT-levyä. Valitut rakenteet vastaavat käsinlaskennassa käytettyjä rakenteita. Kuvassa 33 on esitetty seinälevyjen jäykkyydsmatriisin arvot.



Kuva 32 Laskentamalli.



Kuva 33 RF-Laminate moduulin määrittämä seinien jäykkyydsmatriisi.

Jäykistyksen kannalta oleellisia asioita oikein määritettyjen materiaaliarvojen lisäksi ovat tuennat ja saumakohtien vapautukset. Tornin tuenta on esitetty kuvassa 32. Laskenta on suoritettu kolmelle eri tapaukselle. Kahdessa ensimmäisessä pystyliitoksen jäykkyytenä on käytetty puoliponttiliitoksen jäykkyyttä eli 60 kN/m^2 ja vaakaliitoksissa käsinlaskennassa määritettyjä minimijäykkyyksiä 440 kN/m^2 ja 935 kN/m^2 . Kolmannessa tutkittavassa rakenteessa on käytetty käsinlaskennassa määritettyä loviliitoksen jäykkyyttä pysty- ja vaakasaumoissa. Välipohjarakenteen liitokset on mallinnettu niin, että välipohja siirtää vaakakuormia jokaiselle ympärillään olevalle pystyrakenteelle ja pystykuormia ainoastaan tilaelementtien pitkille seinille ja kannatinpalkeille.

Mallissa käytetyt kuormat ovat rakenteiden omista painoista tulevat pysyvät kuormat ja 1 kN/m suuruinen tuulikuorma. Laskennassa käytetyt kuormitusyhdistelmät ovat käyttörajan tilan yhdistelmä $omapaino + tuulikuorma$ ja ankkurointivoiman määrityksessä $0,9 * omapaino + 1,5 * tuulikuorma$.

7.3.2 Tulokset

FEM-laskennasta saadut rakenteiden siirtymät kerroksittain on esitetty taulukossa 7. Kahdesta ensin lasketusta mallista vaakaliitoksen pienemmällä jäykkyydellä siirtymäarvot ovat huomattavasti sallittuja siirtymiä suurempia, kun taas suuremmalla vaakaliitoksen jäykkyydellä siirtymät ovat lähellä sallittuja arvoja. Käytettäessä loviliitoksen jäykkyyttä siirtymät ovat todella pieniä.

Taulukko 7 Siirtymät FEM-mallissa

| | Siirtymät [mm] | | | |
|--|----------------|-------|-------|-------|
| | 1 krs | 2 krs | 3 krs | 4 krs |
| Vaakaliitos 440 kN/m^2 | 16,6 | 29,9 | 38,9 | 43,5 |
| Vaakaliitos 935 kN/m^2 | 8,5 | 15,7 | 20,6 | 23,2 |
| Loviliitos $4,025 * 10^5 \text{ kN/m}^2$ | 0,7 | 1,3 | 2 | - |

Kuormien jakautuminen perustuksille on esitetty kuvassa 34. Ylemmässä kuvassa on kuormituksen jakautuminen tornissa, jossa pystyliitoksien jäykkyys on 60 kN/m^2 ja vaakaliitoksien jäykkyys 935 kN/m^2 ja alemmassa kuvassa kuormituksen jakautuminen loviliitoksilla kasatussa tornissa. Kuormitusten jakautuminen on jäykemmillä liitoksilla kasatussa tornissa tasaisempaa eli rakenne toimii enemmän kotelomaisena rakenteena. Kuvissa näkyvien rasiitusten määrittämiseksi on käytetty kuormitustapausta $0,9 * omapaino + 1,5 * tuulikuorma$.

Tuulikuorman puoleinen seinälinja on nurkkia lukuunottamatta puristetulla puolella. Rakenteen nurkassa vaikuttaa kuitenkin nostava kuormitus, joka pyrkii nostamaan tuulenpuoleisen seinälinjan nurkkia kuvan 35 mukaisesti. Nurkan nostava rasiitus tulisi ankkuroida perustuksiin.

7.4 Tulosten vertailu

Käsinlaskennassa käytetyillä menetelmillä saadut tulokset ovat samaa suuruusluokkaa FEM-laskennassa saatujen arvojen kanssa. FEM-laskennan tuloksista voidaan päätellä, että liitteessä 2 määritetty kotelorakenteen vaakaliitoksen minimijäykkyys 440 kN/m^2 ei ole riittävä. Liitos itsessään siirtää vaakakuormia rakenteelta toiselle, mutta tuulikuorman suhteen poikittain olevien seinien jäykkyys ei ole riittävä kuormien siirtämiseksi. Tästä syystä oletus, että koko kotelorakenteen poikkileikkaus osallistuisi vaakaliitokseen ei ole järkevä. Kun vaakaliitokseen otettiin mukaan ainoastaan tuulikuorman suuntaisten seinien vaakaliitokset ja käytettiin niille lasketua vaakaliitoksen minimijäykkyyttä 935 kN/m^2 , saatiin käsinlaskennassa ja FEM-laskennassa lähes samat siirtymän arvot. Tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8 Siirtymien vertailu

| | Siirtymät [mm] | | | |
|----------------------------------|----------------|-------|-------|------|
| | 2 krs | 3 krs | 4 krs | |
| Käsinlaskenta | 8,6 | 15,9 | 21 | 23,8 |
| Vaakaliitos 935 kN/m^2 | 8,5 | 15,7 | 20,6 | 23,2 |

Kootuilla kotelopoikkileikkauksilla pystysauman jäykkyyden merkitys on suurempi kuin kootun seinän tapauksessa. Nurkissa sijaitseviin pystysaumoihin kohdistuu suuremmat rasitukset taivutuksesta, kuin kootun seinän keskilinjalla olevaan pystysaumaan. Tulokset vahvistavat sitä oletusta, että rakenteen toimiminen koteloraakenteena edellyttää todella jäykkiä liitoksia.

Ankkuroinnin määrittämisessä käsinlaskennassa käytetty menetelmä on liian yksinkertainen eikä se ota huomioon saumakohtien joustamista ja vaakakuorman suuntaisen seinälinjan alapinnan tukireaktioita. Menetelmällä saaduilla arvoilla voidaan lähinnä arvioida tuulikuormasta aiheutuvien tuki- ja ankkurointivoimien suuruusluokkaa.

Rakenteiden jäykkyyksien karkeaan arviointiin eri rakennepaksumuksilla ja liitosjäykkyyksillä esitellyt käsinlaskentamenetelmät sopivat hyvin. Tarkempi rakenneanalyysi rakenteiden ja liitosten osalta on kuitenkin järkevää suorittaa FEM-ohjelmien avulla.

8. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia tilaelementtitornin tai useista tilaelementeistä muodostuvien huoneistotornien toimimista kotelomaisena jäykistävänä rakenteena. Työssä on käyty läpi käytössä olevia rakenne- ja jäykistysjärjestelmiä sekä tutkittu uuden tornirakennetta hyödyntävän jäykistystarkastelun mahdollisuutta näiden pohjalta.

Tilaelementtikerrostalossa jäykistys toteutetaan jäykistävien levykenttien avulla eli vaakakuormat johdetaan huoneistokohtaisten välipohjakenttien kautta jäykistävälle pystyrakenteille. Jäykistävät pystyrakenteet ovat perinteisessä jäykistystavassa kuorman suuntaisia mastoseiniä. Tilaelementtikerrostaloissa elementtien välisissä vaakaliitoksissa käytetään yleisesti pysty- ja vaakakuormien ankkurointiin ruuvattavia lattateräsosia ja vierekkäisistä elementeistä ankkurointi pystytään tekemään ainoastaan ensin asennettuun elementtiin. Tilaelementtien välisistä kaksoisrakenteisista seinistä pystytään jäykistyksessä käyttämään ainoastaan toista seinää. Perinteinen jäykistävien seinien käyttö on esitetty kuvassa 7.

Vaakakuorman sitominen loviliitoksena tai teräksisillä vaarnatapeilla ja pystykuormien ankkurointi elementtien vapailta sivuilta mahdollistaisi molempien seinien käytön jäykistyksessä. Ankkuroinnin siirtäminen tilaelementtien vapaille sivuille tarkoittaa mahdollisen nostavan pystykuorman siirtämistä nurkkaliitoksen yli jäykistävältä seinältä tuulikuorman puoleiselle poikittaiselle seinälle. Jotta kuorman siirto onnistuisi, on liitoksen oltava todella jäykkä, mikä tarkoittaa sitä ettei liitosta pystytä toteuttamaan perinteisillä suorilla ruuviliitoksilla vaan liitos on tehtävä loviliitoksena tai ruuvattavien kulmaterästen avulla. Kun käytetään edellä mainittuja liitostapoja, päästään tilanteeseen, jossa jäykistyksessä käytetään tilaelementin jokaista pystyrakennetta eli rakenne toimii ainakin osittain kotelomaisena rakenteena.

Liitosten vaikutus CLT-rungon jäykkyyteen on merkittävä. Pystysaumojen jäykkyys vaikuttaa siihen, kuinka hyvin rakenne pystyy toimimaan kotelomaisena rakenteena ja siirtämään kuormia jäykistävältä pystyrakenteelta toiselle. Vaakaliitoksen jäykkyys vaikuttaa pystyjäykisteen eli mastoseinän tai kotelon vaakasuuntaiseen kokonaisjäykkyyteen kaavan 5.3 mukaisesti. Työssä käytetyllä esimerkkirakenteella vaakaliitoksen minimijäykkyydeksi määritettiin 935 kN/m^2 , kun levyjen välisissä

pystyliitoksissa käytettiin puolipontti- ja puskuliitoksen jäykkyyttä 60 kN/m^2 . Tällä pystyliitoksen jäykkyydellä jäykistys tapahtui miltei täysin kuorman suuntaisten seinien avulla. Kun pysty- ja vaakaliitoksissa käytettiin loviliitoksen jäykkyyttä $4,025 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2$ saatiin rakenne toimimaan kotelomaisena rakenteena ja huomattavasti jäykempänä kuin perinteisillä liitostyypeillä.

CLT-rungon rakenneanalyysi on järkevää tehdä FEM-ohjelman avulla, koska rakenne on joustavien liitosten takia vaikeasti laskettavissa käsinlaskentamenetelmillä. Käsinlaskentamenetelmien avulla voidaan kuitenkin arvioida rakenteiden jäykkyyttä ja kuormien jakautumista rakenteilta toiselle.

Lisätutkimusta olisi hyvä tehdä tilaelementtien liitostavoista ja liitosten vaikutuksesta rakenteen toimintaan. Erityisesti tulisi tutkia pystytäänkö tilaelementtien pysty- ja vaakaliitoksissa käyttämään loviliitosta ja vastaako kokeellisesti määritetty liitosjäykkyys laskennallista jäykkyyttä. Lisäksi tilaelementtitornien käyttöä koko rakennuksen jäykistyksessä tulisi tutkia tarkemmin.

LÄHTEET

- [1] *RIL244-2007, Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta.* Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2007.
- [2] *RIL201-1-2008, Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat.* Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2008.
- [3] *TEMTIS Handbook 1 - Timber Structures.* TEMTIS, 2008.
- [4] *RIL205-1-2009, Puurakenteiden suunnitteluohje.* Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2009.
- [5] *SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC, Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.* Suomen standardisoimisliitto SFS, 222 s., Helsinki 2014.
- [6] Antti Matikainen, Timber Bros Oy [viitattu 28.10.2016], “Suomi-kerrostalo, välipohjadetalji.”
- [7] Ari Kevarinmäki, [viitattu 25.4.2016], “Puukerrostalojen jäykistysjärjestelmät,” [WWW], Saatavissa: <http://puumies.fi/pdf/Ari%20Kevarinmaki.pdf>.
- [8] Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus [viitattu 26.8.2016], “Erikoiskuljetukset,” [WWW], Saatavissa: http://www.ely-keskus.fi/documents/10191/139801/erikoiskuljetukset_esite_2010_erikoiskuljetusluvan_tarve_hakeminen_ja_kaytannon_toimenpiteet.pdf/cbcf0229-5b1f-4e7e-8d9b-9bad0a271b51.
- [9] S. Gagnon and C. Pirvu, *CLT handbook - Cross-Laminated Timber, Canadian Edition.* FPInnovations, Quebec 2011.
- [10] Gerhard Schickhofer and Andreas Ringhofer [viitattu 27.10.2016], “The seismic behaviour of buildings erected in solid timber construction,” [WWW], Graz 2012, Saatavissa: <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/The-seismic-behaviour-of-buildings-erected-in-Solid-Timber-Construction-EN.pdf>.
- [11] S. Jokimäki, *Näkökohtia tilaelementtiarkkitehtuuriin, sovelluksena koulu. Diplomityö.* Tampereen teknillinen yliopisto, Arkkitehtuurin koulutusohjelma. 72 s., Tampere 2010.

- [12] J. Junttila, *Kitkaliitos puun ja värinäeristimen välillä. Diplomityö.* Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 79 s., Tampere 2013.
- [13] E. Kryssi, *Puukerrostalo. Diplomityö.* Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 88 s., Tampere 2013.
- [14] G. R. Liu and S. S. Quek, *The Finite Element Method: A Practical Course.* Butterworth-Heinemann, 365 s., 2003.
- [15] J. Luntta, *Ristiinliimattu massiivipuulevykenttä rungon vaakakuormia siirtävänä rakenteena. Diplomityö.* Aalto-yliopisto, Talonrakennustekniikka. 127 s., Espoo 2013.
- [16] Matti Lähteenmäki, [viitattu 25.10.2016], “Elementtimenetelmän perusteet,” [WWW], Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5G0jJ/FES01.pdf>.
- [17] Oy CrossLam Kuhmo Ltd. [viitattu 1.9.2016], “Crosslam laskentaohje, jykistävän seinän kestävyys,” [WWW], Saatavissa: http://www.crosslam.fi/media/pdf/esimerkki_2_ja-cc-88ykista-cc-88va-cc-88n-seina-cc-88n-kesta-cc-88vyys.pdf.
- [18] Puuinfo Oy [viitattu 31.8.2016], “Roadshow 2014, osa 6 - jäykistys,” [WWW], Saatavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/tiedotteet/puukerrostalorakentamisen-tekninen-roadshow-2014/6_stabiliteetti_jaykistavat_rakenteet.pdf.
- [19] Puuinfo Oy [viitattu 31.8.2016], “Runkojärjestelmän vaikutukset puukerrostalon arkkitehtisuunnitteluun,” [WWW], Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkoj%C3%A4rjestelm%C3%A4n-vaikutukset-puukerrostalon-arkkitehtisuunnitteluun>.
- [20] Puuinfo Oy [viitattu 31.8.2016], “Runkopes – puuelementtirakentamisen uusi avoin teollisuusstandardi,” [WWW], Saatavissa: <http://puuinfo.fi/sites/default/files/RunkoPES.pdf>.
- [21] Rothoblaas [viitattu 29.9.2016], “Wood connectors and timber plates,” [WWW], Saatavissa: http://www.rothoblaas.com/uploads/media/wood-connectors-and-timber-plates-en_01.pdf.
- [22] Rothoblaas [viitattu 29.9.2016], “Xrad - technical guide,” [WWW], Saatavissa: <http://www.rothoblaas.com/uploads/media/x-rad-en.pdf>.

- [23] Sven Thelandersson [viitattu 8.9.2016], “Behaviour and modelling of timber structures with reference to robustness,” [WWW], Saatavissa: <http://www.cost-tu0601.ethz.ch/Documents/Meetings/Ljubljana/FACTSHEETS/thelandersson.pdf>.
- [24] Tuomas Laitinen, “Sähköpostikeskustelu 8.6.2016, runkoeristeet puukerrostoissa,” 2016.
- [25] J. Vessby, *Analysis of shear walls for multi-storey timber buildings. Doctoral dissertation*. Linnaeus University press, Tyréns, 2011.

Rakenteiden jäykkydet

CLT:n materiaaliominaisuudet

$$E_{\text{mean}} := 11500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{kim momoduuli}$$

$$G_{\text{mean}} := 690 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Liukumoduuli}$$

$$G_{R,\text{mean}} := 65 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \text{Tasoleikkauksen kim momoduuli}$$

Liitosjäykkydet

Yksittäisen puikkoliittimen jäykkyys

| Liitintyyppi | K_{ser} |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Tappivaarnat | $K_{ser} = \rho_m^{1.5} d / 23$ |
| Pultit | |
| Ruuvit | |
| Naulat, kun puuhun esiporataan reikä | |
| Naulat ilman esiporausta | $K_{ser} = \rho_m^{1.5} d^{0.8} / 30$ |

$$\rho_{m,\text{CLT}} := 420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{CLT-levyn tiheys}$$

$$\rho_{m,\text{C24}} := 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{C24 puutavaran tiheys}$$

Ruuvien liitossiirtymäkertoimia CLT-levyjen liitoksissa

$$d_{\text{ruuvi}} := \begin{pmatrix} 6 \\ 8 \\ 10 \\ 12 \end{pmatrix} \text{mm} \quad \text{Liitoksessa käytettäviä ruuvien halkaisijoita}$$

$$\rho_{m,1} := \rho_{m,\text{CLT}} = 420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{m,2} := \rho_{m,\text{C24}} = 350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{m,\text{soiro}} := \sqrt{\rho_{m,\text{CLT}} \cdot \rho_{m,\text{C24}}} = 383 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$K_{ser} := \frac{\left(\rho_{m,\text{CLT}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)^{1.5} \cdot d_{\text{ruuvi}} \left(\frac{1}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right) = \begin{pmatrix} 2245 \\ 2994 \\ 3742 \\ 4491 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Liitossiirtymäkertoimet 6, 8, 10 ja 12 mm ruuveille CLT-levyjen suorissa liitoksissa (esim. puolipontti- ja puskuiliitos)

$$K_{ser,2} := \frac{\left(\rho_{m,\text{soiro}} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right)^{1.5} \cdot d_{\text{ruuvi}} \left(\frac{1}{\text{mm}} \right)}{23} \cdot \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}} \right) = \begin{pmatrix} 1958 \\ 2611 \\ 3264 \\ 3917 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Liitossiirtymäkertoimet 6, 8, 10 ja 12 mm ruuveille C24-puutavarasoirolla tehtävissä liitoksissa

Puolipontti ja soiroliitosten jäykkyksiä

Ruuviliitoksen kokonaisjäykkyys lasketaan kaavalla

$$K_{tot} = K_{ser} * \frac{n}{l} * \frac{L}{s}$$

- n Leikkaustasojen määrä
- l Liitostyyppin mukainen kerroin, puoliponttiliitos 1, soiroliitos 2
- L Liitospinnan pituus
- s Liitinväli

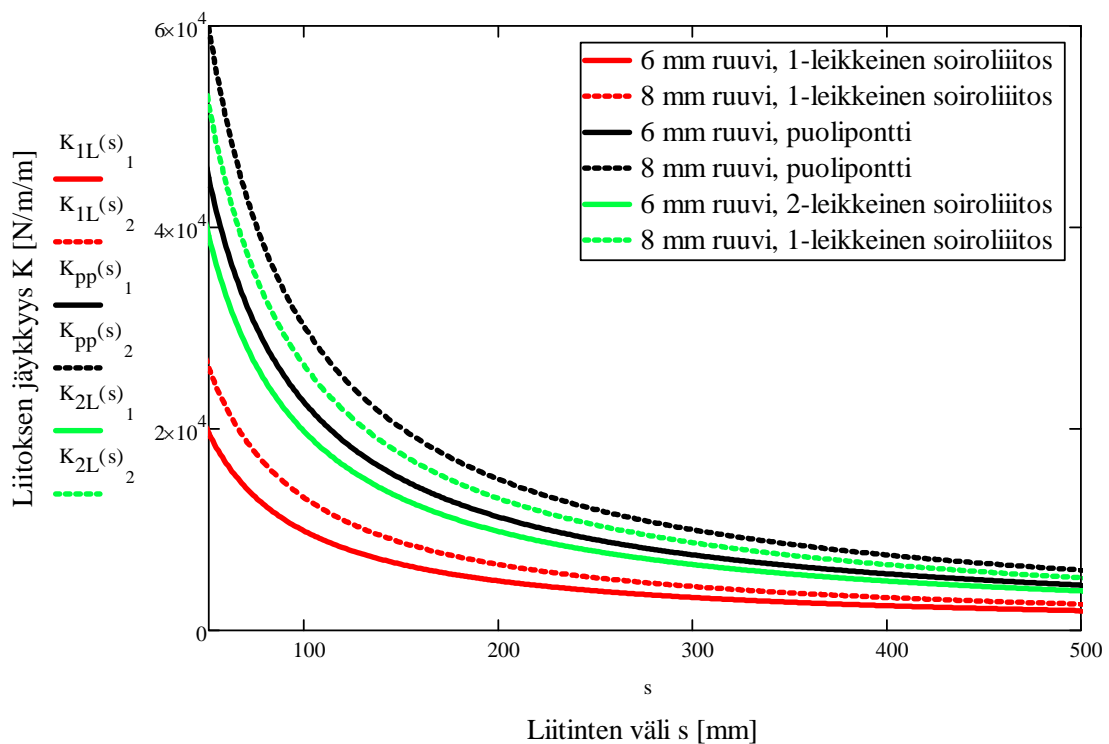
$K_{pp(s)} := \frac{K_{ser}}{s}$ puoliponttiliitoksen jäykkyys 1-metrin matkalle

$K_{1L(s)} := \frac{K_{ser.2}}{2 \cdot s}$ 1-leikkeisen soiroliitoksen jäykkyys metrin matkalle (soiro C24)

$K_{2L(s)} := \frac{K_{ser.2}}{s}$ 2-leikkeisen soiroliitoksen jäykkyys metrin matkalle (soiro C24)

Puikkoliittimin tehtyjen liitosten jäykkyksiä metrin mittaisella liitoksella.

$s_w := 0..1500$

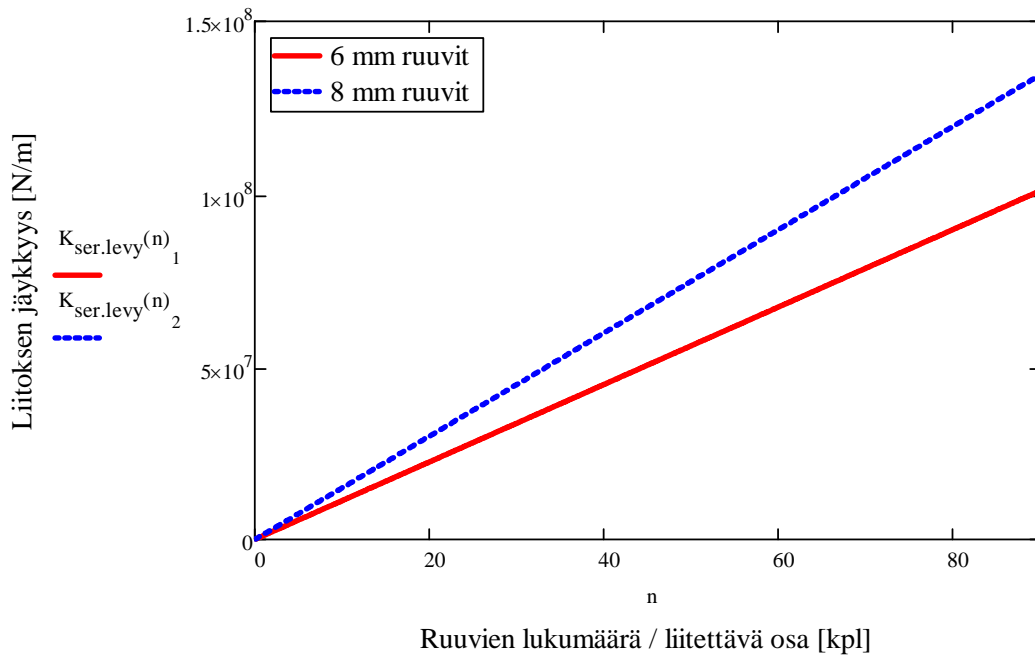
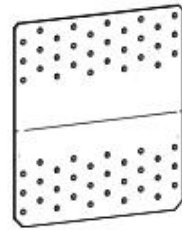


Ruuvattavat latta- ja kulmateräslitokset

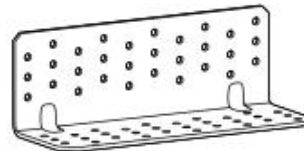
Ruuvauslevyn jäykkyys riippuu käytettävien ruuvien jäykkyydestä ja ruuvien määrästä.

$$K_{ser.levy}^{(n)} := \frac{1}{\frac{1}{n \cdot K_{ser}} + \frac{1}{n \cdot K_{ser}}}$$

Levyliitoksen jäykkyys, kun kummallakin puolella liitosta on sama määrä ruuveja



esim. RothblaasTTF200-kiinnikkeen liitosjäykkyys



$n_1 := 30$

Ruuvien määrä ensimmäisellä sivulla

$K_{ser.TTF.1} := n_1 \cdot K_{ser_1} = 6.736 \times 10^7 \cdot \frac{N}{m}$

Ruuviryhmän jäykkyys 6mm ruuveilla

$n_2 := 30$

Ruuvien määrä toisella sivulla

$K_{ser.TTF.2} := n_2 \cdot K_{ser_1} = 6.736 \times 10^7 \cdot \frac{N}{m}$

Ruuviryhmän jäykkyys 6mm ruuveilla

$$K_{ser.TTF} := \frac{1}{\frac{1}{K_{ser.TTF.1}} + \frac{1}{K_{ser.TTF.2}}} = 3.368 \times 10^7 \cdot \frac{N}{m}$$

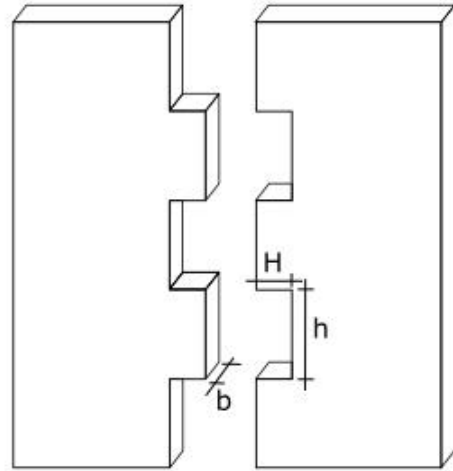
Levyn reunan hammastuksella saavutettava liitosjäykkyys

Käytetään laskennassa mittoja

$$b := 100\text{mm} \quad \underset{\text{ww}}{H} := b = 100\text{mm} \quad h := \frac{3500\text{mm}}{5} = 700\text{mm}$$

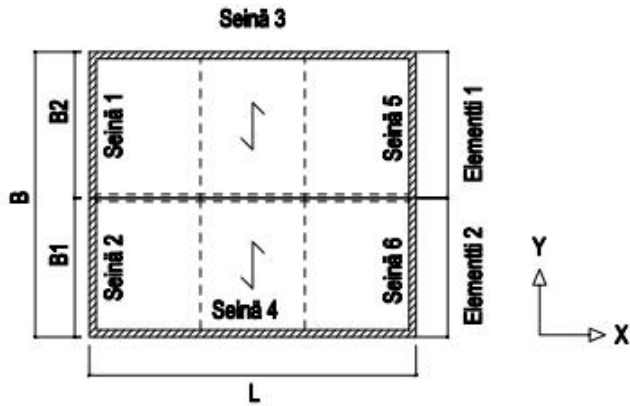
$$K_{\text{ser.ham}} := \frac{G_{\text{mean}} \cdot b \cdot h}{1.2 \cdot H} = 4.025 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Lisäksi täytyy tarkistaa hammastuksen leikkauskapasiteetti



Seinien jäykkydet

Lasketaan kahden tilaelementin muodostaman huoneiston jäykistävien seinien jäykkydet



Seinien jäykkyys määritetään alareunastaan jäykästi kiinnitettynä ulokeseinä Timoshenko-palkkiteorian mukaan.

$$k_{s_i} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot EI_{ef_i}} + \frac{6H_s}{5G_{mean} \cdot A_i}}$$

Jäykistysseinien mitat

Seinän korkeus

$$H_s := 3500 \text{ mm}$$

Seinien paksuudet

Teholliset paksuudet

Seinien pituudet

$$\underline{b} := \begin{pmatrix} 100 \\ 100 \\ 100 \\ 100 \\ 100 \\ 100 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

$$\underline{b_{ef}} := \begin{pmatrix} 60 \\ 60 \\ 60 \\ 60 \\ 60 \\ 60 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

$$\underline{h} := \begin{pmatrix} 4000 \\ 4000 \\ 9000 \\ 9000 \\ 4000 \\ 4000 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

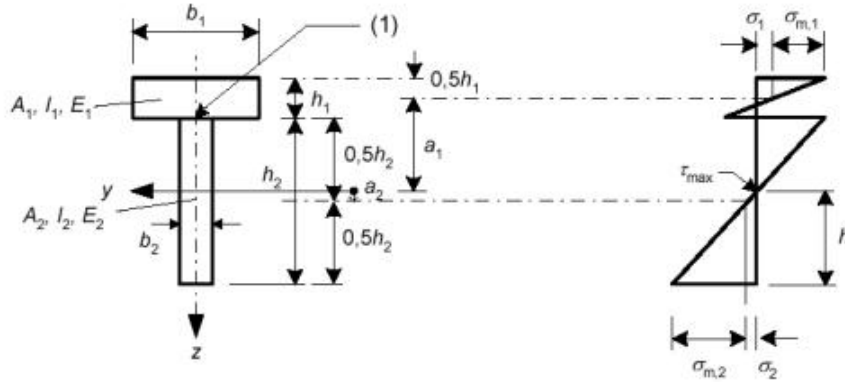
Seinien poikkileikkausarvot

$$\begin{aligned}
 n &:= 1..6 \\
 I_{ef_n} &:= \frac{b_{ef_n} \cdot (h_n)^3}{12} \quad I_{ef} = \begin{pmatrix} 3.2 \times 10^{11} \\ 3.2 \times 10^{11} \\ 3.645 \times 10^{12} \\ 3.645 \times 10^{12} \\ 3.2 \times 10^{11} \\ 3.2 \times 10^{11} \end{pmatrix} \cdot \text{mm}^4 \quad A_{ef_n} := b_{ef_n} \cdot h_n \quad A_n := b_n \cdot h_n = \dots \quad A = \begin{pmatrix} 0.4 \\ 0.4 \\ 0.9 \\ 0.9 \\ 0.4 \\ 0.4 \end{pmatrix} \text{m}^2
 \end{aligned}$$

Seinien jäykkyydet

$$k_{s_n} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot E_{\text{mean}} \cdot I_{ef_n}} + \frac{6H_s}{5G_{\text{mean}} \cdot A_n}} \quad k_s = \begin{pmatrix} 5.235 \times 10^7 \\ 5.235 \times 10^7 \\ 1.408 \times 10^8 \\ 1.408 \times 10^8 \\ 5.235 \times 10^7 \\ 5.235 \times 10^7 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Seinät 1 ja 2 sekä 5 ja 6 muodostavat mekaanisin liittimin yhdistetyn jäykistysseinän. Seinän taivutusjäykkyys $(EI)_{ef}$ määritetään SFS EN 1995-1-1 liitteen B mukaisella mekaanisin liittimin liitettyjen palkkien menetelmällä



$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

$i := 1..2$

$E_i := E_{mean}$

$l_y := 2H_s$ lasketaan ulokepalkkina, joten arvo l on kaksi kertaa ulokkeen mitta.

$$\gamma_i = \left[1 + \pi^2 E_i A_i s_i / (K_i l^2) \right]^{-1} \text{ arvoilla } i = 1 \text{ ja } i = 3$$

Kaavassa esiintyvä s_i/K_i voidaan korvata termillä $1/K$, jossa K on arvo K_i/s_i . Käytetään jäykkyyden K arvoina sopivia puoliponttiliitoksen, ruuvauslevyn ja loviliitoksen arvoja.

$$K_{liitos} := \begin{pmatrix} K_{1L(300)} \\ K_{pp(50)} \\ K_{ser.levy(30)} \\ K_{ser.ham} \end{pmatrix} \cdot \left(\frac{1}{m} \right) = \begin{pmatrix} 3.264 \times 10^3 \\ 5.988 \times 10^4 \\ 3.368 \times 10^7 \\ 4.025 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{N}{m^2}$$

1. C24 soiro 6 mm ruuveilla k300
2. Puoliponttiliitos 8 mm ruuvit k50
3. Teräslevyliitos jossa on 30 ruuvia puolellaan k1000
4. Loviliitos

$\gamma_2 := 1$

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_1 \cdot A_{ef1}}{K_{liitos}(1)_1^2}} = \begin{pmatrix} 5.871 \times 10^{-6} \\ 1.077 \times 10^{-4} \\ 0.057 \\ 0.42 \end{pmatrix}$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 E_1 A_{ef1} (h_1 + h_2)}{2 \cdot \sum_i (\gamma_i E_i A_{ef_i})} = \begin{pmatrix} 0.023 \\ 0.431 \\ 216.154 \\ 1.183 \times 10^3 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad a_1 := 0.5 h_1 + 0.5 h_2 - a_2 = \begin{pmatrix} 4000 \\ 4000 \\ 3784 \\ 2817 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

$$EI_{ef} := \sum_{i=1}^2 \left[E_i I_{ef_i} + \gamma_i E_i A_{ef_i} (a_i)^2 \right] \quad EI_{ef} = \begin{pmatrix} 1.882 \times 10^{16} \\ 1.882 \times 10^{16} \\ 1.895 \times 10^{16} \\ 2.268 \times 10^{16} \end{pmatrix} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

Kootun seinän jäykkyys

$$k_{koottu} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot EI_{ef}} + \frac{6H_s}{5G_{mean} \cdot (A_1 + A_2)}} = \begin{pmatrix} 1.195 \times 10^8 \\ 1.195 \times 10^8 \\ 1.196 \times 10^8 \\ 1.214 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$I_{ehjä} := \frac{b_{ef1} \cdot (h_1 + h_2)^3}{12}$$

$$k_{ehjä} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot E_{mean} \cdot I_{ehjä}} + \frac{6H_s}{5G_{mean} \cdot (A_1 + A_2)}} = 1.235 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Tutkittavalla rakenteella liitosjäykkyyden vaikutus seinien kokonaisjäykkyyteen on melko pieni. Kapeampien ja korkeampien seinien kohdalla taivutusjäykkyydellä ja näin ollen myös liitoksen jäykkyydellä olisi isompi merkitys.

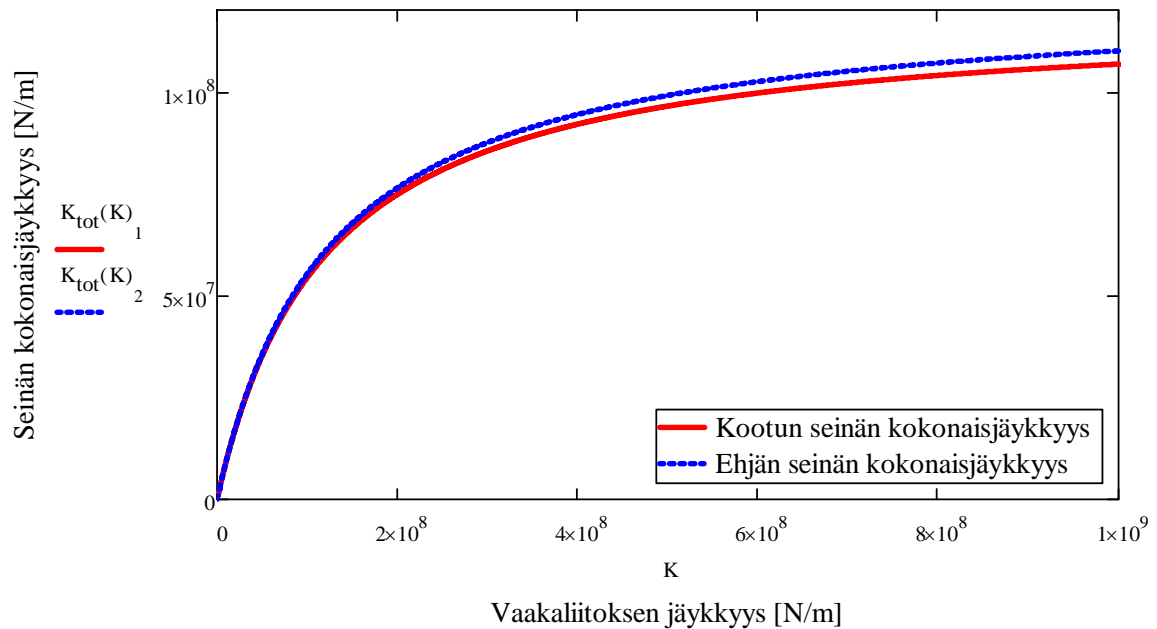
Vaakaliitoksen vaikutus seinien kokonaisjäykkyyteen

$$K_{\text{v}} := 0,100000 \cdot 10^{10}$$

$$K_{\text{seinä}} := \begin{pmatrix} k_{\text{koottu}_1} \\ k_{\text{ehjä}} \end{pmatrix} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{N}}\right) = \begin{pmatrix} 1.195 \times 10^8 \\ 1.235 \times 10^8 \end{pmatrix}$$

Tarkastellaan vaakaliitoksen vaikutusta ehjällä ja kootulla seinällä. Kootun seinän pystyliitos on liitostapa 1 mukainen.

$$K_{\text{tot}}(K) := \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{seinä}}} + \frac{1}{K}}$$



Vaakaliitoksen jäykkyyden vaikutusta voidaan tarkastella yllä olevasta diagrammista. Kokonaisjäykkyys on sama kuin seinän jäykkyys täysin jäykällä liitoksella (K:n arvo ääretön).

Pystyliitoksessa käytetyillä liitostyypeillä seinän kokonaisjäykkyydeksi saadaan. (yhteen liitetyt seinät 1 ja 2)

$$K_{\text{liitos.tot}} := K_{\text{liitos}} \cdot (h_1 + h_2) = \begin{pmatrix} 2.611 \times 10^4 \\ 4.79 \times 10^5 \\ 2.695 \times 10^8 \\ 3.22 \times 10^9 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{\text{v.tot}} := \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{koottu}_1}} + \frac{1}{K_{\text{liitos.tot}}}} = \begin{pmatrix} 2.611 \times 10^4 \\ 4.771 \times 10^5 \\ 8.279 \times 10^7 \\ 1.152 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Mekaanisin liittimin kasatun kotelopoikkileikkauksen jäykkyys

Lasketaan kotelopoikkileikkauksen kuormaa vastaan poikittaiset seinien jäyhyysmomentit.

$$h_1 := 20\text{mm} \quad h_2 := 20\text{mm} \quad t := 20\text{mm}$$

$$d_1 := \frac{h_1}{2} = 10\text{mm}$$

$$a_1 := \frac{h_1}{2} + t + \frac{h_2}{2} = 40\text{mm}$$

$$a_2 := \frac{h_2}{2} = 20\text{mm}$$

$$b := h = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 9 \\ 9 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix} \text{m}$$

$$A_1 := b \cdot h_1 = \begin{pmatrix} 0.08 \\ 0.08 \\ 0.18 \\ 0.18 \\ 0.08 \\ 0.08 \end{pmatrix} \text{m}^2$$

$$A_2 := b \cdot h_2 = \begin{pmatrix} 0.08 \\ 0.08 \\ 0.18 \\ 0.18 \\ 0.08 \\ 0.08 \end{pmatrix} \text{m}^2$$

$$n := 1..4$$

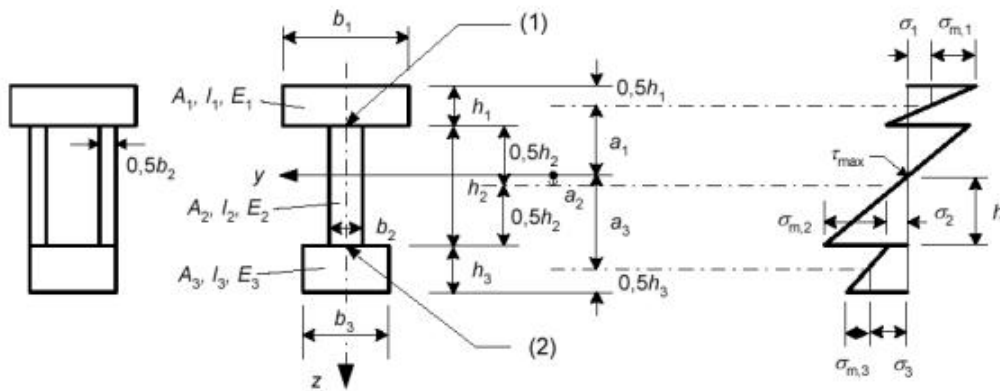
$$\gamma_{\text{poik}_n} := \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^2 E_{\text{mean}} \cdot A_{1_n} \cdot t}{(2 \cdot H_s)^2 \cdot G_{R.\text{mean}} \cdot b_n} \right]}$$

$$\gamma_{\text{poik}} = \begin{pmatrix} 0.986 \\ 0.986 \\ 0.986 \\ 0.986 \end{pmatrix}$$

$$I_{\text{poik.ef}_n} := 2 \cdot \left(\frac{b_n \cdot h_1^3}{12} + \gamma_{\text{poik}_n} \cdot A_{1_n} \cdot a_1^2 \right) + \frac{b_n \cdot h_2^3}{12}$$

$$I_{\text{poik.ef}} = \begin{pmatrix} 2.604 \times 10^8 \\ 2.604 \times 10^8 \\ 5.859 \times 10^8 \\ 5.859 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}^4$$

Lasketaan kotelo-poikkileikkauksen jäykkyydet EN1995 liitteen B mukaisesti



$i := 1..3$

$$h_{\text{kotelo}} := \begin{pmatrix} 100 \\ 8000 \\ 100 \end{pmatrix} \text{mm} \quad b_{\text{kotelo}} := \begin{pmatrix} 9000 \\ 2 \cdot 100 \\ 9000 \end{pmatrix} \text{mm} \quad h_{\text{kotelo.ef}} := \begin{pmatrix} 60 \\ 8000 \\ 60 \end{pmatrix} \text{mm} \quad b_{\text{kotelo.ef}} := \begin{pmatrix} 9000 \\ 2 \cdot 60 \\ 9000 \end{pmatrix} \text{mm}$$

$$A_{\text{kotelo}_i} := h_{\text{kotelo}_i} \cdot b_{\text{kotelo}_i} \quad A_{\text{kotelo}} = \begin{pmatrix} 0.9 \\ 1.6 \\ 0.9 \end{pmatrix} \text{m}^2 \quad A_{\text{kotelo.kok}} := \sum_i A_{\text{kotelo}_i}$$

$$A_{\text{kotelo.ef}_i} := h_{\text{kotelo.ef}_i} \cdot b_{\text{kotelo.ef}_i} \quad A_{\text{kotelo.ef}} = \begin{pmatrix} 0.54 \\ 0.96 \\ 0.54 \end{pmatrix} \text{m}^2$$

$$I_{\text{kotelo}} := \begin{pmatrix} I_{\text{poik.ef}_2} \\ I_{\text{ef}_1} \\ I_{\text{poik.ef}_3} \end{pmatrix} \quad I_{\text{kotelo}} = \begin{pmatrix} 2.604 \times 10^8 \\ 3.2 \times 10^{11} \\ 5.859 \times 10^8 \end{pmatrix} \text{mm}^4$$

Lasketaan kotelopoikkileikkauksien jäykkyydet aiemmin määritetyillä liitostyypeillä

$$K_{\text{liitos}} = \begin{pmatrix} 3.264 \times 10^3 \\ 5.988 \times 10^4 \\ 3.368 \times 10^7 \\ 4.025 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Liitostapa 1:

$$E_1 := E_{\text{mean}} \quad l_1 := 2H_s$$

$$\gamma_1 := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_1 A_{\text{kotelo.ef}_1}}{K_{\text{liitos}_1} \left(\frac{l_1}{h_1}\right)^2}} = \dots \quad \gamma_2 := 1 \quad \gamma = \begin{pmatrix} 2.61 \times 10^{-6} \\ 1 \\ 2.61 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 E_1 A_{\text{kotelo.ef}_1} (h_{\text{kotelo.ef}_1} + h_{\text{kotelo.ef}_2}) - \gamma_3 E_3 A_{\text{kotelo.ef}_3} (h_{\text{kotelo.ef}_2} + h_{\text{kotelo.ef}_3})}{2 \cdot \sum_{i=1}^3 (\gamma_i E_i A_{\text{kotelo.ef}_i})} = 0 \cdot \text{mm}$$

$$a_1 := 0.5 h_{\text{kotelo}_1} + 0.5 h_{\text{kotelo}_2} - a_2 = 4050 \cdot \text{mm}$$

$$a_3 := a_1$$

$$EI_{\text{kotelo.ef}} := \sum_{i=1}^3 \left[E_i I_{\text{kotelo}_i} + \gamma_i E_i A_{\text{kotelo}_i} \left(\frac{a_i}{h_i}\right)^2 \right]$$

$$EI_{\text{kotelo.ef}} = 3.691 \times 10^{15} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

Kotelon jäykkyys

$$k_{\text{kotelo}_1} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot EI_{\text{kotelo.ef}}} + \frac{6H_s}{5G_{\text{mean}} \cdot A_{\text{kotelo.kok}}}}$$

$$k_{\text{kotelo}_1} = 1.766 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Liitostapa 2:

$$\gamma_i := \frac{1}{\pi^2 E_i A_{\text{kotelo.ef}_i} \left(1 + \frac{K_{\text{liitos}_2} \cdot \left(\frac{h_i}{a_i} \right)^2}{\dots} \right)} = \dots \quad \gamma_2 := 1 \quad \gamma = \begin{pmatrix} 4.787 \times 10^{-5} \\ 1 \\ 4.787 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 E_1 A_{\text{kotelo.ef}_1} (h_{\text{kotelo.ef}_1} + h_{\text{kotelo.ef}_2}) - \gamma_3 E_3 A_{\text{kotelo.ef}_3} (h_{\text{kotelo.ef}_2} + h_{\text{kotelo.ef}_3})}{2 \cdot \sum_{i=1}^3 (\gamma_i E_i A_{\text{kotelo.ef}_i})} = 0 \cdot \text{mm}$$

$$a_1 := 0.5 h_{\text{kotelo}_1} + 0.5 h_{\text{kotelo}_2} - a_2 = 4050 \cdot \text{mm}$$

$$a_3 := a_1$$

$$EI_{\text{kotelo.ef}} := \sum_{i=1}^3 \left[E_i I_{\text{kotelo}_i} + \gamma_i E_i A_{\text{kotelo}_i} \left(\frac{a_i}{2} \right)^2 \right]$$

$$EI_{\text{kotelo.ef}} = 3.706 \times 10^{15} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

Kotelon jäykkyys

$$k_{\text{kotelo}_2} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot EI_{\text{kotelo.ef}}} + \frac{6H_s}{5G_{\text{mean}} \cdot A_{\text{kotelo.kok}}}}$$

$$k_{\text{kotelo}_2} = 1.771 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Liitostapa 3:

$$\gamma_i := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_{\text{kotelo.ef}_i}}{K_{\text{liitos}_3} \cdot \left(\frac{h_i}{2}\right)^2}} = \dots \quad \gamma_2 := 1 \quad \gamma = \begin{pmatrix} 0.026 \\ 1 \\ 0.026 \end{pmatrix}$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 E_1 A_{\text{kotelo.ef}_1} (h_{\text{kotelo.ef}_1} + h_{\text{kotelo.ef}_2}) - \gamma_3 E_3 A_{\text{kotelo.ef}_3} (h_{\text{kotelo.ef}_2} + h_{\text{kotelo.ef}_3})}{2 \cdot \sum_{i=1}^3 (\gamma_i E_i A_{\text{kotelo.ef}_i})} = 0 \cdot \text{mm}$$

$$a_1 := 0.5 h_{\text{kotelo}_1} + 0.5 h_{\text{kotelo}_2} - a_2 = 4050 \cdot \text{mm}$$

$$a_3 := a_1$$

$$EI_{\text{kotelo.ef}} := \sum_{i=1}^3 \left[E_i I_{\text{kotelo}_i} + \gamma_i E_i A_{\text{kotelo}_i} \left(\frac{a_i}{2}\right)^2 \right] \quad EI_{\text{kotelo.ef}} = 1.259 \times 10^{16} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

Kotelon jäykkyys

$$k_{\text{kotelo}_3} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot EI_{\text{kotelo.ef}}} + \frac{6H_s}{5G_{\text{mean}} \cdot A_{\text{kotelo.kok}}}} \quad k_{\text{kotelo}_3} = 3.419 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Liitostapa 4:

$$\gamma_i := \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_i A_{\text{kotelo.ef}_i}}{K_{\text{liitos}_4} \cdot \left(\frac{h_i}{2}\right)^2}} = \dots \quad \gamma_2 := 1 \quad \gamma = \begin{pmatrix} 0.243 \\ 1 \\ 0.243 \end{pmatrix}$$

$$a_2 := \frac{\gamma_1 E_1 A_{\text{kotelo.ef}_1} (h_{\text{kotelo.ef}_1} + h_{\text{kotelo.ef}_2}) - \gamma_3 E_3 A_{\text{kotelo.ef}_3} (h_{\text{kotelo.ef}_2} + h_{\text{kotelo.ef}_3})}{2 \cdot \sum_{i=1}^3 (\gamma_i E_i A_{\text{kotelo.ef}_i})} = 0 \cdot \text{mm}$$

$$a_1 := 0.5 h_{\text{kotelo}_1} + 0.5 h_{\text{kotelo}_2} - a_2 = 4050 \cdot \text{mm}$$

$$a_3 := a_1$$

$$EI_{\text{kotelo.ef}} := \sum_{i=1}^3 \left[E_i I_{\text{kotelo}_i} + \gamma_i E_i A_{\text{kotelo}_i} \left(\frac{a_i}{2}\right)^2 \right] \quad EI_{\text{kotelo.ef}} = 8.635 \times 10^{16} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

Kotelon jäykkyys

$$k_{\text{kotelo}_4} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot EI_{\text{kotelo.ef}}} + \frac{6H_s}{5G_{\text{mean}} \cdot A_{\text{kotelo.kok}}}} \quad k_{\text{kotelo}_4} = 5.113 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Yhtenäisen koteloikkileikkauksen jäykkyys

$$I_{ehjä} := \sum_{i=1}^3 \left[I_{koteloi} + A_{kotelof_i} \cdot \left(\frac{a_i}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_{ehjä} = 18.036 \text{ m}^4$$

$$k_{koteloe hjä} := \frac{1}{\frac{(H_s)^3}{3 \cdot EI_{ehjä}} + \frac{6H_s}{5G_{mean} \cdot A_{kotelokok}}}$$

$$EI_{ehjä} := E_{mean} \cdot I_{ehjä} = 2.074 \times 10^{17} \cdot \text{N} \cdot \text{mm}^2$$

$$k_{koteloe hjä} = 5.379 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Vaakaliitoksen vaikutus koteloikkileikkauksen kokonaisjäykkyyteen

Vaakaliitoksen jäykkyys vaikuttaa koteloikkileikkauksen kokonaisjäykkyyteen samaan tapaan kuin seinän kokonaisjäykkyyteen. Lasketaan kokonaisjäykkyydet koteloikkileikkauksille.

Käytetään vaakaliitosten vaikutuksen vertailussa samoja liittostyyppisiä kuin aiemmin

$$K_{liitos} = \begin{pmatrix} 3.264 \times 10^3 \\ 5.988 \times 10^4 \\ 3.368 \times 10^7 \\ 4.025 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

1. C24 soiro 6 mm ruuveilla k300
2. Puoliponttiliitos 8 mm ruuvit k50
3. Teräslevyliitos jossa on 30 ruuvia puolellaan k1000
4. Loviliitos

Vaakaliitoksen kokonaisjäykkyydet 1: koko kotelon piiri otetaan mukaan.

Koteloikkileikkauksen piiri

$$P_{koteloi} := \sum_{i=1}^6 h_i = 34 \text{ m}$$

$$K_{liitos.1} := K_{liitos} \cdot P_{koteloi} = \begin{pmatrix} 1.11 \times 10^5 \\ 2.036 \times 10^6 \\ 1.145 \times 10^9 \\ 1.369 \times 10^{10} \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Vaakaliitoksen kokonaisjäykkyydet 2: ainoastaan kuorman suuntaiset vaakaliitokset otetaan mukaan.

$$K_{liitos.2} := K_{liitos} \cdot 2 \cdot (h_1 + h_2) = \begin{pmatrix} 5.223 \times 10^4 \\ 9.58 \times 10^5 \\ 5.389 \times 10^8 \\ 6.44 \times 10^9 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Lasketaan vaakaliitoksen vaikutus kotelopoikkileikkauksen kokonaisjäykkyyteen koteloille, joissa pystyliitokset on toteutettu puoliponttiliitoksilla, ruuvattavilla teräsosilla ja loviliitoksella.

Kotelopoikkileikkaus, jossa pystyliitoksissa puoliponttiliitos (liitostyyppi 2)

$$k_{\text{kotelo}_2} = 1.771 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{\text{tot.kotelo2}_1} := \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{kotelo}_2}} + \frac{1}{K_{\text{liitos.1}}}} = \begin{pmatrix} 1.109 \times 10^5 \\ 2.013 \times 10^6 \\ 1.534 \times 10^8 \\ 1.748 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

kokonaisjäykkyys vaakaliitoksen kokonaisjäykkyyden 1 mukaisesti

$$K_{\text{tot.kotelo2}_2} := \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{kotelo}_2}} + \frac{1}{K_{\text{liitos.2}}}} = \begin{pmatrix} 5.221 \times 10^4 \\ 9.529 \times 10^5 \\ 1.333 \times 10^8 \\ 1.724 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

kokonaisjäykkyys vaakaliitoksen kokonaisjäykkyyden 2 mukaisesti

Kotelopoikkileikkaus, jossa pystyliitoksissa ruuvattavat teräslitokset (liitostyyppi 3)

$$k_{\text{kotelo}_3} = 3.419 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{\text{tot.kotelo3}_1} := \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{kotelo}_3}} + \frac{1}{K_{\text{liitos.1}}}} = \begin{pmatrix} 1.109 \times 10^5 \\ 2.024 \times 10^6 \\ 2.633 \times 10^8 \\ 3.335 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

kokonaisjäykkyys vaakaliitoksen kokonaisjäykkyyden 1 mukaisesti

$$K_{\text{tot.kotelo3}_2} := \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{kotelo}_3}} + \frac{1}{K_{\text{liitos.2}}}} = \begin{pmatrix} 5.222 \times 10^4 \\ 9.554 \times 10^5 \\ 2.092 \times 10^8 \\ 3.246 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

kokonaisjäykkyys vaakaliitoksen kokonaisjäykkyyden 2 mukaisesti

Koteloikkileikkaus, jossa pystyliitos toteutettu loviliitoksena (liitostyyppi 4)

$$k_{\text{kotelo}_4} = 5.113 \times 10^8 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$K_{\text{tot.kotelo}_4_1} := \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{kotelo}_4}} + \frac{1}{K_{\text{liitos.1}}}} = \begin{pmatrix} 1.11 \times 10^5 \\ 2.028 \times 10^6 \\ 3.535 \times 10^8 \\ 4.929 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Kokonaisjäykkyys vaakaliitoksen kokonaisjäykkyyksien 1 mukaisesti

$$K_{\text{tot.kotelo}_4_2} := \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{kotelo}_4}} + \frac{1}{K_{\text{liitos.2}}}} = \begin{pmatrix} 5.222 \times 10^4 \\ 9.563 \times 10^5 \\ 2.624 \times 10^8 \\ 4.737 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Kokonaisjäykkyys vaakaliitoksen kokonaisjäykkyyksien 2 mukaisesti

Jäykkyyksien vertailu

Vertailua varten rakenteiden jäykkyydet laskettiin neljällä eri liitostyyppillä. Laskelmassa käytettiin pysty- ja vaakaliitoksissa alla esitettyjä liitostyyppejä. Jäykkyydet on laskettu y-suuntaan.

1. C24 soiro 6 mm ruuveilla k300
2. Puoliponttiliitos 8 mm ruuvit k50
3. Teräslevyliitos jossa on 30 ruuvia puolellaan k1000
4. Loviliitos

Y-suuntaisen seinälinjan jäykkyys. Kohdat 1-4 ovat mekaanisesti toisiinsa liitettyjen seinien jäykkyyksiä ja kohdassa 5 on ehjän seinän jäykkyys ilman vaakaliitoksen joustoa.

$$K_{\text{seinät}} := \begin{pmatrix} k_{\text{koottu}_1} \\ k_{\text{koottu}_2} \\ k_{\text{koottu}_3} \\ k_{\text{koottu}_4} \\ k_{\text{ehjä}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.195 \times 10^8 \\ 1.195 \times 10^8 \\ 1.196 \times 10^8 \\ 1.214 \times 10^8 \\ 1.235 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

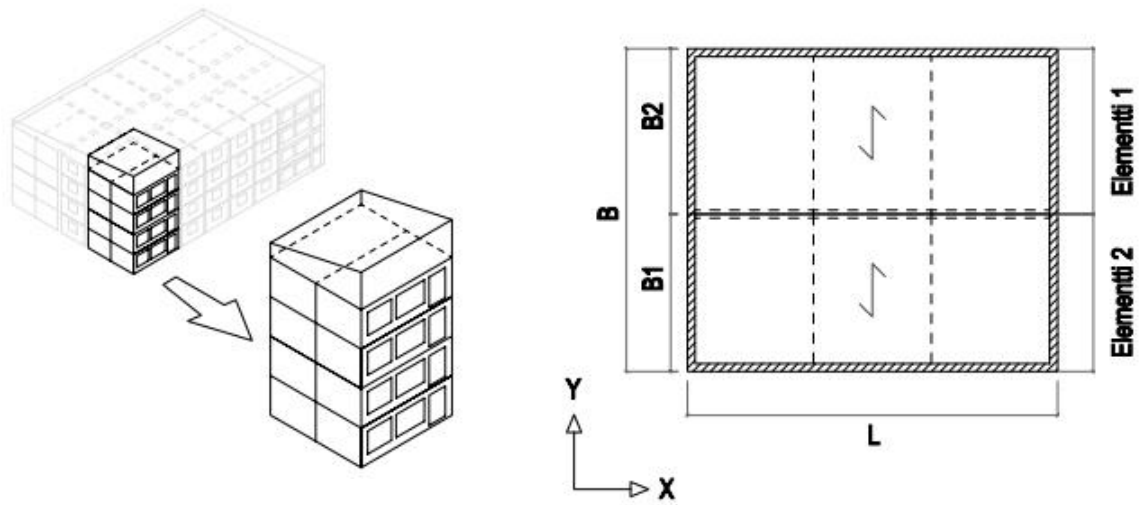
Kotelopoikkileikkauksen jäykkyys y-suuntaan

$$K_{\text{kotelo}} := \begin{pmatrix} k_{\text{kotelo}_1} \\ k_{\text{kotelo}_2} \\ k_{\text{kotelo}_3} \\ k_{\text{kotelo}_4} \\ k_{\text{kotelo.ehjä}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.766 \times 10^8 \\ 1.771 \times 10^8 \\ 3.419 \times 10^8 \\ 5.113 \times 10^8 \\ 5.379 \times 10^8 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Vaakaliitoksen vaikutus jäykistävän rakenteen kokonaisjäykkyyteen on merkittävä. Tästä syystä vaakaliitos kannattaa tehdä mahdollisimman jäykäksi.

Liitteessä 2 lasketaan vaakaliitoksen minimijäykkyys tarkasteltavalle tomirakenteelle maksimisiirtymien kautta. Laskuissa käytetään pystyliitostyyppi 2 (puoliponttiliitos) mukaisia seinän ja kotelon arvoja.

Tornin rakenne



Kerroskorkeudet

$$h_{\text{kerros}} := \begin{pmatrix} 3500 \\ 3500 \\ 3500 \\ 3500 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

$$h_{\text{per}} := 0 \text{ mm}$$

$$h_{\text{katto}} := 2500 \text{ mm}$$

$$h := \sum_{n=1}^4 h_{\text{kerros}_n} + h_{\text{per}} + h_{\text{katto}}$$

Elementti 1

$$b_1 := 4000 \text{ mm}$$

$$l_1 := 9000 \text{ mm}$$

Elementti 2

$$b_2 := 4000 \text{ mm}$$

$$l_2 := l_1 = 9000 \text{ mm}$$

Torni

$$b_{\text{torni}} := b_1 + b_2 = 8 \text{ m}$$

$$l_{\text{torni}} := l_1 = 9000 \text{ mm}$$

$$h_{\text{torni}} := h = 16.5 \text{ m}$$

Vaakakuorma

$$q_{w.k} := 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

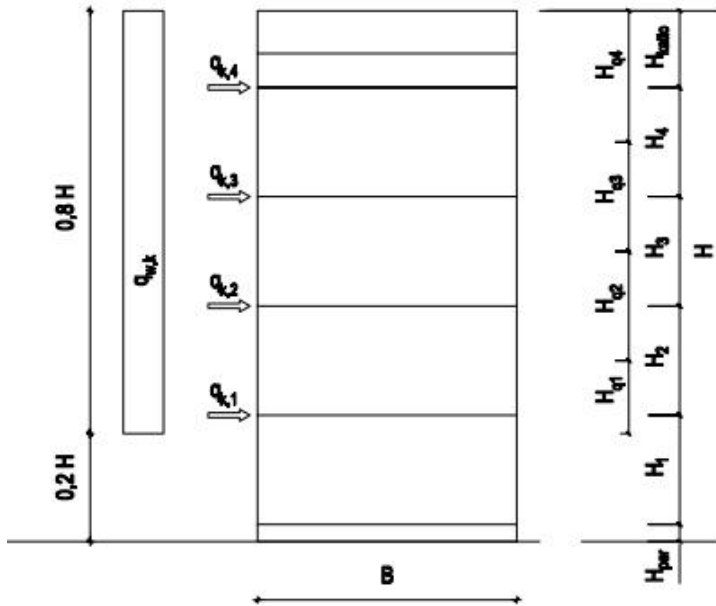
Tuulikuorman ominaisarvo

$$A_{\text{tuuli}} := 0.8 \cdot h_{\text{torni}} \cdot l_{\text{torni}} = 118.8 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{tuuli}} := A_{\text{tuuli}} \cdot q_{w.k} = 118.8 \cdot \text{kN}$$

Tuulikuorman jako kerroskohtaisiksi viivakuormiksi

$$h_{\text{resultantti}} := h_{\text{torni}} \cdot 0.6 = 9.9 \text{ m}$$



Tuulikuorman kuormituskorkeudet ja tuulen aiheuttamat viivakuorma kerroksittain

1. kerroksen katto

$$h_{q.1} := \frac{h_{\text{kerros}_1}}{2} + \min\left(\frac{h_{\text{kerros}_1}}{2}, h_{\text{kerros}_1} + h_{\text{per}} - 0.2h\right) = 1.95 \text{ m}$$

$$q_{w.k.ker_1} := q_{w.k} \cdot h_{q.1} = 1.95 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

2. kerroksen katto

$$h_{q.2} := \frac{h_{\text{kerros}_2} + h_{\text{kerros}_3}}{2} = 3.5 \text{ m}$$

$$q_{w.k.ker_2} := q_{w.k} \cdot h_{q.2} = 3.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

3. kerroksen katto

$$h_{q.3} := \frac{h_{\text{kerros}_3} + h_{\text{kerros}_4}}{2} = 3.5 \text{ m}$$

$$q_{w.k.ker_3} := q_{w.k} \cdot h_{q.3} = 3.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

4. kerroksen katto

$$h_{q.4} := \frac{h_{\text{kerros}_4}}{2} + h_{\text{katto}} = 4.25 \text{ m}$$

$$q_{w.k.ker_4} := q_{w.k} \cdot h_{q.4} = 4.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tuulen aiheuttamat kokonaisviivakuormat kerroksittain.

$$q_{w.k_1} := \sum_{n=1}^4 q_{w.k.ker_n} = 13.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{w.k_2} := \sum_{n=2}^4 q_{w.k.ker_n} = 11.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{w.k_3} := \sum_{n=3}^4 q_{w.k.ker_n} = 7.75 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{w.k_4} := q_{w.k.ker_4} = 4.25 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{w.k} = \begin{pmatrix} 13.2 \\ 11.25 \\ 7.75 \\ 4.25 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kerroskohtaiset resultantit

$$R_w := l_{\text{torni}} \cdot q_{w.k} = \begin{pmatrix} 118.8 \\ 101.25 \\ 69.75 \\ 38.25 \end{pmatrix} \cdot \text{kN}$$

Siirtymät

Siirtymän raja-arvo u_{sallittu}

$n := 1..4$

$$u_{\text{sallittu.2009}_n} := \frac{\sum_{i=1}^n h_{\text{kerros}_i}}{300} \quad u_{\text{sallittu.2009}} = \begin{pmatrix} 11.667 \\ 23.333 \\ 35 \\ 46.667 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad \text{sivusiirtymä kerroskohtaisesti}$$

Tulevissa ohjeissa siirtymälle on annettu tiukempi raja-arvo $H/500$ ylimmän kerroksen lattian tasalla.

$$u_{\text{sallittu.2016}_n} := \frac{\sum_{i=1}^n h_{\text{kerros}_i}}{500} \quad u_{\text{sallittu.2016}_3} = 21 \cdot \text{mm}$$

Määritetään sallitun siirtymän avulla jäykistävän rakenteen minimijäykkyys (käytetään jokaisessa kerroksessa samaa jäykkyyttä)

Määritetään minimijäykkyys RIL205-1-2016 raja-arvon avulla eli $H/500$ ylimmän kerroksen lattian tasalla

$$u(K) := \frac{\sum_{i=1}^3 R_i}{K} \quad u(K) = u_{\text{sallittu.2016}_3} \text{ solve, } K \rightarrow \frac{13800 \cdot N}{\text{mm}} \quad K_{\text{min}} := \frac{13800 \cdot N}{\text{mm}} = 1.38 \times 10^7 \cdot \frac{N}{\text{m}}$$

Tarkistetaan pysyykö siirtymät sallituissa rajoissa nykyisillä ohjeilla

$$u_{\text{min}} := \frac{\left(\sum_{i=1}^n R_i \right)}{K_{\text{min}}} \quad u = \begin{pmatrix} 8.609 \\ 15.946 \\ 21 \\ 23.772 \end{pmatrix} \cdot \text{mm} \quad u_{\text{sallittu.2009}} = \begin{pmatrix} 11.667 \\ 23.333 \\ 35 \\ 46.667 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

"OK" if $u_1 \leq u_{\text{sallittu.2009}_1} \wedge u_2 \leq u_{\text{sallittu.2009}_2} \wedge u_3 \leq u_{\text{sallittu.2009}_3} \wedge u_4 \leq u_{\text{sallittu.2009}_4} = \text{"OK"}$
 "Siirtymän arvo ylittyy" otherwise

Tutkitun rakenteen (seinien/tornin) minimikokonaisjäykkyys tulisi olla $K_{\text{min}} = 1.38 \times 10^7 \cdot \frac{N}{\text{m}}$

Jäykistysseinillä jäykistettynä seinäkohtainen minimijäykkyys

$$K_{\text{min.seinä}} := \frac{K_{\text{min}}}{2} = 6.9 \times 10^6 \cdot \frac{N}{\text{m}}$$

Jäykistysseinän vaakaliitoksen minimijäykkyys

Jäykistysseinän kokonaisjäykkyyteen vaikuttaa seinän jäykkyys ja vaakaliitoksen jäykkyys. Useista levyistä kasatulla seinällä seinän oma jäykkyys on ehjää seinää pienempi, joten kokonaisjäykkyyttä laskettaessa vaakaliitoksen jäykkyyden tarvitsee olla suurempi. Tästä syystä vaakaliitoksen minimijäykkyys lasketaan joustavalla seinärakenteella.

$$K_{\text{seinä}} := 1.195 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad \text{Kootun seinän jäykkyys soiro- tai puoliponttiliitoksella (kts. liite 1)}$$

Seinien kokonaisjäykkyydet, kun liitosjäykkyys x huomioidaan

$$K_{\text{tot}(x)} := \frac{x}{\frac{x}{K_{\text{seinä}}} + 1}$$

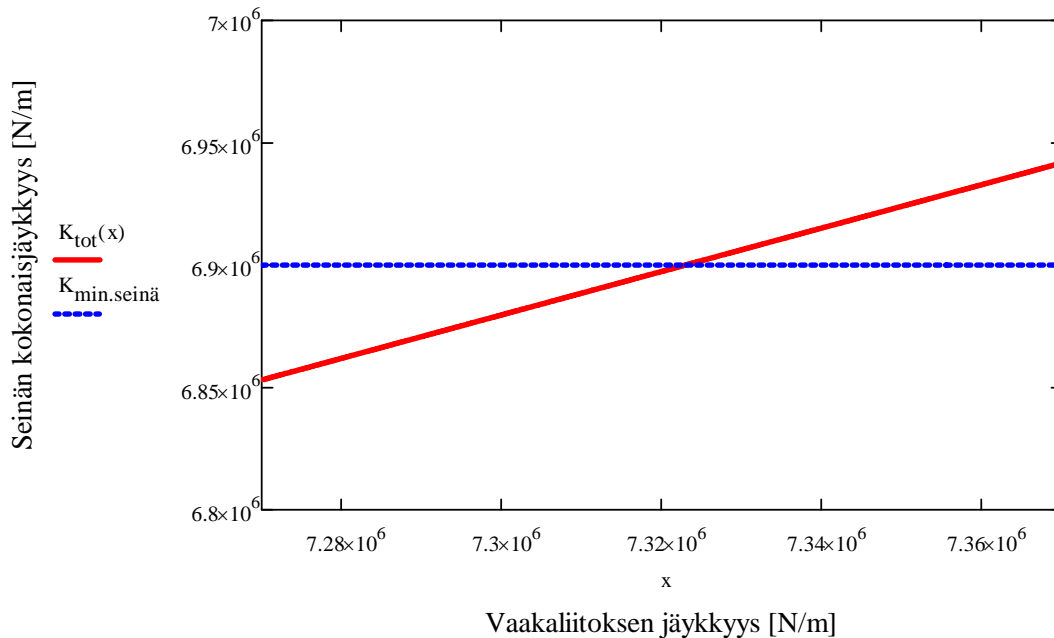
Ratkaistaan x

$$a_1 := K_{\text{seinä}} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{N}}\right) = 1.195 \times 10^8 \quad b := K_{\text{min.seinä}} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{N}}\right) = 6.9 \times 10^6$$

$$\frac{x}{\frac{x}{a_1} + 1} = b \text{ solve, } x \rightarrow \frac{4122750000}{563}$$

$$K_{\text{liitos.min}} := \frac{4122750000}{563} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}} = 7.323 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Seinän vaakaliitoksen minimijäykkyys y-suuntaan (b=8m) saavutetaan esimerkiksi puoliponttiliitoksella, jossa on käytetään 8 mm ruuveja k200. Liitos kannattaa kuitenkin tehdä teräksisillä liitososilla tai loviliitoksena, koska vaakaliitoksen jäykkyys vaikuttaa oleellisesti seinän kokonaisjäykkyyteen. (katso liitosjäykkyydet ja vaakaliitoksen vaikutus liitteestä 1)



$$K_{\text{liitos.seinä.FEM}} := \frac{K_{\text{liitos.min}}}{8\text{m}} = 915.353 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

FEM-laskennassa käytettävä liitoksen minimijäykkyys, jos jäykistyksessä käytetään vain kuorman suuntaisia seiiniä.

Koteloikkileikkauksen vaakaliitoksen minimijäykkyys

$K_{kotello} := 1.766 \times 10^8 \frac{N}{m}$ Kootun seinän jäykkyys soiro- tai puoliponttiliitoksella (kts. liite 1)

Seinien kokonaisjäykkyydet, kun liitosjäykkyys x huomioidaan

$K_{kotello}(x) := \frac{x}{\frac{x}{K_{kotello}} + 1}$

Ratkaistaan x

$a_1 := K_{kotello} \cdot \left(\frac{m}{N}\right) = 1.766 \times 10^8$ $b := K_{min} \cdot \left(\frac{m}{N}\right) = 1.38 \times 10^7$

$\frac{x}{\frac{x}{a_1} + 1} = b \text{ solve, } x \rightarrow \frac{6092700000}{407}$

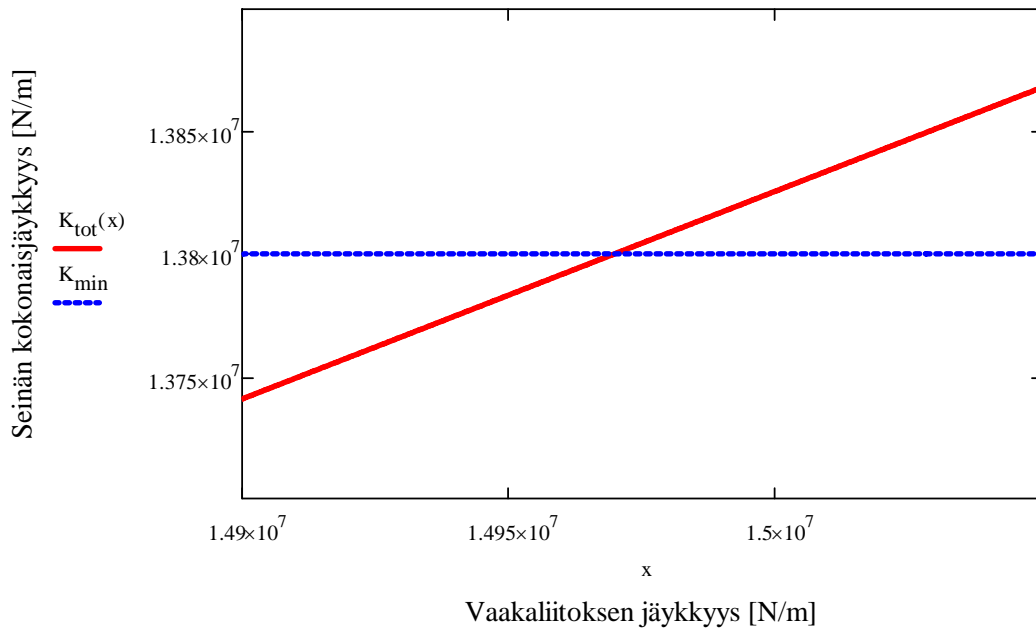
$K_{liitos.min} := \frac{6092700000}{407} \cdot \frac{N}{m} = 1.497 \times 10^7 \cdot \frac{N}{m}$ vaakaliitoksen kokonaisjäykkyys

määritetään tarvittava liitosjäykkyys metrin matkalle FEM-laskentaa varten.

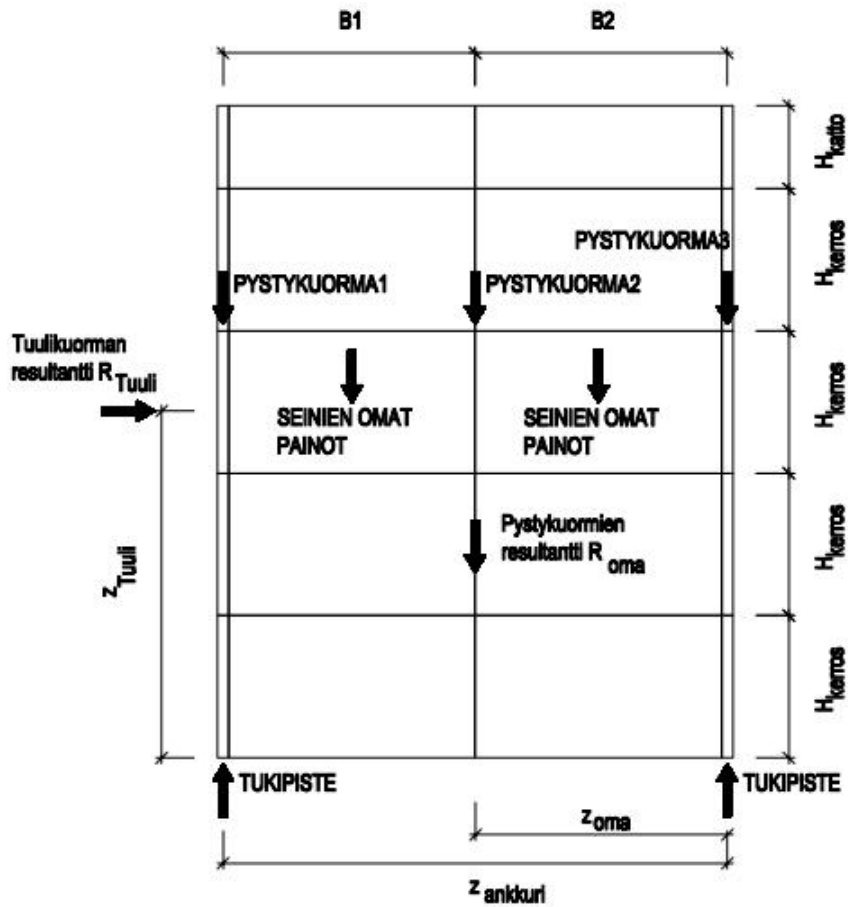
Liitosjäykkyyttä käytetään vaakaliitosten x- ja y-suunnan jäykkyytenä.

$K_{liitos_FEM1} := \frac{K_{liitos.min}}{2.9m + 2.8m} = 440.288 \cdot \frac{kN}{m^2}$ Kaikkien seinien vaakaliitokset siirtävät voimia

$K_{liitos_FEM2} := \frac{K_{liitos.min}}{2.8m} = 935.611 \cdot \frac{kN}{m^2}$ Ainoastaan voiman suuntaisten seinien vaakaliitokset välittävät voimia



Jäykistävän rakenteen ankkurointi



Rakenteiden mitat

$$H_{\text{katto}} := 2500\text{mm}$$

$$H_{\text{kerros}} := 3500\text{mm}$$

$$B_1 := 4000\text{mm}$$

$$B_2 := 4000\text{mm}$$

$$B := B_1 + B_2 = 8\text{ m}$$

$$D := 9\text{m}$$

elementin pituus

Kuormien ja tukipisteen väliset momenttivarret

$$z_{\text{tuuli}} := 9.9\text{m liite 2}$$

$$z_{\text{ankkuri}} := B = 8\text{ m}$$

$$z_{\text{oma}} := B_1 = 4\text{ m}$$

$$z_{\text{op1}} := B_2 + \frac{B_1}{2} = 6\text{ m}$$

$$z_{\text{op2}} := \frac{B_2}{2} = 2\text{ m}$$

$$z_{\text{pk1}} := B = 8\text{ m}$$

$$z_{\text{pk2}} := B_2 = 4\text{ m}$$

$$z_{\text{pk3}} := 0$$

Rakenteiden kuormat

$$g_{\text{CLT}} := 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad d_{\text{vp}} := 160\text{mm} + 80\text{mm} = 0.24\text{m} \quad d_{\text{seinä}} := 100\text{mm}$$

$$g_{\text{vp}} := g_{\text{CLT}} \cdot d_{\text{vp}} = 1.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Tasojen omapaino}$$

$$g_{\text{s}} := g_{\text{CLT}} \cdot d_{\text{seinä}} = 0.5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{seinän omapaino}$$

Pystykuormien resultantit

$$\text{PK1} := (4 \cdot H_{\text{kerros}} + H_{\text{katto}}) \cdot g_{\text{s}} \cdot D + 5 \cdot \frac{g_{\text{vp}} \cdot D \cdot B_1}{2} = 182.25 \cdot \text{kN} \quad \text{Pystykuormat linjalla 1}$$

$$\text{PK2} := 5 \cdot g_{\text{vp}} \cdot D \cdot B_1 = 216 \cdot \text{kN} \quad \text{Pystykuormat linjalla 2}$$

$$\text{PK3} := \text{PK1} \quad \text{Pystykuormat linjalla 3}$$

$$\text{OP1} := 2 \cdot (4 \cdot H_{\text{kerros}} + H_{\text{katto}}) \cdot g_{\text{s}} \cdot B_1 = 66 \cdot \text{kN} \quad \text{Vaakakuorman suuntaisten seinien omapaino}$$

$$\text{OP2} := \text{OP1}$$

$$R_{\text{oma}} := \text{PK1} + \text{PK2} + \text{PK3} + \text{OP1} + \text{OP2} = 712.5 \cdot \text{kN} \quad \text{Pystykuorman resultantti}$$

Vaakakuormat

$$R_{\text{tuuli}} := 120 \text{kN} \quad \text{Tuulikuorman resultantti}$$

Kuormien mitoitusarvot

$$\text{PK}_{\text{d1}} := 0.9 \cdot \text{PK1} = 164.025 \cdot \text{kN} \quad \text{PK}_{\text{d2}} := 2 \cdot \text{PK}_{\text{d1}} = 328.05 \cdot \text{kN} \quad \text{PK}_{\text{d3}} := \text{PK}_{\text{d1}}$$

$$\text{OP}_{\text{d1}} := 0.9 \cdot \text{OP1} = 59.4 \cdot \text{kN} \quad \text{OP}_{\text{d2}} := \text{OP}_{\text{d1}}$$

$$R_{\text{tuuli.d}} := 1.15 \cdot R_{\text{tuuli}} = 138 \cdot \text{kN}$$

Ankkurointivoiman suuruus

$$F_d := \frac{R_{tuuli,d} \cdot z_{tuuli} - R_{oma} \cdot z_{oma}}{z_{ankkuri}} = -185.475 \cdot \text{kN}$$

$$\begin{cases} \text{"Ei tarvetta ankkuroinnille"} & \text{if } F_d \leq 0 \\ \text{"Ankkuroitava voimalle } F_d\text{"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"Ei tarvetta ankkuroinnille"}$$

Tukipisteen puristusvoima

$$N_{tukipiste} := PK_{d1} + PK_{d2} + PK_{d3} + OP_{d1} + OP_{d2} + F_d = 589.425 \cdot \text{kN}$$

Pystysaumoissa vaikuttavat leikkausvoimat

$$V_1 := N_{tukipiste} - (PK_{d2} + PK_{d3} + OP_{d1} + OP_{d2}) = -21.45 \cdot \text{kN} \quad PK_{d1} + F_d = -21.45 \cdot \text{kN}$$

$$V_2 := N_{tukipiste} - (PK_{d2} + PK_{d3} + OP_{d2}) = 37.95 \cdot \text{kN}$$

$$V_3 := N_{tukipiste} - PK_{d3} = 425.4 \cdot \text{kN}$$

Keskimmäisessä pystysaumassa vaikuttavat normaalivoimat

$$M := OP_{d2} \cdot \frac{B_2}{2} + PK_{d3} \cdot B_2 - N_{tukipiste} \cdot B_2 = -1.583 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Momentti liitoskohdassa}$$

$$z_{liitos} := H_{kerros} - 2 \cdot 150 \text{mm} = 3.2 \text{m} \quad \text{momenttivarsi}$$

$$N_{liitos} := \left| \frac{M}{z_{liitos}} \right| = 494.625 \cdot \text{kN} \quad \text{Veto ja puristusvoima}$$

Ankkuroinnin tarve, kun jäykistys toteutetaan kahdella erillisellä jäykistysseinällä.

Tuulikuorma per seinä

$$F := \frac{R_{tuuli,d}}{2} = 69 \cdot \text{kN}$$

Ankkurointivoima

$$F_{ankkuri} := \frac{F \cdot z_{tuuli} - OP_{d1} \cdot \frac{B_1}{2} - PK_{d1} \cdot B_1}{B_1} = -22.95 \cdot \text{kN}$$

STRUCTURAL ANALYSIS

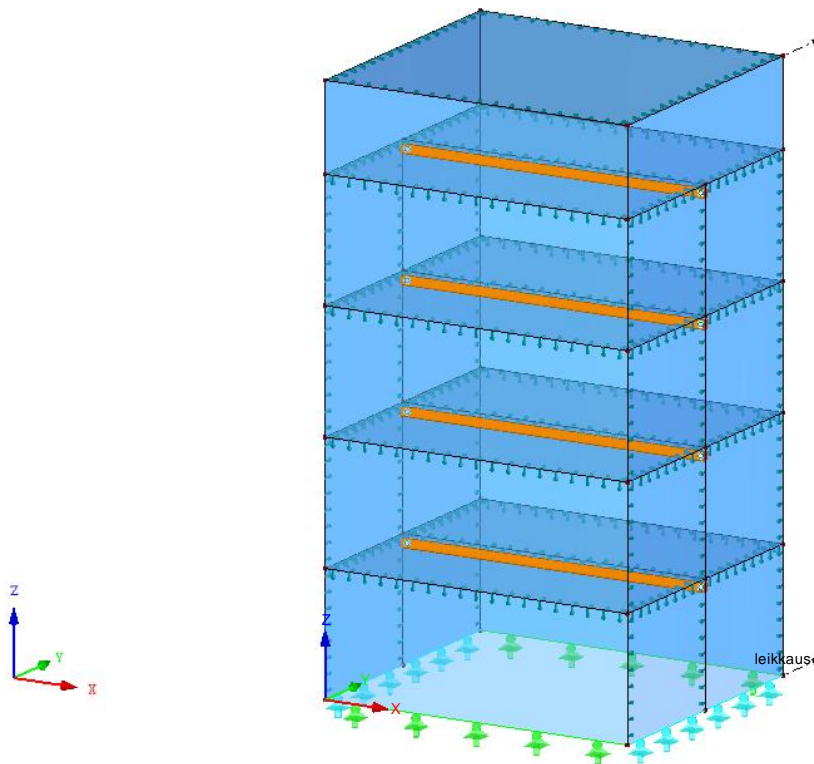
PROJECT

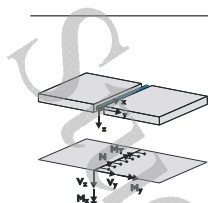
Diplomityö Liite 4: RFEM-laskenta
Vaakaliitostyyppi 1

CLIENT

CREATED BY

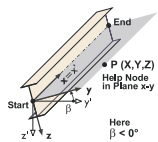
Isometric





1.10 LINE HINGES

| Hinge No. | Line No. | Surface No. | Side | Axial/Shear Release / Spring [kN/m ²] | | | Moment Release / Spring [kNm/rad/m] | | |
|-----------|----------|-------------|------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | u _x | u _y | u _z | φ _x | φ _y | φ _z |
| 1 | 8 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 | 31 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 | 12 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4 | 28 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5 | 20 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6 | 29 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 | 16 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 8 | 24 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 9 | 45 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10 | 33 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 11 | 43 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 12 | 37 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 13 | 35 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 14 | 39 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 15 | 52 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 16 | 66 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 17 | 55 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 18 | 65 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 19 | 60 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 20 | 57 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 21 | 62 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 23 | 64 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 24 | 76 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 25 | 67 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 26 | 75 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 27 | 71 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 28 | 69 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 29 | 73 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 30 | 11 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 31 | 42 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 32 | 19 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 33 | 59 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 34 | 31 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 35 | 45 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 36 | 66 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 37 | 76 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 38 | 28 | 6 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 39 | 9 | 6 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 40 | 26 | 6 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 41 | 8 | 1 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 42 | 12 | 2 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 43 | 10 | 2 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 44 | 14 | 2 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 45 | 16 | 3 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 46 | 18 | 3 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 47 | 20 | 4 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 48 | 24 | 5 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 49 | 22 | 5 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 50 | 43 | 14 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 51 | 30 | 14 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 52 | 41 | 14 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 53 | 29 | 9 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 54 | 33 | 10 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 55 | 32 | 10 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 56 | 34 | 10 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 57 | 35 | 11 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 58 | 36 | 11 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 59 | 37 | 12 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 60 | 39 | 13 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 61 | 38 | 13 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 62 | 65 | 22 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 63 | 53 | 22 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 64 | 63 | 22 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 65 | 52 | 17 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 66 | 55 | 18 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 67 | 54 | 18 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 68 | 56 | 18 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 69 | 57 | 19 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 70 | 58 | 19 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 71 | 60 | 20 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 72 | 62 | 21 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 73 | 61 | 21 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 81 | 75 | 30 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 82 | 80 | 30 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 83 | 89 | 30 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 84 | 64 | 25 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 85 | 67 | 26 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 86 | 81 | 26 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 87 | 83 | 26 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 88 | 69 | 27 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 89 | 85 | 27 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 90 | 71 | 28 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 91 | 73 | 29 | - | 440.000 | <input type="checkbox"/> | 440.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 92 | 87 | 29 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



1.17 MEMBERS

| Mbr. No. | Line No. | Member | Rotation | | Cross-Section | | Hinge No. | | Ecc. No. | Div. No. | Length L [m] | |
|----------|----------|--------|----------|-------|---------------|-----|-----------|-----|----------|----------|--------------|---|
| | | | Type | β [°] | Start | End | Start | End | | | | |
| 1 | 31 | Beam | Angle | 0.00 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | - | 9.000 | X |
| 2 | 45 | Beam | Angle | 0.00 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | - | 9.000 | X |
| 3 | 66 | Beam | Angle | 0.00 | 1 | 1 | 2 | 2 | 5 | - | 9.000 | X |
| 4 | 76 | Beam | Angle | 0.00 | 1 | 1 | 3 | 2 | 6 | - | 9.000 | X |

1.17.1 MEMBERS - STIFFNESS REDUCTION

| Mbr. No. | Factor GJ [-] | Factor EI _y [-] | Factor EI _z [-] | Factor EA [-] | Factor GA _y [-] | Factor GA _z [-] |
|----------|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 1.00 | 0.70 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 2 | 1.00 | 0.70 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 3 | 1.00 | 0.70 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 4 | 1.00 | 0.70 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

2.1 LOAD CASES

| Load Case | Load Case Description | Action Category | Self-Weight - Factor in Direction | | | EN 1990 + 1995 FIN Load Duration | |
|-----------|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|-------|-------|------------------------------------|------------|
| | | | Active | X | Y | | Z |
| LC1 | Omapaino | Permanent | <input checked="" type="checkbox"/> | 0.000 | 0.000 | -1.000 | Permanent |
| LC2 | Tuuli | Wind | <input type="checkbox"/> | | | | Short-term |

2.1.1 LOAD CASES - CALCULATION PARAMETERS

| Load Case | Load Case Description | Calculation Parameters |
|-----------|-----------------------|---|
| LC1 | Omapaino | Method of analysis : <input type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z) |
| LC2 | Tuuli | Method of analysis : <input type="radio"/> Geometrically linear analysis Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Newton-Raphson Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z) |

2.5 LOAD COMBINATIONS

| Load Combin. | Load Combination | | No. | Factor | Load Case |
|--------------|------------------|--------------------|-----|--------|--------------|
| | DS | Description | | | |
| CO1 | ULS' | 1.35*LC1 | 1 | 1.35 | LC1 Omapaino |
| CO2 | ULS' | 1.15*LC1 + 1.5*LC2 | 1 | 1.15 | LC1 Omapaino |
| | | | 2 | 1.50 | LC2 Tuuli |
| CO3 | ULS' | 0.9*LC1 | 1 | 0.90 | LC1 Omapaino |
| CO4 | ULS' | 0.9*LC1 + 1.5*LC2 | 1 | 0.90 | LC1 Omapaino |
| | | | 2 | 1.50 | LC2 Tuuli |
| CO5 | S Ch | LC1 | 1 | 1.00 | LC1 Omapaino |
| CO6 | S Ch | LC1 + LC2 | 1 | 1.00 | LC1 Omapaino |
| | | | 2 | 1.00 | LC2 Tuuli |
| CO7 | S Qp | 1.8*LC1 | 1 | 1.80 | LC1 Omapaino |
| CO8 | S Qp | 1.8*LC1 + LC2 | 1 | 1.80 | LC1 Omapaino |
| | | | 2 | 1.00 | LC2 Tuuli |

2.5.2 LOAD COMBINATIONS - CALCULATION PARAMETERS

| Load Combin. | Description | Calculation Parameters |
|--------------|--------------------|--|
| CO1 | 1.35*LC1 | Method of analysis : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: : <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N : <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z : <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Materials (partial factor γ _M) : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z) |
| CO2 | 1.15*LC1 + 1.5*LC2 | Method of analysis : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: : <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N : <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z : <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Materials (partial factor γ _M) : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z) |
| CO3 | 0.9*LC1 | Method of analysis : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: : <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N : <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z : <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Materials (partial factor γ _M) : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, EI _y , EI _z , EA, GA _y , GA _z) |
| CO4 | 0.9*LC1 + 1.5*LC2 | Method of analysis : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: : <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N : <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z : <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Materials (partial factor γ _M) : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) |

2.5.2 LOAD COMBINATIONS - CALCULATION PARAMETERS

| Load Combin. | Description | Calculation Parameters |
|--------------|---------------|---|
| CO5 | LC1 | Method of analysis : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, E _y , E _z , EA, GA _y , GA _z) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, E _y , E _z , EA, GA _y , GA _z) |
| CO6 | LC1 + LC2 | Method of analysis : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, E _y , E _z , EA, GA _y , GA _z) |
| CO7 | 1.8*LC1 | Method of analysis : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, E _y , E _z , EA, GA _y , GA _z) |
| CO8 | 1.8*LC1 + LC2 | Method of analysis : <input type="radio"/> Second order analysis (P-Delta) Method for solving system of nonlinear algebraic equations : <input type="radio"/> Picard Options : <input checked="" type="checkbox"/> Consider favorable effects due to tension : <input checked="" type="checkbox"/> Refer internal forces to deformed system for: <input checked="" type="checkbox"/> Normal forces N <input checked="" type="checkbox"/> Shear forces V _y and V _z <input checked="" type="checkbox"/> Moments M _y , M _z and M _T Activate stiffness factors of: : <input checked="" type="checkbox"/> Cross-sections (factor for J, I _y , I _z , A, A _y , A _z) : <input checked="" type="checkbox"/> Members (factor for GJ, E _y , E _z , EA, GA _y , GA _z) |

LC2
Tuuli

3.4 SURFACE LOADS

LC2: Tuuli

| No. | On Surfaces No. | Load Type | Load Distribution | Load Direction | Load Parameters | |
|-----|-----------------|-----------|-------------------|----------------|-----------------|------------------------|
| | | | | | Symbol | Value Unit |
| 2 | 9,17,35 | Force | Uniform | YP | p | 1.00 kN/m ² |
| 3 | 25 | Force | Uniform | YP | p | 1.00 kN/m ² |

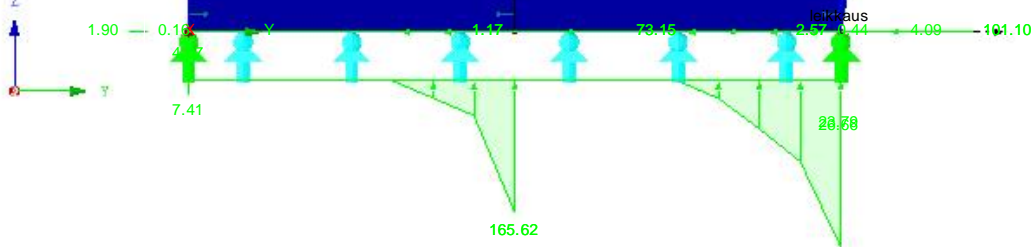
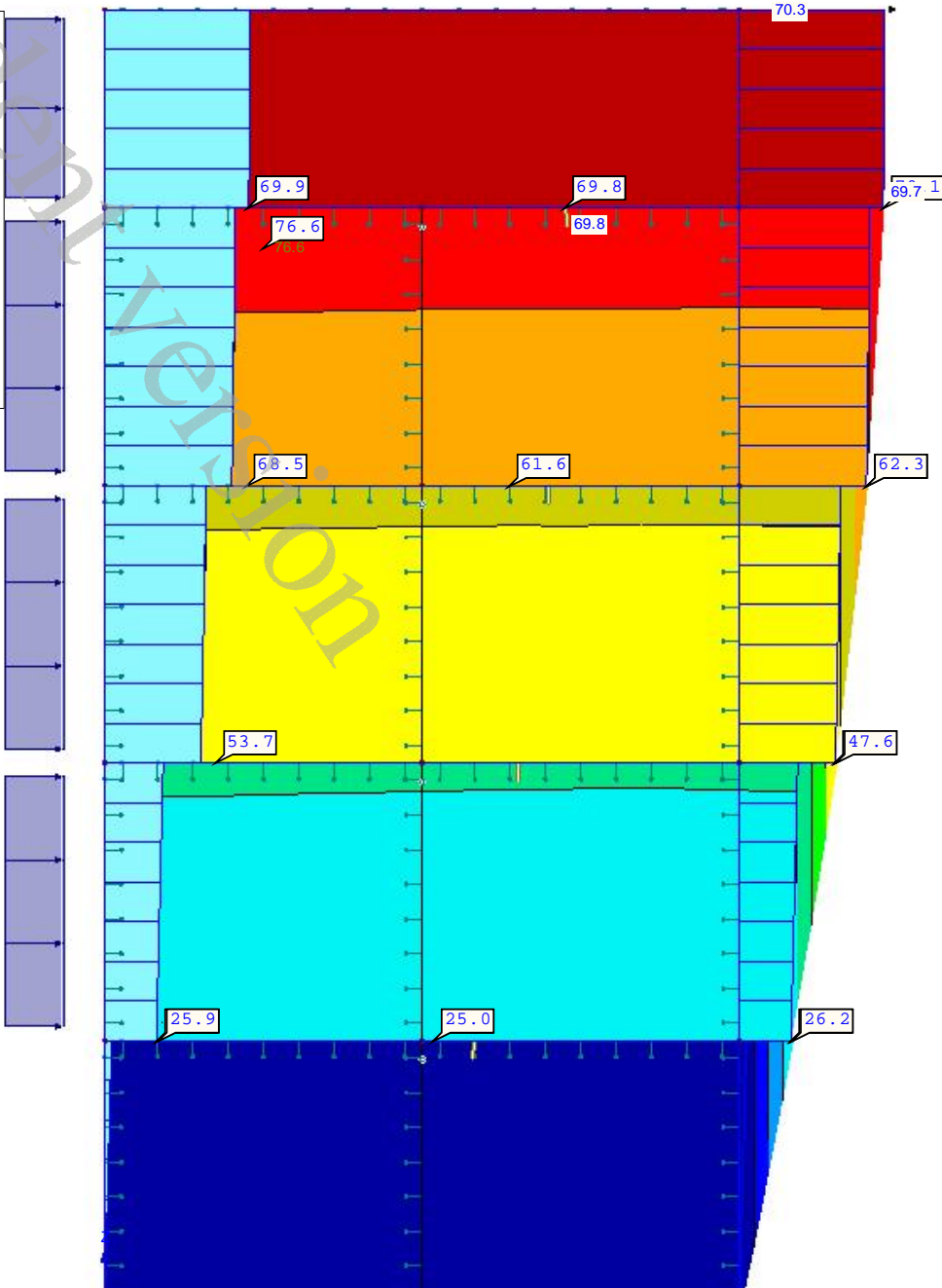
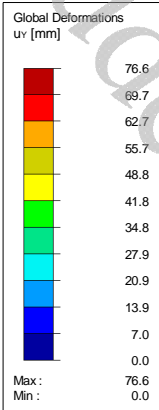
4.0 RESULTS - SUMMARY

| Description | Value | Unit | Comment |
|--|---|------|---|
| CO4 - 0.9*LC1 + 1.5*LC2 | | | |
| Sum of loads in X | 0.00 | kN | |
| Sum of support reactions in X | 0.00 | kN | |
| Sum of loads in Y | 175.50 | kN | |
| Sum of support reactions in Y | 175.50 | kN | Deviation 0.00% |
| Sum of loads in Z | -646.85 | kN | |
| Sum of support reactions in Z | -646.85 | kN | Deviation 0.00% |
| Resultant of reactions about X | -104.86 | kNm | At center of gravity of model (X:4.50, Y:4.00, Z:9.49 m) |
| Resultant of reactions about Y | 0.00 | kNm | At center of gravity of model |
| Resultant of reactions about Z | 0.00 | kNm | At center of gravity of model |
| Max. displacement in X | -3.1 | mm | FE Node No. 3108 (X: 9.000, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. displacement in Y | 76.6 | mm | FE Node No. 2364 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 13.500 m) |
| Max. displacement in Z | -15.0 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. vector displacement | 76.6 | mm | FE Node No. 2364 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 13.500 m) |
| Max. rotation about X | -12.8 | mrاد | FE Node No. 4420 (X: 4.500, Y: 0.000, Z: 3.500 m) |
| Max. rotation about Y | -3.5 | mrاد | Member No. 4, x: 0.000 m |
| Max. rotation about Z | -20.2 | mrاد | FE Node No. 113 (X: 9.000, Y: 0.000, Z: 7.000 m) |
| Method of analysis | 2nd Order | | Second order analysis (Nonlinear, Timoshenko) |
| Internal forces referred to deformed system for... | <input checked="" type="checkbox"/> | | N, V _y , V _z , M _y , M _z , M _T |
| Reduction of stiffness | <input type="checkbox"/> | | Materials, Cross-sections, Members, Surfaces |
| Consider favorable effects of tensile forces | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Divide results by CO factor | <input type="checkbox"/> | | |
| Number of load increments | 1 | | |
| Number of iterations | 5 | | |
| CO6 - LC1 + LC2 | | | |
| Sum of loads in X | 0.00 | kN | |
| Sum of support reactions in X | 0.00 | kN | |
| Sum of loads in Y | 117.00 | kN | |
| Sum of support reactions in Y | 117.00 | kN | Deviation 0.00% |
| Sum of loads in Z | -718.72 | kN | |
| Sum of support reactions in Z | -718.72 | kN | Deviation 0.00% |
| Resultant of reactions about X | -72.3 | kNm | At center of gravity of model (X:4.5, Y:4.0, Z:9.5 m) |
| Resultant of reactions about Y | 0.0 | kNm | At center of gravity of model |
| Resultant of reactions about Z | 0.0 | kNm | At center of gravity of model |
| Max. displacement in X | -2.9 | mm | FE Node No. 3108 (X: 9.000, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. displacement in Y | 48.0 | mm | FE Node No. 4451 (X: 4.000, Y: 0.000, Z: 14.000 m) |
| Max. displacement in Z | -13.4 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. vector displacement | 48.0 | mm | FE Node No. 4451 (X: 4.000, Y: 0.000, Z: 14.000 m) |
| Max. rotation about X | -7.8 | mrاد | FE Node No. 4420 (X: 4.500, Y: 0.000, Z: 3.500 m) |
| Max. rotation about Y | -3.2 | mrاد | Member No. 4, x: 0.000 m |
| Max. rotation about Z | -12.7 | mrاد | FE Node No. 113 (X: 9.000, Y: 0.000, Z: 7.000 m) |
| Method of analysis | 2nd Order | | Second order analysis (Nonlinear, Timoshenko) |
| Internal forces referred to deformed system for... | <input checked="" type="checkbox"/> | | N, V _y , V _z , M _y , M _z , M _T |
| Reduction of stiffness | <input type="checkbox"/> | | Cross-sections, Members, Surfaces |
| Consider favorable effects of tensile forces | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Divide results by CO factor | <input type="checkbox"/> | | |
| Number of load increments | 1 | | |
| Number of iterations | 5 | | |
| Summary | | | |
| Other Settings | Number of 1D finite elements | : | 72 |
| | Number of 2D finite elements | : | 4608 |
| | Number of 3D finite elements | : | 0 |
| | Number of FE mesh nodes | : | 4535 |
| | Number of equations | : | 27210 |
| | Max. number of iterations | : | 100 |
| | Number of divisions for member results | : | 10 |
| | Division of cable/foundation/tapered members | : | 10 |
| | Number of member divisions for searching maximum values | : | 10 |
| | Subdivisions of FE mesh for graphical results | : | 0 |
| | Percentage of iterations according to Picard method in combination with Newton-Raphson method | : | 5 % |
| | Activate ineffective supports | : | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Options | <input checked="" type="checkbox"/> Activate shear stiffness of members (Ay, Az) | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Activate member divisions for large deformation or post-critical analysis | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Activate entered stiffness modifications | | |
| | <input type="checkbox"/> Ignore rotational degrees of freedom | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Check of critical forces of members | | |
| | <input type="checkbox"/> Nonsymmetric direct solver if demanded by nonlinear model | | |
| | Method for the system of equations | | <input checked="" type="radio"/> Direct <input type="radio"/> Iteration |
| | Plate bending theory | | <input checked="" type="radio"/> Mindlin <input type="radio"/> Kirchhoff |
| | Solver version | | <input type="radio"/> 32-bit <input checked="" type="radio"/> 64-bit |
| Precision and Tolerance | <input type="checkbox"/> Change default setting | | |
| Nonlinear effects - Activate | <input checked="" type="checkbox"/> Support and elastic foundations | | |

GLOBAL DEFORMATIONS, SUPPORT REACTIONS

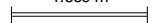
CO4: 0.9*LC1 + 1.5*LC2
 Global Deformations u-Y
 Support Reactions[kN/m]
 Values: u-Y [mm]

Against X-direction



Max p-z': 4.07, Min p-z': -212.03 kN/m
 Max p-y': 101.10, Min p-y': -2.57 kN/m
 Max u-Y: 76.6, Min u-Y: 0.0 mm
 Factor of deformations: 26.00

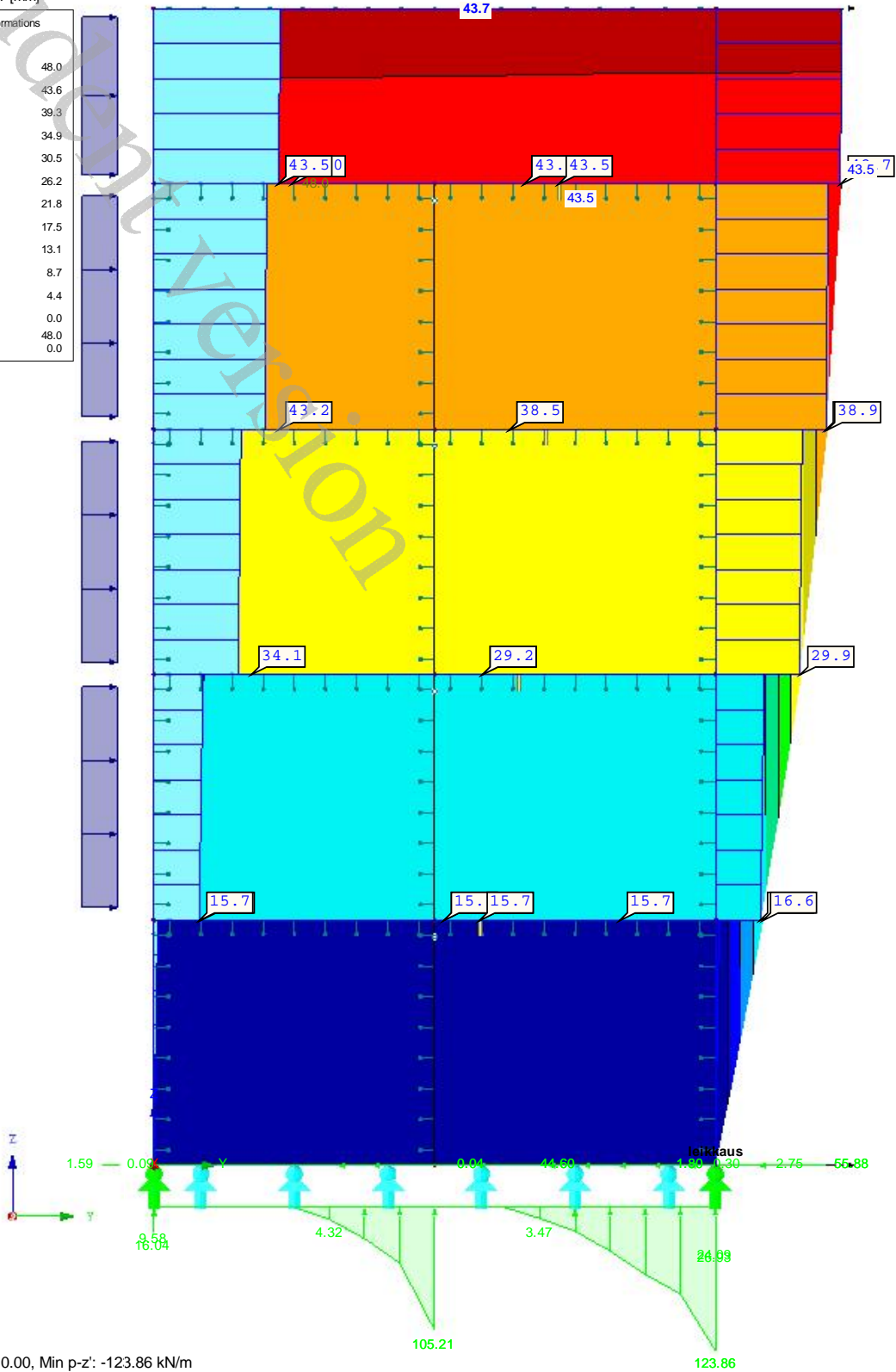
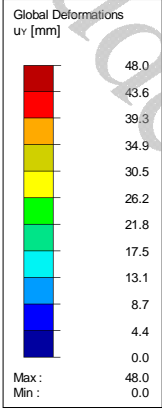
1.669 m



GLOBAL DEFORMATIONS, SUPPORT REACTIONS, KÄYTTÖRAJATILA

CO6: LC1 + LC2
 Global Deformations u-Y
 Support Reactions[kN/m]
 Values: u-Y [mm]

Against X-direction



Max p-z': 0.00, Min p-z': -123.86 kN/m
 Max p-y': 55.88, Min p-y': -1.80 kN/m
 Max u-Y: 48.0, Min u-Y: 0.0 mm
 Factor of deformations: 41.00

1.669 m

1.1.1 GENERAL DATA

| | |
|------------------------------|--|
| Surfaces to design | 1-30,33-39 |
| Design according to Standard | EN 1995-1-1:2004-11/SFS |
| Material model: | Orthotropic |
| Ultimate Limit State | |
| Load combinations to design | CO4 0.9*LC1 + 1.5*LC2 Persistent/transient |

1.1.2 DETAILS

| | |
|--|-------------------------------------|
| Plate bending theory: | Mindlin |
| 1 - Composition 1 | |
| Surfaces assigned to composition: | 7,8,15,16,23,24,37-39 |
| Layer coupling | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Cross laminated timber without glue on the narrow side | <input type="checkbox"/> |
| Effect of drilling stiffness D_{33} | $k_{33} = 0.65$ |
| Effect of shear stiffness D_{44} | $k_{44} = 1.00$ |
| Effect of shear stiffness D_{55} | $k_{55} = 1.00$ |
| Effect of membrane stiffness D_{88} | $k_{88} = 0.70$ |
| Reference plane relative to: | Composition center |
| Reference plane shift: | 0.0 mm |
| 2 - Composition 2 | |
| Surfaces assigned to composition: | 1-6,9-14,17-22,25-30,33-36 |
| Layer coupling | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Cross laminated timber without glue on the narrow side | <input type="checkbox"/> |
| Effect of drilling stiffness D_{33} | $k_{33} = 0.65$ |
| Effect of shear stiffness D_{44} | $k_{44} = 1.00$ |
| Effect of shear stiffness D_{55} | $k_{55} = 1.00$ |
| Effect of membrane stiffness D_{88} | $k_{88} = 0.70$ |
| Reference plane relative to: | Composition center |
| Reference plane shift: | 0.0 mm |

1.1.3 DATA FOR STANDARD

| | | | | |
|--|---------|------|-----------------|-----------------|
| Plywood (Part 2) | | | | |
| Partial Factor γ_M | | | | |
| Persistent/transient | | 1.25 | | |
| Accidental | | 1.00 | | |
| Modification Factor k_{mod} | | | Service Class 1 | Service Class 2 |
| Permanent | | | 0.60 | 0.60 |
| Long-term | | | 0.70 | 0.70 |
| Medium-term | | | 0.80 | 0.80 |
| Short-term | | | 0.90 | 0.90 |
| Instantaneous | | | 1.10 | 1.10 |
| Serviceability Limits (Deflections) | | | | |
| Combination of actions: | | | Cantilevers | |
| Characteristic | L / 400 | | $L_c / 200$ | |
| Frequent | L / 300 | | $L_c / 150$ | |
| Quasi-permanent | L / 200 | | $L_c / 100$ | |

1.2.1 MATERIAL CHARACTERISTICS - A

| Comp. No. | Layer No. | Material Description | Factor Category | Thickness t [mm] | Poisson's Ratio [-] | | Shear Modulus [N/mm ²] | | |
|-----------|---|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|------------|------------------------------------|----------|----------|
| | | | | | ν_{xy} | ν_{yx} | G_{xz} | G_{yz} | G_{xy} |
| 1 | Composition 1 | | | | | | | | |
| | 1 | C24 | A | 30.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | | | | | | | | |
| | 2 | C24 | A | 40.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | | | | | | | | |
| | 3 | C24 | A | 30.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | | | | | | | | |
| 2 | Composition 2 | | | | | | | | |
| | 1 | C24 | A | 20.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | | | | | | | | |

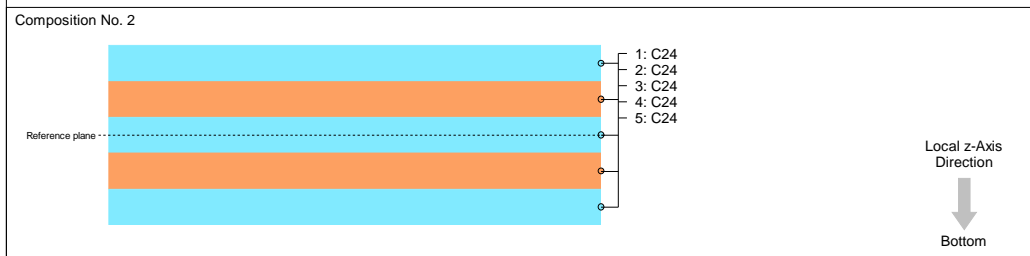
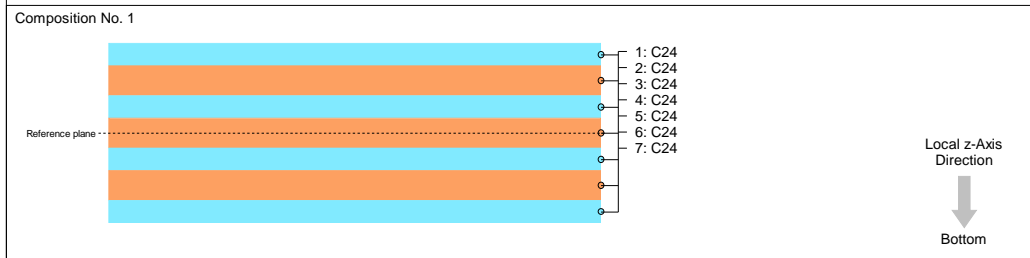
1.2.1 MATERIAL CHARACTERISTICS - A

| Comp. No. | Layer No. | Material Description | Factor Category | Thickness t [mm] | Poisson's Ratio [-] | | Shear Modulus [N/mm ²] | | |
|-----------|---|--|-----------------|------------------|---------------------|------------|------------------------------------|----------|----------|
| | | | | | ν_{xy} | ν_{yx} | G_{xz} | G_{yz} | G_{xy} |
| | 2 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | A | 20.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | 3 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | A | 20.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | 4 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | A | 20.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | 5 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | A | 20.0 | 0.200 | 0.007 | 690.0 | 50.0 | 690.0 |
| | Factor Category A - Plywood (Part 2) | | | | | | | | |

1.2.2 MATERIAL CHARACTERISTICS - B

| Comp. No. | Layer No. | Material Description | Angle β [°] | Modulus of Elasticity [N/mm ²] | | Sp. Weight γ [N/m ³] | Coeff. of Th. Exp. α_T [1/K] |
|-----------|----------------------|--|-------------------|--|-------|---|-------------------------------------|
| | | | | E_x | E_y | | |
| 1 | Composition 1 | | | | | | |
| | 1 | C24 CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 0.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 2 | C24 CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 90.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 3 | C24 CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 0.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 4 | C24 CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 90.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 5 | C24 CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 0.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 6 | C24 CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 90.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| 2 | Composition 2 | | | | | | |
| | 1 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 90.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 2 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 0.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 3 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 90.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 4 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 0.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |
| | 5 | C24 CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 90.00 | 12500.0 | 0.0 | 5000.0 | 5.0E-06 |

1.2.4 LAYER DIAGRAMMS



1.3 MATERIAL STRENGTHS

| Comp. No. | Layer No. | Material Description | Strength for Bend. /Tens. / Compr. [N/mm ²] | | | | | | Shear Strengths [N/mm ²] | | | |
|-----------|----------------------|---|---|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-----|
| | | | f _{b,0,k} | f _{b,90,k} | f _{t,0,k} | f _{t,90,k} | f _{c,0,k} | f _{c,90,k} | f _{xy,k} | f _{v,k} | f _{R,k} | |
| 1 | Composition 1 | | | | | | | | | | | |
| | 1 | C24 | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.0 |
| | 2 | C24 | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.0 |
| | 3 | C24 | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.0 |
| | 4 | C24 | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.0 |
| | 5 | C24 | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.0 |
| | 6 | C24 | CLT 240 L7s, Floor Panel(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.0 |
| 2 | Composition 2 | | | | | | | | | | | |
| | 1 | C24 | CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.3 |
| | 2 | C24 | CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.3 |
| | 3 | C24 | CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.3 |
| | 4 | C24 | CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.3 |
| 5 | C24 | CLT 100 C5s, Wall Element(Spruce), Stora Enso (ETA-14/0349) | 24.0 | 0.0 | 14.0 | 0.4 | 21.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 1.3 | |

STRUCTURAL ANALYSIS

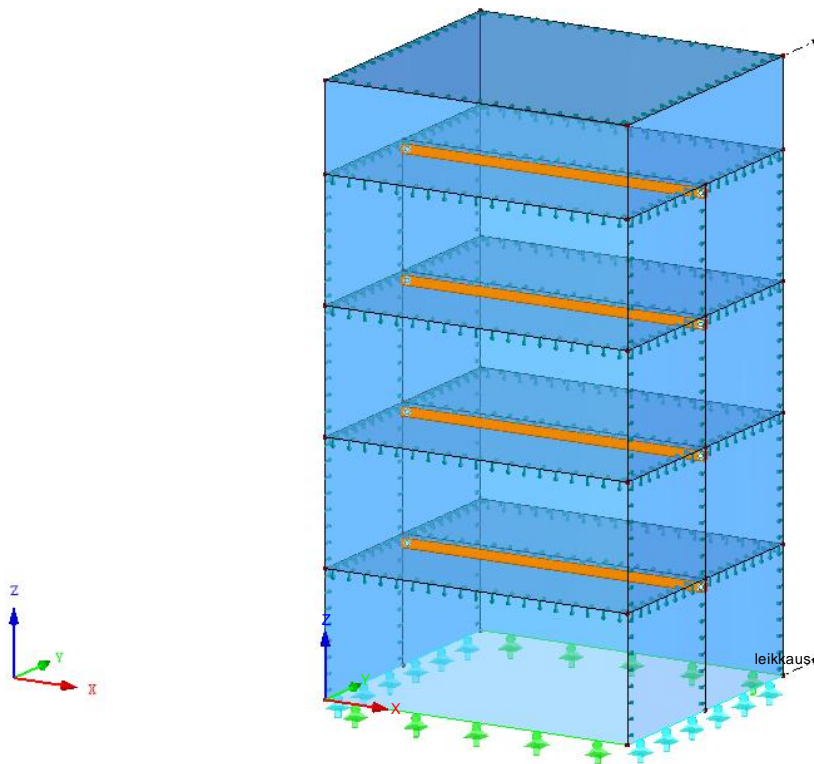
PROJECT

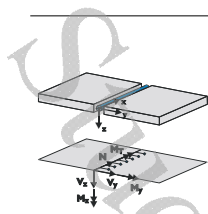
Diplomityö Liite 4: RFEM-laskenta
Vaakaliitostyyppi 2

CLIENT

CREATED BY

Isometric





1.10 LINE HINGES

| Hinge No. | Line No. | Surface No. | Side | Axial/Shear Release / Spring [kN/m ²] | | | Moment Release / Spring [kNm/rad/m] | | |
|-----------|----------|-------------|------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | u _x | u _y | u _z | φ _x | φ _y | φ _z |
| 1 | 8 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 | 31 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 | 12 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4 | 28 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5 | 20 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6 | 29 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 | 16 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 8 | 24 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 9 | 45 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10 | 33 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11 | 43 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 12 | 37 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 13 | 35 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 14 | 39 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 15 | 52 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 16 | 66 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 17 | 55 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 18 | 65 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 19 | 60 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 20 | 57 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 21 | 62 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 23 | 64 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 24 | 76 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 25 | 67 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 26 | 75 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 27 | 71 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 28 | 69 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 29 | 73 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 30 | 11 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 31 | 42 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 32 | 19 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 33 | 59 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 34 | 31 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 35 | 45 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 36 | 66 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 37 | 76 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 38 | 28 | 6 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 39 | 9 | 6 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 40 | 26 | 6 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 41 | 8 | 1 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 42 | 12 | 2 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 43 | 10 | 2 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 44 | 14 | 2 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 45 | 16 | 3 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 46 | 18 | 3 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 47 | 20 | 4 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 48 | 24 | 5 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 49 | 22 | 5 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 50 | 43 | 14 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 51 | 30 | 14 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 52 | 41 | 14 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 53 | 29 | 9 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 54 | 33 | 10 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 55 | 32 | 10 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 56 | 34 | 10 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 57 | 35 | 11 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 58 | 36 | 11 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 59 | 37 | 12 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 60 | 39 | 13 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 61 | 38 | 13 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 62 | 65 | 22 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 63 | 53 | 22 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 64 | 63 | 22 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 65 | 52 | 17 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 66 | 55 | 18 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 67 | 54 | 18 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 68 | 56 | 18 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 69 | 57 | 19 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 70 | 58 | 19 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 71 | 60 | 20 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 72 | 62 | 21 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 73 | 61 | 21 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 81 | 75 | 30 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 82 | 80 | 30 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 83 | 89 | 30 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 84 | 64 | 25 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 85 | 67 | 26 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 86 | 81 | 26 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 87 | 83 | 26 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 88 | 69 | 27 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 89 | 85 | 27 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 90 | 71 | 28 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 91 | 73 | 29 | - | 935.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 92 | 87 | 29 | - | 60.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

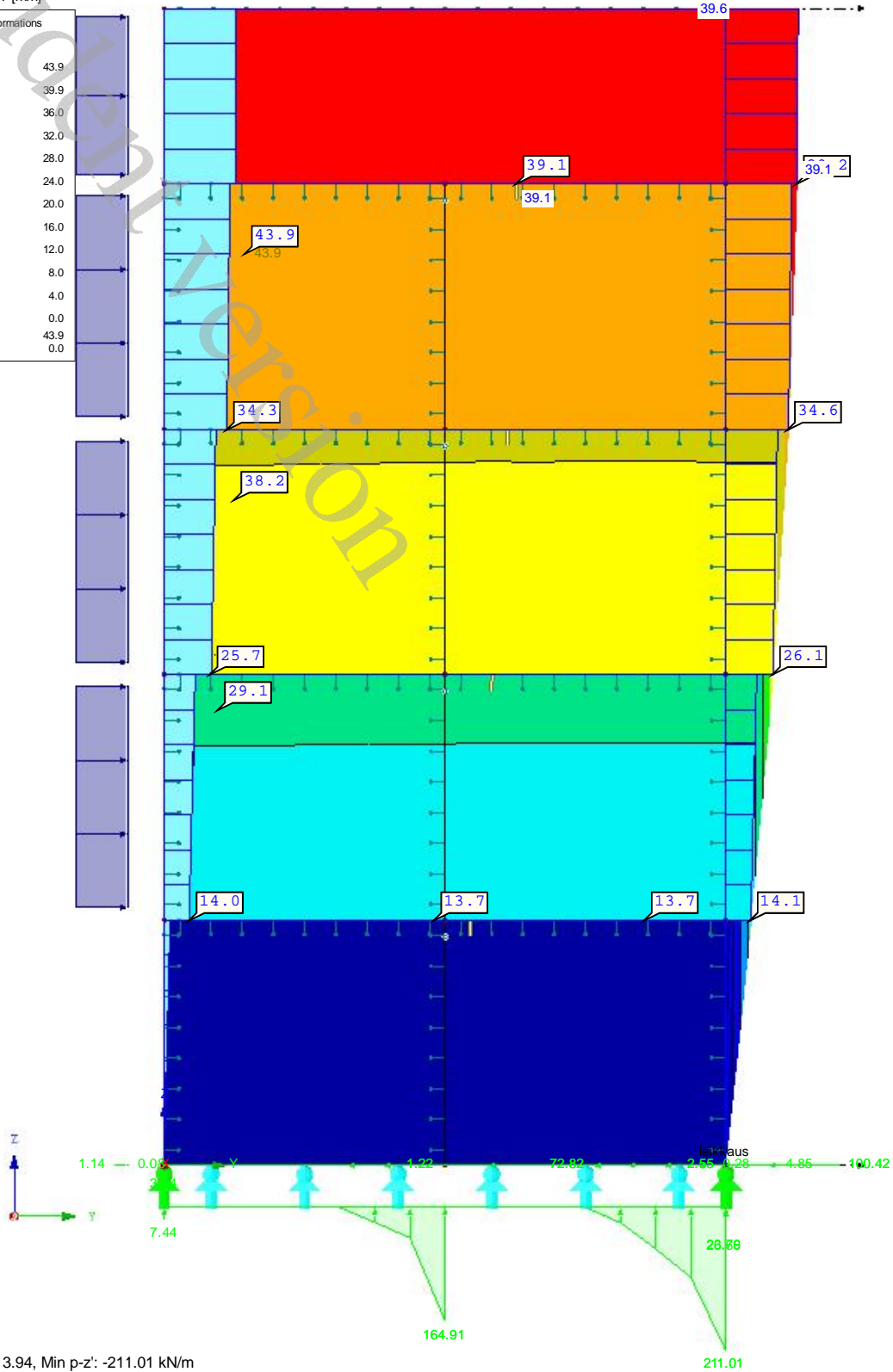
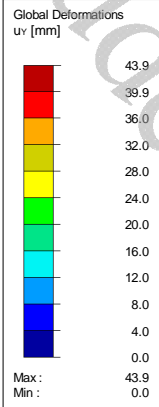
4.0 RESULTS - SUMMARY

| Description | Value | Unit | Comment |
|--|---|------|---|
| CO4 - 0.9*LC1 + 1.5*LC2 | | | |
| Sum of loads in X | 0.00 | kN | |
| Sum of support reactions in X | 0.00 | kN | |
| Sum of loads in Y | 175.50 | kN | |
| Sum of support reactions in Y | 175.50 | kN | Deviation -0.00% |
| Sum of loads in Z | -646.85 | kN | |
| Sum of support reactions in Z | -646.85 | kN | Deviation 0.00% |
| Resultant of reactions about X | -100.09 | kNm | At center of gravity of model (X:4.50, Y:4.00, Z:9.49 m) |
| Resultant of reactions about Y | 0.00 | kNm | At center of gravity of model |
| Resultant of reactions about Z | 0.00 | kNm | At center of gravity of model |
| Max. displacement in X | -3.1 | mm | FE Node No. 3108 (X: 9.000, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. displacement in Y | 43.9 | mm | FE Node No. 2345 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 13.000 m) |
| Max. displacement in Z | -15.0 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. vector displacement | 43.9 | mm | FE Node No. 2345 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 13.000 m) |
| Max. rotation about X | -8.8 | mrad | FE Node No. 4412 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 3.500 m) |
| Max. rotation about Y | -3.5 | mrad | Member No. 4, x: 0.000 m |
| Max. rotation about Z | -11.7 | mrad | FE Node No. 113 (X: 9.000, Y: 0.000, Z: 7.000 m) |
| Method of analysis | 2nd Order | | Second order analysis (Nonlinear, Timoshenko) |
| Internal forces referred to deformed system for... | <input checked="" type="checkbox"/> | | N, V _y , V _z , M _y , M _z , M _T |
| Reduction of stiffness | <input checked="" type="checkbox"/> | | Materials, Cross-sections, Members, Surfaces |
| Consider favorable effects of tensile forces | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Divide results by CO factor | <input type="checkbox"/> | | |
| Number of load increments | 1 | | |
| Number of iterations | 5 | | |
| CO6 - LC1 + LC2 | | | |
| Sum of loads in X | 0.00 | kN | |
| Sum of support reactions in X | 0.00 | kN | |
| Sum of loads in Y | 117.00 | kN | |
| Sum of support reactions in Y | 117.00 | kN | Deviation -0.00% |
| Sum of loads in Z | -718.72 | kN | |
| Sum of support reactions in Z | -718.72 | kN | Deviation -0.00% |
| Resultant of reactions about X | -67.3 | kNm | At center of gravity of model (X:4.5, Y:4.0, Z:9.5 m) |
| Resultant of reactions about Y | 0.0 | kNm | At center of gravity of model |
| Resultant of reactions about Z | 0.0 | kNm | At center of gravity of model |
| Max. displacement in X | -2.9 | mm | FE Node No. 3108 (X: 9.000, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. displacement in Y | 26.1 | mm | FE Node No. 2345 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 13.000 m) |
| Max. displacement in Z | -13.4 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. vector displacement | 27.0 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. rotation about X | -5.1 | mrad | FE Node No. 88 (X: 0.000, Y: 0.000, Z: 16.500 m) |
| Max. rotation about Y | -3.2 | mrad | Member No. 4, x: 0.000 m |
| Max. rotation about Z | -7.4 | mrad | FE Node No. 113 (X: 9.000, Y: 0.000, Z: 7.000 m) |
| Method of analysis | 2nd Order | | Second order analysis (Nonlinear, Timoshenko) |
| Internal forces referred to deformed system for... | <input checked="" type="checkbox"/> | | N, V _y , V _z , M _y , M _z , M _T |
| Reduction of stiffness | <input checked="" type="checkbox"/> | | Cross-sections, Members, Surfaces |
| Consider favorable effects of tensile forces | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Divide results by CO factor | <input type="checkbox"/> | | |
| Number of load increments | 1 | | |
| Number of iterations | 5 | | |
| Summary | | | |
| Other Settings | Number of 1D finite elements | : | 72 |
| | Number of 2D finite elements | : | 4608 |
| | Number of 3D finite elements | : | 0 |
| | Number of FE mesh nodes | : | 4535 |
| | Number of equations | : | 27210 |
| | Max. number of iterations | : | 100 |
| | Number of divisions for member results | : | 10 |
| | Division of cable/foundation/tapered members | : | 10 |
| | Number of member divisions for searching maximum values | : | 10 |
| | Subdivisions of FE mesh for graphical results | : | 0 |
| | Percentage of iterations according to Picard method in combination with Newton-Raphson method | : | 5 % |
| | Activate ineffective supports | : | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Options | <input checked="" type="checkbox"/> Activate shear stiffness of members (Ay, Az) | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Activate member divisions for large deformation or post-critical analysis | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Activate entered stiffness modifications | | |
| | <input type="checkbox"/> Ignore rotational degrees of freedom | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Check of critical forces of members | | |
| | <input type="checkbox"/> Nonsymmetric direct solver if demanded by nonlinear model | | |
| | Method for the system of equations | | <input checked="" type="radio"/> Direct <input type="radio"/> Iteration |
| | Plate bending theory | | <input checked="" type="radio"/> Mindlin <input type="radio"/> Kirchhoff |
| | Solver version | | <input type="radio"/> 32-bit <input checked="" type="radio"/> 64-bit |
| Precision and Tolerance | <input type="checkbox"/> Change default setting | | |
| Nonlinear effects - Activate | <input checked="" type="checkbox"/> Support and elastic foundations | | |

GLOBAL DEFORMATIONS, SUPPORT REACTIONS

Against X-direction

CO4: 0.9*LC1 + 1.5*LC2
 Global Deformations u-Y
 Support Reactions[kN/m]
 Values: u-Y [mm]



Max p-z': 3.94, Min p-z': -211.01 kN/m
 Max p-y': 100.42, Min p-y': -2.55 kN/m
 Max u-Y: 43.9, Min u-Y: 0.0 mm
 Factor of deformations: 26.00

1.669 m

STRUCTURAL ANALYSIS

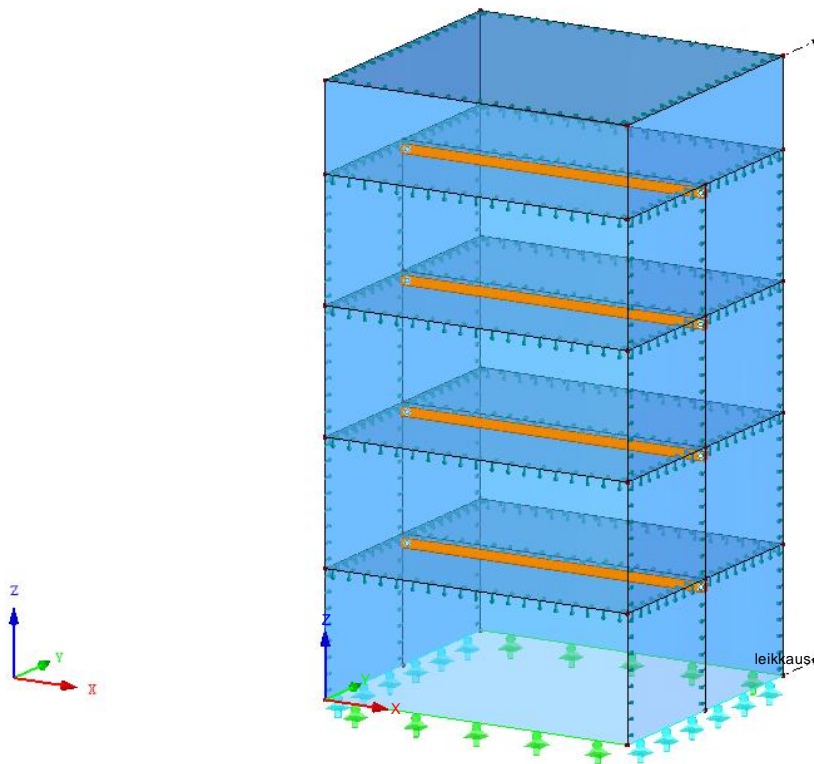
PROJECT

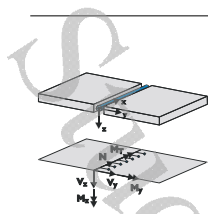
Diplomityö Liite 4: RFEM-laskenta
Pysty- ja vaakaliitokset liitteen 1
loviiliitoksen jäykkyydellä

CLIENT

CREATED BY

Isometric





1.10 LINE HINGES

| Hinge No. | Line No. | Surface No. | Side | Axial/Shear Release / Spring [kN/m ²] | | | Moment Release / Spring [kNm/rad/m] | | |
|-----------|----------|-------------|------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | u _x | u _y | u _z | φ _x | φ _y | φ _z |
| 1 | 8 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 | 31 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 | 12 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4 | 28 | 7 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5 | 20 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6 | 29 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7 | 16 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 8 | 24 | 8 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 9 | 45 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10 | 33 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 11 | 43 | 15 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 12 | 37 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 13 | 35 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 14 | 39 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 15 | 52 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 16 | 66 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 17 | 55 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 18 | 65 | 23 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 19 | 60 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 20 | 57 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 21 | 62 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 23 | 64 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 24 | 76 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 25 | 67 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 26 | 75 | 38 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 27 | 71 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 28 | 69 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 29 | 73 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 30 | 11 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 31 | 42 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 32 | 19 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 33 | 59 | 37 | - | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 34 | 31 | 6 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 35 | 45 | 16 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 36 | 66 | 24 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 37 | 76 | 39 | - | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 38 | 28 | 6 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 39 | 9 | 6 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 40 | 26 | 6 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 41 | 8 | 1 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 42 | 12 | 2 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 43 | 10 | 2 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 44 | 14 | 2 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 45 | 16 | 3 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 46 | 18 | 3 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 47 | 20 | 4 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 48 | 24 | 5 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 49 | 22 | 5 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 50 | 43 | 14 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 51 | 30 | 14 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 52 | 41 | 14 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 53 | 29 | 9 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 54 | 33 | 10 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 55 | 32 | 10 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 56 | 34 | 10 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 57 | 35 | 11 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 58 | 36 | 11 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 59 | 37 | 12 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 60 | 39 | 13 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 61 | 38 | 13 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 62 | 65 | 22 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 63 | 53 | 22 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 64 | 63 | 22 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 65 | 52 | 17 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 66 | 55 | 18 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 67 | 54 | 18 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 68 | 56 | 18 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 69 | 57 | 19 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 70 | 58 | 19 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 71 | 60 | 20 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 72 | 62 | 21 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 73 | 61 | 21 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 81 | 75 | 30 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 82 | 80 | 30 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 83 | 89 | 30 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 84 | 64 | 25 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 85 | 67 | 26 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 86 | 81 | 26 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 87 | 83 | 26 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 88 | 69 | 27 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 89 | 85 | 27 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 90 | 71 | 28 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 91 | 73 | 29 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | 935.000 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 92 | 87 | 29 | - | 402500.000 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

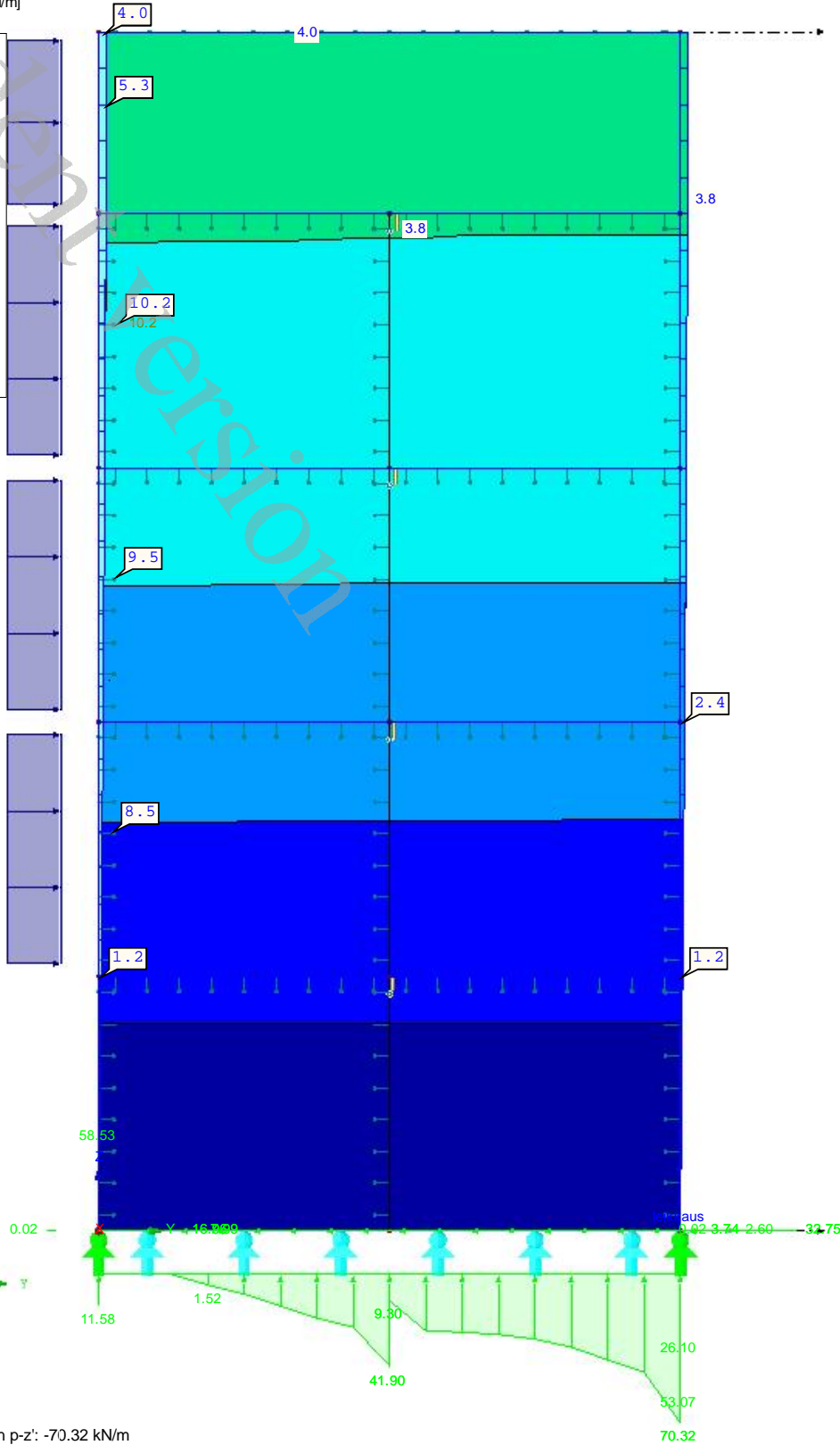
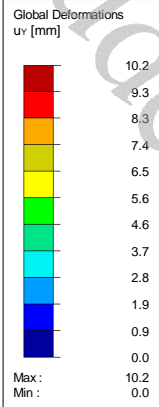
4.0 RESULTS - SUMMARY

| Description | Value | Unit | Comment |
|--|---|------|---|
| CO4 - 0.9*LC1 + 1.5*LC2 | | | |
| Sum of loads in X | 0.00 | kN | |
| Sum of support reactions in X | 0.00 | kN | |
| Sum of loads in Y | 175.50 | kN | |
| Sum of support reactions in Y | 175.50 | kN | Deviation 0.00% |
| Sum of loads in Z | -646.85 | kN | |
| Sum of support reactions in Z | -646.85 | kN | Deviation 0.00% |
| Resultant of reactions about X | -92.84 | kNm | At center of gravity of model (X:4.50, Y:4.00, Z:9.49 m) |
| Resultant of reactions about Y | 0.00 | kNm | At center of gravity of model |
| Resultant of reactions about Z | 0.00 | kNm | At center of gravity of model |
| Max. displacement in X | -3.1 | mm | FE Node No. 3108 (X: 9.000, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. displacement in Y | 10.2 | mm | FE Node No. 2326 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 12.500 m) |
| Max. displacement in Z | -15.1 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. vector displacement | 15.6 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. rotation about X | -5.7 | mrad | FE Node No. 88 (X: 0.000, Y: 0.000, Z: 16.500 m) |
| Max. rotation about Y | -3.5 | mrad | Member No. 4, x: 0.000 m |
| Max. rotation about Z | -4.8 | mrad | FE Node No. 1606 (X: 9.000, Y: 0.000, Z: 9.000 m) |
| Method of analysis | 2nd Order | | Second order analysis (Nonlinear, Timoshenko) |
| Internal forces referred to deformed system for... | <input checked="" type="checkbox"/> | | N, V _y , V _z , M _y , M _z , M _T |
| Reduction of stiffness | <input type="checkbox"/> | | Materials, Cross-sections, Members, Surfaces |
| Consider favorable effects of tensile forces | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Divide results by CO factor | <input type="checkbox"/> | | |
| Number of load increments | 1 | | |
| Number of iterations | 4 | | |
| CO6 - LC1 + LC2 | | | |
| Sum of loads in X | 0.00 | kN | |
| Sum of support reactions in X | 0.00 | kN | |
| Sum of loads in Y | 117.00 | kN | |
| Sum of support reactions in Y | 117.00 | kN | Deviation -0.00% |
| Sum of loads in Z | -718.72 | kN | |
| Sum of support reactions in Z | -718.72 | kN | Deviation 0.00% |
| Resultant of reactions about X | -61.8 | kNm | At center of gravity of model (X:4.5, Y:4.0, Z:9.5 m) |
| Resultant of reactions about Y | 0.0 | kNm | At center of gravity of model |
| Resultant of reactions about Z | 0.0 | kNm | At center of gravity of model |
| Max. displacement in X | -2.9 | mm | FE Node No. 3108 (X: 9.000, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. displacement in Y | 5.7 | mm | FE Node No. 2326 (X: 3.500, Y: 0.000, Z: 12.500 m) |
| Max. displacement in Z | -13.4 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. vector displacement | 13.6 | mm | FE Node No. 3243 (X: 4.500, Y: 4.000, Z: 16.500 m) |
| Max. rotation about X | -5.1 | mrad | FE Node No. 88 (X: 0.000, Y: 0.000, Z: 16.500 m) |
| Max. rotation about Y | -3.2 | mrad | Member No. 4, x: 9.000 m |
| Max. rotation about Z | -2.7 | mrad | FE Node No. 875 (X: 9.000, Y: 0.000, Z: 5.500 m) |
| Method of analysis | 2nd Order | | Second order analysis (Nonlinear, Timoshenko) |
| Internal forces referred to deformed system for... | <input checked="" type="checkbox"/> | | N, V _y , V _z , M _y , M _z , M _T |
| Reduction of stiffness | <input type="checkbox"/> | | Cross-sections, Members, Surfaces |
| Consider favorable effects of tensile forces | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Divide results by CO factor | <input type="checkbox"/> | | |
| Number of load increments | 1 | | |
| Number of iterations | 3 | | |
| Summary | | | |
| Other Settings | Number of 1D finite elements | : | 72 |
| | Number of 2D finite elements | : | 4608 |
| | Number of 3D finite elements | : | 0 |
| | Number of FE mesh nodes | : | 4535 |
| | Number of equations | : | 27210 |
| | Max. number of iterations | : | 100 |
| | Number of divisions for member results | : | 10 |
| | Division of cable/foundation/tapered members | : | 10 |
| | Number of member divisions for searching maximum values | : | 10 |
| | Subdivisions of FE mesh for graphical results | : | 0 |
| | Percentage of iterations according to Picard method in combination with Newton-Raphson method | : | 5 % |
| | Activate ineffective supports | : | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Options | <input checked="" type="checkbox"/> Activate shear stiffness of members (Ay, Az) | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Activate member divisions for large deformation or post-critical analysis | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Activate entered stiffness modifications | | |
| | <input type="checkbox"/> Ignore rotational degrees of freedom | | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> Check of critical forces of members | | |
| | <input type="checkbox"/> Nonsymmetric direct solver if demanded by nonlinear model | | |
| | Method for the system of equations | | <input checked="" type="radio"/> Direct <input type="radio"/> Iteration |
| | Plate bending theory | | <input checked="" type="radio"/> Mindlin <input type="radio"/> Kirchhoff |
| | Solver version | | <input type="radio"/> 32-bit <input checked="" type="radio"/> 64-bit |
| Precision and Tolerance | <input type="checkbox"/> Change default setting | | |
| Nonlinear effects - Activate | <input checked="" type="checkbox"/> Support and elastic foundations | | |

GLOBAL DEFORMATIONS, SUPPORT REACTIONS

Against X-direction

CO4: 0.9*LC1 + 1.5*LC2
 Global Deformations u-Y
 Support Reactions[kN/m]
 Values: u-Y [mm]



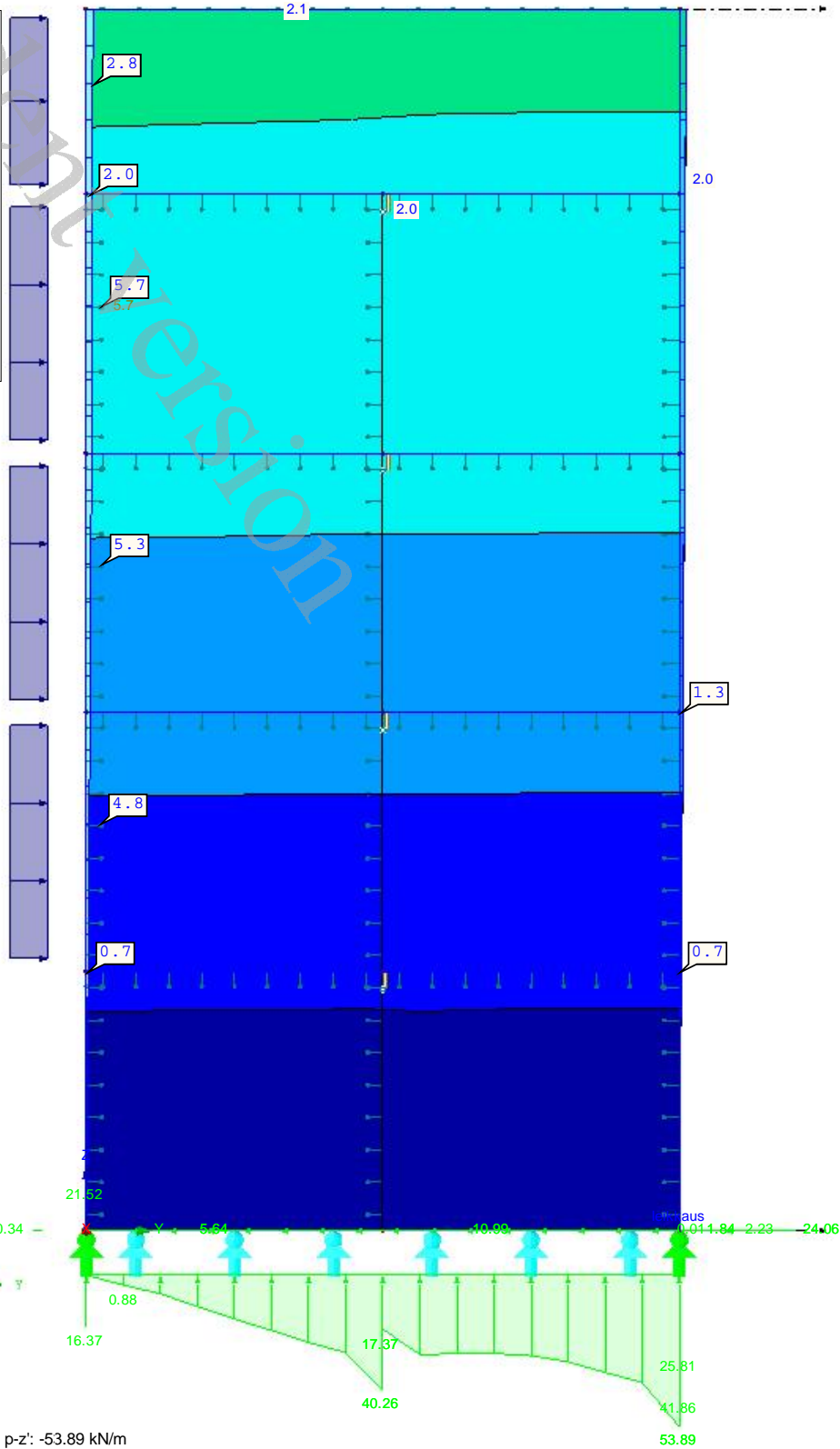
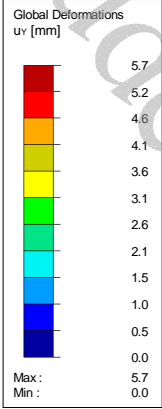
Max p-z': 58.53, Min p-z': -70.32 kN/m
 Max p-y': 32.75, Min p-y': -0.02 kN/m
 Max u-Y: 10.2, Min u-Y: 0.0 mm
 Factor of deformations: 26.00

1.669 m

GLOBAL DEFORMATIONS, SUPPORT REACTIONS, KÄYTTÖRAJATILA

CO6: LC1 + LC2
 Global Deformations u-Y
 Support Reactions[kN/m]
 Values: u-Y [mm]

Against X-direction



Max p-z': 21.52, Min p-z': -53.89 kN/m
 Max p-y': 24.06, Min p-y': -0.34 kN/m
 Max u-Y: 5.7, Min u-Y: 0.0 mm
 Factor of deformations: 41.00

1.669 m